

dienten quer zur Stromrichtung. Da der Geschwindigkeitsausgleich in dem Bereich, in dem der Strahl Substanz aus seiner Umgebung aufnimmt, nur sehr langsam vonstatten geht und dieser Bereich proportional der Brennraumhöhe ist, nimmt der Anteil des Oberofens, der nahezu als Kolbenströmung durchströmt wird, umgekehrt proportional zur Brennraumhöhe h zu. Zur qualitativen Festlegung des Mischungsgrades in dem Teil des Oberofens, der als Mischer wirkt, vergleicht man die gemessene Verteilung mit der, die man bei idealer Vermischung erhält, und bezieht zu diesem Zweck die Summenkurven auf die Zeit $\frac{t-t_{\min}}{t_{\text{th}}}$ (Bild 27). Wie zu erwarten war, liegen sämtliche Verteilungen zwischen den beiden idealen Strömungen (Kolbenströmung und idealer Mischer). Die intensivste Vermischung des eintretenden Stoffstroms mit dem Oberofeninhalte findet in den Stirnbrennerwannen statt. Wesentlich schwächer ist diese Vermischung bei ölbeheizten Querbrennerwannen und ist am geringsten bei gasbeheizten Querbrennerwannen. Die sehr intensive Vermischung des Frischzulaufes mit dem Oberofeninhalte dürfte vom wärmetechnischen Standpunkt — es werden zuviel Rauchgase in den Brennstoffstrom eingemischt — genau so wenig erwünscht sein wie die sehr schwache Vermischung bei Gasbeheizung.

5. Zusammenfassung

Nach einer kurzen Zusammenfassung der theoretischen Grundlagen des Verweilzeitverhaltens werden die Möglichkeiten zur Messung der Verweilzeit der Gase im Oberofen einer Glasschmelzwanne diskutiert und die Meßapparatur beschrieben.

6. Literatur

- [1] ZENKNER, K.: Verweilzeit der Brenngase im Feuerraum einer Glasschmelzwanne. Glastechn. Ber. **40** (1967) S. 425—432.
- [2] BRÜNING, R.: Untersuchungen an U-Flammenwannen. Teil III. Aufenthaltszeitverteilung. Glastechn. Ber. **41** (1968) S. 408—413.
- [3] SCHÜMMER, P.: Beiträge zur Methode der Indikator-Modulation — vornehmlich der periodischen Modulation — für die Untersuchung von Vorgängen in verfahrenstechnischen Reaktionsstrecken. Bericht der Forschungsgesellschaft für Verfahrenstechnik (GVT).
- [4] DANKWERTS, P. V.: Continuous flow systems. Distribution of residence times. Z. chem. Eng. Sci. **2** (1953) S. 1—3.
- [5] MULFINGER, H. O. und SCHOLZE, H.: Löslichkeit und Diffusion von Helium in Glasschmelzen. I und II. Glastechn. Ber. **35** (1962) S. 466—478, 495—500.
- [6] LEE, K. B.: Recirculation distribution in enclosed turbulent jet flames. (Unveröffentlichter Bericht der IFRF. Doc. Nr. G/2/a/2. Mai 1962.)
- [7] TERADA, K. und WAKAMATSU, M.: Grundlegende Untersuchungen über Glasschmelzwannen, Teil I. Modelluntersuchungen über die Glasströmungen in U-Flammenwannen bei Verwendung von Wasser und heißen Gasen als Modellsubstanzen. (Orig. jap. mit engl. Zsfssg.) J. ceram. Assoc. Japan **67** (1959) S. 61—70. [Ref. Glastechn. Ber. **33** (1960) S. 313.]
- [8] EICKHOFF, H.: Der Strömungsverlauf in eingeschlossenen Strahlflammen. Internat. Z. Gaswärme **15** (1966) S. 334 bis 339. [Ref. Glastechn. Ber. **40** (1967) S. 362.] (48545)

DK 666.1.031.2:662.614:66.012.3:666.1.031.13

Wärmetechnisches Verhalten von Glasschmelzwannenöfen

Teil II: Einfluß der Brennstoffverteilung auf den Wärmeverbrauch*)

Von WOLFGANG TRIER und HANS-JÖRG VOSS, Frankfurt (Main)

(Mitteilung aus der Hüttentechnischen Vereinigung der Deutschen Glasindustrie (HVG), Frankfurt (Main))

(Eingegangen am 20. September 1968)

Ein für gleichmäßige Brennstoffenergieverteilung entwickeltes mathematisches Modell für den Wannenofen wird dahingehend erweitert, daß der Einfluß unterschiedlicher Energieverteilung auf Schmelz- und Läuterzone der Wanne hinsichtlich des spezifischen Wärmeverbrauches der Anlage abgeschätzt werden kann. Daneben wird die Auswirkung einer Veränderung des Verhältnisses der prozentualen Abschmelzleistungen von der Ober- und Unterseite des Gemengeteppichs untersucht.

In der Praxis spielt die Verteilung des Brennstoffes über der Wannenlängsachse eine große Rolle. Die Auffassungen, welche Verteilung im Einzelfall die besten

Die Analyse der gemessenen Verweilzeitverteilungen, die sich als unabhängig vom Ort des Eintritts in den Oberofen erwiesen, ergab, daß der Oberofen zum Teil in Form einer Kolbenströmung mit Längsmischung durchströmt wird und zum Teil als Mischer wirkt, dem eine Rückströmung überlagert. Während über die Längsmischung abhängig von der Ofenkonstruktion nichts Näheres ausgesagt werden kann, ergab sich für den Mischgrad, der für die Kolbenströmung gleich Null und für die ideale Vermischung unendlich ist, daß dieser bei stirnbeheizten Wannen am größten ist, d. h. die Vermischung des frisch eintretenden Brennstoff-Luft-Gemisches mit dem Ofeninhalte ist bei diesen Wannen sehr intensiv, was vor allem auf den sehr langen Mischweg zurückzuführen sein dürfte.

Mit Hilfe der beschriebenen Meßverfahren gelang es auch, den Stoffaustausch zwischen den einzelnen Brennern, der impulsabhängig ist, und dessen Einfluß auf das Zeitverhalten zu ermitteln.

