nach etwas angehoben werden. Nach dem letzten Wannenumbau, bei dem die Wanne mit stehenden Kammern und Magnesitgitterung ausgerüstet wurde, gelang es, durch die höhere Luftvorwärmung eine maximale Temperatur von über 1550 °C zu erreichen.

Durch die Reinheit des Erdgases und die Gleichmäßigkeit der chemischen Zusammensetzung ist die Feuerung von der meß- und regeltechnischen Seite sehr einfach zu überwachen.

Ein wesentlicher Vorteil ergab sich durch die Einführung des Erdgases auf dem Personalsektor. Während zur Erzeugung des Generatorgases 25 Arbeitskräfte benötigt wurden, ist jetzt ein Mann, der zur Revision der Erdgasanlage eingesetzt ist, ausreichend. (45892)

DK 662.767:662.764.3:662.753:662.951.2:666.1.031.24:662.61

Einsatz des Erdgases in der Glasindustrie

Von Martinus H. de Lange, Eindhoven (Holland)

(Mitteilung aus den N. V. Philips' Gloeilampenfabrieken, Eindhoven (Holland))

(Eingegangen am 26. März 1967)

Im ersten Teil wird über den Austausch von Koksofengas durch Erdgas in einem Glaswerk für Spezialglas berichtet, und es werden die spezifischen Eigenschaften der beiden Gase einander gegenübergestellt. Die Hauptprobleme liegen in der besonderen Form der Gasdüsen mit Flammenhalter, die infolge der niedrigen Verbrennungsgeschwindigkeit des Erdgases nötig sind. Die technischen Probleme beim Austausch von Heizöl durch Erdgas für die Glasschmelze werden im zweiten Teil kurz erwähnt und rechnerisch auf der Basis der verbrennungstechnischen Kennwerte der unterschiedlichen Brennstoffe verfolgt. Die praktischen Erfahrungen mit einer querbeheizten Regenerativwanne und mit einer U-Flammenwanne stehen in gutem Einklang mit den theoretischen Überlegungen.

In den Glashütten der Philips AG wurden bis vor einigen Jahren hauptsächlich zwei Arten von Brennstoffen verwendet: Koksofengas zur Beheizung von Kühlöfen, Speiservorherden, Tageswannen und vielen Arten von Anlagen zur Weiterverarbeitung der Glasprodukte und mittelschweres Heizöl zur Beheizung von größeren Rekuperativ- und Regenerativglasschmelzwannen.

Bei der Einführung des Erdgases als Ersatz für das Koksofengas ergab sich sofort das Problem, die nötigen Brenner und Verbrennungssysteme zu konstruieren. Gleichzeitig wurde die Frage gestellt, ob es vorteilhaft sei, auch das Heizöl für die Glasschmelze durch Erdgas zu ersetzen. Technisch bereitet die Umstellung keine größeren Schwierigkeiten. Die Beheizung mit Erdgas ist ist allerdings nur dann wirtschaftlich sinnvoll, wenn der Wärmepreis des Erdgases niedriger ist als der des Öls. Im folgenden wird nur von den technischen Problemen die Rede sein.

Wie bekannt, unterscheiden sich die verbrennungstechnischen Eigenschaften des Erdgases sehr stark von denen des Koksofengases und des Heizöles, was bei der Umstellung im Hinblick auf die Brennerausbildung, Flammenentwicklung usw. berücksichtigt werden muß.

1. Austausch des Koksofengases durch Erdgas

1.1. Eigenschaften

In Tabelle 1 sind die Eigenschaften der beiden Gase eingetragen. Das verwendete Koksofengas wurde in den Bergwerken von Süd-Limburg (Holland) erzeugt; das Erdgas stammt aus dem Vorkommen von Slochteren. Wie aus Tabelle 1 zu ersehen ist, gibt es wesentliche Unterschiede in der Analyse der beiden Gase, und zwar enthält Erdgas relativ viel Stickstoff aber keinen Wasserstoff. Diese Unterschiede wirken sich auf die Brennereigenschaften des Erdgases so aus, daß Dichte, Heizwerte und Luftbedarf pro 1000 kcal (bezogen auf H_u) höher sind, die Verbrennungsgeschwindigkeit dagegen niedriger.

