

## Einsatz von Sauerstoff bei der Beheizung von Glasschmelzwannen

Von RUDOLF MEISTER, Frankfurt (Main)

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

(Eingegangen am 17. April 1972)

Es wird über Versuche berichtet, die an einer regenerativ mit Öl beheizten U-Flammenwanne zum Schmelzen grünen Flaschenglases durchgeführt wurden. Ziel dieser Versuche war die Erzeugung unsymmetrisch brennender Flammen durch Einführung reinen Sauerstoffs unter den Ölzerstäuberdüsen. Dabei sollten mit steigender Sauerstoffanreicherung auf etwa 30 % der Öldurchsatz stufenweise bis um etwa 50 % erhöht und die Schmelzleistung ohne Beeinträchtigung der Glasqualität gesteigert werden. Der Sauerstoff wurde zur Schonung des feuerfesten Materials der Seitenwände nur unter dem Innenzerstäuber jedes Brenners zugesetzt. Bei den etwa 3wöchigen Versuchen wurde bei Sauerstoffanreicherung auf 27 % eine Erhöhung der Schmelzleistung um etwa 60 % bei gleichzeitiger Steigerung des Öldurchsatzes um 25 % erzielt. Die Begrenzung des Öldurchsatzes war durch die maximal zulässige Temperatur von 1600 °C im Läuterbereich gegeben.

Im Gemenge-, im Schaumbereich und vor dem Durchlaß stiegen die Gewölbetemperaturen um etwa 50 °C an. Die Art der Sauerstoffmischung und die Wechselwirkung zwischen den mit und ohne Sauerstoff an den beiden Zerstäubern jedes Brenners erzeugten verschieden langen Flammen sind vermutlich hierfür verantwortlich.

Der Temperaturverlauf an den im Boden der Schmelzwanne liegenden Thermoelementen zeigt, daß das Gleichgewicht zwischen Wärmeangebot an die Schmelze und Wärmeabgabe der Schmelze an das darüber befindliche Gemenge für die erzielbare Schmelzleistungssteigerung entscheidend ist. Das Wärmeangebot kann, wie ein Kurzversuch über 2 Tage zeigte, durch Einführung von Sauerstoff unter beide Ölzerstäuber, durch Anwendung möglichst vieler mit Sauerstoffzusatz arbeitender Flammen und/oder durch elektrische Zusatzheizung im Gemengebereich wesentlich gesteigert werden.

### Oxygen addition in the heating of glass tank furnaces

Some experiments made on an oil-fired regenerative horseshoe flame furnace; melting green bottle glass, are reported. The object of these tests was the production of asymmetrically burning flames by introduction of pure oxygen below the oil burners. By oxygen enrichment of about 30 % the oil supply was to increase step-wise to 50 % without adversely affecting glass quality. Having regard for the sidewall refractory materials, the oxygen was introduced only under the inner burner in each port. Over about 3 weeks, operating with around 27 % oxygen, furnace load was increased by about 60 % and oil consumption by around 25 %. The increase in oil consumption was limited by the maximum permissible temperature of 1600 °C in the refining zone.

The crown temperature in the melting end was about 50 °C higher. The type of oxygen mixing and the interaction between the two burners in each port, one with oxygen and one without, gave different length flames which are probably responsible for this.

Temperatures at the bottom of the tank as indicated by thermocouples showed that the equilibrium between the heat transferred to the melt and the heat released by it to the melting batch determines the attainable increase in production. The heat transferred into the melt in the batch melting region can be increased by oxygen addition under both burners, by using as many oxygen enriched flames as possible, as shown by brief tests over two days, or by electric boosting.

### Utilisation de l'oxygène pour le chauffage des fours à bassin de verrerie

Des essais portant sur un four à boucle à régénération chauffé au mazout et destiné à la fusion de verre vert pour bouteille sont décrits. Le but de ces essais est de produire des flammes non symétriques par introduction d'oxygène pur sous les tuyères des pulvérisateurs à mazout. Cette méthode doit permettre de porter l'enrichissement d'oxygène graduellement de 30 % de la proportion de mazout à environ 50 % de celle-ci et d'augmenter ainsi le rendement de la fusion sans toutefois compromettre la qualité du verre. Afin de ménager les réfractaires des parois latérales, l'oxygène n'est introduit que dans le pulvérisateur intérieur de chaque brûleur. Au cours des essais, qui ont duré trois semaines environ, un enrichissement en oxygène de 27 % a permis d'obtenir un accroissement de la production d'environ 60 % en n'augmentant que de 25 % la consommation de mazout. La limitation du débit de mazout correspondait à une température maximale de 1600 °C admissible dans la zone d'affinage.

Dans la zone de composition et dans la zone de moussage, de même que devant la gorge, les températures des voûtes augmentaient de 50 °C. Le mode d'incorporation de l'oxygène et les interactions entre les flammes de différentes longueurs obtenues avec ou sans introduction d'oxygène dans les pulvérisateurs de chaque brûleur sont probablement responsables de cet accroissement de température.

L'évolution de la température au niveau des thermoéléments incorporés dans la sole de la cuve montre que l'équilibre entre l'apport calorifique à la fonte et la cession de chaleur de la fonte au mélange qui la recouvre est un élément décisif de l'accroissement de production que l'on peut obtenir. Comme le montre un essai de courte durée réalisé pendant deux jours, l'apport de chaleur peut être fortement augmenté si l'on introduit l'oxygène dans les deux pulvérisateurs, lorsque l'on utilise le plus possible de flammes additionnées d'oxygène et/ou par un chauffage électrique d'appoint dans la zone de composition.

Berechnet man an Hand der stöchiometrischen Daten und unter der Voraussetzung einer konstanten Abgastemperatur von 1500 °C die im Verbrennungsraum von Glasschmelzöfen verfügbare Wärme, so erkennt man für die Verbrennung mit reinem Sauerstoff, die Verbrennung mit vorgewärmter Verbrennungsluft und die Verbrennung mit vorgewärmter, auf 30 % Sauerstoffgehalt angereicherter Verbrennungsluft folgendes:

Bei einer Vorwärmtemperatur von etwa 1230 °C, wie sie in modernen Regeneratoren bei einer Abgastempera-

tur von 1500 °C erreicht wird, sind Ofenwärme, feuerungstechnischer Wirkungsgrad und — wegen der bei Verbrennung mit reinem Sauerstoff erhöhten Dissoziation — auch die adiabaten Flammentemperaturen nahezu gleich [1 u. 2]. Der Nutzen der Sauerstoffanwendung scheint daher besonders in den Fällen gegeben, wo die Luftvorwärmung begrenzt ist.

Tatsächlich war bei einigen der ersten Versuche mit Sauerstoffzusatz in Glasschmelzöfen [3 u. 4] die Luftvorwärmung nicht hoch und daher die Anreicherung des

Sauerstoffgehaltes der Verbrennungsluft sehr erfolgreich. Auch bei den Versuchen, die bei der Internationalen Flammenforschungsgemeinschaft in Ijmuiden an Versuchsbrennstrecken durchgeführt worden sind [5 bis 8], wurde entweder kalte oder nur auf maximal 600 °C vorgewärmte Verbrennungsluft benutzt. Die dort beobachteten, sehr starken Unterschiede in der Flammentemperatur und Flammenstrahlung bei Verbrennung mit und ohne Sauerstoffzusatz können daher nicht ohne weiteres auf die Verhältnisse in Glasschmelzöfen übertragen werden, die z. B. mit Luftvorwärmtemperaturen über 1200 °C arbeiten. Ähnlich verhält sich dies auch mit den Ergebnissen, wie sie zum Studium von Flammenform und Temperaturfeld bei Flammen mit Sauerstoffzusatz im Wassermmodell [9] erhalten wurden.

MICHAUD [4] hat jedoch auch über einen Langzeitversuch an einer Querbrennerwanne mit zwei Brennerpaaren berichtet, die mit schwerem Heizöl als Brennstoff und hoch vorgewärmter Verbrennungsluft von fast 1100 °C arbeitete. Durch den Zusatz von Sauerstoff mittels unter den Öldruckzerstäubern des ersten Brennerpaares angeordneten Sauerstoffdüsen gelang es, die spezifische Schmelzleistung von 1,46 t/m<sup>2</sup> 24 h auf 2,33 t/m<sup>2</sup> 24 h, d. h. um  $\approx 60\%$  zu steigern. Die Ausgangsschmelzleistung liegt zwar niedrig, aber für die Mitte 1952 allgemein erreichten Leistungen im üblichen Rahmen. Die zugehörigen spezifischen Wärmeverbrauchsdaten von 0,31 kg Öl/kg Glas ohne und von 0,198 kg Öl/kg Glas mit Sauerstoffzusatz zeigen jedoch, daß zwischen den Verhältnissen von damals und bereits 10 bis 15 Jahren danach erhebliche Fortschritte zu verzeichnen sind. Spezifische Schmelzleistungen von 2,3 bis 2,5 t/m<sup>2</sup> 24 h sind bei weißen und braunen Flaschengläsern an modernen querbeheizten Regenerativwannen auch ohne Sauerstoffzusatz erreichbar. Trotz der dabei erreichten hohen Verbrennungsraumtemperaturen von etwa 1600 °C sind in Verbindung mit der hohen Schmelzleistung spezifische Wärmeverbrauchsdaten von etwa 1500 kcal/kg Glas bei Wannenlaufzeiten von fünf Jahren und darüber keine Seltenheit.

Diese Verhältnisse zwingen dazu, die Frage des Sauerstoffeinsatzes in Glasschmelzöfen und die Zielsetzung weiterer Versuche auf neue Gesichtspunkte hin sorgfältig zu prüfen.

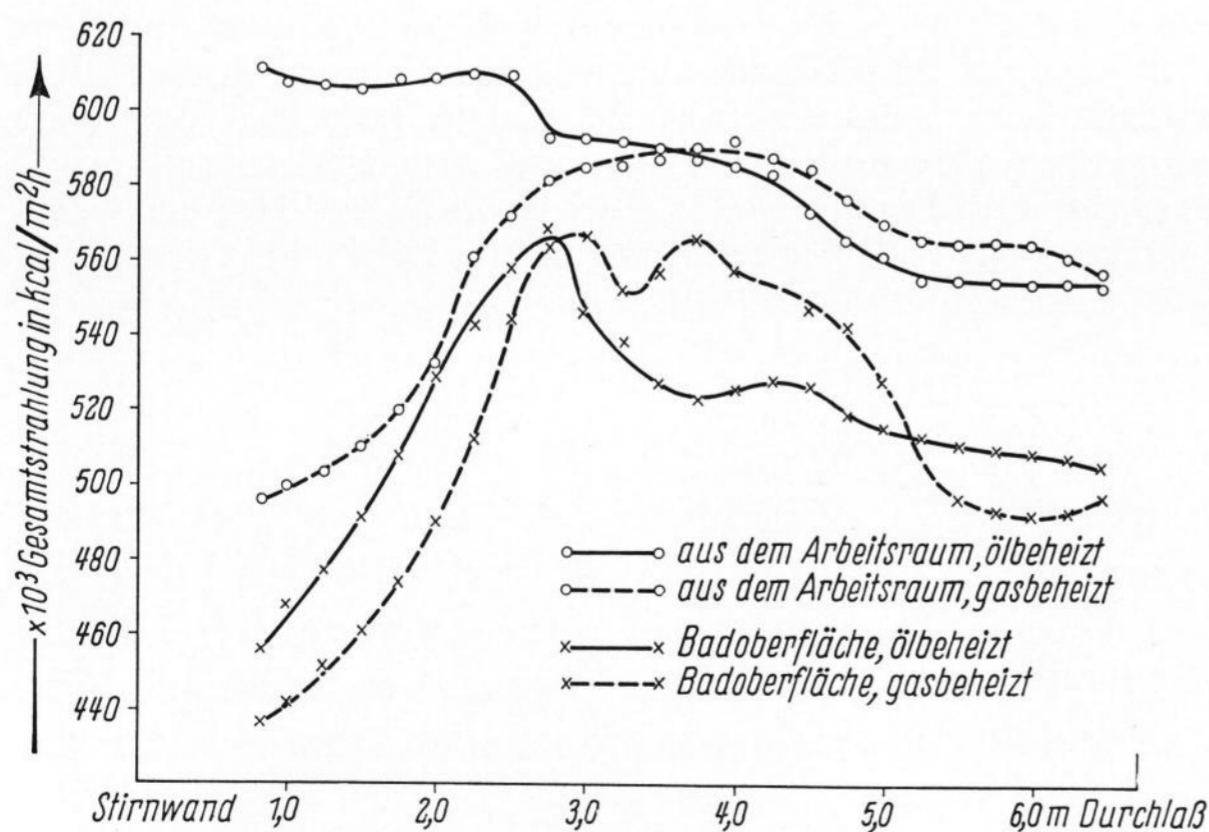


Bild 1. Von Flamme und Gewölbe zum Bad und zurück gerichtete Strahlungsströme bei Öl- und Gasbeheizung in einer U-Flammenwanne.

