

von Ringkammern, in welche die Ringe während der Schmelze und Läuterung gelegt werden, Abhilfe bringen.

Zusammenfassend kann man feststellen, daß zwar in bezug auf die Homogenität kein allzu großer Unterschied zwischen der Glasqualität der im Hafenofer und in Tageswannen erschmolzenen Gläsern besteht, daß sogar in Tageswannen zu bestimmten Zeiten teilweise höhere Homogenitätsmaßzahlen erzielt wurden. In bezug auf den zeitlichen Verlustwert der Glasqualität ist die Tageswanne durch die erhöhte Zahl der Glasfehler, wie Steinchen und Schlieren, gebildet durch Feuerfestmaterial, im Nachteil.

3. Zusammenfassung

Im Hinblick auf Betriebsverhalten, Konstruktion und Glasqualität wurden sechs Wannen überprüft. Die dabei gewonnenen Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Schmelzleistung und Wärmeverbrauch liegen nur in Einzelfällen günstiger als bei Hafenofern. Der Ausarbeitungsgrad, der meist von der Art der Produktion her bestimmt ist, übt einen großen Einfluß darauf aus. Der spezifische Brennstoffverbrauch kann durch die Beziehung $G = F (700 - 58 F)$ ermittelt werden. Der spezifische Wärmeverbrauch gibt keine gute Vergleichsbasis für Tageswannen, da Ausarbeitungsgrad und Glasart (Bleiglas) einen großen Einfluß ausüben.

2. Die Feuerführung ist, bedingt durch den sich ändernden Strömungsquerschnitt und die periodische Betriebsweise, schwierig. Vor- und Nachteile müssen im Einzelfall sorgfältig abgewogen werden.

3. Die Temperaturführung, insbesondere die maximalen Schmelz- und Läutertemperaturen, hängen von der Glasart ab. Werden 1500 °C nicht überschritten, dann ist bei normalen Gläsern mit erhöhtem Blasen- gehalt des Glases zu rechnen.

4. U-Flammenwannen mit nach oben überschlagender Flamme mit und ohne Zwischengewölbe werden viel verwendet. Zwischengewölbe erleichtern die Feuerführung, bringen aber durch verstärkte Kondensation und Schlackenbildung zusätzliche Glasfehler.

Längsbrennerwannen sind vorteilhaft für größere Anlagen.

5. Die Gemengeeinlage kann bei Tageswannen leichter mechanisiert werden als bei Hafenofern. Von dieser Möglichkeit ist unbedingt Gebrauch zu machen, und es ist darauf zu achten, daß über einen längeren Zeitraum in kleineren Portionen staubarm eingelegt wird. Eine zu starke Abkühlung der benachbarten Steine ist zu vermeiden.

6. Für das Gewölbe und die Seitenwände empfiehlt sich Silika, für die Brenner, Abzüge und das Wannenbecken schmelzgegossenes Material. Ein verstärktes Reißen der Wannensteine entsteht durch lokalen Kaltlufteinfall (Arbeitsöffnungen) und Randlage des kalten Gemenges. Abdeckplatten über den Wannensteinen, sorgfältige Ofendruckeinstellung und Gemengeeinlage halten das Reißen der Wannensteine in erträglichen Grenzen.

7. Die ablaufende Schlacke des Oberofens führt bei Tageswannen zu einem relativ hohen Anteil an Glasfehlern. Dies gilt besonders bei Gläsern, deren spezifisches Gewicht größer ist als das des Schlackenglases (Bleiglas). Tropfkanten im Gewölbe bringen Besserung.

8. Die Homogenität des erschmolzenen Glases ist der von Hafenofern annähernd gleichzusetzen und in Sonderfällen sogar besser. Die Schwierigkeiten, mit Ringen zu arbeiten, zwingen bei Tageswannen zu besonders sorgfältigem Arbeiten.

Bei der Herstellung dünnwandiger Artikel (Kelchgläser) wird die Qualität des Hafenoferns nicht erreicht.

Für die Offenlegung der Betriebsaufzeichnungen und Erfahrungen und zahlreiche Diskussionen sei an dieser Stelle den beteiligten Glashütten nochmals bestens gedankt. Besonderer Dank gebührt auch Herrn Professor H. W. HENNICKE, Clausthal, und seinen Mitarbeitern für die Identifizierung von Glasfehlern und Untersuchung der Homogenität zahlreicher Glasproben. Der Autor dankt Herrn Ing. H. BEINE, Frankfurt (Main), der mit den Untersuchungen begonnen hatte, diese dann krankheitshalber aber abgeben mußte.

Zur Finanzierung der Arbeit stellte die Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen (AIF), Köln, Mittel des Bundeswirtschaftsministeriums, Bonn, zur Verfügung. Beiden Institutionen gebührt Dank für die gewährte Hilfestellung.

4. Literatur

[1] SORG, K.: Konstruktion und Betriebsweise von Tageswannen für die Glasschmelze. *Glastechn. Ber.* **37** (1964) S. 292–295.

[2] GÜNTHER, R., TRIER, W. und THEISSL, K. H.: Die Entwicklung der Glasschmelzhafenofer. *Glastechn. Ber.* **30** (1957) S. 308–318. (48444)

DK 662.612.31:533.6.011:666.1.031.2:66.042.875

Verweilzeitverhalten der Brenngase im Oberofen von Glasschmelzwannen

VON WOLFGANG TRIER und HEINZ STAATSMANN, Frankfurt (Main)

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

(Eingegangen am 26. September 1968)

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

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 sich 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 des beschriebenen Meßverfahrens 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 Stoffstromes.

Eine wichtige Größe für die Auslegung kontinuierlich arbeitender Glasschmelzwannen ist die Zeit, wäh-

rend Brennstoff, Verbrennungsluft und Abgas im Oberofen verweilen, die sogenannte Verweilzeit. Zusammen

mit der Reaktionszeit bestimmt sie den Grad des Wärmeumsatzes und des Wärmeaustausches im Oberofen. Bei der Projektierung des Brennraumes ging man bisher von der vereinfachenden Annahme aus, daß alle Brennstoffteilchen gleich lang im Oberofen verweilen. Diese Annahme ist jedoch unzutreffend, da die Strömung, die Molekulardiffusion und anderes mehr eine Vermischung des Frischzulaufes mit dem Oberofeninhalte bewirken.

Über das Verweilzeitverhalten und die mittlere Aufenthaltszeit der Gase im Oberofen von Feuerungsanlagen allgemein und von Glasschmelzwannen speziell war bisher praktisch noch nichts bekannt. Zwar wurden vor einiger Zeit Modelluntersuchungen [1, 2] auf diesem Gebiet durchgeführt, doch dürften diese die tatsächlichen Vorgänge im Oberofen nur bis zu einem gewissen Grad nachahmen können, weshalb Messungen an Glasschmelzwannen selbst durchgeführt wurden.

Ziel der im folgenden beschriebenen Untersuchungen, die an quer- und stirnbeheizten Glasschmelzwannen unterschiedlicher Konstruktion und unterschiedlicher Beheizung (Öl, Gas) durchgeführt wurden, war, Aufschluß über das zeitliche Verhalten der in den Oberofen eingeführten Stoffe zu erhalten, d. h. deren Verweilzeitverteilung zu bestimmen. Über die Kenntnis der Verweilzeit gewinnt man eine Vorstellung davon, welche Zeit z. B. den Brennstoffteilchen zur Verfügung steht, um sich im Oberofen mit der Verbrennungsluft zu mischen, zu reagieren und die erzeugte Wärme abzugeben.

Auch sollte die Messung darüber Auskunft geben, ob das Verweilzeitspektrum entsprechend aussagekräftig ist, um die schwierig zu messenden, örtlichen Zustandsgrößen, die das Transportverhalten beschreiben, ganz oder weitgehend zu ersetzen.

1. Allgemeine Betrachtungen

Die Verweilzeitverteilung, eine Integralaussage im Gegensatz zu den Differentialaussagen der Erhaltungssätze, gibt das Zeitverhalten einer Reaktionsstrecke in ihrer Gesamtheit wieder und ist, insbesondere dann, wenn der einfache Betriebszustand (stationärer Zustand) informationsarm und die Vorgänge im System sehr komplex und schwer zu erfassen sind, ein sehr gutes Hilfsmittel zur Beschreibung der Transportvorgänge im System [3].

Zur Messung des Zeitverhaltens eines Systems markiert man nach einer neuerdings häufig angewendeten Methode die zu untersuchende Komponente im Eingang mit einem zeitlich variierenden Indikator, der dasselbe Transportverhalten wie die Eingangsgröße zeigt. Aus dem Vergleich vom Eingangs- und Ausgangsverlauf ergeben sich die charakteristischen Parameter des Systems. Unter einem Indikator ist in diesem Zusammenhang eine physikalische Eigenschaft der Komponente zu verstehen, die die zu untersuchenden Prozesse nicht beeinflußt. Ideale Indikatoren sind z. B. Radioaktivität, elektrolytische Leitfähigkeit, Farbintensität, p_H -Wert u. a. m. Die mathematische Form der zeitlichen Indikatormodulation ist weitgehend frei. Man wird sie jedoch den Gegebenheiten entsprechend einfach wählen. Sehr einfach zu verwirklichende Modulationsformen sind z. B.:

a) **Stoßfunktion:** Eine Indikatormenge wird möglichst momentan in das System eingeführt (Pulsen, siehe Abschnitt 2.5.).

b) **Stufenfunktion:** Eine konstante Indikatormenge wird gleichmäßig von einer Zeit $t = 0$ an zugegeben.

c) **Sinusfunktion:** Der Indikator wird mit sinusförmiger Variation zugegeben.

1.1. Verweilzeitverteilung [4]

Ist t die Aufenthaltszeit eines kleinsten „Teilchens“ der Erhaltungsgröße, so stellt $E(t)$ die Verweilzeitverteilung der während einer gewissen Zeit das System durchströmenden Teilchen dar. Definiert ist $E(t)$ durch $\int_{t_1}^{t_2} E(t) dt$; dieser Ausdruck gibt den Bruchteil der Teilchenmenge, die zur Zeit $t = 0$ eintritt, wieder, der zwischen den Zeiten t_1 und t_2 ($t_1 < t_2$) im System verweilt, d. h. es zwischen den Zeiten t_1 und t_2 verläßt. t ist dabei als stetige Verteilungsgröße aufgefaßt. Aus obigem folgt:

$$\int_0^{\infty} E(t) dt \equiv 1. \quad (1)$$

1.2. Innere Verweilzeit

Von der Verweilzeit zu unterscheiden ist die Altersverteilung der im System befindlichen Teilchen $J(t)$ [4].

Das Integral

$$\int_{t_1}^{t_2} J(t) dt$$

gibt an, welcher Bruchteil der im System befindlichen Teilchen gerade zwischen den Zeiten t_1 und t_2 dort verweilt. Während $J(t)$ eine reine Altersverteilung der Teilchen im System ist, die angibt, welcher Anteil der das System füllenden Teilchen t Zeiteinheiten alt ist, ist $E(t)$ sowohl Verweilzeitverteilung als auch Altersverteilung. Im ersten Fall gibt $E(t)$ die zeitliche Verteilung der zur Zeit $t = 0$ eintretenden Teilchenmenge im Systemaustritt wieder ($t =$ stetige Verteilungsgröße); im zweiten Falle gibt — wie aus den Erhaltungssätzen folgt — $E(t)$ die Altersverteilung im austretenden Strom wieder.

1.3. Summenverteilung der Verweilzeit

Die Summenverteilung

$$F(t) = \int_0^t E(t) dt \quad (2)$$

gibt den Bruchteil der Teilchenmenge mit einer Verweilzeit $< t$ an. Aus 1.1. folgt zwingend

$$\lim_{t \rightarrow \infty} F(t) \equiv 1. \quad (2a)$$

1.4. Zusammenhang zwischen den Verteilungsfunktionen, mittlere Verweilzeit

Die Verteilungsfunktionen hängen über eine integrale Erhaltungsgleichung miteinander zusammen. Ist $Q(t)$ die bis zur Zeit t vom Zeitpunkt $t = 0$ an gerechnet ins System eintretende Stoffmenge und V die Aufnahmefähigkeit des Systems (Volumen), so gilt:

$$\underbrace{Q(t)}_{\text{eingebrachte Menge}} = \underbrace{\int_0^t J(\theta) V d\theta}_{\text{im System befindliche Menge}} + \underbrace{\int_0^t \frac{dQ}{d\theta} \cdot \int_0^{\theta} E(\theta') d\theta' d\theta}_{\text{Menge, die das System schon verlassen hat}}. \quad (3)$$

Ist $Q(t) = \dot{v} \cdot t$, so vereinfacht sich obige Gleichung.

Es gilt dann:

$$\dot{v}t = \int_0^t J(\Theta) V d\Theta + \dot{v} \int_0^t \int_0^\Theta E(\Theta') d\Theta' d\Theta. \quad (3a)$$

Aus der Bilanzgleichung (3a) errechnet sich der Zusammenhang zwischen der Verweilzeitverteilung $E(t)$ und der inneren Verweilzeit $J(t)$ zu

$$1 - \int_0^t E(\Theta) d\Theta = \frac{V}{\dot{v}} J(t) = 1 - F(t). \quad (4)$$

Der Mittelwert der Verweilzeit (Schwerpunktszeit) \bar{t} läßt sich mit Hilfe der Summenverteilung sehr einfach bestimmen.

Aus

$$\bar{t} = \int_0^{t_{\max}} t E(t) dt \quad (5)$$

ergibt sich durch Produktintegration

$$\bar{t} = \int_0^{t_{\max}} (1 - F(t)) dt. \quad (6)$$

t_{\max} ist in obigen Gleichungen die größtmögliche Verweilzeit ($t_{\max} \rightarrow \infty$). Die praktische Bedeutung von Gleichung (6) zur Bestimmung der mittleren Verweilzeit liegt darin, daß die Fläche zwischen der einfach zu ermittelnden Kurve $F(t)$ und der Geraden $F = 1$ ein Maß für die mittlere Verweilzeit ist.

Führt man Gleichung (3a) nach einmaliger Differentiation in Gleichung (6) ein und berücksichtigt, daß $\int_0^{t_{\max}} J(t) dt \equiv 1$ ist, so ergibt sich für die mittlere Aufenthaltszeit

$$\bar{t} = \frac{V}{\dot{v}}, \quad (7)$$

d. h. die mittlere Aufenthaltszeit ist unabhängig von der Verweilzeitverteilung immer gleich dem Quotienten aus Systemvolumen und Durchsatz ($\dot{v} = \dot{v}(P, T)$).

1.5. Messung der Verteilungsfunktion durch Pulsen mit Indikatorsubstanz

Zur Messung der beschriebenen Verteilungsfunktionen benutzt man ein Verfahren, nach dem ein möglichst momentan im Systemeintritt eingepfelter Indikatorstoß über zeitliche Konzentrationsmessungen im Systemaustritt verfolgt wird. Das Integral von $t = 0$ bis $t = t_{\max}$ über den gemessenen zeitlichen Konzentrationsverlauf muß bei konstantem Volumendurchsatz \dot{v} des Trägermediums, das gekennzeichnet wurde, ein Maß für die eingepflete Indikatormenge sein:

$$Q_{\text{Ind}} = \int_0^{t_{\max}} C(t) \dot{v} dt. \quad (8)$$

$C(t) \dot{v}$ gibt den momentanen Durchsatz an Indikatorsubstanz an, so daß

$$\frac{\int_{t_1}^{t_2} C(t) \dot{v} dt}{\int_0^{t_{\max}} C(t) \dot{v} dt}$$

der Bruchteil der Indikatorsubstanz ist, der zwischen t_1 und t_2 im System verweilt; d. h. aber nach 1.1., daß

$$\frac{C(t)}{Q_{\text{Ind}}/\dot{v}} = E(t) \quad (9)$$

die Verweilzeitverteilung der Indikatorsubstanz ist. Hat

nun das untersuchte System dem Trägermedium gegenüber die gleichen Übertragungseigenschaften wie gegenüber dem Indikator — was anzustreben ist — so ist damit die Verweilzeitverteilung des Trägermediums gewonnen.

1.6. Messung der Summenverteilung durch kontinuierliche Indikatorzugabe

Ist das Transportverhalten des Systems linear, d. h. die Verteilungsfunktion ist unabhängig von der Eintrittszeit, dann gelten für das System die Superpositionsgesetze.

Gibt man im Eintritt des Systems von einer bestimmten Zeit $t = 0$ an kontinuierlich konstante Indikatormengen zu, so entspricht das einem fortgesetzten Pulsen. Die gemessene Konzentration im Auslauf ist dann eine Überlagerung der Korrespondenzen ein und derselben Pulsfunktion, deren zeitlicher Nullpunkt nur auf die verschiedenen Einlaufzeiten transformiert werden muß [3].

Nach Gleichung (9) ist der Konzentrationsverlauf im Systemaustritt

$$C(t) = E(t) \frac{Q_{\text{Ind}}}{\dot{v}}.$$

Im Falle des kontinuierlichen Zuimpfens ist statt der eingepfleten Indikatormenge Q_{Ind} ein zeitlich zugeführter Indikatordurchsatz \dot{Q}_{Ind} anzunehmen, so daß die fortgesetzte Pulsung mit der Menge $\dot{Q} dt$ erfolgt. Somit ergibt bei kontinuierlicher Indikatorzugabe vom Zeitpunkt $t = 0$ an:

$$C_s(t) = \int_0^t E(t) \frac{\dot{Q} dt}{\dot{v}}. \quad (10)$$

Mit $\frac{\dot{Q}}{\dot{v}}$ der Ausgleichskonzentration C_∞ ergibt sich bei $\dot{Q} = \text{const.}$

$$\frac{C_s(t)}{C_\infty} = \int_0^t E(t) dt = F(t). \quad (11)$$

Eine kontinuierliche Indikatorzugabe von einem bestimmten Zeitpunkt $t = 0$ an ist oftmals nicht leicht zu verwirklichen (Anlaufstörungen). Einfacher ist es, eine kontinuierliche Indikatorzugabe, nachdem sich die Ausgleichskonzentration eingestellt hat, plötzlich abbrechen und den Konzentrationsabfall zu messen. Aus der Indikatormengenbilanz läßt sich sofort ableiten, daß für den Konzentrationsabfall $C'(t)$ gilt:

$$C'_s(t) = C_\infty - C_s(t)$$

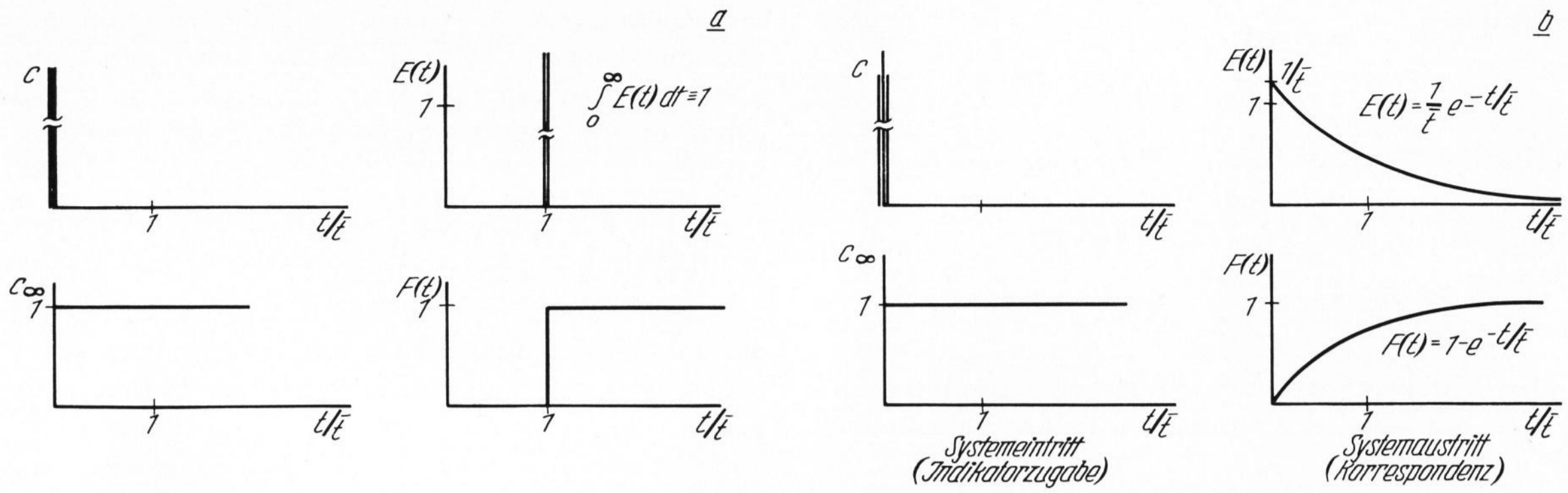
bzw.

$$\frac{C'_s(t)}{C_\infty} = 1 - F(t). \quad (12)$$

1.7. Verteilungsfunktionen einiger einfacher Systeme

Zwei sehr einfache, idealisierte und in der Praxis nur näherungsweise verwirklichte Strömungsformen sind einmal die Kolbenströmung und zum anderen die Durchströmung eines Systemes als idealer Mischer.