1.2. Anwendung

Bei der Verbrennung muß besonders in eng begrenzten, kleinen Feuerräumen (Speiser, Vorherde, Kleinöfen) der niedrigeren Verbrennungsgeschwindigkeit des Erdgases Rechnung getragen werden, da die benötigte Brennstrecke im Vergleich zu Koksofengas entsprechend länger sein muß und die Gefahr des unvollständigen Ausbrandes im Feuerraum mit möglicherweise reduzierender Ofenatmosphäre entsteht. Auch der etwas größere Luftbedarf des Erdgases wirkt sich in dieser Richtung aus. Im allgemeinen kommt man damit aus, daß man das Erdgas durch mehr Düsen in den Feuerraum einführt, als es bei Koksofengas nötig ist. Dabei wird die Berührungsfläche zwischen Gas und Verbrennungsluft relativ größer und die Verbrennung läuft schneller ab.

Wegen der größeren Gefahr des Abhebens der Flamme muß für Brenner, die mit einem Gemisch aus Gas und Luft gespeist werden, die Austrittsgeschwindigkeit im Vergleich zu Koksofengas niedriger gewählt werden. Auch in dieser Hinsicht ist es zweckmäßig, das Gemisch auf eine größere Anzahl Düsen zu verteilen.

Bei Brennern für die Glasverarbeitungsmaschinen prägt sich die niedrigere Verbrennungsgeschwindigkeit

Tabelle 1. Eigenschaften von Koksofengas und Erdgas.

Chemische Zusammensetzung in Vol.-%	Koksofengas	Erdgas
H_2	63,1	—
CO	4,8	—
CH_4	25,6	81,3
C_2H_6	—	2,75
C_3H_8	—	0,36
C_4H_{10}	—	0,13
C_mH_n	1,8	0,05
O_2	0,3	—
CO_2	1,1	0,90
N_2	3,3	14,5
Physikalische Daten	**Koksofengas**	**Erdgas**
Dichte (Luft = 1)	0,31	0,64
H_o in kcal/Nm³	4580	7910
H_u in kcal/Nm³	4060	7160
Luftbedarf in Nm³/Nm³	4,340	8,364
Luftbedarf in Nm³/1000 kcal	1,068	1,164
Verbrennungsgeschwindigkeit in cm/s	75	30

