

ANALYSE DES WÄRMEÜBERGANGS IN BLASENSÄULEN

W. KAST

Mitteilung aus dem Forschungsinstitut Verfahrenstechnik der GVT, Aachen

(Received 2 November 1961)

Zusammenfassung—In Blasensäulen treten schon bei kleinen Gasgeschwindigkeiten sehr hohe Wärmeübergangszahlen von der Flüssigkeit an die begrenzende Wand auf. Die Höhe der Wärmeübergangszahlen kann nicht allein durch eine axiale Flüssigkeitsströmung, welche die Umströmung der Blasen und die freie Konvektion an der Wand hervorruft, erklärt werden. Vielmehr muss man auch eine Strömung, welche senkrecht auf die Wand hin und von der Wand weg gerichtet ist, annehmen. Unter dieser Annahme, welche sich zwanglos aus den Strömungsverhältnissen erklärt, lässt sich auch der Wärmeübergang in Blasensäulen in allgemeine Gesetzmässigkeiten des Wärmeübergangs einfügen. Es ergibt sich hieraus die Möglichkeit, durch Begasen den Wärmeübergang von einer Flüssigkeit an eine Wand wesentlich zu erhöhen, welche besonders bei kleinen Strömungsgeschwindigkeiten der Flüssigkeit wirksam ist. Aus der Wärmeübergangszahl lässt sich ferner eine Quergeschwindigkeit in der Blasensäule definieren, welche ein Mass für die Rühr- und Mischwirkung aufsteigender Blasen ist.

EINLEITUNG

IM CHEMISCHEN Apparatewesen werden Blasensäulen für die Absorption oder Reaktion eines Gases in einer Flüssigkeit wegen der grossen Austauschflächen und den guten Stoffübergangsverhältnissen zwischen Gas und Flüssigkeit vielfach verwendet. Das Gas wird dabei über ein Verteilungssystem der Säule zugeführt und steigt in Blasen in der insgesamt ruhenden oder nur mit kleiner Geschwindigkeit strömenden Flüssigkeit auf. Da derartige Prozesse meist mit Wärmetönungen verbunden sind, muss die freiwerdende oder benötigte Wärme dem Gas-Flüssigkeitsgemisch durch die begrenzende Wand oder durch besonders eingehängte Heizflächen ab- oder zugeführt werden. Zur richtigen Bemessung solcher Heizflächen ist daher die Kenntnis der Wärmeübergangszahlen zwischen Wand und Flüssigkeits-Gasgemisch in ihrer Abhängigkeit von der Abmessung der Säule, der Blasengrösse und Blasen Geschwindigkeit, vom Durchsatz und von den Stoffeigenschaften erforderlich. Für den hier betrachteten Wärmeübergang werden allein die Stoffeigenschaften der Flüssigkeit von Einfluss sein, da die an der Wand anliegende Grenzschicht, welche für den Wärmetransport in erster Linie ausschlaggebend ist, nicht von Gasblasen durchsetzt

wird. Für die Darstellung des Wärmeübergangs ist, wie bei durchströmten Proben, eine Beziehung zwischen dimensionslosen Kenngrössen $Nu = f(Re, Pr)$, wobei Re passend definiert wird, üblich. Es fragt sich, ob diese Darstellung den Wärmeübergangs- und Strömungsverhältnissen in einer Blasensäule gerecht wird.

MESSUNG DES WÄRMEÜBERGANGS

Von Kölbel und Siemes wurden eingehende Untersuchungen über die Bewegung und Grösse der Blasen [1, 2] und des Wärmeübergangs an die Wandung [3] durchgeführt. Zur Messung des Wärmeübergangs hängten sie ein beheiztes Rohr in die Achse der Blasensäule ein und bestimmten aus der elektrisch zugeführten Leistung und der Übertemperatur $\Delta\vartheta$ des Rohres die Wärmeübergangszahl α zwischen Heizrohr und Flüssigkeit gemäss der Definition

$$\alpha = \frac{q}{f\Delta\vartheta} \quad (1)$$

Kölbel und Siemes konnten ihre Messungen an Wasser und verschiedenen Rohrzuckerkonzentration durch einen Kurvenzug darstellen, wenn sie auftrugen $Nu = \alpha d/\lambda$ über $Re = wd/\nu$. Dabei ist d der Durchmesser des eingehängten

