

HVG-Mitteilung Nr. 2030

Ergebnisse von spektroskopischen Untersuchungen im Rahmen des HVG-AiF-Forschungsvorhaben Nr. 12370 N „Untersuchungen zur schnelleren Erfassung von Eigenschaften industrieller Glasschmelzen“

B. Fleischmann, P. Baumann, HVG, Offenbach

Vortrag in der gemeinsamen Sitzung der Fachausschüsse II und VI
am 26. März 2003 in Würzburg

Einleitung

Das Aufschmelzen der Glasrohstoffe erfolgt bei den allermeisten Glasprodukten in kontinuierlich arbeitenden Glasschmelzwannen, wobei die Teilprozesse Einschmelzen, Läutern und Homogenisieren zeitgleich im selben Reaktionsraum ablaufen. Die Regeleigenschaften des Glasschmelzprozesses sind zur Zeit immer noch durch den extrem langen Zeitraum von 8 bis 24 Stunden, der zwischen der Gemengebereitung und der Erfassung der Produkteigenschaften kurz vor bzw. kurz nach der Formgebung vergeht, maßgeblich geprägt. Die Regelung des Glasschmelzprozesses wird zusätzlich dadurch erschwert, dass durch das Einschmelzen von Altglas und Filterstaub das Gemenge Eigenschaftsschwankungen unterliegt, die nur schwer zu quantifizieren sind, da entsprechende Sensoren und Messtechniken fehlen bzw. zu zeitaufwendig und teuer sind.

Die Aufgabe dieses Forschungsvorhabens war es, zur Verbesserung der Regelbarkeit des Schmelzprozesses Sonden bzw. Messverfahren zu testen bzw. an die Messaufgabe und -bedingungen anzupassen, so dass eine Charakterisierung der Glasschmelze im Hinblick auf Redoxzustand und Farbe zu einem möglichst frühen Zeitpunkt erfolgen kann. Da ein Zugang der Schmelze in der Glasschmelzwanne von oben durch den darüber liegenden Verbrennungsraum sehr schwierig ist, ist vorgesehen, am Wannenboden eine Drainage anzubringen, die eine Glasschmelze zur Verfügung stellt, die bereits soweit homogenisiert ist, dass sie die späteren Produkteigenschaften wiedergibt.

Die grundsätzlichen Möglichkeiten der optischen Spektroskopie von Glasschmelzen auch bei höheren Temperaturen wurden in AiF-Forschungsvorhaben (AiF-Nr. 9386, 12064 B) aufgezeigt. Im Forschungsvorhaben „Regelung“ soll das berührungslose Messverfahren genutzt werden, um möglichst frühzeitig Aussagen zum Redox-Zustand der Glasschmelze und zu den Gleichgewichtszuständen farbgebender Ionen zu erhalten.

Grundlagen der optischen Spektroskopie von Glasschmelzen

Chrom kommt in den üblichen Natron-Kalk-Silicatgläsern in den Oxidationsstufen +3 und +6, Eisen in den Oxidationsstufen +2 und +3 vor. Zwischen diesen Oxidationsstufen herrschen Gleichgewichte, die unter anderem von der Temperatur abhängen. Mit steigender Temperatur und mit zunehmender Haltezeit verschieben sich diese Redoxgleichgewichte auf die Seite der niedrigeren Oxidationszahlen. Die polyvalenten Ionen stehen dabei auch mit dem physikalisch gelösten Sauerstoff im Gleichgewicht.

Die Farben der typischen Behältergläser werden durch das Redoxgleichgewicht des Eisens (Weißglas, Grünglas und Braunglas) und das Redoxgleichgewicht des Chroms (Grünglas) eingestellt. Bei der optischen Spektroskopie bei Raumtemperatur können die einzelnen Spezies anhand ihrer typischen Absorptionsbanden erkannt werden.

Mit Hilfe der optischen Spektroskopie kann man bei Raumtemperatur unter den entsprechenden Voraussetzungen, d.h. Kenntnis des Extinktionskoeffizienten der einzelnen Ionspezies als Funktion der Wellenlänge, die Konzentration der einzelnen farbgebenden Ionen bestimmen [1,2] und den Farbort des Glases messen [3]. Bild 1 zeigt typische Transmissionskurven von Weiß-, Grün- und Braungläsern.

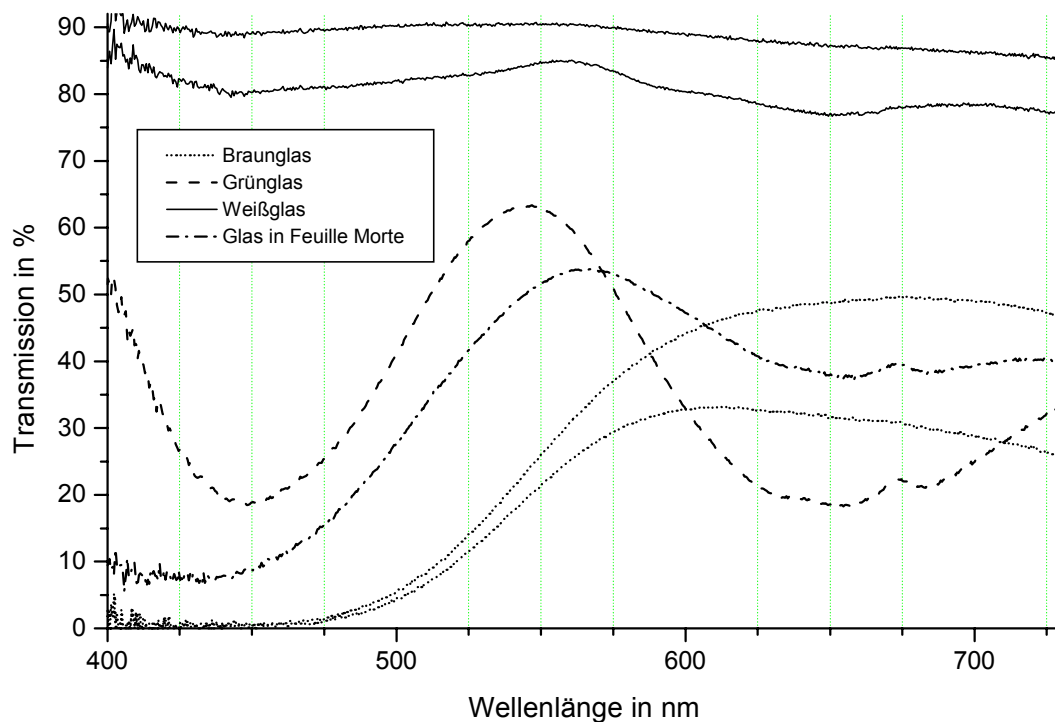


Bild 1: Transmissionsspektren von Farbgläsern bei Raumtemperatur [3].