## 1. Zielsetzung neuer Versuche

Beschränkt man sich auf die Beheizung der Glasschmelzöfen durch Verbrennung natürlicher Brennstoffe, wie Heizöl und Erdgas, so verlangt die erwünschte weitere Steigerung der Schmelzleistung eine höhere Wärmebelastung der Glasbadoberfläche. Mit Rücksicht auf die Haltbarkeit des feuerfesten Materials darf dabei die bereits vielfach als Grenztemperatur anzusprechende maximale Feuerraumtemperatur nicht ansteigen.

Durch Einführen reinen Sauerstoffs an der dem Glasbad zugewandten Flammenunterseite läßt sich deren Temperatur durch die Erhöhung der Verbrennungsgeschwindigkeit wegen des verminderten Stickstoffballastes beträchtlich steigern [5 bis 9]. Die darüber liegende mit der vorgewärmten Verbrennungsluft brennende Flammenschicht schirmt das Ofengewölbe gegen die heißere, über dem Bad liegende Zone ab, wenn auch eine eindeutige Trennung dieser Zonen im Verlauf des Verbrennungsvorgangs, d. h. gegen das Ende der Flamme hin, nicht zu erwarten ist.

Die durch den Sauerstoffzusatz intensivierte Verbrennung gibt außerdem die Möglichkeit, mehr Brennstoff im gleichen Brennraum zu verbrennen und auch von dieser Seite her die Wärmebelastung der Glasbadoberfläche zu steigern. Für die an diese übertragbare Wärme sind jedoch nicht allein die Flammentemperatur und die Strahlungseigenschaften der Flamme entscheidend, sondern auch das Wärmeaufnahmevermögen der Badoberfläche, also im wesentlichen deren Absorptionsvermögen für Flammenstrahlung.

Messungen der Wärmeübertragung an die Glasbadoberfläche in einer U-Flammenwanne bei Öl- und Koks-ofengasbeheizung [10] zeigten nach Bild 1 den Verlauf der Gesamtstrahlung von der Öl- und Gasflamme in Richtung zur Badoberfläche bzw. von dieser zurück in Richtung zur Flamme. Mit zunehmender Entfernung von der Stirnwand schmilzt das Gemenge ab; die bei Ölbeheizung kürzere, bei Gasbeheizung etwa 1 m längere Schaumzone beginnt. Von der Stirnwand (Gemengebereich) zum Schaumbereich steigt die Wärmehinterstrahlung des Bades, z. T. durch verstärkte Reflexion der Flammenstrahlung bedingt, stark an, die an das Glasbad übertragbare Wärme nimmt entsprechend ab. Schmelzleistung und Wärmeverbrauch waren in dieser Meßreihe bei Öl- und Gasbeheizung gleich.

Daraus folgt, daß es richtig ist, die Steigerung der Wärmebelastung der Herdfläche mit Hilfe des Sauerstoffzusatzes auf den Gemengebereich zu konzentrieren. Erste Versuche der Hüttentechnischen Vereinigung der Deutschen Glasindustrie (HVG) an einer querbeheizten Glasschmelzwanne im Frühjahr 1966 bestätigten dies. Die Ergebnisse sind in den Glastechnischen Berichten veröffentlicht worden [11]. Sie zeigten:

1. Im Gemengebereich querbeheizter Glasschmelzwannen ließ sich der Brennstoffdurchsatz um 50 bis 70% steigern, wenn mit Sauerstoffzusatz entsprechend einer globalen Anreicherung des Sauerstoffgehaltes auf 27% gearbeitet wurde. Die Wärmebelastung der Badoberfläche stieg dabei von  $320 \cdot 10^3$  auf  $556 \cdot 10^3$  kcal/m<sup>2</sup> h an, die Abgastemperatur im abziehenden Brenner sank von 1430 auf 1410 °C. Obwohl es wegen des Dralls der verwendeten Ölzerstäuber nicht gelungen ist, unsym-

metrisch brennende Flammen zu erzeugen, fiel auch die Gewölbetemperatur um etwa 20 °C ab. Diese Erscheinung ist auch von MICHAUD [4] beschrieben worden und auf den infolge der Verkürzung der Flamme verstärkten Strahlungsaustausch zwischen Gewölbethermoelement und gemengebedeckter Badoberfläche zurückzuführen.

2. Im Bereich des zweiten Brennerpaares führte die Steigerung des Brennstoffdurchsatzes um 40% in Verbindung mit der Sauerstoffanreicherung zu einem Ansteigen der Abgastemperatur um 85 °C. Wie bereits in Bild 1 gezeigt, wird im hier beginnenden Schaumbereich die verstärkte Flammenstrahlung nicht ebenso wie im Gemengebereich absorbiert, sondern erhöht die Rückstrahlung vom Glasbad an die Flamme, wodurch deren Wärmeabgabe behindert wird. Diese Erscheinung beruhte hauptsächlich darauf, daß an den Maschinen nur eine Schmelzleistungssteigerung von 14% verarbeitet werden konnte, und die Grenze des Gemenge Teppichs gegen das erste Brennerpaar zurückging.

Wichtigstes Ergebnis dieses Versuchs war die Erkenntnis, daß sich auch bei sehr hoher Luftvorwärmung von über 1250 °C und bei einer Steigerung des Öldurchsatzes um 70% die Zufuhr reinen Sauerstoffs unter die Flamme im Gemengebereich bis zu einer globalen Anreicherung von 27% Sauerstoff in einer Senkung der Abgas- und Gewölbetemperatur auswirkte.

Für einen weiteren Versuch stellte sich die Frage, wie man die optimale unsymmetrische Flammenausbildung, d. h. die Trennung in die sehr heiße Flammenschicht über dem Bad und in den kälteren rußreichen Flammteil darüber, in der Praxis verwirklichen könnte. Weiter war der Zusammenhang zwischen Sauerstoffanreicherung, Erhöhung des Brennstoffdurchsatzes, Ofenraum-, Abgas- und Luftvorwärmtemperaturen sowie der möglichen Steigerung der Schmelzleistung und der Temperaturverteilung im Glasbad zu untersuchen. Schmelzleistung und Temperaturverteilung im Glasbad beeinflussen die Glasqualität entscheidend.

Für diesen Versuch empfahl sich eine U-Flammenwanne mittlerer Größe aus mehreren Gründen:

- geringerer Brennstoffdurchsatz und damit Sauerstoffbedarf,
- einfache Anpassung des Verbrennungsluftbedarfs abhängig vom Sauerstoffzusatz,
- einfache Kontrolle der im Ofenraum abgegebenen Wärmemenge durch Messung der Stoffströme und ihrer Temperatur am unter Feuer stehenden und am abziehenden Brenner,
- geringere Mengen an Überschußglas mit steigender Schmelzleistung.

Diesen Vorteilen stehen jedoch auch im Vergleich zur querbeheizten Wanne schwerwiegende Nachteile gegenüber:

- Flammenführung über Gemenge-, Schaum- und Läubereich mit sehr unterschiedlichem Wärmeaufnahmevermögen,
- ungünstiges Verhältnis der flammenbedeckten zur gesamten Glasbadoberfläche,
- ungleichmäßiges, mit dem Wechsel der Feuerstellung schwankendes Wärmeangebot an das Glasbad,

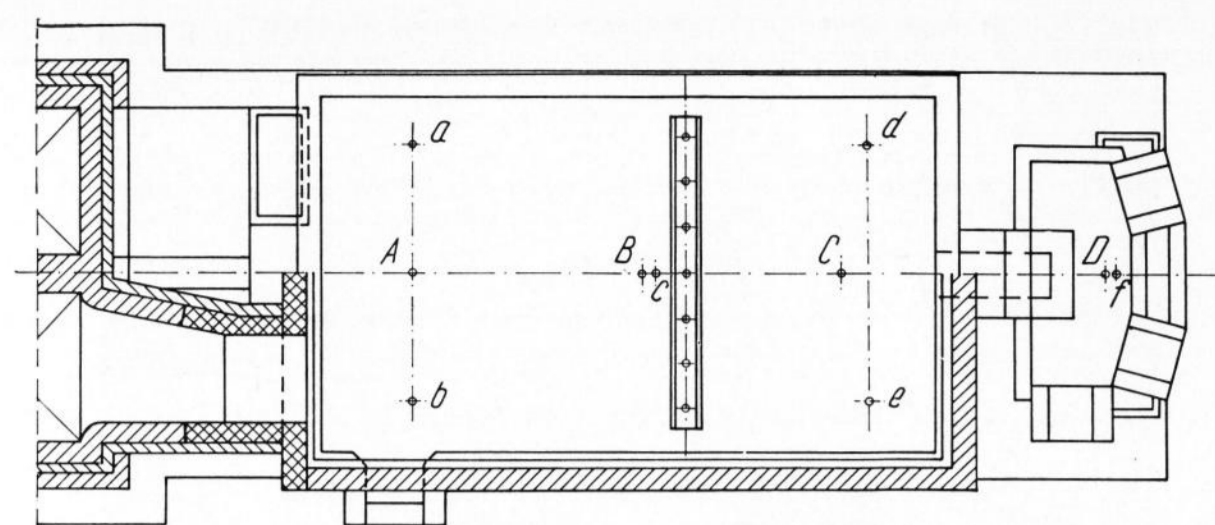


Bild 2. Wannengrundriß.

A bis D = Gewölbemeßstellen; a bis f = Bodenmeßstellen.

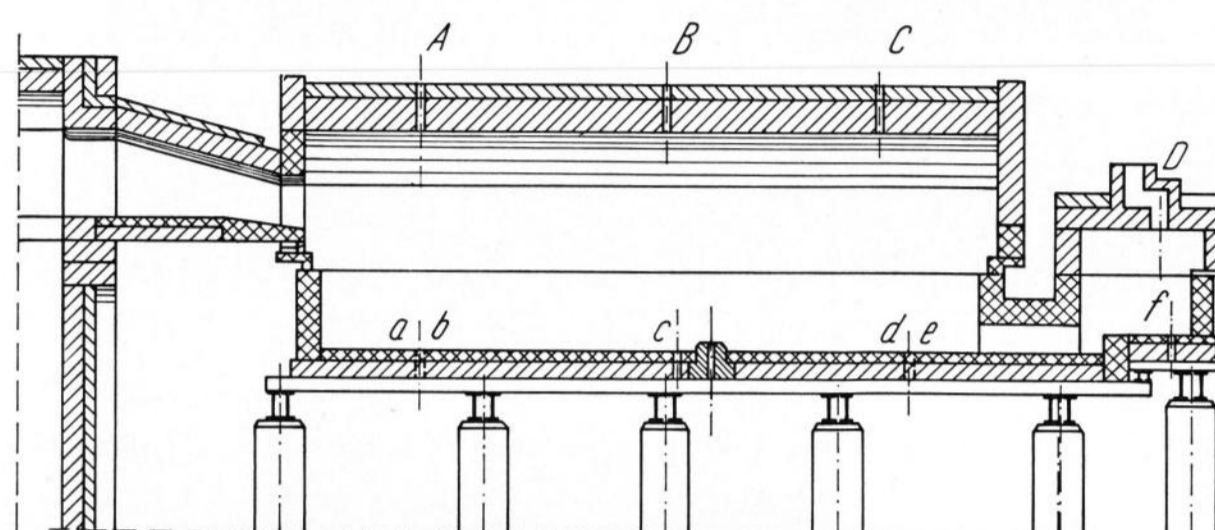


Bild 3. Längsschnitt durch die Wanne.