Heizrohres und nicht der Säule, in welcher das Rohr eingehängt war; d war bei allen Versuchen konstant. Die Geschwindigkeit w_L ist die einfach zu bestimmende Gasgeschwindigkeit im leer gedachten Säulenquerschnitt. In Abb. 1 sind diese Messungen wiedergegeben, wobei aber die Kennzahlen Nu und Re mit dem hydraulischen Durchmesser der Blasensäule gebildet

elektrisch beheizte, bündig in die Wand eingesetzte Kupferplatte, welche mit Thermoelementen besetzt war (Abb. 2). Die an die Umgebung abgegebene Wärmemenge wurde durch eine Isolierung klein gehalten und durch Eichung bestimmt. Die Messungen, welche sich vor allem auf den Bereich kleiner Gasgeschwindigkeiten w_L erstrecken, sind in Abb. 1 in der dimensions-

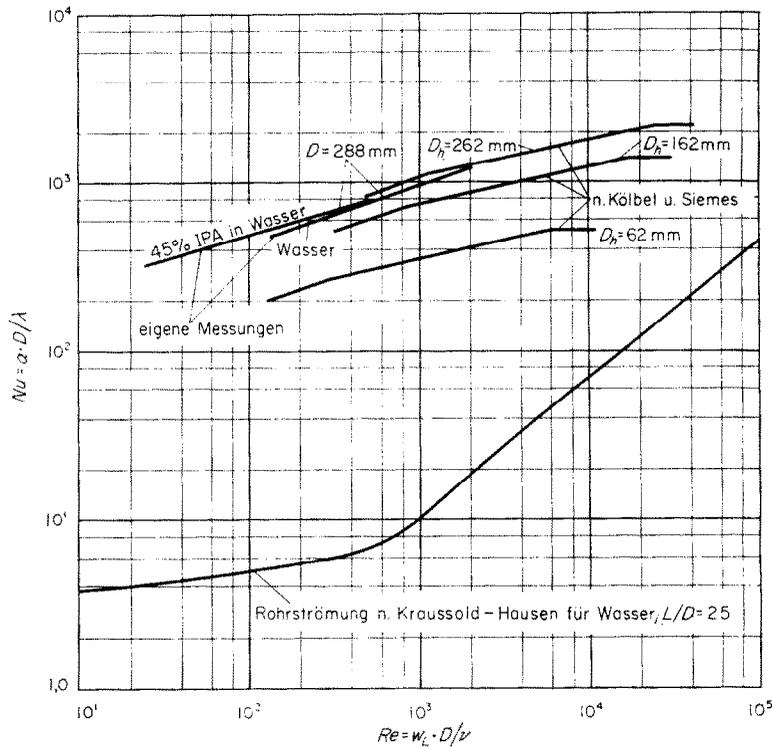


ABB. 1. Wärmeübergang in der Blasensäule und im durchströmten Rohr in dimensionsloser Darstellung.

sind, um zu einer dimensionsanalytisch richtigeren Betrachtung zu kommen.

Messungen von Novosad [4] in einer sehr engen Säule von nur 38 mm \varnothing lassen sich in der gleichen Art wie bei Kölbl und Siemens wiedergeben, doch dürfte bei dieser Säule sich ein Wandeffekt auf die Bewegung der Blasen und den Wärmeübergang bemerkbar machen (s.u.).

Eigene Messungen wurden an Blasensäulen von 288 mm \varnothing in 2,25 m Höhe über dem Gasverteilungssystem vorgenommen. Die Messung erfolgte in der Rohrwand selbst durch eine

losen Darstellung $Nu = f(Re)$ mit eingetragen. Um die Grössenordnung der Wärmeübergangszahlen zu zeigen, ist in Abb. 3 die Wärmeübergangszahl für Wasser und für 45% Isopropylalkohol in Wasser in der Säule von 288 mm \varnothing über der Leerrohrgeschwindigkeit w_L aufgetragen.

In diese Abbildung sind zum Vergleich die Wärmeübergangszahlen für die Rohrströmung nach Kraussold-Hausen [5, 6] für Wasser bei gleichem Rohrdurchmesser eingetragen, wenn die Strömungsgeschwindigkeit des Wassers im Rohr mit der Leerrohrgeschwindigkeit des Gases in der Blasensäule gleich ist. Der Vergleich

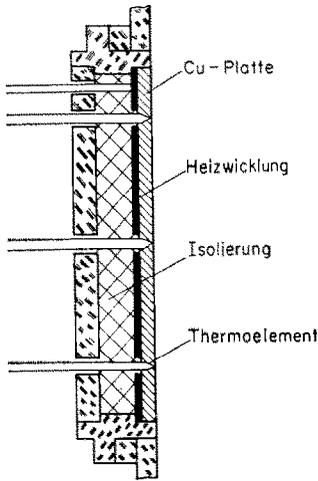


ABB. 2. Messelement zur Bestimmung der Wärmeübergangszahlen.