Da die Fläche unter den gemessenen Verteilungen dem Gasstrom proportional ist, läßt sich für den Anteil des Stoffstroms, der ohne Queraustausch den Oberofen durchströmt, eine Aufteilung in Haupt- und Rückstrom durchführen. Je nach Zerstäuberdurchsatz und Brennraumhöhe variiert die Rückstrommenge, die mit der nach einem modifizierten Craya-Curtet-Berechnungsverfahren ermittelten übereinstimmt, zwischen 10 und 25% des gesamten eintretenden Stoffstroms.

Die Autoren danken der Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen (AIF), Köln, und dem Bundeswirtschaftsministerium, Bonn, für die Bereitstellung der finanziellen Mittel.

Gedankt sei Herrn Ing. H. BEINE und Herrn Techn. W. MERGLER für die Hilfe bei der Versuchsdurchführung.

*) Teil I. Glastechn. Ber. **41** (1968) Nr. 6, S. 217—229. Die Numerierung von Gleichungen und Bildern wird fortlaufend zu Teil I vorgenommen.

Ergebnisse hinsichtlich Glasqualität und geringem Brennstoffverbrauch bei hohen Schmelzleistungen liefert, gehen weit auseinander. Während früher eine stärkere Brennstoffbelastung des Einschmelzbereiches als vorteilhafter betrachtet wurde, hat sich bei hochbelasteten Hohlglaswannen mehr und mehr die Gepflogenheit einer gleichmäßigen Brennstoffbelastung durchgesetzt.

Eine Diskussion dieser Frage mit den Praktikern der Betriebe verlief bisher immer etwas unbefriedigend, da wegen der vielfältigen Einflüsse die Beobachtungen an der Wanne selbst in einem weiten Bereich streuen, was im Endeffekt zur Folge hat, daß mehr Auffassungen und Meinungen als fundiertes Wissen geäußert werden. Hinzu kommt, daß selbst bei richtiger Beobachtung die Frage nach dem Warum offen bleibt.

Eine Möglichkeit, auch in diesem Bereich die Zusammenhänge klar zu erkennen und zu fundierten Aussagen zu kommen, bildet eine Erweiterung und Modifizierung des von den Verfassern entwickelten Rechenmodells [1]. Man kann bei diesem Vorgehen noch einen Schritt weitergehen und nicht nur den Einfluß der Brennstoffverteilung über der Längsachse der Anlage untersuchen, sondern auch die Frage des Abschmelzens des Gemenges von oben (Flamme) und unten (Glasbad) mit untersuchen. Wenn auch das Ausmaß der Abschmelzleistung von unten (Glasbad) nur sehr bedingt beeinflußt werden kann, so bietet das Erkennen der Zusammenhänge doch die Möglichkeit, sich den als optimal erkannten Verhältnissen durch verschiedene Maßnahmen anzunähern. In diesem Zusammenhang taucht auch die Frage der elektrischen Zusatzheizung auf. Auch dieser Komplex ist über eine Erweiterung des Rechenmodells der theoretischen Behandlung zugänglich. Die vorliegende Arbeit beschränkt sich auf die Frage der Brennstoffverteilung und der Abschmelzleistung des Gemenges durch Flamme und Glasbad. Der Einfluß der elektrischen Zusatzheizung soll in einer später folgenden Arbeit behandelt und diskutiert werden.

1. Aufbau eines mathematischen Modells für den Wannenofen

1.1. Grundlagen des Modells

In [1] wurde über die Entwicklung und Aussagefähigkeit eines neuartigen mathematischen Modells eines querbeheizten Wannenofens berichtet.

Der Einschmelzvorgang des Gemenges und der Läutervorgang des Glases wurden hierbei in formelmäßigen Zusammenhang mit der Wärmeenergiezufuhr im Oberofen und Glasbad gebracht, wozu die Wanne in zwei Bereiche, den Schmelz- und den Läuterbereich, unterteilt und für beide Abschnitte getrennte Wärmebilanzen und Wärmeübertragungsgleichungen aufgestellt wurden. Ferner wurde die Bedeckung des Bades mit Gemenge berücksichtigt und in Anlehnung an in der Praxis durchgeführte Messungen der Oberflächentemperaturverlauf der mit Gemenge bedeckten und der gemengefreien Badfläche in Richtung der Wannenlängsachse in die Gleichungen eingeführt. Durch Miteinbeziehen der Glastemperatur am Ende der Schmelz- und Läuterwanne und der Aufenthaltszeit des Glases im Läuterbereich gelang es, den Begriff der Glasqualität mit zu berücksichtigen. Über den Erwärmungsvorgang des

Gemenges und des erschmolzenen Glases kommt der instationäre Charakter des Einschmelz- und Läutervorganges zur Geltung.

1.2. Aussagefähigkeit des bisherigen Modells

Mit den bisher entwickelten Gleichungen läßt sich z. B. folgendes abschätzen: die spezifische Schmelzleistung in kg Glas/m² 24 h in Abhängigkeit von der spezifischen Brennstoffwärmezufuhr in kcal/m² h, der spezifische Wärmeverbrauch in kcal/kg Glas in Abhängigkeit von der spezifischen Schmelzleistung, die Dicke des Gemenge Teppichs in Abhängigkeit von der spezifischen Wärmezufuhr oder der spezifischen Schmelzleistung, die notwendige Gemengevorschubgeschwindigkeit und das sich einstellende Bereichslängenverhältnis zwischen Schmelz- und Läuterbereich der Wanne. Bei allen diesen Zusammenhängen kann der Einfluß der Oberofenverluste, des Kammerwirkungsgrades, der Bedeckung des Bades mit Gemenge im Schmelzbereich, der spezifischen Wärme des Glases, der Aufenthaltszeit des Glases im Läuterbereich und der Art des Brennstoffes abgeschätzt werden.

Das entwickelte Gleichungssystem liefert beim Einsetzen der aus Messungen bekannten Parameterwerte gut mit der Praxis übereinstimmende Daten.

