

Untersuchungen zur Gegenströmung von Dampf und Wasser während der Notkühlung von Druckwasser-Kernreaktoren*

Rolf Spatz, Dieter Mewes und Franz Mayinger**

Herrn Professor Dr.-Ing. Eckhart Blaß zum 60. Geburtstag

1 Problemstellung

Der Gegenstrom von Gas und Flüssigkeit tritt nicht nur in verfahrenstechnischen Apparaten wie z. B. Fallstromverdampfern, Füllkörper- und Siebbodenkolonnen auf, sondern auch im Kern von leichtwassergekühlten Kernreaktoren während der Notkühlphase. Nach einem hypothetischen Kühlmittelverlust-Störfall wird in Druckwasserreaktoren deutscher Bauart Notkühlwasser in den oberen Raum des Druckbehälters eingespeist. Von hier soll es in den Reaktorkern gelangen. Der Kontakt des Wassers mit den heißen Struktur- und Brennelementen verursacht eine heftige Verdampfung, und der aufsteigende Dampf strömt dem Notkühlwasser entgegen. Um die Abhängigkeit des in den Kern gelangenden Notkühlwassers vom entgegengerichteten Dampfstrom zu untersuchen, wurden Experimente an Strukturelementen unterschiedlicher geometrischer Anordnung mit den Fluiden Dampf und Wasser durchgeführt. Die experimentellen Ergebnisse wurden dazu verwendet, auf empirischer Grundlage ein Berechnungsverfahren zu entwickeln.

2 Versuchsanlage

In eine Meßstrecke mit quadratischem Querschnitt der Abmessungen 230 mm × 230 mm wurden als Einbauten ein unbeheiztes 4 × 4-Stabbündel mit Lochplatte und eine unbeheizte Brennelement-Attrappe, die aus einem 16 × 16-Stabbündel mit einem darüber angeordneten Brennelementkopf besteht, eingesetzt. Am Fuße des

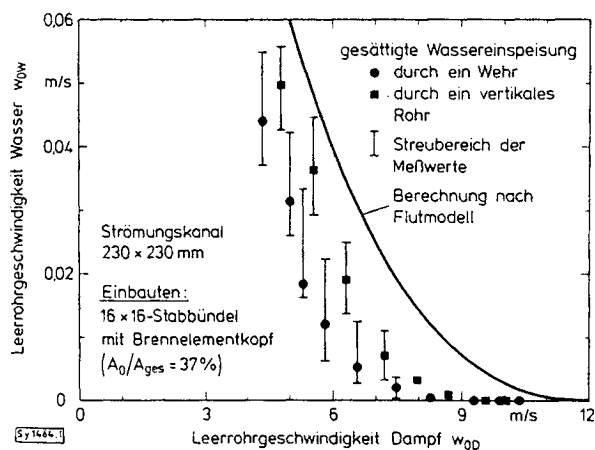


Abb. 1. Vergleich zwischen den experimentellen und den rechnerischen Ergebnissen für die komplette Brennelement-Attrappe; A_0 , freier Strömungsquerschnitt, A_{ges} gesamter Strömungsquerschnitt.

* Auszugsweise vorgetragen auf der Sitzung des GVC-Fachauschusses „Mehrphasenströmungen“, 28. Febr./1. März 1985 in Braunschweig.

** Dipl.-Ing. R. Spatz, Prof. Dr.-Ing. D. Mewes, Institut für Verfahrenstechnik der Univ. Hannover, Callinstr. 36, 3000 Hannover 1, und Prof. Dr.-Ing. F. Mayinger, Lehrstuhl A für Thermodynamik der Techn. Univ. München, Arcisstr. 21, 8000 München 2.

Brennelementkopfes befindet sich ebenfalls eine Lochplatte, die sog. Stabhalteplatte, deren relativer freier Strömungsquerschnitt mit 37% der engste in der gesamten Brennelement-Attrappe ist. Die Einbauten wurden von unten mit gesättigtem Dampf von 4,8 bar (abs.) durchströmt und von oben mit gesättigtem und unterkühltem Wasser beaufschlagt. Das nach unten dringende Wasser und der vom Dampf nach oben mitgerissene Anteil wurden in Auffangbehältern gemessen.

