

Prom. Nr. 2827

**Wärme- und Stoffaustausch  
zwischen Dampfblase und Flüssigkeit  
bei N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>-Gemischen**

Von der  
Eidgenössischen Technischen  
Hochschule in Zürich

zur Erlangung  
der Würde eines Doktors der technischen Wissenschaften  
genehmigte

**PROMOTIONSARBEIT**

vorgelegt von

**ANDREAS FRANK**

dipl. Masch.-Ing. E. T. H.

von Obersiggenthal (Kanton Aargau)

Referent: Herr Prof. Dr. P. Grassmann

Korreferent: Herr Prof. Dr. G. Eichelberg

Juris-Verlag Zürich

1958

## 6. Zusammenfassung

Es wurden Wärme- und Stoffaustauschvorgänge zwischen flüssigen und dampf- förmigen  $N_2 - O_2$ -Gemischen bei Atmosphärendruck untersucht. Das Gas strömte dabei in Form von Blasen, die an einer einzelnen Oeffnung gebildet wurden, durch die ruhende Flüssigkeit. Gaszusammensetzung, Flüssigkeitszusammensetzung und Flüssigkeitsstand über der Düse konnten dabei beliebig, die Temperatur der Flüssigkeit, die Eintrittstemperatur des Gases, Düsendurchmesser und eingblasener Gasstrom beschränkt variiert werden.

Für Flüssigkeitszusammensetzungen  $\psi_{fl} \approx 0,36$  Molanteil  $O_2$ , Gaszusammensetzungen  $\psi_{\alpha} \approx 0,87$  Molanteil  $O_2$ , einen Gesamtdruck  $p \approx 725$  Torr und Gasströme zwischen  $2 < V_{\alpha} < 27$   $cm^3/s$ , können die gemessenen Verstärkungsverhältnisse  $s$  für  $0,2 \leq h \leq 3$  cm beschrieben werden durch

$$s = 1 - e^{-6,76 h^{0,39} V_{\alpha}^{-0,36}}$$

mit  $h$  in cm,  $V_{\alpha}$  in  $cm^3/s$ . Das Verstärkungsverhältnis ist von einer Ueberhitzung oder Unterkühlung der Flüssigkeit in der Grössenordnung von einigen  $1/10^{\circ} C$ , der Ueberhitzung des eintretenden Gases in der Grössenordnung von einigen  $^{\circ} C$  unabhängig. Das Verstärkungsverhältnis variiert mit der Flüssigkeitszusammensetzung und ist zudem für den Richtungssinn  $O_2 \longrightarrow$  Flüssigkeit (Richtungssinn bei der Rektifikation) ausser bei hohen Sauerstoffgehalten der Flüssigkeit grösser als für den Richtungssinn  $O_2 \longrightarrow$  Dampf. Sofern der Richtungssinn der gleiche bleibt, ist das Verstärkungsverhältnis für nicht zu kleine Gleichgewichtsstörungen unabhängig von der Zusammensetzung des eintretenden Gases. Wie die Abhängigkeit bei kleinen Gleichgewichtsstörungen (Grössenordnung einige 0,01 Molanteile) ist, ob also das Verstärkungsverhältnis sich beim Richtungswechsel sprunghaft oder stetig ändert, konnte mit der Apparatur nicht gemessen werden. Zeitlupenaufnahmen der Blasenbewegung gaben keinen Anhaltspunkt dafür, dass diese Aenderung des Stoffaustausches beim Richtungswechsel zurückzuführen ist auf eine Aenderung der Kinematik der Blase während der Blasenbildung an der Düse oder während dem Aufstieg in der Flüssigkeit. Nach einer Interpretation von Zuderweg<sup>55)</sup> kann diese Abhängigkeit des Verstärkungsverhältnisses durch Dampfblasenstabilität bzw. -instabilität je nach dem Richtungssinn des Stoffaustausches erklärt werden.

Mit Hilfe des Austauschpoles nach Bošnjaković konnten aus den Stoffaustauschmessungen die Zustände an der Grenzfläche zwischen Dampf und Flüssigkeit während dem Aufstieg der Blase bestimmt werden. Dabei ergab sich, dass bei Flüssigkeitstemperaturen in der Nähe der Siedetemperatur der Stoffaustauschwiderstand flüssigkeitsseitig nur einige Prozent des gaseitigen beträgt. Wärme- und Stoffüber-

gangszahlen während dem Aufstieg der Blase sind:

$$k_V = 3,2 \cdot 10^{-4} h^{-0,61} V_\alpha^{0,49}$$

Stoffübergangszahl gasseitig  
[mol/cm<sup>2</sup> · s · atm]

$$\bar{\alpha}_{fl} = 4,2 \cdot 10^{-2} V_\alpha^{0,85}$$

Wärmeübergangszahl flüssigkeitsseitig  
[cal/cm<sup>2</sup> · s · °C] .

Mit Hilfe der Lewis'schen Beziehung ergibt sich

$$\alpha_V = 2,2 \cdot 10^{-3} h^{-0,61} V_\alpha^{0,49}$$

Wärmeübergangszahl gasseitig  
[cal/cm<sup>2</sup> · s · °C]

$$k_{fl} = 6,9 \cdot 10^{-3} V_\alpha^{0,85}$$

Stoffübergangszahl flüssigkeitsseitig  
[mol/cm<sup>2</sup> · s · atm] .

Die Lewis'sche Beziehung darf aber nur mit gewissen Vorbehalten auf der Flüssigkeitsseite angewendet werden. In die Gleichungen sind  $h$  in cm und  $V_\alpha$  in cm<sup>3</sup>/s einzusetzen. Die Uebergangskoeffizienten gelten bei den selben Daten, die zur Beziehung für  $s$  gehören.

Die Wärmezufuhr  $Q \left[ \frac{\text{cal}}{\text{s}} \right]$  von der Flüssigkeit an den Dampf kann bei konstantem  $V_\alpha$  und konstanten Flüssigkeits- und Dampfeintrittszusammensetzungen beschrieben werden durch

$$Q = A (h + B) \Delta T_{fl} + E.$$

$\Delta T_{fl}$  ist die Ueberhitzung resp. Unterkühlung der Flüssigkeit.  $A, B$  und  $E$  sind dimensionsbehaftete Konstanten, die aber von  $V_\alpha$  und den Zusammensetzungen der Flüssigkeit und des eintretenden Dampfes abhängen. Aus den Wärmeaustauschmessungen kann ebenfalls gefolgert werden, dass während dem Aufstieg der Blase der Stoffaustauschwiderstand flüssigkeitsseitig bedeutend kleiner ist als der gasseitige.

Beschallung des Blasenweges mit einem magnetostriktiven Ultraschallgeber (28 kHz, Schalleistung ca. 1 W) hat bei  $V_\alpha \approx 8,1 \text{ cm}^3/\text{s}$  und oben angegebenen Intervallen keinen Einfluss auf das Verstärkungsverhältnis.

Die Oberflächenspannung bei  $p \approx 725$  Torr siedender  $N_2 - O_2$  -Gemische wurde mit der Abreissmethode gemessen. Es ergaben sich Werte für die Oberflächenspannung, die 4 - 17% höher sind als diejenigen anderer Autoren, gemessen nach anderen Methoden.