

Betrachtungen über die thermische Stabilität von Elektrowannen

Von Wolfgang Trier, Frankfurt (Main)

Herrn Prof. Dr. Dr. Ludvik Žagar zum 70. Geburtstag gewidmet

(Mitteilung aus der Hüttentechnischen Vereinigung der Deutschen Glasindustrie e. V., Frankfurt (Main))

(Eingegangen am 7. Oktober 1980)

Die rein elektrische Glasschmelze und bis zu einem gewissen Grad auch die elektrische Zusatzheizung für Glasschmelzöfen gewinnt, bedingt durch erhöhte Umweltschutzauflagen, zunehmendes Interesse. Im Zusammenhang mit den vielen dabei auftretenden technischen Besonderheiten wird auch die Frage der thermischen Stabilität von Elektrowannen verstärkt behandelt. Die Angaben in der

Literatur beschränken sich jedoch meistens auf die elektrischen Eigenschaften der Glasschmelze. Der Temperatureausgleich durch verstärkte Wärmeabgabe wird nicht ausreichend berücksichtigt. Im folgenden soll der Einfluß der Wärmeabgabe durch Strahlung und Leitung mit behandelt werden.

Contribution on the thermal stability of electric furnaces

Increasing interest in all-electric glass melting and in electric boosting is largely due to environmental considerations. Besides the many technical details involved there is also the question of the thermal stability of electric furnaces. Information in the literature is lar-

gely restricted to the electrical properties of the glass melt. Equilibration of temperature with increased heat evolution has not been dealt with in sufficient detail. The influence of heat transfer by radiation and conduction is here discussed.

Considérations sur la stabilité thermique des bassins chauffés à l'électricité

La fusion uniquement électrique et, jusqu'à un certain degré, le chauffage d'appoint électrique des fours de fusion de verrerie, présentent un intérêt croissant par suite de l'augmentation des charges pour la protection de l'environnement. En liaison avec les nombreuses particularités techniques que présente ce mode de chauffage, le problème de la stabilité thermique des bassins chauffés à l'électricité est

étudié plus particulièrement. Les données de la littérature se limitent le plus souvent aux propriétés électriques de la fonte. Il n'est pas tenu suffisamment compte de l'égalisation des températures par un accroissement du dégagement de chaleur. Les déperditions de chaleur par rayonnement et conduction sont ensuite traitées.

1. Elektrischer Widerstand von Glasschmelzen

Nach der bekannten Arrhenius-Gleichung gilt für den elektrischen Widerstand ρ von Glasschmelzen

$$\rho = \rho_0 e^{E_a/R \cdot T}$$

mit E_a als Aktivierungsenergie, R der Gaskonstanten und T der Temperatur. Umgewandelt ergibt sich

$$\log \rho = A + B/T.$$

Für verschiedene Gläser finden sich Angaben für die Konstanten A und B in der Arbeit von Baucke [1]. Der spezifische Widerstand der Gläser in Abhängigkeit von der Temperatur ist aus Bild 1 zu ersehen, die chemische Zusammensetzung aus Tabelle 1.

Als Maß für die Neigung eines Glases zur thermischen Instabilität bei der elektrischen Glasschmelze wird in einer Literatur überwiegend die Änderung seines elek-

