

GLASTECHNISCHE BERICHTE

herausgegeben von der
Deutschen Glastechnischen Gesellschaft
Frankfurt am Main

*
Sämtliche Veröffentlichungen sind Eigentum der D. G. G. — Alle Rechte vorbehalten (Copyright)

Band III

1925

Heft 4

5. Messung hoher Gastemperaturen zwecks richtiger Bemessung der Ofenelemente.

Von Ingenieur Fox Maule, Ingelstad i. Schweden.

Als ich vor etwa 10 Jahren meine Tätigkeit bei der Firma A. Hermansen begann, baute dieselbe schon lange rekuperative Oefen. Man hatte gelernt, wie große Querschnitte für Rauchgas und Luft nötig wären, um die Vorrichtung der gegebenen Brennstoffmenge anzupassen, aber für eine rationelle Berechnung der Heizfläche des Rekuperators hatte man keine Anhaltspunkte. Die Größe wurde meist nach rein praktischen Verhältnissen bemessen, bei Umbauten nach verfügbarem Platz, bei Neubauten nach erreichbarem Preise, jedoch so, daß die durch die Praxis gestützte Schätzung eine wichtige Rolle spielte.

Gerade bei meinem Eintritt lagen einige Temperaturbeobachtungen vor, welche zu der Annahme führten, daß selbst verhältnismäßig kleine Anlagen die Lufttemperatur ganz nahe zur Rauchgastemperatur zu steigern vermöchten. Zwei Pyrometer, das eine in den wärmsten Rauchgaskanal, das andere in den wärmsten Luftkanal eingesetzt, zeigten eine Temperaturdifferenz von nur 50 bis 100° C an. Man versuchte nun, die Rekuperatoren kleiner als üblich zu bauen, was jedoch zur Folge hatte, daß die Wirtschaftlichkeit des Ofens entsprechend herabging.

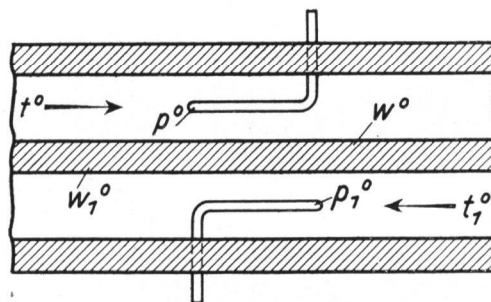


Bild 1.
Scheinbare und wahre Gastemperatur.

Mittels folgender Betrachtung gelang es uns, die Beobachtungen zu erklären. Wenn ein Pyrometer in einem Rohre (Bild 1) angebracht ist, dessen Wände eine Innentemperatur w haben, und das von einem Gasstrome mit der höheren Temperatur t durchströmt wird, so nimmt der Pyrometerkörper eine Temperatur p an, bei welcher der Wärmeübergang

durch Strahlung auf die Pyrometerwand dem Wärmeübergang durch Leitung von dem vorüberstreichenden Gas auf das Pyrometer das Gleichgewicht hält. Sind die entsprechenden Uebergangszahlen σ und β , so hat man:

$$(p - w) \cdot \sigma = (t - p) \cdot \beta \quad \text{und} \quad (w_1 - p_1) \cdot \sigma_1 = (p_1 - t_1) \cdot \beta$$

Beispiel: $5^\circ \cdot 330 = 220^\circ \cdot 7,5$ und Beispiel: $5^\circ \cdot 290 = 240^\circ \cdot 6,05$

Die Uebergangszahl σ steigt bekanntlich ungefähr mit der dritten Potenz der mittleren, absoluten Temperatur, und beträgt bei einer Temperaturhöhe von 1000°C etwa $330 \text{ WE/m}^2/\text{st}^\circ \text{C}$, während die Uebergangszahl β bei 5 bis $10 \text{ WE/m}^2/\text{st}^\circ \text{C}$ liegt. Hieraus folgt, daß eine ganz kleine Differenz zwischen Wand und Pyrometer, z. B. 5° , einer weit größeren Differenz zwischen Gas und Pyrometer, z. B. 220° , das Gleichgewicht hält. Möglich wäre daher eine Temperaturverteilung wie:

$$\begin{array}{lll} w = 1000^\circ, & p = 1005^\circ, & t = 1225^\circ \\ w_1 = 950^\circ, & p_1 = 945^\circ, & t_1 = 705^\circ \\ \text{Differenzen:} & 50^\circ & 60^\circ & 520^\circ \\ \text{Scheinbarer Umsetzungsgrad:} & p_1 : p = 94 \text{ v. H.} \\ \text{Wirklicher Umsetzungsgrad:} & t_1 : t = 58 \text{ v. H.} \end{array}$$

