

## Glastemperaturmessung mit Thermovisionskamera unter Ausnutzung spektraler Emissionseigenschaften des Glases

Otto-R. Hofmann und Christian Welz

Fachhochschule Jena, Fachbereich GW, Jena

Dieter Gödeke

Otto-Schott-Institut für Glaschemie, Friedrich-Schiller-Universität, Jena

### 1. Einleitung und Aufgabenstellung

Bei der Glasherstellung besteht an vielen Stellen der technologischen Abfolge bis hin zur Kaltendvergütung die Aufgabe, Temperaturen berührungsfrei zu messen. Ihre Kenntnis, Kontrolle und Beeinflussung ist mitentscheidend für Qualität und Produktionsmenge. Auf dem Gebiet der Meßtechnik deutet sich die Konkurrenz zwischen der Pyrometrie und der Thermografie an. Bei anhaltend günstiger Preisentwicklung hat die IR-Thermografie den Vorteil eines bildgebenden Verfahrens und vermittelt einen zweidimensionalen, gegebenenfalls auch dreidimensionalen Eindruck vom Objekt und der Meßumgebung.

Die Temperaturen von heißem Glas können durch die Messung der vom Glas ausgehenden Strahlung in ausgewählten infraroten Spektralbereichen bestimmt werden. Bei Kenntnis der stoffspezifischen Emissionseigenschaften ist es möglich, die Temperatur in verschiedenen Schichttiefen zu bestimmen. Umgekehrt kann man bei bekanntem Temperaturverlauf auf die Emissions- bzw. Absorptionseigenschaften des Glases schließen und somit indirekt auf die Zusammensetzung folgern.

Im Rahmen dieser Arbeit sollen die Möglichkeiten der bildgebenden kontaktlosen Temperaturmessung von Glas mit Thermografie beschrieben werden. Nachfolgend soll an zwei Beispielen die Ermittlung des oberflächennahen Temperaturverlaufs in heißem Glas dargestellt werden. Derartige Informationen sind wichtig, um z.B. mittlere Glastemperaturen (innere Energie des Glaspostens, Rückerwärmung) zu messen oder technologische Parameter einhalten zu können.

### 2. Physikalische Grundlagen

Die von einem Körper ausgesandte Strahlung ist eine Funktion der Temperatur und seines Emissionsvermögens. Die spektrale Intensitätsverteilung ist durch das Plancksche Gesetz beschrieben.

$$L_{\lambda s}(T, \lambda) = \frac{c_1}{\pi \lambda^5 (e^{c_2/(\lambda T)} - 1)}, \quad (1)$$

mit  $L_{\lambda s}$  = spektrale Strahlendichte eines schwarzen Strahlers,  $c_1$ ,  $c_2$  = 1. und 2. Plancksche Strahlungskonstante,  $T$  = Temperatur und  $\lambda$  = Wellenlänge.

Gemäß dem Kirchhoffschen Gesetz emittiert ein heißer Körper entsprechend seinem Absorptionsvermögen. Die Gesamtstrahlung eines Körpers ergibt sich aus der Summe des Emissions-, Transmissions- und Reflexionsanteils.

$$\alpha(\lambda, T) + \varrho(\lambda, T) + \tau(\lambda, T) = 1 \quad (2)$$

mit  $\alpha(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T)$  und  $\alpha$  = Absorptionsgrad,  $\varrho$  = Reflexionsgrad,  $\tau$  = Transmissionsgrad und  $\varepsilon$  = Emissionsgrad.

Die Strahlungsintensität nimmt in einem semitransparenten Medium exponentiell mit dem Weg  $d$  gemäß

$$I_d = I_0 e^{-ad} \quad (3)$$

ab [1 und 2], und unter der inneren Transmission  $t$  soll das Verhältnis der transmittierten Strahlung  $I_d$  zur inneren emittierten Strahlung  $I_0$  verstanden werden [3].

$$t = e^{-ad}. \quad (4)$$

Die effektive Sichttiefe  $d_{\text{eff}}$  ist die Tiefe, bei der unter der Voraussetzung eines kleinen linearen Temperaturgradienten die aktuell gemessene Temperatur auftritt. Sie ist gleich dem reziproken Wert des Absorptionskoeffizienten  $a$  [2 und 4].

