

DK 556.425.1.001.5:621.059.52.001.24

Messungen der maximalen Heizflächenbelastung beim Sieden

von Dr.-Ing. Franz Mayinger, Nürnberg

INHALTSANGABE

An zwangsdurchströmten Kanälen wurden bei Drücken von 70 bis 100 at Messungen der maximalen Heizflächenbelastung beim Sieden durchgeführt. Die Arbeiten hatten zum Ziel, nähere Aufschlüsse über die thermodynamischen und hydrodynamischen Vorgänge im Core von Siede- und Druckwasserreaktoren bei sehr hohen Heizflächenbelastungen zu liefern und insbesondere den Einfluß der Einlaufbedingungen auf den Burnout zu untersuchen. Wie die Messungen zeigen, können zwei verschiedene Arten des Burnout auftreten, von denen die eine zweckmäßig als hydrodynamisch stabile, die andere als pulsierende Siedekrise bezeichnet wird. Die Ergebnisse liefern wertvolle Hinweise und Berechnungsunterlagen für die thermodynamische Auslegung von Druck- und Siedewasserreaktoren.

Measurements of the critical heat flux in boiling were carried out on forced-flow channels at pressures ranging from 70 to 100 atmospheres. The object of this work was to obtain more detailed information on the thermo-dynamic and hydro-dynamic processes in the core of boiling-water and pressurised-water reactors under conditions of very high heat flux and in particular to study the effects of the inlet conditions on burnout. The measurements revealed that two different types of burnout can occur, one of which may conveniently be termed the hydro-dynamically stable and the other the pulsating boiling crisis. The results yielded valuable information and calculation details for the thermo-dynamic design of pressurised-water and boiling-water reactors.

Nous avons effectué des relevés de la charge maximale de surface de chauffe à l'ébullition dans des canaux à circulation forcée à des pressions entre 70 et 100 kg/cm². Ces travaux avaient pour but de fournir des détails plus précis au sujet des phénomènes thermo-dynamiques et hydro-dynamiques dans le Core de réacteurs à ébullition et à eau sous pression, pour des charges très élevées de la surface de chauffe, et d'examiner en particulier l'influence des conditions d'arrivée sur le Burnout. Ces relevés montrent que 2 types différents de Burnout se présentent, dont un pourra être désigné comme hydro-dynamiquement stable et l'autre comme ébullition critique à pulsations. Ces résultats fournissent des renseignements et documents de calcul précieux pour la conception thermodynamique de réacteurs à eau sous pression et à ébullition.

1. DER BEGRIFF DER MAXIMALEN HEIZFLÄCHENBELASTUNG

Wärmeübertragung durch Sieden erlaubt sehr hohe Wärmestromdichten, da -- bedingt durch die kräftige Rührwirkung der Dampfblasen und durch die in Form von Verdampfungswärme von jeder Dampfblase aufgenommene Energie -- ein hoher und intensiver Wärmetransport gewährleistet ist. Mit steigender Heizflächenbelastung verbessern sich zunächst sogar noch diese wärmeübertragenden Eigenschaften, um dann jedoch plötzlich bei Erreichen eines kritischen Wertes, der sog. maximalen Heizflächenbelastung beim Sieden, äußerst stark abzufallen.

Diese maximale Heizflächenbelastung wurde zum ersten Male von NUKIYAMA [1] an einem elektrisch beheizten Draht untersucht, der horizontal in einem Wasserbad atmosphärischen Druckes ausgespannt war. NUKIYAMA fand die in Bild 1 dargestellte charakteristische Abhängigkeit der Heizflächenbelastung von der Übertemperatur des Drahtes gegen das Wasserbad. Sein Experiment ergab vier verschiedene Bereiche für den Wärmeübergangsmechanismus zwischen Draht und Wasser. In dem in Bild 1 mit I gekennzeichneten Bereich herrscht freie Konvektion und die Wärme wird durch aufsteigende heiße Flüssigkeitsballen vom Draht abgeführt. Beim Übergang in den Bereich II setzt Sieden ein und es bilden sich Dampfblasen

auf der Drahtoberfläche, die mit steigender Heizflächenbelastung immer zahlreicher werden. Die rechte Grenze von Bereich II ist durch das Erreichen der maximalen Heizflächenbelastung beim Sieden gekennzeichnet. Überschreitet man diese Grenze und kommt in Bereich III, so geht die Blasenverdampfung in eine instabile Filmverdampfung über.

Die Heizflächenbelastung nimmt hier mit steigender Temperaturdifferenz zwischen Draht und Wasser ab. Im Bereich IV schließlich herrscht stabile Filmverdampfung und die Übertemperatur des Drahtes steigt rasch zu hohen Werten, die schließlich zu einer Zerstörung des Materials führen.

Bei flüssigkeitsgekühlten Kernreaktoren und anderen hoch beanspruchten Anlagen hat die Größe der maximalen Heizflächenbelastung entscheidende Bedeutung. Von ihr ist die äußerste Grenze des sicheren Betriebes der Anlage abhängig. Die Brennstoffelemente der Druck- und Siedewasserreaktoren werden im Bereich großer Leistung meist durch Zwangskonvektion gekühlt. Dadurch überlagern sich den thermodynamischen Parametern eine Reihe hydrodynamischer Einflüsse, die das Problem der maximalen Heizflächenbelastung beim Sieden noch wesentlich komplizierter machen.

2. ZIEL DER VERSUCHE

In den vergangenen 20 Jahren wurden in allen Ländern, die sich mit Reaktortechnik befassen, insbesondere aber in den Vereinigten Staaten von Amerika, eine große Anzahl experimenteller und theoretischer Untersuchungen über die maximale Heizflächenbelastung beim Sieden durchgeführt. Im Rahmen eines Forschungsvertrages mit EURATOM laufen auch im Versuchsfeld der Abteilung für Kernenergieanlagen der M.A.N. experimentelle Untersuchungen über dieses Problem.