A bis D = Gewölbemeßstellen; a bis f = Bodenmeßstellen.

h) schlechter beherrschbare Gemengeverteilung bei steigender Schmelzleistung durch einseitige Gemengeeinlage.

Die angeführten Nachteile zeigen, daß bei dem Versuch an einer U-Flammenwanne der Nutzeffekt des Sauerstoffzusatzes unter besonders schwierigen Bedingungen geprüft werden muß. Die Gemengeverteilung konnte durch Entwicklung eines neuen Einlegeverfahrens mit verschiebbarer Einlegemaschine einwandfrei beherrscht werden; die vorbereitenden Arbeiten und Versuche hierfür nahmen etwa 1 1/2 Jahre in Anspruch.

Im Schrifttum ist eine neuere Arbeit über einen Versuch mit Sauerstoffzusatz in einer U-Flammenwanne [12] veröffentlicht. Die Verfasser gehen darin jedoch auf die erwähnten Schwierigkeiten nicht ein. Realisiert wurde eine globale Sauerstoffanreicherung auf 23%, eine Steigerung des Öldurchsatzes um 8% und eine Erhöhung der Schmelzleistung um 17%. Im folgenden wird daher über eine Versuchsreihe an einer U-Flammenwanne berichtet, die im Februar 1970 mit der oben erwähnten Zielsetzung durchgeführt wurde.

## 2. Ergebnisse eines Versuchs mit Sauerstoffzusatz an einer U-Flammenwanne

### 2.1. Beschreibung der Anlage

Bild 2 zeigt den Grundriß der zur Verfügung stehenden Wanne mit einer Schmelzfläche von etwa 38 m<sup>2</sup>. Die Schmelzwanne ist mit einer Blasdüsenreihe und fünf im Wannenboden verteilt angeordneten Bodenelementen ausgerüstet. An die Arbeitswanne sind zwei Speiservorherde angeschlossen, die das Glas zu zwei R 7-Maschinen leiten. Der dritte an der rechten Seite liegende Vorherd dient zum Ablauf des überschüssigen, nicht an den Maschinen verarbeitbaren Glases in den Keller.

Bild 3 zeigt den Längsschnitt durch die Wanne mit der Brennerausbildung, den Temperaturmeßstellen in Gewölbe und Boden und den Blasdüsen, die den für die

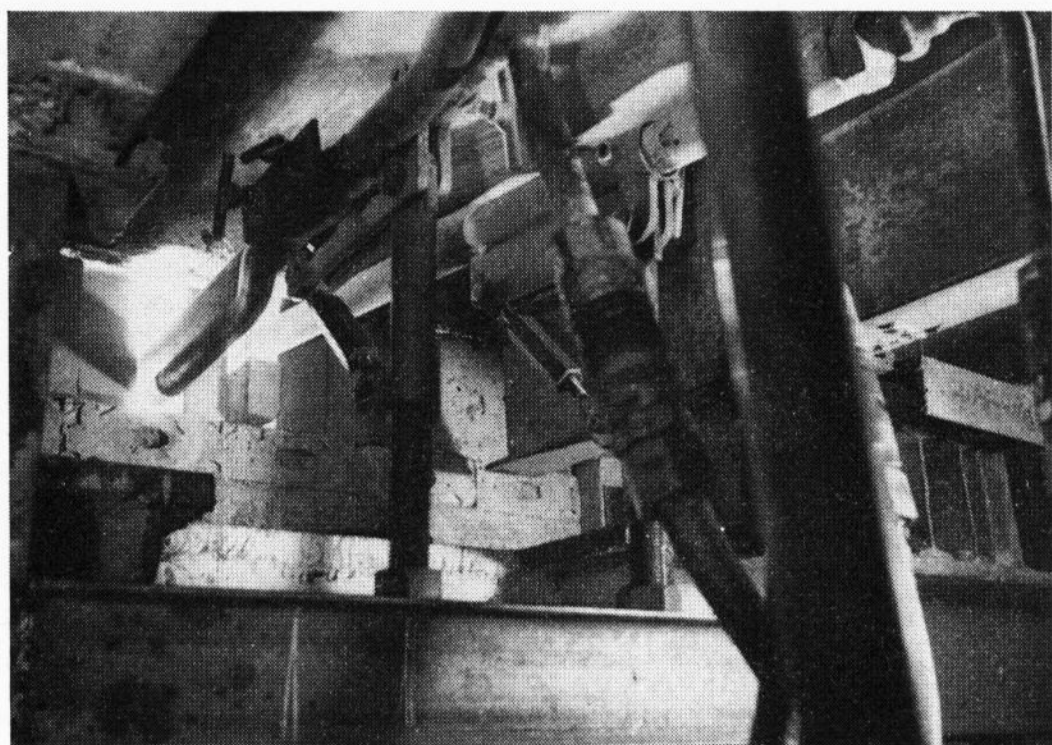


Bild 4. Anordnung der Sauerstofflanze unter dem Innenzerstäuber des rechten Brenners.

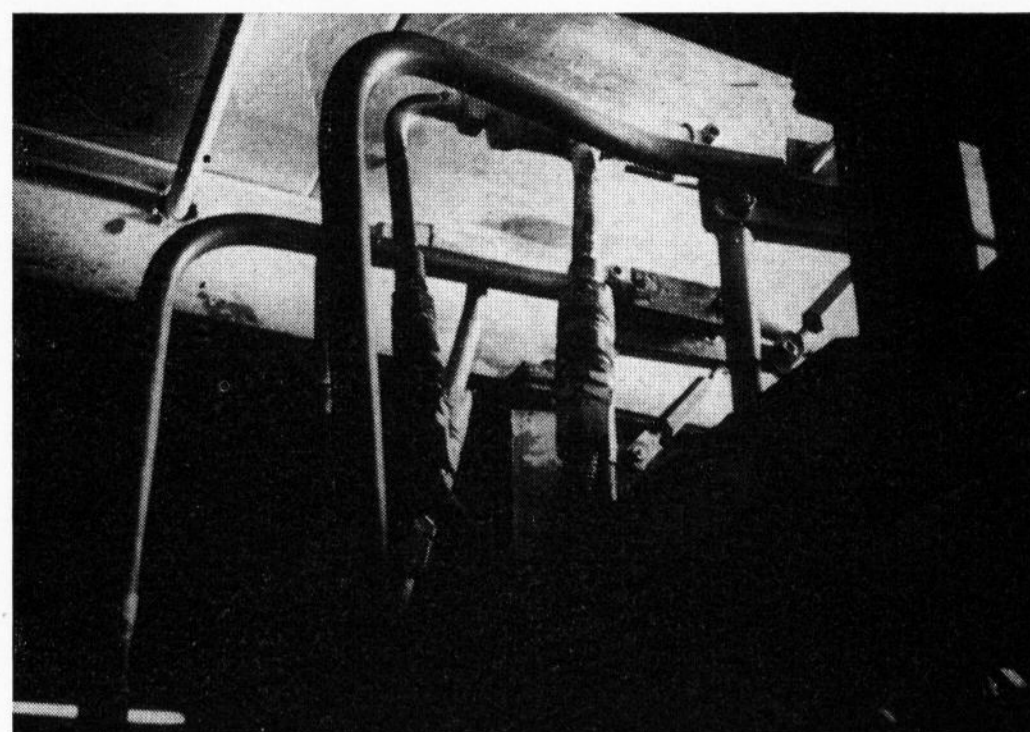


Bild 5. Sauerstofflanzen unter beiden Zerstäubern des linken Brenners.

Gemengeschmelze verfügbaren Teil der Wanne begrenzen. In jedem der beiden Brennerhälse sind zwei drallfreie Preßluft-Ölzerstäuber in Unterbankanordnung eingesetzt, die Düsensteine liegen zwischen Brennerbankplatte und Nasenstein.

Wie aus Bild 2 zu ersehen ist, sind die Brennerhälse parallel und in geringem Abstand zu den Seitenwänden angeordnet. Modelluntersuchungen des Strömungsverlaufs im Verbrennungsraum von U-Flammenwannen [13] zeigten, daß dies zu einem „Ansaugen“ der Flammen an die Seitenwände mit hoher thermischer Belastung und Verschleiß des feuerfesten Materials führt.

Um den zu erwartenden Schwierigkeiten zu entgegen, wurde an jedem Brenner zunächst nur der innen liegende Zerstäuber mit einer ungekühlten Sauerstofflanze unter dem Ölzerstäuber ausgerüstet; die Außenflammen in Nachbarschaft der Seitenwände dienten zur Abschirmung gegen die heißen mit Sauerstoffzusatz brennenden Ölflammen. Bild 4 zeigt die Anordnung der Sauerstofflanze unter dem Innenzerstäuber des rechten Brenners. Erst an den drei letzten Tagen der drei Wochen dauernden Versuchsreihe wurden am linken Brenner beide Zerstäuber mit Sauerstofflanzen ausgerüstet (Bild 5). Der Sauerstoff wurde als Flüssigsauerstoff angeliefert, verdampft und über Druckregelstation, Mengenmeßstrecke und Verteilerleitungen mit im Takt der Feuerumstellung arbeitenden, automatisch gesteuerten Magnetventilen zu den jeweils unter Feuer stehenden Brennern geführt. Aus Gründen der Betriebssicherheit waren außerdem Handabsperrventile vorgesehen, die den Sauerstoffzutritt zu den Düsen unterbrechen, wenn Wartungsarbeiten an Zerstäubern und Sauerstoffdüsen durchgeführt werden mußten.

## 2.2. Flammenentwicklung

Frühere Versuche in Ijmuiden [5 bis 8] und die Untersuchungen von PAPAGEORGIOU [9] zeigten den erheblichen Einfluß, den die Lage der Sauerstoffdüse zum Ölzerstäuber hat. In Bild 6 sind die Längsschnitte durch zwei Modellflammen, simuliert im Wassermodell, mit den Linien gleicher Temperatur dargestellt. Unter die Flammen wird Sauerstoff injiziert; die globale Anreicherung beträgt 30%. Die an den Isothermen angegebenen Zahlen sind ein Maß für die erreichte Temperatur bei adiabater Verbrennung. Beide Temperaturfelder bzw. Flammen unterscheiden sich nur durch den unterschiedlichen Abstand zwischen Zerstäuber- und Sauer-

stoffdüse, der im oberen Bildteil 5 cm, im unteren 10 cm beträgt. Die Vergrößerung des Abstandes verschiebt das Temperaturmaximum in der unteren Hälfte der asymmetrischen Flamme in Richtung zum Flammenende und reduziert gleichzeitig die maximale Temperatur wegen der zunehmenden Vermischung zwischen Sauerstoffstrahl und umgebender Atmosphäre.

Mit Rücksicht auf die in U-Flammenwannen begrenzte Länge der Gemengeschicht in Flammenrichtung bestand die Aufgabe, sehr kurze, asymmetrisch brennende und an ihrer Unterseite möglichst heiße Flammen zu erzeugen. Der verfügbare Platz zwischen Brennerbank und Nasenstein zwang dazu, die Sauerstoffdüsen ohne Zwischenraum unter die Ölzerstäuber zu legen. Damit war in Analogie zu den in Bild 6 gezeigten Versuchsergebnissen eine zwar sehr kurze, aber nicht unbedingt optimale Flammenentwicklung zu erwarten.

Ziel der Versuche war es, den Brennstoffdurchsatz über steigende Sauerstoffanreicherung auf maximal 30% Sauerstoff um etwa 50% zu erhöhen und dabei die Schmelzleistung um etwa 100% zu steigern. Als Vergleichsbasis war die durch die davor liegende Wanneneinreise bereits in Mitleidenschaft gezogene Wanne in der vor den Sauerstoffversuchen liegenden Woche an die Grenze ihrer Belastungsfähigkeit gefahren worden. Diese lag wegen der begrenzten „Schluckfähigkeit“ der Regeneratoren bzw. der Kaminzugreserven bei einem Öldurchsatz von 400 kg/h und einer Schmelzleistung von 61,3 t grünen Flaschenglases pro 24 h.

Bild 7 zeigt die Flammenentwicklung in diesem Versuchsabschnitt ohne Sauerstoffzusatz mit einem Öldurchsatz von je 200 kg/h an beiden Zerstäubern des rechten Brenners. Die Flamme weist den bei Unterbankfeuerung oft beobachteten Luftmangel an der Unterseite über der Schmelze auf.