Bei der Herstellung von Glas sieht man, dass die Glasschmelzen der verschiedenen farbigen Gläser bei hohen Temperaturen ($> 800 - 900^\circ \text{C}$) für das Auge nicht zu unterscheiden sind. Dies liegt zum einen daran, dass die Redoxgleichgewichte sich mit der Temperatur verschieben, zum anderen auch daran, dass sich die „Farbe“ erst bei tieferen Temperaturen einstellt. Im Rahmen des HVG-AiF-Forschungsvorhabens Nr. 12064 B [4] wurden chromhaltige Glasschmelzen [5] sowie eisenhaltige Glasschmelzen [5,7] bei höheren Temperaturen mit Hilfe der optischen Spektroskopie untersucht sowie die Absorptions- und Emissionseigenschaften dieser Gläser bei unterschiedlichen Temperaturen ermittelt. Dabei wurde spektroskopisch nachgewiesen, dass sich beispielsweise das Braunchromophor bei Temperaturen über $550 - 700^\circ \text{C}$ zersetzt bzw. sich erst unterhalb dieses Temperaturintervalls bildet [7].

Geräte und Messaufbau

Die Transmissions- bzw. Emissionsmessungen am heißen Glasschmelzstrang sind berührungslos geplant. Dazu wird über optische Lichtleiter das Licht der Beleuchtungsquelle so an den Glasdrainagestrang herangebracht, dass über einen zweiten optischen Lichtleiter das Messsignal zum Monochromator und Empfänger geleitet werden kann (Bild 2). Bild 3 zeigt den geplanten Messaufbau für die beiden Messmethoden am frei abfließenden Glasdrainagestrang.

Um eine quantitative Auswertung von Transmissions- bzw. Emissionsspektren zu ermöglichen, ist die Kenntnis der Schichtdicke bzw. des Durchmessers des Drainagestrangs nötig. Außerdem benötigt man für die Bestimmung der Konzentration der gesuchten Ionenspezies den spezifischen Extinktionskoeffizienten bei dem gegebenen Grundglas. Für die handelsüblichen Behältergläser wurden die Extinktionskoeffizienten für Eisen und Chrom im vorher genannten Forschungsvorhaben (AiF-Nr. 12064 B) ermittelt. Nachdem in der ersten Sitzung der projektbegleitenden Arbeitsgruppe festgestellt wurde, dass ein Einbau der Drainage im Wannenboden nicht möglich sein wird, beschloss die Arbeitsgruppe, dass die Forschungs-

stelle sich bemühen sollte, ein Lasermikrometer zu kaufen und dabei eine Umwidmung der Fördermittel zu beantragen. Damit sollte eine quantitative Auswertung der Transmissions- und Emissionsspektren auch dann ermöglicht werden, wenn diese Messungen am frei auslaufenden Glasdrainagestrang vorgenommen werden. Ein entsprechender Änderungsantrag wurde der AiF nach der Sitzung des projektbegleitenden Arbeitsausschusses zugeleitet, von der AiF bewilligt und das Messgerät daraufhin beschafft.

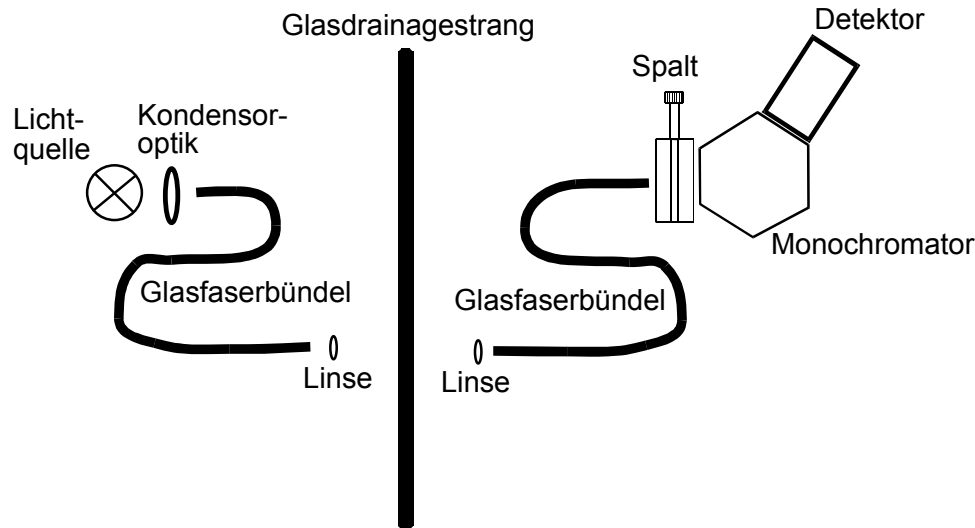


Bild 2: Prinzipielle Messanordnung des verwendeten, modular aufgebauten Spektrometers von LOT Oriol.

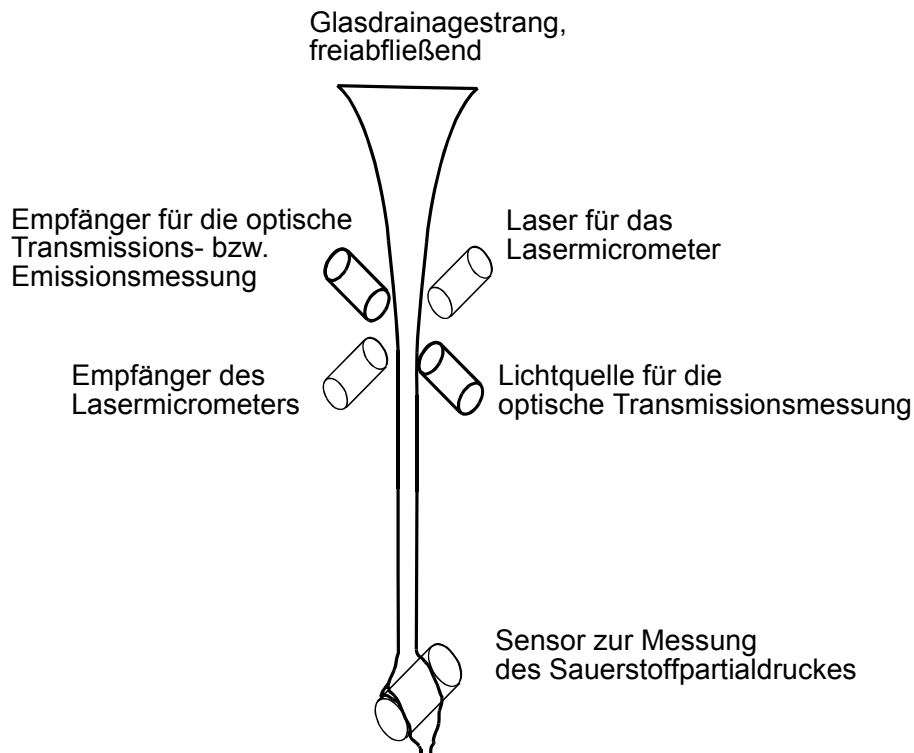


Bild 3: Möglicher Messaufbau für die Messung des Sauerstoffpartialdruckes und eines Transmissions- bzw. Emissionsspektrums an einem heißen Glasdrainagestrang.