An der Luftseite hat man ganz analoge Verhältnisse, und kann die Verteilung hier etwa sein $w_1 = 950^\circ$, $p_1 = 945^\circ$, $t_1 = 705^\circ$, so daß man eine Differenz von nur 60° beobachtet, während die gesuchte Differenz 520° , das heißt, das 8 bis 9fache, beträgt. Der „Umsetzungsgrad“ des Rekuperators war nicht $945 : 1005 = 94 \text{ v. H.}$, sondern nur $705 : 1225 = \text{rd. } 58 \text{ v. H.}$

Um volle Klarheit zu gewinnen, war es notwendig, die wahren Gas-temperaturen t zu messen.

Durch rasches Absaugen des Gases mittels eines besonderen Rohres erreicht man eine erhebliche Steigerung der Uebergangszahl β , vielleicht bis auf 40 bis 50. Da die Uebergangszahl σ für Strahlung aber bis auf 900 bis 1000 steigen kann (Gitter der Martinöfen), ist diese Lösung, das damals übrigens nicht bekannte „Absaugepyrometer“ nur bei niedrigerer Temperatur einigermaßen zuverlässig.

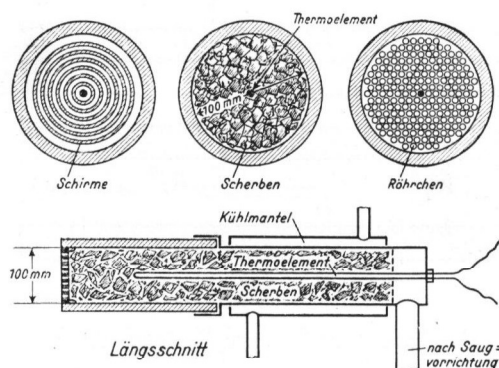


Bild 2.
Scherbenpyrometer.

Wir betraten rechnerisch den Weg der Schirme in Verbindung mit raschem Absaugen (Bild 2), und fanden, daß eine erhebliche Anzahl innen

und außen bespülter Schirme nötig war, um den Fehler bis auf 5 bis 10^o herabzusetzen. In der Praxis wurden die Schirme durch Scherben ersetzt, welche in ein Meßrohr von etwa 100 mm Durchmesser um das axial angeordnete Thermolement herum geschüttet waren. Das heiße Gas wurde durch die Schüttung hindurch mittels eines kräftigen Ventilators (nach der nötigen Kühlung) abgesaugt.

Unsere Anordnung stimmte also mit derjenigen der Oberflächenverbrennung überein. Wenn aber, wie dort, eine Verbrennung innerhalb des Gases vor sich geht, wird die Schüttung eine noch höhere Temperatur erhalten als die wahre Gastemperatur eines gewöhnlichen Feuerkanals, weil die einander suchenden Gasteilchen sich in den engen Räumen der Schüttung schneller finden als im Feuerkanal, und daher die Verbrennung am schnellsten in der Schüttung vor sich geht.

Dieser Umstand spielt ebenso bei den Winderhitzern der Oefen eine bedeutende Rolle. Wenn auch die hell leuchtende Flamme auf den Arbeitsraum beschränkt wird, kann eine erhebliche, schwach leuchtende Flamme sich weit in die Regenerativanlage hinein fortsetzen. Einerseits bewirkt diese Nachverbrennung, daß der Gasstrom seine Wärme teilweise durch Strahlung auf den Ziegel überträgt, wodurch die Uebergangszahl gesteigert wird, und andererseits wird in der Pyrometerschüttung eine Verbrennung vor sich gehen, welche die Anzeige über die wahre Gastemperatur hinaus steigert.

Da wir keinen Anhaltspunkt für die gegenseitigen Beziehungen dieser beiden Wirkungen hatten, wurde auf eine Temperaturbestimmung des eintretenden Rauchgases verzichtet, welche Bestimmung übrigens in vielen Fällen an der ungenügenden Haltbarkeit des Meßgerätes scheitern mußte. Aus praktischen Gründen wurde als Temperatur des eintretenden Rauchgases die innere Wandtemperatur des Ofens angenommen. Wir mußten daher die Uebertemperatur des Rauchgases, sowie die Strahlwirkung desselben, durch passende Korrekturen in Rechnung stellen. Mit dem Scherbenpyrometer wurden die Temperaturen der abziehenden Luft und des Rauchgases gemessen, während die Temperatur der eingehenden Luft durch ein gewöhnliches Thermometer ermittelt wurde.