Im ersten Fall, der Kolbenströmung, wird das System ohne Längs- und Quermischung mit über dem Querschnitt konstanter Geschwindigkeit durchströmt. Unter einem idealen Mischer versteht man dagegen ein



Bilder 1 a und b. Aufenthaltzeitverteilung bei idealer Durchströmung eines Raumes, a) Kolbenströmung, b) idealer Mischer.

System, in dem sich die eintretende Stoffmenge momentan über das ganze Systemvolumen verteilt, d. h. innerhalb des Systems liegt sofort nach Eingabe eines Stoffes eine örtlich konstante Konzentration vor.

Je nach Indikatorzugabe ergeben sich im Systemaustritt die folgenden Verteilungskurven (Bild 1), die, um von Durchsatz und vom Systemvolumen unabhängig zu sein, über der dimensionslosen Zeit t/\bar{t} aufgetragen sind.

1.8. Strömungsmodelle und deren Verteilungsfunktionen

Im allgemeinen ist das Strömungsverhalten reeller Systeme kompliziert und kann nicht durch ein einziges vereinfachtes Strömungsmodell wiedergegeben werden. Auch eine Kombination der zuvor beschriebenen idealen Strömungen, d. h. Aufteilen des Strömungsraumes in verschiedene Gebiete, genügt im allgemeinen zur Beschreibung nicht, da Totwassergebiete, Rückströmung und Längs- und Quermischung Abweichungen von den idealen Strömungsmodellen bewirken.

Berücksichtigt man bei der Kombination der idealen Strömungen, daß

a) durch Totwassergebiete das Systemvolumen V verkleinert wird, d. h. die tatsächliche mittlere Aufenthaltzeit ist kleiner als die rechnerische,

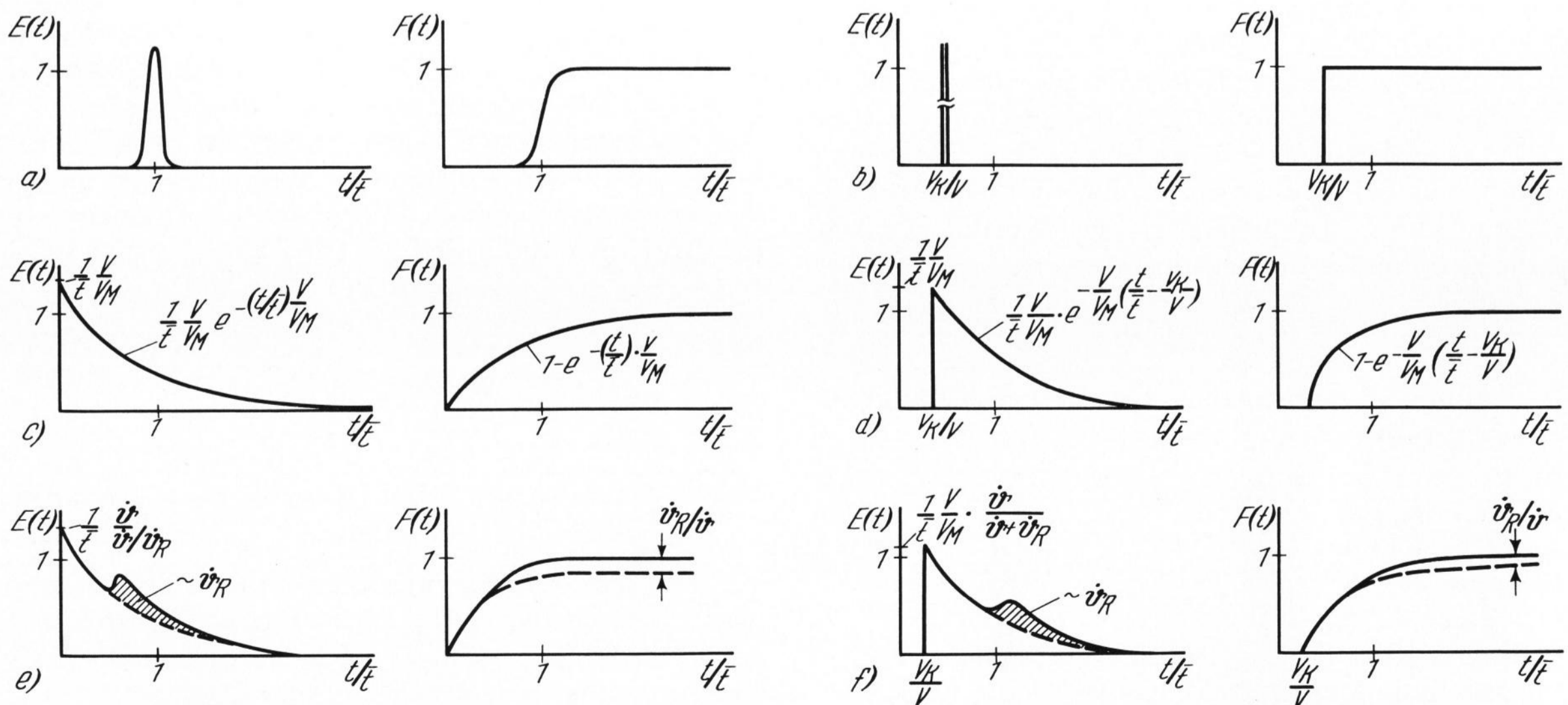
b) durch die Rückströmung ein Teil des Vorstroms wieder stromaufwärts transportiert wird und dort wieder dem Vorstrom zugegeben wird

c) Längsmischung nur bei Kolbenströmung auftritt und als Maß für die Abweichung von der Kolbenströmung angesehen werden kann,

so ergeben sich je nach Kombination die in Bild 2 gezeigten Verteilungen, die ebenfalls über der dimensionslosen Zeit t/\bar{t} aufgetragen sind. Für die Volumina der in Bild 2 gezeigten, in Reihe geschalteten Modellströmungen gilt allgemein: $V = V_K + V_M + V_T$.

2. Meßeinrichtung und Versuchsdurchführung

Die Verweilzeitverteilung kann, wie dargestellt wurde, sehr einfach auf zwei verschiedene Arten bestimmt werden: einmal direkt, indem ein Teil des kontinuierlich zuströmenden Mediums kurzzeitig gekennzeichnet wird (z. B. durch Zugabe von Isotopen) und im Systemaustritt die Konzentration der gekennzeichneten Substanz in Abhängigkeit von der Zeit bestimmt



Bilder 2a bis f. Verteilungskurven einiger vereinfachter Strömungsmodelle,

- a) Kolbenströmung mit Längsmischung, b) Kolbenströmung mit Totwasser, c) ideale Durchmischung mit Totwasser, d) ideale Durchmischung und Kolbenströmung, e) ideale Durchmischung mit Rückströmung, f) Kolbenströmung und ideale Durchmischung mit Rückströmung und Totwasser.

wird. Die andere Möglichkeit besteht darin, gekennzeichnete Substanz kontinuierlich in das System eintreten zu lassen und den zeitlichen Konzentrationsanstieg im Austritt bis zum Ausgleich in Abhängigkeit von der Zeit zu bestimmen, bzw. den Konzentrationsabfall nach Abbrechen der Indikatorzugabe.

Aus dem zeitlichen Konzentrationsanstieg bei kontinuierlicher Zugabe von gekennzeichneteter Substanz kann nach Abschnitt 1.6., Gleichung (10), durch Differentiation das Verweilzeitpektrum errechnet werden. Da jedoch die Funktion der Summenkurve als solche nicht bekannt ist, müßte in diesen Fällen eine grafische Differentiation durchgeführt werden. Dies ergibt aber bei nur punktweise bestimmten Kurven meist sehr ungenaue Ergebnisse. Aus diesem Grunde wurde die Meßeinrichtung so aufgebaut, daß beide Indikatormodulationsformen direkt durchgeführt werden konnten.

2.1. Möglichkeiten zur Markierung der in den Oberofen eintretenden Stoffe

Bei der Markierung des Durchsatzes eines Systems, durch den die Vorgänge nicht gestört werden dürfen, kann man daran denken, eine Komponente des eintretenden Stoffstromes durch Verändern einer ihrer Eigenschaften zu kennzeichnen. So könnte z. B. eine Komponente durch eines ihrer Isotope ersetzt werden bzw. könnte dieses Isotop zusätzlich in geringen Mengen zugegeben werden. Von diesen Möglichkeiten wurde jedoch kein Gebrauch gemacht, da das Arbeiten mit gasförmigen Isotopen schwierig ist.

Eine weitere Möglichkeit zur Kennzeichnung ist die plötzliche Mehrzugabe einer Komponente des Durchsatzstromes. Dies führt jedoch nur dann zu befriedigenden Ergebnissen, wenn a) der Pegel dieser Komponente konstant gehalten werden kann und b) nur geringe Mengen der entsprechenden Komponente zusätzlich zugegeben werden brauchen.

Diese Bedingungen erfüllen die an der Meßstelle (Abgasaustritt aus dem Oberofen) in hoher Konzentration auftretenden Bestandteile des Abgases (N_2 , CO_2 , H_2O , SO_2 , O_2) nicht. Als Impfgas bietet sich jedoch eines der in der Frischluft enthaltenen Edelgase an. Neon, Krypton und Xenon, die in der Luft in sehr geringen Konzentrationen ($< 10^{-5}$ Vol.-%) enthalten sind und abhängig vom Luftüberschuß vernachlässigbare Pegelschwankungen aufweisen, sind als Impfgas zu teuer.

Auch Argon, das in der Luft zu etwa 0,93 Vol.-% enthalten ist, ist als Impfgas ungeeignet, da der Argongehalt des Abgases in Abhängigkeit vom Luftüberschuß zu stark schwankt. Bleibt von den Edelgasen noch Helium als Impfgas. Der Heliumgehalt der Luft beträgt $5 \cdot 10^{-4}$ Vol.-% und der Pegel im Abgas etwa $4,5$ bis $4,8 \cdot 10^{-4}$ Vol.-%. Auch ist Helium sowohl gaschromatografisch als auch mit dem Massenfilter einfach nachzuweisen. Der zu erwartende He-Pegel im Abgas von 4,8 p.p.m. ($4,8 \cdot 10^{-4}$ Vol.-%) dürfte bei einer mittleren He-Konzentration des Abgases nach dem Impfen von 0,2 bis 0,5 Vol.-% keine Auswirkungen auf die Meßgenauigkeit haben, so daß für die Messungen ein He-Pegel von Null % angenommen werden kann.

Zwar löst sich Helium in flüssigem Glas, doch ist die Sättigungszeit relativ groß; sie beträgt, wie Versuche ergaben [5], in reiner He-Atmosphäre ungefähr 2 bis 3 h. Da nur geringe Mengen Helium zugegeben werden

und zudem die maximale Verweilzeit unter 60 s liegt, ist zu erwarten, daß die vom Glas aufgenommene Heliummenge sehr gering ist und innerhalb der Meßgenauigkeit liegt.

2.2. Impfeinrichtung

Während die kontinuierliche Indikatorzugabe zur Frischluft bzw. zur Zerstäuberluft relativ einfach zu handhaben ist, muß beim Pulsen eine größere Indikatormenge (≈ 30 bis 50 Nl) in kurzer Zeit ($\approx 0,1$ bis $0,35$ s) in den Oberofen eingeführt werden. Die zu diesem Zweck konstruierte Vorrichtung zeigt Bild 3.

Das Impfgas (He) wird aus einer Gasvorratsflasche in den Druckbehälter gefüllt und steht dort unter dem Überdruck p_0 (≈ 15 atü). Die Verbindung zwischen der wassergekühlten Impfsonde und dem Druckkessel wird über ein elektrisch gesteuertes Magnetventil hergestellt. Aus 18 Bohrungen mit 2,5 mm Durchmesser ($F_A = 88,5$ mm²), die radial am Ende des Leitungsrohres der Sonde angebracht sind, strömt das Gas nach Öffnen des zeitgesteuerten Magnetventils auf einen wassergekühlten, ringförmigen Prallschirm auf, der den hohen Impuls des austretenden Gases weitgehend vernichtet und eine gute Verteilung im Hauptstrom gewährleistet.

2.3. Gasprobenahme

Zur Bestimmung der Verweilzeit muß der das System verlassende Stoffstrom in Abhängigkeit von der Zeit auf seinen He-Gehalt analysiert werden. Da eine kontinuierliche, nahezu vergrößerungsfreie Analyse nicht durchgeführt werden kann, werden nach einem vorgegebenen Zeitplan zu verschiedenen Zeiten dem Abgasstrom Gasproben entnommen, die nachträglich auf ihren He-Gehalt untersucht werden.

Das zu analysierende Gas wird dazu kontinuierlich (Bild 4) über eine wassergekühlte Entnahmesonde abgesaugt und über einen Verteilerrechen, an dessen Abgängen Magnetventile sitzen, auf 12 Gassammelflaschen verteilt. Nach Durchströmen der Gasflaschen wird der Gasstrom über Magnetventile und einen Sammelrechen der Pumpe zugeführt. In die Leitung zur Pumpe ist eine

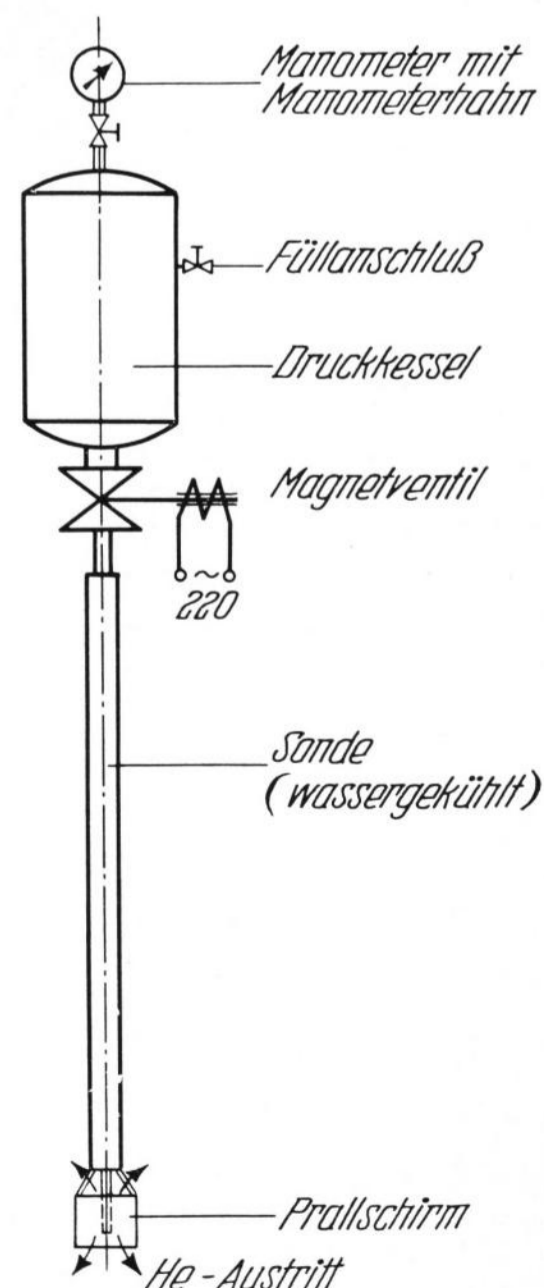


Bild 3. Impfvorrichtung

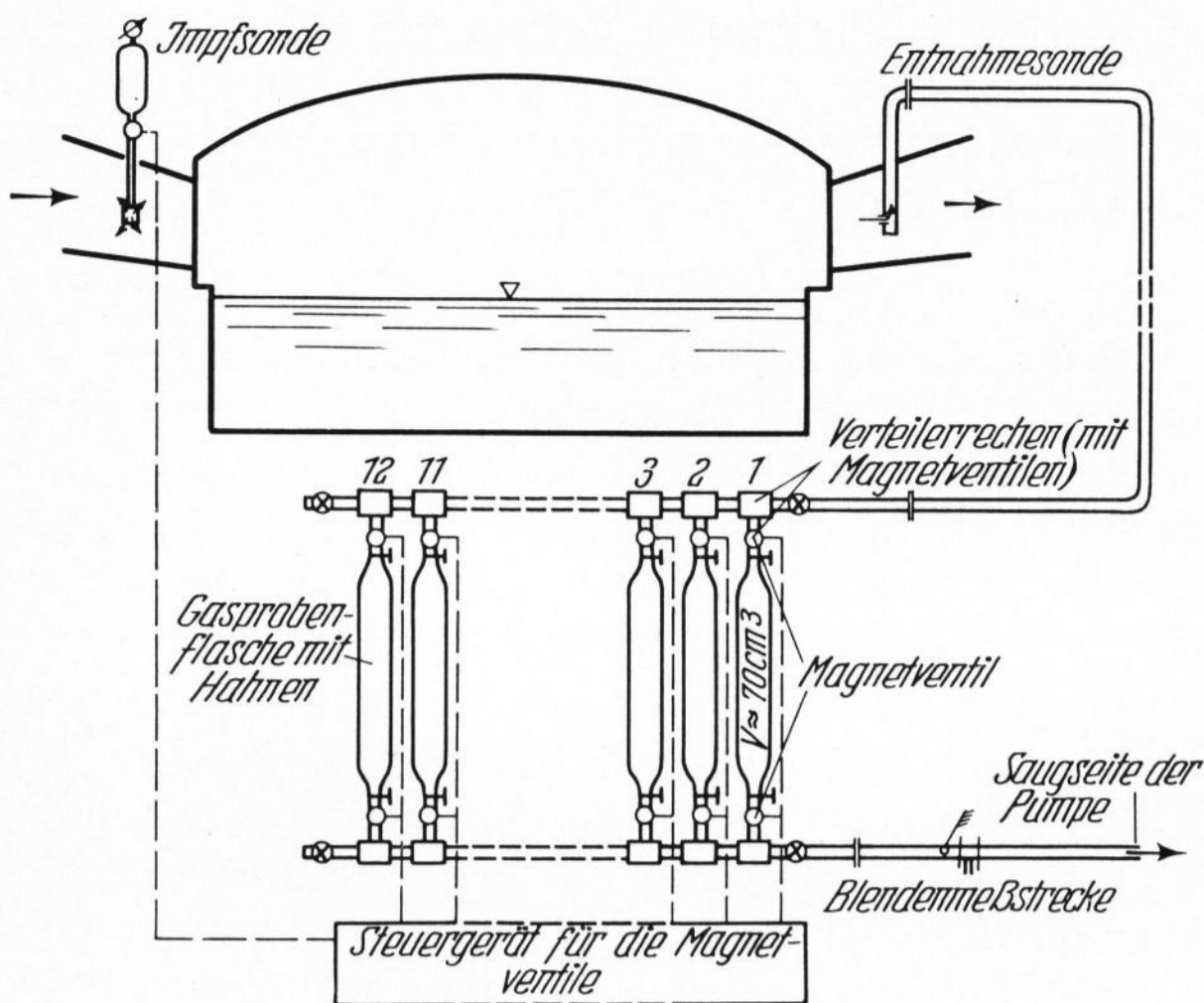


Bild 4. Schema der Versuchsanordnung.

Durchflußmeßstrecke zur Bestimmung des abgesaugten Volumens und der mittleren Strömungsgeschwindigkeit eingebaut.

Die ganze Anlage ist so ausgelegt, daß der lichte Durchmesser des Systems als nahezu konstant angesehen werden kann. Auch sind die Gasflaschen so konstruiert, daß keine Totwasserräume und größeren Wirbel beim Durchströmen entstehen können, so daß die Flaschen gleichmäßig durchspült bzw. gefüllt werden.