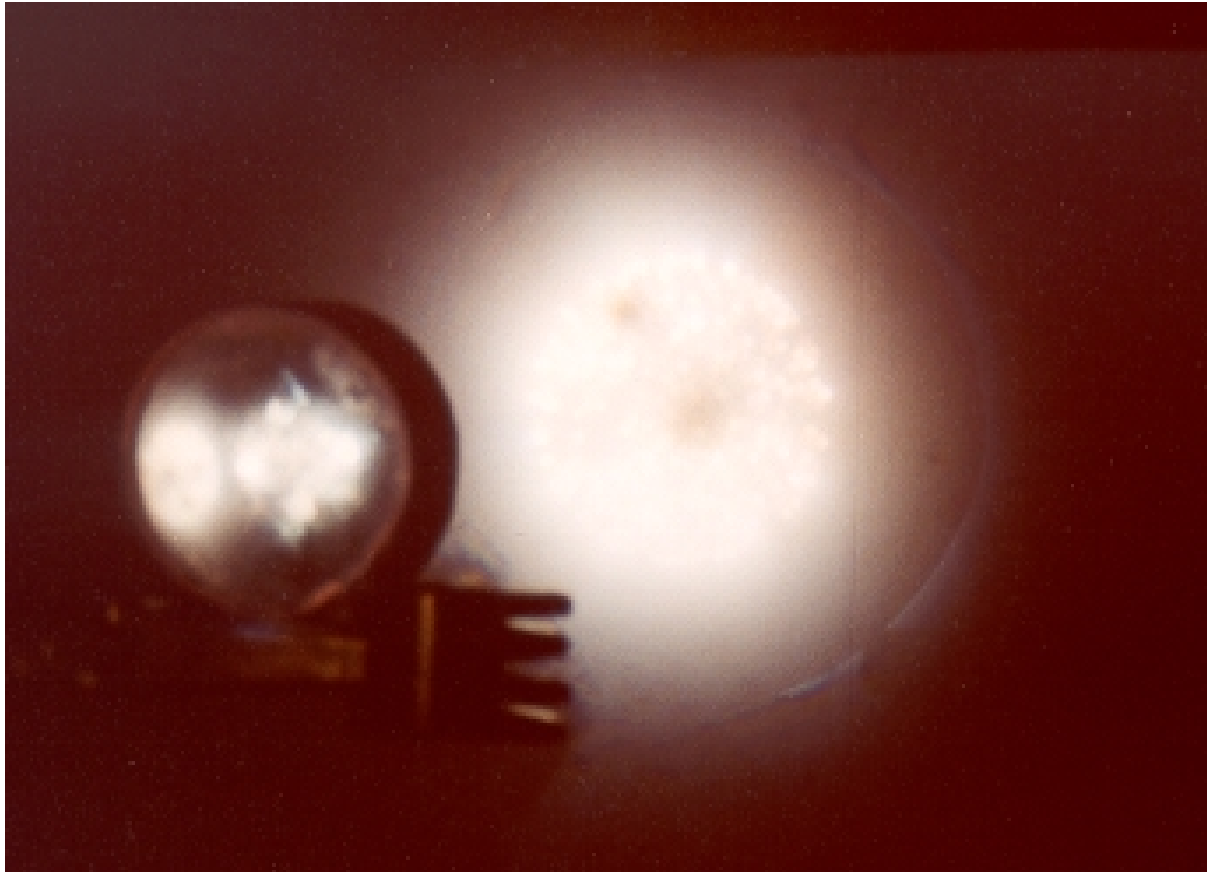


Bild 4: Abbildung des Glasfaserbündels (vergrößert durch eine Linse) mit „ungestörtem“ Strahlengang.

Laboruntersuchungen

Es wurden mit dem modular aufgebauten Spektrometer Messungen an Gläsern mit bekannten Eigenschaften bei Raumtemperatur durchgeführt, um das Messgerät zu testen, die Programmierung zur Automatisierung der Messaufgabe vorzunehmen und das Messgerät zu optimieren. Nach Erhalt des Lasermikrometers musste das Lasermikrometer mit dem Spektrometer kombiniert, die beiden Geräte aufeinander abgestimmt und eine gemeinsame Ansteuerung erstellt werden.

Nach der Entscheidung der projektbegleitenden Arbeitsgruppe, die Messungen am frei abfließenden Glasschmelzstrang vorzunehmen, wurden im Labor spektrometrische Messungen an Glasstäben durchgeführt, um sicherzustellen, dass auch bei dieser Geometrie sinnvolle Messungen mit dem Spektrometer möglich sind. Bild 4 zeigt den Strahlengang des Glasfaserbündels, wobei dieser mit Hilfe einer Linse vergrößert auf die Leinwand projiziert wird. Bild 5 zeigt die Abbildung mit einem Glasstab im Strahlengang. Verantwortlich ist hierfür die Brechung und Totalreflektion an der gekrümmten Oberfläche bei runder Geometrie. Es ergeben sich je nach Abstand von Glasfaserbündel und Glasstab sowie Abbildungsebene völlig unterschiedliche Effekte und Messergebnisse. Bild 6 gibt die Verhältnisse an einer runden Geometrie prinzipiell wieder, wobei der Brechzahl 1,52 für den Glasstab angenommen wurde.

