

August 1949

H V G Mitteilung Nr. 517

Zur Berechnung des Wandverlustes an Industrieöfen

Die Wandverluste der Industrieöfen, d.i. die durch "Leitung und Strahlung" der Wände abgegebene Wärmemenge, machen bekanntlich einen Hauptanteil ihres Wärmeaufwandes aus. Der Wunsch liegt deshalb nahe, diese Verluste rechnerisch zu erfassen, zumal nur aus einer genauen Kenntnis der Einzelverluste Verbesserungen hergeleitet werden können. Hinweise und Anhaltswerte zur Bestimmung der Wandverluste sind gegeben, z.B. in den "Glastechnischen Berichten" 22 (1948/49) Heft 3/4 (vgl. Anlage zu HVG-Mitteilung Nr. 506). Die dort genannten Zahlen sind Erfahrungswerte, die unter durchschnittlichen Betriebsverhältnissen gute Mittelwerte ergeben.

Im folgenden soll gezeigt werden, welche Einflüsse den Vorgang des Wärmeflusses durch Ofenwände stören können, welche Unsicherheiten dadurch eintreten und welche Folgerungen man hieraus für die Berechnung zu ziehen hat.

Wenn, wie im Ofenbau üblich, Aussen- und Innentemperatur einer Wand bekannt sind, kann man die Wandverluste nach den bekannten Gleichungen der Wärmeleitung berechnen. Ausserdem besteht eine zweite Rechnungsmöglichkeit aus der Aussentemperatur allein nach der Gleichung des Wärmeübergangs. Beide Rechnungen müssen theoretisch den gleichen Wert für die als Wandverlust abgeführten Wärmemengen ergeben, denn durch die Wand wird ebenso viel Wärme geleitet, als an der Aussenseite an die Umgebung übertragen wird. Nach diesem Gleichgewicht zwischen Wärmeleitung durch die Ofenwand und Wärmeübertragung an die Umgebung stellt sich im Betrieb die Aussentemperatur des Ofens ein.

Erfahrungsgemäss ergeben beide Rechnungen oft nicht den gleichen Wert bzw. die gemessene Aussentemperatur weicht öfter von den errechneten ab. Die Gründe hierfür sind mannigfacher Art.

1. Wärmeleitung

In der Formel zur Berechnung der Wärmeleitung sind ausser der Innen- und Aussentemperatur auch die Wärmeleitfähigkeit und die Wanddicke enthalten. Im Neuzustand des Ofens, für den man derartige Rechnungen anzustellen pflegt, ist die Wanddicke bekannt. Nimmt im Betrieb die

Dicke der Steine ab, so wird der Wandverlust grösser. Um die grössere durch die Wand fliessende Wärmemenge an die Umgebung abzuführen, reicht der ursprüngliche Wärmeübergang an der Aussenseite nicht aus. Die Aussentemperatur der Wand steigt deshalb so lange, bis sich ein neues Gleichgewicht zwischen Wärmeleitung im Stein und Wärmeübertragung an der Aussenseite eingestellt hat. Da im Ofenbetrieb die Wanddicke laufend abnimmt, steigt auch die Aussentemperatur stetig

Die Wärmeleitzahl kennt man lediglich für die einzelnen Steintypen. Sie schwankt von Lieferung zu Lieferung und von Hersteller zu Hersteller in Bereichen bis  $\pm 10\%$  und bringt damit eine entsprechende Ungenauigkeit in die Berechnung. Die Bestimmung der Wärmeleitzahl für einzelne Steinlieferungen wird wegen zu hohem Aufwandes kaum je durchgeführt.

Als weitere Erschwerung kommt hinzu, dass die Wärmeleitzahl temperaturabhängig ist. Man setzt sie deshalb in die Rechnung für die zu erwartende Mitteltemperatur der Wand ein, nimmt also eine lineare Temperaturabhängigkeit an. Da diese Annahme mit geringen Fehlern zutrifft, entstehen für diese Art der Berechnung keine grossen Ungenauigkeiten.