Zu erwähnen ist noch, daß die Apparatur so ausgelegt ist, daß sowohl im Durchstrom wie auch über evakuierte Flaschen Gasproben entnommen werden können.

Beim Absaugen im Durchstromverfahren werden über ein Schaltrelais die beiden Magnetventile vor und hinter den einzelnen Sammelflaschen paarweise gleichzeitig plötzlich geöffnet, so daß das Gas durch die entsprechende Flasche strömt. Einige Zeit später werden beide Ventile ebenso plötzlich wieder geschlossen. Um einen gleichförmigen Durchstrom zu erreichen, sind immer zwei Flaschen gleichzeitig in den Durchstrom geschaltet.

Im Gegensatz dazu wird beim Absaugen in evakuierte Flaschen nur über einen Verteilerrechen abgesaugt. Die zwischen Verteilerrechen und Gassammelflasche eingebauten Magnetventile werden wie beim Durchstromverfahren zu festgelegten Zeiten plötzlich kurzzeitig geöffnet. Da die Flaschen evakuiert sind, strömt Gas aus dem kontinuierlichen Strom durch den Verteilerrechen, der an der Saugseite der Pumpe liegt, in die Flaschen ein. Obwohl der Widerstand in den Magnetventilen beträchtlich ist, tritt, da das Flaschenvolumen klein und der freie Strömungsquerschnitt groß ist, sehr schnell ein Druckausgleich ein, d. h. die Flasche füllt sich in sehr kurzer Zeit mit Probegas.

Nach Probenahme werden die Hähne der Flaschen geschlossen, die Gassammelflaschen ausgebaut und deren Inhalt mit Hilfe eines Gaschromatografen analysiert. Für die vorliegende Analysenaufgabe erwies sich ein 6 ft langes Molekularsieb als Trennkolonne und Argon als Trägergas als am günstigsten.

Da nach Modelluntersuchungen [1] die Verweilzeitverteilungen Zeitspannen umfassen, die je nach Brennumraumgröße und Brennerbelastung zwischen 20 und 40 s

liegen und da gleich zu Beginn des Spektrums mit einem starken Konzentrationsanstieg zu rechnen ist, muß die Steuerung der Magnetventile sehr genau sein, d. h. es müssen Öffnungszeiten bis unter 0,1 s verwirklicht werden können. Bei dem gewählten, diesen Ansprüchen genügenden Schaltwerk wird eine auswechselbare Programmwalze, die mit verstellbaren Schaltnocken bestückt ist, über ein Getriebe von einem stufenlos regelbaren Asynchronmotor angetrieben. Die Schaltnocken wirken über fein einstellbare Betätigungshebel auf Mikroschalter. Die Umlaufzeit der Programmwalze, die 15 Kontaktbahnen enthält, ist stufenlos regelbar von 10 bis 72 s.

Wie Bild 5 zeigt, werden über die Mikroschalter 1 bis 12 die Magnetventile, zwischen denen die Gassammelflaschen liegen, gesteuert, während Kontakt 13 das Magnetventil zwischen Druckbehälter und Impfsonde steuert. Kontaktbahn 15 ist dagegen so geschaltet, daß nach einer Umdrehung der Walze der gesamte Stromkreis unterbrochen ist, d. h. alle Ventile geschlossen bleiben.

Zu erwähnen ist noch, daß bei kontinuierlicher Impfgaszugabe direkt aus der Gasflasche das Impfsondenventil über Kontakt 15 gesteuert wurde.

2.4. Bestimmung der Totzeit der Meßapparatur

Das über die Absaugsonde abgesaugte Abgas wird über eine den örtlichen Gegebenheiten angepaßte Schlauchleitung zum Verteilerbrett geführt, auf das die einzelnen Gasprobeflaschen montiert sind (Bild 4). Unter der Totzeit (t_{tot}) ist die Zeit zu verstehen, die verstreicht, bis ein zur Zeit $t = 0$ in die Absaugsonde eingesaugtes Teilchen die Gassammelflaschen erreicht hat. Da die lichte mittlere Weite des Absaugsystems nicht genau bekannt ist, läßt sich die Totzeit nur näherungsweise über das abgesaugte Volumen errechnen. Aus

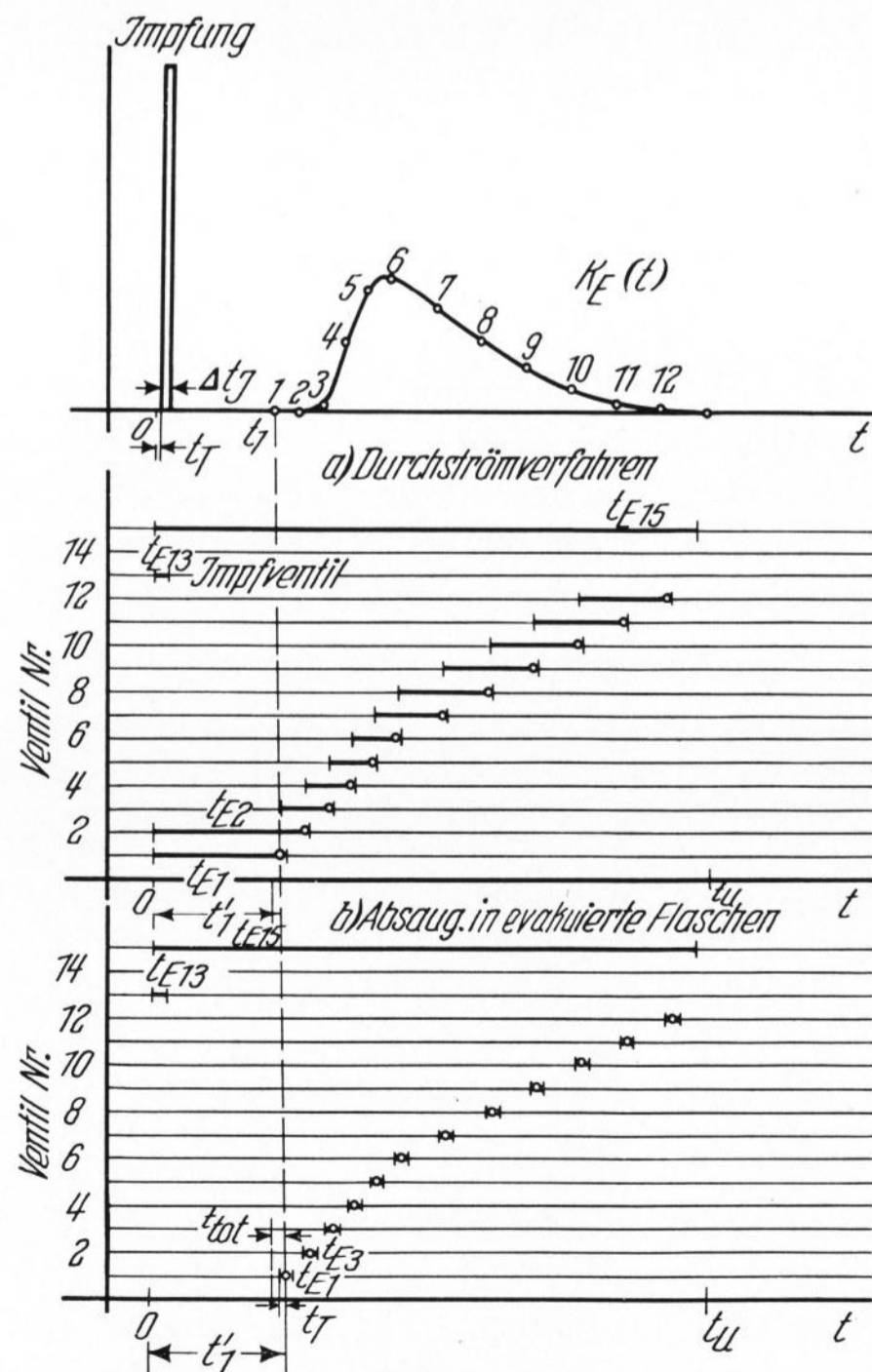


Bild 5. Programmschaltplan.

t_T = Totzeit, d. h. Zeit, die verstreicht, bis sich das Ventil nach Einschalten öffnet ($\approx 0,04$ s),

t_E = Ventilzeit, Zeit, während der das Ventil eingeschaltet ist,

t_{tot} = Zeitverzögerung, Zeit, die ein Gasteilchen benötigt, um von der Absaugstelle in die Gasflasche zu strömen.

diesem Grunde wurde die Totzeit bei jeder Versuchsreihe direkt gemessen. Zu einem genau bekannten Zeitpunkt $t = 0$ wurde dazu ein kurzer Heliumstoß direkt vor dem Sondeneintritt der Absaugsonde der abgesaugten Luft zugegeben. Die zu verschiedenen, genau bekannten Zeiten dem Gasstrom entnommenen Gasproben wurden dann gaschromatografisch auf ihren He-Gehalt analysiert.

Ein Vergleich der gemessenen Totzeit, wie sie an einem Beispiel (Bild 6) zeigt, mit der über das abgesaugte Volumen errechneten ergab bei allen Versuchen eine sehr gute Übereinstimmung.

Ein Beweis für die große Turbulenz der Strömung ($Re \approx 13500$) im Absaugsystem ist der sehr steile Konzentrationsanstieg, gleich nachdem die ersten Teilchen die Gassammelflaschen durchströmt haben. Die Strömung nähert sich also der Kolbenströmung, was erwünscht ist, um Längsmischungen im Leitungssystem zu vermeiden. Der wesentlich schwächere, schleppende Abfall der Konzentration (Bild 6) kommt daher, daß die He-Wolke, die sich um die Absaugsonde herum ausbildet, nicht schlagartig entfernt werden kann.

3. Versuchsergebnisse

Nach einer eingehenden Erprobung der Meßapparatur, die der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse galt und ergab, daß beide Verfahren zur Gasprobennahme gleiche Ergebnisse liefern, wurden die Verweilzeitverteilungen der Gase im Oberofen verschiedener Glasschmelzwannen bestimmt. Im einzelnen wurde das Verweilzeitverhalten der Gase in Abhängigkeit vom Ort der Impfgaszugabe und der Probenahme sowie in Abhängigkeit von der Wannenbelastung und von der Art des Brennstoffes (Öl oder Gas) an drei Querbrennerwannen und zwei Stirnbrennerwannen unterschiedlicher Konstruktion bestimmt.

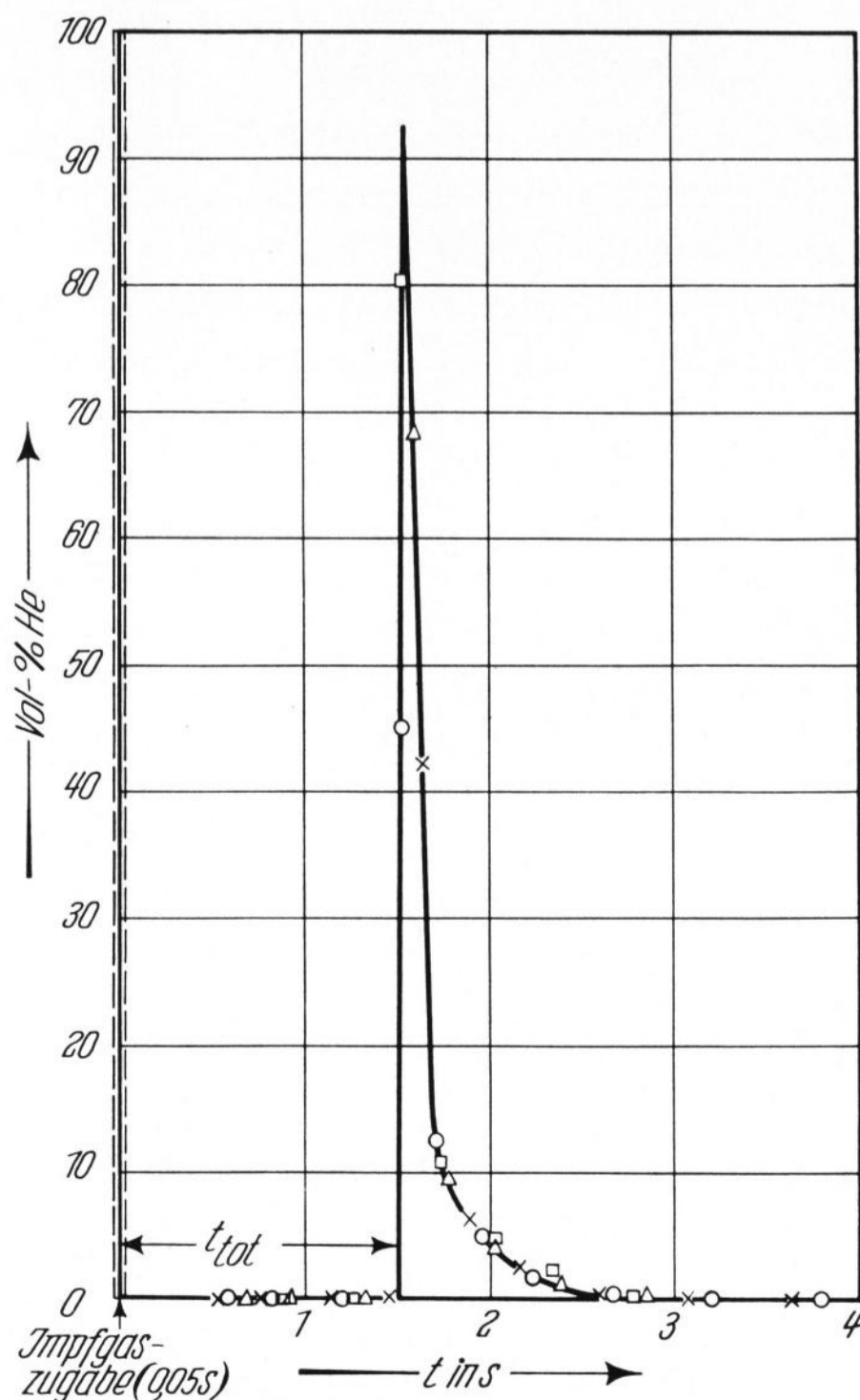


Bild 6. Totzeitbestimmung.

Da das Verweilzeitverhalten der Primärluft nicht mit dem des durch die Zerstäuber zugeführten Brennstoff-Luftgemisches übereinstimmen muß, wurde — soweit dies möglich war — Indikatorsubstanz sowohl der Hauptluft wie auch der Zerstäuberluft zugegeben. Im letzten Falle konnten allerdings nur die Summenkurven bestimmt werden, da zur Zerstäuberluft nur eine kontinuierliche Impfgaszugabe möglich war. Zu erwähnen ist noch, daß zur Sicherstellung des Kurvenverlaufs der Verweilzeitverteilungen und der Summenkurven sämtliche Einzelmessungen mehrmals mit unterschiedlichen Zeitprogrammen wiederholt wurden.

3.1. Verweilzeitverteilung in Abhängigkeit vom Ort der Impfgaszugabe und vom Ort der Probenahme

3.1.1. Verweilzeitverteilung der Frischluft

Zur Bestimmung der Verweilzeitverteilung in Abhängigkeit vom Ort der Impfgaszugabe und vom Ort der Probenahme wurde an verschiedenen Stellen des einziehenden Brenners Impfgas zugegeben und die der Verweilzeitverteilung proportional zeitliche Konzentrationsverteilung (siehe Abschnitt 1.5. und 1.6.) an den entsprechenden Stellen im abziehenden Brenner bestimmt.

Eine Abhängigkeit vom Ort der Impfgaszugabe zur Verbrennungsluft konnte bei keiner der untersuchten Anlagen einschließlich der Stirnbrennerwannen festgestellt werden, was auf eine intensive Vermischung der einzelnen einziehenden Luftschichten hindeutet. Zurückzuführen ist diese intensive Verwirbelung einmal auf die plötzliche Querschnittserweiterung am Brenneraustritt und zum anderen auf die meist sehr starke Neigung des Brenners zum Zerstäuberstrahl und Glasbad hin.

Unabhängig vom Ort der Impfgaszugabe ergab sich jedoch, wie Bild 7 an einem Beispiel zeigt, eine deutliche

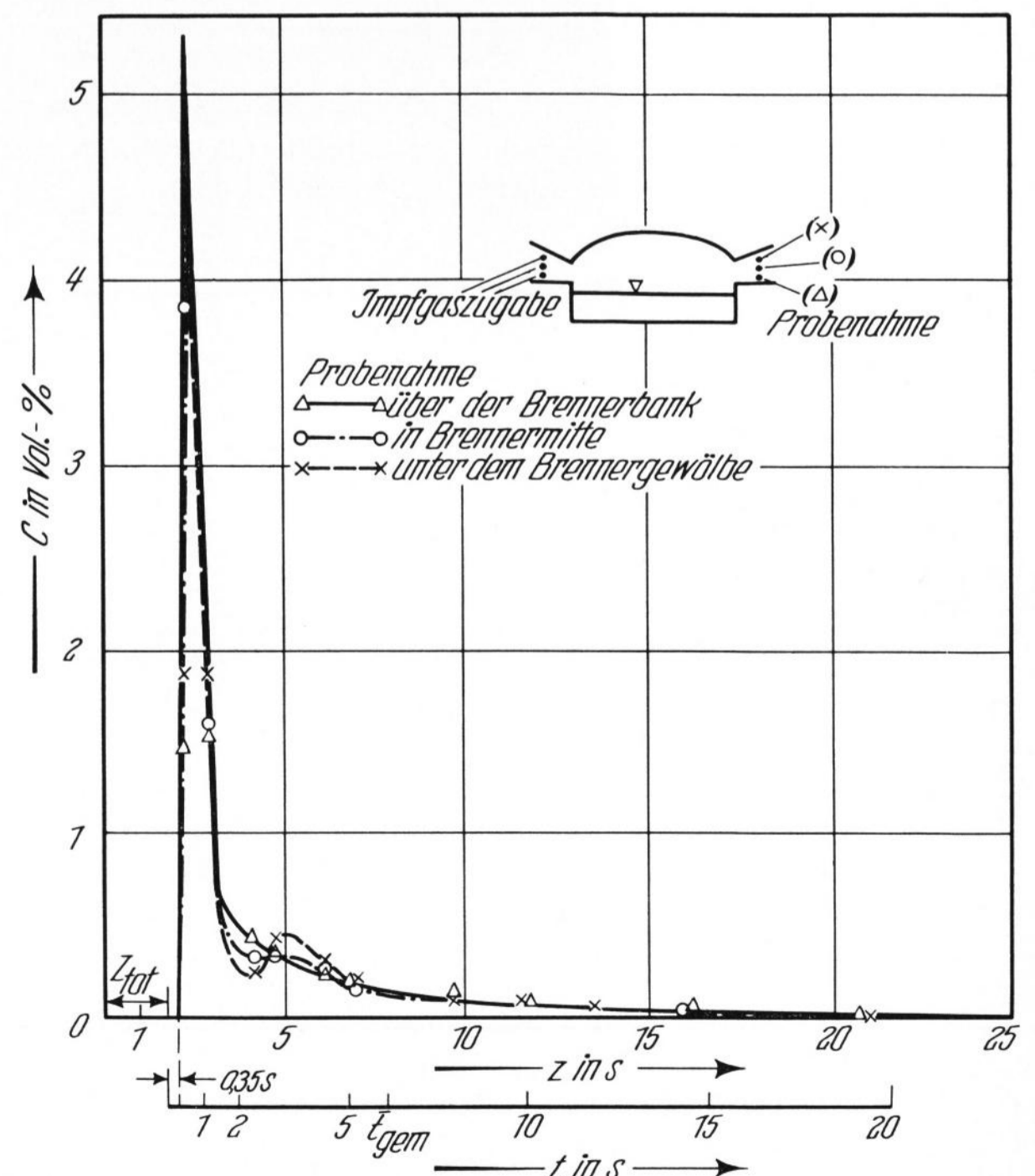


Bild 7. Konzentrationsverteilungen in verschiedenen Höhen, im Abgas führenden Brenner gemessen.

Abhängigkeit der zeitlichen Konzentrationsverteilung d. h. auch der Verweilzeitverteilung vom Ort der Probenahme. Zu bemerken ist, daß die beiden Abszissenmaßstäbe einmal die Meßzeit darstellen, in der die Totzeit der Absaugeinrichtung und die Zeiten, die das Gas benötigt, um von der Impfstelle in den Oberofen eintritt bzw. vom Oberofenaustritt bis zur Absaugsonde zu gelangen, enthalten sind (z-Achse). Der andere Zeitmaßstab (t-Achse) gibt dagegen die echte Verweilzeit im Oberofen wieder.