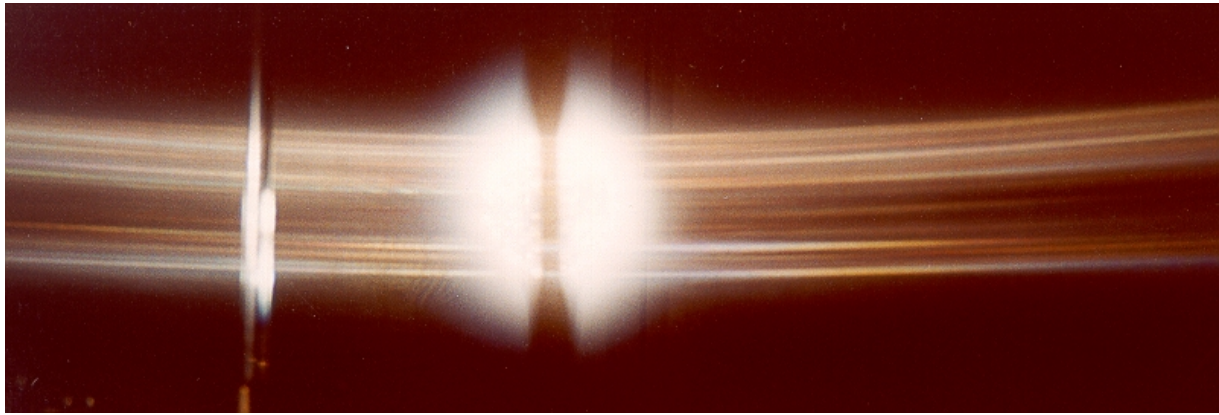


Bild 5: Projektion des Strahlengangs des Glasfaserbündels mit durchleuchtetem Glasstab.

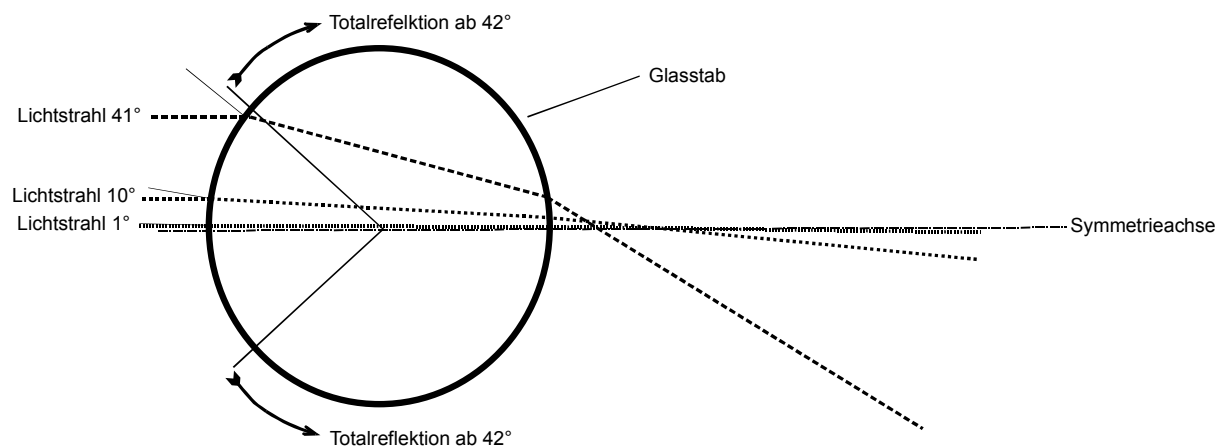


Bild 6: Brechung von parallelen Lichtstrahlen mit unterschiedlichen Einfallswinkeln je nach Abstand zur Mittelachse an einem rundem Glasstab.

Anhand der Prinzipskizze von Bild 6 kann man erkennen, dass vor allem der Abstand Glasstab – Empfänger für die Messung wichtig ist. Denn je kleiner die Fläche des Empfängers bzw. der Empfängeroptik und je größer der Abstand zwischen Glasstab und Empfänger desto geringer ist die detektierte Lichtmenge, da immer mehr der gebrochenen Strahlen am Empfängerteil vorbei gehen. Auch das Verhältnis von Glasstabdicke und Strahlbreite spielt eine Rolle. Im Gegensatz zu Bild 5 ist die Breite des Lichtstrahls (11 mm beim Austritt aus dem Glasfaserbündel, anschließend mit Divergenzwinkel von $1,6151^\circ$) bei den Messungen größer als der Drainagestrang (bei den Messungen zwischen 1 und 3 mm). Dies bedeutet, dass unter Umständen auch noch Beugungseffekte (siehe Bild 5: eingeschnürter Schatten des Glasstabes in der Abbildungsebene) die Verhältnisse erschweren.

Messungen in der Glasindustrie

Da für die Messungen nur bereits vorhandene Drainagen zur Verfügung standen, war die Zugänglichkeit der Drainagen in allen Fällen durch Produktionsanlagen, Schutzeinrichtungen und aufgrund möglichst geringer thermischer Belastung der Umgebung sehr eingeschränkt. Schon das gleichzeitige Anbringen der Sensoren für die beiden berührungslosen Messungen (optisches Spektrometer und Lasermikrometer) ist unter den räumlich beengten Verhältnissen in der Industrie äußerst schwierig und lässt sich unter Umständen nur dadurch realisieren, dass die Sensoren in einer Ebene jeweils um 90° versetzt angeordnet werden oder die Messungen zeitlich versetzt erfolgen.

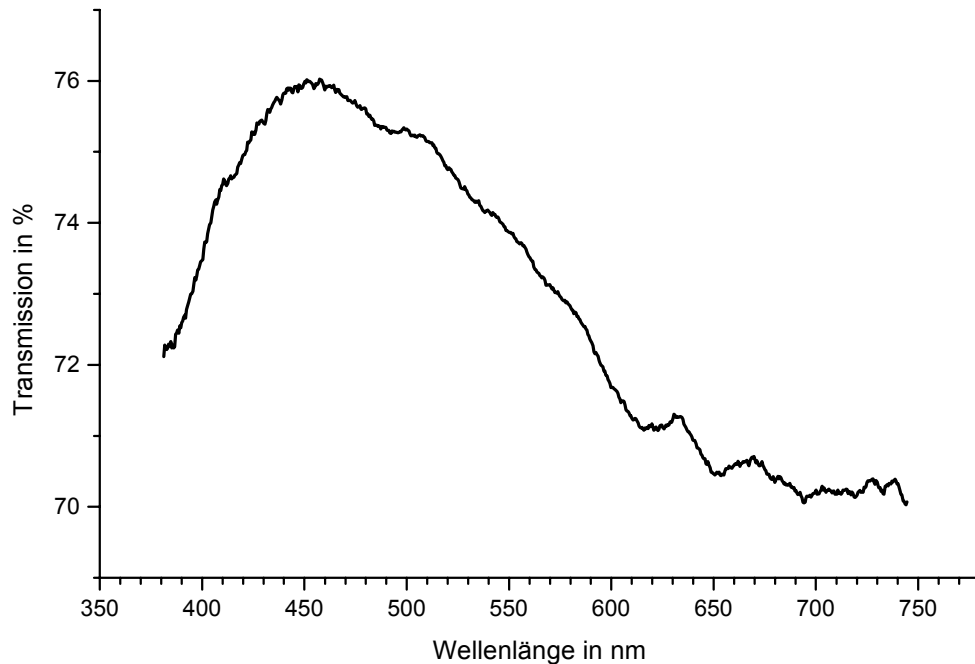


Bild 7: Transmissionsspektrum eines grünen Behälterglases bei Temperaturen knapp unter 1200°C an einem ca. 1,85 mm dicken, frei abfließenden Drainagestrang.