Eingegangen am 26. Juni 2000.

Als Poster präsentiert auf der 74. Glastechnischen Tagung in Ulm vom 29. bis 31. Mai 2000.

$$d_{\text{eff}} \equiv \frac{1}{a} \quad (5)$$

Die an einer Grenzschicht auftretende Reflexion macht eine Korrektur mit Hilfe der Reflexionseigenschaften notwendig.

$$L_{\lambda_s, \text{korrigiert}}(T, \lambda) = L_{\lambda_s, \text{gemessen}}(T, \lambda) \cdot (1 - r)^{-1}, \quad (6)$$

wobei  $r$  für den Reflexionsgrad des Glases steht.

In Glasplatten beeinflusst Mehrfachreflexion (Index  $m$ ) die Strahlung, was durch Reihenentwicklung der Emissions-, Transmissions- und Reflexionsgrade berücksichtigt werden kann [4 und 5].

$$\varrho_m = r \left[ 1 + \frac{t^2(1-r)^2}{1-r^2 t^2} \right], \quad (7)$$

$$\tau_m = \frac{t(1-r)^2}{1-r^2 t^2}, \quad (8)$$

$$\varepsilon_m = \frac{(1-r)(1-t)}{1-rt}. \quad (9)$$

### 3. Notwendige Vorbetrachtungen

Zur Verfügung stand die Infrarotkamera VarioTHERM, entwickelt von der Jenoptik AG in Jena, welche in einem Spektralbereich von 3 bis 5  $\mu\text{m}$  arbeitet. Des weiteren wurden IR-Filter mit unterschiedlichen Transmissionsbereichen im Arbeitsbereich der Kamera gewählt:

- Bandpass 3,3  $\mu\text{m}/40 \text{ nm}$ ,
- Bandpass 3,4  $\mu\text{m}/200 \text{ nm}$ ,
- 3,7  $\mu\text{m}$  Cut Off,
- Bandpass 4,0  $\mu\text{m}/75 \text{ nm}$ ,
- 4,7 bis 5,3  $\mu\text{m}$ .

Um zu garantieren, daß das durch die Filter abgeschwächte Meßsignal  $M_{\lambda_s}$  für die Kamera ausreichend ist, wurde eine energetische Abschätzung durchgeführt. Dies geschah durch Vergleich der vom Filter transmittierten Energie und der von der Kamera benötigten Energie [6]. Die Filterbandbreite und die Objekttemperatur sind dabei entscheidende Kriterien.

$$M_{\lambda_s, \text{Istsignal}}(\lambda_1 \text{ Filter} \approx \lambda_2 \text{ Filter}, T_{\text{Objekt}}) \geq M_{\lambda_s, \text{Mindestsignal}}(\lambda_1 \text{ Kamera} \approx 3 \mu\text{m} = \lambda_2 \text{ Kamera} \approx 5 \mu\text{m}, T_{\text{min. Meßbereich}} \approx 293 \text{ K}).$$

Auch die Charakteristik des Detektors muß beachtet werden, da dieser in bestimmten Wellenlängenbereichen eine veränderte Empfindlichkeit aufweisen kann. Da die Kamera bei Verwendung der Filter im Strahlengang niedrigere Temperaturen als real anzeigt, war zusätzlich die Ermittlung der jeweiligen Kalibrierkurven notwendig. Dies geschah durch die Messung und Auswertung an mehreren Stützstellen im Temperaturbereich unter Zuhilfenahme eines Schwarzen Strahlers und die an-

schließende Konstruktion der Kalibrierkurve. Weiterhin ist die Kenntnis des spektralen Absorptionskoeffizienten des Glases notwendig, der durch Labormessungen bestimmt wurde.