2. Erweiterung des Modells auf unterschiedliche Energiedichteverteilung

Den bisherigen Betrachtungen liegt eine gleichmäßige Brennstoffenergiedichte q_B/B in kcal/m² h über der gesamten Länge der Wanne und prozentual gleiches Abschmelzen des Gemenge Teppichs von seiner Ober- und Unterseite ($\varphi = 0,5$) zugrunde.

Wählt man nun die Brennstoffenergiedichte in der Schmelzzone der Wanne verschieden von der Brennstoffenergiedichte in der Läuterzone und variiert zudem noch das Verhältnis der Anteile der Abschmelzleistungen von der Ober- und Unterseite des Gemenge Teppichs, dann ergeben sich die in Abschnitt 3. geschilderten Zusammenhänge.

Alle anderen in [1] getroffenen Vereinbarungen für die Rechnung sollen gleich bleiben. Der prozentuale Anteil des Abschmelzens des Gemenge Teppichs von seiner Unterseite her wurde über 50% ($\varphi = 0,5$), 30% ($\varphi = 0,7$) und 10% ($\varphi = 0,9$) variiert. Die für das Abschmelzen von unten her notwendige Wärme wird im Läuterbereich in das Glasbad zusätzlich eingestrahlt und über Glasströmungen in den Schmelzbereich der Wanne transportiert (Bild 15).

Bezeichnet man die Brennstoffenergiedichte im Läuterbereich der Wanne mit q_{B2}/B , dann sei die Brenn-

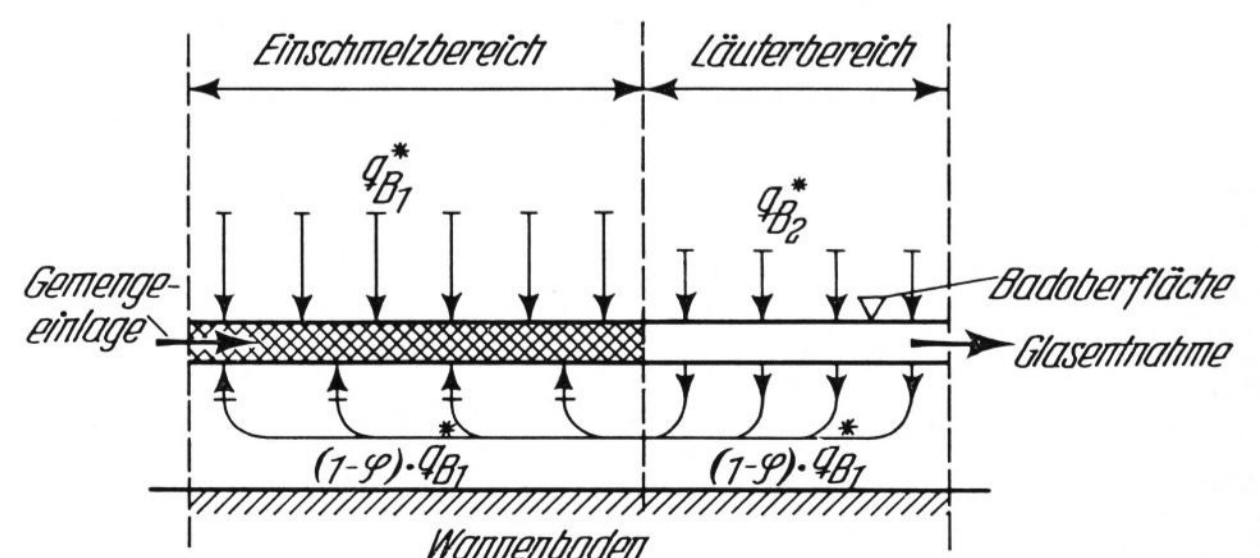


Bild 15. Schema der Wärmeenergiezufuhr.