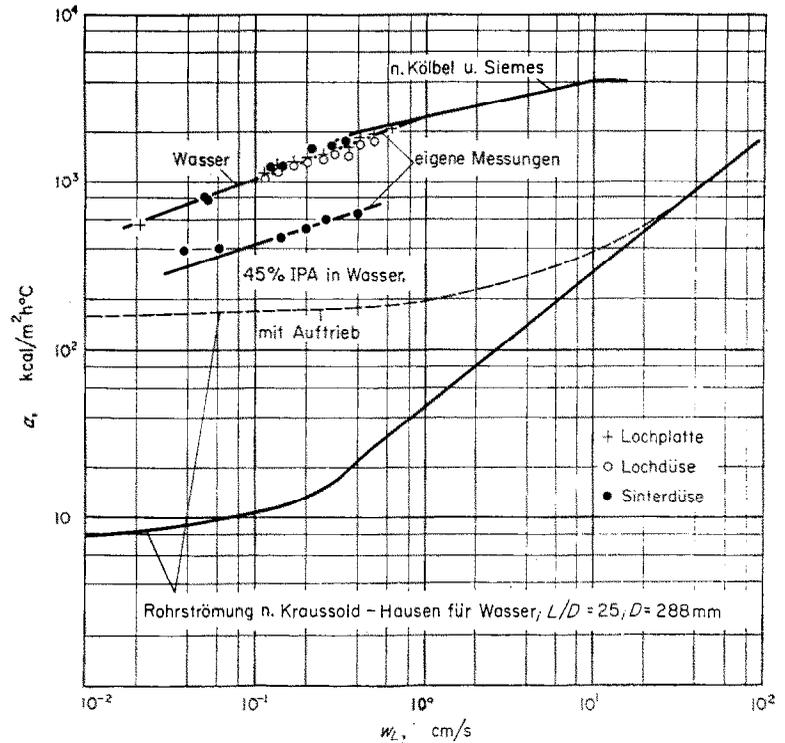


ABB. 3. Wärmeübergangszahlen in der Blasensäule und im Rohr aufgetragen über der Geschwindigkeit.

ist insofern nicht ganz berechtigt, da bei den Messwerten bereits eine freie Konvektion inbegriffen ist, welche durch den Temperaturunterschied Wand-Flüssigkeit ausgelöst wird (Berechnung s. weiter unten). Um auch die bei der Durchströmung eines senkrechten Rohres auftretende freie Konvektion zu berücksichtigen, müsste der Kurvensug von Kraussold-Hausen um ca. $w = 5 \text{ cm/s}$ (entsprechend $\Delta\vartheta = 3\text{--}4^\circ\text{C}$) zu kleineren Geschwindigkeiten verschoben werden (gestrichelt eingetragen). Dadurch wird der Unterschied zwischen dem Wärmeübergang in der Blasensäule und im Rohr zwar kleiner, aber nicht erklärt. Die Frage ist auch, ob in der Blasensäule mit ihren starken Querströmungen, sich überhaupt eine freie Konvektion ausbildet. Die entsprechende dimensionslose Beziehung ist in Abb. 1 ebenfalls eingetragen. Bemerkenswert ist, wie man aus den Abbildungen 1 und 3 erkennt, die Tatsache, dass die Wärmeübergangszahlen in Blasensäulen Werte erreichen, die ein

Vielfaches—bis zum ca. 100-fachenden in durchströmten Rohren erreichbaren betragen, wenn man die Durchsatzgeschwindigkeit der Luft in Blasensäulen der Strömungsgeschwindigkeit im Rohr gleichsetzt. Umbefriedigend an den Darstellung ist, dass der Zusammenhang $Nu = f(Re)$ nicht allein für den Wärmeübergang massgebend ist, da als Parameter in Abb. 1 der Durchmesser, in Abb. 3 aber Stoffeigenschaften auftreten. Eine dimensionsanalytisch richtige Darstellung des Wärmeübergangs in Blasensäulen wird nur möglich sein, wenn der physikalische Vorgang der Wärmeübertragung, welcher gleichzeitig auch die Höhe der Wärmeübergangszahlen erklärt, erfassbar ist.