Dank der vorzüglichen Arbeiten von Professor Nusselt hatten wir eine Grundlage für die Berechnung der Uebergangszahl β , und zwar den dimensionslosen Ausdruck:

$$\frac{\beta \cdot d}{\lambda} = 0,03622 \cdot \left(\frac{d}{l}\right)^{0,054} \cdot \left(\frac{d \cdot v \cdot q \cdot c}{\lambda}\right)^{0,786}$$

d = Kanaldurchmesser, l = Kanallänge
 λ = Leitvermögen, v = Geschwindigkeit } in beliebigen Einheiten
 q = Volumengewicht des Gases
 c = Spezifische Wärme des Gases
 λ , q und c auf Mitteltemperatur Gas-Wand bezogen.

Durch Einführen der auf 0^o C reduzierten Gasgeschwindigkeit, v_0 , und nach Berechnung der temperaturabhängigen Größen, kann der Ausdruck für zweiatomige Gase bei Atmosphärendruck, und in den gewöhnlichen Einheiten der Praxis, geschrieben werden:

$$\beta = 3,84 \cdot \left(\frac{1}{d}\right)^{0,16} \cdot \left(\frac{1}{l}\right)^{0,054} \cdot v_0^{0,786} \cdot \left(1 + \frac{t}{2040} - \left[\frac{t}{5000}\right]^2\right) \text{ WE/m}^2/\text{St}^{\circ}\text{C}$$

wo t die mittlere Temperatur Gas-Wand in Celsiusgraden angibt.

Die Temperaturfunktion kommt der vierten Wurzel der absoluten Temperatur, durch 273 dividiert, sehr nahe.

Es galt nun zu untersuchen, inwiefern dieser Ausdruck für die in Regenerativanlagen, besonders in unseren Rekuperatoren, üblichen Geschwindigkeiten und Temperaturen verwendbar war; Professor Nusselt's Ausdruck ist auf Versuche mit vielfach größeren Geschwindigkeiten und niedrigeren Temperaturen gegründet.

Bei Messungen an Rekuperatoren hat es sich nun gezeigt, daß die Wirkung etwas (15 bis 20 v. H.) größer war als berechnet. Dieses Ergebnis ist teilweise durch die Annahme einer zu niedrigen Temperatur des eintretenden Rauchgases zu erklären, und teilweise durch den Umstand, daß bei unserer Bauart der Luftweg mehrere Wendungen aufweist, wo nicht nur Wirbel entstehen, die an sich den Uebergang begünstigen, sondern auch eine Vergrößerung der Luftheizfläche stattfindet. Dieser Umstand ist durch den Faktor $l^{-0,054}$ nicht genügend berücksichtigt.

Die Uebereinstimmung war daher befriedigend, und durch geeignete Korrekturen war es möglich, genügend zuverlässige Gesamtübergangszahlen für Rohr-, Stunde- und Grad-Unterschied Rauchgas-Luft, zu berechnen, und hiernach den Rekuperator so zu bemessen, daß die erreichte wahre Lufttemperatur in eine gewünschte Beziehung zur Ofentemperatur kommt. Wir sind somit in der Lage, die Mehrkosten für die Vergrößerung des Rekuperators und die hierdurch erreichten Betriebsersparnisse rechnerisch zu vergleichen.

Unsere Messungen wurden auch auf Regenerativanlagen ausgedehnt. Einige Zahlen darüber dürften interessieren. Bei einem Martinofen fanden wir in runden Zahlen: Vorgewärmte Luft $1200 \pm 50^\circ \text{C}$, vorgewärmtes Gas $1100 \pm 50^\circ \text{C}$, und abziehendes Rauchgas, hinter den Umschaltungsventilen und etwa 10 m Essenkanal, 550 bis 600°C . Die Ziegeltemperatur des Luftgitters lag etwa 350°C über der Lufttemperatur, woraus wir mittels der oben gegebenen Formel, mit v_0 auf durchsichtbaren Querschnitt bezogen, eine Uebergangszahl $\beta = 4,33$ (Ziegel-Luft) berechneten, wogegen die tatsächlich übertragene Wärmemenge einen β -Wert von 6,0 bedingte. Das Fehlen der Uebereinstimmung dürfte hauptsächlich auf die zahlreichen Wirbelquellen zurückzuführen sein, so daß die Schichthöhe des Gitters mit einem erheblich größeren negativen Exponenten als $-0,054$ eingetragen werden muß, um eine Uebereinstimmung bei dieser Bauart herbeizuführen.