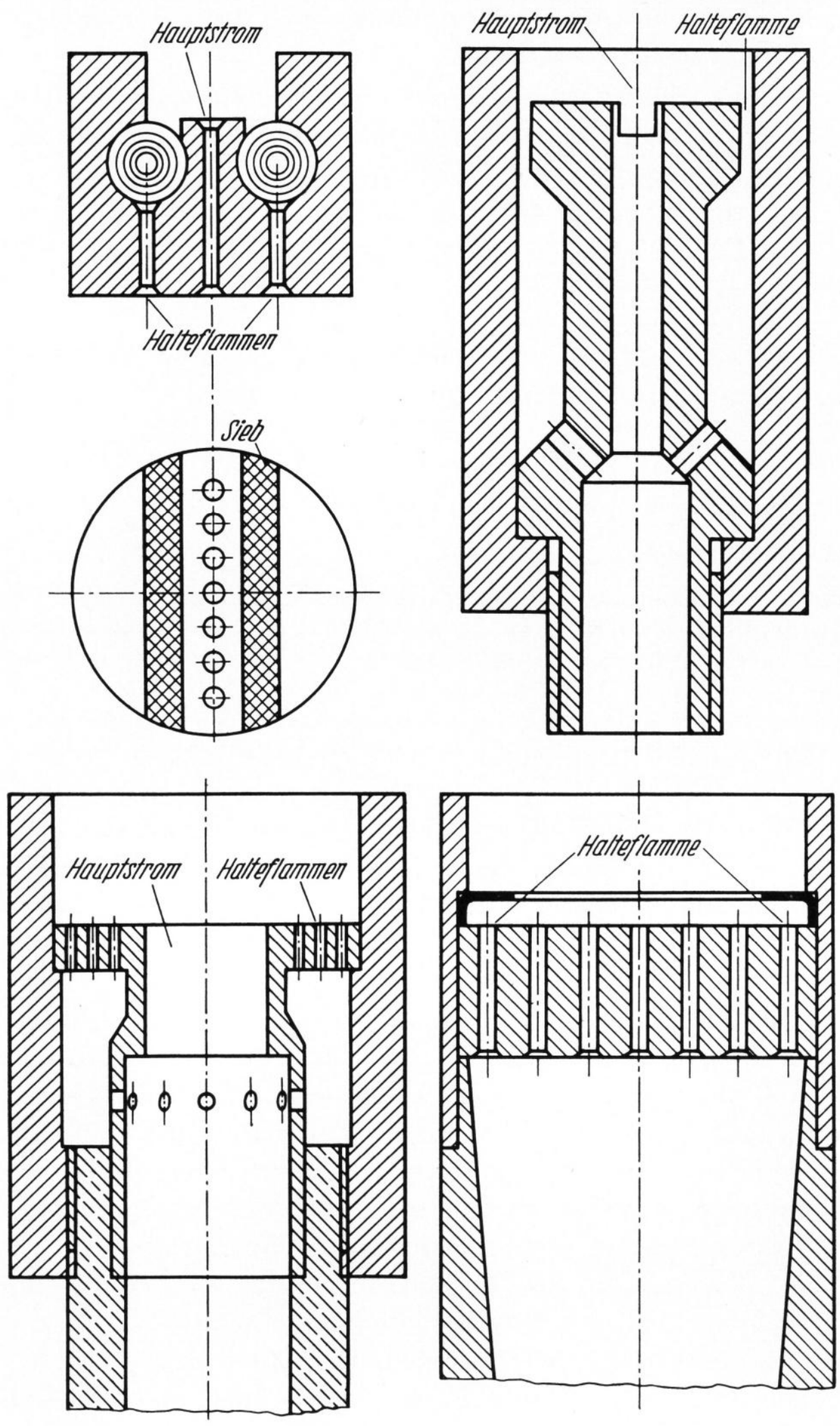

Bild 1. Verschiedene Brenner mit Halteflamme für Erdgas-Luft-Gemisch.

des Erdgases besonders aus. Diesen Brennern wird meistens ein mittels Treibdüsen erzeugtes Gemisch aus Gas und Luft zugeführt. Manchmal wird die Luft teilweise oder völlig durch Sauerstoff ersetzt. Die Flammen brennen mit dem Bunsenkegel. Mit diesen Brennern soll eine räumlich scharf begrenzte Stelle des Glasgegenstandes erhitzt werden, was mit einer relativ hohen Austrittsgeschwindigkeit des Gas-Luft-Gemisches aus den Brennerdüsen zu erreichen ist.

Wegen der relativ niedrigen Verbrennungsgeschwindigkeit des Erdgas-Luft-Gemisches haben die Flammen starke Neigung zum Abheben von den Austrittsdüsen. Es ist deshalb notwendig, spezielle Brenner für Erdgas zu bauen. Alle Konstruktionen zielen darauf hin, daß ein Teil des Gas-Luft-Gemisches vom Hauptstrom abgezweigt wird und mit geringerer Geschwindigkeit als der des Hauptstroms aus dem Brenner austritt. Durch die geringe Geschwindigkeit brennt dieser Teil des Gemisches als stabile Flamme auf dem Brenner und heizt den Hauptstrom des Gemisches auf, wodurch die Verbrennungsgeschwindigkeit des Hauptstromes steigt. Prinzipiell hat man es bei all diesen Brennerkonstruktionen um Brenner mit Halteflammen zu tun. In Bild 1 sind einige solcher Brennerkonstruktionen dargestellt.

Wegen der geringeren Verbrennungsgeschwindigkeit des Erdgases besteht neben der Gefahr des Abhebens das Problem, daß die erzeugte Wärmeenergie pro Flächeneinheit der Flammenkegelfläche geringer ist als bei Koksofengas. An besonders kritischen Stellen ist es manchmal nötig, die Verbrennungsgeschwindigkeit des Gemisches durch Zugabe von Sauerstoff zu erhöhen. Da es bei Verschmelzbrennern oder anderen Weiterverarbeitungsanlagen darauf ankommt, an bestimmten Stellen große Wärme zur Verfügung zu haben, kann man sich helfen, indem man mehrere Flammen auf den Glasgegenstand richtet.

2. Austausch des Heizöls durch Erdgas

Bei der Umstellung von Heizöl auf Erdgas wird man bestrebt sein, die Schmelzleistung der Wanne nicht zu ändern. Das bedeutet, daß die pro Zeiteinheit übertragene Energiemenge sich gleichfalls nicht ändern darf. Hierzu einige theoretische Überlegungen: Bei der Energie-Übertragung spielen zwei Mechanismen eine Rolle, die Energieentwicklung bei der Verbrennung und die Übertragung dieser Energie auf das Glasbad. Beide Mechanismen sind für Erdgas und Heizöl verschieden.