DEUTUNG DES WÄRMEÜBERTRAGUNGSVORGANGES IN DER BLASENSÄULE

Um zu einer Erklärung der hohen Wärmeübergangszahlen zu kommen, muss man von idealisierten Strömungsverhältnissen in der

Blasensäule ausgehen. Die Blasen seien dabei alle gleich gross (Durchmesser d) und allseitig gleich weit voneinander entfernt (Abstand s); der Abstand zur Wand der äusseren Blase betrage s^2 . In der Flüssigkeit sollen sie mit der Geschwindigkeit w_B aufsteigen. Zwischen der Blasenauftiegs geschwindigkeit w_B und der Leerrohrgeschwindigkeit w_L besteht der einfache Zusammenhang

$$\frac{w_L}{w_B} = \epsilon \quad (2)$$

mit ϵ dem relativen Gasgehalt; ϵ lässt sich äusserst leicht aus der Ausdehnung der Säule bei Gasdurchsatz (Höhe h) gegenüber der ohne Gasdurchsatz bestimmen (Höhe $h - \Delta h$):

$$\epsilon = \frac{\Delta h}{h} \quad (3)$$

Der Zusammenhang von ϵ und w_L ist von Kölbl und Siemes untersucht. Den charakteristischen Verlauf zeigt Abb. 4. Mit Hilfe von ϵ läßt sich nun die maximale und mittlere

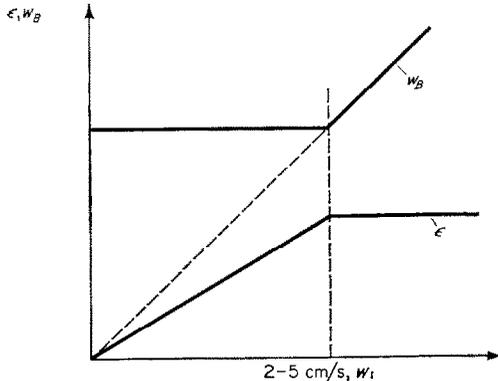


ABB. 4. Charakteristischer Zusammenhang zwischen dem Gasgehalt, der Blasen geschwindigkeit und der Leerrohrgeschwindigkeit.

Strömungsgeschwindigkeit, mit welcher die Flüssigkeit an den aufsteigenden Blasen aufsteigenden Blasen vorbeiströmt, abschätzen:

Die Zahl der Blasen n in der Volumeneinheit beträgt:

$$n = \frac{\epsilon}{(\pi/6)d^3}, \quad (4)$$

der Abstand s zwischen den Blasen bei tetraedischer Packung (Blasen in den Ecken eines Tekaeders) ist

$$s = \frac{1}{\sqrt[3]{[n\sqrt{(\frac{3}{4})}]}} = \frac{d}{\sqrt[3]{[\epsilon(6/\pi)\sqrt{(\frac{3}{4})}]}} \quad (5)$$

der Strömungsquerschnitt f an der engsten Stelle zwischen den Blasen folgt daraus zu

$$f = s^2\sqrt{(\frac{3}{4})} - (\pi/4)d^2 \quad (6)$$

und damit für die Geschwindigkeit w_e im engsten Querschnitt:

$$w_e = \frac{w_B(\pi/4)d^2}{f} = \frac{w_B}{(4/\pi)\sqrt[3]{[(\pi/6)\sqrt{2}]} \cdot \epsilon^{-2/3} - 1} \quad (7)$$

Um auf die mittlere Umströmungsgeschwindigkeit w_x zu kommen, ist zunächst mit dem Faktor 1/2 für den Mittelwert von w_e an der Blase und dann mit dem Verhältnis $[(\pi d^2)/4]/s^2$ zu multiplizieren, um den Mittelwert für eine Blasenschicht der Höhe s zu erhalten:

$$w_x = w_e \frac{1}{2} \frac{(\pi/4)d^2}{s^2} \quad (8)$$

Diese rohe Abschätzung, welche die ständig wechselnde Strömungsgeschwindigkeit an der an der Wand bzw. zwischen den einzelnen Blasen durch einen Mittelwert ersetzt, kann nur die Grössenordnung der Geschwindigkeit w_x geben. Sie wäre als mittlere Strömungsgeschwindigkeit für den Wärmeübergang massgebend. Das Verhältnis w_x/w_L ist in Abb. 5 über ϵ aufgetragen. Mit der in Abb. 4 angegebenen Beziehung bestimmt sich dann w_x , wie es Abb. 6 zeigt. Näherungsweise ist danach w_x proportional w_L .