Vergleicht man die an verschiedenen Stellen im abziehenden Brenner einer rund $5\frac{1}{2}$ m breiten Hohlglaswanne gemessenen Konzentrationsverteilungen miteinander, so stellt man fest, daß, unabhängig vom Ort der Probenahme, die ersten Heliummengen das System (Oberofen) nach rund 0,35 s verlassen. Gleich darauf steigt die Konzentration sehr steil an, erreicht ungefähr 0,5 s nach Impfgaseintritt in den Oberofen ein Maximum, von dem aus sie sehr steil wieder abfällt. Diese Maxima konnten nicht direkt gemessen werden, sondern wurden über die Meßpunkte mehrerer Messungen interpoliert; da die Verweilzeitaussagen jedoch ausschließlich integralen Charakter haben, ist dies kaum von Einfluß auf die Ergebnisse. Bemerkenswert ist, daß das spitze Maxi-

imum aller Meßkurven zur gleichen Zeit auftritt und die Kurven im Bereich $0 \leq t \leq 1,3$ s ähnlich sind, d. h. sich nur im Absolutwert der Konzentration unterscheiden. Unabhängig vom Ort der Impfgaszugabe zeigen alle Verweilzeitverteilungen, die unter dem Brennergewölbe aufgenommen wurden, ein stark ausgeprägtes zweites Maximum, das ungefähr nach 3,3 s auftritt. Wesentlich schwächer ist dieses zweite Maximum bei den in der Brennerhalsmitte aufgenommenen Verteilungskurven und ist bei den über dem Brennerboden gemessenen Kurven nicht mehr nachweisbar.

Das ausgeprägte zweite Maximum der unter dem Brennergewölbe gemessenen Konzentrationsverteilung dürfte sich aus der Zumischung von heliumreichen Rauchgasen aus dem über dem Flammenstrahl liegenden Rückstrom erklären lassen. Dieses heliumreiche rückströmende Gasgemisch kann nur von dem das erste Maximum bildenden Vorstrom stammen. Da weitere Minima und Maxima nicht nachweisbar waren, kann der zeitliche Abstand beider Maxima, der bei dieser Anlage 2,8 s beträgt, als Austausch- oder Umlaufzeit des Rückstromes gedeutet werden. Da das zugegebene Helium als Indikator das Verhalten der Meßstrecke wiedergibt — zumal es nur in geringen Mengen zugegeben wurde — und eine Entmischung, wie aus ähnlichen Messungen [6] bekannt ist, nicht auftritt, gilt obiges auch für den dem System ursprünglich allein zugegebenen Stoffstrom, d. h. für die Frischluft.

Neben der der Verweilzeit proportionalen Konzentrationsverteilung wurden für verschiedene Positionen auch die Summenkurven bestimmt, die man bei kontinuierlicher Impfgaszugabe erhält. Da die Summenkurven mit den Integralkurven der entsprechenden Verweilzeitverteilungen identisch sind, kann über erstere die Verweilzeitmessung sehr einfach kontrolliert werden und außerdem der Anteil der Gasmenge, der nach t s das System schon wieder verlassen hat, bestimmt werden. Nach den den Verteilungskurven von Bild 7 zugeordneten gemessenen Summenkurven (Bild 8), die sehr gut mit den errechneten übereinstimmen, verweilen 50% der zur Zeit $t = 0$ eintretenden Gasmenge weniger als 1,5 s im Oberofen, während die restlichen 50% bis zu 25 s im Oberofen verweilen.

Im Gegensatz zu der relativ schmalen und hohen Querbrennerwanne ($b/h \approx 2,8$) ergaben die Messungen an zwei breiten Querbrennerwannen (Tafelglaswannen), die beide ungefähr 8 m breit waren und ein Breiten/Höhen-Verhältnis von $b/h = 4$ bis 8 hatten, keine Abhängigkeit vom Ort der Impfgaszugabe und vom Ort der Probenahme. Das bei einigen Brennern mit relativ kleinem b/h -Verhältnis unabhängig vom Ort der Probenahme gefundene zweite Maximum der Konzentrationsverteilung (Bild 9), das, wie schon dargelegt wurde, durch Zumischen von heliumreichem Gas aus dem Rückstrom über der Flamme entstanden sein dürfte, deutet darauf hin, daß bei diesen Wannern im Bereich des abziehenden Brenners eine sehr intensive Vermischung der aus verschiedenen Ofenbereichen stammenden Gase stattfindet. Diese wird durch den relativ langen Mischweg dieser Wannern nach Eintritt des Rückstroms in den Vorstrom noch begünstigt.

Es ist in diesem Zusammenhang darauf hinzuweisen, daß — wie später noch nachgewiesen wird — eine Rückströmung sich nicht unbedingt als zweites Maximum in der Verteilungskurve ausweisen muß.

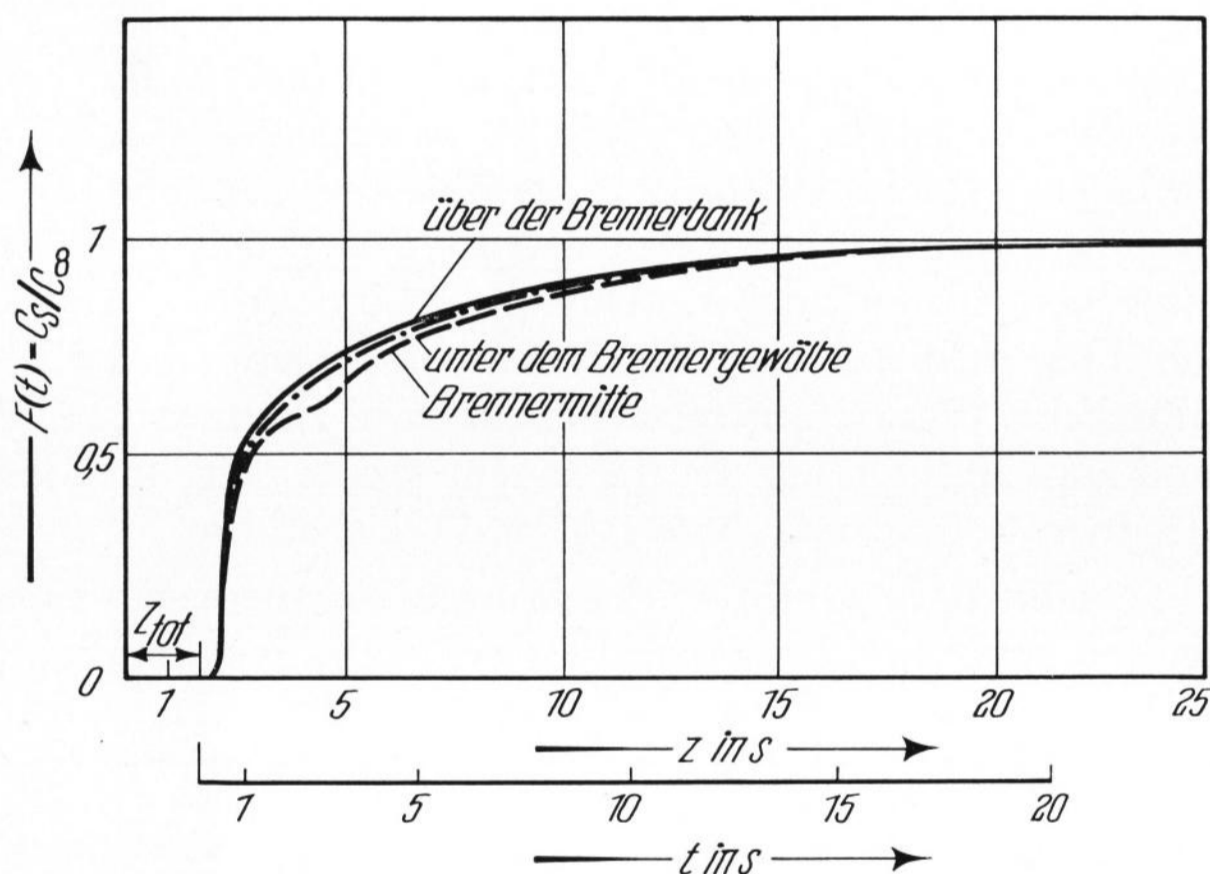


Bild 8. Summenverteilungen in verschiedenen Höhen im Abgasbrenner (Integralkurve von Bild 7).

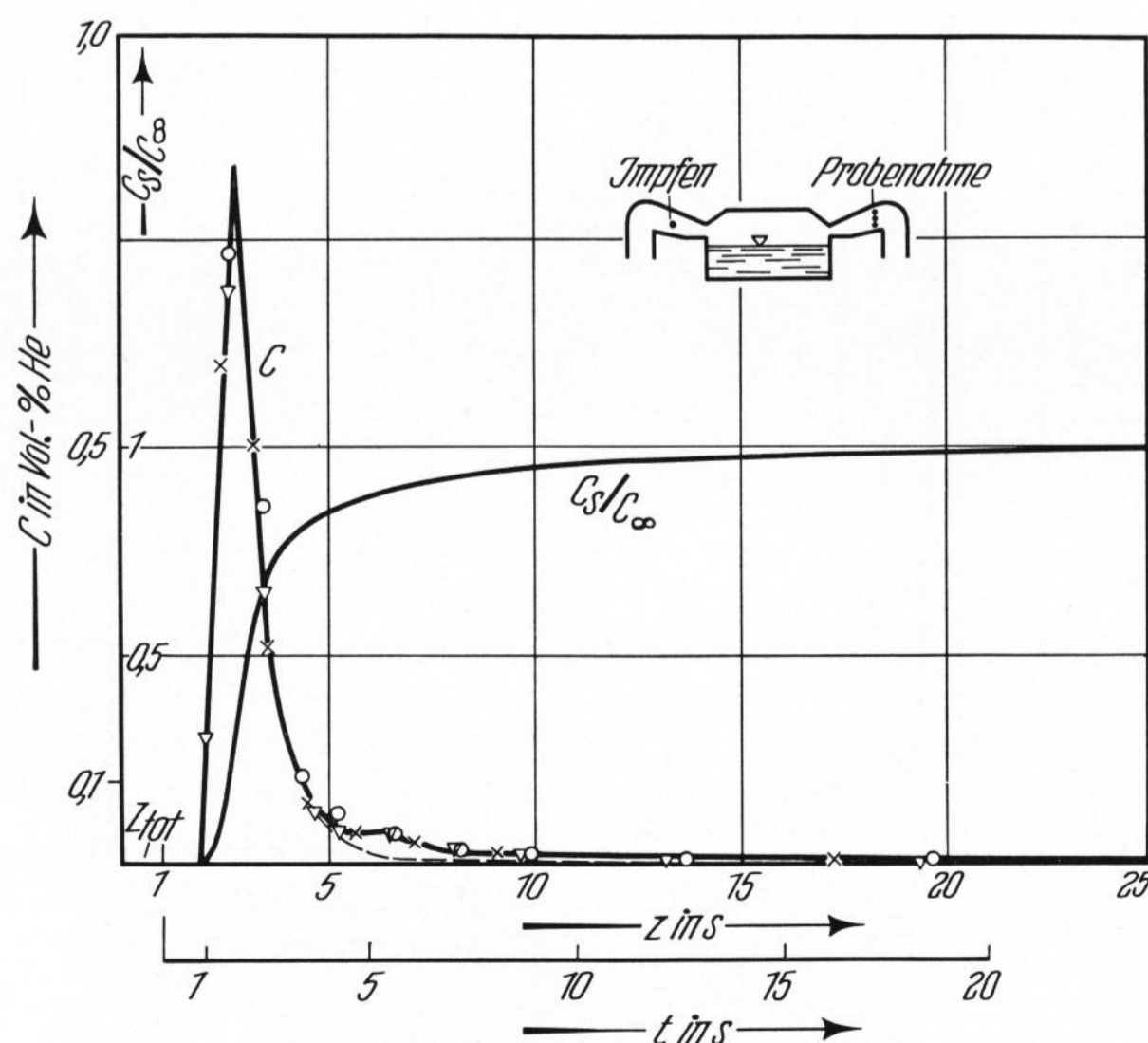


Bild 9. Verweilzeitverteilung in Abhängigkeit vom Ort der Probenahme (Tafelglaswanne).

Eine Abhängigkeit vom Ort der Gasprobenahme ergab sich auch bei der untersuchten U-Flammenwanne (Bild 10), in der außerdem auch die Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilungen im Oberofen bestimmt wurden. Nach Erreichen eines Hauptmaximums, das sich als ortsunabhängig erwies und rund 3,1 s nach Impfgaszugabe auftritt, fällt wie bei der zuvor besprochenen Verteilung die Konzentration stark ab und erreicht rund 7 s nach dem Impfstop ein schwaches zweites Maximum, das relativ breit ist und auf eine zwischen dem U-förmigen Hauptstrom liegende Wirbelwalze hindeutet, deren Verlauf aus den gemessenen Geschwindigkeits- und Temperaturverteilungen (Bilder 11a und b) abgeleitet werden kann. Dieses zweite Maximum ist — wie zu erwarten war — nahe der Brennerinnenseite am größten und fällt nach außen hin ab, was darauf hindeutet, daß die Vermischung des indikatorsubstanzreicheren Gasgemisches aus dem Rückstrom mit dem Hauptstrom bei Verlassen des Ofens noch nicht beendet ist.

Neben der zeitlichen Konzentrationsverteilung, wie sie Bild 10 zeigt, ergaben sich bei der Messung an dieser U-Flammenwanne unter sonst gleicher Ofeneinstellung zwei Verteilungen, die sehr stark von der zuvor beschriebenen Verteilung abweichen (Bild 12).

Da die beiden Verteilungen im zeitlichen Abstand von 1 h bei Probenahmen an zwei verschiedenen Positionen ermittelt wurden, können Meßfehler von Seiten der Meßapparatur ausgeschlossen werden. Die von den normalerweise gemessenen zeitlichen Konzentrationsverteilungen abweichenden Kurven deuten auf einen veränderten Strömungsverlauf im Ofen hin. Die Strömung scheint von der stabilen Geschwindigkeitsverteilung, die sich in U-Flammenwannen normalerweise ausbildet und durch Messung nachgewiesen wurde (Bilder 11a und b), abzuweichen. Inwiefern der Strömungsverlauf, der im übrigen instabil zu sein scheint und bei weiteren Messungen nicht mehr nachzuweisen war, der in der Literatur als liegende „8“ bezeichneten Strömungsform entspricht, kann aus den vorliegenden Messungen nicht eindeutig beantwortet werden.

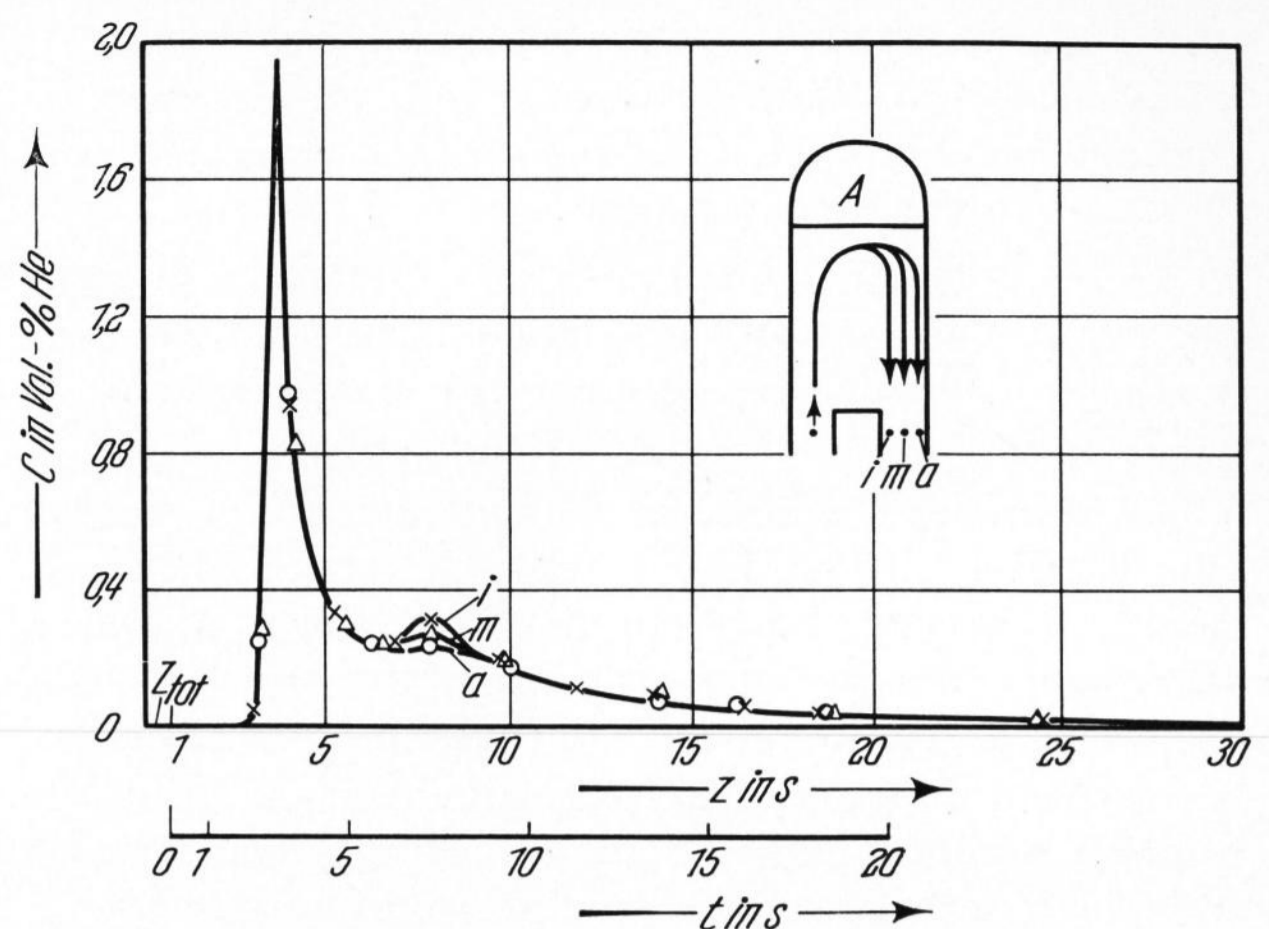


Bild 10. Verweilzeitverteilung in Abhängigkeit vom Ort der Probenahme (U-Flammenwanne).