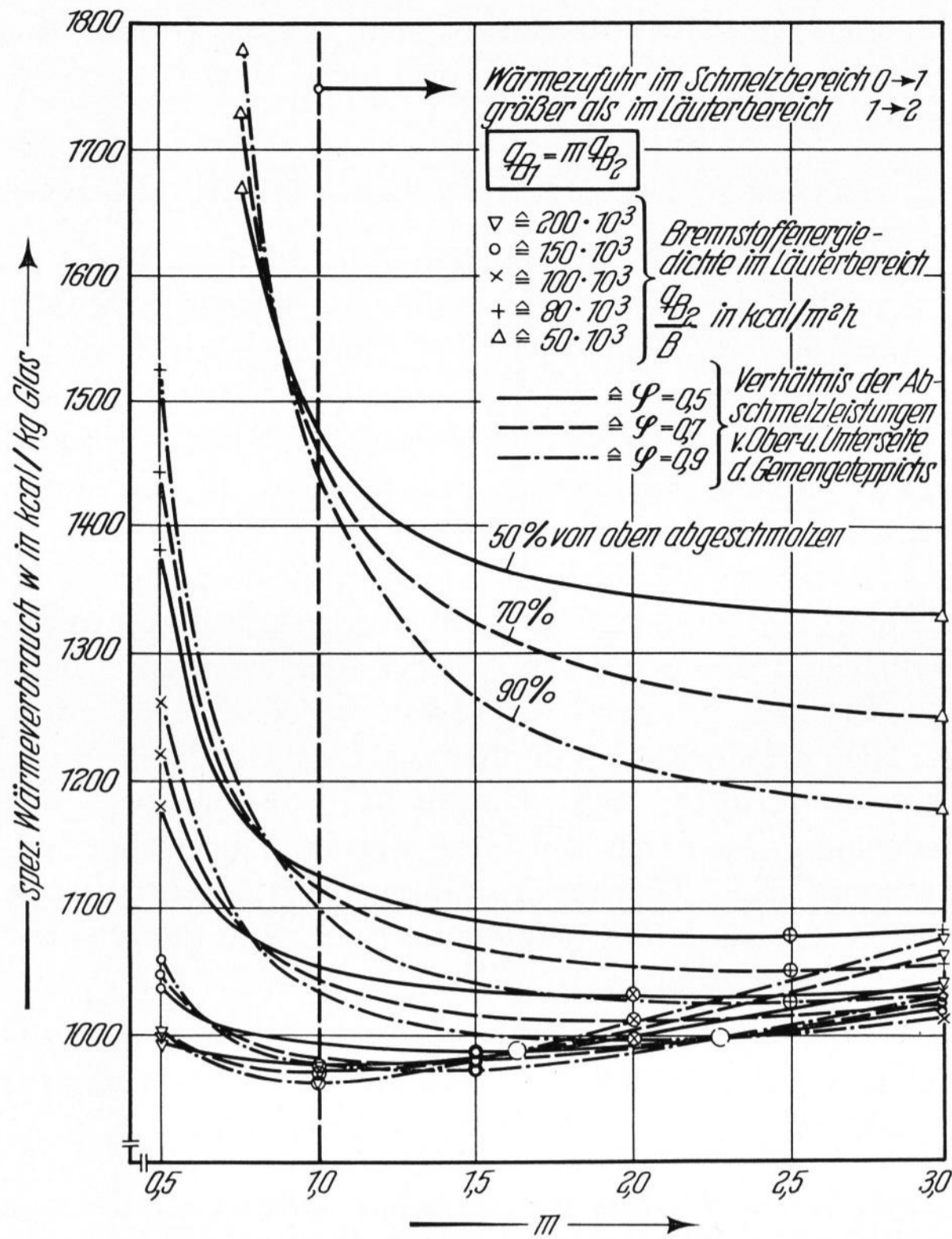


Bild 16. Einfluß der Brennstoffenergiedichte-
verteilung m auf den spezifischen Wärmeverbrauch. Vollkommen geschlossene
Gemengedecke im Schmelzbereich (C = 0).

a = 20 · 10³ kcal/m² h Oberofenverluste,
c_{mGlas} = 0,4 kcal/kg grd (einschließlich Reaktionswärmen und Enthalpie
der Gemengegase). K₁ = 0,43 · 10⁻³, η_k = 0,65.

stoffenergiedichte in der Schmelzzone q_{B1}/B um den
Faktor m davon verschieden, d. h.

$$q_{B1} = m q_{B2} \tag{27}$$

Hierbei bedeutet m > 1 größere Energiedichte im
Schmelzbereich als im Läuterbereich der Wanne, m = 1
charakterisiert eine gleichmäßige Brennstoffenergiedichte
für die gesamte Schmelz- und Läuterwanne.

Die Brennstoffenergiedichten im Einschmelzbereich
(q_{B1}) und im Läuterbereich (q_{B2}) sind, bedingt durch die
Feuerungsverluste und die Wärmeverluste des Ober-
ofens, größer als die vom Gemenge und dem läuternden
Glas aufgenommenen Wärmeenergiedichten q_{B1}^{*} und
q_{B2}^{*}, was beim Vergleich zwischen der Schemadarstellung
(Bild 15) und Gleichung (27) beachtet werden muß.

$$\frac{G}{Fk} \left\{ \frac{\xi \left[\frac{q_{B2}}{B} \cdot \frac{K_1(1-\eta_k)}{(1-C)} + \frac{k}{(1-C)} \right]}{\left[\frac{q_{B2}}{B} K_1(1-\eta_k) + kC \right]} \cdot \ln \left(\frac{\frac{q_{B2}}{B} [1-K_1(1-\eta_k) \vartheta_{G,1}] + kC (\vartheta_{G,2} - \vartheta_{G,1}) - a - \frac{2b}{B}}{\frac{q_{B2}}{B} [1-K_1(1-\eta_k) \vartheta_{G,2}] - a - \frac{2b}{B}} \right) + \right. \\ \left. + \frac{\frac{\varphi}{1-C} \vartheta_{G,1} \left[\frac{q_{B1}}{B} K_1(1-\eta_k) + k \right] + 2 \frac{b'Fk}{L_2 G}}{\frac{q_{B1}}{B} [1-K_1 \vartheta_{G,1} (1-\eta_k)] - \frac{kC}{2} (\vartheta_{G,1} - \vartheta_{G,2}) - a - \frac{2b}{B}} \right\} = 1. \tag{28}$$

Aus der Brennstoffzufuhr im Schmelzbereich 0 → L₁
und der im Läuterbereich (L₂ - L₁) ergibt sich die ins-
gesamt zugeführte Brennstoffmenge zu