Da die Wandung der Blasensäule geheizt oder gekühlt wird, überlagert sich dieser Strömung eine Auf- oder Abtriebsströmung. Nach Krischer [7] ergeben sich bei freier Anströmung von z.B. ebenen Platten, Rohren usw. die gleichen Wärmeübergangszahlen wie bei erzwungener Konvektion, wenn man eine Geschwindigkeit w_f entsprechend der Beziehung

$$Re = \frac{w_f l}{\nu} = \sqrt{(\frac{1}{2}Gr)} \quad (9)$$

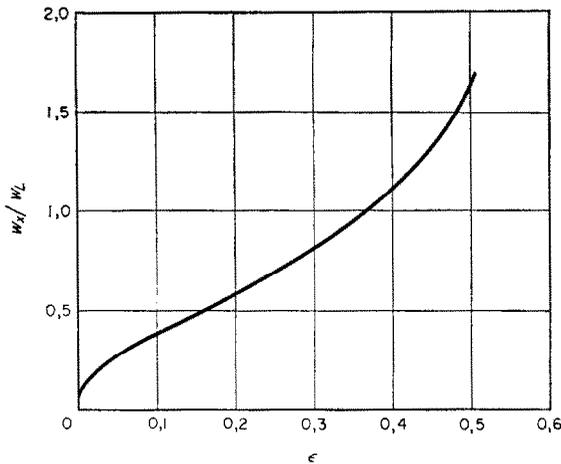


ABB. 5. Das Verhältnis der mittleren Strömungsgeschwindigkeit zur Leerrohrgeschwindigkeit.

definiert. Darin ist Gr die Grashof'sche Kennzahl:

$$Gr = \frac{l^3 g \beta (\vartheta_w - \vartheta_m)}{\nu^2} \quad (10)$$

Die sich hieraus ergebende Geschwindigkeit w_f ist in Abb. 7 über der Temperaturdifferenz $\vartheta_w - \vartheta_m$ für Wasser bei einer beheizten Rohrlänge von z.B. 1 m aufgetragen.

Zur Bestimmung der Wärmeübergangszahl ist w_x und w_f zu überlagern: $w^+ = w_x \pm w_f$, wobei, da w_x der Blasenbewegung entgegen-

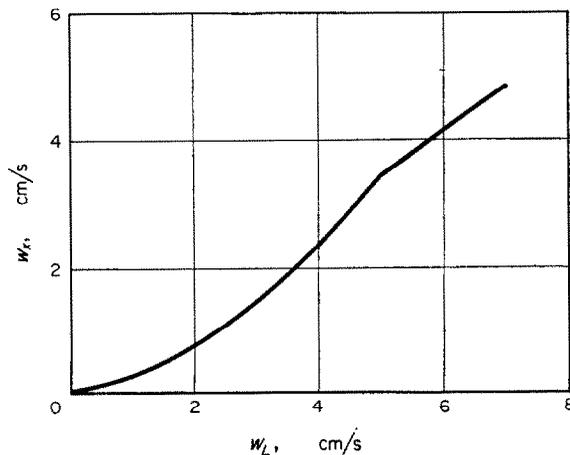


ABB. 6. Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit.

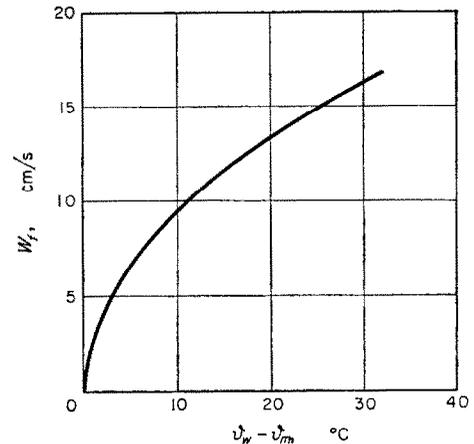


ABB. 7. Die Auftriebsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz.

gerichtet ist, das positive Vorzeichen für Kühlung der Wand, das negative für Heizung gilt. Damit lässt sich mit der Gleichung für den Wärmeübergang an eine längsangeströmte Wand [7]

$$Nu = 0,6 \sqrt{Re^+} \quad (11)$$

mit $Nu = (\alpha_w l) / \lambda$; $Re^+ = (w^+ l) / \nu$, die Wärmeübergangszahl abschätzen.

Dies ist die Wärmeübergangszahl an der Wand auf Grund von Strömungen, welche axial in der Säule erfolgen. Die Wärmeübergangszahlen liegen für Wasser in der Größenordnung von 100 kcal/m² h °C (Abb. 8) und reichen bei weitem nicht aus, die beobachteten Wärme-

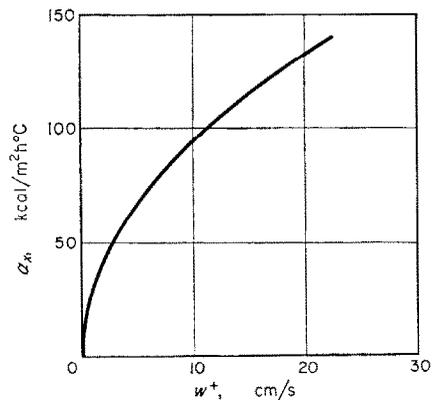


ABB. 8. Die Wärmeübergangszahl auf Grund von axialen Strömungen in der Blasensäule.