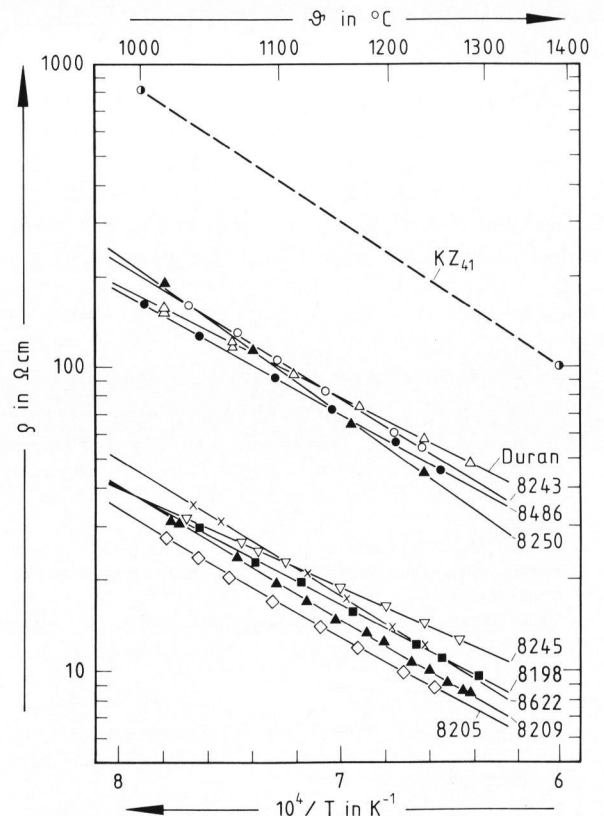


Bild 1. Spezifischer Widerstand verschiedener Gläser nach Baucke [1]. Zusammensetzung der Gläser siehe Tabelle 2. KZ₄₁-schmelzgeossener Korundzirkondioxidstein mit 41 % Zirkondioxid.

Tabelle 1. Chemische Zusammensetzung (Massengehalt in %) der untersuchten Gläser (Bild 1) nach [1]

Glasnummer	SiO ₂	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Li ₂ O	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	BaO	ZnO	CeO ₂	PbO	TiO ₂
Duran 50	80,60	12,80	2,30	—	3,60	0,60	—	—	—	—	—	—	—
8198	66,50	—	3,80	0,25	7,20	7,20	—	—	12,40	—	—	1,70	—
8205	62,50	—	3,50	—	7,90	9,40	2,90	1,00	1,40	—	—	11,20	—
8209	62,30	—	3,30	—	8,80	6,90	2,70	1,70	13,00	—	0,20	—	0,60
8243	67,50	21,30	3,00	—	3,10	4,70	—	—	0,30	—	—	—	—
8245	69,00	17,00	5,20	0,50	7,00	0,10	—	—	—	0,80	—	—	—
8250	68,80	18,50	3,00	0,60	0,90	7,50	—	—	—	0,60	—	—	—
8486	75,60	11,00	3,80	—	4,00	1,00	1,20	—	3,00	—	—	—	—
8622	57,00	1,30	—	—	3,60	9,50	3,80	—	—	—	—	24,50	—

trischen Widerstandes mit der Temperatur bezeichnet, also

$$\frac{dq_{el}}{dT} = \rho'_{el} \quad (1)$$

Gläser mit großen Änderungen neigen stärker zu Instabilitäten als Gläser mit geringer Änderung.

Andrusieczko [2] weist mit einer gewissen Berechtigung darauf hin, daß für das Verhalten in der Praxis nicht ρ'_{el} maßgebend ist, sondern das Verhältnis der Leistungsänderung zur aufgenommen Leistung. Damit wird

$$\frac{dW/dT}{W} = \frac{\rho'_{el}}{\rho_{el}} \quad (2)$$

An Hand von Beispielen zeigt er, daß die Relation ρ'_{el}/ρ_{el} eine von ρ'_{el} abweichende Charakteristik aufweisen kann.

Während die Betrachtung der Instabilität über ρ'_{el} nur das Glas mit seinen elektrischen Eigenschaften, losgelöst vom Schmelzofen beinhaltet, umfaßt das Verhältnis ρ'_{el}/ρ_{el} bereits implizit den Anwendungsfall im Ofen, nämlich die eingesetzte elektrische Leistung. Die thermischen Eigenschaften des Glases bleiben bei dieser Betrachtung aber immer noch unberücksichtigt.