Bild 7 und Bild 8 zeigen Ergebnisse der Spektrometermessung an einem grünen Behälterglas. Bild 7 zeigt das Transmissionsspektrum zwischen 380 und 750 nm, während Bild 8 das entsprechende Emissionsspektrum zeigt. Die Glasstrangdicke schwankte während des Messzeitraums zwischen 1,7 und 1,9 mm. Die Temperatur der Glasschmelze lag nach Angabe des Glasherstellers bei ca. 1200°C am Ort der Glasdrainage. Dies bedeutet, dass die Temperatur der Glasschmelze des abfließenden Glasdrainagestrangs < 1200°C war. Dabei ist zu beachten, dass die Temperatur im Glasstrang nicht homogen verteilt ist, sondern im Innern des Drainagestrangs eine höhere Temperatur herrscht als in den kühlen Außenbereichen.

Während bei der Transmissionsmessung eine externe Lichtquelle das Licht erzeugt und mit dem Empfänger derjenige Anteil der Lichtquelle erfasst und gemessen wird, der von der Glasschmelze nicht absorbiert wird, wird bei der Emissionsmessung die Eigenstrahlung der hellrot glühenden Glasschmelze des Drainagestrangs erfasst. Diese Eigenstrahlung ist vorwiegend durch die Temperatur der Glasschmelze geprägt, wobei sich anwesende Ionen durch eine vermehrte Strahlung oder Absorptionserscheinungen bemerkbar machen.

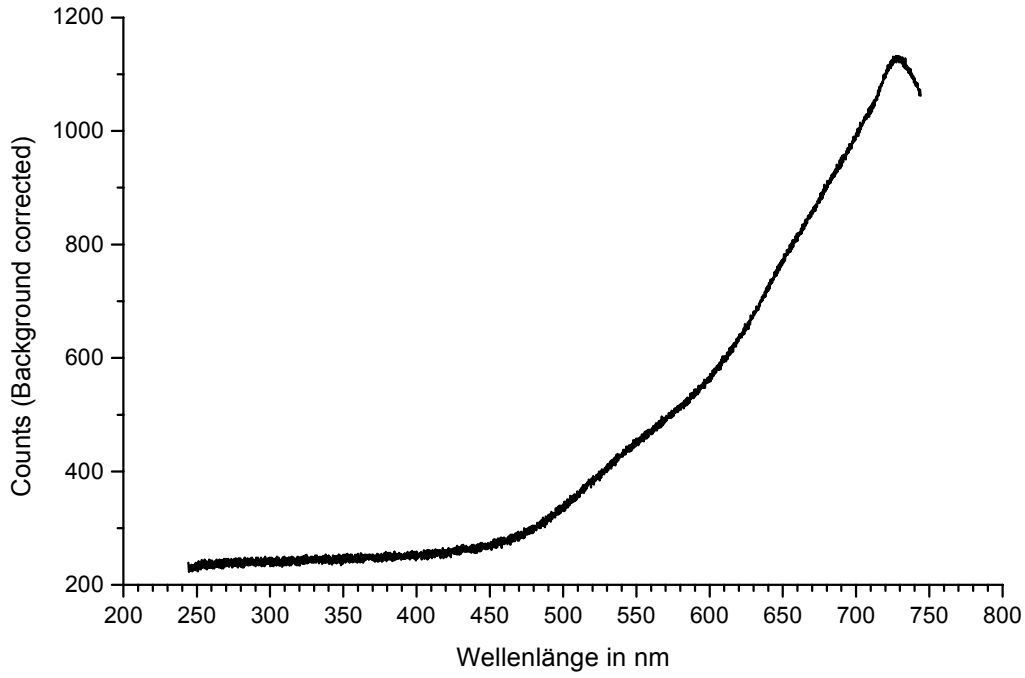


Bild 8: Emissionsspektrum eines grünen Behälterglases bei Temperaturen knapp unter 1200°C an einem ca. 1,8 mm dicken, frei abfließenden Drainagestrang.

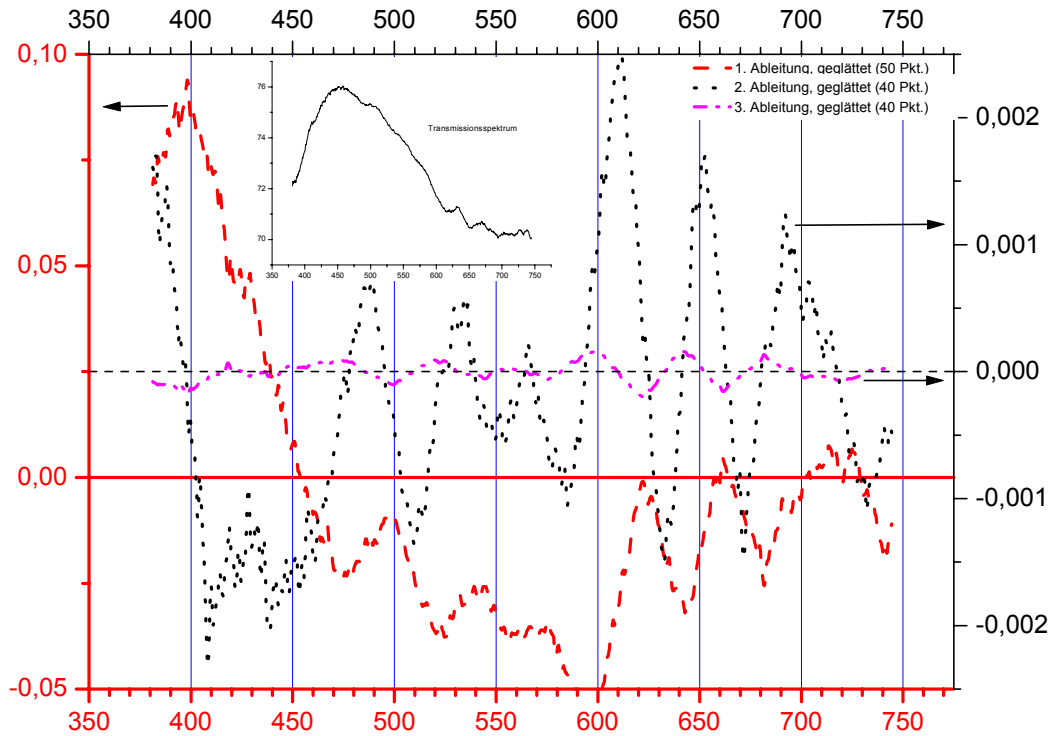


Bild 9: Kurvendiskussion eines Transmissionspektrum zur Bestimmung der Peakmaxima bzw. -minima.