übergangszahlen zu erklären. Dies wird auch durch Beobachtungen von Kölbel und Siemes [3] bestätigt, wonach die Höhe der Temperaturdifferenz, welche nach dem vorstehenden den grössten Anteil an der Geschwindigkeit w^+ besitzen müsste, keinen merkbaren Einfluss hat.

Betrachtet man die Umströmung der Blasen (Abb. 9), so erkennt man, dass die Umströmungs-

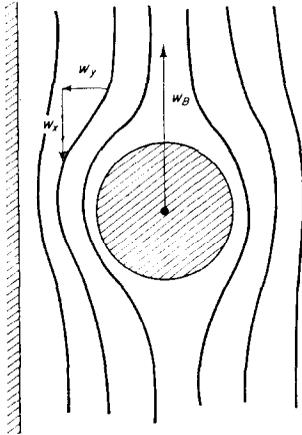


ABB. 9. Umströmung der Blasen.

geschwindigkeit nicht nur aus einer Komponente w_x in axialer Richtung besteht, sondern auch eine Komponente w_y senkrecht dazu besitzt. Durch das Aufsteigen der Blasen werden so Flüssigkeitselemente mit der Frequenz des Blasenauftretens an die Wand und von ihr weggeführt. Es entsteht hierdurch eine Querbewegung, welche, wie bekannt, ein Mischen und Rühren des Säuleninhaltes zur Folge hat. Man kann sie als eine makroskopische Turbulenz auffassen und sie entsprechend den Turbulenzerscheinungen behandeln. Die mit dieser Querbewegung transportierte Wärmemenge ist

$$Q_y = w_y f c \gamma (\vartheta_m - \vartheta_w) = \alpha_y f (\vartheta_m - \vartheta_w), \quad (12)$$

wenn angenommen wird, dass die Flüssigkeitselemente der Temperatur ϑ_m bei Berührung mit der Wand die Wandtemperatur ϑ_w annehmen. Die durch Gl. 13 definierte Wärmeübergangszahl α_y ist dann

$$\alpha_y = w_y c \gamma. \quad (13)$$

Setzt man $w_y \approx w_x$, was grössenordnungsmässig

sicher zutrifft, so erhält man die in Abb. 10 aufgetragenen Wärmeübergangszahlen, welche in der Grössenordnung der gemessenen Werte liegen. Diese Querbewegung ist also massgebend für die hohen Wärmeübergangszahlen in Blasen Säulen und man kann $\alpha \approx \alpha_y$ setzen.

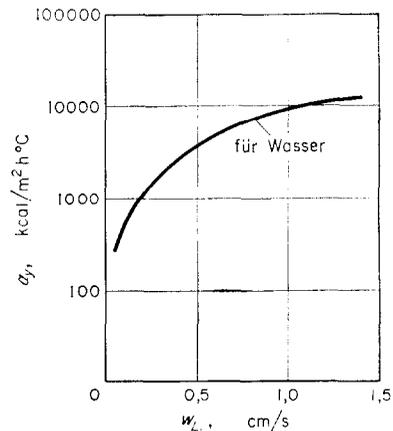


ABB. 10. Die Wärmeübergangszahl auf Grund von Querströmung in der Blasen säule.

Durch Gl. 13 ist andererseits eine für den Quertransport, d.h. für die Rühr- und Mischwirkung massgebliche Quergeschwindigkeit definiert, welche für solche Transportvorgänge von Interesse sein könnte. Sie ist in Abb. 11 über der Leerrohrgeschwindigkeit nach den vorliegenden Messungen aufgetragen.

Auch bei der erzwungenen turbulenten Rohrströmung ist die ungeordnete Mischbewegung, welche senkrecht zur Hauptströmungsrichtung wirkt, für den Wärmeaustausch verantwortlich. Diese Schwankungsgeschwindigkeit wird im vorliegenden Fall durch die Umströmung der Blasen erzeugt und erreicht, da die Blasen makroskopische Abmessungen besitzen, wesentlich höhere Werte als bei dem mikroskopischen Vorgang der Turbulenzentstehung im Rohr. Der physikalische Vorgang ist aber in beiden Fällen der gleiche; eine dimensionslose Darstellung muss natürlich die besonderen Strömungsverhältnisse in einer Blasen säule, welche in dem Einfluss der Schwerkraft auf die Blasenbewegung liegen, berücksichtigen.