Die Gasdurchlässigkeit der Steine bringt ebenfalls eine gewisse Unsicherheit mit sich, denn durch den Ueberdruck im Ofenraum, besonders unter der Kappe, strömt eine gewisse Rauchgasmenge durch die Poren der Steine und führt ihre Wärme auf diesem Weg zusätzlich ab. Man kann diesen Verlust für Glasschmelzöfen vernachlässigen, weil die Steine nach kurzer Betriebsdauer glasiert sind, so dass der Gasdurchtritt verhindert wird. Die Verluste durch Fugen und Risse im Mauerwerk sind nicht als Wandverluste, sondern als Ausflammverluste zu betrachten.

## 2. Wärmeübertragung

Die Wärmeabgabe an der Aussenseite der Wände setzt sich aus Strahlungs- und Konvektionsanteil zusammen. Für beide bestehen Erfahrungswerte, die in Form von Gesamt-Wärmeübergangszahlen bekannt sind. Sie beruhen meist auf der Berechnung einer freien Abstrahlung in den Luftraum mit Strahlungswerten von etwa 0,8 und für die Konvektion auf der Annahme ebener senkrechter Wände in ruhender Luft. Es wird also vorausgesetzt, dass sich die Konvektionsströmung frei entfalten kann und nicht durch Zugluft gestört wird.

Beim Glasschmelzofen sind diese Voraussetzungen nur in beschränktem Umfange erfüllt. Die Wandteile, welche hinter Brenner-

schächten, im Winkel der Vorbauten usw. liegen, können nicht in den freien Raum abstrahlen. Es liegt ihnen ganz oder teilweise eine ebenfalls heisse Fläche gegenüber, so dass weit weniger Wärme durch Strahlung abgegeben werden kann als dies bei freier Lage der Flächen der Fall wäre. Die Folge ist, dass sich die betreffenden Wandteile an der Aussenseite stärker erwärmen als freiliegende, so lange, bis auch hier ein Gleichgewicht zwischen Wärmezufuhr durch die Wand und Wärmeabgabe an der Aussenseite eingestellt ist. Wenn man bei Einstellung dieses Gleichgewichtes zu unzulässig hohen Aussentemperaturen kommt, muss künstliche Kühlung den Konvektionsanteil des Wärmeübergangs steigern und dafür sorgen, dass die Gleichgewichtstemperatur herabgesetzt wird.

Während die erwähnten Einflüsse die Abstrahlung vermindern, wird die Konvektion auf andere Weise gestört; der freie Konvektionsstrom steigt an der Aussenseite des Ofens senkrecht nach oben. Seine Geschwindigkeit wurde an Glasschmelzöfen mit maximal 1 m/sec gemessen. Es werden in diesem Strom Lufttemperaturen bis 200° gefunden. Die auf solchen Voraussetzungen beruhenden Konstanten für "ebene senkrechte Wände" werden unrichtig, sobald die Wände nicht mehr eben sind, z.B. wenn vorgebaute Halteeisen der Wannengebäude usw. die Strömung über längere Strecken von den Wänden abheben, an ihren eigenen Seitenflächen ebenfalls Wärme abgeben usw. Ganz unsicher werden die Wärmeübergangswerte, wenn Zugluft die Wärmeabgabe der Ofenwände verstärkt. Da die Windgeschwindigkeit von Punkt zu Punkt verschieden ist, lässt sich in solchen Fällen der Konvektionsverlust auch nach den Gesetzen des Wärmeübergangs in bewegter Luft nur schlecht bestimmen.