2. Berücksichtigung der Wärmeabgabe der Glasschmelze

Bei den bisherigen Betrachtungen wurde nur die elektrische Leitfähigkeit der Glasschmelze berücksichtigt. Für die thermische Stabilität ist jedoch nicht nur die Energieaufnahme, sondern auch die Energieabgabe von Bedeutung. Für die thermische Instabilität eines lokalen Volumenbereiches kann man schreiben

$$\frac{dW/dT}{dq/dT} = D,$$

wenn mit dW/dT die Änderung der elektrischen Leistungsaufnahme mit der Temperatur T und mit dq/dT die Änderung der Wärmeabgabe mit der Temperatur bezeichnet werden. Für $D > 1$ ist der Volumenbereich thermisch instabil, für $D < 1$ ist er stabil.

Für die elektrische Leistung W gilt

$$W = I^2 \cdot \rho_{el} \quad \text{und} \quad \frac{dW}{dT} = I^2 \cdot \rho'_{el}.$$

Bezeichnet man mit T_u die Umgebungstemperatur und mit l die lineare Ausdehnung des betrachteten Volumenbereiches der Temperatur T , dann wird für die Wärmeabgabe q

$$q = \frac{T - T_u}{l} \left[(\kappa_L + \kappa_{Str}) \cdot \frac{F}{V} + k_0 \right],$$

wobei mit κ_L die Wärmeleitung der Schmelze, mit κ_{Str} die Strahlungsleitfähigkeit und mit k_0 der konvektive Anteil bezeichnet werden. V ist der Volumenbereich und F die Fläche des Volumenbereiches. Für dq/dT ergibt sich

$$\frac{dq}{dT} = \frac{(\kappa_L + \kappa_{Str}) \cdot \frac{F}{V} + k_0}{l}.$$

Nach den Arbeiten von Genzel [3] gilt mit guter Näherung

$$\kappa_{Str} = \frac{16}{3} \sigma n^2 T^3 \cdot \mathcal{F}.$$

\mathcal{F} bedeutet dabei die mittlere freie Weglänge der Strahlungsquanten, n den Brechungsindex und σ die Strahlungskonstante. Für verschiedene Gläser und Temperaturbereiche kann \mathcal{F} aus Tabelle 2 entnommen werden.

Tabelle 2. Mittlere freie Weglänge der Strahlungsquanten \mathcal{F} (in cm)

	Temperatur in K					
	1300	1400	1500	1600	1700	1800
Wirtschaftsglas	4,16	3,92	4,32	4,78	4,96	5,17
Fensterglas	5,71	5,00	3,74	3,29	3,52	3,49
Grünglas (Eisengrün)	0,424	0,380	0,345	0,308	0,332	0,334
Röntgen-schutzglas	1,43	1,103	0,691	0,508	0,594	0,537

Für den Instabilitätsfaktor D kann man somit schreiben

$$D = \frac{I^2 \cdot \rho'_{el} \cdot l}{\left(\kappa_L + \frac{16}{3} \sigma n^2 T^3 \cdot \mathcal{F}\right) \frac{F}{V} + k_0}$$

Im Bereich des Glasbades einer Glasschmelzwanne ist κ_L bedeutend kleiner als κ_{Str} , wie aus Bild 2 hervorgeht. Im allgemeinen wird auch der konvektive Anteil k_0 gegenüber der Strahlung vernachlässigt werden können. Für einen Würfel mit der Kantenlänge l gilt $F/V = 6/l$. Damit ergibt sich bei Dominanz der Wärmestrahlung für die thermische Instabilität der dimensionslose Ausdruck

$$D_{Str} = \frac{I^2 \cdot \rho'_{el} \cdot l^2}{32 \sigma n^2 T^3 \cdot \mathcal{F}}$$

D_{Str} hat den Charakter einer thermischen Kennzahl. Die thermische Stabilität $1/D_{Str}$ nimmt mit steigender Temperatur und großer freier Weglänge (helles Glas) stark zu. Sie nimmt ab mit der Strombelastung (I^2), dem Gradienten des elektrischen Widerstandskoeffizienten ρ'_{el} des Glases und der geometrischen Ausdehnung des betrachteten Bereiches (l).