Zu Beginn des Arbeitens mit Sauerstoffzusatz wurde versucht, eine sehr heiße asymmetrisch brennende Flamme dadurch zu erzeugen, daß den Innenzerstäubern die stöchiometrisch erforderliche Sauerstoffmenge von 2,28 Nm<sup>3</sup>/kg Öl zugeführt und die so sehr heiße Flamme unter die mit Luft langsamer brennende Ölflamme des Außenzerstäubers geführt wurde. Bild 8 läßt deutlich erkennen, daß die oberen Bereiche der mit vorgewärmter Verbrennungsluft brennenden Flamme des Außenzerstäubers dabei aus der Luftversorgung herausgedrängt werden und mit verhältnismäßig langer, voluminöser Flamme verbrennen.

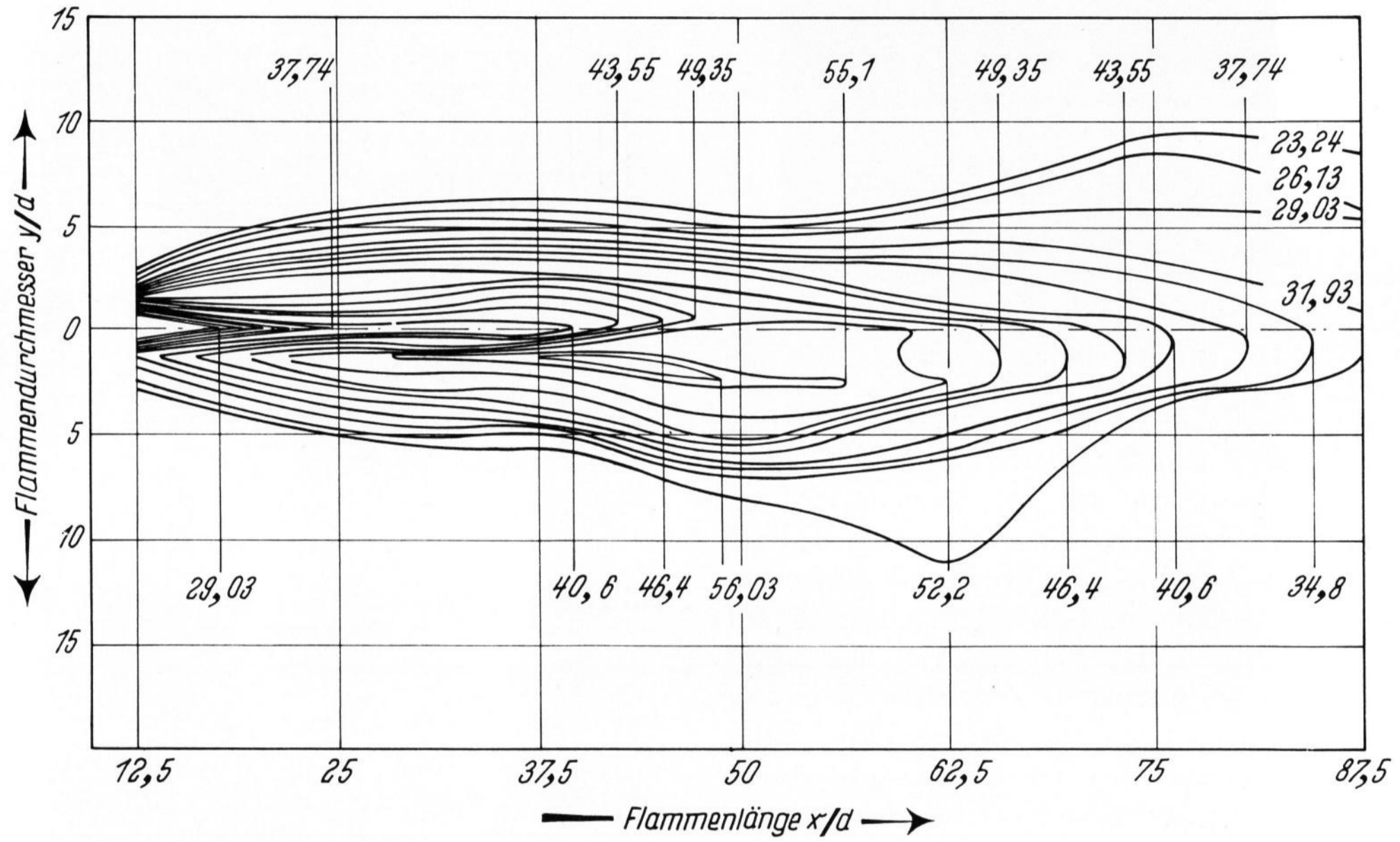
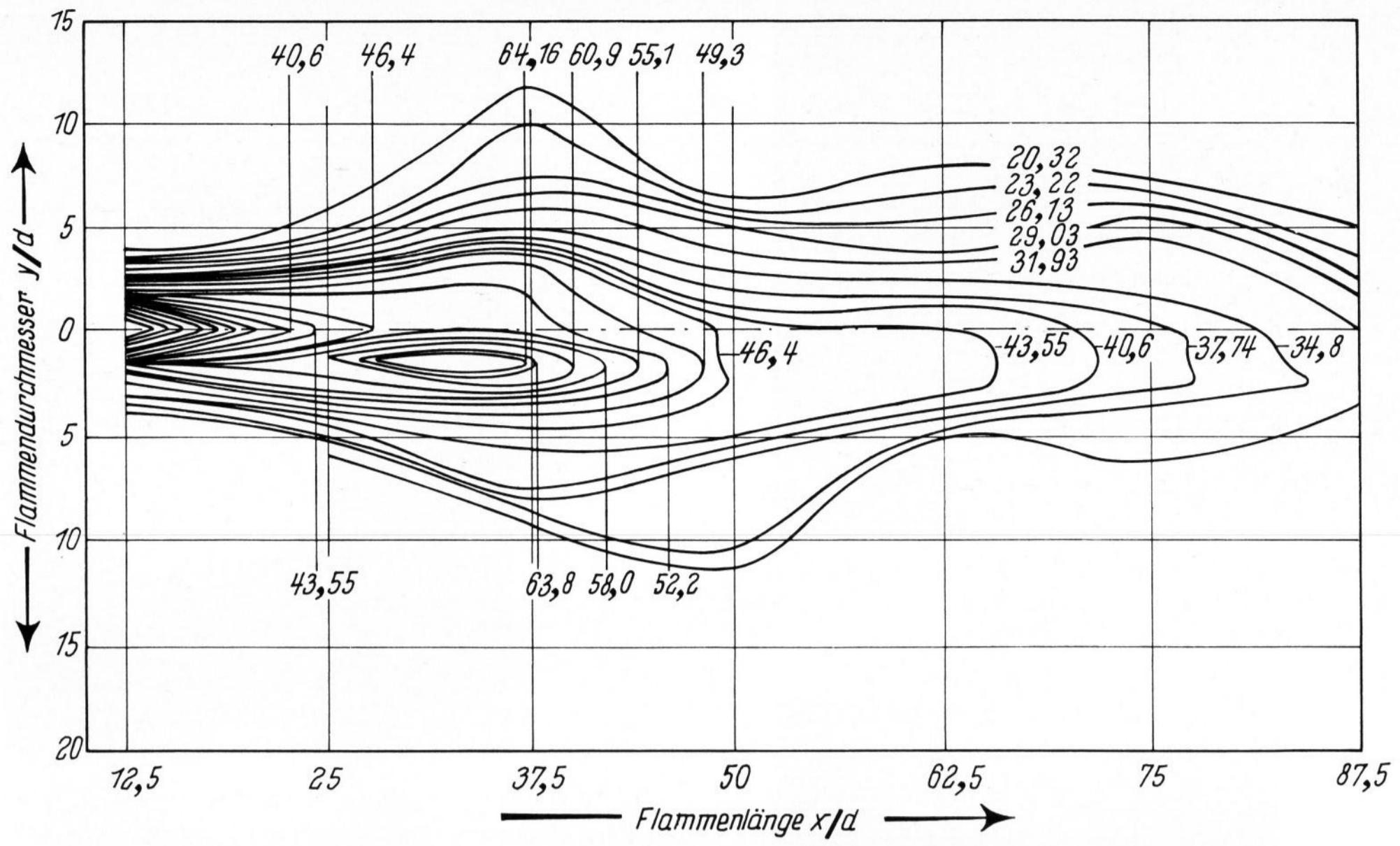


Bild 6. Temperaturverteilung in zwei Flammen mit unter den Zerstäubern liegenden Sauerstoffdüsen. Düsenabstand oben 5 cm, unten 10 cm; Sauerstoffanreicherung 30%; simuliert im Wassermodell [9].



Bild 7. Flammenausbildung am rechten Brenner ohne Sauerstoffzusatz, 1/1000 s.



Bild 8. Überschichtung der Sauerstoffflamme durch die Flammen des Außenzerstäubers, 1/1000 s.

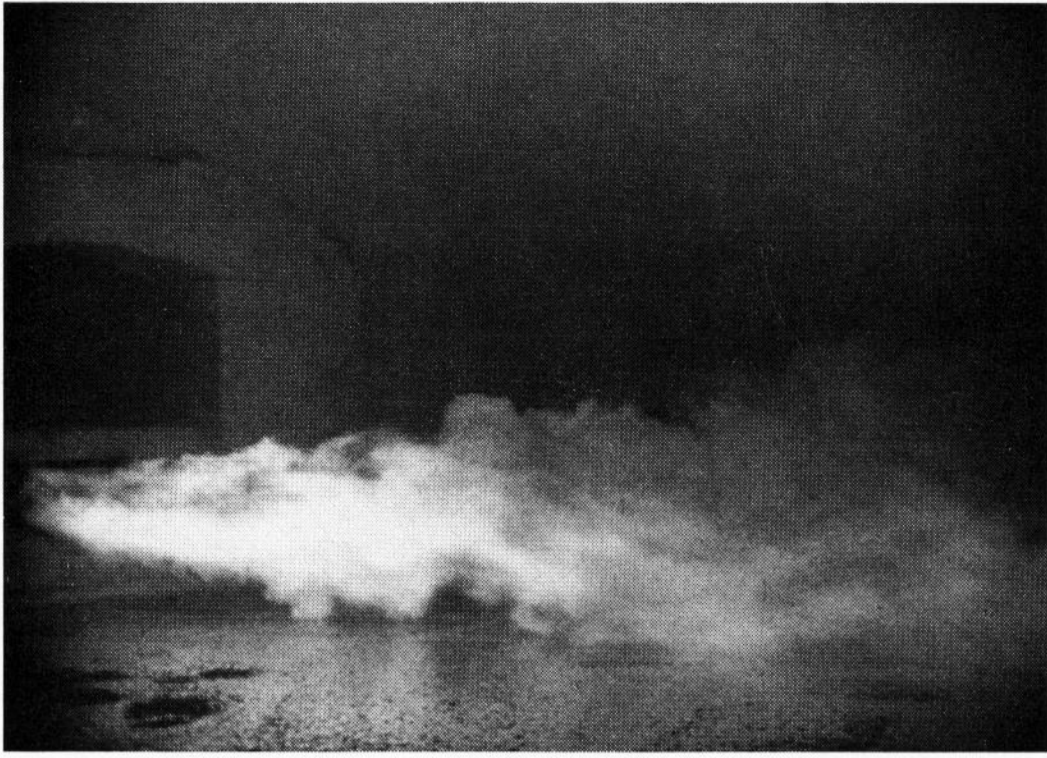


Bild 9. Innenzerstäuber 260 kg Öl/h, Sauerstoffanreicherung 25 %, dahinter Flamme des Außenzerstäubers ohne Sauerstoff, 190 kg Öl/h, 1/1000 s.