$$q_B L_2 = q_{B1} L_1 + q_{B2} (L_2 - L_1). \tag{29}$$

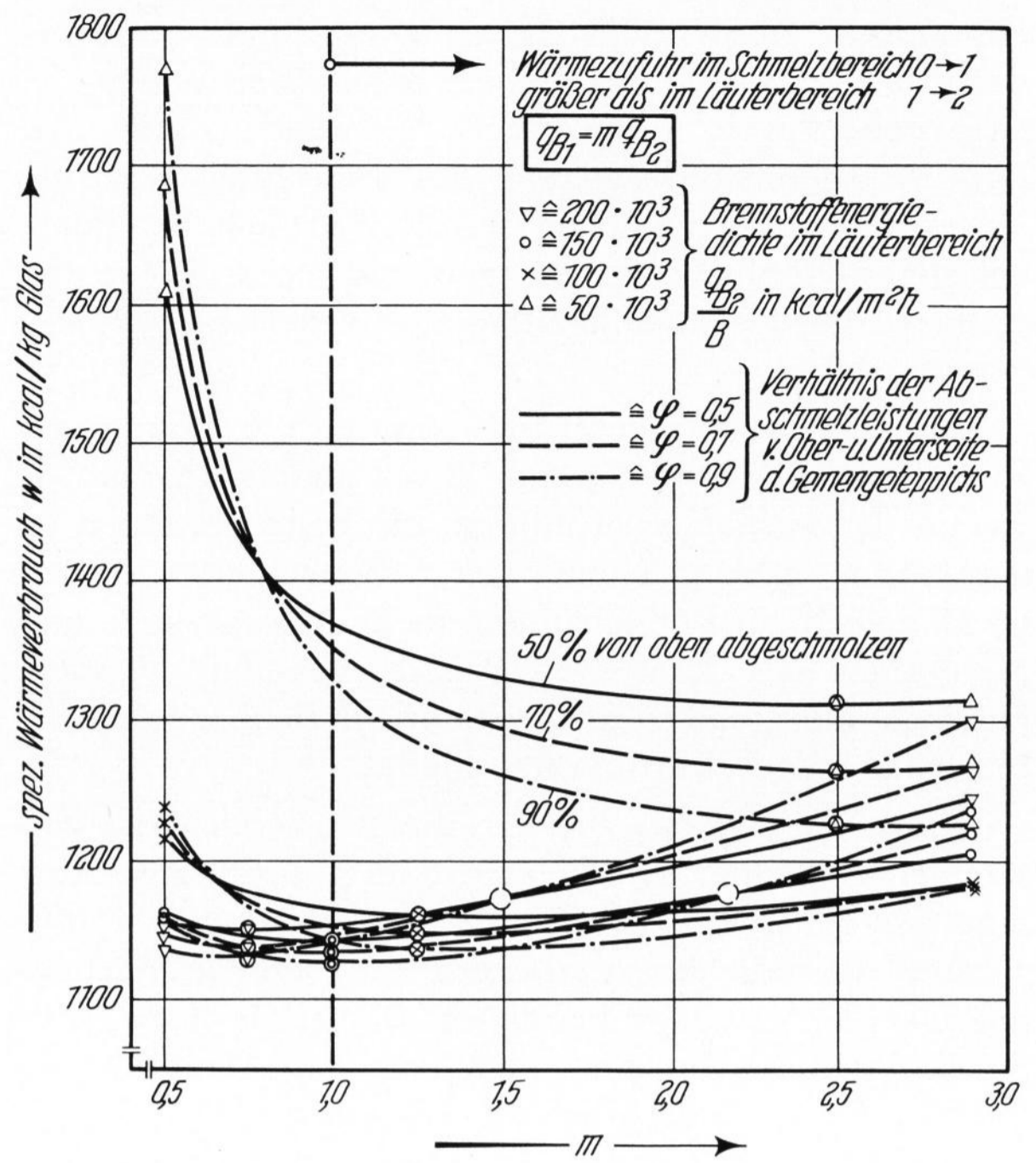


Bild 17. Einfluß der Brennstoffenergiedichte-
verteilung m auf den spezifischen Wärmeverbrauch. 80% des Schmelzbereiches
mit Gemenge bedeckt (C = 0,2).

a = 20 · 10³ kcal/m² h Oberofenverluste,
c_{mGlas} = 0,4 kcal/kg grd, K₁ = 0,43 · 10⁻³, η_k = 0,65.

Die Ableitung der den Gesamtvorgang beschreiben-
den Gleichung wird erleichtert und abgekürzt, wenn
man den in [1] dargelegten Gedankengängen folgt und
die dort verwendeten Bezeichnungen übernimmt.

Die Wärmebilanzen (1) und (5) für Schmelz- und
Läuterzone bleiben im Aufbau gleich. In (1) wird q_B
durch q_{B1}, in (5) q_B durch q_{B2} ersetzt.

Damit gelten auch weiterhin die Beziehungen (9)
und (10) in ihrem Aufbau, allerdings mit entsprechend
veränderten Bezeichnungen für die Brennstoffenergiedichten.
In Gleichung (9) wird q_B durch q_{B2} ersetzt, in
Gleichung (10) q_B durch q_{B1}.

Führt man die so abgeänderte Gleichung (10) in die
ebenfalls abgeänderte Gleichung (9) ein, dann ergibt
sich durch Umformen und Zusammenfassen Gleichung (28)
als neue Bestimmungsgleichung für die spezifische
Schmelzleistung bei unterschiedlichen Energiedichten
in der Schmelz- und Läuterzone:

Mit Gleichung (27) erhält man nach einigen Zwi-
schenrechnungen

$$\frac{q_B}{B} = \frac{q_{B2}}{B} \left[\frac{L_1}{L_2} (m-1) + 1 \right]. \tag{30}$$

Der Wert $\frac{L_1}{L_2}$ errechnet sich aus Gleichung (17). Der hierbei benötigte Zahlenwert für die Schichtdicke d ist aus der modifizierten Gleichung (15) zu ermitteln, in der q_B durch q_{B2} ersetzt wird.

3. Diskussion der Ergebnisse

Setzt man in Gleichung (28) für einzelne Parameter dem praktischen Wannenbetrieb entsprechende Zahlenwerte ein, dann lassen sich Zusammenhänge zwischen interessierenden Größen, wie z. B. spezifischer Wärmeverbrauch und Brennstoffverteilung, erkennen, die grafisch anschaulich dargestellt werden können. Die Zahlenwerte wurden, um den Anschluß an die bisherigen Ergebnisse zu finden, dem in [1] gewählten Beispiel entsprechend gewählt. Es muß hier allerdings ausdrücklich darauf aufmerksam gemacht werden, daß die Gleichung (28) allgemein gilt. Beschränkt man sich auf die Zusammenhänge der einzelnen Größen, dann gelten die Ergebnisse der folgenden Abschnitte nicht nur für das gewählte Zahlenbeispiel, sondern allgemein, vorausgesetzt, daß man sich nicht zu stark von den Ausgangsdaten entfernt, was für normale Betriebszustände zutrifft.

3.1. Einfluß der Brennstoffenergiedichte

Geht man von einer vollkommen geschlossenen Gemengedecke ($C = 0$) im Einschmelzbereich aus (der Läuterbereich ($L_1 - L_2$) ist gemengefrei!) und trägt den sich unter verschiedenen Bedingungen einstellenden spezifischen Wärmeverbrauch (kcal/kg Glas) über dem Brennstoffenergiedichteverhältnis m auf, dann ergeben sich die in Bild 16 wiedergegebenen Zusammenhänge. Während bei geringer Energiedichte (z. B. $50 \cdot 10^3$ kcal/m² h) der spezifische Wärmeverbrauch mit zunehmendem m (höhere Brennstoffbelastung des Einschmelzbereiches) abnimmt, verändert sich das Bild mit höher werdender Energiedichte. Die Kurven verschieben sich in den Bereich geringeren Wärmeverbrauchs, und vor allem tritt eine Drehung nach links auf, was bedeutet, daß bei diesen Betriebszuständen eine Veränderung der Brennstoffverteilung mit einer Verlagerung