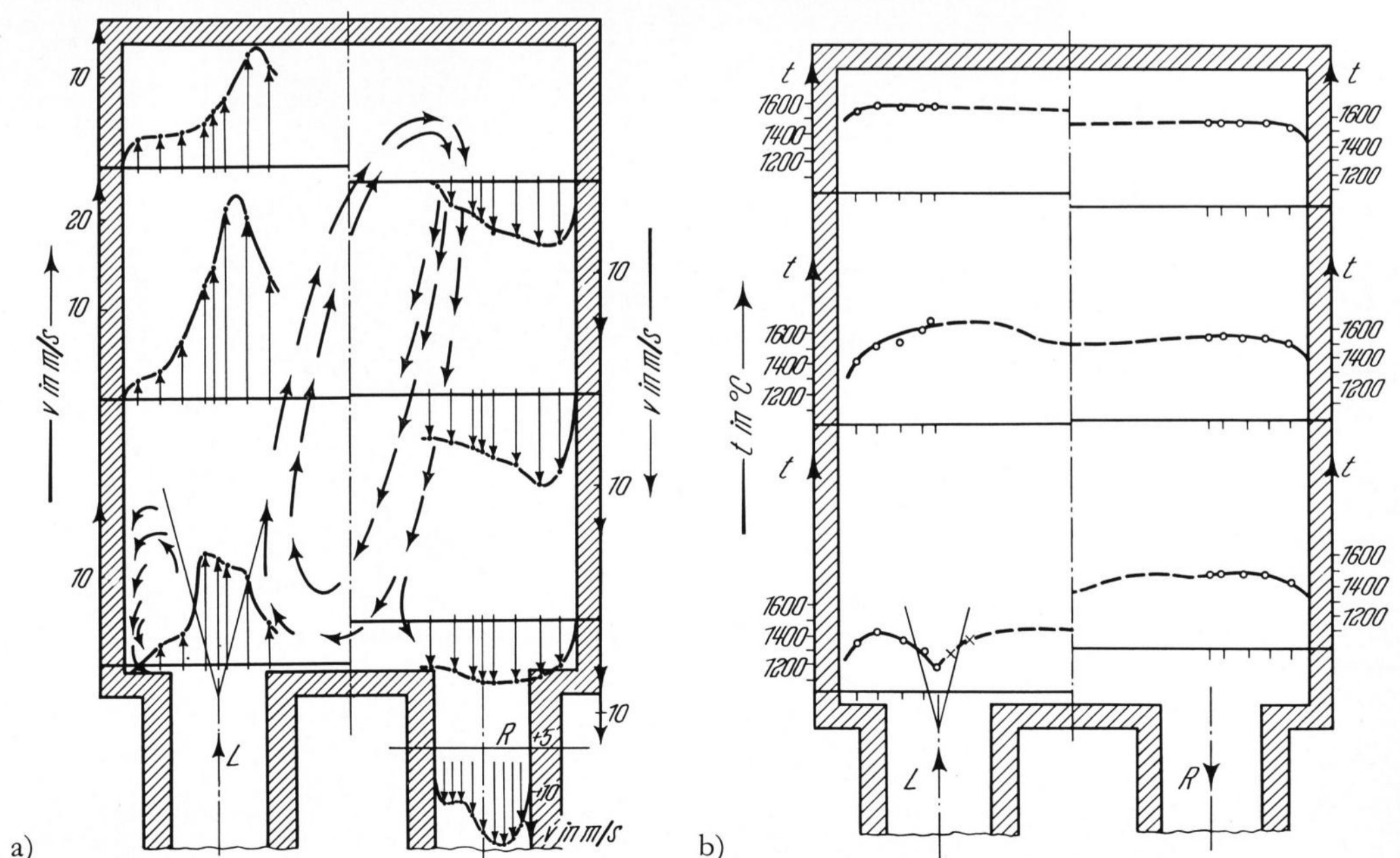
Wie der gestrichelt gezeichnete Kurvenverlauf, der auch über die Mengenbilanz nicht eindeutig festgelegt werden konnte, zeigt, tritt hier das zweite Maximum rund 2,5 s früher auf als bei der als stabil anzusehenden Strömungsform. Dieses gleich nach dem ersten Maximum auftretende zweite Maximum dürfte auf den von TERADA und WAKAMATSU [7] beschriebenen Strömungsverlauf zurückzuführen sein: Der eintretende Strahl wird, wie diese in Modellversuchen zeigten, etwa in der Ofenmitte fast horizontal um 90° abgelenkt, trifft nahezu senkrecht auf die gegenüberliegende Ofenwand und teilt sich dort in zwei etwa gleiche Teile, von denen der eine dem abziehenden Brenner direkt zuströmt, während der andere eine beschreibt, wobei er beim Rückweg zum abziehenden Brenner unter dem eintretenden Strahl hindurchtritt (Zopfströmung Bild 12).

3.1.2. Verweilzeitverteilung des Zerstäubermediums

Zum Vergleich der Verweilzeitverteilungen der über den Brenner zurückgeführten Frischluft und der über den Zerstäuber zugegebenen Luft und damit des Brenn-

Bilder 11a und b. Geschwindigkeitsverteilung und Gas- und Flammentemperatur über dem Glasbad,

- a) Geschwindigkeitsverteilung (300 mm über der horizontalen Strahlachse),
- b) Gas- und Flammentemperatur (630 mm über dem Bad).



stoffs, wurde letzterer — soweit dies möglich war — kontinuierlich Helium zugegeben und im abziehenden Brenner die Summenverteilung in Abhängigkeit vom Ort der Probenahme bestimmt.

Dabei ergaben sich bei einer der untersuchten Querbrennerwannen, die mit schwerem Heizöl beheizt war, deutliche Unterschiede zwischen den Verteilungskurven der Frischluft und der Zerstäuberluft (Bild 13).

Obwohl die minimale Aufenthaltszeit in beiden Fällen dieselbe ist und beide Verteilungen ähnlich verlaufen, ist der Anteil der über die Zerstäuber zugeführten Stoffmenge, der weniger als t_s im Oberofen verweilt, größer, d. h. das Brennstoff-Luft-Gemisch der Zerstäuber verweilt in dieser relativ schmalen Anlage (Hohlglaswanne) weniger lang als die Frischluft. Da bei den anderen Querbrennerwannen eine Impfung des Brennstoffs nicht möglich war (Gasbeheizung, Druckkölzerstäubung), kann obiges Ergebnis nicht ohne weiteres auf andere Querbrennerwannen übertragen werden.

Keine Unterschiede im Verweilzeitverhalten der Frischluft und der Zerstäuberluft konnten dagegen bei den untersuchten Stirnbrennerwannen, die alle ölbeheizt waren, festgestellt werden (Bild 14), was wahrscheinlich auf die infolge des längeren Flammenweges und der Umlenkung intensivere Vermischung im Oberofen zurückzuführen ist.

3.2. Verweilzeitverteilung in Abhängigkeit vom Brennstoffdurchsatz

Bedingt durch Schmelzleistungssteigerung war bei zwei der untersuchten Ofenanlagen die Möglichkeit

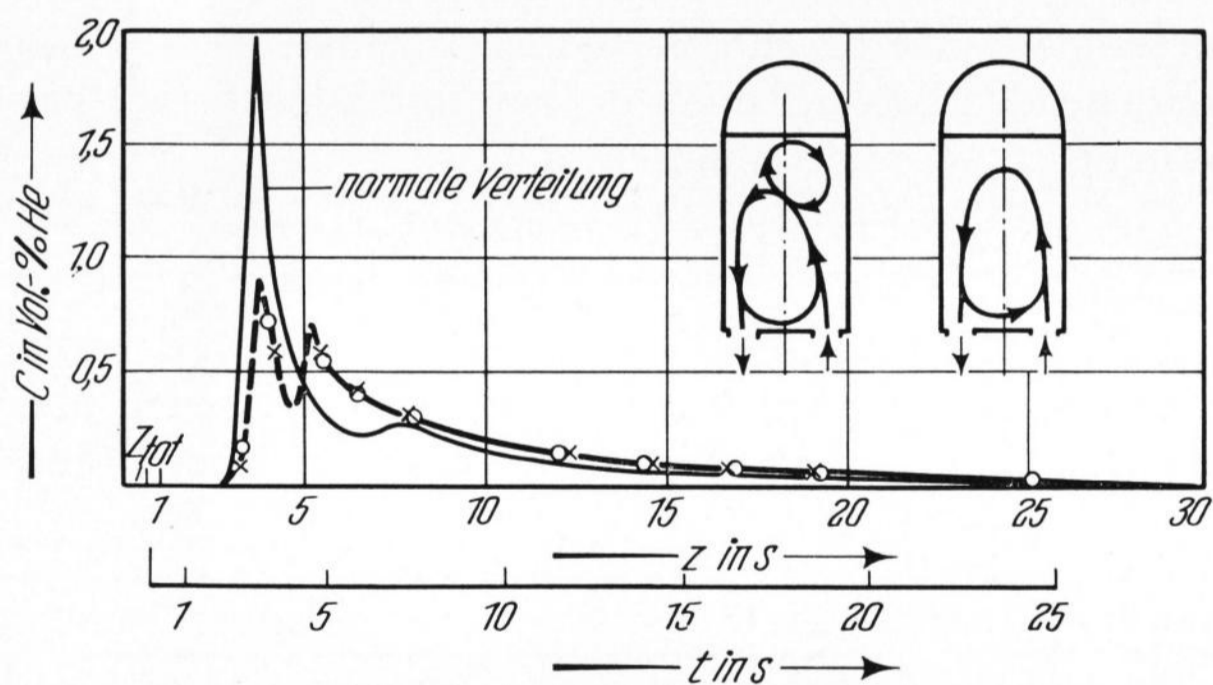


Bild 12. Verweilzeitverteilung bei instabiler Durchströmung einer U-Flammenwanne.

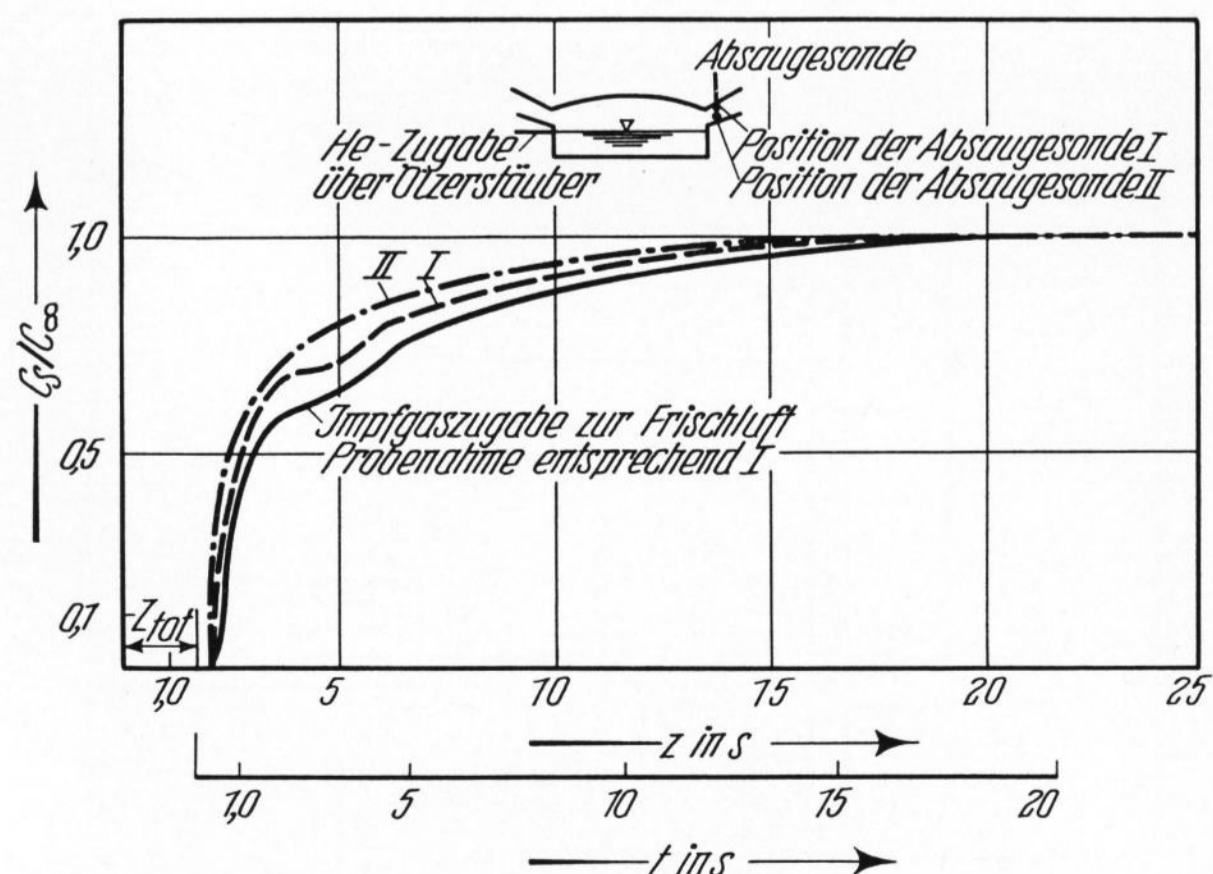


Bild 13. Helium-Zugabe zur Zerstäuberluft einer Querbrennerwanne (Hohlglaswanne).

gegeben, die Verweilzeitverteilung in Abhängigkeit vom Brennstoffdurchsatz zu messen.

Wie Bild 15 am Beispiel einer U-Flammenwanne zeigt, ergibt sich auch bei erhöhter Schmelzleistung ein ähnlicher Verlauf für die Verweilzeitverteilung der Gase im Oberofen; die absoluten Konzentrationswerte sind jedoch entsprechend dem höheren Gas-Durchsatz bei gleicher Impfgasmenge niedriger. Außerdem ist entsprechend der durch die höhere Schmelzleistung bedingten Vergrößerung der mittleren Gasgeschwindigkeit die Verweilzeitverteilung in Richtung des Koordinatensprungs verschoben, d. h. bei höherer Belastung sinkt — was ja auch zu erwarten ist — die Verweilzeit der eingebrachten Stoffmenge.

Die bei verschiedenen Belastungen gemessenen Verteilungskurven lassen sich jedoch durch eine dimensionslose Darstellung, bei der die Zeit auf die mittlere Aufenthaltszeit \bar{t}_{th} und die Konzentration auf die mittlere Eintrittskonzentration (Q_{He}/\dot{v}) bezogen wird, ineinander überführen, was ein Beweis dafür ist, daß sich der Strömungsverlauf im Oberofen auch bei höheren Belastungen nicht grundlegend ändert, sondern ähnlich ist — was auch zu erwarten war — da das Impulsverhältnis aus Zerstäuberdurchsatz und Verbrennungsluft konstant bleibt ($Re_1 = 13000, Re_2 = 17000$).

3.3. Verweilzeitverteilung in Abhängigkeit von der Art des Brennstoffes (Gas/Öl)

Die bisher gezeigten Verweilzeitverteilungen wurden ausschließlich an ölbeheizten Wannen gemessen, bei denen der Brennstoff mit sehr hoher Geschwindigkeit

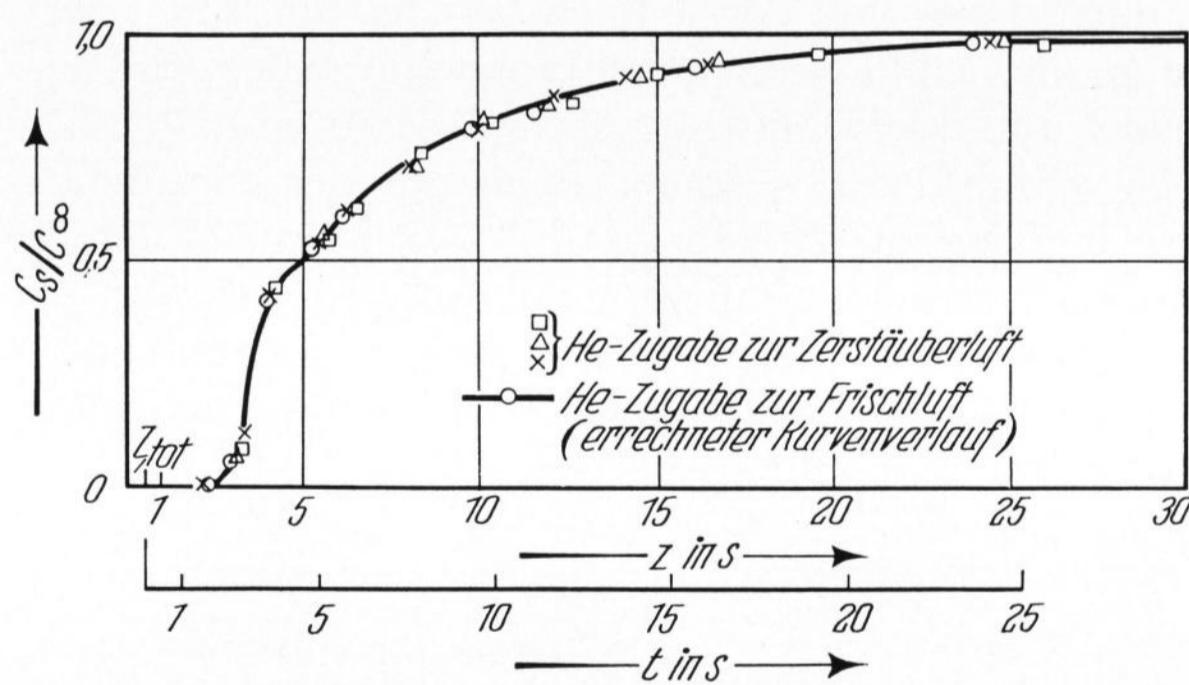


Bild 14. Helium-Zugabe zur Zerstäuberluft bei einer U-Flammenwanne.

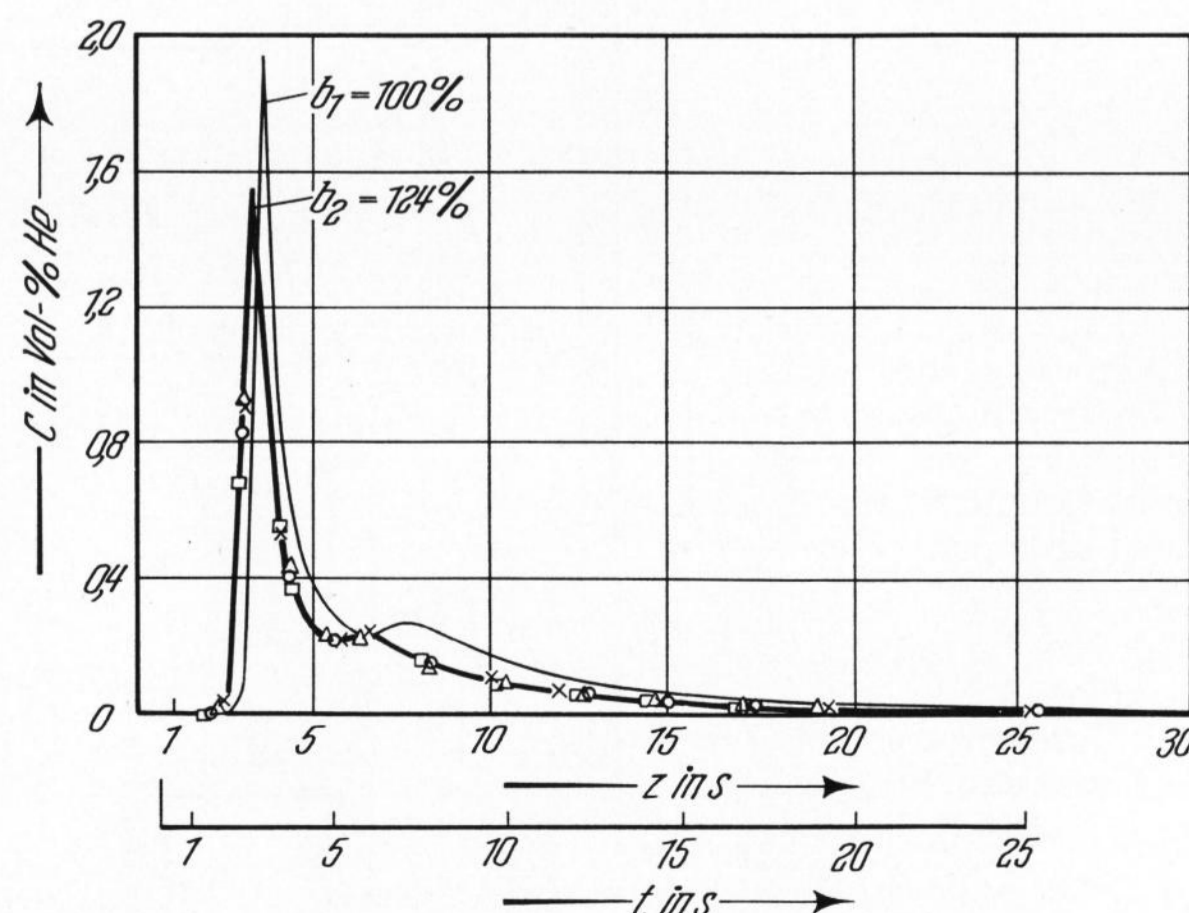


Bild 15. Verweilzeitverteilung in Abhängigkeit vom Brennstoffdurchsatz.