Die maximale Heizflächenbelastung beim Sieden hängt von einer Anzahl thermodynamischer, hydrodynamischer und geometrischer Parameter ab, wie z. B. Druck, Temperatur, Dampfgehalt, Strömungsgeschwindigkeit und Krümmung der beheizten Oberfläche, deren quantitativer Einfluß in zahlreichen experimentellen Arbeiten untersucht wurde. Bis heute liegen jedoch keine Erfahrungen darüber vor, wie das

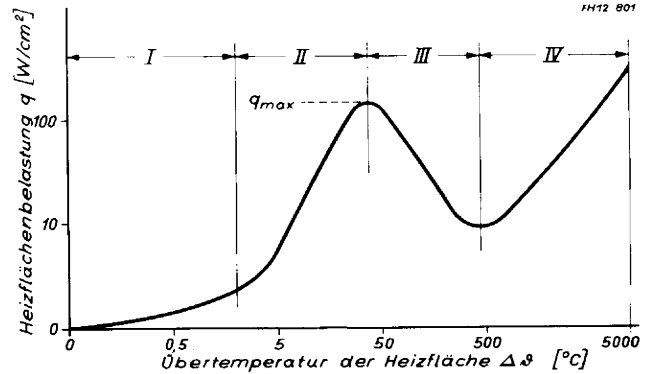


Bild 1 Siedekurve

Strömungsprofil und die Vorgeschichte der Strömung die maximale Heizflächenbelastung beim Sieden beeinflussen. Unter Vorgeschichte ist in diesem Fall der Einfluß der Art der Strömung am Eintritt in den Versuchskanal und der Einfluß des Schlankheitsgrades, d. h. der Einfluß des Verhältnisses von Länge des Versuchsrohres zu seinem hydraulischen Durchmesser, zu verstehen.

Unsere Messungen der kritischen Heizflächenbelastung beim Sieden werden durchgeführt an Einzelrohren von 5 bis 15 mm hydraulischem Durchmesser bei Drücken von 70 bis 200 at. Das Versuchsprogramm beinhaltet folgende Parameter:

Druck	70 bis 200 at
Temperatur am Versuchskanaleintritt	200 bis 364°C
Dampfgehalt am Versuchskanaleintritt	0 bis 10 Prozent
Unterkühlung unter Sättigungstemperatur am Versuchskanaleintritt	bis zu 80°C
Mengenstrom	200 bis 400 g/cm²s
Schlankheitsgrad des Versuchskanals	5 bis 140

3. BESCHREIBUNG DER VERSUCHSANLAGE

Bild 2 zeigt den Aufbau der Versuchsanlage. Vollentsalztes und entgastes Wasser wird mittels der Umwälzpumpe 6 über 3 Mengenmeßblenden, die wahlweise zu- und abgeschaltet werden können, in den Vorwärmer 7 gedrückt, wo das Wasser durch eine elektrische Widerstandsheizung auf den am Versuchskanaleintritt