2.1. Verbrennungsvorgang

Die chemischen Vorgänge laufen bei der Verbrennung viel schneller ab als die physikalischen (d. h. die Mischung von Brennstoff mit Verbrennungsluft). Der Ausbrandverlauf und damit die Länge der Verbrennungsstrecke wird wesentlich von den Mischungsverhältnissen bestimmt. Bei der Ölverbrennung wird die Mischung dadurch erreicht, daß die Öltröpfchen infolge Zerstäubung einen Impuls erhalten (Geschwindigkeit etwa 100 bis 300 m/s) und durch diesen in die Verbrennungsluft gelangen, so daß die Verbrennung stattfinden kann. Bei der Verbrennung von Gasen liegen die Verhältnisse wesentlich anders, da der Brennstoff nicht in Form von Tröpfchen in den Ofenraum gelangt, sondern als geschlossener Freistrahl aus einer Düse austritt. Die Mischung von Gas und Luft hängt von der relativen Geschwindigkeit des Gases gegenüber der Luft und von der Größe der Berührungsfläche beider ab.

Diese Betrachtung führt zu zwei Möglichkeiten, die Verbrennung einer gegebenen Gasmenge pro Zeiteinheit innerhalb gegebener Raumverhältnisse ablaufen zu lassen: Die Mischung kann auf der einen Seite durch die relative Geschwindigkeit — in der Praxis ist bei Glasschmelzwannen hauptsächlich die Gasgeschwindigkeit zu beeinflussen, leicht sind Austrittsgeschwindigkeiten bis 300 m/s zu erreichen —, auf der anderen Seite durch die Anzahl der Brenner, d. h. durch die Größe der Berührungsfläche zwischen Gas und Luft, beeinflußt werden.

2.2. Wärmeübertragung

Bei den in Glasschmelzwannen gegebenen Verhältnissen wird die bei der Verbrennung entwickelte Wärmeenergie teilweise durch Strahlung und teilweise durch Konvektion (Berührung) auf das Glasbad übertragen, wobei in Hochtemperaturprozessen — und zu diesen muß die Glasschmelze gezählt werden — der größte Teil der Wärme durch Strahlung übertragen wird. Bei der Verbrennung von zerstäubtem Heizöl in einer Glasschmelzwanne wird ein Teil der Öltröpfchen unter Luftmangel aufgeheizt. Dabei entstehen durch Crackprozesse starke kohlenstoffhaltige Festkörper, die infolge

ihrer hohen Temperatur intensiv über einen breiten Wellenlängenbereich strahlen. Wegen des geringeren Gehaltes an schweren Kohlenwasserstoffen muß man erwarten, daß die Wärmeübertragung durch Strahlung bei Verbrennung von Erdgas relativ niedrig ist. Das bedeutet, daß beim Erdgas auch die direkte Wärmeabgabe im Ofenraum niedriger ist, was besonders bei Wannen ins Gewicht fällt, in denen der Flammenweg relativ kurz ist und dadurch die konvektive Wärmeabgabe beschränkt wird. In dieser Hinsicht sind U-Flammenwannen für Erdgasbeheizung günstiger als relativ schmale Querbrennerwannen.

2.3. Luftbedarf und Rauchgasmenge

In Tabelle 2 sind die Analysen von holländischem und französischem Erdgas angegeben. Wie schon erwähnt, enthalten beide Gase relativ wenig schwere Kohlenwasserstoffe. Gegenüber dem französischen Gas von Lacq hat das holländische Gas den Nachteil, 15,4% unbrennbare Bestandteile aufzuweisen. Demzufolge ist der Heizwert des holländischen Gases relativ niedrig. Außerdem müssen die inerten Gase als Ballast bei der Verbrennung mitgeschleppt werden.

In Tabelle 3 sind die verbrennungstechnischen Kennwerte der beiden erwähnten Gase und die des Heizöles angegeben. Um Unterschiede der Heizwerte beim Vergleich der Brennstoffe auszuschalten, sind die Luft- und Rauchgasmengen auf 1000 kcal des jeweils unteren Heizwertes bezogen. Aus der Tabelle geht hervor, daß das holländische Erdgas 2,4% mehr Verbrennungsluft erfordert als Heizöl und daß 7,4% mehr Rauchgase entstehen. Für das Gas von Lacq braucht man 2,3% weniger Luft, und es entsteht 1,0% mehr Rauchgas. Wenn die Abgastemperaturen beim Erdgas die gleichen wären wie beim Heizöl, dann müßte man aus rein rechnerischen Gründen erwarten, daß die Abgasverluste beim Erdgas höher sind als beim Heizöl. Dieser Unterschied wird noch größer, wenn man in Betracht zieht, daß die direkte Wärmeabgabe im Ofenraum beim Erdgas niedriger ist als beim Heizöl. Für praktische Verhältnisse läßt sich dieser Einfluß nicht berechnen, weil zahlenmäßige Unterlagen nicht zur Verfügung stehen.