### 4. Labormessungen zur Bestimmung des spektralen Absorptionskoeffizienten des verwendeten Glases

Da der spektrale Absorptionskoeffizient von der Glaszusammensetzung und der Temperatur abhängt und für Glasformgebungstemperaturen häufig nicht bekannt ist, waren als Vorbereitung für die Temperaturmessung Transmissionsmessungen nötig. Es wurden dabei zwei unterschiedliche Glassorten untersucht: ein optisches Glas (Glas A) und ein mit  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  dotiertes Kalknatron-Silicatglas (Glas B). Für das Glas A wurden polierte Glasscheiben der Dicke 0,77, 2,8 und 19,7 mm hergestellt und auf 700 und 750 °C (Verarbeitungstemperatur) in einem Muffelofen erwärmt. Beim Glas B betragen die Dicken der Glasscheiben: 1,03, 3,02 und 16,77 mm. Die Aufheizraten waren ca. 20 K/min. Während als Haltezeit bei der Solltemperatur mindestens 10 min gewählt wurden, betrug sie zwischen den einzelnen Aufnahmen (Filterwechsel) ca. 5 min. Mit jedem der gewählten Filter wurde ein IR-Bild aufgenommen. Wichtig sind dabei kalte (IR-strahlungsarme) Hintergründe, da deren Strahlung von den Proben transmittiert und reflektiert wird. So wird fast ausschließlich der Emissionsanteil der Glasplattenproben gemessen. Eine typische Thermografieaufnahme von Glasplatten (Glas A) für Transmissionsmessungen bei 750 °C wird in Bild 1 gezeigt.

Nach dem Korrigieren der gemessenen Temperaturen mit den Filterkalibrierkurven setzt man die Gleichungen (7), (8) und (9) in Gleichung (10) ein

$$M_{\lambda_s, \text{Probe}}(\lambda_1 \approx \lambda_2; T_{\text{Glas, real}}) = M_{\lambda_s}(\lambda_1 \approx \lambda_2; T_{\text{Glas, gemessen}}) \cdot \varepsilon_m + M_{\lambda_s}(\lambda_1 \approx \lambda_2; T_{\text{Hintergrund}}) \cdot \tau_m + M_{\lambda_s}(\lambda_1 \approx \lambda_2; T_{\text{Reflexion}}) \cdot \varrho_m \quad (10)$$

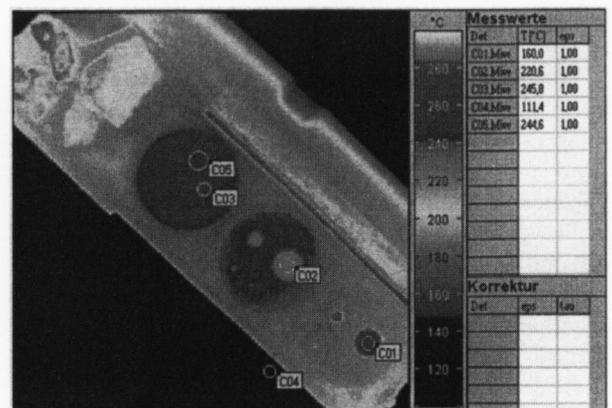


Bild 1. Thermografieaufnahme von Glasplatten (Glas A) für Transmissionsmessungen bei 750 °C.

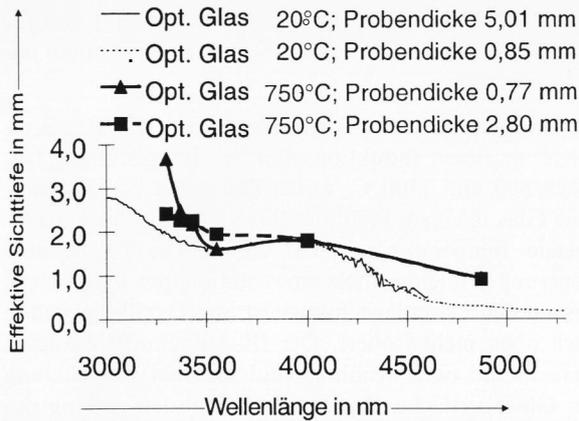


Bild 2. Effektive Sichttiefen bei 750°C der 0,77 und 2,80 mm dicken Proben (Glas A) im Vergleich zu gegebenen Werten für 20°C.