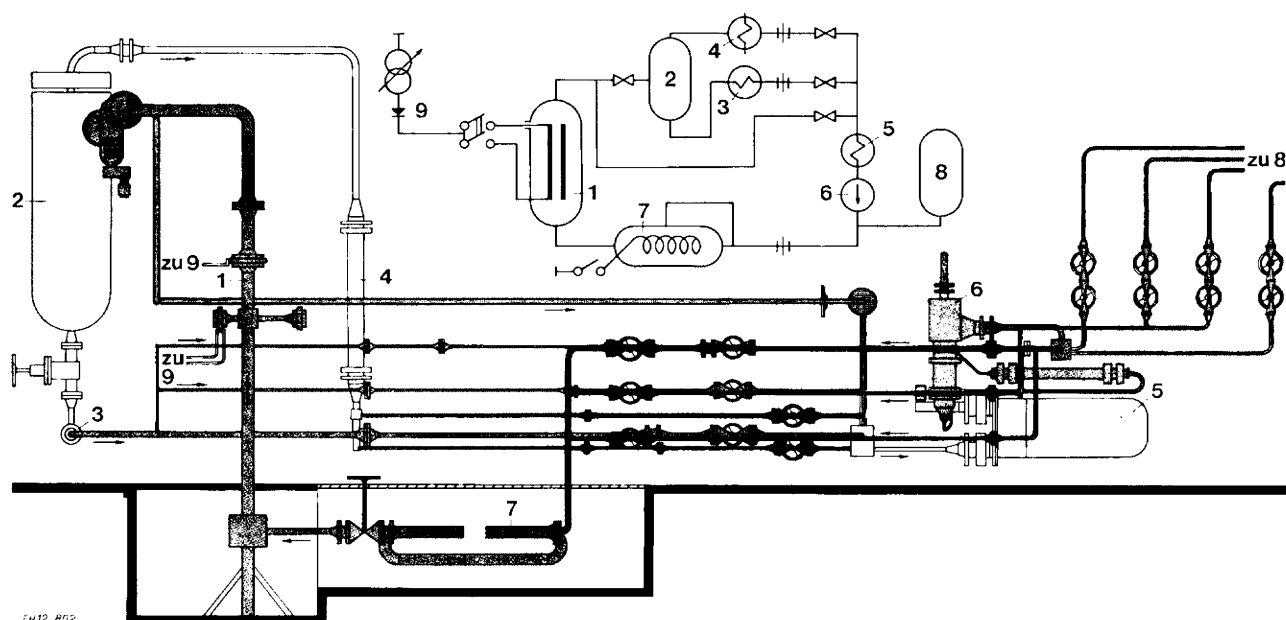


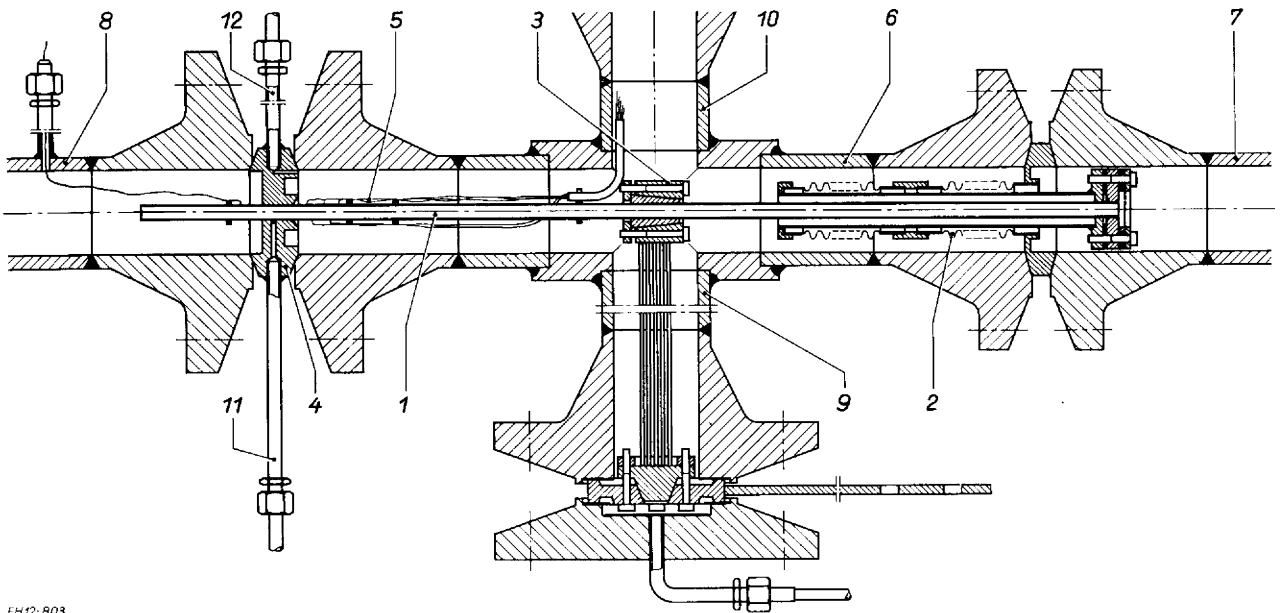
Bild 2 Schema der Versuchsanlage

- | | | |
|---------------|-------------------|------------------|
| 1 Meßstrecke | 2 Dampfabscheider | 5 Kühler |
| 4 Kondensator | 5 Kühler | 6 Pumpe |
| 7 Vorwärmer | 8 Druckerzeuger | 9 Stromzuführung |

erwünschten Zustand erwärmt und auch teilweise verdampft werden kann. Vom Vorwärmer 7 strömt das Medium in die Meßstrecke 1 ein, die den für die Untersuchung der maximalen Heizflächenbelastung jeweils vorgesehenen Kanal enthält. Das im Versuchskanal entstehende Wasser-Dampf-Gemisch strömt dem Dampfabscheider 2 zu und wird dort getrennt. Der trocken gesättigte Dampf wird im Kondensator 4 kondensiert und das abgeschiedene Wasser im Kühler 5 etwas unter Sättigungstemperatur unterkühlt. Die Kondensatmenge und die abgeschiedene Wassermenge werden in getrennten Mengenmeßblenden bestimmt. Hinter diesen Mengenmeßstrecken vereinigen sich beide Mengenströme und gelangen über den Kühler 5 zum Ausgangspunkt des Kreislaufes der Pumpe 6. Um bei Versuchen mit dampffreiem Wasser den Druck im Kreislauf regeln zu können, ist der Druckerzeuger 8 vorgesehen. Die installierte elektrische Heizleistung beträgt 400 kW im Versuchskanal und 200 kW im Vorwärmer.

Die Anordnung der eigentlichen Meßstrecke ist in Bild 3 dargestellt. Der Versuchskanal 1, ein innen von Wasser durchströmtes Rohr, an dem die Untersuchungen der maximalen Heizflä-

chenbelastung beim Sieden vorgenommen werden, ist von einem Autoklaven umschlossen. Der Autoklav besteht im wesentlichen aus dem dickwandigen Rohr 6, in dem der Versuchskanal 1 zentrisch gelagert ist. Seitlich an dieses Rohr sind in einem Winkel von 90° zwei weitere Rohre 9 und 10 angeschweißt, in denen die Kupferschienen 5 für den Heizstrom, die Meßleitungen für die Thermoelemente 5 und die Spannungsabgriffe verlegt sind. Der Versuchskanal, dessen Wand zur Beheizung als Ohmscher Widerstand dient, ist oben in eine Linse 4 eingelötet, die zugleich Halterung und negative Stromschiene ist. Diese Linse 4 schließt den Raum zwischen Versuchskanal 1 und Druckrohr 6 nach oben dicht ab. Nach unten wird dieser Raum von dem Axialkompensator 2 gasdicht begrenzt, der auf der einen Seite an die zwischen den Druckrohren 6 und 7 angebrachte Dichtungslinse angeschweißt, auf der anderen Seite mit dem Versuchskanal 1 druckdicht und elektrisch isoliert verschraubt ist. Der so umschlossene Raum wird mit Stickstoff gefüllt. Da der Axialkompensator 2, der eine ungehinderte Wärmedehnung des Versuchskanals gewährleistet, nur einen begrenzten Differenzdruck aufnehmen kann, muß der Gasdruck im Stickstoffraum, d. h. zwischen Versuchskanal 1 und Druckrohr 6, nahezu gleich dem Druck des Wassers am Versuchskanaleintritt sein. Diese Druckgleichheit wird durch ein automatisch arbeitendes Druckausgleichssystem gewährleistet.



FH12-803

Bild 3 Meßstrecke

- | | |
|---|--------------------|
| 1 Versuchskanal | 2 Axialkompensator |
| 5 Kupferschienen (+ Pol) | 4 Linse (- Pol) |
| 5 Thermoelemente | 6, 7, 8 Druckrohr |
| 9, 10 Rohr für Stromanschlüsse und Meßleitungen | |
| 11 Druckentnahme, Differenzdruckmesser | |
| 12 Ent- und Belüftung des Gasballastraumes | |

Bei der Untersuchung der kritischen Heizflächenbelastung beim Sieden ist es notwendig, die Oberflächentemperatur des beheizten Kanals genau zu messen, um daraus auf die Wärmeübergangsbedingungen und das Einsetzen des Filmsiedens schließen zu können. Der Übergang vom Blasenieden zum Filmsieden erfolgt meist sehr rasch und es müssen deshalb die Temperaturmeßsonden eine sehr hohe Ansprechgeschwindigkeit gegenüber schnellen Änderungen der Oberflächentemperatur aufweisen. Befestigt man die Heißlötstelle eines Thermoelementes unmittelbar auf der beheizten Oberfläche, so ist zwar eine sehr hohe Ansprechgeschwindigkeit garantiert, infolge der endlichen Ausdehnung der Lötstelle überlagert sich jedoch der Thermospannung eine hohe Fehler-spannung, die von dem Spannungsabfall herrührt, der längs des vom Strom durchflossenen Versuchskanals herrscht.