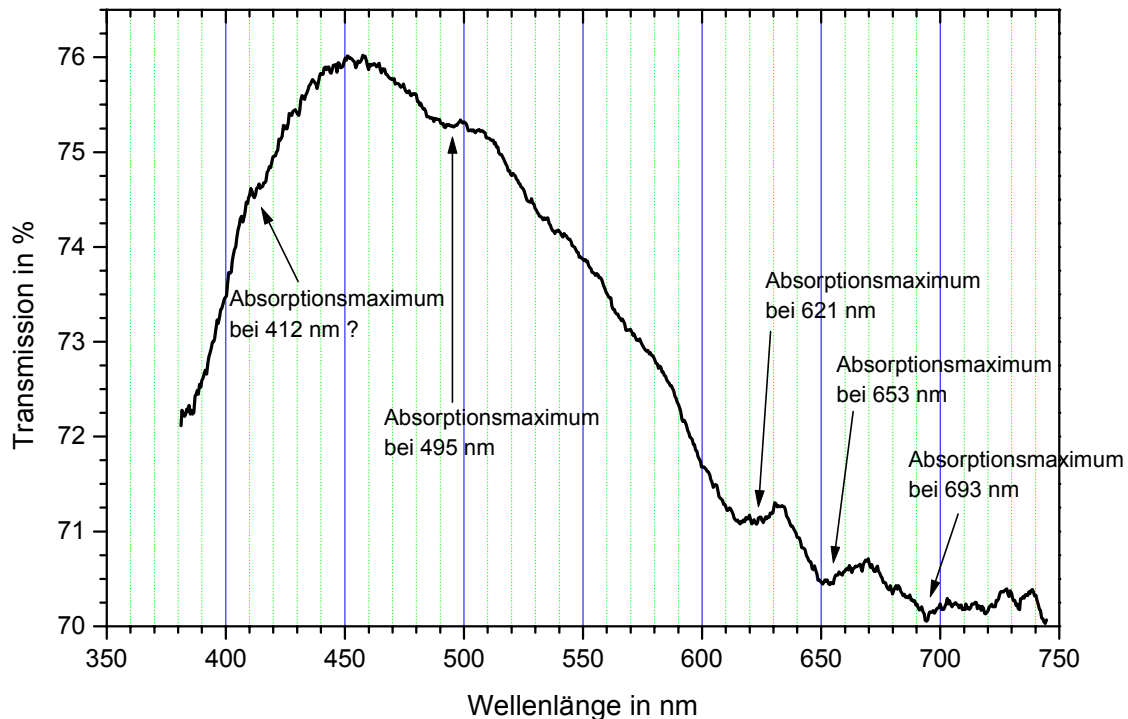


Bild 10: Bestimmung der Lage der Absorptionsmaxima mit Hilfe der Kurvendiskussion an einem Transmissionsspektrum eines grünen Behälterglases.

Eine entsprechende mathematische Auswertung (Kurvendiskussion zur Ermittlung von Maxima und Minima, sowie von Wende- und Sattelpunkten) der beiden Messkurven mit Hilfe entsprechender Programme (Microcal™ Origin™ Version 5.0 SR2, 1997) führt zu den Ergebnissen, wie sie in Bild 9 beispielhaft dargestellt sind. Mit Hilfe der Nulldurchgänge der 1. Ableitung sowie der Diskussion der 2. und 3. Ableitung kann eine Auswertung der Messkurven erfolgen, deren Ergebnisse in Bild 10 und Bild 11 dargestellt sind.

Diskussion der Ergebnisse der Transmissions- und Emissionsmessungen

Unter Berücksichtigung der Ergebnissen der Untersuchungen im Rahmen des AiF-Forschungsvorhabens Nr. 12064 B [4 bis 9] ist folgende Auswertung und Interpretation der Messergebnisse möglich.

Transmissionsspektrum

Es konnten durch die Kurvendiskussion 5 verschiedene Absorptionsmaxima ausgemacht werden (Bild 10). Basierend auf Daten aus der Literatur [vor allem: 5 und 7] kann folgende Zuordnung vorgenommen werden:

- Absorptionsmaximum bei 412 nm: Eisen, dreiwertig, in 4er oder 6er Koordination.
- Absorptionsmaximum bei 495 nm: Chrom, dreiwertig. Dieses Absorptionsmaximum liegt bei Raumtemperatur (25°C) bei 450 nm und verschiebt sich mit zunehmender Temperatur zu höheren Wellenlängen (800°C: 470nm; 1200°C: 498 nm). Aus der Verschiebung des Absorptionsmaximums auf 495 nm ergibt sich eine Temperatur des Glasdrainagestranges von ca. 1160°C.
- Absorptionsmaximum bei 621 nm: Chrom, dreiwertig.
- Absorptionsmaximum bei 653 nm: Chrom, dreiwertig.
- Absorptionsmaximum bei 693 nm: Chrom, dreiwertig. Dieses Absorptionsmaximum liegt bei Raumtemperatur bei 680 nm, d.h. auch hier ist mit steigender Temperatur eine Verschiebung zu höheren Wellenlängen zu beobachten.