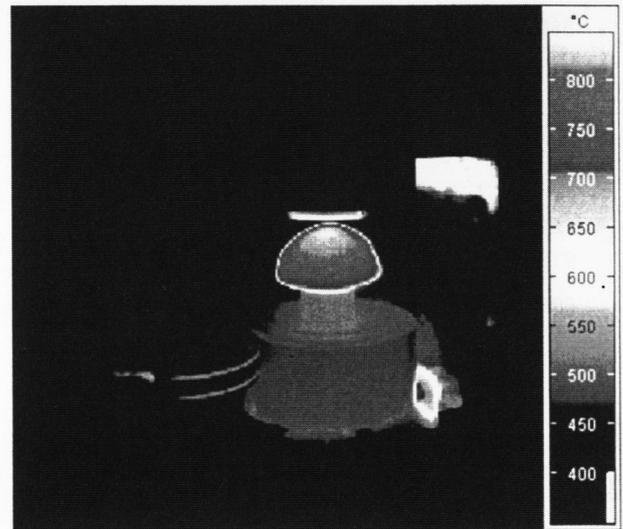


Bild 4. Thermografiebild mit heißem Glasgegenstand (Glas A).

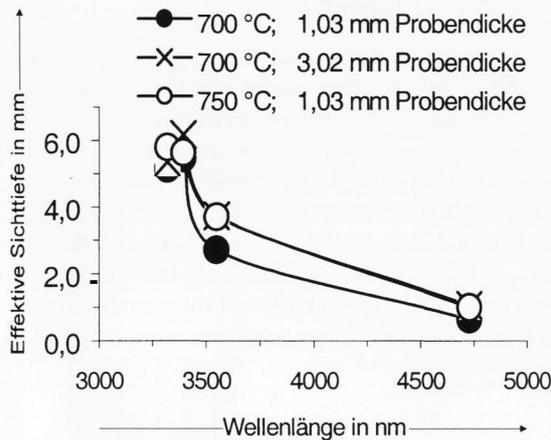


Bild 3. Effektive Sichttiefe als Funktion der Wellenlänge für das Glas B.

und stellt auf die Normalform der quadratischen Gleichung  $0 = t^2 + pt + q$  um. Mit der allgemeinen Lösungsgleichung ergibt sich die innere Transmission  $t$ . Mit den Gleichungen (4) und (5) erhält man die effektiven Sichttiefen

$$d_{\text{eff}} = - \frac{d}{\ln t}, \quad (11)$$

welche in Bild 2 für Glas A über den Schwerpunktwellenlängen der einzelnen Filter abgetragen sind.

Im Bild 3 sind die ermittelten effektiven Sichttiefen für Glas B als Funktion der Wellenlänge dargestellt. Für diese Auswertung wurden die effektiven Sichttiefen nach 1 s und nach 5 s Ofenöffnung herangezogen, die dann auf die Null-Sekunden Ofenöffnung extrapoliert wurden. Die Ergebnisse zeigen, daß die effektive Sichttiefe nach 5 s im Vergleich zu der nach 1 s ansteigt. Dies entspricht nicht den Erwartungen [7], da hier der Effekt schneller Abkühlung kleiner Probendicken überwiegt.

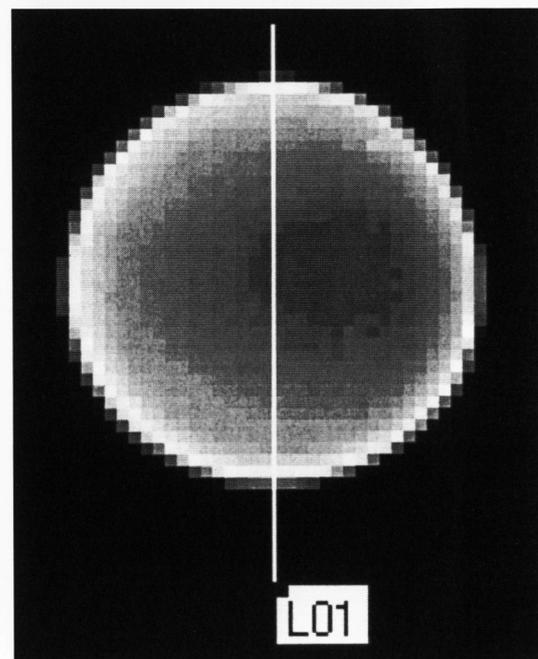


Bild 5. Ausschnitt aus dem Thermografiebild mit Glasgegenstand und Pixellinie zum Datenauslesen.