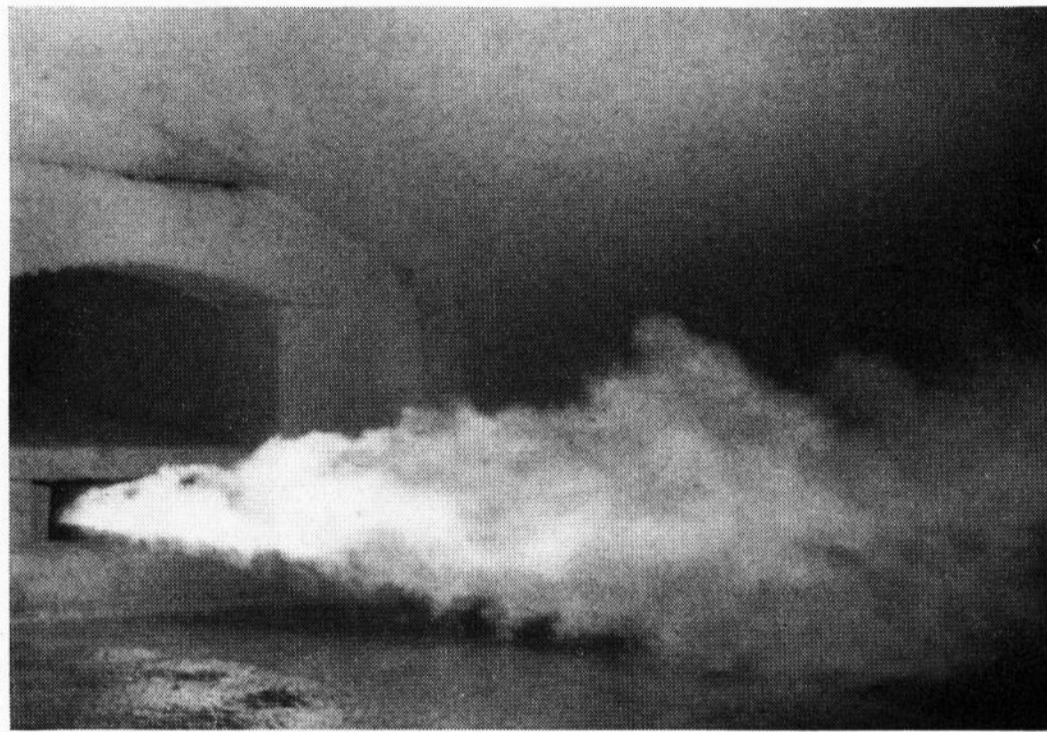


Bild 10. Flammenausbildung bei 350 kg Öl/h, Sauerstoffanreicherung 27 % am Innenzerstäuber, 150 kg Öl/h am Außenzerstäuber, 1/1000 s.

Für alle weiteren Versuche wurde daher die Übersichtung aufgegeben; die mit den Sauerstoffdüsen ausgerüsteten Innenzerstäuber übernahmen den laufend steigenden Öldurchsatz. Bild 9 zeigt die Flammenentwicklung bei 260 kg Öl/h und bei Anreicherung auf 25 % Sauerstoff am Innenzerstäuber, der Außenzerstäuber war mit 190 kg Öl/h belastet. Auch bei weiterer Steigerung des Öldurchsatzes auf 350 kg Öl/h, einer Sauerstoffanreicherung auf 27 % am Innen- und einem Öldurchsatz von 150 kg/h am Außenzerstäuber war die Flamme nicht länger, wie Bild 10 erkennen läßt. An der zunehmenden Aufhellung von Brennereinfassung und Gewölbe ist die ansteigende Temperatur in diesem Bereich zu erkennen. Die angestrebte unsymmetrisch brennende Flamme scheint jedoch zumindest an Hand dieser Aufnahmen nicht erreicht zu sein, was vornehmlich auf die zwar unter, aber unmittelbar am Ölzerstäuber anliegende Sauerstoffdüse zurückzuführen ist. Bereits in der Flammenwurzel ist ein starkes Einmischen des Sauerstoffs mit hellem Flammenkern zu sehen. Der dunklere Saum unter dem hellen Teil ist durch die optisch dahinter liegende Flamme des Außenzerstäubers ohne Sauerstoffdüse verursacht. Er verschwindet, wenn beide Zerstäuber mit Sauerstoffdüsen ausgerüstet werden, wie Bild 11 zeigt. Dieses senkrecht zur Flammenachse aufgenommene Bild läßt die sehr helle Flammenunterseite deutlich erkennen.

### 2.3. Temperaturverlauf im Verbrennungsraum

Von besonderem Interesse ist der Temperaturverlauf im Ofenraum; die maximale Temperatur ist durch die



Bild 11. Asymmetrische Flamme, beide Ölzerstäuber des linken Brenners mit Sauerstoffzusatz, Anreicherung 27 %, Öldurchsatz je 270 kg/h, 1/1000 s.

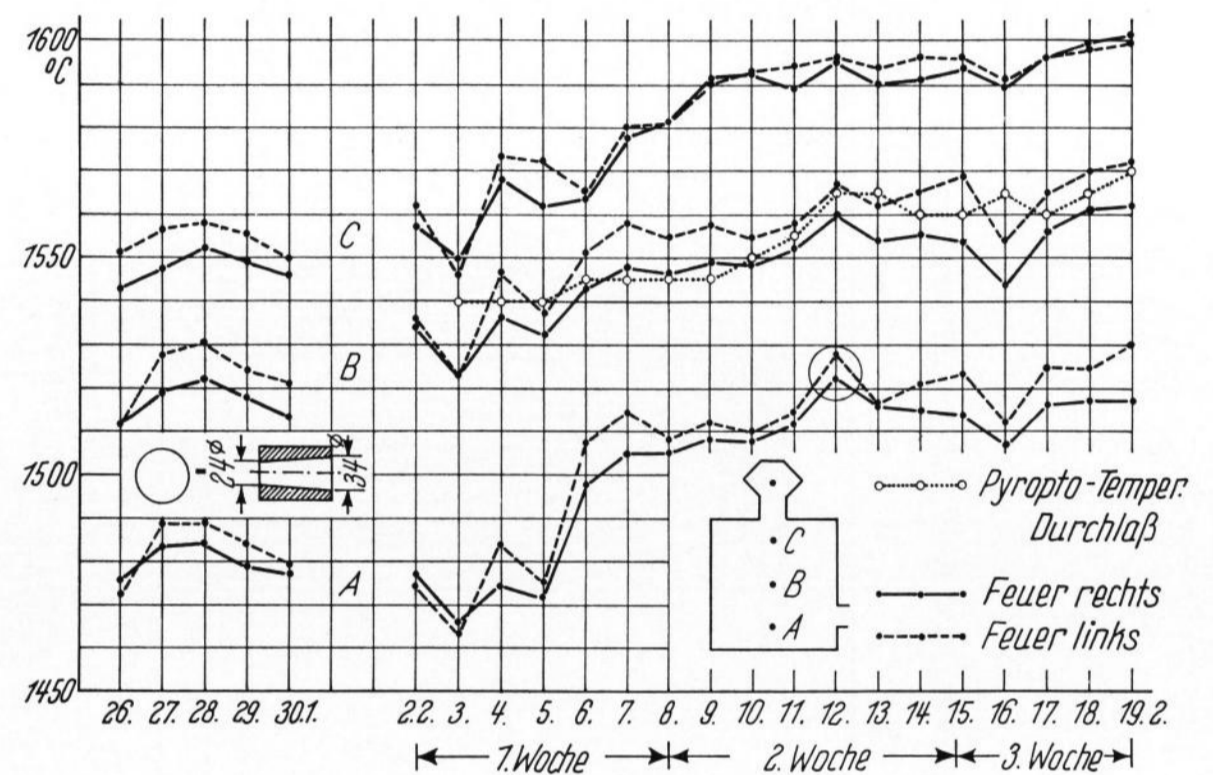


Bild 12. Temperaturverlauf im Gewölbe der drei Zonen der Schmelzwanne.

Haltbarkeit des feuerfesten Materials begrenzt. Wegen des isolierten Ofengewölbes wurde die Grenztemperatur mit 1600 °C festgelegt. Bild 12 zeigt den Temperaturverlauf an den drei Gewölbethermoelementen für den Vorversuch ohne Sauerstoffzusatz und während der 3 Wochen mit Sauerstoffzusatz. Nur während der ersten vier Tage der ersten Woche, in der mit überschichteter, asymmetrischer Flamme (Bild 8) gearbeitet wurde, liegt die Temperatur im Gemengebereich (Element A) unter derjenigen im Basisversuch ohne Sauerstoff. Der Öldurchsatz ist jedoch nur um 7,5 %, die Schmelzleistung um etwa 17 % gestiegen. Auch im Schaum- und Läuterbereich (Elemente B und C) ist die Temperatur nur um im Mittel 15 °C angestiegen.

Das Aufgeben der Übersichtung am 6. 2. und die Steigerung des Brennstoffdurchsatzes an den mit Sauerstoffzusatz arbeitenden Innenzerstäubern hebt, wie die Bilder 9 und 10 zeigten, durch das schnelle Einmischen des Sauerstoffs im Anfangsteil der Flamme die ausgeprägt asymmetrische Temperaturverteilung auf. Vom 5. zum 6. 2. steigt die Temperatur im Gemengebereich um 25 °C an und nimmt dann stetig mit zunehmendem Brennstoffdurchsatz zu. Im Schaumbereich (B) ist der Anstieg der Kurve vermutlich durch

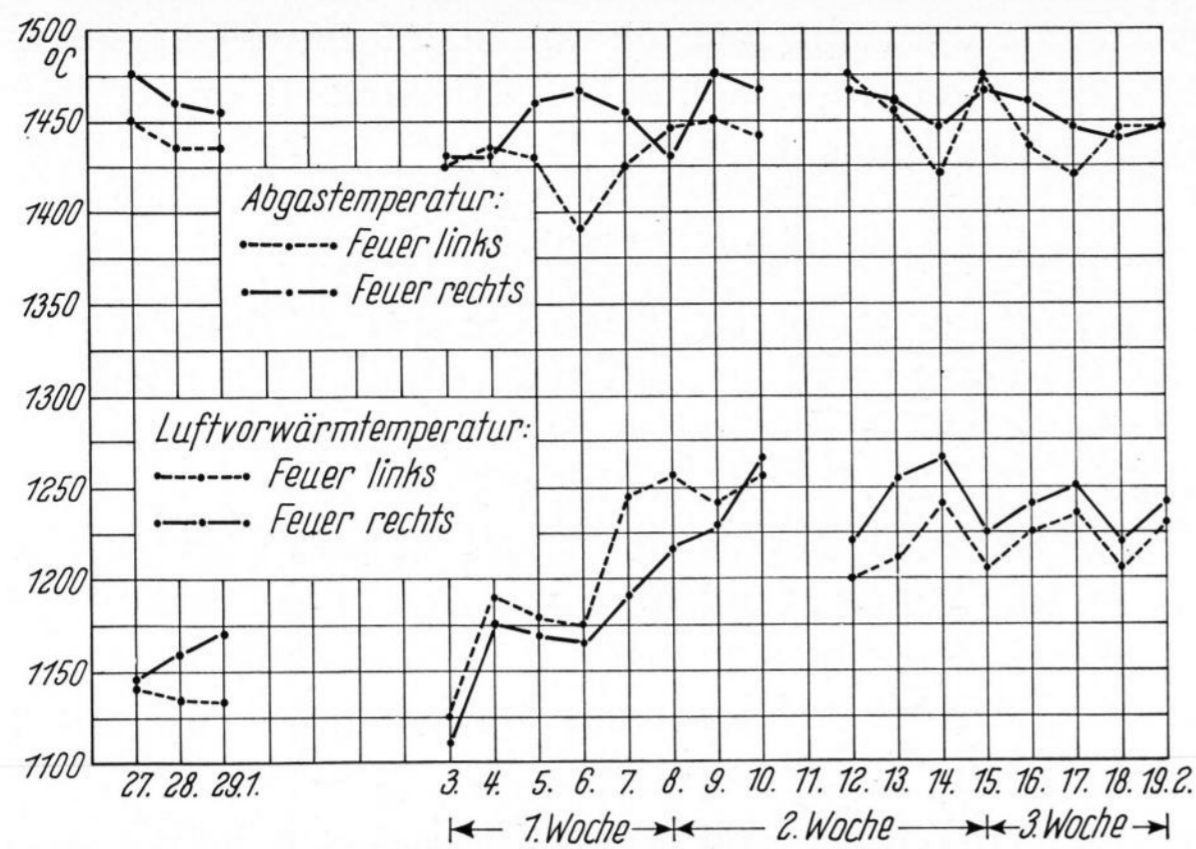


Bild 13. Abgas- und Luftvorwärmtemperaturen in °C.

den Strahlungsaustausch mit dem relativ kalten Bodenglas, das die Blasdüsen nach oben bringen, gedämpft. Die hohe Temperatur im Umkehrpunkt der Flamme vor dem Durchlaß im Gewölbe (C), die um 30 °C über der mit dem Teilstrahlungs-pyrometer „Pyropto“ an der Rückwand über dem Durchlaß ohne Feuer gemessenen Temperatur liegt, könnte durch Nachverbrennung der infolge Dissoziation gebildeten latenten Wärme verursacht sein. Sie steigt mit zunehmendem Brennstoff- und Sauerstoffdurchsatz an, da ihre Rekombination im Schaumbereich erschwert wird.