Zur Messung der Oberflächentemperatur am elektrisch beheizten Versuchskanal wurden bei unseren Arbeiten besondere Temperaturmeßsonden entwickelt, die es gestatten, den Temperaturverlauf im Zeitpunkt des äußerst ra-

schen Umschlages vom Blasen- zum Filmsieden, d. h. bei Erreichen der maximalen Heizflächenbelastung, verzögerungsfrei und mit großer Genauigkeit zu messen. Diese Temperaturmeßsonden sind sogenannte Doppelthermoelemente, deren Aufbau Bild 4 zeigt. Sie bestehen aus drei Drähten, die in einem gegenseitigen Abstand von rund 0,5 mm nebeneinander auf die stromführende Oberfläche aufgeschweißt oder aufgelötet werden. Die beiden äußeren Thermodrahtschenkel bestehen aus thermoelektrisch gleichartigem Material, während für den inneren Thermoschenkel ein Werkstoff verwendet wird, der in der elektrischen Spannungsreihe abweicht. Die zwischen den Drähten liegenden Rohrstücke bilden die in Bild 4 dargestellten Widerstände R_7 und R_8 einer Wheatstoneschen Brücke. Die restlichen beiden Widerstände dieser Brückenschaltung, sind die Teilwiderstände R_1 und R_2 eines Potentiometers, dessen Schleifer mit dem mittleren Draht verbunden ist. Diese Anordnung erlaubt mit relativ geringem Aufwand eine Kompensation der vom Heizstrom herrührenden, oben erläuterten Fehlerspannung, wie sie bei normalen Thermoelementen auftritt.

Die Doppelthermoelemente befinden sich auf der äußeren ungekühlten Seite des Versuchsröhrchen, und zwar am oberen Ende der beheizten Länge. Die Anzeige der Thermospannungen erfolgt über einen Lichtlinien-Oszillographen, dessen hochempfindliche Drehspulgalvanome-

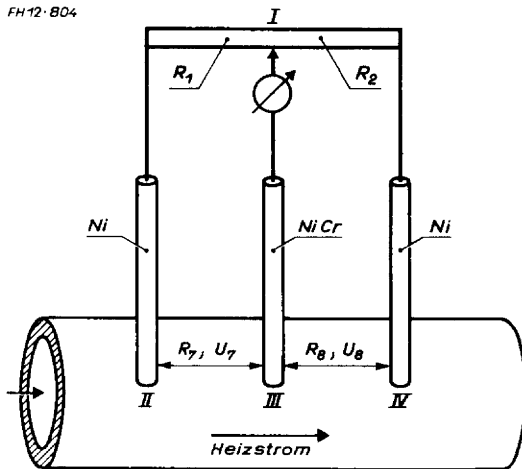


Bild 4 Schaltung des Doppelthermoelementes

ter Temperaturschwankungen bis zu einer Frequenz von 90 Hz folgen können.

Als Sicherheitseinrichtung zum Abschalten des Heizstromes beim Einsetzen des Filmsiedens wird ein sogenannter Burnout-Detektor verwendet. Burnout ist ein besonders im Amerikanischen häufig verwendetes Wort, das das Einsetzen des Filmsiedens und damit das Erreichen der maximalen Heizflächenbelastung beim Sieden kennzeichnet. Bei diesem Burnout-Detektor wird zur Feststellung des unzulässigen Temperaturanstieges beim Einsetzen des Filmsiedens die Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes des Versuchskanals herangezogen. Im Prinzip handelt es sich bei der Schaltung dieses Gerätes um eine Wheatstone'sche Brücke, bei der der elektrische Widerstand der oberen Hälfte der beheizten Länge des Versuchskanals mit dem der unteren Hälfte verglichen wird. Anstelle des bei der Wheatstone'schen Brücke üblicherweise eingebauten Galvanometers befindet sich ein Differenzverstärker, der die bei Beginn des Filmsiedens auftretende Verstimmungsspannung der Brücke vervielfacht und über ein Relais einen Steuerkreis zur Abschaltung des Heizstromes betätigt.

Die Messung der Temperatur des Strömungsmediums an den verschiedenen Stellen im Versuchskreislauf erfolgt mit stahummantelten Thermoelementen, die einen Manteldurchmesser von 3 mm besitzen. Diese Thermoelemente sind alle so eingebaut, daß der Meßfehler infolge Wärmeableitung von der Lötstelle vernachlässigbar klein ist und keine unkontrollier-

baren „wilden“ Thermospannungen an den Anschlußstellen der Verlängerungsleitungen und an den Klemmen der Meßinstrumente entstehen können. Der Druck wird mit geeichten Präzisionsmanometern zum Teil auch mit einer nach dem Prinzip des gewichtsbelasteten Kolbens arbeitenden Druckwaage gemessen, die gleichzeitig als Geber für die Druckregelung wirkt.

Zur Messung der durch den Versuchskanal strömenden Wassermenge werden Normblenden verwendet, deren Wirkdruck an Quecksilber-Differenzdruckmanometern angezeigt wird. Zur Kontrolle der Strömungsverhältnisse im Versuchskanal ist kurz vor der Meßstrecke ein Drehflügel-Mengenmesser, Pottermeter genannt, eingebaut. Dieses Pottermeter hat die Aufgabe, das Verhalten des Mengenstromes beim Einsetzen des Filmsiedens zu registrieren.

4. VERSUCHSERGEBNISSE

Wie bereits erwähnt, haben die Versuche zum Ziel, den Einfluß des Längen-Durchmesser-Verhältnisses des Versuchskanals sowie den Einfluß der am Eintritt zum Versuchskanal herrschenden Einlaufbedingungen auf die kritische Heizflächenbelastung beim Sieden zu untersuchen. Um den Einfluß des Rohrdurchmessers auszuschalten, wurden zunächst alle Messungen mit einem konstanten Innendurchmesser von 7 mm durchgeführt. Klarer Versuchsbedingungen wegen wurde vorerst der Druck auf den Bereich von 70 bis 100 at beschränkt. Der thermodynamische Zustand am Eintritt des Versuchskanals erstreckte sich von Sättigung bis zu 30 Prozent Unterkühlung, wobei Unterkühlung

definiert ist als der Koeffizient von $x_E = \frac{i - i'}{r}$

Hierbei bedeuten i die Enthalpie des Strömungsmediums, i' die dem jeweiligen Druck entsprechende Sättigungsenthalpie und r die Verdampfungswärme.