3 Versuchsergebnisse

Die fluiddynamischen Vorgänge, die während des Flutens in Stab-bündeln ablaufen, sind mit den an Lochplatten ablaufenden vergleichbar. Wird ein konstanter Volumenstrom an Wasser eingespeist, so dringt für niedrige Dampfgeschwindigkeiten die Flüssigkeit durch einen bestimmten Teil der in der Stabhalteplatte befindlichen Bohrungen nach unten, während der Dampf durch den verbleibenden Teil nach oben strömt. Mit zunehmender Dampfgeschwindigkeit werden die Wechselwirkungen zwischen den Phasen größer, und oberhalb der Stabhalteplatte baut sich eine Sprudelschicht auf. Mit gesteigerter Dampfgeschwindigkeit werden am sog. „Flutbeginn“ [1] erste mitgerissene Tropfen nach oben ausgetragen, und der Druckabfall oberhalb der Stabhalteplatte erreicht einen relativen Maximalwert. Während des Flutens wird mit zunehmender Geschwindigkeit ein größerer Anteil der Flüssigkeit ausgetragen, bis beim Erreichen der sog. „Gegenstromgrenze“ [1] kein Wasser mehr in den Bündelbereich dringt. Der Differenzdruck nähert sich dem der einphasigen Dampfströmung an. In Abb. 1 sind die Ergebnisse an der kompletten Brennelement-Attrappe für unterschiedliche Formen der Wassereinspeisung dargestellt. In dem Flutdiagramm ist die Leerrohrgeschwindigkeit des nach unten dringenden Wassers als Funktion der Leerrohrgeschwindigkeit des Dampfes aufgetragen. Die Leerrohrgeschwindigkeit ist als Volumenstrom definiert, der auf den engsten freien Strömungsquerschnitt bezogen wird. Aus den Ergebnissen der Experimente an der Brennelement-Attrappe geht hervor, daß ein deutlicher Einfluß der Form der Wassereinspeisung vorliegt. Im Unterschied zu den Experimenten am 4 × 4-Stabbündel baut sich auf der Stabhalteplatte keine gleichmäßige Sprudelschicht auf. Durch Randschlitze in der Stabhalteplatte dringt ein sehr großer Teil des Wassers als Film nach unten. Dieser Effekt wird durch bestimmte Formen der Wassereinspeisung verstärkt, da sich Geschwindigkeit und Strömungsform des eintretenden Wassers für die unterschiedlichen Formen der Einspeisung ändern.

Für unterkühlt eingespeistes Wasser treten im Unterschied zu den bislang dargestellten Experimenten für gesättigte Einspeisung zusätzlich Phasenwechsellvorgänge auf: Ein Teil des Dampfes kondensiert und erwärmt das unterkühlte Wasser auf Sättigungstemperatur. Im Vergleich zur gesättigten Wassereinspeisung beginnt das Fluten bei größeren Dampfgeschwindigkeiten. Die Gegenstromgrenze ist im Unterschied zur gesättigten Einspeisung abhängig von dem eingespeisten Wasservolumenstrom. Neben den fluiddynamischen Instabilitäten während des Flutens können zusätzlich durch Kondensationseffekte Instabilitäten verursacht werden. Ist die Unterkühlung der Flüssigkeit so groß, daß der gesamte Dampf in der Meßstrecke kondensiert, kommt es zu heftigen Druckszillationen und Kondensationsschlägen durch das Zusammenbrechen lokaler Dampfzellen.

4 Vorausberechnung der Flutgrenze

Ausgehend von der Stabilität welliger Grenzschichten [2, 3] hat Kröning [4] ein Verfahren zur Berechnung von Flutkurven entwickelt, das sich als Summe zweier Terme darstellen läßt, die aus der

Produkt von Froude-Zahl, Weber-Zahl und zweiphasigem Dichteverhältnis für die jeweilige Phase gebildet werden. Der Geometrie-Einfluß und der Viskositätseinfluß werden durch empirische Ansätze erfaßt. Die Abweichungen zwischen den experimentellen und den rechnerischen Ergebnissen in Abb. 1 sind im Vergleich zu Flutmodellen anderer Autoren klein [5]. Eine bessere Übereinstimmung konnte in Experimenten ohne Randschlitze in der Stabhalteplatte erreicht werden. In dem Berechnungsverfahren wurde für unterkühlte Wassereinspeisung die Verringerung des Dampfstromes durch Kondensation für den Flutbeginn berücksichtigt. Ein eingeführter Kondensationsparameter ist abhängig vom Grad der Durchmischung, von der Phasengrenzfläche, von der Verweilzeit des Dampfes in der Kondensationszone und von der Unterkühlung der Flüssigkeit in diesem Bereich. Daraus resultiert eine starke Abhängigkeit des Flutverhaltens für unterkühlt eingespeistes Wasser von der Geometrie der Einbauten, der Dampf- und Wassereinspeisungen.

Die Verfasser danken der Europäischen Gemeinschaft, dem Bundesministerium für Forschung und Entwicklung, der Kraftwerk Union

sowie der Gesellschaft für Reaktorsicherheit für die finanzielle und technische Unterstützung.

Eingegangen am 23. April 1985

- [1] Brauer, H.: Grundlagen der Einphasen- und Mehrphasenströmungen, 1. Aufl., Verlag Sauerländer, Aarau 1971.
- [2] Shearer, C. F.; Davidson, J. F.: J. Fluid Mech. 22 (1965) Nr. 2, S. 321/335.
- [3] Cetinbudakler, A. G.; Jameson, G. F.: Chem. Eng. Sci. 24 (1969) S. 1669/1680.
- [4] Kröning, H.: Dissertation, Univ. Hannover 1984.
- [5] Hawighorst, A.; Kröning, H.; Mayinger, F.: Nucl. Sci. Eng. 8 (1984) Nr. 3, S. 376/384.

Schlüsselworte: Gegenstrom, Fluten, Brennelement, Lochplatte, Unterkühlung, Kondensation, Kerntechnik.

Das vollständige Manuskript dieser Arbeit umfaßt 33 Seiten mit 13 Abbildungen und 19 Literaturziten. Es ist als Fotokopie oder Mikrofiche MS 1385/85 erhältlich. Eine Bestellkarte finden Sie am Schluß dieses Heftes.