In Bild 12 ist am 12. 2. ein besonders steiler Anstieg der Temperatur im Gemengebereich festzustellen. Die angedeutete Vergrößerung des Austrittsquerschnitts der Sauerstoffdüse führte zu einer Halbierung des Sauerstoffimpulsstroms. Der Sauerstoff wurde dabei noch schneller in den austretenden Ölnebel eingesaugt, was zur verstärkten Wärmeabstrahlung im Gemengebereich auch zum Gewölbe hin führte.

#### 2.4. Abgastemperatur, Verbrennungsluftvorwärmung

Für die von Flammen und Verbrennungsgasen im Ofenraum abgegebene Wärme ist die Abgastemperatur am abziehenden Brenner eine kennzeichnende Größe. In Bild 13 ist der Verlauf der Abgas- und Luftvorwärmtemperatur, gemessen mit Absaugthermoelementen im Brennerhals hinter der Brennermündung, dargestellt. Trotz des während der Versuche stetig steigenden Öldurchsatzes auf 25% über denjenigen zu Versuchsbeginn ist die Abgastemperatur nicht angestiegen, sie liegt z. T. sogar unter den Ausgangswerten. Fast durchgehend liegt die Abgastemperatur bei Feuer rechts höher, obwohl der linke Brenner mit um etwa 15% höherem Brennstoffdurchsatz arbeitete. Ursache ist die dichtere Gemengelage auf der linken Hälfte der Glasbadoberfläche im Vergleich zur rechten.

Berücksichtigt man, daß die Abgasmenge bei höchstem Öldurchsatz nur um 0,2% kleiner ist als im Mittel bei den Versuchen ohne Sauerstoffzusatz, so wird deutlich, daß der gesamte Mehrbetrag der im Öl chemisch gebundenen Wärme aus der Steigerung des Durchsatzes als Ofenwärme, d. h. zur Deckung des Nutzwärmebedarfs und der Wandverluste zur Verfügung steht. Er wirkt sich infolge des Sauerstoffzusatzes weder in einer Erhöhung der Abgasmenge noch der Abgastemperatur aus.

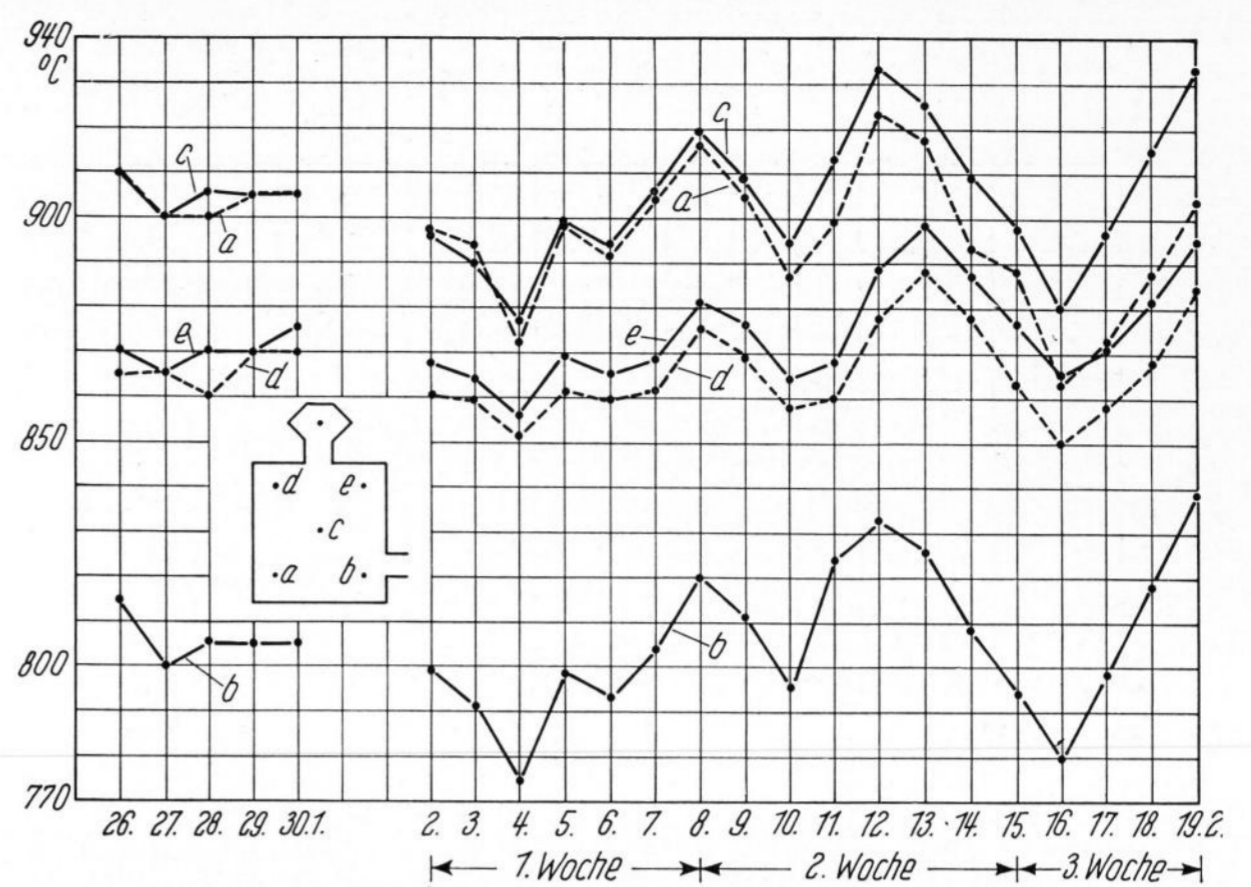


Bild 14. Temperaturverlauf an den Bodenelementen.

Der untere Teil des Bildes 13 zeigt den Verlauf der Luftvorwärmtemperaturen bei beiden Feuerstellungen. Gegenüber den Basisversuchen ohne Sauerstoffzusatz ist die Verbrennungslufttemperatur von im Mittel 1150 °C um fast 100 °C bei maximaler Sauerstoffanreicherung auf 28% (9. und 10. 2.) angestiegen; sie fällt dann mit steigendem Brennstoffdurchsatz und Zurücknahme der Sauerstoffanreicherung auf Werte von 25 bis 27% wegen des entsprechend höheren anteiligen Verbrennungsluftbedarfes wieder leicht ab.

Der Vergleich der Flammenentwicklung mit und ohne Sauerstoffzusatz zeigt sehr deutlich, daß entgegen der rein energetischen Betrachtung [1 u. 2] hohe Verbrennungsluftvorwärmung auf 1250 °C keine ebenso hohe Flammentemperatur bringt, wie die auf Grund des verminderten Stickstoffballastes mit Sauerstoff brennende Flamme, da die Geschwindigkeit der Energieumsetzung die ausschlaggebende Rolle spielt.

#### 2.5. Temperaturverlauf im Glasbad

Neben der Temperaturverteilung im Ofenraum ist der Temperaturverlauf im Glasbad von besonderem Interesse. Er ist ein Maß für den Wärmebedarf der Schmelze bei steigender Schmelzleistung. In Bild 14 ist der Temperaturverlauf an den Bodenelementen aufgetragen, ihre Lage ist den Bildern 2 und 3 zu entnehmen. Sie tauchen nicht in das Glasbad ein, sondern sind in Bohrungen im Wannenboden eingesetzt, die bis an den Bodenbelag reichen. Die angezeigten Temperaturen liegen daher noch niedriger als bei Erschmelzung von Grünglas üblich. Sie reagieren dennoch, wie die aufgetragenen Tagesmittelwerte ausweisen, sehr empfindlich auf Veränderungen der Beheizung und der Schmelzleistung.

Wie zu erwarten, ist dem in Nachbarschaft zum Einlegevorbau befindlichen Thermolement (b) die niedrigste Temperatur zugeordnet. Erstaunlicherweise weist das in gleichem Abstand zur Stirnwand, aber in größerem Abstand zum Einlegevorbau befindliche Thermolement (a) eine um etwa 100 °C höhere Temperatur auf. Dies deutet darauf hin, daß das kalte in die Wanne eingeschobene Gemenge dem Glasbad sehr viel Wärme entzieht und mit fortschreitendem Schmelzverlauf an der Gemengeunterseite vermutlich eine isolierende Schicht aus Gasblasen entsteht, die die Wärmeaufnahme aus dem Bad erschwert. Die starke Kühlwirkung des einlaufenden Gemenges führte bei kurzfristig gesteiger-

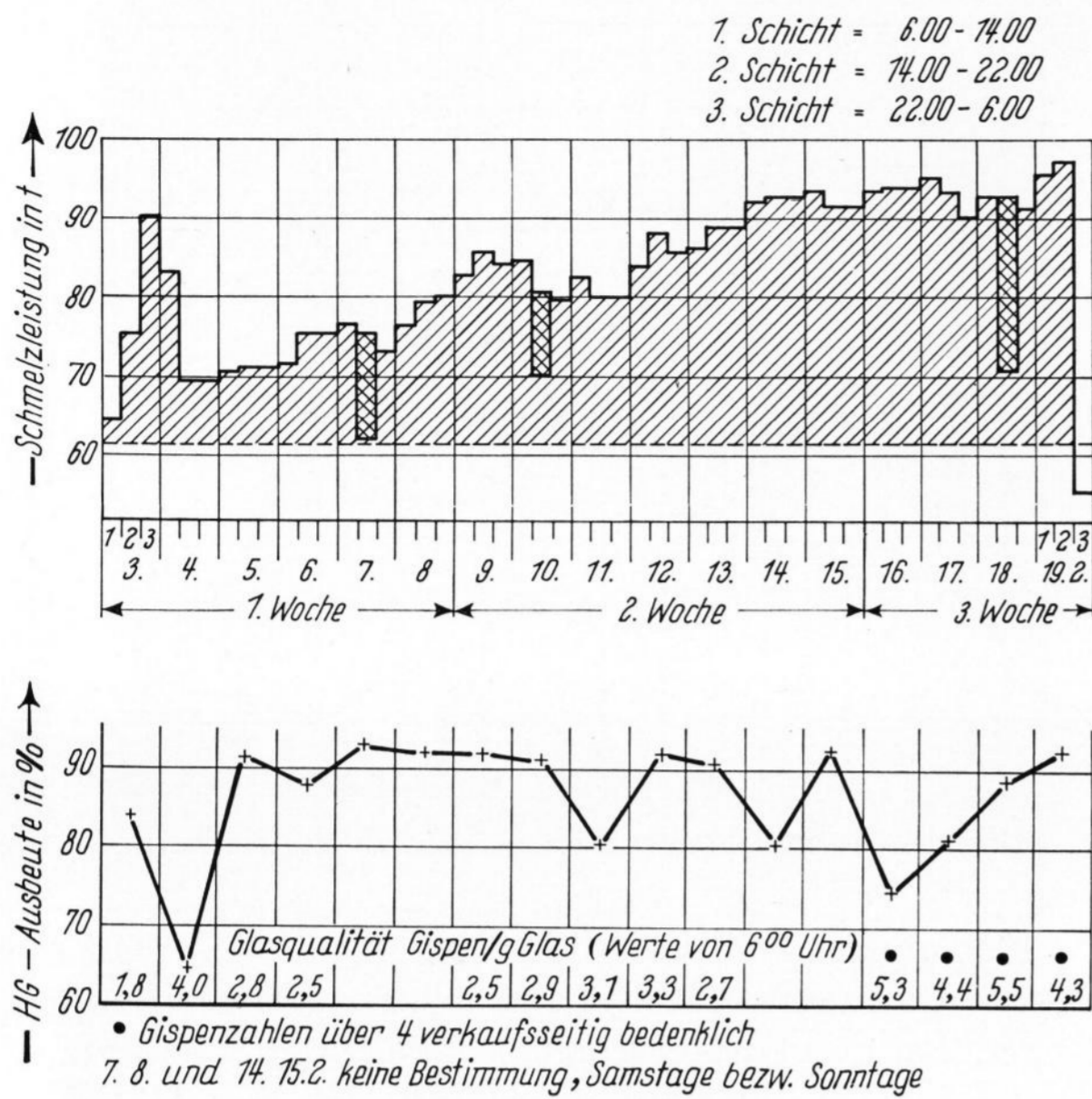


Bild 15. Schmelzleistung, Glasausbeute und Gispenszahl während der Sauerstoffversuche.

ter Schmelzleistung zu einer so erheblichen Zunahme der Viskosität im Einlegebereich, daß das von der Einlegeschwinge eingeschobene Gemenge wie auf Gummi zurücklief. Die Schmelzleistungssteigerung war daher bei nur einem mit Sauerstoffzusatz arbeitenden Zerstäuber auf etwa 10 t/24 h begrenzt.