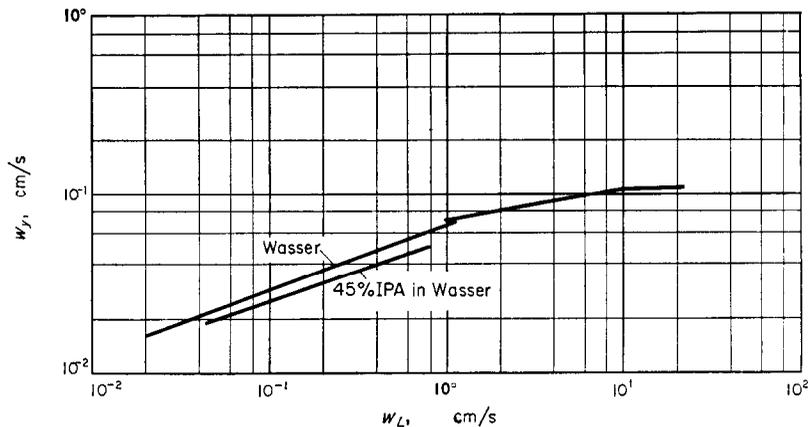


ABB. 11. Die Quergeschwindigkeit w_y aufgetragen über der Leerrohrgeschwindigkeit.

DIMENSIONSLOSE DARSTELLUNG

Eine dimensionslose Darstellung des Wärmeüberganges muss davon ausgehen, dass der Quertransport für den Austausch massgeblich ist.

Aus Gl. 13 erhält man als dimensionslose Kenngrösse für den Wärmeübergang

$$\frac{\alpha_y}{w_y c \gamma} = St, \quad (14)$$

mit St als der Stanton'schen Kennzahl. Diese ist über kennzeichnenden Strömungsparametern aufzutragen. Die Umströmung der aufsteigenden Blasen wird durch Trägheits-, Schwer- und Zähigkeitskräfte bestimmt [8]. Das Verhältnis der ersten zur zweiten Kraft ist als Froud'sche Kennzahl, das der ersten zur dritten als Reynold'sche Kennzahl bekannt. (Bei der Rohrströmung ist nur Re massgebend.) Weiterhin ist zu erwarten, dass auch die Prandtl'sche Kennzahl einen Einfluss hat. Es wird also allgemein

$$St = f(Fr, Re, Pr). \quad (15)$$

Da Längenabmessungen keinen nachweisbaren Einfluss auf den Wärmeübergang besitzen,*

* Dies wird in etwa verständlich, wenn man bedenkt, dass bei einem durchströmten Rohr der Impuls- und Wärmeaustausch nur auf den Umfang (πD) beschränkt ist, während in der Blasensäule mit ihren gleichmässig über dem Querschnitt verteilten Blasen (Turbulenzquellen) keine Abhängigkeit des Impuls- und Wärmeaustausch von Querschnitt oder Umfang vorhanden ist.

ist man berechtigt

$$Re \cdot Fr = \frac{w_L^3}{\nu g}$$

anzusetzen. Aus den Versuchswerten von Kölbl und Siemes und den eigenen ergab sich, dass eine gemeinsame Darstellung aller Stoffe möglich ist, wenn man St über der Kombination $Re \cdot Fr \cdot Pr^2 = (w_L^3 \nu) / \alpha^2 g$ aufträgt.

In Abb. 12 ist die Darstellung

$$St = f[\sqrt[3]{(Re \cdot Fr \cdot Pr^2)}] = f\left[w_L \sqrt[3]{\left(\frac{\nu}{\alpha^2 g}\right)}\right] \quad (16)$$

gewählt. Sie entspricht den Strömungs- und Wärmeübergangsverhältnissen in der Blasensäule und kann sehr einfach zur Bestimmung der Wärmeübergangszahlen benutzt werden. Voraussetzung bei Anwendung dieser Beziehung ist, dass der Säulendurchmesser sehr viel grösser als der Blasendurchmesser ist ($D \gg d$), da sonst das Verhältnis dieser beiden Durchmesser eingeht, und dass die Blasen gleichmässig über den Querschnitt verteilt sind, was aber immer schon relativ kurz über dem Verteilungssystem—auch bei einer zentralen Gaszufuhr der Fall ist.

Damit ist die anfangs gestellte Aufgabe gelöst, sowohl die Wärmeübergangszahlen in einer Blasensäule zu klären, als auch hiervon ausgehend die richtige dimensionslose Beziehung zu ihrer Darstellung zu finden.

