Tabelle 1. Theoretisch, experimentell nach Gl. (20) und näherungsweise nach Gl. (25) bestimmte Neigungswerte für die Schnittpunkte der Moiré-Linien auf dem Radius D – D in Bild 6 am Beispiel der Plattenaufgabe von Bild 4.

Punkt	x = y mm	$w_{xT}/10^{-3}$ nach Gl. (30)	$w_{xN}/10^{-3}$ nach Gl. (20)	$w_{xN}/10^{-3}$ nach Gl. (25)	$\frac{w_{xT} - w_{xN}}{w_{xT}} 100\%$	$\frac{w_{xT} - w_{xN}}{w_{xT}} 100\%$
1	43,30	-10,825332	-10,828085	-10,5	0,025	3,01
2	52,77	-9,351545	-9,348341	-9,0	0,034	3,76
3	57,32	-7,863202	-7,853628	-7,5	0,122	4,62
4	60,74	-6,367912	-6,356038	-6,0	0,186	5,78
5	63,59	-4,867535	-4,857009	-4,5	0,216	7,55
6	66,04	-3,372577	-3,356963	-3,0	0,463	11,05
7	68,26	-1,858534	-1,856278	-1,5	0,121	19,29

In Tabelle 1 sind die Ergebnisse des Vergleichs zusammengestellt. Diese lassen sich zwar nicht verallgemeinern, weisen jedoch darauf hin, daß eine der Auswertung des Experiments vorausgehende Abschätzung über den Einfluß der einzelnen Parameter auf die Genauigkeit der gesuchten Verformungsgrößen notwendig ist.

Literatur

[1] Ligtenberg, F.K.: The moiré-method, a new experimental method for the determination of moments in small slab models. Proc. Soc. Exp. Stress Anal. Bd. 12 (1954/55) Nr. 2, S. 83/98.
[2] DeHaas, H.M., u. H.W. Loof: An optical method to facilitate the interpretation of moiré pictures. VDI-Ber. Nr. 102. Düsseldorf: VDI-Verlag 1966, S. 65/70.

[3] Heise, U.: A moiré method for measuring plate curvature. Exp. Mech. Bd. 7 (1967) Nr. 1, S. 47/48.
[4] Chiang, F.P., u. M. Bailangadi: A method for direct determination of small curvatures. J. Appl. Mech. Bd. 42 (1975) Nr. 1, S. 29/31.
[5] Ritter, R., u. W. Gonska: Experimentelle Bestimmung der Krümmungsgrößen dynamisch belasteter Platten nach dem Moiré-Prinzip. Forsch. Ing.-Wes. Bd. 43 (1977) Nr. 5, S. 141/45.
[6] Ritter, R.: Zur Bestimmung der Balkenkrümmung mit Hilfe des Moiré-Prinzips. Forsch. Ing.-Wes. Bd. 46 (1980) Nr. 5, S. 164/66.
[7] Ritter, R., u. R. Schettler-Koehler: Curvature measurement by moiré effect. Exp. Mech. Bd. 23 (1983) Nr. 2, S. 165/70.

Eingegangen am 2. 11. 1983 F 3677

Wärmeübergang und Fouling beim Strömungssieden von Argon und Stickstoff im horizontalen Rohr

Hans Müller-Steinhagen

Die zunehmende Bedeutung der Kryotechnologie erfordert verbesserte Auslegungsmethoden für die Teilkomponenten der verfahrenstechnischen Anlagen. Deshalb werden am Institut für Thermische Verfahrenstechnik der Universität Karlsruhe seit einigen Jahren systematische Untersuchungen des Wärmeübergangs und des Druckverlustes bei der Zweiphasenströmung von Argon und Stickstoff in horizontalen Rohren durchgeführt, über deren neueste Ergebnisse hier kurz berichtet wird. Diese Ergebnisse beschränken sich nicht nur auf den Kryobereich, sondern können teilweise auch bei anderen Flüssigkeits-Gasströmungen Anwendung finden.

Fouling-Vorgänge beim Strömungssieden: Bei Messungen mit Argon wurde eine allmähliche Verschlechterung des Wärmeübergangs beobachtet, die nach mehreren Stunden bei einer beträchtlich höheren Wandüberhitzung oder mit dem Eintreten der Siedekrise endete. Als Ursache wurde die Ablagerung von gelöstem Kohlendioxid (CO₂) an der Heizfläche ermittelt, wobei zu beachten ist, daß die Reinheit des verwendeten Argons größer als 99.996 Vol.-% war. In weiteren Versuchen wurde der Einfluß der CO₂-Konzentration auf diesen Fouling-Vorgang bestimmt und ein Verfahren entwickelt, um das CO₂ aus dem Meßkreislauf zu entfernen. Das gleiche instationäre

Verhalten wurde auch bei Stickstoff beobachtet, wenn der CO₂-Volumengehalt auf über 5‰ erhöht wurde.

Umfangsgemittelter Wärmeübergang: Beim Strömungssieden von Argon und Stickstoff im horizontalen Rohr wurde außer dem Blasensiedebereich auch ein ausgeprägter Bereich des konvektiven Siedens festgestellt. Da diese Beobachtung im Widerspruch zu früheren Meßergebnissen steht, wurden letztere nochmals überprüft und ein systematischer Fehler in der damals verwendeten Meßdatenerfassungsanlage gefunden. Nach der entsprechenden Korrektur der Originaldaten wurde eine weitgehende Übereinstimmung mit den eigenen Meßergebnissen festgestellt.

Örtlicher Wärmeübergang an Argon und Stickstoff: Bei der Verdampfung in horizontalen Rohren ergibt sich aufgrund unterschiedlicher Wärmeübergangskoeffizienten der Flüssigkeit und des Dampfes eine starke Ungleichverteilung des Wärmeübergangs am Rohrumfang, die wesentlich von der Wärmeleitfähigkeit und von den Abmessungen des Rohrs abhängt. Aufbauend auf Messungen mit Argon und Stickstoff, bei denen durch numerische Rechnung lokale Wärmeübergangskoeffizienten und Benetzungsgrenzen ermittelt werden konnten, wurden Berechnungen des umfangsgemittelten Wärmeübergangskoeffizienten durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, daß bei Verwendung von Rohren mit voneinander abweichendem Wärmeleitvermögen der Rohrwand oder bei verschiedenen Beheizungsarten Unterschiede von mehreren 100% in den umfangsgemittelten Wärmeübergangskoeffizienten auftreten können.

Reibungsdruckverlust: Es wurde eine besonders einfache Korrelation zur Berechnung des Reibungsdruckverlustes bei der Zweiphasenströmung in horizontalen und vertikalen Rohren entwickelt. Diese Korrelation wurde anhand einer Datenbank mit etwa 9000 Meßwerten überprüft. Mit keiner der derzeit publizierten Korrelationen wurde eine bessere mittlere Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Reibungsdruckverlusten erreicht.

Für die Dokumentation: Tieftemperaturtechnik - Zweiphasenströmung - Umfangsgemittelter Wärmeübergang - Lokaler Wärmeübergang - Siedemechanismen - Fouling - Reibungsdruckverlust - Beschleunigungsdruckverlust

Reihe 6 Nr. 143 der FORTSCHRITT-BERICHTE DER VDI-ZEITSCHRIFTEN gibt den vollen Wortlaut der Arbeit als Manuskript gedruckt wieder. 258 Seiten, 101 Bilder, 13 Tabellen, Preis 100,- DM. Bestellungen an die VDI-Verlag GmbH, Postfach 1139, 4000 Düsseldorf I. Kein Artikel des Buchhandels.