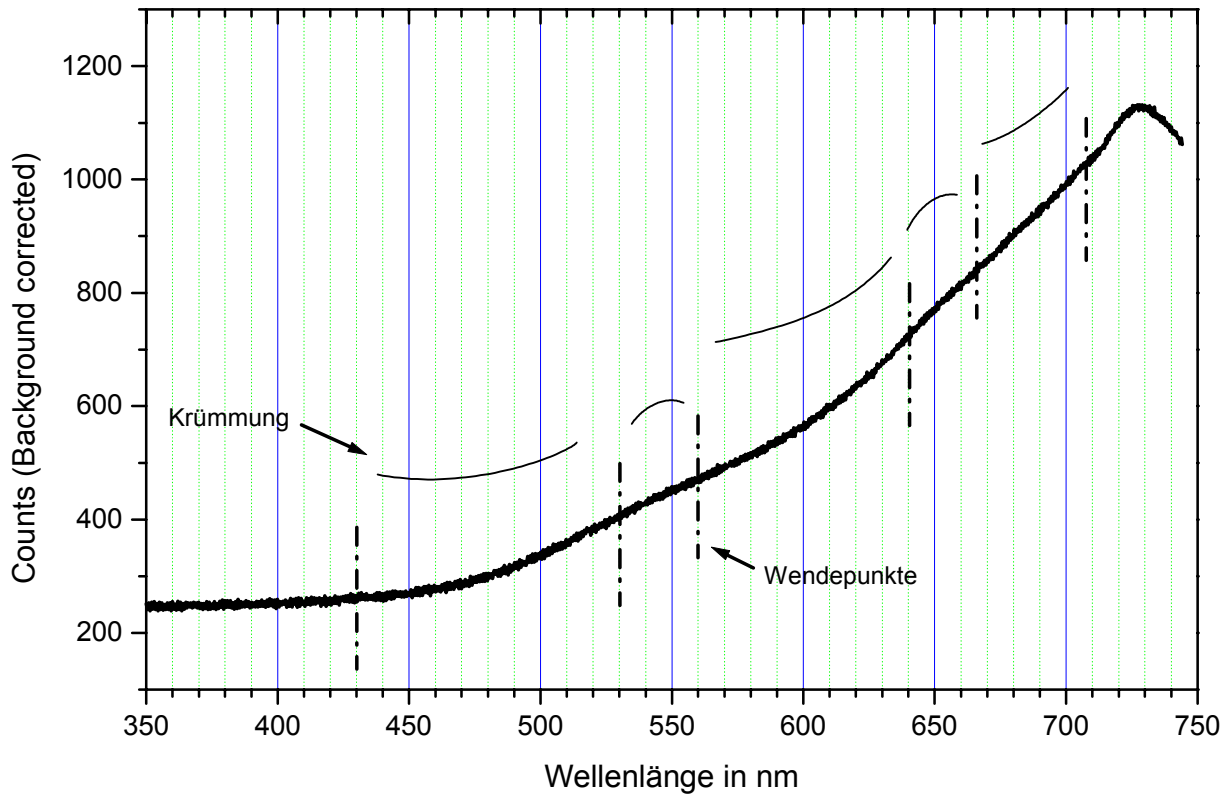


Bild 11: Bestimmung der Lage der Emissionsmaxima und -minima mit Hilfe der Kurvendiskussion an einem Emissionsspektrum eines grünen Behälterglases.

Eine quantitative Auswertung der Transmissionsmessung ist nicht möglich. Obwohl im AiF-Forschungsvorhaben 12064 B die Absorptionskoeffizienten bei hohen Temperaturen und bekannten Konzentrationen gemessen bzw. errechnet wurden [5, 6, 7, 9], ergab der Versuch, das in Bild 10 dargestellte Transmissionspektrum entsprechend der Vorgehensweise bei Raumtemperatur [1, 2] auszuwerten, kein vernünftiges Ergebnis. Dies dürfte zum einen vor allem daran liegen, dass der Glasdrainagestrang keine einheitliche Temperatur besitzt, sondern im Inneren heißer ist (die Verschiebung des entsprechenden Peaks auf 495 nm gibt die Temperatur im heißen Inneren wieder: ca. 1160°C) und eine kältere Außenhaut besitzt, welche die Transmissionsminima bei ca. 620 nm, ca. 650 nm und ca. 680 nm verursacht. Denn betrachtet man die im AiF-Forschungsvorhaben ermittelten Absorptionskoeffizienten von Chrom als Funktion der Wellenlänge [5, 6, 9], so fällt auf, dass bei Temperaturen über 1100°C diese Absorptionsmaxima nicht mehr zu erkennen sind. Dies bedeutet, dass bei der Messung des Spektrums von Bild 10 die Temperatur der Außenhaut des Glasdrainagestrangs deutlich unter 1100°C lag, sehr wahrscheinlich sogar unter 1000°C.

Ein weiteres Problem bei der quantitativen Auswertung der Transmissionsmessung ist die Tatsache, dass der Strahlengang mit dem runden Stab bzw. dem runden Drainagestrang zu Messeffekten führt, die nicht oder nur sehr schwer bzw. ungenau quantifiziert werden können, da die entsprechenden Randbedingungen nicht bekannt sind. Lichtbrechung, -beugung, -streuung sowie der divergierende Lichtstrahl aus dem Glasfaserbündel, das von der Lichtquelle gespeist wird, sowie die Empfangscharakteristik des Glasfaserbündels, welches das Restlicht zum Empfänger weiterleitet, sind die wichtigsten Effekte und Erscheinungen, die hier berücksichtigt werden müssten.

Die Ermittlung der Transmission zwischen 1000 nm und 1050 nm würde eine quantitative Auswertung erheblich erleichtern, da in diesem Wellenlängenbereich bei den üblichen Soda-Kalk-Silicatgläsern nur das Fe^{2+} -Ion Absorption zeigt. Bei Kenntnis des Extinktionskoeffizienten von Eisen bei entsprechenden Temperaturen ließe sich eine Schmelze, deren Fe^{2+} -Gehalt bekannt ist, vielleicht trotz der ungünstigen Versuchsbedingungen dazu benutzen, eine quantitative Auswertung der Transmissionsspektren zu erreichen. Der Detektor des modular aufgebauten Spektrometers besitzt im genannten Wellenlängenbereich jedoch nur eine ungenügende Empfindlichkeit, wie die Kennlinie des Gesamtsystems (Detektor, Filter, Gitter, Glasfaser [10]) in Bild 12 zeigt. Für eine Messung der optischen Eigenschaften im genannten Bereich von 1050 nm müsste ein neuer Detektor (InGaAs) eingesetzt werden, da die Detektoren für den sichtbaren Bereich hier üblicherweise zu schwach sind.