3. Verhalten des feuerfesten Materials

Nach Untersuchungen von Hammerschmidt und Hausner [4] ist bekannt, daß die schmelzgegossenen Wannensteine und hier besonders die mit Glas infiltrierten heißen Randbereiche der Steine eine fühlbare elektri-

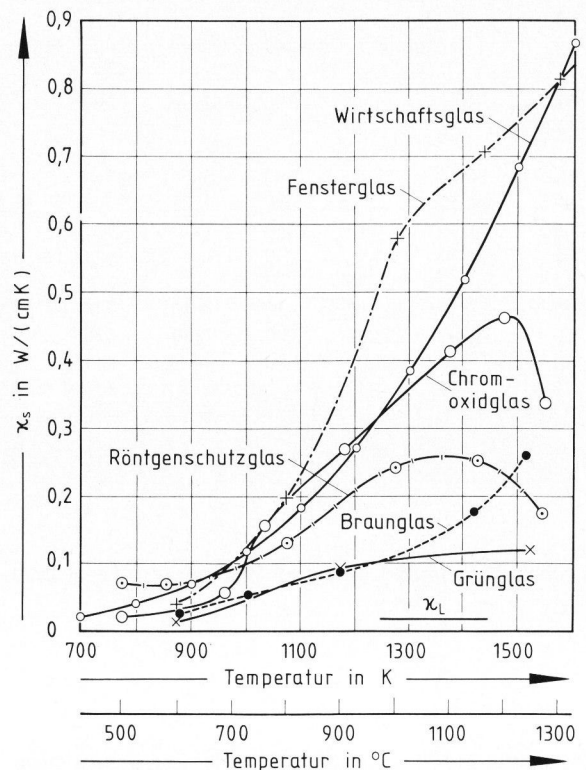


Bild 2. Verlauf der Strahlungsleitfähigkeit einiger Gläser mit der Temperatur [3]. κ_L = mittlerer Wert der echten Wärmeleitfähigkeit, wie er bei niedrigen Temperaturen bekannt ist (zum Vergleich).

sche Leitfähigkeit besitzen (Bild 1). Der Temperaturgradient von ρ_{el} hat die gleiche Größenordnung wie der der Glasschmelze. Demgegenüber beschränkt sich die Wärmeabgabefähigkeit vornehmlich auf die Wärmeleitung, hinzu kommt, daß der konvektive Anteil k_0 Null ist. Mit $\mathcal{F} = 0$ und $k_0 = 0$ wird für D

$$D_{ff} = \frac{6 I^2 \cdot \rho'_{el} \cdot l^2}{\kappa_L}$$

Im Bereich der feuerfesten Steine können damit in Nähe der Elektroden, wo höhere Stromdichten auftreten, durchaus thermische Instabilitäten entstehen. Die Gefahr des Auftretens thermischer Instabilitäten liegt somit wegen des dominanten Einflusses von T^3 im Bereich niedriger Temperaturen mit relativ hohen Stromdichten.

4. Literatur

- [1] Baucke, F. G. K. und Frank, W. A.: Conductivity cell for molten glasses and salts. Glastechn. Ber. **49** (1976) S. 157–161.
- [2] Andrusieczko, A.: Niektóre problemy elektrycznego topienia i podgrzewania masy szklanej. – Szkło i Ceram. **16** (31) (1965) S. 209–212.
- [3] Genzel, L.: Zur Berechnung der Strahlungsleitfähigkeit der Gläser. Glastechn. Ber. **26** (1953) S. 69–71.
- [4] Hammerschmidt, R. und Hausner, H.: Elektrische Leitfähigkeit von feuerfesten Baustoffen für die Glasindustrie. Abschlußbericht des AIF-Forschungsvorhabens Nr. 3700. (Der Bericht befindet sich in der Bibliothek der Deutschen Glastechnischen Gesellschaft und wird Interessenten auf Wunsch als Xerokopie zur Verfügung gestellt.)