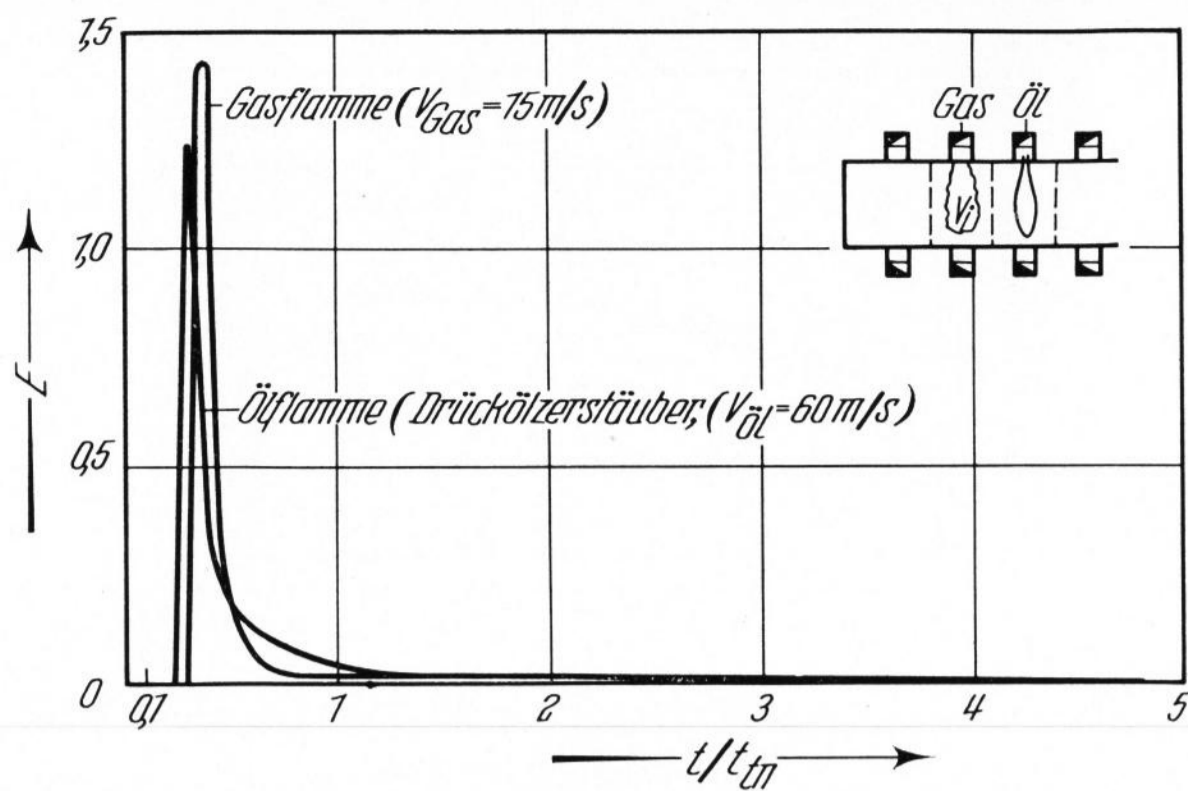


Bild 16. Normierte Verweilzeitverteilung einer Öl- und einer Gasflamme (Luftgeschwindigkeit $\approx 10,4$ m/s).

in den Oberofen eingedüst wird. Es liegen also Flammen vor, die wie auch Freistrahlfammen einen Strahlbereich besitzen, in dem die zu Anfang sehr hohe Geschwindigkeit durch Impulsaustausch abgebaut wird.

Ein ganz anderes Strömungsbild zeigen dagegen stadtgasbeheizte Wannen, bei denen Frischgas und Luft bei Eintritt in den Oberofen meist gleiche Geschwindigkeit haben und die Vermischung durch entsprechende Strahlanstellung erreicht wird. Entsprechend den unterschiedlichen Strömungen ist für beide Flammen ein unterschiedliches Verweilzeitverhalten zu erwarten, das auch an einer Querbrennerwanne, die teilweise mit Öl und zum Teil mit Gas (Bild 16) beheizt wurde, nachgewiesen werden konnte. Da der Gesamtdurchsatz durch beide Brenner sehr verschieden war, wurden beide Verteilungen normiert über der dimensionslosen Zeit t/\bar{t}_{th} aufgetragen und damit durchsatzunabhängig gemacht. Die Verweilzeitverteilung der Ölflamme zeigt das Verhalten einer Strahlflamme. Ein Teil der den Ölstrahl umgebenden Luft wird in den Strahl hineingerissen und durchquert relativ schnell den Ofenraum, während der Rest der eingegebenen Luft sich erst langsam mit dem Strahl mischt und zum abziehenden Brenner transportiert wird. Im Gegensatz dazu deutet die Verweilzeitverteilung der Gasflamme darauf hin, daß Luft und Gas bzw. dessen Abgas den Ofenraum weitgehend gleichmäßig durchqueren.

3.4. Verweilzeitverteilung und Queraustausch zwischen den einzelnen Brennern

Eine bei der Bestimmung der Verweilzeit erstmals quantitativ festgestellte Erscheinung, die Einfluß auf die Verweilzeitverteilung hat und die Turbulenz in der Strömung charakterisiert, ist der Stoffaustausch zwischen benachbarten Brennern, im folgenden kurz Queraustausch genannt. Stellt man für ein Brennerpaar eine Mengenbilanz für den zugegebenen Indikator auf, so stellt man fest, daß nur 60 bis 85% des zugegebenen Indikators durch den direkt gegenüberliegenden Brenner den Oberofen verlassen.

Da die Heliumlöslichkeit im Glas sehr klein ist, muß angenommen werden, daß die fehlende He-Menge durch die benachbarten Brenner entweicht. Es existieren demnach zwischen den einzelnen Flammen turbulente Austauschzone.

Ein Nachweis des vermuteten Stoffaustausches erbrachten die Messungen an zwei querbeheizten Tafelglaswannen, bei denen auch der zeitliche Konzentrations-

verlauf in den benachbarten, nicht dem geimpften Brenner zugeordneten abgasführenden Brenner bestimmt wurde (Bild 17). Wie Bild 17 an einem Beispiel zeigt, ähneln diese Konzentrationsverteilungen etwa den bisher gezeigten Verteilungen; sie unterscheiden sich jedoch im Absolutwert der Konzentration, die meist rund eine Zehnerpotenz niedriger ist als die der Hauptverteilung. Die im abklingenden Kurvenast auftretende Minima und Maxima deuten darauf hin, daß zwischen den einzelnen Brennern mehr oder weniger stabile Strömungswalzen liegen, über die der Stoffaustausch stattfindet.

Die Auswertung der Messungen hinsichtlich des Queraustausches ergab für die eine Tafelglaswanne (Bild 18), daß nur rund 80% der durch einen Brenner zugeführten Stoffmenge durch den gegenüberliegenden Brenner abzieht; die restlichen 20% teilen sich innerhalb einer gewissen Streubreite auf die beiden Nachbarbrenner auf und werden wahrscheinlich über beiderseits der Flamme liegende Strömungswalzen ausgetauscht.

Eine etwas andere, sehr viel unsymmetrischere Aufteilung, ergab sich bei der zweiten untersuchten Tafelglaswanne (Bild 19). Bei dieser Wanne, bei der auch ein Gasaustausch zum Ziehkreuz hin festgestellt wurde, lag die direkt den Oberofen durchströmende Gasmenge sogar zwischen 45 und 80%. Bemerkenswert ist bei dieser Anlage, daß bei allen Brennern bis auf den letzten 7. Brenner eine größere Abgasmenge an den zum Ziehkreuz hin benachbarten Brenner abgegeben wird.

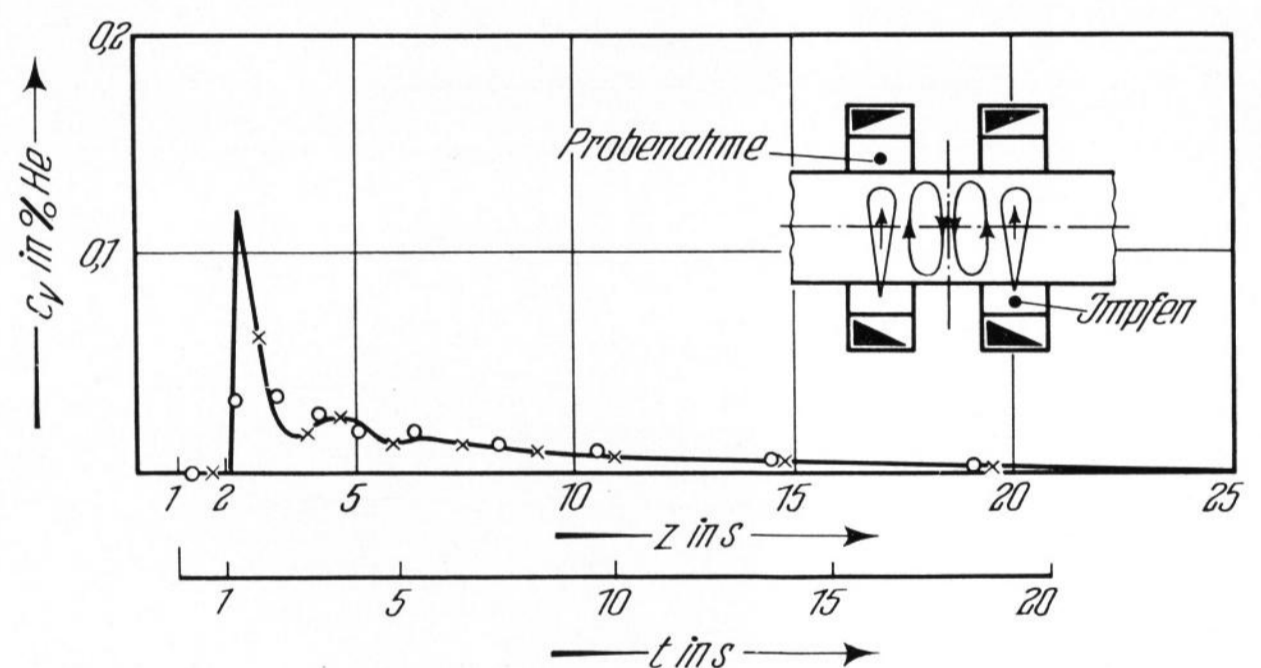


Bild 17. Nebenverteilung bei einer Querbrennerwanne.

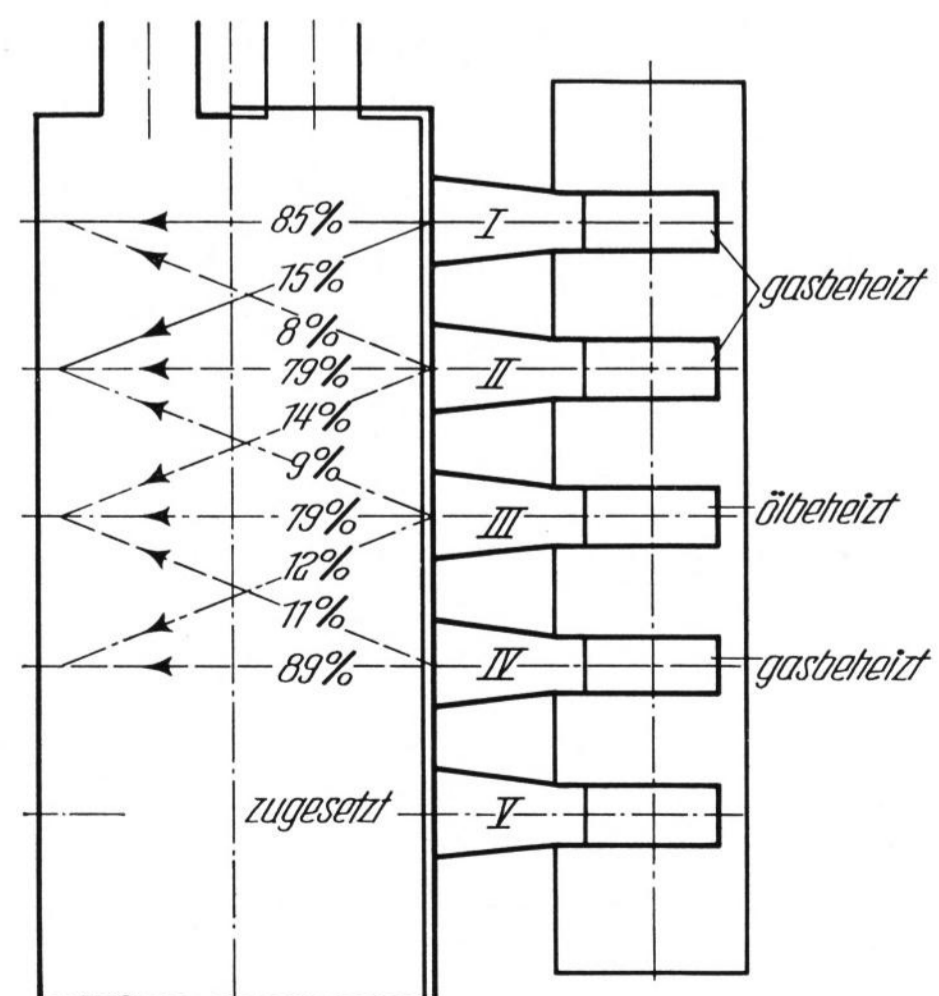


Bild 18. Queraustausch im Oberofen einer Querbrennerwanne (Tafelglaswanne).

Auffallend ist auch der extrem hohe Gasaustausch vom 3. zum 4. Brenner, der vermutlich auf die starke Verengung des Brennerhalses zurückzuführen ist, wo starke Ablagerungen beobachtet wurden. Die Abgase stauen sich vor diesem Brenner auf, wodurch Teilmengen zum Nachbarbrenner hin abgedrängt werden, was sich auch auf den Gasaustausch zwischen den daneben liegenden Brennern auswirkt. Allgemein ist zu erwarten, daß der Queraustausch bei Querbrennerwannen mit Ölbeheizung um so geringer ist, je größer der gesamte Brennerimpuls ist. Bis auf Brenner III der Tafelglaswanne (Bild 19), der sehr wahrscheinlich infolge der erwähnten Querschnittsverengung im Brennerhals stark abweicht, bestätigt die Berechnung diese Tendenz (Bild 20).

4. Diskussion der Ergebnisse

4.1. Minimale und Maximale Aufenthaltszeit

Vergleicht man die an verschiedenen Wannenanlagen gemessenen, der Verweilzeitverteilung proportionalen Konzentrationsverteilungen miteinander, so stellt man fest, daß unabhängig vom Ort der Impfgaszugabe, dem Ort der Probenahme und vom Brennstoff die ersten Teilchen nach einer von Anlage zu Anlage unterschiedlichen minimalen Aufenthaltszeit t_{min} den Oberofen verlassen. Kurze Zeit später ist der Anteil der zur Zeit $t = 0$ eingebrachten Teilchen maximal und fällt dann sehr steil mit oder ohne zweites Maximum monoton ab. Die letzten Teilchen, die zum Zeitpunkt $t = 0$ ins

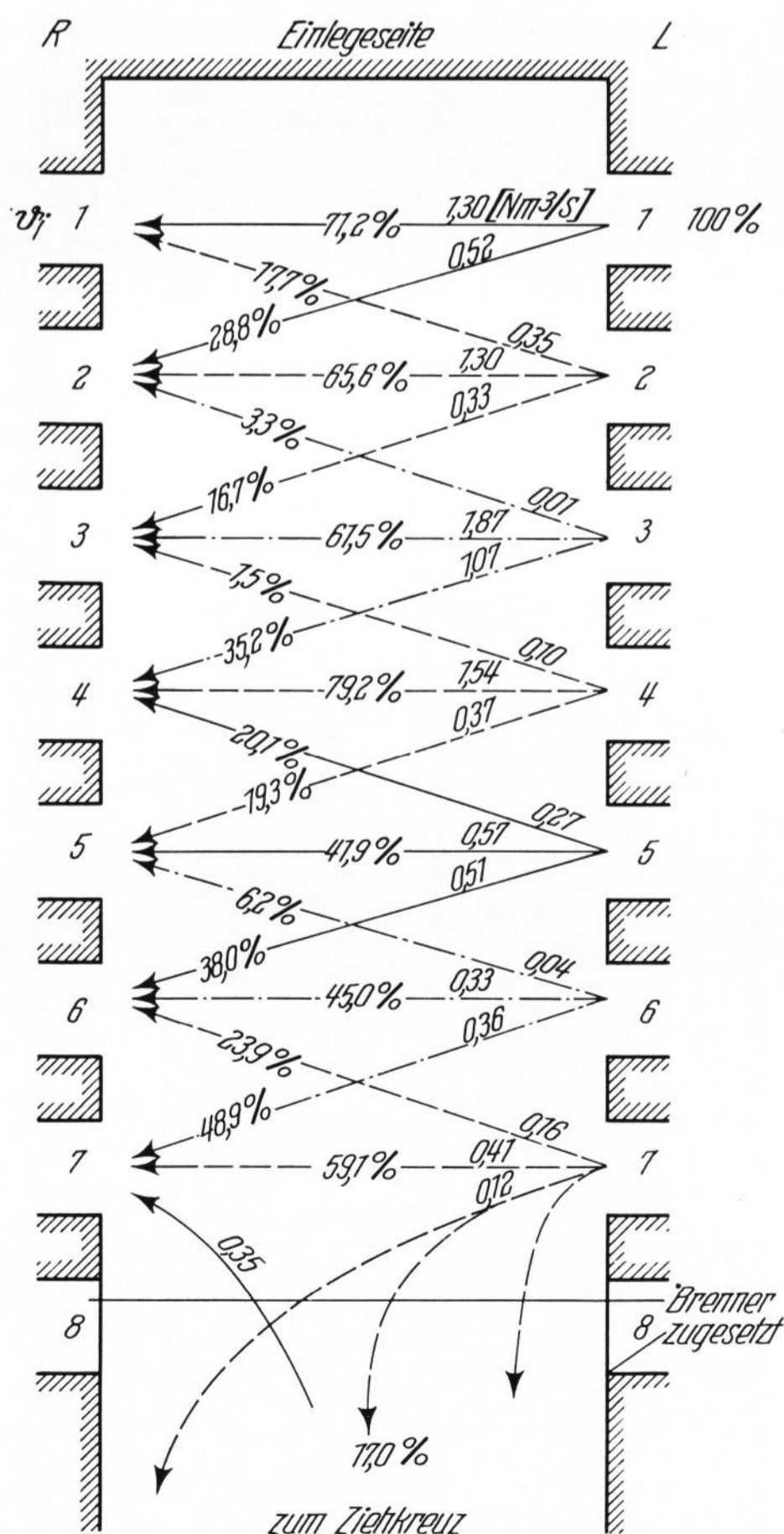


Bild 19. Queraustausch im Oberofen einer Querbrennerwanne (Tafelglaswanne).

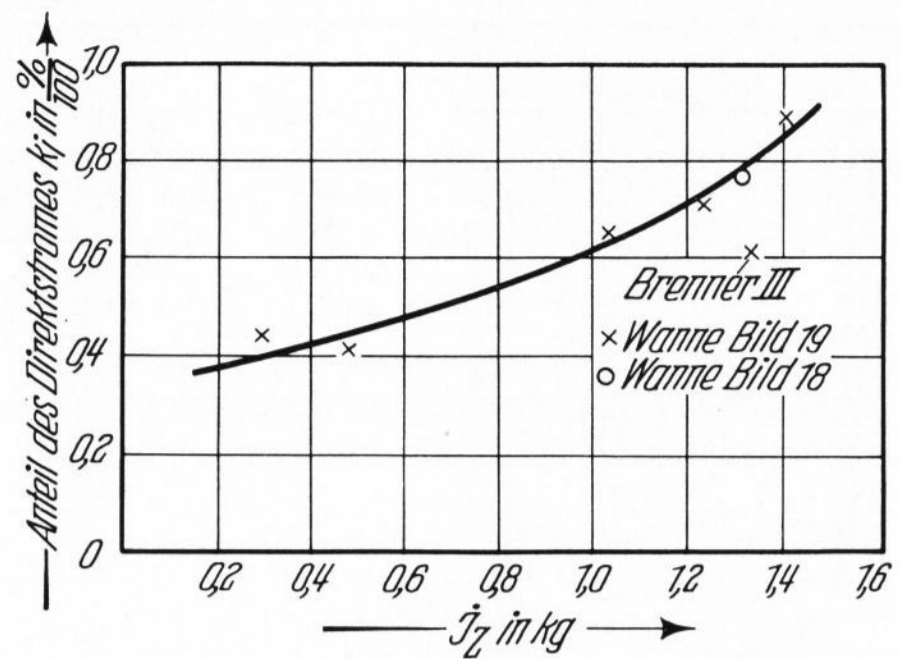


Bild 20. Anteil des Direktstromes in Abhängigkeit vom Brennerimpuls.

