

Sichtbarkeit von Rauchfahnen

Von D. J. Pyke, Ormskirk, Lancashire (England)

(Vortrag auf dem HVG-Kolloquium „Emissionen von Glasschmelzöfen“ am 28. Oktober 1977 in Frankfurt (Main))
(Mitteilung aus der Pilkington Brothers Ltd., Ormskirk, Lancashire (England))

(Eingegangen am 28. Oktober 1977)

Behandelt wird die Sichtbarkeit der Rauchfahnen von Spiegelglasöfen in Abhängigkeit von Brennstoff, Produktions- und Wetter-

bedingungen. Theoretische Überlegungen zum Verständnis der Zusammenhänge und der Beeinflussbarkeit werden angegeben.

Plume visibility

The visibility of plumes from flat glass furnaces, with various fuel, production and weather conditions, is predicted with sufficient

accuracy to justify the use of the theory in future work on plume visibility control.

La visibilité des panaches de fumée

On traite de la visibilité des panaches de fumée des fours de glace polie en fonction du combustible, des conditions de production et des conditions atmosphériques. Suivent des considérations théo-

riques facilitant la compréhension des relations existant entre ces facteurs et une discussion sur les moyens de les influencer.

1. Einführung

Die Rauchfahnen von Glasschmelzöfen sind wegen ihrer Sichtbarkeit im zunehmenden Maße der Kritik ausgesetzt. Die Beeinflussung der Sichtbarkeit setzt die Kenntnis der Zusammenhänge voraus. In dieser Arbeit wird zusammenfassend über entsprechende Arbeiten berichtet. Die theoretischen Ableitungen basieren auf dem Zustand der Rauchfahnen bei der Spiegelglasherstellung in Abhängigkeit von Witterung und Beobachtungsweise. Die Theorie basiert auf den Angaben von Jarman und de Turville [1] für Kraftwerke. Die Sichtbarkeit der Rauchfahne C_p wird definiert als Kontrast zwischen der Helligkeit der Fahne B_p zur Helligkeit des Hintergrundes B_0 . Es gilt

$$C_p = \frac{B_p - B_0}{B_0}$$

Die Helligkeit der Fahne umfaßt die Lichttransmission durch die Fahne B , die Streuung des Sonnenlichtes in das Auge des Beobachters durch die Fahne B_{sun} und die entsprechende Streuung des Himmelslichtes B_{sky} . Damit ergibt sich

$$C_p = \frac{B_{\text{sun}}}{B_0} + \frac{B_{\text{sky}}}{B_0} + \frac{B}{B_0} - 1.$$

Die einzelnen Parameter werden nachfolgend abgeleitet, aber die Definition der Rauchfahnen-Sichtbarkeit bedarf einer genaueren Diskussion.

Fahnen sind sichtbar, wenn ihr Kontrast über der visuellen Kontrastschwelle liegt ($\approx 0,003$ nach [1]). Diese Definition ist für Rauchfahnen geeigneter als die Definition über die Opazität (B/B_0). Die Opazität eignet

sich für die Kennzeichnung von rußhaltigen Rauchfahnen. In solchen Fahnen ist die Streuung des Lichtes gering, und B_{sun} und B_{sky} können vernachlässigt werden. Bei der Definition nach der Opazität ist eine Fahne, die heller als die Umgebung ist, nicht denkbar. Da bei Glasschmelzöfen keine rußhaltigen Rauchgasfahnen auftreten, kommen Fahnen, die heller als die Umgebung sind, häufig vor.

Die Kontrastdefinition erlaubt die Kennzeichnung von Fahnen, die dunkler (C_p negativ), die heller (C_p positiv) und die unsichtbar ($+0,003 > C_p > -0,003$) gegenüber dem Hintergrund sind. Bei der Sichtbarkeit der Rauchfahnen gibt es drei verschiedene Zustände. Die Fahnen lösen sich schlecht auf. Die Fahnen sind noch kilometerweit zu erkennen. Die Fahnen sind sichtbar. Nur der letztgenannte Zustand soll hier behandelt werden.

2. Theorie

Der Streulichtterm des Sonnenlichtes B_{sun}/B_0 kann aus der elektromagnetischen Theorie abgeleitet werden zu

$$\frac{B_{\text{sun}}}{B_0} = \left(\frac{\lambda}{2\pi} \right)^2 \cdot \frac{DI_s}{2 B_0} \sum n(i_1 + i_2),$$

wobei im einzelnen bedeuten: λ die effektive mittlere Wellenlänge des Tageslichtes, D den Fahnedurchmesser, I_s die Intensität des auf die Fahne einfallenden Sonnenlichtes, n die Anzahl der Teilchen in der Volumeneinheit der Fahne in einem vorgegebenen Bereich, i_1 und i_2 die MIE-Funktionen, bezogen auf die Stärke der elektrischen Felder senkrecht und parallel zur Streuebene.