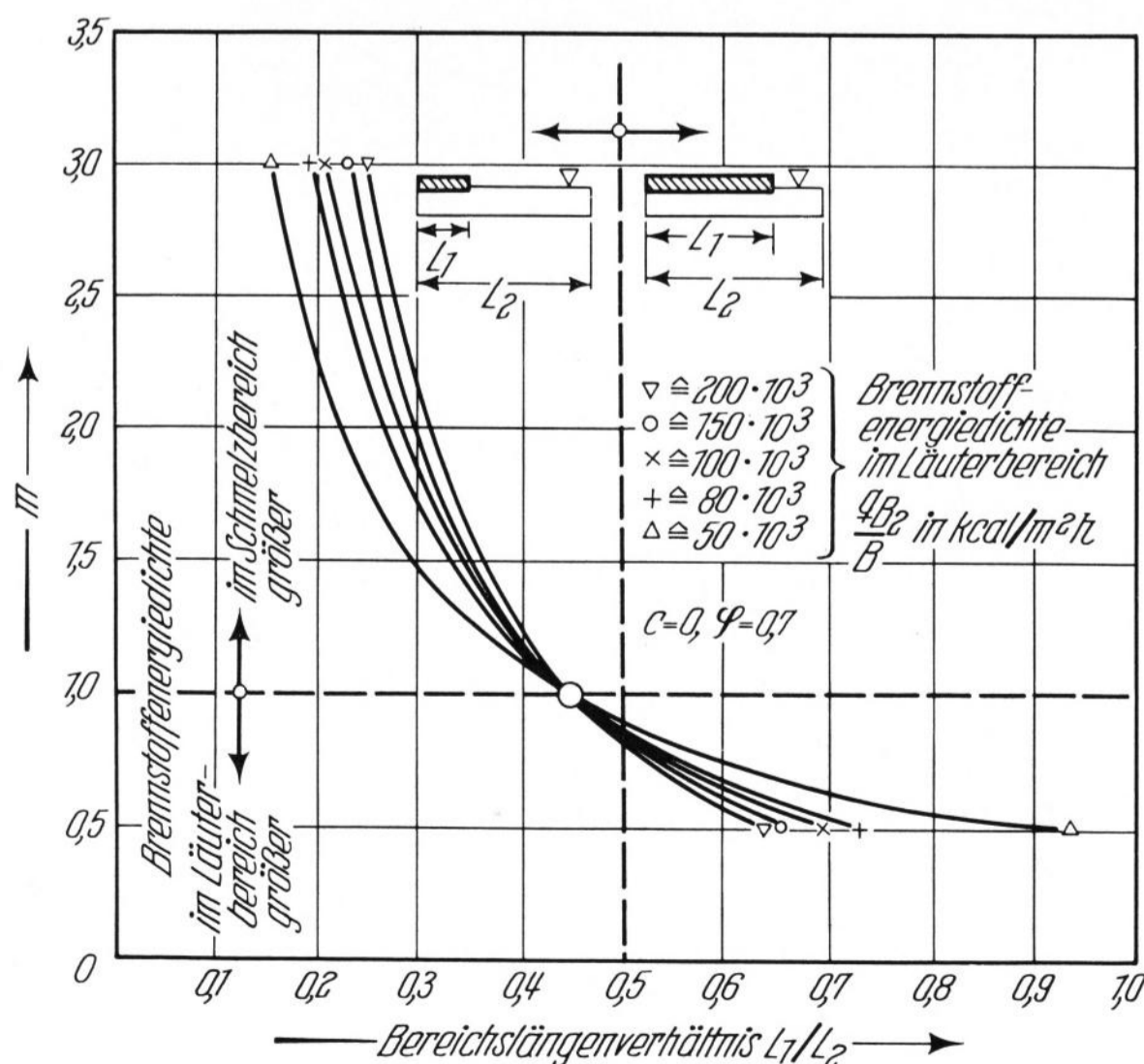


Bild 18. Zusammenhang zwischen dem Bereichslängenverhältnis L_1/L_2 und dem Brennstoffenergiedichteverhältnis m .
 $a = 20 \cdot 10^3$ kcal/m² h Oberofenverluste,
 $c_{mGlas} = 0,4$ kcal/kg grd, $K_1 = 0,43 \cdot 10^{-3}$, $\eta_k = 0,65$.