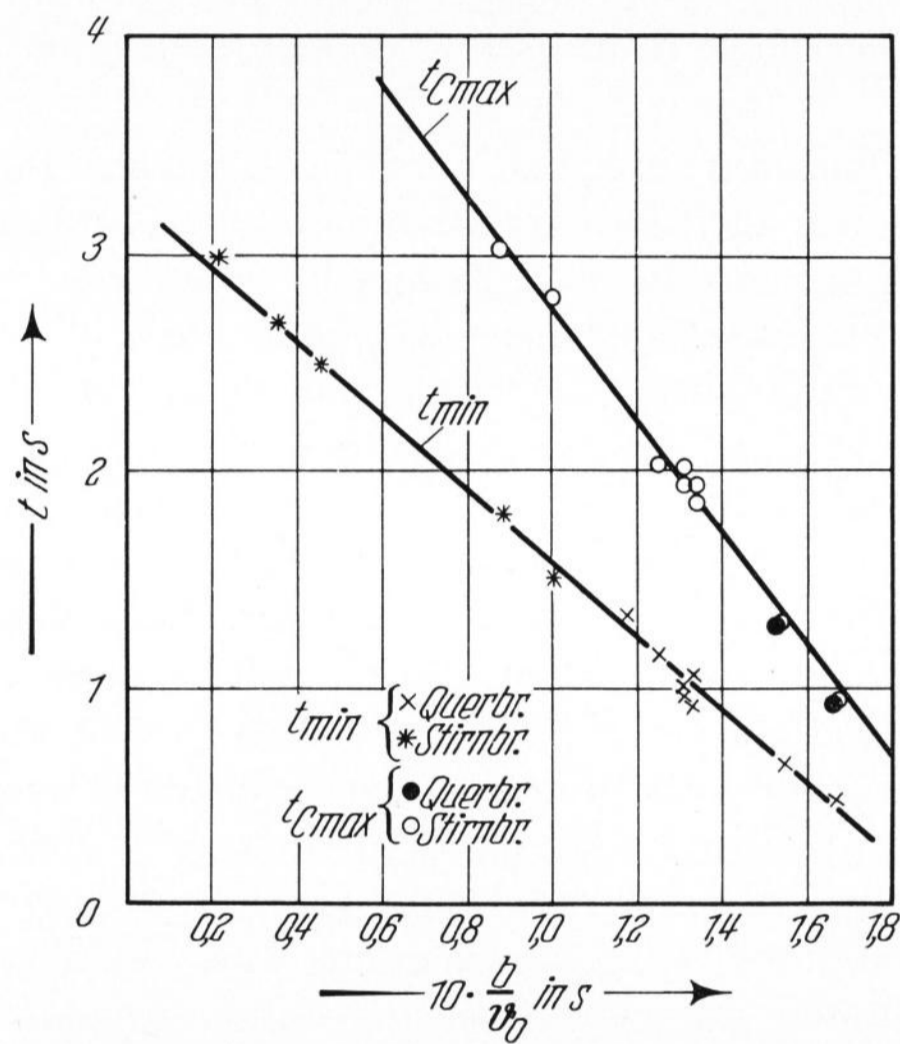


Bild 21. Minimale Aufenthaltszeit und Aufenthaltszeit des Verweilzeitmaximums in Abhängigkeit von der Wannebreite und der Strahleintrittsgeschwindigkeit.

System eingeführt wurden, verlassen nach einer Zeit t_{max} den Oberofen.

Betrachtet man den Brennstoffstrahl als Freistrah, was bei großen Feuerräumen in erster Näherung möglich ist, so gilt für die Achsgeschwindigkeit v_m des Strahles

$$v_m \sim \frac{v_0}{x}$$

Für die mittlere Achsgeschwindigkeit \bar{v}_m über die Strahllänge (Ofenbreite b) folgt daraus

$$\bar{v}_m \sim v_0$$

woraus sich mit $\frac{b}{v} = t$ bzw. mit $\frac{b}{\bar{v}_m} = t_{min}$

$$t_{min} \sim \frac{b}{v_0} \tag{13}$$

ableitet.

Trägt man t_{min} über b/v_0 auf, so muß sich also, da die Gasteilchen, die sich auf der Strahlachse bewegen, den Oberofen auf kürzestem Weg mit höchster Geschwindigkeit verlassen, eine Gerade ergeben (Bild 21). Analog gilt für die der Maximalkonzentration zugeordnete Zeit t_{cmax} , die auch proportional dem Quotienten aus Wannebreite und Strahleintrittsgeschwindigkeit ist, da die mittlere Strahlgeschwindigkeit gleichfalls proportional $1/v_0$ ist.

Auch die maximale Aufenthaltszeit der Gase im Oberofen ist von Brenner zu Brenner und von Ofen zu Ofen verschieden. Rein überlegungsmäßig nimmt sie mit zunehmendem Oberofenvolumen, das geometrisch jedem Brenner zugeordnet ist, zu und fällt mit zunehmendem Brennstoffdurchsatz ab, d. h. die maximale Aufenthaltszeit nimmt mit zunehmender mittlerer Aufenthaltszeit \bar{t}_{th} zu (Bild 22).

4.2. Vergleich der Verweilzeitverteilungen

Will man die an verschiedenen Brennern gemessenen Konzentrationsverteilungen miteinander vergleichen, so muß man diese normieren, d. h. die auf die Gasmenge 1 bezogene Verweilzeitverteilung nach Gleichung (9) berechnen. Da — wie gezeigt wurde — bei Wannen mit mehreren Brennern die zu einem Brenner einziehende Stoffmenge nicht ausschließlich durch den zugeordneten abgasführenden Brenner abströmt, sind je nach Betrachtungsweise verschiedene Verweilzeitverteilungen möglich:

1. Verweilzeitverteilung $E(t)$ der Stoffmenge, die die Ofenanlage auf direktem Weg durchströmt. Das Integral über die Verteilung $E(t)$, die nach Gleichung (9) definiert ist zu

$$E(t) = C_{i-i}(t) \frac{\dot{v}_i}{Q_{He}}, \quad (14)$$

gibt — wie aus der Bilanzgleichung folgt — den Anteil der zum i-ten Brenner eintretenden Stoffmenge wieder, der durch den gegenüberliegenden i-ten Brenner abzieht:

$$\int_0^\infty E(t) dt = k_{i-i} \leq 1.$$

2. Verweilzeitverteilung $E_g(t)$ des gesamten durch einen Brenner eintretenden Stoffstroms. Diese Verteilung, die berücksichtigt, daß Teilmengen des eintretenden Stoffstroms mit anderer Zeitverteilung durch benachbarte Brenner abziehen, ergibt sich, da die Einzelverteilungen parallel ablaufen, als Überlagerung unter Berücksichtigung des Anteils der ausgetauschten Substanzmenge. Es gilt

$$E_g(t) = C_{i-(i-1)}(t) \frac{\dot{v}_{i-1}}{Q_{He}} + C_{i-i}(t) \frac{\dot{v}_i}{Q_{He}} + C_{i-(i+1)}(t) \frac{\dot{v}_{(i+1)}}{Q_{He}}$$

und

$$\int_0^\infty E_g(t) dt \equiv 1. \quad (15)$$

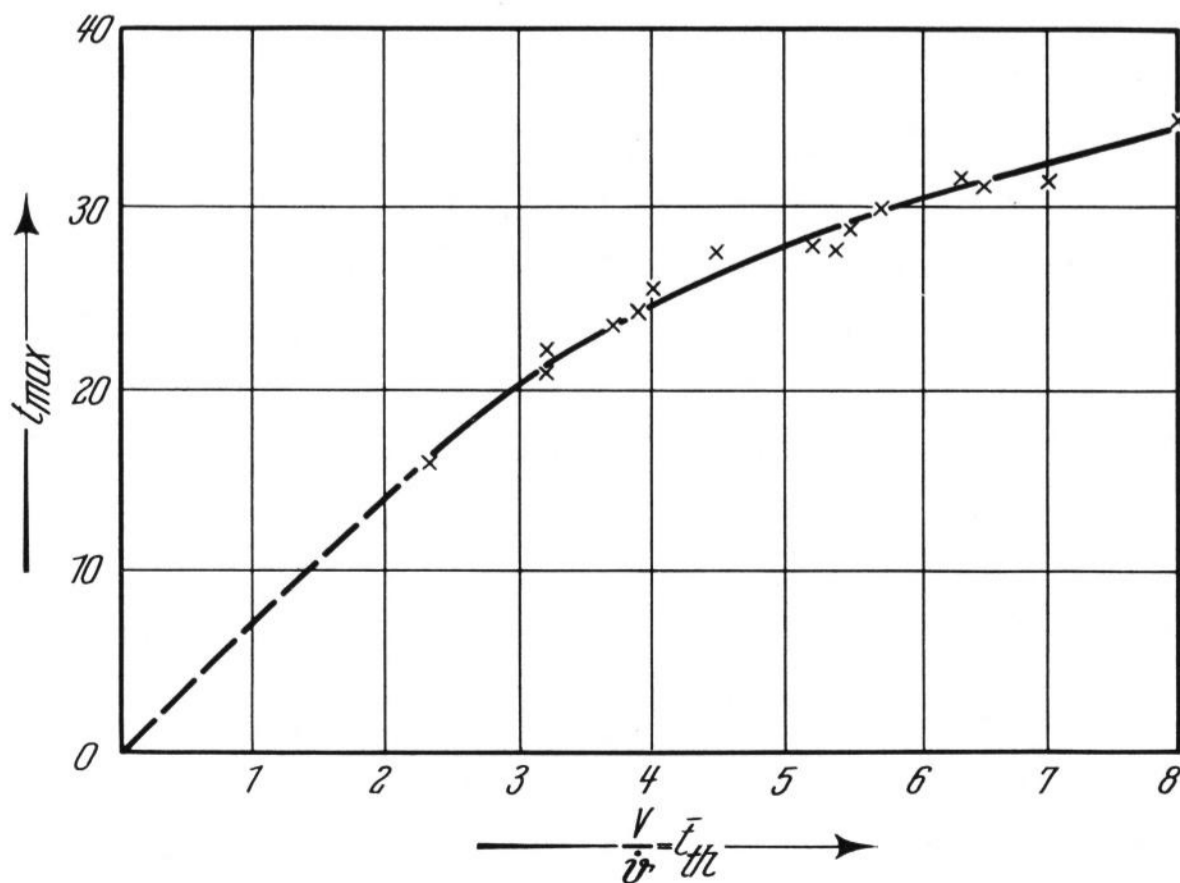


Bild 22. Maximale Aufenthaltszeit in Abhängigkeit von der mittleren theoretischen Aufenthaltszeit.

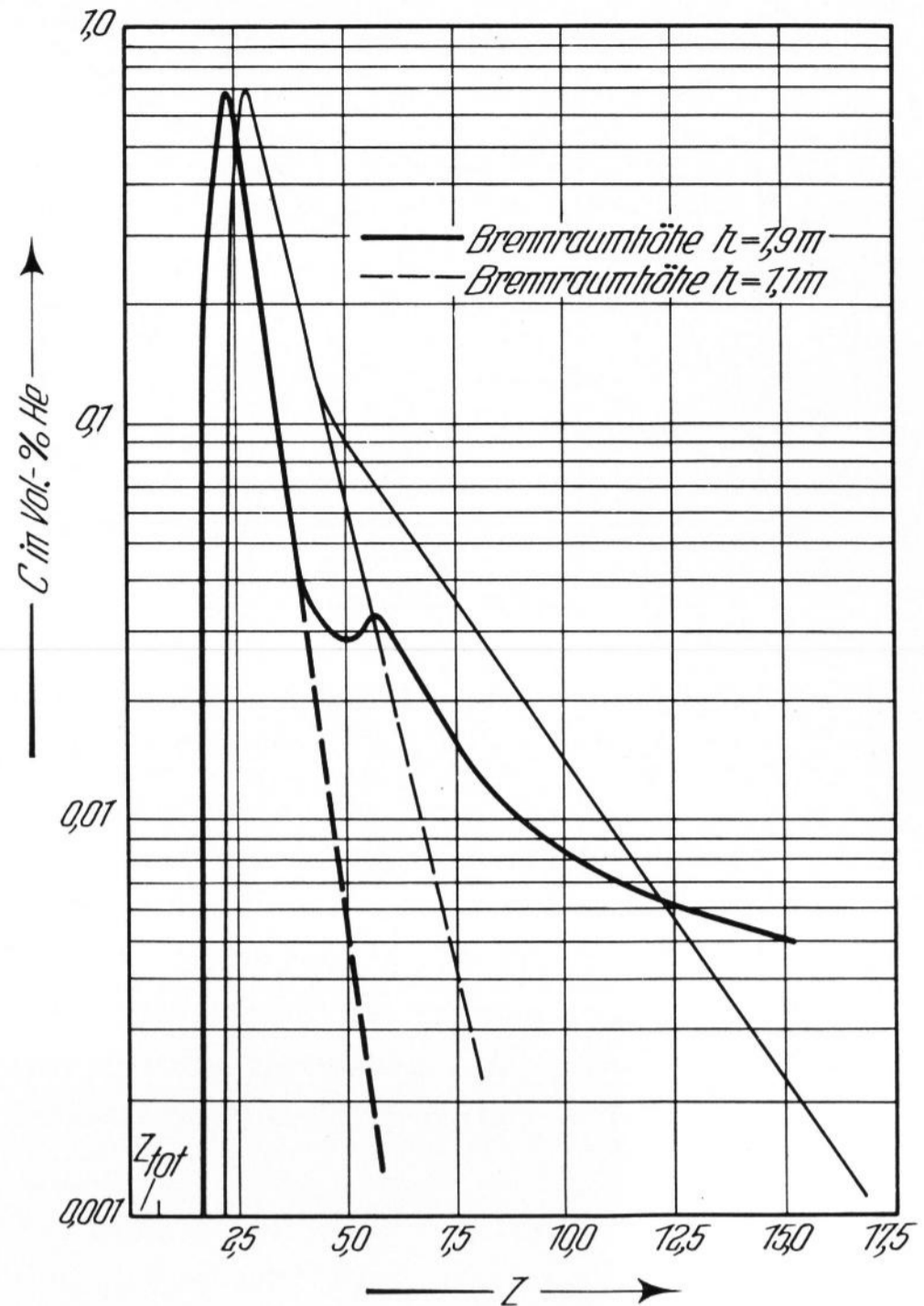


Bild 23. Logarithmische Darstellung der Verweilzeitverteilung zweier Brenner unterschiedlicher Brennraumhöhe bei gleicher Wannenbreite.

Um die Verteilungen $E(t)$ und $E_g(t)$ von der unterschiedlichen, durch die einzelnen Brenner einziehenden Gasmenge und der Brennraumgröße unabhängig darstellen zu können, wird die laufende Zeit t auf die theoretische Aufenthaltszeit bei voller Raumausnutzung \bar{t}_{th} (Gleichung (7)) bezogen.

4.2.1. Verteilung des Direktstromes $E(t)$ und Bestimmung der Rückstrommenge

Da der Gasaustausch zwischen den einzelnen Brennern kontinuierlich ist, erlauben die zeitlichen Verteilungen $E(t)$ des Direktstromes, der nicht am Queraustausch teilnimmt, Rückschlüsse auf die Durchströmung. Vergleicht man die der Verteilung $E(t)$ direkt proportionalen Konzentrationsverteilungen der verschiedenen Wannen (Bilder 6, 8, 9, 14 und 15) mit den in Bild 2 aufgezeigten Verteilungen bei idealisiertem Strömungsverhalten, so stellt man fest, daß die Verteilungen sämtlicher Ölfammen der Durchströmung eines Raumes teilweise als Kolbenströmung und zum Teil als idealer Mischer mit Rückströmung und Totwasser ähneln.

Ohne großen rechnerischen Aufwand läßt sich die Frage, inwieweit die gemessenen Verteilungen mit der idealisierten (Bild 2d) übereinstimmt, beantworten, wenn man erstere logarithmisch aufträgt, wie Bild 23 am Beispiel zweier Brenner einer Tafelglaswanne mit unterschiedlicher Brennraumhöhe zeigt.

Ohne Rückströmung ergibt sich bei idealer Durchströmung eines Systems nach Bild 2d eine Verweilzeitverteilung, die zur Zeit $t = t_{min}$ plötzlich den Maximalwert erreicht und dann nach einer e-Funktion, d. h. logarithmisch aufgetragen, linear abfällt. Tritt zusätzlich noch eine Rückströmung auf, so ergibt sich, da diese als Parallelstrom dem Vorstrom überlagert ist, von einem bestimmten Zeitpunkt an eine Abweichung von anfangs linearem Abfall. Bei den gemessenen Direktverteilun-

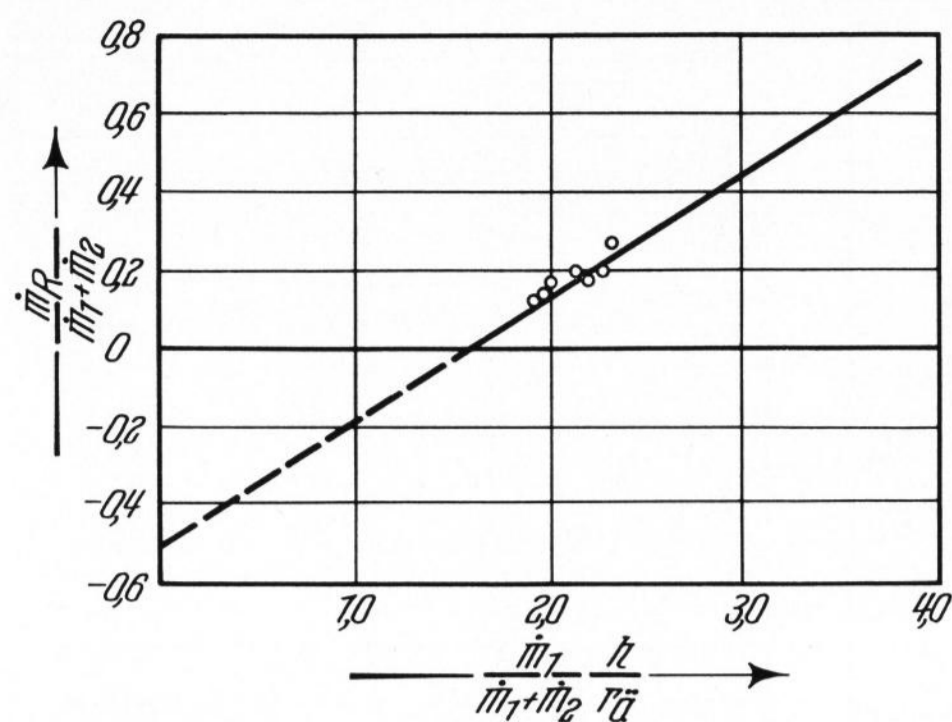


Bild 24. Rückströmanteil eines eingeschlossenen Strahles in Glasschmelzwannen bei Unterbankfeuerung.

gen ergeben sich Abweichungen vom Kurvenverlauf bei idealisierter Durchströmung vor allem im Bereich $t = t_{\min}$, da das Maximum der gemessenen Verteilungen etwas verzögert auftritt. Diese Verzögerung deutet auf eine Abweichung von der Kolbenströmung hin und dürfte vor allem durch Längsmischung verursacht sein (siehe Bild 2a).

Obwohl nur die eine der beiden Verteilungen ein deutliches zweites Maximum zeigt, das auf eine Rückströmung hindeutet, ergeben sich bei allen, nicht nur den beiden als Beispiel aufgezeigten Verteilungen Abweichungen vom erwarteten linearen Abfall bei logarithmischer Auftragung. Das zweite Maximum ist also kein hinreichendes Kriterium für eine Rückströmung.

Allgemein läßt sich zur direkten Durchströmung des Oberofens sagen, daß ein Teil des Oberofens in Form einer Kolbenströmung mit Längsmischung durchströmt wird, während der restliche Teil des Oberofens als — wenn auch nicht idealer — Mischer wirkt und zum Teil von einer Rückstromwalze eingenommen wird. Inwieweit das geometrisch jedem Brenner zugeordnete Oberofenvolumen noch durch Totwassergebiete bzw. stagnierende Strömungsbereiche eingeschränkt wird, läßt sich jedoch erst aus dem Vergleich von gemessener und theoretischer mittlerer Aufenthaltszeit festlegen (siehe Abschnitt 4.2.).