In einer ersten Versuchsreihe wurde das untere Ende des Versuchskanals so ausgebildet, daß die Strömung unmittelbar am Beginn der beheizten Länge über einen scharfkantigen, nicht abgerundeten Einlauf in den Versuchskanal eintrat, so daß der Beginn der hydrodynamischen Einlaufstrecke mit dem Beginn der beheizten

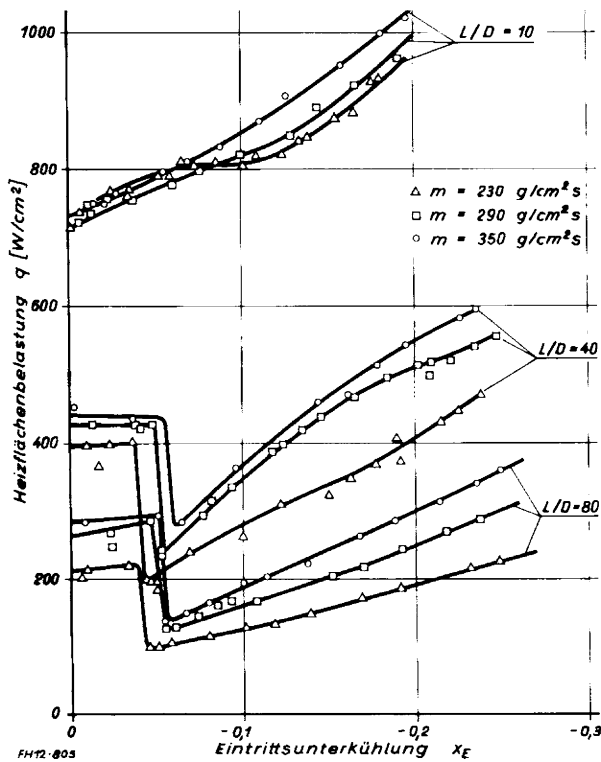


Bild 5 Kritische Heizflächenbelastung bei 70 ata für verschiedene L/D -Verhältnisse

Rohrlänge und damit mit dem Ausgangspunkt für die Entwicklung des thermischen Strömungsprofils zusammenfällt. Unter thermischem Strömungsprofil ist die Dichte- bzw. Temperaturverteilung, unter hydrodynamischem Profil die Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit quer zur Strömungsrichtung zu verstehen. Mit diesen Einlaufbedingungen wurden die maximalen Heizflächenbelastungen beim Sieden an Rohren mit L/D -Verhältnissen von 5, 10, 40, 80 und 140 gemessen.

In Bild 5 sind in Abhängigkeit vom Unterkühlungsgrad des Strömungsmediums am Eintritt des Versuchskanals die Meßergebnisse für L/D -Verhältnisse von 10, 40 und 80 aufgetragen. Der Druck war bei diesen Messungen konstant 70 ata, die Mengenströme betrugen 230, 290 und 350 $\text{g/cm}^2\text{s}$. Auffallend ist die sprunghafte Änderung der kritischen Heizflächenbelastung bei einer Eintrittsunterkühlung von $x_E = -0,05$. Sie ist darauf zurückzuführen, daß bei den Versuchen zwei verschiedene Arten der Siedekrise auftraten, wobei unter Siedekrise der Umschlag vom Blasen- zum Filmsie-

den zu verstehen ist. Bei der einen Art treten unmittelbar vor Einsetzen des Filmsiedens Schwankungen in Druck und Mengenstrom auf. Die zweite Art der Siedekrise zeigt ein hydrodynamisch vollkommen stabiles Verhalten bis zum plötzlichen Temperaturanstieg in der Wand des Versuchskanals mit Beginn des Filmsiedens. Aufgrund der vorangehenden Schwankungen in Druck und Mengenstrom könnte man die erste Art der Siedekrise als pulsierende Siedekrise bezeichnen. Sie führt zu Werten der kritischen Heizflächenbelastung, die bis zu 50 Prozent unter den Werten der hydrodynamisch stabilen Siedekrise liegen. Der Umschlagpunkt von Siedekrise 1 zu Siedekrise 2 kann sich in einem weiten Qualitätsbereich verschieben und ist abhängig vom Druck, vom Mengenstrom, vom L/D -Verhältnis des Versuchskanals sowie vom Dämpfungsverhalten und von der Resonanzfrequenz der an die Meßstrecke unmittelbar angeschlossenen Rohrleitungen und Apparate des Versuchsstandes. Bei sehr kurzen Meßstrecken mit einem L/D -Verhältnis von 10 und weniger tritt, wie Bild 5 zeigt, bei Mengenströmen über 250 $\text{g/cm}^2\text{s}$ die pulsierende Siedekrise nicht mehr auf und die hydrodynamisch stabile Siedekrise erstreckt sich bis zu großen Unterkühlungsgraden.

Aus Bild 5 ist auch der Einfluß des L/D -Verhältnisses auf die kritische Heizflächenbelastung beim Sieden abzulesen. Da der thermodynamische Zustand am Eintritt des Versuchskanals als Abszisse gewählt wurde, ist zu beachten, daß als zweiter Parameter neben dem L/D -Verhältnis der Dampfanteil am Ort des Filmsiedens, der mit wachsender beheizter Länge steigt, mit eingeht.

Bild 6 zeigt Werte für die kritische Heizflächenbelastung bei einem Druck von 100 ata. Die anderen Parameter, wie Mengenstrom, L/D -Verhältnis, Rohrdurchmesser und Einlaufbedingungen entsprechen vollkommen den oben gezeigten Versuchsergebnissen. Vergleicht man Bild 6 mit Bild 5, so ist festzustellen, daß infolge des erhöhten Druckes die erreichbaren Werte der kritischen Heizflächenbelastung geringfügig abgefallen sind. Dafür tritt bei diesem höheren Druck, bedingt durch den geringeren Dichteunterschied zwischen Wasser und Dampf, die pulsierende Siedekrise nur mehr bei langen Versuchskanälen auf.

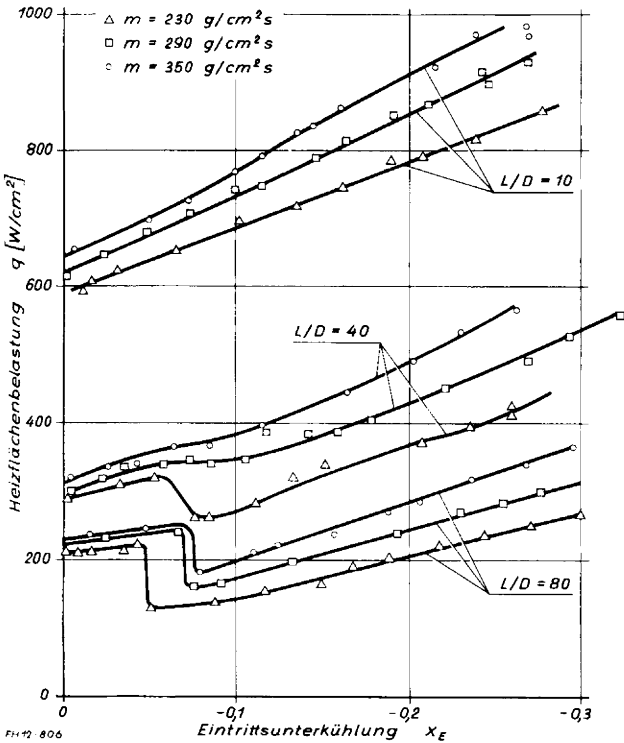


Bild 6 Kritische Heizflächenbelastung bei 100 ata für verschiedene L/D -Verhältnisse