Die höchste Temperatur wird in der Nähe der Blasdüsenreihe gemessen, womit die Wärmetransportwirkung der Glasströmungen im Bereich der Blasdüsen in Richtung zum Wannenboden unterstrichen wird. Im Bereich höchster Oberofentemperatur und schaumfreien Glasspiegels vor dem Durchlaß liegen die Bodentemperaturen um z. T. 30 bis 40 °C (Elemente d und e) unter den im Gemengebereich (a) gemessenen, was auf starke Strahlungswärmeabsorption des erschmolzenen Glases und stagnierende Zonen hindeutet.

Ein Abfallen der Glasbad- bzw. Bodentemperatur bedeutet eine Gefährdung der Glasqualität. Die sichtbaren Einbrüche im Kurvenverlauf deuten mangelnde Wärmeversorgung des Bades an, verursacht durch zu schnell gesteigerte Schmelzleistung, die z. T. als Folge unvorhergesehener Betriebsstörungen nötig war, um den Zeitplan einzuhalten. Besonders interessant ist der Kurvenverlauf vom 12. bis 19. 2. Die Steigerung der Schmelzleistung von etwa 85 auf 93 t/24 h war im Hinblick auf das Abschmelzen des Gemenges einwandfrei möglich, beeinträchtigte jedoch die Wärmeversorgung des Glasbades in steigendem Maße. Der Tiefpunkt am 16. 2. ist auf zusätzliche Störungen an den Ölzerstäuberdüsen zurückzuführen, wodurch die Brennstoffversorgung mehrfach unterbrochen war. Am 17. 2. wurde die Sauerstoffinstallation geändert und beide Ölzerstäuber des linken Brenners mit Sauerstoffdüsen ausgerüstet. Die ansteigenden Bodentemperaturen zeigen sehr deutlich, daß die Wärmeversorgung des Bades durch die Hinzunahme einer zweiten Sauerstoffflamme, wenn auch nur bei einer Feuerstellung, schnell ansteigt. Bei einer maximalen Schmelzleistung von 96 t/24 h am 19. 2. lagen die Bodentemperaturen allgemein höher als bei der Ausgangsschmelzleistung von 61 t/24 h ohne Sauer-

stoff. Die Versuche mußten am 19. 2., 20.00 Uhr, abgebrochen werden, da die bereitgestellten Sauerstoffreserven verbraucht waren.

## 2.6. Glasqualität

Die Glasqualität ist durch die gute Produktion an den Maschinen und die Zahl der Gispens/g Glas gekennzeichnet. Als gute Ausbeute wird für das Grün glas eine solche von 89 bis 90% betrachtet. Sie wurde bei einer Schmelzleistung von 56 bis 58 t/24 h an dieser Wanne über viele Monate erreicht. Als Grenze für die Zahl der zugelassenen Gispens gelten 4/g Glas. Bild 15 zeigt den Verlauf der Schmelzleistung und darunter den Verlauf der Ausbeute in % sowie die Gispenszahl.

Die gekreuzt schraffierten Bereiche am 7., 10. und 18. 2. zeigen unprogrammmäßige Betriebsstörungen durch Verstopfen der Glasablauf Rinne, Ausfall der Sauerstoffversorgung und kurz vor Schluß noch der Einlegemaschine an, bei denen die Schmelzleistung innerhalb einer Schicht auf die durch die Schraffur angegebene Schmelzleistung abgesenkt und anschließend wieder hochgefahren werden mußte. Die Glasausbeute zeigt am 4. 2. einen tiefen Abfall auf 65%, gleichzeitig steigt die Gispenszahl auf 4/g Glas. Ursache ist die unprogrammmäßige Steigerung der Schmelzleistung von 75 auf 90 t/24 h durch den Nachtschichtingenieur am 3. 2., also gleich zu Beginn der Versuche. Durch eine zusätzliche Störung an der Einlegemaschine wurde dabei für mehrere Stunden von Hand eingelegt. Das daraufhin bis in die Blasdüsenreihe laufende Gemenge führte zur Bildung von Gemengesteinchen und Gispens. Zwei weitere Einbrüche mit Abfall der Ausbeute auf etwa 80% am 11. und 14. 2. sind durch Sortenwechsel bedingt. Die Gispenszahl am 10., 11. und 12. 2. steigt durch den Sauerstoffausfall an, der sich nach Bild 14 auch in der Bodentemperatur bemerkbar macht. Am 16. 2. fällt die Ausbeute auf 75%; Störungen in der Ölversorgung bei der zu hoch gehaltenen Schmelzleistung führen zu einem neuen Tiefpunkt der Bodentemperatur und einem Anstieg der Gispenszahl auf 5,3/g Glas. Der erneute Anstieg der Gispenszahl auf 5,5/g Glas am 18. 2. ist, wie der Vergleich mit den Bodentemperaturen zeigt, eindeutig durch den Ausfall der Einlegemaschine verursacht. Während des Einlegens von Hand schwammen große Gemengehaufen in die Blasdüsen, führten jedoch nicht zur Steinchenbildung mit eingeschränkter Maschinenausbeute. Am 19. 2., um 6.00 Uhr früh, war bereits eine Besserung zu verzeichnen, obwohl die Schmelzleistung innerhalb von 12 h um mehr als 20 t erhöht wurde. Am 19. 2. war die Schmelzleistung von 8.00 bis 18.00 Uhr auf 96,5 t/24 h erhöht worden, um 18.00 Uhr war der Sauerstoffvorrat erschöpft. Bodentemperatur, Maschinenausbeute und Gispenszahl am 20. 2. um 6.00 Uhr deuten darauf hin, daß die Grenze der Schmelzleistung noch nicht erreicht wurde.

## 2.7. Wärmewirtschaftliches Verhalten

Eine im allgemeinen recht deutliche Antwort auf das wärmewirtschaftliche Verhalten eines Ofens gibt die Wärmebilanz. Durch sorgfältige kontinuierliche Überwachung des Herdraumdruckes, der Mengenströme von Sauerstoff, Brennstoff, Verbrennungsluft und Zerstäubungsluft, des Sauerstoffgehaltes der Abgase und der Temperaturen von Abgasen und Verbrennungsluft konnten die Grundlagen für die Berechnung der kennzeich-

nenden Posten der Wärmebilanz gewonnen werden. In Bild 16 ist die Änderung der Wärmebilanzposten im Vergleich zu den, aus den vorhergehenden Basisversuchen berechneten und gleich 1,0 gesetzten Ausgangswerten zusammen mit der Sauerstoffanreicherung dargestellt.

Die Brennwärme, d. h. die im Heizöl eingebrachte, chemisch gebundene Wärme ist in der angegebenen Stufung um etwa 25% gegenüber dem Mittelwert des Basisversuchs vom 27. bis 29. 1. ohne Sauerstoffzusatz erhöht worden.

Die Regenerationswärme, d. h. die Enthalpie der Verbrennungsluft, hat trotz des Anstiegs der Luftvorwärmtemperatur um z. T. 100 °C abhängig von der jeweils gewählten Sauerstoffanreicherung auf im Mittel etwa 90% derjenigen des Basisversuchs abgenommen. Der Tiefstwert liegt bei 80% entsprechend der maximalen Sauerstoffanreicherung auf 28%. Sie wurde nur für zwei Tage versuchsweise verwirklicht, da trotz nicht erhöhter Brennwärme mit zunehmender Sauerstoffmenge die Temperatur im Läuterbereich weiter anstieg und ebenso die Abgastemperatur am abziehenden Brenner. Die Höhe des Sauerstoffzusatzes ist somit besonders bei stirnbeheizten Wannen wegen der zunehmenden Dissoziation nicht unbedingt auch ein Maß für die günstigste Fahrweise.

Die Abgaswärme nimmt zwar bei steigendem Sauerstoffzusatz wegen der verminderten Abgasmenge deutlich ab. Die Ofenwärme nimmt jedoch nicht in entsprechendem Umfang zu, sondern bleibt, wie der Verlauf vom 8. bis 11. 2. bei nahezu konstanter Brennwärme zeigt, unabhängig vom stark wechselnden Sauerstoffzusatz ebenfalls nahezu konstant. Dies deshalb, weil mit steigendem Sauerstoffzusatz auch die dem Oberofen zugeführte Regenerationswärme abnimmt.

Für den Anstieg der Ofenwärme und damit für die mögliche Steigerung der Nutzwärme ist der ohne nachteilige Beeinflussung der Haltbarkeit des feuerfesten Materials (maximale Ofentemperatur) erzielbare Brennstoffdurchsatz (Brennwärme) vorrangig.

Die Ofenwärme wird z. T. zur Deckung des Nutzwärmebedarfs, z. T. zur Deckung der Wandverluste verbraucht. Der Nutzwärmebedarf ist allgemein auf eine Glastemperatur von 1500 °C am Austritt aus der Schmelzwanne bezogen, ohne Rücksicht auf die im Vorversuch ohne Sauerstoffzusatz niedrigeren Verbrennungsraumtemperaturen und z. T. auch Bodentemperaturen.

Die Wandverluste sind als Restglied bestimmt, sie zeigen einen entsprechend unregelmäßigen Verlauf. Aus dem Vergleich mit der Ofenwärme und der Nutzwärme geht hervor, daß die so bestimmten Wandverluste davon abhängig sind, wie weit es gelingt, die angebotene Ofenwärme in Form von Nutzwärme in Anspruch zu nehmen. Dies ist besonders deutlich bei Störungen (3./4. 2., 10. 2.), die zur schnellen Zurücknahme der Schmelzleistung zwangen. Die angebotene Ofenwärme kann dann wegen der angestrebten Besserung der Glasqualität bzw. Maschinenausbeute nicht reduziert werden, z. B. um die Glasbadtemperaturen wieder zu erhöhen. Dabei steigen erwartungsgemäß auch die Wandverluste überdurchschnittlich an. Wird andererseits durch abnormale Schmelzleistungssteigerung mehr Wärme verbraucht, als über die angebotene Ofenwärme zur Verfügung steht