Die Auswertung beruht auf der Annahme, daß die volumenbezogene Strahlungsleistung der unterschiedlich dicken Proben in dem betrachteten Wellenlängenbereich gleich ist (Gleichung (10)). Liegt jedoch eine unterschiedliche Temperaturverteilung in den Glasproben vor, (die dickere Probe heizt sich im Vergleich zur dünneren Probe langsamer auf und zeigt damit größere Temperaturunterschiede), so ist Gleichung (10) nicht mehr erfüllt und kann zu fehlerhaften Ergebnissen führen.

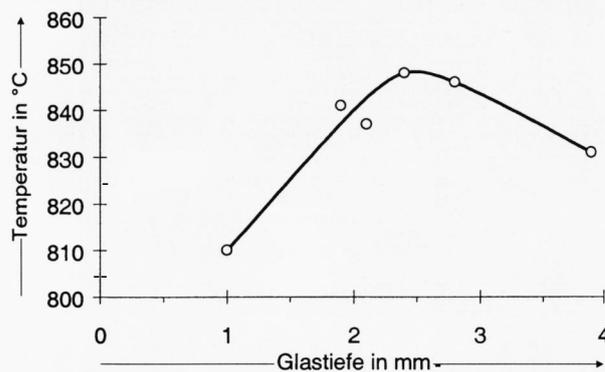


Bild 6. Temperaturgradient eines Glasgegenstandes (Glas A) nach den Labormessergebnissen der Probe 0,77 mm bei 750 °C.

### 5. Messungen an einer Produktionslinie (Glas A) und in einem Laborinduktionsofen (Glas B)

In einer automatisierten Linie zur Formgebung von Glas wurden IR-Bilder von ca. 800 °C heißen Glasgegenständen (Glas A) (Bilder 4 und 5) unter Verwendung der beschriebenen Filter aufgenommen.

Da in den Rechnungen der Reflexionsgrad für senkrechten Lichteinfall für Glas verwendet wird, wurden nur die Pixeltemperaturen aus dem orthogonalen Zentrum des Glasgegenstandes per Software ausgelesen und verwendet. Zum Erhalt der Meßergebnisse wurden die Meßwerte mit den Filterkalibrierkurven korrigiert und der Reflexionsverlust mit Gleichung (6) an der Phasengrenze berücksichtigt.

Bild 6 zeigt den ermittelten Temperaturverlauf (Glas A) als Funktion der Sichttiefe. Der vorher bekannte Temperaturverlauf im Innern des Glaskörpers wurde annähernd bestätigt. Eine Unsicherheit ergibt sich dadurch, daß das Ergebnis laut Voraussetzung nur für li-

neare und kleine Temperaturgradienten gilt [4] und für größere Glastiefen hinter dem Temperaturmaximum ungenau wird [8].

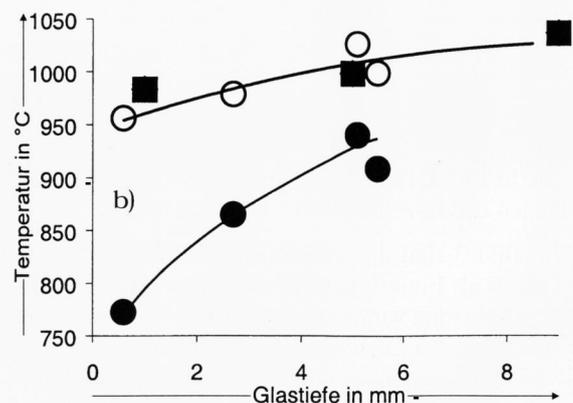
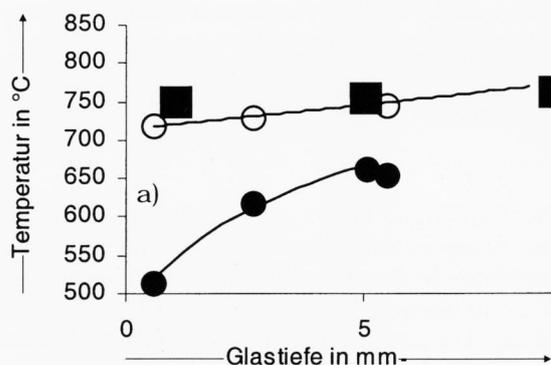
Die Durchführung der Messung für das Glas B erfolgte an einem Induktionsofen bei Temperaturen zwischen 800 und 1100 °C, wobei das schon vorgeschmolzene Glas in einem Platintiegel (63 cm<sup>3</sup>) auf die entsprechende Temperatur gebracht wurde. Die Temperatursteuerung erfolgte mittels eines stationären Pyrometers, das auf den Platintiegel fokussiert war. Der Tiegel wurde nach oben nicht isoliert. Die IR-Aufnahmen erfolgten abwechselnd ohne Kühlung und mit Inertgas-Kühlung der Glasoberfläche. Zur Kontrolle wurden entlang des Platintiegels Thermoelemente (Pt-PtRh, Typ S) angepunktet, deren Temperaturwerte mit in die Bilder 7a und b eingezeichnet sind.