Der Himmelslichtterm B_{sky}/B_0 kann analog angegeben werden zu

$$\frac{B_{sky}}{B_0} = \left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)^2 \pi D \sum_n \int_0^{\pi/2} (i_1 + i_2) \sin \Theta d\Theta,$$

wobei Θ den Winkel zwischen dem einfallenden und dem gestreuten Licht bedeutet und das Integral aus Daten errechnet werden kann, die in [1] angegeben und beschrieben sind.

Der Absorptionsterm $(B/B_0) - 1$ kann leicht abgeleitet werden zu

$$\frac{B}{B_0} - 1 = - D \sum_n K A_s,$$

wobei K den Absorptionskoeffizienten und A_s die Querschnittsfläche der Fahnenpartikel bedeuten.

Diese Darstellung umfaßt viele Annahmen einschließlich der einfachen Streuung bei einer Verdünnung von unter 10% und einer vernachlässigbar geringen Verminderung der Fahnsichtbarkeit zwischen Beobachter und Fahne durch Nebel, Dunst und dgl.

Die komplizierten Funktionen müssen nun den Besonderheiten der Fahnen von Glasschmelzöfen und der Art der Beobachtung angepaßt werden. Die Austrittsgeschwindigkeit der Abgase aus dem Schornstein ist so groß, daß dadurch bis zu einem begrenzten Abstand vom Schornstein die Vermischung mit der Atmosphäre bestimmt wird. Darüber hinaus werden die atmosphärischen Bedingungen maßgebend. Die Beschränkung der Beobachtung der Fahne in der Anfangsphase gestattet eine Reihe von Vereinfachungen. 95% des emittierten Materials befinden sich innerhalb eines Kegels mit einem Durchmesser, der $1/6$ des Abstandes vom Schornstein beträgt [2]. Es wird eine konstante Konzentration in der Fahne mit

$$nu \frac{\pi}{4} \cdot D^2 = n_0 Q$$

angenommen, wobei u die Windgeschwindigkeit, n_0 die Konzentration der Teilchen im Abgas des Schornsteins und Q der Abgasvolumenstrom sind. D ist $D_0 + x/6$, wenn D_0 der Durchmesser der Schornsteinkrone und x der horizontale Abstand vom Kamin sind. Der Meßwert der Partikelkonzentration ist die Konzentration γ , gewöhnlich in Masse pro Volumeneinheit. Es gilt

$$\gamma = \frac{4}{3} \pi \frac{d^3}{2} \rho n_0;$$

d ist der Teilchendurchmesser, entsprechend $A_s = \pi d^2/2$ und ρ die Dichte der Teilchen.

Damit kann die Kontrastgleichung nun als Ganzes geschrieben werden, wenn für jeden Teil der Fahne eine charakteristische Größe der Teilchen angegeben werden

kann, von denen anfänglich n_0 in der Volumeneinheit enthalten sind. Für jeden Teil der Fahne ergibt sich dann:

$$C_P = \frac{\gamma Q}{\rho u (6D_0 + x)} \cdot \left[\frac{18 \lambda^2 I_s (i_1 + i_2)}{\pi^4 d^3 B_0} + \frac{36 \lambda^2}{\pi^3 d^3} \int_0^{\pi/2} (i_1 + i_2) \sin \Theta d\Theta - \frac{36 K}{\pi d} \right].$$

Die einzelnen Glieder der Gleichung müssen nun ermittelt werden: a) für jeden Teil der Fahne, für ein gegebenes x und Θ , womit die Beobachtungsrichtung zur Fahne festgelegt ist, b) für verschiedene Wetterbedingungen und c) für einen gegebenen Schornstein und Ofenbetriebszustand.

3. Erfahrungen aus der Praxis

Es muß sichergestellt sein, daß x nicht zu groß wird (weniger als 1 km, damit die vereinfachenden Annahmen noch zutreffen). 50 m sind als Einheit gewählt worden. Der Wert Θ bestimmt den Winkel zwischen einfallendem und gestreutem Licht. Das Integral wird stark vereinfacht, wenn der Beobachter direkt von unten auf die Fahne blickt und das Sonnenlicht mit 30° zur Horizontalen einfällt.