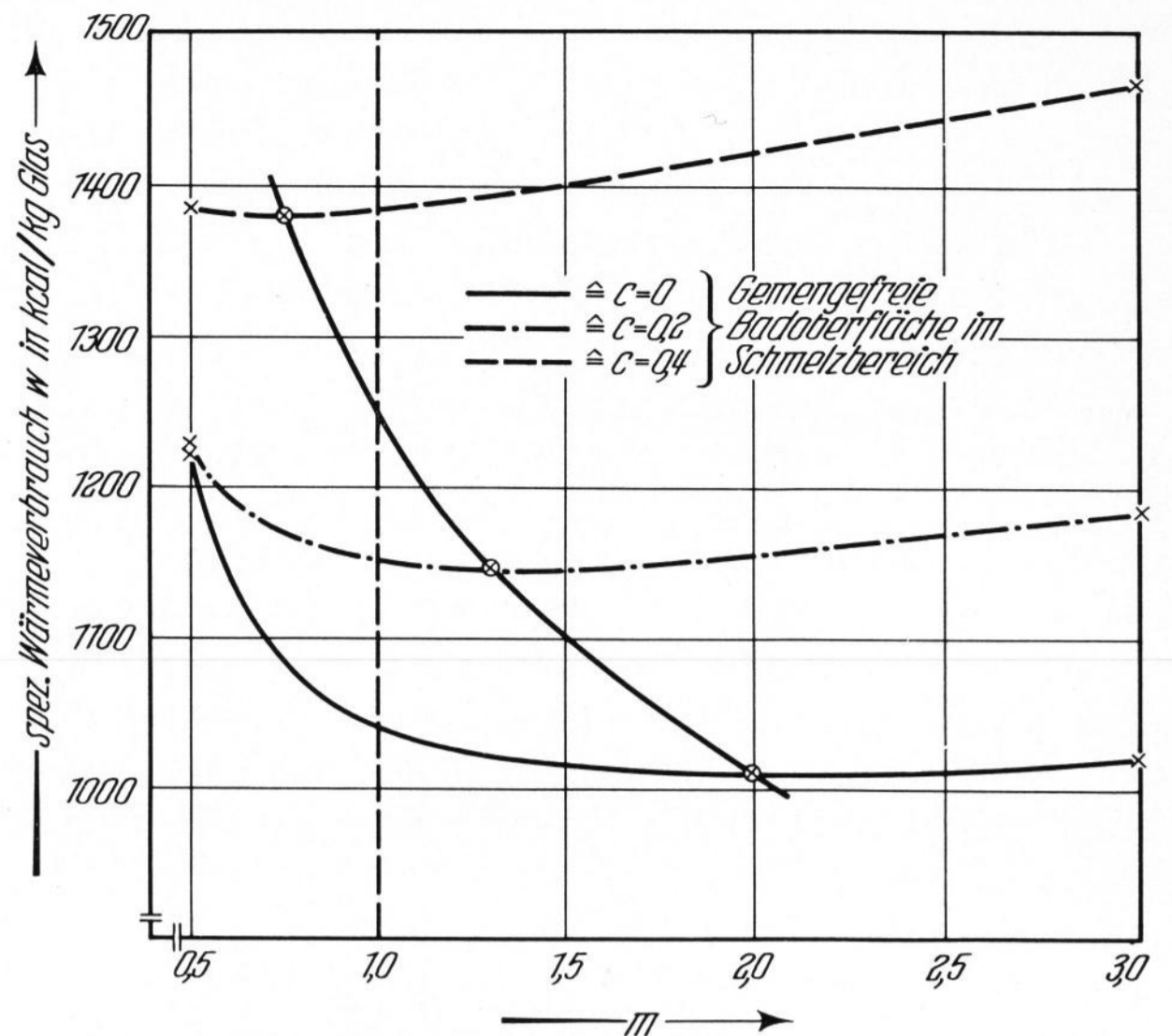


Bild 19. Einfluß der Gemengebedeckung des Schmelzbereiches auf die optimale Brennstoffenergiedichteverteilung.

vom Einschmelzbereich in Richtung Läuterbereich günstiger ist. Es kommt zur Ausbildung von Minima, die bei sehr hohen Energiedichten ($200 \cdot 10^3$ kcal/m² h im Läuterbereich), wie sie nur bei extrem hoch belasteten Anlagen auftreten, im Bereich von $m = 1$ liegen.

Geht man vom Idealfall $C = 0$ ab und untersucht die Verhältnisse bei $C = 0,2$ (80% der Einschmelzfläche ist mit Gemenge bedeckt oder trägt zum direkten Einschmelzen bei), dann ergeben sich die in Bild 17 dargestellten Zusammenhänge. Im Grundsätzlichen besteht gegenüber $C = 0$ (Bild 16) kein Unterschied. Bemerkenswert ist jedoch das Zusammendrängen der Kurven mittlerer und hoher Energiedichten im Bereich von $m = 0,9$ bis 1,5. Die Minima sind sehr flach geworden. Dieser Befund zeigt, daß bei Wannen mit guter Gemengebedeckung und einer Brennstoffenergiebelastung, wie sie heute bei hochbelasteten Hohlglaswannen üblich ist, die Brennstoffverteilung über der Längsachse der Wanne in einem weiten Bereich von m nur einen sehr untergeordneten Einfluß auf den spezifischen Brennstoffverbrauch ausübt. Dies steht im Einklang mit den Beobachtungen und Erfahrungen der Praxis. Wannen mit geringer Energiebelastung, wie sie früher besonders bei Generatorgasbeheizung die Regel waren, erfordern jedoch eine stärkere Verlagerung des Brennstoffes zum Einschmelzbereich ($m > 1$). Auch dieser Befund steht im Einklang mit den Beobachtungen der Praxis.

3.2. Abschmelzen des Gemenges, Anteil der Ober- und Unterseite

Es ist heute noch eine offene Frage, welcher Anteil des Gemenges von oben (durch die Flamme) und welcher von unten (durch das Glasbad) abgeschmolzen wird. In dem entwickelten Rechenmodell ist dies durch den Faktor φ berücksichtigt. Aus den Bildern 16 und 17 kann auch der Einfluß des Abschmelzverhältnisses φ auf das Zusammenspiel zwischen spezifischem Wärmeverbrauch und m ersehen werden.

Es zeigt sich dabei das überraschende Ergebnis, daß ein verstärktes Abschmelzen von unten (kleiner werdendes φ) zu einem höheren spezifischen Brennstoffverbrauch führt. Mit zunehmender Energiedichte wird diese Tendenz allerdings immer schwächer. Die Ursache dieses im

ersten Moment überraschenden Verhaltens ist, daß die zum Abschmelzen von unten notwendige Wärme auf dem Umweg über den Läuterbereich (L_2-L_1) herangeführt werden muß (Bild 15), was wärmewirtschaftlich nachteilig ist.

Aus technologischen Gründen darf dieser Gedanke jedoch nicht konsequent bis zum Extremfall fehlender Abschmelzleistung von der Unterseite verfolgt werden. Zur Aufrechterhaltung des technologischen Ablaufes der Glasschmelze in einem Wannnofen ist ein schwimmfähiges Gemenge notwendig. An der Grenzfläche Gemenge—Glasbad kommt es zu einer Abkühlung des Glasbades, wodurch der Gemengevorstrom abgebremst wird. Da besonders bei geschlossener Gemengedecke nur wenig Wärme direkt von den Flammen in das Glasbad unterhalb des Gemenges gelangt, käme es bei fehlendem Wärmerückstrom aus dem Läuterbereich zum Einfrieren des Glasbades im Einschmelzbereich.

Aus diesem Grund ist also ein Wärmetransport vom Läuterbereich her unter die Gemengedecke im Einschmelzbereich notwendig. Hiermit verbunden ist dann aber auch ein Wärmeübergang vom Glas an das Gemenge und damit auch ein Abschmelzen des Gemenges von der Unterseite her. Die Größe dieses notwendigen Wärmerückstromes ist u. a. von der Wannengröße, der Schmelzleistung und der Glasfarbe abhängig und kann heute im einzelnen noch nicht angegeben werden. Es bedarf dazu noch genauerer Untersuchungen des Wärmeüberganges Glas—Gemenge und der auftretenden Glasströmungen.