Mit den ermittelten Zahlen braucht man kaum auf die Annahme einer Strahlungsübertragung zu greifen, welche bei Erhitzung von Luft ziemlich unwahrscheinlich wäre. Während der Rauchgasperiode dagegen ist zweifellos, wie schon bei den Rekuperatoren erwähnt, eine erhebliche Strahlung tätig, als Folge der Schlußverbrennung.

Die früher übliche Annahme, daß die Luft bei Martinöfen bis auf 1500° erhitzt wird, führt zu Uebergangszahlen von 50 bis 60, welche für reine Bestreichungswirkung ausgeschlossen sein dürften.

Daß das Heizgas, trotz der größeren Abmessungen der Gaskammern im Vergleich mit den Luftkammern, nur um 800° , und zwar von 300 bis 1100° erwärmt wurde, dürfte auf die Spaltung des Wasserdampfes zurückgeführt werden müssen. Die Generatoren wurden teilweise mit Holz beschickt.

Die hier erwähnten Betrachtungen über wahre Gastemperaturen machen keinen Anspruch auf Neuheit. Nachdem wir im Jahre 1919 ähnliche

Bemerkungen in einer kleinen Broschüre veröffentlicht hatten, ist dieselbe Frage u. a. von Professor Knoblauch in seiner „Anleitung zu genauen technischen Temperaturmessungen“ (1919) behandelt worden. Wir haben jedoch den Eindruck, daß die Sachlage nur ausnahmsweise ins Bewußtsein der Wärmetechniker gelangt ist. Beispielsweise sieht man noch häufig Pyrometer derart im Rauchgasabzuge angeordnet, daß der Schornsteinverlust 25 v. H. oder mehr zu gering gemessen werden muß. Andere meinen, durch Schirme das Pyrometer gegen Strahlung schützen zu können. Wenn die Schirmanordnung aber nicht von raschem Absaugen begleitet wird, vermeidet man höchstens eine Vergrößerung des Meßfehlers.

Eben so wenig wie eine Neuheit der Betrachtungen, will ich die wissenschaftliche Durchführung der Messungen für mich in Anspruch nehmen. Unsere Aufgabe war, so schnell wie möglich eine Berechnungsgrundlage aufzustellen, die gestattete, unsere Luftheritzer mit 10 bis 15 v. H. Genauigkeit zu bemessen, aber nicht eine allgemeine wissenschaftliche Untersuchung zu unternehmen.

Die erforderlichen erheblichen Abmessungen unseres Meßgerätes machten es notwendig, die Messungen an großen Oefen durchzuführen, damit das Absaugen der erheblichen Gas- oder Luftmengen keinen zu großen Einfluß hatte. Der Betrieb reiner Versuchsöfen wurde deshalb sehr kostspielig, um so mehr, weil die Erreichung eines Beharrungszustandes mehrere Tage in Anspruch nahm. Auch kommen bei den Oefen im Betriebe immer erhebliche Schwankungen vor.

Unsere Ergebnisse bedürfen deshalb, um allgemeine Verwendung finden zu können, einer weiteren, wissenschaftlich durchgeführten Forschung, wobei der Wärmeübergang bei hoher Temperatur in seine einzelnen Stufen zerlegt wird. Ich sehe darin eine Reihe interessanter Aufgaben für die zukünftige Forschung.

Eine Neuheit dürfte jedoch unsere Arbeit gebracht haben, und zwar, daß es uns gelang, wahre Gastemperaturen von etwa 1300° C mit großer Annäherung zu messen. Diese Messung wurde dadurch möglich, daß die „passive“ Isolierung des Absaugepyrometers durch eine „aktive“, d. h. gasdurchströmte Isolierung ersetzt wurde.

Was die hierdurch gegebene Möglichkeit, hohe Gastemperaturen verhältnismäßig genau messen zu können, bedeutet, werden alle diejenigen würdigen, die sich einmal mit der wissenschaftlichen Grundlage befaßt haben.

6. Der Glasmacherstar und seine Verhütung.

Von Geh. Rat Dr. Cramer, Cottbus.

Die Wichtigkeit der zu besprechenden Erscheinung als typische Berufskrankheit der Glasarbeiter rechtfertigt ihre Schilderung an dieser Stelle. Nach kurzer Auseinandersetzung und Demonstration der groben Anatomie des Auges wird gezeigt, wie die ersten Erscheinungen des Glasmacherstars — Name für eine zur Undurchsichtigkeit der Linse und damit schließlich zur Erblindung führende Krankheit — am hinteren Linsenpol nur innerhalb des Pupillengebietes in Form einer fast kreisrunden, immer dunkler werdenden Trübung auftreten und schon in diesem Zustand das sogenannte „direkte“ Sehen mit dem Netzhautzentrum aufheben. Der Zu-