3.1. Bereiche der Rauchfahne

Konventionelle Flachglasanlagen erzeugen Abgase, deren Zusammensetzung in einem weiten Bereich von der Glaszusammensetzung, der Ofenbetriebsweise und dem Brennstoff abhängt. Die Abgaszusammensetzung am Emissionspunkt und chemische Änderungen bis zum Beobachtungspunkt sind definiert. Im allgemeinen kommen drei Grundkomponenten vor: als Feststoff Natrium- und Kaliumverbindungen mit einem Partikeldurchmesser von $\approx 0,3 \mu\text{m}$; als Aerosole, entstanden aus dem $\text{SO}_3/\text{H}_2\text{O}$ -Gehalt der Gase mit einem Gleichgewichtsdurchmesser von $\approx 0,1 \mu\text{m}$ und als weitere Möglichkeit Kombinationen, die aus der Lösung der Festteilchen im Aerosol entstehen mit einem Durchmesser von $\approx 1,0 \mu\text{m}$. Messungen im Schornstein und mit Geräten, die mit Ballonen in die Rauchfahne getragen wurden, wurden durchgeführt. Die ermittelten Teilchengrößen sind die besten derzeit verfügbaren Daten. Experimente zeigen, daß für jede Komponente eine Teilchengröße angenommen werden kann. Fahnen anderer Glasschmelzanlagen können ähnlich angenommen werden. Die Theorie wurde mit befriedigenden Ergebnissen auch auf die Bleiglasschmelze ausgedehnt.

3.2. Wetterbedingungen

Die entwickelten Gleichungen gelten für sonniges Wetter mit klarem Himmel, für andere Bedingungen müssen sie modifiziert werden. Für Tageslichtbedingungen kann den Smithsonian-Tabellen der Wert $I_s/B_0 = 22$ ent-

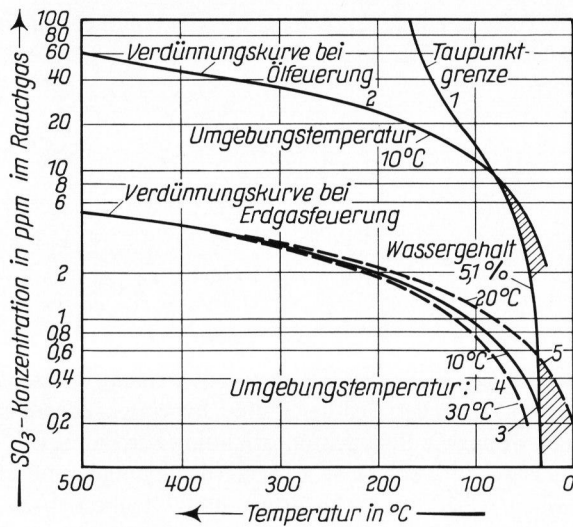


Bild 1. Verdünnung, Kühlung und Taupunktgrenze von Abgasen.

nommen werden. Folgende verschiedene Wetterbedingungen können abgeleitet werden:

- a) Anfangsbedingungen für hellen, klaren Himmel mit $I_s/B_0 = 22$: Alle drei Glieder der Gleichung sind einschlägig. Dies ist die „helle“ Bedingung.
- b) Scheint die Sonne bei hellem, wolkeigen Hintergrund auf die Fahne, dann sind alle drei Terme einschlägig, I_s/B_0 ist dann aber kleiner als 22. Der Betrag von I_s/B_0 kann durch Messung der Helligkeit der Wolken und des Hintergrundes ermittelt werden. Eine helle Kumuluswolke kann viermal heller als der normale Hintergrund sein, was zu $I_s/B_0 = 5,5$ führt. Dies ist die „helle Wolken“-Bedingung.

c) Reduzieren Wolken die Intensität des direkt auf die Fahne einfallenden Sonnenlichtes, dann wird I_s/B_0 eventuell so stark vermindert, daß der Sonnenlichtterm vernachlässigt werden kann. Dies ist die „trübe“ Bedingung.

Thermische Bedingungen beeinflussen die Stabilität aller Aerosole. Die Gase verlassen den Schornstein mit einer Temperatur von angenommen 350 °C, sie werden verdünnt und in der umgebenden Luft abgekühlt. Diese Abkühlung kann an den Fahhengrenzen meist unmittelbar nach dem Austritt auftreten. Eine Verdünnung vermindert die SO_3 -Konzentration. Es ist möglich, eine vereinfachte Beziehung für den Zusammenhang Taupunkttemperatur zu SO_3 -Gehalt anzugeben, so daß alle Bedingungen rechts der Taupunkt-Schwellenkurve (Kurve 1, Bild 1) das Gebiet der beständigen Aerosole kennzeichnen. Diese Kurve repräsentiert eine Kurvenschar, die für verschiedene Feuchtigkeiten der Atmosphäre gilt: Eine fast gleiche Kurvenfläche mit begrenzter Dicke gibt diesen Fall noch besser wieder.