Den Verlauf der kritischen Heizflächenbelastung bei Versuchskanälen mit einem L/D -Verhältnis von 140 und 5 zeigen die Bilder 7 und 8. Aus Bild 7 geht hervor, daß sich mit ganz kurzen Kanälen bei Mengenströmen von nur 200 bis 500 $\text{g/cm}^2\text{s}$, was einer mittleren Wassergeschwindigkeit von 3 bis 4 m/s entspricht, Heizflächenbelastungen von über 1000 W/cm^2 erreichen lassen. Dieser starke Anstieg in der Heizflächenbelastung läßt sich vielleicht damit erklären, daß mit abnehmender Kanal-länge die Stelle, an der das Filmsieden eintritt, immer stärker in den Bereich der Einlaufturbulenz gerät. Bei gleichmäßig beheizten Kanälen ist, wie bereits DE BORTOLI [2], LOTTES [5] und andere feststellten, das Filmsieden immer am Ende des beheizten Kanales zu beobachten. Im Bereich der Einlaufströmung herrscht neben der heftigen Querturbulenz in Wandnähe ein wesentlich steileres thermisches Profil

als bei voll ausgebildeter Strömung. Je größer aber der Dichtegradient in der wandnahen Grenzschicht ist, desto intensiver ist der Stoff- und Wärmeaustausch zwischen beheizter Wand und Flüssigkeit.

Um den Einfluß der hydrodynamischen Einlaufbedingungen auf die kritische Heizflächenbelastung beim Sieden zu untersuchen, wurde in einer neuen Versuchsreihe vor die beheizte Länge des Versuchskanals eine unbeheizte ungestörte Einlaufstrecke geschaltet, die denselben Durchmesser wie der Versuchskanal besaß und deren Länge das 60fache des Durchmessers betrug. Dadurch wurde gewährleistet, daß die Strömung zu Beginn der beheizten Strecke

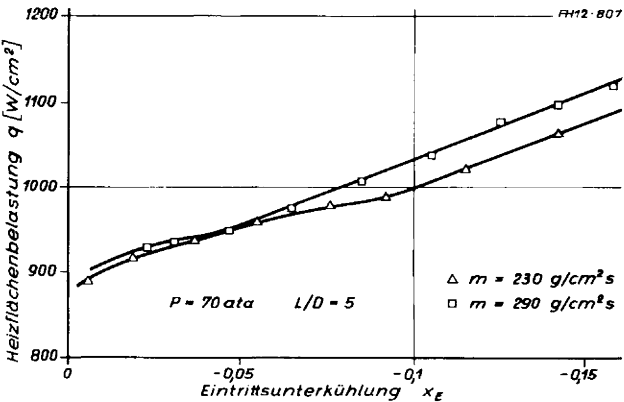


Bild 7 Kritische Heizflächenbelastung bei 70 ata und einem L/D -Verhältnis = 5

hydrodynamisch voll ausgebildet war. Der Einfluß dieser Einlaufstrecke ist nur bei kurzen beheizten Längen bemerkbar. Als Beispiel sind in Bild 9 die Unterschiede für ein L/D -Ver-

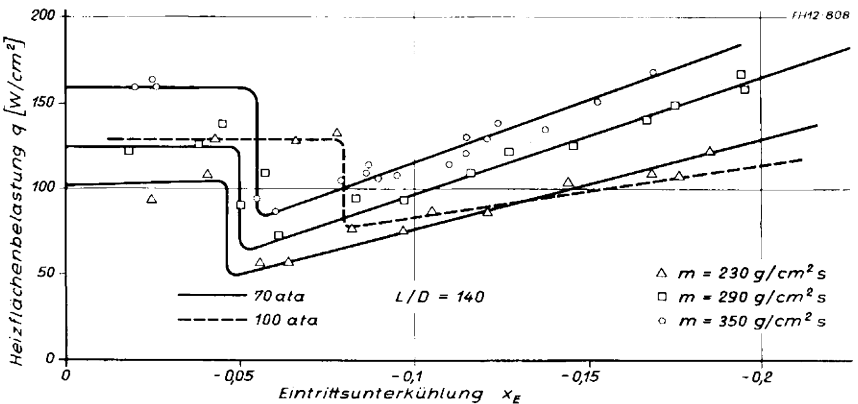


Bild 8 Kritische Heizflächenbelastung bei 70 und 100 ata und bei $L/D = 140$

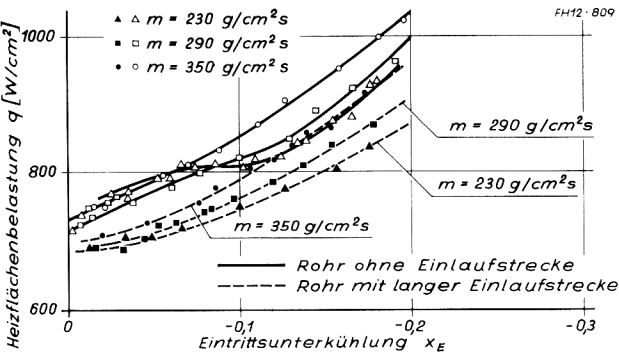
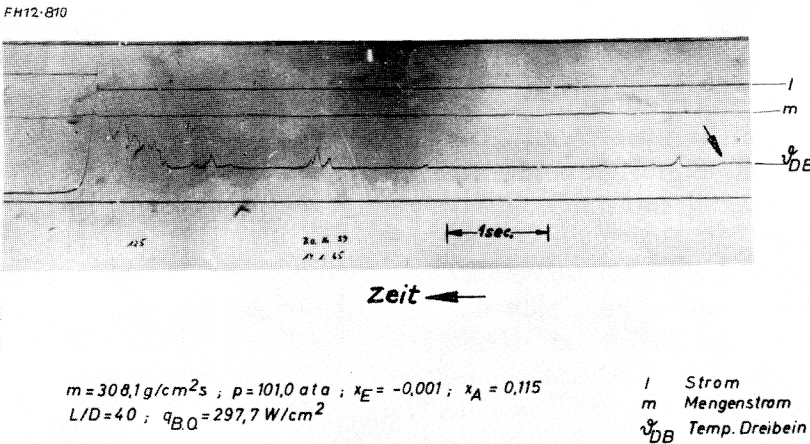