Tabelle 2. Vergleich der Zusammensetzungen des holländischen und französischen Erdgases

Analyse i. Vol.-%	Erdgas (holl.)	Erdgas (franz.)
CH_4	81,3	95,9
C_2H_6	2,75	3,7
C_3H_8	0,36	—
C_4H_{10}	0,13	—
C_mH_n	0,05	—
CO_2	0,90	—
N_2	14,5	0,4

Tabelle 3. Verbrennungskennwerte des holländischen und französischen Gases sowie des Heizöls

Verbrennungskennwerte	Erdgas (holl.)	Erdgas (Lacq)	Heizöl
H_o in kcal/Nm³ bzw. /kg	7910	9750	10400
H_u in kcal/Nm³ bzw. /kg	7160	8800	9730
Luftbedarf in Nm³/Nm³ bzw. /kg	8,364	9,740	11,05
Luftbedarf in Nm³/1000 kcal H_u	1,164	1,110	1,136
Rauchgas in Nm³/Nm³ bzw. /kg	9,367	10,767	11,75
Rauchgas in Nm³/1000 kcal H_u	1,305	1,221	1,209

Man muß also erwarten, daß beim Erdgas der Wärmeinhalt der Abgase beim Verlassen des Ofenraumes höher ist als beim Öl, und zwar um so mehr, je größer das Abgasvolumen und je ungünstiger die Möglichkeiten der konvektiven Wärmeabgabe sind. Der Wärmeinhalt der Abgase wird — teilweise in Form vorgewärmter Verbrennungsluft — mit einem Wärmeaustauscher wieder in den Ofenraum eingeführt. In den Bildern 2 und 3 sind die oben erwähnten Verhältnisse zahlenmäßig veranschaulicht. In Bild 2 sind schematisch zwei Fälle aufgeführt, bei denen 1000 kcal durch Heizöl bzw. Erdgas (holländisch) in den Ofenraum eingebracht werden. Angenommen sei, daß im Wärmeaustauscher jeweils 60% der Abgaswärme auf die Verbrennungsluft übertragen werden, die auf diese Weise zusätzlich in den Ofenraum kommt. Weiterhin wird angenommen, daß die Abgastemperatur im Fall des Erdgases 100 grd höher liegt als beim Heizöl — die angegebenen Zahlenwerte entsprechen etwa den Verhältnissen in einer quer beheizten Wanne.

Man erkennt in Bild 2, daß bei Erdgasbeheizung im Ofenraum 40 kcal weniger frei werden, als bei Ölbeheizung; auf 740 kcal der bei Ölbeheizung verfügbaren Wärme im Oberofen für die Schmelze und zur Deckung der Verluste bezogen sind das 5,4% weniger.

In Bild 3 sind die Verhältnisse dargestellt, wie sie in etwa bei einer U-Flammenwanne vorliegen, die mit Heizöl bzw. Gas von Lacq beheizt wird. Auch in diesem Falle entsprechen die gegebenen Zahlenwerte den prak-