Bemerkenswert ist, daß im Bereich von relativ kleinem und relativ großem m , also bei stark einseitiger Brennstoffverteilung, eine Überschneidung der Kurven gleicher Energiedichte, aber von verschiedenem φ zu beobachten ist. Eine Deutung dieser Erscheinungen ist an Hand des Bildes 18 möglich, in dem die Zusammenhänge zwischen dem Brennstoffenergiedichteverhältnis und dem Bereichslängenverhältnis L_1/L_2 entsprechend Gleichung (30) dargestellt sind. Bei stark einseitiger Brennstoffverteilung kommt es bei großem m zu einer starken Verminderung der Einschmelzfläche (L_1) und bei kleinem m zu einer Verminderung der Läuterfläche (L_2-L_1). Bei geringem Energiedichteniveau prägt sich dieses Verhalten besonders deutlich aus, bleibt aber auch bei hoher Energiedichte erhalten.

Da die Linien in den Bildern 16 und 17 Linien konstanter Energiedichte im Läuterbereich (L_2-L_1) sind, bedingt eine Verminderung von m im Bereich $m < 1$ eine starke Verminderung von L_2-L_1 und damit eine starke Verminderung der insgesamt der Anlage zugeführten Energie. Dies bedeutet bei gut mit Gemenge bedeckten Anlagen (kleines C) eine starke Verminderung der Schmelzleistung und eine Erhöhung des spezifischen Wärmebedarfs entsprechend den Bildern 4 und 6 in [1]. Eine Erhöhung der Energiezufuhr bei konstant gehaltenem m ist unter diesen Bedingungen durch eine Verminderung von φ und damit durch eine Erhöhung der Abschmelzleistung des Gemenges von unten möglich. Ein zunehmender Teil der über L_2-L_1 eingestrahelten Wärme wird von unten L_1 zugeführt, was eine Verkleinerung von L_1 zu Gunsten von L_2-L_1 zur Folge hat.

Im Bereich hoher m -Werte liegen die Verhältnisse ge-

rade umgekehrt. Hier treten Überschneidungen nur im Bereich hoher Energiedichten auf, die über hohe m -Werte zu extrem hohen Energiedichten ($400 \cdot 10^3$ kcal/m² h und mehr) im Bereich von L_1 führen.

Im Bereich dieser hohen Energiedichten steigt der spezifische Wärmebedarf über die Feuerungsverluste wieder an, was besonders deutlich bei schlecht bedeckten Anlagen (großes C) zum Ausdruck kommt. Unter diesen Bedingungen führt also eine Verminderung der insgesamt der Anlage zugeführten Energie zu einer Verminderung des spezifischen Wärmeverbrauchs. Eine solche Verminderung ist bei hohen m -Werten über eine Erhöhung der Abschmelzleistung des Gemenges von unten und damit eine weitere Verkleinerung von L_1 möglich.

3.3. Einfluß der Badbedeckung mit Gemenge

Bleibt man bei der gewählten Darstellung des spezifischen Brennstoffverbrauchs über dem Faktor m des Brennstoffverteilungsverhältnisses und wählt als Kurvenparameter den Bedeckungsgrad C des Schmelzbereiches, dann ergeben sich für eine Brennstoffenergiedichte im Läuterbereich von $100 \cdot 10^3$ kcal/m² h die in Bild 19 wiedergegebenen Zusammenhänge.

Es ergibt sich das bereits bekannte Bild, daß gut bedeckte Anlagen wärmewirtschaftlich günstiger arbeiten. In allen drei untersuchten Fällen ($C = 0; 0,2; 0,4$) bilden sich in Abhängigkeit von m Minima aus. Diese Minima verschieben sich von hohen m -Werten bei ideal bedeckten Anlagen zu niedrigen m -Werten bei schlechterer Bedeckung. Bei gut mit Gemenge bedeckten Schmelzflächen ist es also günstiger, im Gemengebereich mehr Brennstoff zu geben, während bei schlecht bedeckter Anlage eine Verschiebung der Brennstoffzufuhr in Richtung Läuterbereich günstiger wird.

4. Zusammenfassung

Es ist möglich, das in Teil I [1] entwickelte Rechenmodell zum Studium des wärmetechnischen Verhaltens von Glasschmelzöfen so zu erweitern, daß der Einfluß der Brennstoffverteilung über der Wannenslängsachse und der Art des Abschmelzens des Gemenges auf den spezifischen Brennstoffverbrauch oder den spezifischen Wärmebedarf abgeschätzt werden kann.

Bei mittleren und höheren Energiedichten prägen sich in Abhängigkeit von der Brennstoffverteilung Minima des spezifischen Wärmeverbrauchs aus. Bei mäßig belasteten Anlagen ist eine verstärkte Brennstoffzufuhr im Einschmelzbereich günstig, bei höher belasteten Anlagen ist eine gleichmäßigere Brennstoffverteilung zweckmäßiger. Die Minima sind in diesem Bereich schwach ausgeprägt, was bedeutet, daß—von Extremwerten abgesehen—die Brennstoffverteilung über der Wannenslängsachse von untergeordneter Bedeutung wird.

Unter normalen Bedingungen ist es besser, das Gemenge vornehmlich von oben durch die Flamme und weniger von unten durch das Glasbad abzuschmelzen, wenn die Wärme über den Läuterbereich der Wanne unter das Gemenge gebracht werden muß.

Eine Verminderung der Gemengebedeckung im Einschmelzbereich verschiebt die optimale Brennstoffenergieverteilung vom Einschmelzbereich in Richtung auf den Läuterbereich.

5. Literatur

[1] TRIER, W., und VOSS, H.-J.: Wärmetechnisches Verhalten von Glasschmelzwannöfen. Glastechn. Ber. 41 (1968) Nr. 6, S. 217—229.

[2] TRIER, W.: Wärmeübergang zwischen Flamme und Glasbad in Glasschmelzwannen. Glastechn. Ber. 36 (1963) S. 73—86. (48571)