Die Abkühlkurve der Abgasfahnen bei Öl- und Gasfeuerung (1,8% S im Öl und S-freies Erdgas) wird in Bild 1 mit der Taupunktkurve verglichen. Es wird deutlich, daß eine Aerosolbildung in der Abgasfahne einer typischen ölbeheizten Flachglasanlage (Kurve 2) leichter einsetzt als bei einer erdgasbeheizten Anlage. Die Wahrscheinlichkeit einer Aerosolbildung ist von der Umgebungstemperatur abhängig (Kurven 3, 4 und 5). Man erkennt, daß bei Erdgas eine Aerosolbildung nur unter winterlichen Bedingungen wahrscheinlich ist. Dieser vereinfachte Überblick steht mit den Beobachtungen in Hütten in der ganzen Welt

Tabelle 1. Daten zur quantitativen Berechnung

Ofendaten		Öl	Öl	Erdgas	Erdgas
Ofenbetriebsweise		Antempfern	Produktion	Antempfern	Produktion
gemessene Staubkonzentration	g/m ³	0	0,250	0	0,150
gemessene SO ₃ -Konzentration im Schornstein	g/m ³	0,020	0,100	0	0,020
äquivalente Aerosolkonzentration H ₂ O/SO ₃	g/m ³	0,041	0,204	0	0,041
Konzentration der Mischung Na ₂ SO ₄ /H ₂ O/SO ₃	g/m ³	—	3,560	0	2,140
zusätzliche Aerosole H ₂ O/SO ₃	g/m ³	—	0,171	0	0,024
Abgasvolumen Q	m ³ /s	20	30	20	30
Zenitwinkel der Sonne θ	rad	30			
Windgeschwindigkeit (effektiver Mittelwert) n	m/s	6			
Schornstein-Durchmesser D ₀	m	2,1	für alle Brennstoffe und Ofenbetriebsweisen		
Abstand des Beobachters vom Schornstein	m	50			
effektive Lichtwellenlänge	m	0,524 · 10 ⁻⁶			
Teilchendaten					
Durchmesser d in m			0,1 · 10 ⁻⁶	0,3 · 10 ⁻⁶	1,0 · 10 ⁻⁶
Dichte in g/m ³			1,47 · 10 ⁶	2,7 · 10 ⁶	1,04 · 10 ⁶
optische Funktionen:					
Sonne (i ₁ + i ₂)			0,00283	0,0311	9,294
Himmel (i ₁ + i ₂) sin θ			0,00268	1,6	124
Zwischenmedium k			0,0138	0,523	3,888

Tabelle 2. Ergebnisse der Theorie und Beobachtungen des Rauchfahnenkontrastes in der Praxis

Brennstoff/ Ofenbetriebs- weise	ein- schlägige Konzentration	Kontrastterm (Helligkeitsbedingungen)			Gesamtkontrast					
		Sonne	Himmel	Zwischen- raum	hell		helle Wolken		trüb	
					berech.	gemess.	berech.	gemess.	berech.	gemess.
Öl/ Antempern	3	+ 0,005	+ 0,001	- 0,002	+ 0,004	*	0,000	**	- 0,001	**
Öl/ Produktion	4	+ 0,029	+ 0,008	- 0,015						
	2	+ 2,832	+ 10,729	- 12,165						
	gesamt				+ 1,420	+ 1,04	- 0,726	- 1,01	- 1,441	- 1,15
Erdgas/ Antempern	gesamt	0	0	0	0	**	0	**	0	**
Erdgas/ Produktion, warm	1	+ 0,006	+ 0,084	- 0,089	+ 0,001	**	- 0,004	*	- 0,005	*
Erdgas/ Produktion, kalt	4	+ 0,004	+ 0,001	- 0,002						
	2	+ 1,702	+ 6,483	- 7,307						
	gesamt				+ 0,881	n. b.	- 0,399	n. b.	- 0,825	n. b.

*: kaum sichtbare Fahne,
 **: nichtsichtbare Fahne,
 n. b.: nicht bestimmt.

in guter Übereinstimmung und kann als Richtlinie für die Wahl der Fahneneinflüsse dienen, wie nachfolgend angegeben.