Bild 9 Einfluß der hydrodynamischen Einlaufbedingungen auf die kritische Heizflächenbelastung bei $L/D = 10$

hältnis von 10 aufgetragen. Die gestrichelten Linien in diesem Bild gelten für einen Versuchskanal mit langer Einlaufstrecke, die ausgezogenen Linien für einen ohne Einlaufstrecke. Die vorgeschaltete Einlaufstrecke bewirkt, daß sich das hydrodynamische Strömungsprofil bis zum Ort der Siedekrisis voll ausgebildet hat. Das thermische Strömungsprofil kann sich erst vom Beginn der beheizten Länge an ausbilden. Damit läßt sich aus den beiden Kurvenscharen von Bild 9 deutlich der Einfluß des hydrodynamischen Strömungsverhaltens am Ort der Siedekrisis auf die kritische Heizflächenbelastung beim Sieden ansehen. Wie bereits erwähnt, wurden bei den vorliegenden Messungen zwei verschiedene Arten der Siedekrisis festgestellt, von denen die eine als hydrodynamisch stabiler Burnout, die andere als hydrodynamisch instabiler oder pulsierender Burnout bezeichnet wurde. Den Verlauf von Temperatur und Mengenstrom im Augenblick des Übergangs vom Blasen- zum Filmsieden für jede dieser beiden Arten der Siedekrisis zeigen die Bilder 10 und 11, die eine fotografische Wiedergabe von während des Versuches mit Hilfe eines Lichtlinienschreibers aufgenommenen Oszillogrammen sind. Die Zeit als Abszisse läuft von rechts nach links, als Ordinate sind die Temperatur bzw. der Mengenstrom aufgetragen. Um den Augenblick zu kennzeichnen, in dem der Burnout-Detektor die Wärmezufuhr abschaltet, wurde auch der Strom, der den Versuchskanal elektrisch beheizt, in dem Oszillogramm mit wiedergegeben. Hierbei ist auch zu beachten, daß das Galvanometer für den Strom umgekehrt gepolt war wie die Galvanometer, die Temperatur und Mengenstrom anzeigten. Wie aus Bild 10 hervorgeht, bleibt bei der hydrodynamisch stabilen Siedekrisis der Mengenstrom bis zum Einsetzen des Filmsiedens vollkommen konstant und zeigt auch im Augenblick des Burnout kaum eine merkliche Änderung. Am rechten Ende von Bild 10 ist an der mit einem Pfeil gekennzeichneten Stelle deutlich zu sehen, wie die Temperatur der beheizten Oberfläche zunächst leicht abnimmt, sich dann kurzzeitige statistische Schwankungen ausbilden, die schließlich in einem fast stufenförmigen Anstieg zum Filmsieden führen. Das leichte Absinken der Temperatur, wenige Sekunden bevor das Filmsieden ausgebildet ist, läßt auf eine Verbesserung des Wärmeübergangs durch völliges Verdampfen der bis dahin bestehenden zweiphasigen Grenzschicht schließen. Die anschließenden statistischen Temperaturschwankungen weisen darauf hin, daß sich auf der Heizfläche örtliche Dampfflecke und damit heiße Stellen gebildet haben, die zu Anfang jedoch immer wieder von der Flüssigkeit benetzt werden können, bis schließlich das Filmsieden über eine größere Zone einsetzt. Die Schwankungen im Mengenstrom bei pulsierendem Burnout, die in Bild 11 wiedergegeben sind, wurden mit Hilfe des Drehflügel-Mengenmessers aufgenommen. Es ist deutlich

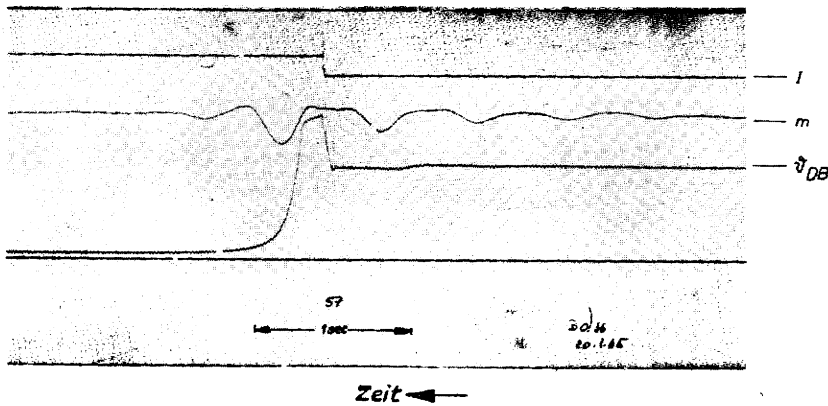


$m = 308,1 \text{ g/cm}^2\text{s}$; $p = 101,0 \text{ ata}$; $x_E = -0,001$; $x_A = 0,115$
 $L/D = 40$; $q_{BQ} = 297,7 \text{ W/cm}^2$

I Strom
m Mengenstrom
 t_B Temp. Dreiein

Bild 10 Verlauf von Temperatur und Mengenstrom im Augenblick der hydrodynamisch stabilen Siedekrisis

FH12-811



$m = 350 \text{ g/cm}^2 \text{ s}$; $p = 100 \text{ ata}$; $x_E = -0,208$; $x_A = -0,006$;
 $L/D = 80$; $q_{BO} = 285 \text{ W/cm}^2$

I Strom
 m Mengenstrom
 ϑ_{DB} Temp. Dreibein

Bild 11 Verlauf von Temperatur und Mengenstrom im Augenblick der pulsierenden Siedekrisis

zu sehen, wie der Mengenstrom bis wenige Sekunden vor dem Burnout vollkommen stabil verläuft und sich dann die Schwingungsamplituden nach der ersten Erregung, die vom Siedevorgang im Versuchsrohr ausgeht, zunehmend vergrößern. Auch hier ist wieder kurz vor dem Filmsieden ein leichter Rückgang in der Temperatur der beheizten Kanalwand festzustellen. Der Temperaturanstieg beim Filmsieden erfolgt wesentlich rascher als beim hydrodynamisch stabilen Burnout. Auffallend ist, daß die Wandtemperatur des Versuchskanals nach Abschalten der Wärmezufuhr noch 0,1 bis 0,2 Sekunden nahezu konstant bleibt. Dies ist darauf zurückzuführen, daß sich – hervorgerufen durch die Pulsationen im Augenblick der Siedekrisis – ein Dampfpolster im Versuchskanal gebildet hat, das erst durch das von der Umwälzpumpe geförderte nachfließende Wasser wieder verdrängt werden muß. Von da ab setzt dann die Kühlung voll ein, wie der weitere Verlauf der Temperatur zeigt.