### 3. Einflüsse der Ecken und Kanten

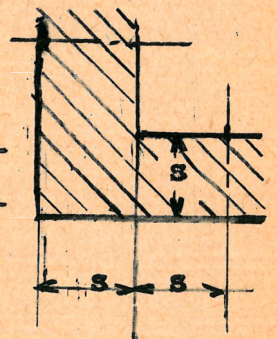
Die Berechnung der Wandverluste aus der Wärmeleitung der Steine setzt voraus, dass der Aussenfläche der Wand ein entsprechend grosses Stück der Innenfläche gegenüber liegt, so dass ein Wärmestrom nur senkrecht zur Wandfläche stattfindet. An Ecken und Kanten eines Ofens ist diese Voraussetzung nicht gegeben. Die Aussenfläche ist hier grösser als die Innenfläche, durch die Ecken und Kanten wird den in der Nähe liegenden Wandteilen der Innenseite zusätzlich Wärme entzogen. Dadurch herrscht in den Ecken eines einheitlich beheizten Ofenraumes die niedrigste Temperatur. Dieser Wärmeentzug wirkt sich bis zu einem gewissen Abstand von der Ofenkante oder Ecke aus. Ein Rechenverfahren für die Wandverluste von Ecken und Kanten hat H e i l i g e n s t a e d t

angegeben. Er betrachtet den Wandteil, auf den sich der Wärmeeintzug durch die zusätzlichen Aussenflächen der Ecken und Kanten erstreckt, gesondert von den übrigen Wänden und leitet auf diese Weise Faktoren ab, die eine Umrechnung vom Wandverlust durchgehender Wandflächen auf die Ecken und Kanten zulassen. Die entsprechenden Faktoren gehen aus nachstehender Tabelle hervor.

$\lambda/s$  = Quotient aus Wärmeleitfähigkeit und Wanddicke

$a_K, a_E$  = Umrechnungsfaktoren für den Wandverlust von Kanten und Ecken.

Ist  $q$  der Wandverlust eines ebenen Wandstückes in  $\text{kcal/m}^2\text{h}$ , so beträgt an den Kanten und Eckflächen der Wandverlust  $q_K = a_K \cdot q$  bzw.  $q_E = a_E \cdot q$ . Den Kanten und Eckflächen werden Teile der ebenen Wand zugerechnet in einer Breite, die der Wanddicke entspricht (vgl. Skizze). Zur Bestimmung von  $q_K$  und  $q_E$  ist die Aussenfläche zugrunde zu legen.



$\lambda/s$ ( $\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ )	10	5	2,5	2	1,25	1	0,5	0,25
$a_K$	0,795	0,772	0,753	0,748	0,740	0,738	0,731	0,726
$a_E$	0,603	0,570	0,543	0,537	0,526	0,523	0,514	0,508

#### 4. Folgerungen

Die Berechnung der Wandverluste kann nur dann zu befriedigenden Ergebnissen führen, wenn man die oben angegebenen störenden Einflüsse berücksichtigt. Insbesondere muss man sich darüber klar sein, dass in der Wärmeübergangsberechnung mehr und grössere Fehlermöglichkeiten liegen als in der Berechnung der Wärmeleitung.

Die sichersten Ergebnisse bringt die Berechnung der Wärmeleitung in der Wand für den Neuzustand des Ofens aufgrund gemessener Innen- und Aussentemperaturen. Die Innentemperatur kann man aus einer verhältnismässig kleinen Zahl von Messungen entnehmen, da die örtlichen Schwankungen sich in mässigen Grenzen halten. Die Aussentemperatur bestimmt man mit Anlegepyrometer an einer grösseren Zahl von Stellen. Sofern keine Messwerte oder Firmenangaben über die Wärmeleitfähigkeit der verwendeten Steine vorliegen, muss man sich mit Tabellenwerten begnügen, auf diese Weise kommen in erster Linie Unsicherheiten in den sonst zuverlässigen Rechnungsgang. Selbstverständlich müssen die Aussentemperaturen am neuen Ofen gemessen sein, wenn man mit der ursprünglich vorhandenen Steindicke rechnen will.

Die Nachrechnung des Wärmeübergangs führt mehr zu einer allgemeinen Orientierung über den Ablauf der Vorgänge als zu zuverlässigen Ergebnissen.