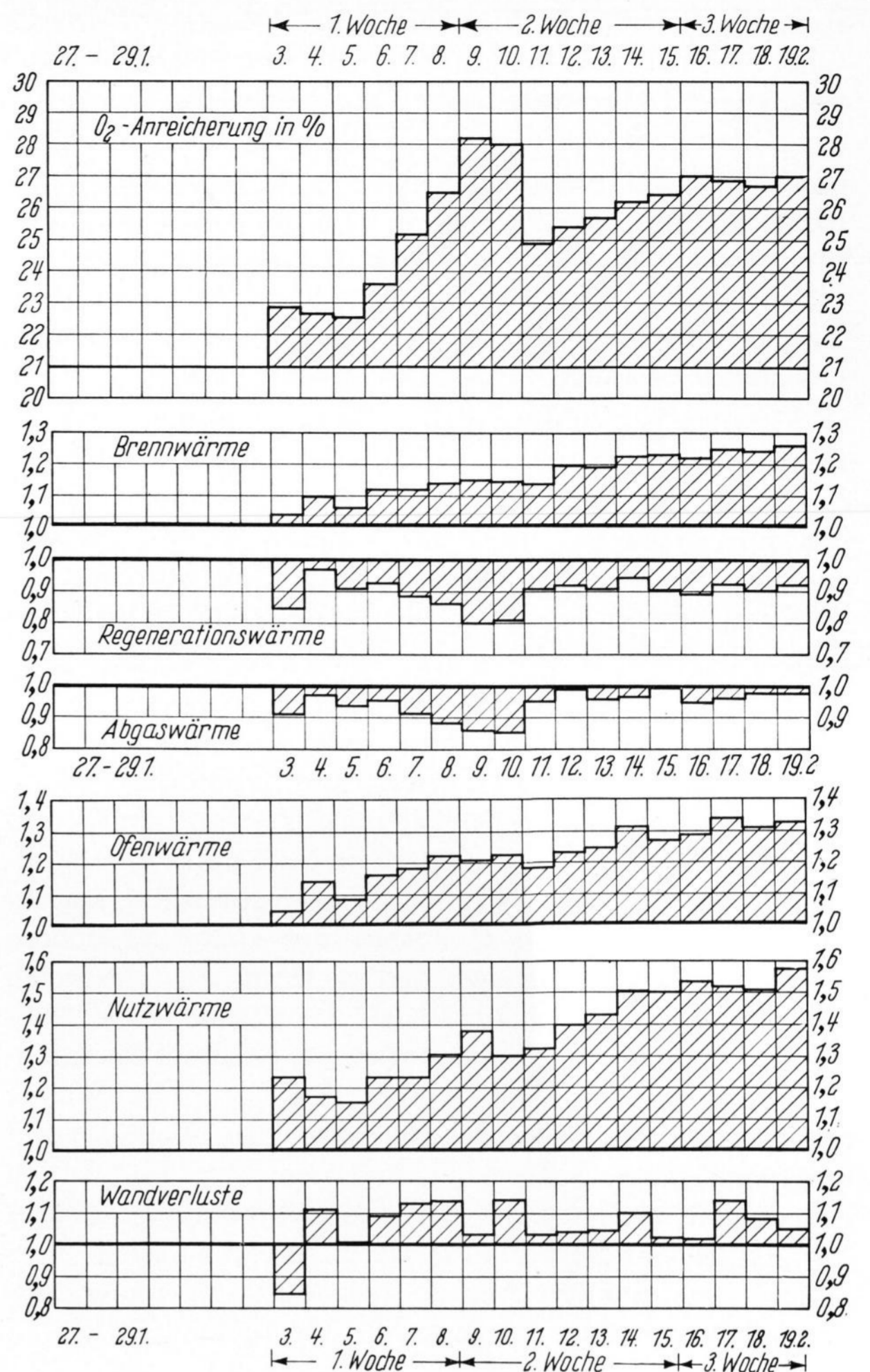


Bild 16. Änderung der Wärmebilanzposten, abhängig von der Sauerstoffanreicherung.

(3. 2.), dann werden die Wärmespeicher Glasbad und Wandungswärme über Gebühr in Anspruch genommen, und die über die Wandungen nach außen fließende Wärme sinkt entsprechend ab. Der Verlauf der Kurve zeigt in Analogie mit dem Verlauf z. B. der Bodentemperaturen, daß bei sorgfältiger Überwachung der Anlage die Wandverluste selbst in U-Flammenwannen mit ihren ungünstigen, durch die Flammenführung bedingten Verhältnissen nur um etwa 5 bis 10% ansteigen, während der Brennstoffdurchsatz um 25% erhöht wird.

### 3. Schlußfolgerungen

Auch für stirnbeheizte Wannen gilt es, das Wärmeangebot vornehmlich auf den Gemengebereich zu konzentrieren. Hauptanliegen muß es sein, durch optimale Anordnung der Sauerstoffdüsen asymmetrisch brennende Flammen zu erzeugen, deren heiße Zonen unmittelbar über dem Bad liegen. So kann die thermische Belastung der Feuerraumwandungen wirksam reduziert werden. Wegen der im Schaum- und Läuterbereich deutlich verminderten Rekombination der durch Dissoziation gebildeten Kohlenmonoxid-, Wasserstoff- und Sauerstoffbestandteile ist eine Nachverbrennung im Flammenumkehrpunkt mit entsprechender Temperaturerhöhung nicht auszuschließen. Es scheint hier wichtig, bei Steigerung des Wärmeangebotes auf möglichst viele kurz-

flammig brennende Flammen hinzuarbeiten. Dadurch wird die Wärme vornehmlich im Einschmelzbereich des Gemenges freigesetzt, wo sie mit höchstem Wirkungsgrad übertragen wird. Außerdem wird dabei auch das Verhältnis der flammenbedeckten zur gesamten Herdfläche wirksam vergrößert. Rekuperativ beheizte Stirnbrennerwannen, die es gestatten, mehrere Brenner über die Breite der Stirnwand anzuordnen und mit Sauerstoffzusatz zu betreiben, dürften den regenerativ beheizten U-Flammenwannen deutlich überlegen sein.

Besonders wichtig ist die volle Ausnutzung der für die Gemengesmelze verfügbaren Glasbadoberfläche durch gleichmäßige Verteilung des eingelegten Gemenges. Das Problem konnte durch Entwicklung einer verschiebbaren Einlegemaschine auch für stirnbeheizte Wannen mit seitlicher Einlage befriedigend gelöst werden.

Bei den Versuchen wurde zwar eine Steigerung der spezifischen Schmelzleistung von 1,6 t/m<sup>2</sup> 24 h auf 2,5 t/m<sup>2</sup> 24 h erzielt bei gleichzeitiger Verminderung des spezifischen Wärmeverbrauchs von 1550 auf 1240 kcal/kg Glas. Da die Basisversuche ohne Sauerstoffzusatz jedoch bei einer maximalen Verbrennungsraumtemperatur von 1560 °C anstatt der später erreichten 1600 °C durchgeführt wurden, scheint der Vergleich nicht korrekt. Es wurde daher vorgesehen, die Vergleichsversuche ohne Sauerstoffzusatz bei einer Maximaltemperatur von 1600 °C zu wiederholen. Die Wanne lief kurzzeitig bei dieser Temperatur für Weißglas mit einer maximalen Schmelzleistung von 72 t/24 h. Wegen der abweichenden Glasfarbe und des Fehlens weiterer Unterlagen zur Beurteilung des wärmetechnischen Verhaltens ist eine Korrektur der bei den Sauerstoffversuchen erzielten Ausgangsleistung nicht möglich.

Bei der Steigerung der Schmelzleistung durch Sauerstoffzusatz zur Verbrennung könnten die mit der zeit-

weise beobachteten Abkühlung des Glasbades verbundenen Schwierigkeiten beseitigt werden, wenn gleichzeitig die bei Farbglasschmelzen heute weit verbreitete Elektrozusatzheizung im Gemengebereich angewandt würde. Damit stellt sich die Frage nach den Kosten bei Sauerstoffzusatz im Vergleich zur elektrischen Zusatzheizung. Die Versuche zeigten, daß die Mehrschmelze aus Öl- und Sauerstoffverbrauch etwa 3,5 DPf/kg Glas kostet. Dabei ist der Ölpreis mit 100 DM/t und der Sauerstoffpreis mit 10 DPf/Nm<sup>3</sup> eingesetzt. Bei Elektrozusatzheizung ist die Mehrschmelze bei einem effektiven Strompreis von 5 DPf/kWh und einer elektrischen Leistung von 0,8 kWh/kg Glas mit 4 DPf/kg Glas belastet. Dieser Vergleich zeigt bereits, daß bei kleinen Steigerungen der Schmelzleistung, wie im vorliegenden Fall, der Sauerstoff zu einem Preis von 10 DPf/Nm<sup>3</sup> verfügbar sein muß, wenn er mit dem elektrischen Strom in Konkurrenz treten will. Günstiger werden die Verhältnisse vermutlich, wenn größere Schmelzleistungssteigerungen realisiert und in Anspruch genommen werden.

Die Untersuchungen wurden durch die großzügige Unterstützung zahlreicher Stellen und Personen ermöglicht, denen hiermit besonders gedankt sei:

Für die Bereitstellung der Wannenanlage und die Versuchsvorbereitung sowie die Unterstützung während der Versuche Herrn Dir. E. SCHULZE, VEBA-Glas AG, Essen, und seinen an den Versuchen beteiligten Mitarbeitern,

der Firma Messer Griesheim GmbH, Abteilung Industriegase, Düsseldorf, für die Bereitstellung der erforderlichen Installationen und die Mitarbeit ihrer Ingenieure,

den Mitarbeitern der Hüttentechnischen Vereinigung der Deutschen Glasindustrie (HVG), Frankfurt (Main), den Herren VOSS und MERGLER, STARZINSKY und SCHAKAKI für ihren Einsatz während der Versuche und schließlich der Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen (AIF), Köln, für die finanzielle Unterstützung dieser Arbeiten.

## 5. Literatur

- [1] MEISTER, R.: Einsatz von Sauerstoff bei der Beheizung von Glasschmelzöfen, Zweckmäßigkeit und Wirtschaftlichkeit. Vortrag Fachausschuß II der DGG am 7. 10. 1964. [Ref. Glastechn. Ber. **38** (1965) S. 33.]
- [2] MEISTER, R.: Avantages techniques et économiques de l'utilisation de l'oxygène dans le chauffage des fours pour la fusion du verre. Verres et Réfract. **20** (1966) S. 106 – 112.
- [3] BEAUSEIGNEUR, G. und MICHAUD, M.: Essais de sur-oxygénation de l'air dans les fours de verrerie. Verres et Réfract. **2** (1948) S. 339 – 343.
- [4] MICHAUD, M.: L'utilisation d'oxygène pour la combustion dans les fours à flamme — Application aux fours de verrerie. In: IV. Congr. Intern. Chauff. Industr., Paris 1952. Groupe IV, Section 43, Nr. 124. [Ref. Glastechn. Ber. **26** (1953) S. 22.]
- [5] KISSEL, R. R. und MICHAUD, M.: International Flame Research Foundation: First experiments at Ijmuiden on the combustion of oil using oxygen. J. Inst. Fuel **35** (1962) S. 109 – 120. [Ref. Glastechn. Ber. **36** (1963) S. 413.]
- [6] BEER, J. M. und LEE, K. B.: First results of the Ijmuiden trial on the heat transfer from oxygen enriched oil and gas flames. International Flame Research Foundation. Doc. nr. K 20/a/10. 21. August 1963.
- [7] CHEDAILLE, J.: Injection d'oxygène pur dans les flammes de mazout. International Flame Research Foundation. Doc. nr. K 20/a/18. 20. März 1965.
- [8] CHEDAILLE, J.: Experimental study of the influence on heat transfer of the injection of pure oxygen under industrial oil flames. International Flame Research Foundation. Doc. nr. K 20/a/28. 30. Dezember 1965.
- [9] PAPAGEORGIOU, N.: Flammenform und Temperaturfeld bei Flammen an Brennern mit Sauerstoff-Zusatzdüse und ihre Untersuchung im Wassermmodell. TU Braunschweig, Diss. v. 24. 6. 1970.
- [10] MEISTER, R.: Wärmeflußmessungen im Ofenraum von U-Flammenwannen bei Beheizung mit Öl und Ferngas. Vortrag 37. Glastechnische Tagung 1963 in Münster. [Ref. Glastechn. Ber. **36** (1963) S. 205.]
- [11] MEISTER, R.: Zur Frage des Sauerstoffeinsatzes in Glasschmelzöfen. Glastechn. Ber. **41** (1968) S. 557 – 565.
- [12] LE JEAN, M. und WINTER, M.: Injection d'oxygène sous la flamme d'un four de verrerie. Rev. générale Thermique **7** (1968) S. 1467 – 1471. [Ref. Glastechn. Ber. **44** (1971) Nr. 4, R71-0616.]
- [13] BRÜNING, R.: Modelluntersuchungen an U-Flammenwannen. Teil I: Strömungsverlauf und Stabilität. Teil II: Geschwindigkeitsverteilung und Mischungsverlauf. Teil III: Aufenthaltszeitverteilungen. Teil IV: Einfluß eines Einlegevorbaus und geometrischer Varianten des Oberbaus. Glastechn. Ber. **41** (1968) S. 277 – 283, S. 326 bis 334, S. 408 – 413; **44** (1971) Nr. 2, S. 56 – 65.