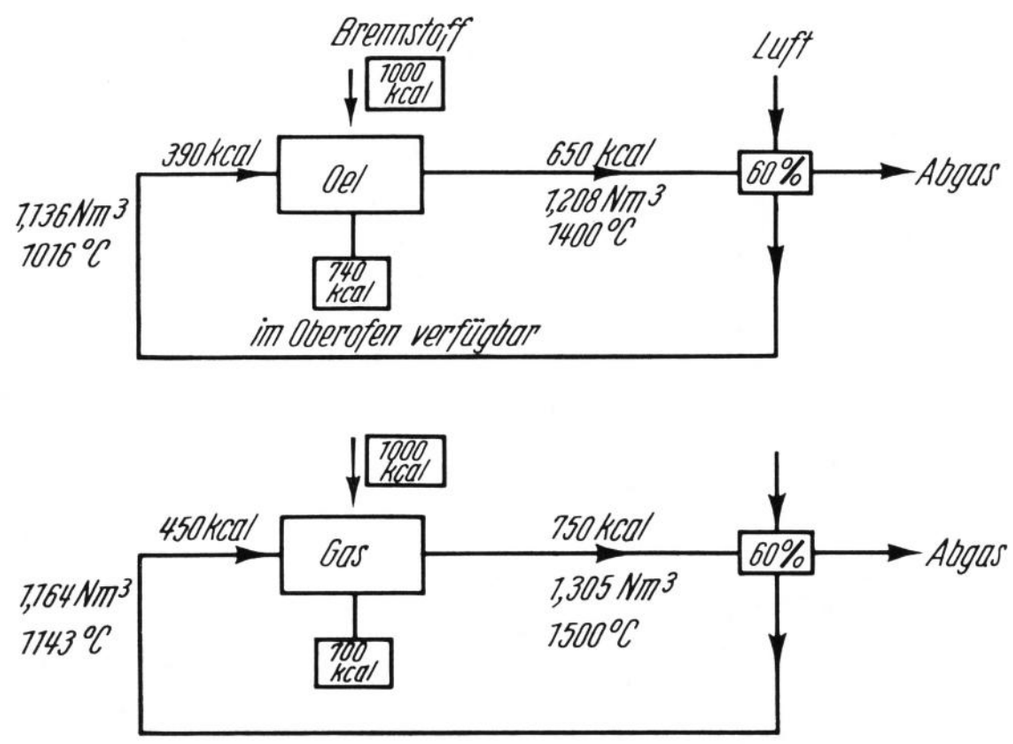

Bild 2. Vereinfachte Wärmebilanz für Öl- und Erdgasbeheizung, bezogen auf 1000 kcal zugeführte Wärme einer Querbrennerwanne.

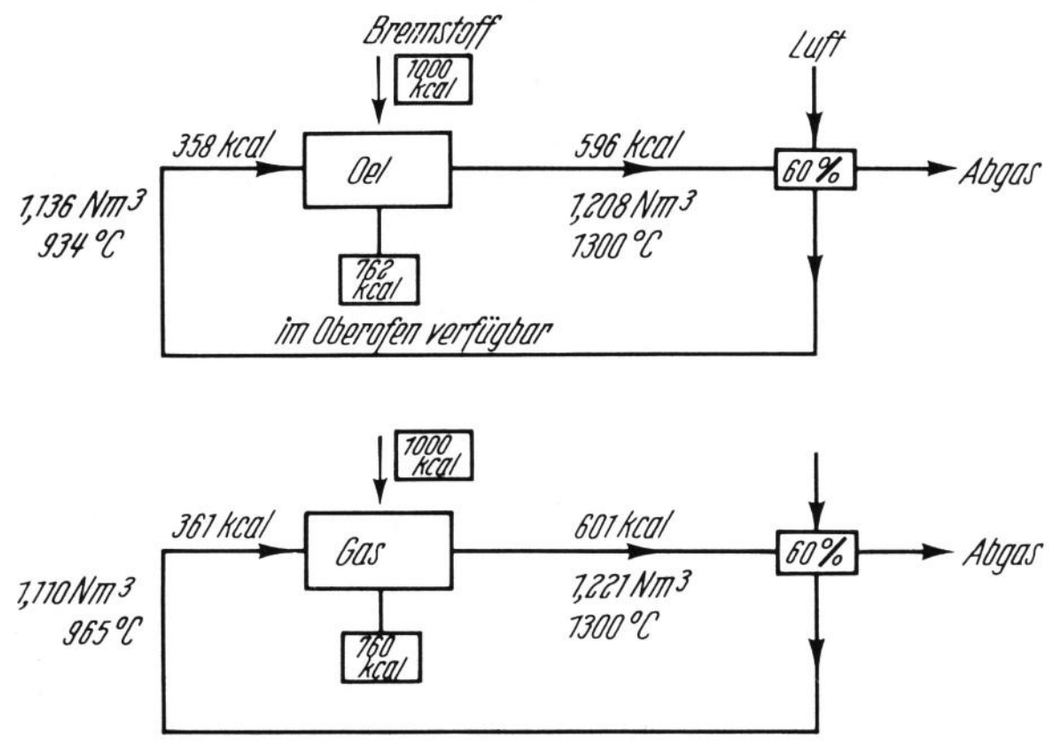

Bild 3. Vereinfachte Wärmebilanz für Öl- und Erdgasbeheizung, bezogen auf 1000 kcal zugeführte Wärme einer U-Flammenwanne.

tischen Erfahrungen. Wegen der verfügbaren größeren Brennstrecke in diesem Ofen sind die Abgastemperaturen in beiden Fällen praktisch gleich hoch. Weil auch die Abgasvolumina kleine Unterschiede aufweisen — es handelt sich in diesem Falle um französisches Erdgas mit höherem Heizwert als holländisches Gas — werden im Oberofen etwa die gleichen Wärmemengen frei.