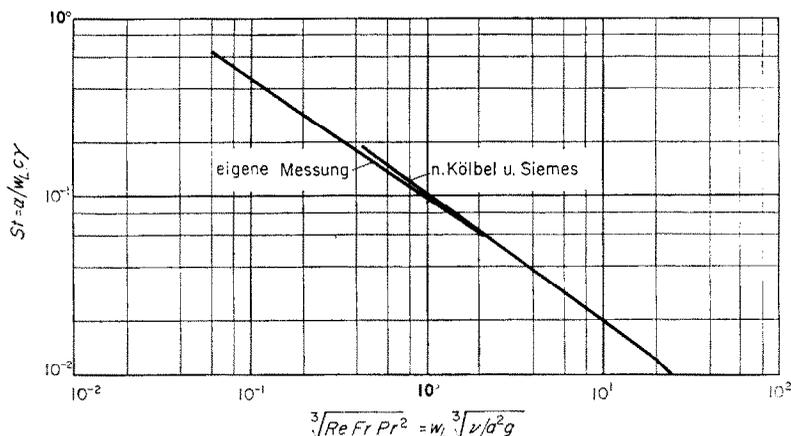


ABB. 12. Dimensionslose Darstellung des Wärmeübergangs in Blasensäulen.

LITERATUR

1. H. KÖLBEL und W. SIEMES, Gasblasen in Flüssigkeiten, *Chem.-Ing.-Tech.* **26**, 479–496, 614–630 (1954).
2. H. KÖLBEL, E. BORCHERS und H. LANGMANN, Größenverteilung der Gasblasen in Blasensäulen; *Chem.-Ing.-Tech.* **33**, 668–675 (1961).
3. H. KÖLBEL und W. SIEMES, Wärmeübergang in Blasensäulen, *Chem.-Ing.-Tech.* **30**, 400–404 (1958).
4. Z. NOVOSAD, *Chem. Listg.* (tschechisch) **48**, 946 (1954).
5. E. ECKERT, *Einführung in den Wärme- und Stoffaus-*
6. E. SCHMIDT, *Einführung in die techn. Thermodynamik*, 8. Aufl. Springer Verlag Berlin, Göttingen, Heidelberg (1960).
7. O. KRISCHER, *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik*. Springer Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg (1956).
8. P. GRASSMANN, *Physikalische Grundlagen der Chemie-Ingenieur-Technik*. Verlag Sauerländer, Aarau und Frankfurt (1961).

Abstract—In bubble columns very high heat transfer coefficients from the fluid to the limiting walls are obtained even at small gas velocities. These high coefficients cannot be explained only by the flow around the bubbles and natural convection along the wall, but a flow normal to and from the wall also has to be assumed. By this assumption, resulting from the flow conditions, the heat transfer in bubble columns fits into the general regularities of heat transfer. Thus, by gasing, it is possible to increase considerably the heat transfer from a fluid to a wall. This is of greatest effect at small fluid velocities. From the heat transfer coefficient a lateral velocity in the bubble column can be determined and serve as a scale of the stirring- and mixing-effect of the ascending bubbles.

Résumé—Dans les colonnes à bulles on obtient des coefficients d'échange thermique entre fluide et parois très élevés, même pour des vitesses de gaz petites. Ces coefficients élevés ne peuvent s'expliquer uniquement par l'écoulement autour des bulles et la convection naturelle le long des parois, on peut supposer également un écoulement normal allant et venant des parois. Par cette hypothèse, résultant des conditions d'écoulement, la transmission de chaleur dans les colonnes à bulles rejoint les règles générales de la transmission de chaleur. Ainsi, il est possible d'augmenter considérablement l'échange thermique entre un liquide et des parois par gazéification. Cet effet est très important quand les vitesses du fluide sont très petites. A partir de ce coefficient d'échange thermique on peut déterminer une vitesse latérale dans la colonne qui servira à évaluer l'effet de mélange et d'agitation produit par les bulles qui montent.

Аннотация—Показано, что в колпачковых колоннах получаются очень большие коэффициенты теплообмена даже при малых скоростях газа. Эти высокие коэффициенты теплообмена нельзя объяснить только движением пузырьков и естественной конвекцией на стенке. Следует допустить наличие течений, направленных перпендикулярно к стенке в направлении от неё. При этом предположении, которое легко объясняется условиями течения, теплообмен в колпачковых колоннах соответствует общим закономерностям теплообмена. Таким образом, путём аэрации можно значительно увеличить теплообмен от жидкости к стенке. Наибольший эффект получается при малых скоростях жидкости. Поперечная скорость в колпачковой колонне может быть определена по коэффициентам теплообмена. Она служит мерой взбалтывающего и перемешивающего действия поднимающихся пузырьков.