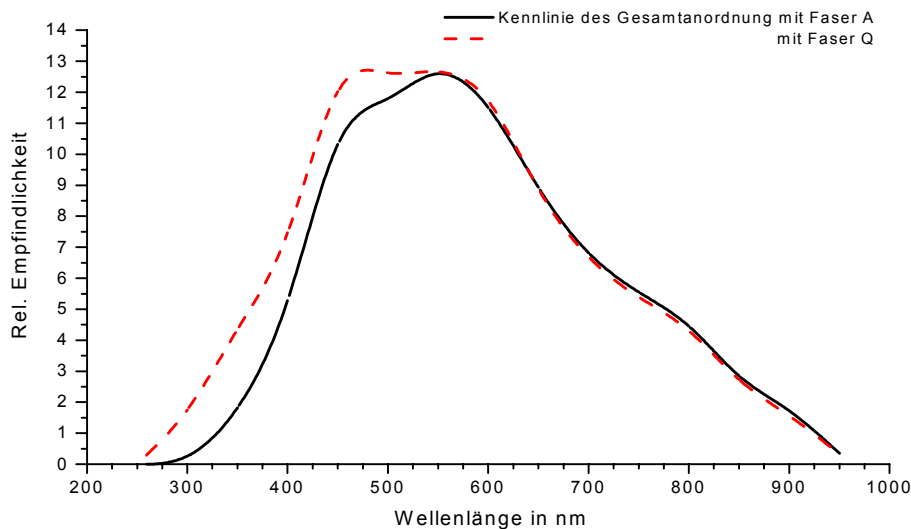


Bild 12: Kennlinie der relativen Empfindlichkeit der Messeinheit unter Berücksichtigung des Empfängers und wichtiger optischer System- bzw. Bauteile.

Emissionsspektrum

Das Emissionsspektrum kann nur sehr bedingt ausgewertet werden. Da diese Messmethode nicht vorgesehen war und nur als zusätzliche Messung vorgenommen wurde, ist eine Kalibrierung der Messeinheit an einem Schwarzen Strahler nie vorgenommen worden. Damit sind nur einige grundlegende Aussagen aus dem Emissionsspektrum zu gewinnen. Betrachtet man die Kennlinie der Empfindlichkeit der gesamten Messeinheit, die die entsprechenden Kennlinien des Empfängers, der Gitter und Filter sowie der verwendeten Glasfaser berücksichtigt, so erhält man Bild 12. Diese Kennlinie müsste bei einer intensiveren Auswertung des Emissionsspektrums ebenfalls mit einbezogen werden.

Auf Grund der Untersuchungen im Rahmen des AiF-Forschungsvorhabens 12064 B können folgende prinzipielle Aussagen auf Grund des gemessenen Emissionsspektrums getroffen werden: Da der Glasdrainagestrang aus einer heißeren Mitte und einer kälteren Außenhaut besteht, ist zu erwarten, dass die Temperaturstrahlung aus der Mitte (bei der Dicke von kleiner 2 mm entspricht dies keinem schwarzen Strahler [9]) durch die kältere Außenhaut bei entsprechender Wellenlänge auf Grund von Absorption noch geschwächt wird. Dies könnte die entsprechende Krümmung der Emissionskurve in Bild 11 in den Wellenbereichen um 450 nm, 620 nm und 680 nm erklären. Der Abfall der gemessenen Emissionsstrahlung ab 730 nm ist möglicherweise auf die Absorption des Fe^{2+} in der kalten Außenhaut zurückzuführen, kann aber auch durch völlig andere Effekte bedingt sein.

Zusammenfassung

Die optische Spektroskopie im Bereich von 300 bis 700 nm wurde eingesetzt, um die Eigenschaften der Glasschmelze berührungslos messen zu können. Es konnte am Drainageglas sowohl ein Transmissions- als auch ein Emissionsspektrum gemessen werden. Das Transmissionspektrum konnte genutzt werden, um einige qualitative Aussagen über das Drainageglas zu machen. Eine quantitative Auswertung, d.h. die Bestimmung der Konzentrationen an polyvalenten, farbgebenden Ionen, ist auf Grund der Versuchsbedingungen allerdings nicht ohne weiteres möglich. Das Emissionsspektrum entzieht sich auf Grund der thermisch inhomogenen Struktur der Drainageschmelze (heißer Kern, kalter Außenbereich) einer weitergehenden Interpretation bzw. Auswertung.



Die Forschungsarbeiten wurden durchgeführt mit der freundlichen Unterstützung der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF), Köln, (AiF-Nr.: 12370N) 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.

Literatur

- [1] B. Fleischmann: Erfahrungen mit Transmissionsmessungen an Gläsern. Vortrag im Fachausschuss III der DGG am 24. Oktober 2001 in Würzburg.
- [2] B. Fleischmann: Erste Erfahrung mit Transmissionsmessungen an Gläsern zur Bestimmung der Konzentration an farbgebenden Komponenten. HVG-Mitteilung Nr. 2009. Hüttentechnische Vereinigung der Deutschen Glasindustrie, Frankfurt am Main, April 2002.
- [3] B. Fleischmann: Farbmessung an Gläsern – Grundlagen und praktische Erfahrungen. HVG-Mitteilung Nr. 2010. Hüttentechnische Vereinigung der Deutschen Glasindustrie, Frankfurt am Main, April 2002.
- [4] D. Gödecke, M. Müller, C. Rüssel: Emissionsspektroskopische Untersuchungen an ionengefärbten Glasschmelzen (Zwischenbericht zum HVG-AiF-Forschungsvorhaben Nr. 12064 B). Vortrag im Fachausschuss III der DGG am 11. Oktober 2000 in Würzburg. Glastechn. Ber. Glass Sci. Technol. 74 (2001) 3, N73.
- [5] D. Gödecke, M. Müller, C. Rüssel: Hochtemperatur-UV-VIS-MIR-Spektroskopie von chrom-dotierten Gläsern. Glastechn. Ber. Glass Sci. Technol. 74 (2001) 6, 177 – 182.
- [6] D. Gödecke, M. Müller, C. Rüssel: Wärmestrahlung von chrom-dotierten Glasschmelzen. Glastechn. Ber. Glass Sci. Technol. 74 (2001) 10, 277 – 282.
- [7] M. Müller, C. Rüssel, O. Clausen: UV-VIS-spektroskopische Untersuchungen von Kohlebleibglas bei hohen Temperaturen. Glastechn. Ber. Glass Sci. Technol. 72 (1999) 11, 302 – 366.
- [8] D. Gödecke, M. Müller, C. Rüssel: Emissionsspektroskopische Untersuchungen an ionengefärbten Glasschmelzen. Vortrag im Fachausschuss III der DGG am 11. Oktober 2000 in Würzburg. Protokollanhang.
- [9] C. Rüssel: Emissionsspektroskopie an Glasschmelzen zur quantitativen Bestimmung färbender Ionen. AiF-Abschlußbericht Nr. 12064 B, 09.08.2001.
- [10] The Book of Photon Tools. Oriel Instruments, Stratford (USA).

Grundlagen:

- [11] G. Fuxi: Optical and Spectroscopic Properties of Glass. Springer Verlag, Shanghai Scientific and Technical Publishers, Shanghai. 1992.
- [12] W. Schmidt: Optische Spektroskopie – Eine Einführung. Wiley-VCH, Weinheim. 2000.
- [13] C. R. Bamford: Colour Generation and Control in Glass. Glass Science and Technology 2. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam. 1977.