4. Quantitative Angaben

Den in Tabelle 1 angegebenen Werten liegen folgende Annahmen und Meßwerte zugrunde:

Ölheizung: Temperzustand, keine Staubemission. SO₃-Emission 0,02 g/m³, gibt Teilchen von 0,1 µm Durchmesser und einer Dichte von 1,47 · 10⁶ g/m³. Gesamter Abgasvolumenstrom 20 m³/s.

Ölheizung: Produktionsbedingungen. Staubemission 0,25 g/m³, Partikelgröße 0,3 µm, bei Wirkung als Kondensationskern 1 µm, mittlere Dichte 1,04 · 10⁶ g/m³ bei einer Gesamt-Konzentration von 3,56 g/m³.

Die flüssigen Kondensate entfallen nur zum Teil auf die SO₃-Emission mit 0,10 g/m³, den Rest bilden Teilchen von 0,1 µm Durchmesser der Dichte 1,47 · 10⁶ g/m³ bei einer Konzentration 0,171 g/m³. Der gesamte Abgasvolumenstrom beträgt 30 m³/s.

Erdgasfeuerung: Temperbedingungen, keine Staub- oder SO₃-Emission.

Erdgasfeuerung: Produktionsbedingungen. Staubkonzentration 0,15 g/m³, Teilchengröße 0,3 µm. Unter normalen Umgebungsbedingungen tritt keine Kondensation auf. Bei kühler Witterung kommt es zur Kondensation an den Staubpartikelchen. Es entstehen Teilchen mit einem

Durchmesser von 1 µm mit einer mittleren Dichte von 1,47 · 10⁶ g/m³. Der Rest des ursprünglichen SO₃-Gehaltes mit einer Konzentration von 0,02 g/m³ bildet Teilchen von 0,1 µm Durchmesser mit einer Dichte von 1,47 · 10⁶ g/m³ und einer Konzentration von 0,024 g/m³.

Die visuelle Beobachtung der Kontrastbilder bei Helligkeit, Dunkelheit oder Unsichtbarkeit gegen den Hintergrund bestätigt die Vorhersagen in jedem Fall (Tabelle 1). Kontrastmessungen sind mit dem Telefotometer unter Standard-Beobachtungsbedingungen durchzuführen. Für die wenigen durchgeführten Messungen ist aus Tabelle 2 zu ersehen, daß eine befriedigende Übereinstimmung mit der Theorie besteht.

Die Angaben und Größen der drei Gruppen in Tabelle 2 zeigen eindeutig den Einfluß der Parameter auf das Zustandekommen des Rauchfahnenkontrastes. Die Staubkonzentration ist in den betrachteten Fällen nicht immer maßgebend. Es ist verständlich, daß der Unterschied mit 40 ppm bei Ölheizung und 8 ppm bei Erdgasheizung der Haupteinfluß der unterschiedlichen Rauchfahnen-sichtbarkeit ist.

Die angegebenen Beziehungen gelten nur für niedrige Werte des Terms für das Zwischenmedium. Die Beobachtung darf nicht behindert sein.

Die Erfassung der Rauchfahnen-sichtbarkeit ist der Zweck dieser vornehmlich theoretischen Arbeit. Die Untersuchung begann mit einem Gerät zur Abgasproben-nahme aus dem Schornstein. Diese Abgasproben wurden

durch eine Beobachtungskammer geschickt, in der sie einen Modell-Schornstein durchströmen. Die entstehende Rauchfahne kann unter definierten Bedingungen beobachtet werden. Die entwickelten Gleichungen wurden auf die Modellbedingungen angewendet, und es ergab sich eine zufriedenstellende Übereinstimmung.

Die jetzt laufenden Experimente haben das Ziel, die Rauchfahnsichtbarkeit zu beeinflussen.

Die vorliegende Arbeit wird veröffentlicht mit Zustimmung der Direktoren der Pilkington Brothers Ltd., Ormskirk, Lancashire (England), und von Dr. D. S. Oliver, dem Leiter der Abteilung Forschung und Entwicklung.

5. Literatur

- [1] Jarman, R. T. und Turville, C. H. de: The visibility and length of chimney plumes. *Atmospheric Environment* **3** (1969) S. 257–280.
- [2] Lowan, A. N. (Hrsg.): Tables of scattering functions for spherical particles. Washington: U.S. Government Printing Office 1948. (Nat. Bur. Standards. Appl. Math. Ser. 4.)
- [3] Nonhebel, G. J.: Recommendations on heights for new industrial chimneys. *J. Inst. Fuel* **33** (1960) S. 479–511. [Ref. Glastechn. Ber. **34** (1961) S. 425.]
- [4] Houghton, H. G. und Chalker, W. R.: *J. opt. Soc. Amer.* **39** (1949) S. 955–957.

78R1197