### 6. Zusammenfassung

Im vorliegenden Aufsatz wird gezeigt, auf welche Art und Weise sich die Temperatur von heißem Glas in unterschiedlichen Schichttiefen berührungslos mit einer IR-Kamera messen läßt und wie die Auswertung erfolgt. Dabei sind die komplexen physikalischen Zusammenhänge, die bei der Ausbreitung der IR-Strahlung im Glas und beim Übergang in die Atmosphäre von Bedeutung sind, zu beachten. Zusätzliche Labormessungen waren notwendig, um die spektralen Emissionseigenschaften des Glases bei Formgebungstemperaturen zu ermitteln.

\*

Für die freundliche Unterstützung bei der Durchführung der Arbeiten bedanken wir uns bei Herrn H.-J. Becker, Schott Glaswerke, Mainz, Herrn Lembke, Jenoptik - Laser, Optik, Systeme GmbH, Jena, und Herrn Dr. H.-J. Voss, Friedrichsdorf, Taunus.



Bilder 7a und b. Temperaturgradienten von Glas B im Induktionsofen bei a) 800 °C, b) 1050 °C; ○ = IR-Temperaturen ohne Inertgaskühlung, ● = IR-Temperaturen mit Inertgaskühlung, ■ = Thermoelementtemperaturen ohne Kühlung.

## 7. Literatur

- [1] Maciejewicz, N.; Kluge, G.: Temperaturmessungen in der Glasindustrie mit stationären Pyrometern des VEB Wärmetechnisches Institut der Glasindustrie Jena. *Silikattechnik* **37** (1986) Nr. 1, S. 32–34.
- [2] Neuroth, N.; Haspel, R.: Anordnung zur berührungslosen Messung der Temperatur von teiltransparenten Medien in verschiedener Schichttiefe. DBP. = DE Nr. 29 17 653 C3. Pat. ab 2. 5. 1979, ausgeg. 4. 6. 1981.
- [3] Struß, O.: Pyrometrische Temperaturmessung an Gläsern und Keramik. VDI-Seminar – Technik der Messung hoher Temperaturen (1995) S. 1–15.
- [4] DeWitt, D. P.; Nutter, Gene D.: *Theory and practice of radiation thermometry*. New York: Wiley, 1988.
- [5] McMahon, H. O.: Thermal radiation characteristics of some glasses. *J. Am. Ceram. Soc.* **34** (1951) Nr. 3, S. 91–96.
- [6] Siegel, R.; Howell, J. R.; Lohrengel, J.: *Wärmeübertragung durch Strahlung*. Berlin et al.: Springer, 1988.
- [7] Endrýs, J.; Geotti-Bianchini, F.; De Riu, L.: Study of the high-temperature spectral behavior of container glass. *Glastech. Ber. Glass Sci. Technol.* **70** (1997) Nr. 5, S. 126–136.
- [8] Brinckmann, M.: Fundamentals of pyrometric temperature measurements in hot glass. In: *Proc. 6th Int. Conf. Advances in Fusion and Processing of Glass*, Ulm, 2000. *Glastech. Ber. Glass Sci. Technol.* **73 C2** (2000). Im Druck. ■ 1200T021

Adressen der Autoren:

O.-R. Hofmann, C. Welz  
Fachhochschule Jena  
Fachbereich GW  
Carl-Zeiss-Promenade  
D-07745 Jena

D. Gödeke  
Otto-Schott-Institut für Glaschemie  
Friedrich-Schiller-Universität Jena  
Fraunhoferstraße 6  
D-07743 Jena