2.4. Bisherige praktische Erfahrungen

2.4.1. Querbeheizte Regenerativwanne

Erfahrungen konnten mit einer Querbrennerwanne mit einer beheizten Fläche von 36 m² gesammelt werden. Die Beheizung erfolgt durch drei Brennerpaare. Bei der Umstellung von Heizöl auf holländisches Erdgas wurden in jeden Brennerhals seitlich zwei Erdgasdüsen eingesetzt.

Bei den ersten Versuchen wählte man eine Austrittsgeschwindigkeit von 60 m/s. Dabei stellte sich heraus, daß die Ausbrandstrecke der Flammen viel zu lang war; sie brannten erst in den Kammern aus, und die Kammertemperaturen stiegen dementsprechend an.

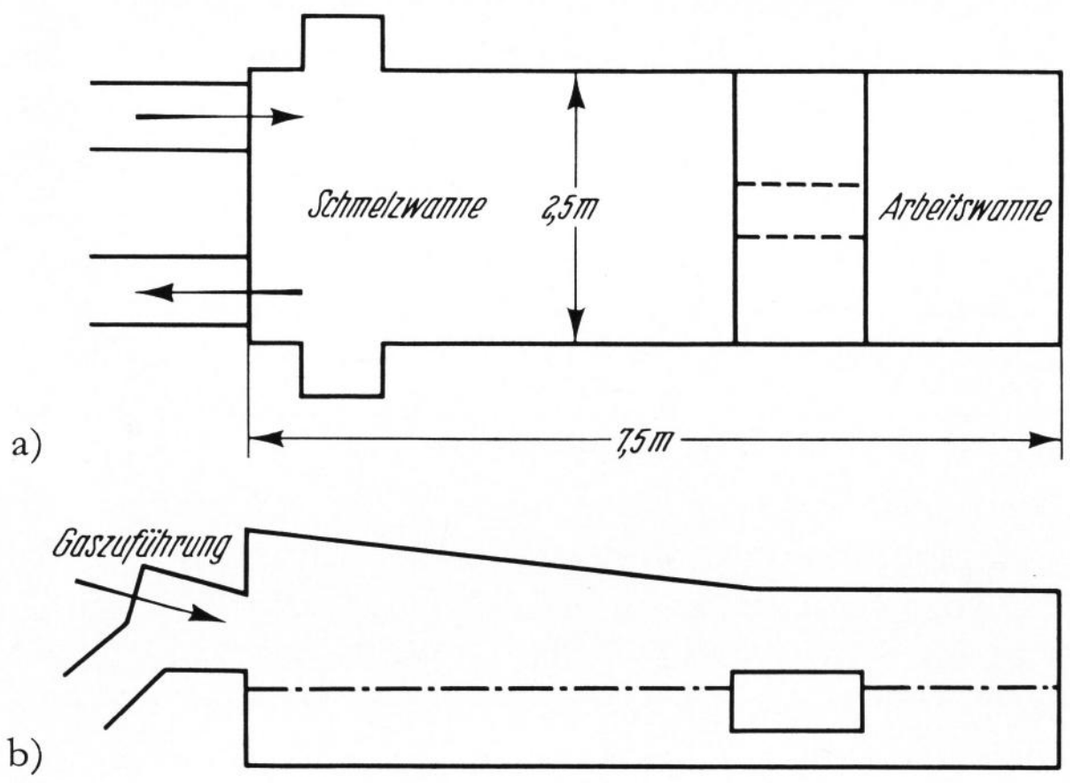

Bild 4. a) Grund- und b) Seitenriß einer U-Flammenwanne.