Da die der Kolbenströmung überlagerte Längsmischung nicht näher festgelegt werden kann, ist eine quantitative Aufteilung des Oberofens in verschiedene Strömungsbereiche nicht möglich. Rein quantitativ läßt sich jedoch über die Durchströmung des Oberofens sagen, daß der Strahlbereich, in dem ein intensiver Impuls- und Stoffaustausch stattfindet, als Mischer wirkt. An dem Strahlbereich, der im allgemeinen nicht nur bis dort zu rechnen ist, wo der Strahl die Begrenzungswände berührt, sondern darüber hinaus reicht, schließt sich der Bereich an, der als Kolbenströmung mit Längsmischung durchströmt wird. Bedingt ist diese Längsmischung durch den nicht völlig abgebauten Geschwindigkeitsgradienten quer zur Stromrichtung.

Nach Abschnitt 1.5. ist die Fläche unter den zeitlichen Konzentrationsverteilungen nicht nur ein Maß für die nicht am Queraustausch teilnehmende Indikatormenge, sondern, da diese das gleiche Transportverhalten zeigt wie die ursprünglich dem Oberofen allein zugeführten Stoffe, ein Maß für den Direktstrom, der nach Bild 2d wiederum in zwei Anteile zerlegt werden kann: in den Vorstrom und in den Rückstrom. Ersterer ent-

spricht der Fläche unter dem Kurvenverlauf ohne Rückstrom (strichlierte Linie Bild 2d), letzterer der Fläche zwischen der Kurve mit und ohne Rückströmung (schraffierte Fläche in Bild 2d).

Die Bestimmung des Rückstromanteils aus den gemessenen Direktverteilungen $E(t)$ einer mit sieben Brennern versehenen Querbrennerwanne mit unterschiedlicher Brennerhöhe ergab sehr gute Übereinstimmung mit den nach dem nachstehenden modifizierten Thring-Newby-Berechnungsverfahren [17] ermittelten Werten (Bild 24). Bei der Anpassung des Berechnungsverfahrens für den Rückstromanteil nach THRING und NEWBY [8] wurde davon ausgegangen, daß sich in Glasschmelzwannen, da die Strahlachse (Zerstäuberachse) nur wenige Zentimeter über dem Glasbad verläuft, nur ein „Halbstrahl“ und kein rotationssymmetrischer Strahl ausbildet. Unter dieser Voraussetzung ergibt sich für den Rückstromanteil:

$$\frac{\dot{m}_R}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} \approx 0,316 \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} \cdot \frac{h}{r_{\text{äq}}} - 0,5 + 0,25 \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} \quad (16)$$

mit \dot{m}_R = Rückstrommasse in kg/s, \dot{m}_1 = Strahldurchsatz in kg/s, \dot{m}_2 = Frischluftmassenstrom in kg/s, h = Brennraumhöhe, von der Strahlachse aus gemessen, in m und $r_{\text{äq}}$ = äquivalenter Düsendurchmesser [8] in m.

Da der auf den Gesamtstrom bezogene Massenstrom des Strahles $\dot{m}_1/(\dot{m}_1 + \dot{m}_2)$ bei nahezu allen Feuerungen kleiner als 10^{-1} ist, kann, zumal es sich um eine Näherungsgleichung handelt, das letzte Glied in obiger Gleichung vernachlässigt werden, wenn

$$h/r_{\text{äq}} \gg \dot{m}_1,$$

so daß gilt:

$$\frac{\dot{m}_R}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} \approx 0,316 \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} \cdot \frac{h}{r_{\text{äq}}} - 0,5. \quad (17)$$

4.2.2. Vergleich der gemessenen und der theoretischen mittleren Verweilzeit

Zur Beschreibung der verschiedenen gemessenen Verteilungen wird als charakteristische Größe die mittlere Verweilzeit herangezogen, die als Schwerpunktszeit sehr stark vom Kurvenverlauf abhängig ist und als die Zeit definiert ist, zu der man sich den zur Zeit $t = 0$ eintretenden Stoffstrom das System plötzlich wieder verlassend vorstellen kann. Dieser mittleren gemessenen Verweilzeit gegenübergestellt wird die aus Oberofenvolumen und Durchsatz errechnete theoretische mittlere Verweilzeit (Gleichung (7)), die von der Art der Durchströmung des Oberofens unabhängig ist und nur voraussetzt, daß das ganze Oberofenvolumen, das geometrisch den einzelnen Brennern zugeordnet ist, ausgefüllt wird. Insofern gibt das Verhältnis aus mittlerer gemessener Verweilzeit und mittlerer theoretischer Verweilzeit den Ausnutzungsgrad des Ofenraumes durch die Strömung wieder.

Vergleicht man die gemessenen mittleren Aufenthaltszeiten mit den errechneten, so stellt man fest, daß bei allen Querbrennerwannen die gemessene mittlere Aufenthaltszeit zum Teil wesentlich kleiner ist als die theoretische; bei allen untersuchten Stirnbrennerwannen sind dagegen beide mittleren Aufenthaltszeiten gleich groß. Je nach Brenner liegt bei Querbrennerwannen das Verhältnis aus mittlerer gemessener und mittlerer theo-

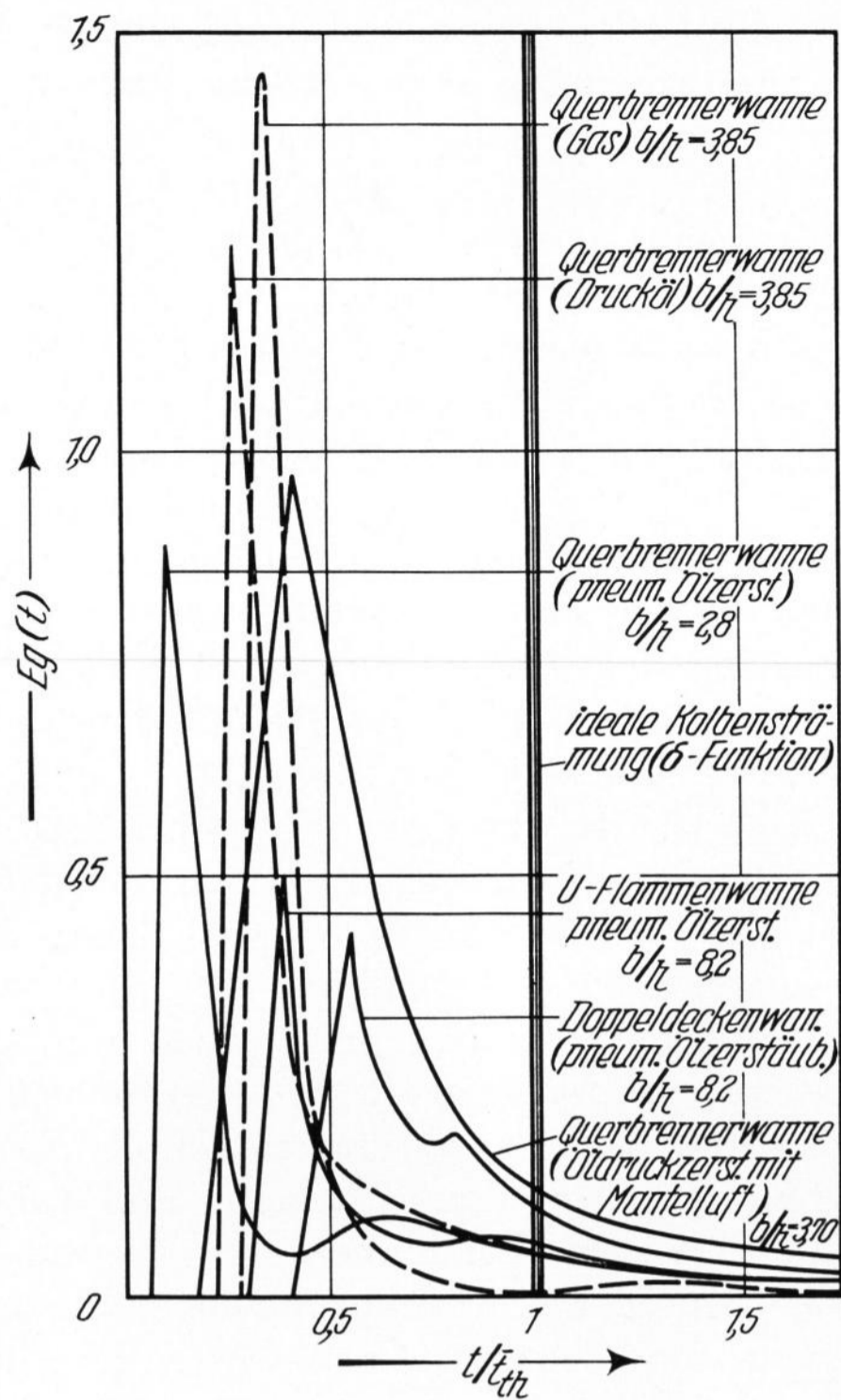


Bild 25. Verweilzeitverteilungen in verschiedenen Ofenanlagen.

retischer Aufenthaltszeit zwischen 0,60 und 0,85 s, d. h. nach vorherigem, daß vom Direktstrom, der nicht am Queraustausch teilnimmt, nur 60 bis 85% des geometrisch dem Brennerpaar zugeordneten Oberofenvolumens ausgenutzt werden.

Vergleicht man den vom Direktstrom beanspruchten Anteil des Oberofenvolumens mit dem prozentualen Anteil des Direktstroms vom gesamten eintretenden Strom, so stellt man fest (Tabelle 1), daß der Ausnutzungsgrad \bar{t}_g/\bar{t}_{th} und der Direktstromanteil k_{i-1} nahezu gleich sind, d. h. das Verhältnis beider in etwa 1 ist. Der Direktstrom nutzt also den ihm geometrisch zustehenden Raumanteil weitgehend aus. Da weiter bei Querbrennerwannen auch die mittlere Gesamtverweilzeit \bar{t}_{ges} , die sich aus den einzelnen gemessenen Verteilungen errechnet, in etwa gleich der theoretischen mittleren Verweilzeit (Tabelle 1) ist, kann man allgemein sagen, daß der Oberofen von der Strömung voll ausgenutzt wird und kaum Totwassergebiete vorhanden sind, die das Strömungsverhalten beeinflussen.

Tabelle 1. Theoretische und tatsächliche mittlere Aufenthaltszeit in Querbrennerwannen

Brenner Nr.	Brennstoff	\bar{t}_{gem} in s	\bar{t}_{th} in s	$\frac{\bar{t}_{gem}}{\bar{t}_{th}}$	k_{i-1} in %	\bar{t}_{ges} in s	$\frac{\bar{t}_{ges}}{\bar{t}_{th} \cdot k_{i-1}}$	$\frac{\bar{t}_{ges}}{\bar{t}_{th}}$
1	Gas	3,46	4,40	0,79	85	4,35	0,94	0,99
2	Gas	2,42	3,20	0,76	79	3,16	0,96	0,99
3	Gas	2,45	2,89	0,85	89	2,90	0,95	1,00
4	Öl	3,02	3,74	0,81	79	3,72	1,02	0,99
5	Öl	4,65	6,03	0,77	72	6,11	1,06	0,98
6	Öl	2,75	3,84	0,71	66	3,89	1,06	0,99
7	Öl	2,46	3,48	0,70	63	3,27	1,10	1,06
8	Öl	1,82	2,30	0,79	79	2,14	1,00	1,07
9	Öl	4,05	6,15	0,69	43	—*)	1,61*)	—
10	Öl	3,08	5,60	0,56	45	4,78	1,21	—
11	Öl	4,25	3,50	1,21	60	—*)	2,00*)	—

*) Gasaustausch zum Ziehkreuz bzw. zur Arbeitswanne hin.

Dies gilt insbesondere auch für Stirnbrennerwannen, für die der Oberofenausnutzungsgrad $\bar{t}_{gem}/\bar{t}_{th} \approx 1$ ist, was sich auch bei Modelluntersuchungen [2] ergab.

4.3. Vergleich der Verweilzeitverteilungen des eintretenden Stoffstroms

Zum Vergleich des Verweilzeitverhaltens der Gase im Oberofen der verschiedenen Wannen werden, da die direkt gemessenen Verteilungen infolge des Queraustausches im Oberofen nicht repräsentativ für das zeitliche Verhalten des eintretenden Stoffstroms sind, die nach 5.2. errechneten Gesamtverteilungen $E_g(t)$ (Bild 25) bzw. deren Summenkurven (Bild 26) herangezogen.

Der Vergleich der gemessenen Gesamtverteilungen mit den Verteilungen bei idealer Durchströmung (Bild 2) ergibt für die Verteilung der Zerstäuberstrahlflammen eine Durchströmung des Oberofens, teilweise als Mischer mit Rückströmung und teilweise als Kolbenströmung, der Längsmischung überlagert ist.

Das gleiche gilt auch für die Gasflamme, nur daß hier — wie noch gezeigt wird — die Abweichung vom idealen Mischer noch größer ist. Interessant ist, daß auch bei Gasflammen eine deutliche Rückströmung, die allerdings stark verzögert auftritt, erkennbar ist.

Sieht man von der Gasbeheizung ab, so stellt man fest, daß der Anteil der Kolbenströmung, für den t_{min} bzw. t_{min}/\bar{t}_{th} ein Maß ist, bei den Gesamtverteilungen mit zunehmendem Verhältnis von Brennraumlänge zu Brennraumhöhe (b/h) zunimmt.

Zurückzuführen ist dies auf den mit zunehmender Strahllänge b abnehmenden Geschwindigkeitsgra-

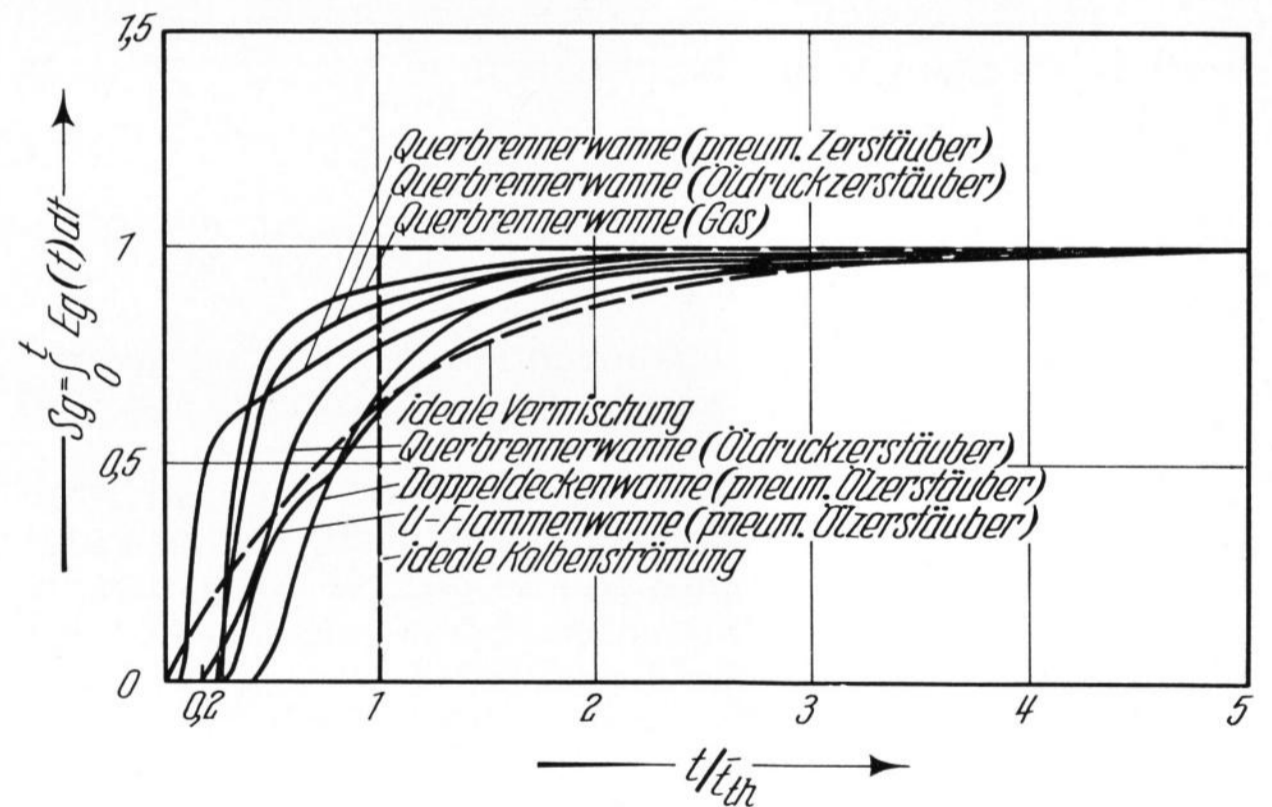


Bild 26. Summenverteilungen der Gase in verschiedenen Wannen.

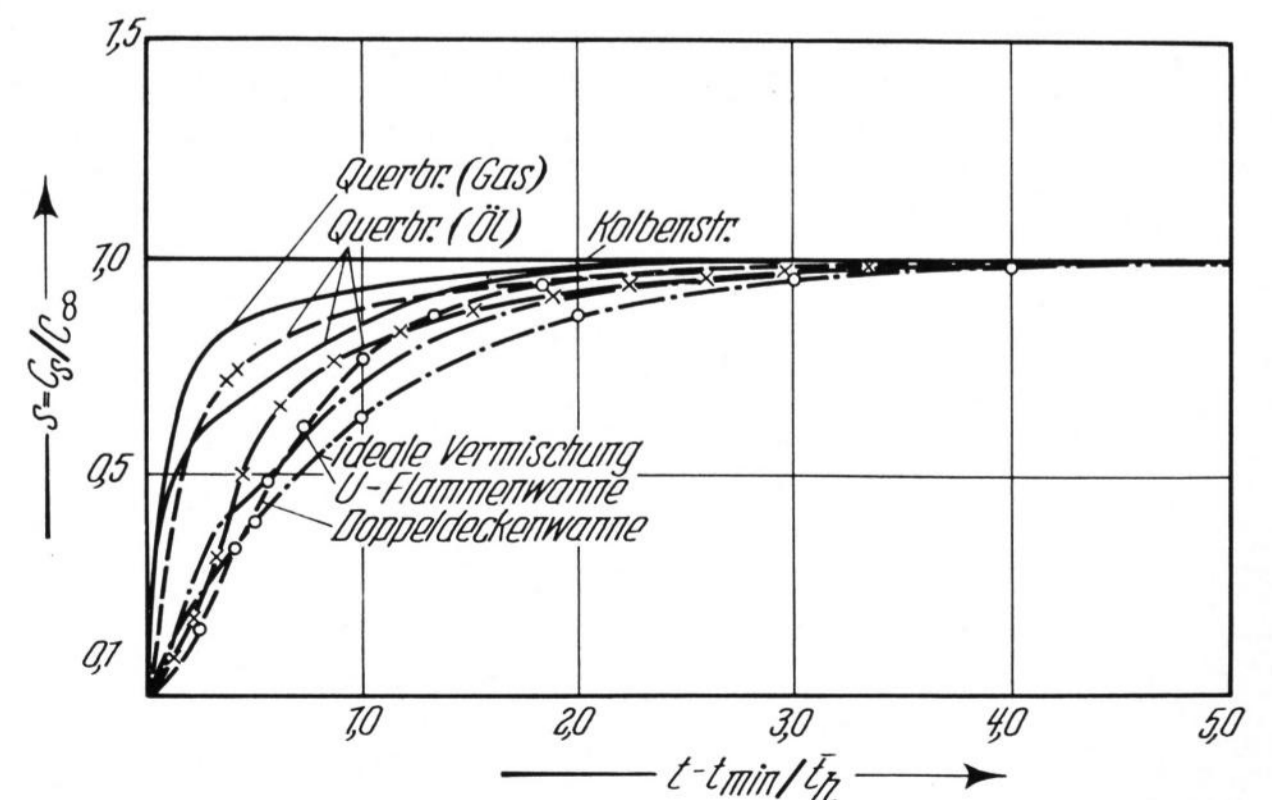


Bild 27. Summenverteilungen der Gase in verschiedenen Wannen.

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 Stirnbrennerwanen statt. Wesentlich schwächer ist diese Vermischung bei ölbeheizten Querbrennerwanen und ist am geringsten bei gasbeheizten Querbrennerwanen. 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-Flammenwanen. 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-Flammenwanen bei Verwendung von Wasser und heißen Gasen als Modellsubstanzen. (Orig. jap. mit engl. Zsfsg.) 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.