Ein Vergleich unserer Ergebnisse mit neuesten Messungen von SILVESTRI [4], BECKER [5] sowie von LEE und OBERTELLI [6] zeigten gute Übereinstimmung.

5. PRAKTISCHE FOLGERUNGEN FÜR DIE THERMODYNAMISCHE AUSLEGUNG VON DRUCK- UND SIEDEWASSERREAKTOREN

Die Versuche geben eine Reihe wichtiger Berechnungsunterlagen und Hinweise für eine besserethermodynamische Auslegung des Cores von Druck- und Siedewasserreaktoren. Abgesehen von den Zahlenwerten der Versuchsergebnisse, die zur Aufstellung von Burnoutkriterien für Brennelemente beitragen, sind vor allem der Einfluß der Einlaufturbulenz und die Gefahr der durch Siede-

vorgänge hervorgerufenen Pulsationen von Bedeutung.

Wie die Versuchsergebnisse zeigten, liegt die kritische Heizflächenbelastung in der Zone der Einlaufturbulenz um einen merklichen Wert höher, als wenn sich das thermische und hydrodynamische Strömungsprofil voll ausgebildet hat. Man kann diese Einlaufturbulenz durch geeignete Wahl und Anordnung der aus Gründen der Festigkeit ohnehin zwischen den einzelnen Brennstoffstäben notwendigen Distanzhalter über die ganze Länge eines Brennelementes ausdehnen. Die Form dieser Distanzhalter oder sogenannten Spacer ist so zu wählen, daß sie die bis dahin aufgebaute Strömungsform vollständig zerstören und sich stromabwärts in ihrem Nachlauf ein neues Strömungsprofil aufbauen muß. Je turbulenter dieser Nachlauf, desto besser sind die Bedingungen für den Stoff- und Wärmeaustausch und desto höhere Heizflächenbelastungen können zugelassen werden, bis die Gefahr der Siedekrisis gegeben ist. Vermieden muß jedoch werden, daß sich unmittelbar hinter den Distanzhaltern Strömungsschatten bilden, die zu Totwasserzonen sowie Dampfnestern und damit zu Gebieten schlechter Kühlung führen. Diesen Forderungen entsprechen am ehesten Spacer, die mit kleinen Drallblechen versehen oder nach Art von Siebblechen aufgebaut sind, die mit besonderen, die Strömung an die Wand des Brennstoffstabes drück-

kenden Leitblechen bestückt sind. Der Abstand in Strömungsrichtung zwischen zwei Spacern soll, wie aus den Versuchen hervorgeht, zwischen dem 10- bis 40fachen des hydraulischen Durchmessers des Kühlkanales liegen. Selbstverständlich erhöhen diese Einbauten den Druckverlust im Core. Vergegenwärtigt man sich jedoch, daß der Druckverlust im Core bei den meisten Druck- und Siedewasserreaktoren nur der kleinere Teil des gesamten Primärkreisverlustes ist, so ist diese Erhöhung, gemessen am Gewinn in der übertragbaren Wärmemenge, nicht von Bedeutung.

Die Versuche zeigten weiterhin, daß unter gewissen hydrodynamischen und thermodynamischen Bedingungen, insbesondere im Bereich unterkühlten Siedens, Pulsationen im Druck und Mengenstrom des Kühlmediums entstehen können, die einen Burnout zur Folge haben, dessen kritische Heizflächenbelastung wesentlich unter den Werten der hydrodynamisch stabilen Siedekrise liegt. Das Core eines Druckwasserreaktors, das aus einer großen Zahl paralleler Brennelement-Kanäle besteht, ist hierfür um so anfälliger, je geringer das Verhältnis Druckabfall im Core zum Druckabfall im gesamten Primärkreis, je kleiner der Mengenstrom, je länger der Brennelementkanal und je niedriger der Systemdruck im Primärkreis ist. Steigt in einem Brennelementkanal der Strömungswiderstand infolge erhöhten Siedens, so kann dies leicht, da die Druckdifferenz und damit die treibende Kraft über den ganzen Querschnitt des Cores gleich ist, zu einer starken Verminderung der Strömung in diesem Kanal führen, wobei die Durchsatzmenge in den be-

nachbarten Kanälen geringfügig steigt. Dies ist der Ausgangspunkt für die Pulsationen.

Durch geeignete konstruktive Maßnahmen ist es, wie die aus den Versuchen gewonnene Erfahrung lehrt, weitgehend möglich, die Ausbildung dieser Pulsationen zu vermeiden. Alle schwingungsfähigen Räume stromaufwärts des Cores begünstigen die Pulsation, deshalb ist es zweckmäßig, den bei Druckwasserreaktoren notwendigen Druckhalter, der als Windkessel wirkt und ein kompressibles Dampfpolster enthält, stromabwärts vom Core, am besten zwischen Wärmetauscher und Umwälzpumpe, anzuschließen. Am Eintritt zu den Brennelement-Kanälen des Cores eingebaute Drosselstellen verhindern durch Reflektion der pulsierenden Druckwellen deren Auswirkung auf den Flüssigkeitsnachschub und tragen so ebenfalls zur Stabilisierung der Strömung bei.

SCHRIFTTUM

- [1] S. Nukiyama: J. Soc. Mech. Eng. Japan 37, No. 206 (1954), S. 567.
- [2] R. A. De Bortoli u. a.: Bericht WAPD-188, Oktober 1958. Westinghouse Electr. Corp. Bettis Plant, Pittsburgh, Pa., U.S.A.
- [3] P. Lottes und W. Jens: Argonne Natl. Lab. Report. ANL-4915 (1952).
- [4] M. Silvestri u. a.: Energia Nucleare, Bd. 12, Nr. 3, März 1965, S. 121/172.
- [5] K. M. Becker: Bericht AF-178, Aktiebolaget Atomenergi, Stockholm 1965.
- [6] D. E. Lee und J. D. B. Obertelli: Bericht AEEW-R-213, August 1965, UKAEA, England.