Darauf wurde die Gasgeschwindigkeit erhöht auf 200 m/s, wobei die Flammen im Ofenraum einwandfrei ausbrannten. Nach einigen Wochen stellte man fest, daß der Energieverbrauch um 8% höher war als bei Heizöl, daß die Kammertemperaturen am heißen Ende in der Gasperiode 100 grd und in der Luftperiode etwa 80 grd höher lagen (die wahren Luft- und Gastemperaturen wurden nicht gemessen) und daß ein Einfluß auf den Schmelzvorgang nicht nachweisbar war (wobei allerdings zu berücksichtigen ist, daß die Wanne nicht sehr hoch belastet war). Nach einer Versuchsperiode von 5 Monaten mußte wegen der zu hohen Kammertemperaturen wieder auf Heizöl zurückgegangen werden; das feuerfeste Material der Kammern war den hohen Temperaturen nicht gewachsen.

2.4.2. U-Flammenwanne (regenerativ)

Außer der Querbrennerwanne wurde eine U-Flammenwanne (Bild 4) mit einer beheizten Fläche von 17 m² von Heizöl auf französisches Erdgas (Gas von Lacq) umgestellt, in dem an Stelle der zwei Ölzerstäuber Gasdüsen eingesetzt wurden. Nach einigen Experimenten mit der Flammenlänge wurde eine Gasaustrittsgeschwindigkeit von 60 m/s gewählt. Die Umstellung und die Versuche wurden während des vollen Betriebes der Wanne durchgeführt und haben in keiner Weise den Schmelzvorgang gestört, obwohl die Wanne sehr hoch belastet war. Aus Temperaturmessungen ging hervor, daß sich die Lage des Temperaturmaximums etwas weiter entlang des Flammenweges in den Ofenraum verschoben hatte, als man es von der Ölheizung kannte. Kalorisch gerechnet ist der Energieverbrauch praktisch unverändert geblieben, was im Einklang mit den bereits erwähnten Überlegungen steht.

2.4.3. Vergleich der Ergebnisse beider Wannen

Bei beiden Wannen wurde festgestellt, daß bei Erdgasbeheizung die Temperaturverhältnisse in der Wanne sich von denen bei Ölbeheizung unterscheiden. Das ist auf Grund der verschiedenen Mechanismen der Wärmeübertragung verständlich und bedeutet, daß bei der Umstellung von Heizöl auf Erdgas die Feuerführung der Wannen überprüft und die richtige Einstellung gesucht werden muß. Um mit Erdgas eine technisch einwandfreie Beheizung zu erzielen, müssen intensive Langzeit-Versuche unternommen werden. (45841)

DK 662.767:662.959.63:621.54:662.611.3:662.612.3:66.075:666.1.031.2-623.1

Erdgasdüsen mit Druckluftzusatz zur Beheizung von Glasschmelzwannen

Von Helmut Michels, Benthe

(Vortrag auf dem HVG-Kolloquium am 23. November 1966 in Essen)

(Eingegangen am 13. Juni 1967)

Bei dem hohen Temperaturniveau der Glasschmelze spielen für den Wärmeübergang von der Flamme an das Glasbad die Strahlungseigenschaften der Flamme eine bedeutende Rolle. In dieser Hinsicht stehen die methanreichen Erdgase den Heizölen gegenüber stark zurück. Allerdings kann durch Eigenkarburierung die Strahlungsintensität der Erdgasflammen erhöht werden. Dabei hat sich Druckluftzusatz gut bewährt und ermöglicht es, straffere und kürzere Flammen zu erhalten, wobei die Gaslanzen in Unterbankanordnung installiert werden. Bei umgestellten Wannen kann bei geringfügig erhöhtem Wärmeaufwand die Produktionsleistung wie bei Ölbeheizung erreicht werden.

Nach Kohle und Erdöl ist das Erdgas mit 13% Anteil der drittgrößte Energieträger des Weltenergiebedarfes. Mit dem Bau großer, leistungsfähiger und im Verbund stehender Erdgasleitungen kommt dieser hochwertige Brennstoff dicht vor die Tür zahlreicher Industrieunternehmen. Die Frage ist daher aktuell, ob es praktisch, zweckmäßig und ökonomisch richtig ist, auf den Brennstoff Erdgas umzustellen.

1. Verbrennungstechnisch wichtige Eigenschaften des Erdgases

Erdgas in der Form wie es dem Verbraucher dargeboten wird, besteht in der Hauptsache aus Methan (CH_4), enthält jedoch je nach Fundort und Vorbehandlung noch schwere Kohlenwasserstoffe, Stickstoff und Kohlendioxid in unterschiedlicher Höhe. Es ist geruchsfrei und — da Kohlenmonoxid fehlt — ungiftig. Meistens wird