

MESSUNGEN DER KRITISCHEN HEIZFLÄCHEN-
BELASTUNG IN STABBÜNDELN BEI STATIONÄ-
REM UND INSTATIONÄREM BETRIEBSZUSTAND

D. Hein, W. Kastner, F. Mayinger
M.A.N.-Werk Nürnberg, Bundesrepublik Deutschland

Zusammenfassung

An Stabbündeln wurden Untersuchungen über den Einfluß radialer Wärme flu ß ver teil ung auf die kritische Heizflächenbelastung sowie Messungen bei Leistungsexkursionen und Mengenstromänderungen durchgeführt. Die radiale Leistungsverteilung wirft die Frage nach den Mischungsvorgängen auf. Bei raschen Leistungsexkursionen liegen die gemessenen Werte der kritischen Wärmestromdichte stets über den bei entsprechenden quastationären Bedingungen. Die Verbesserung wird stark von der Geometrie des Bündels beeinflusst. Für Mengenstromänderungen lassen sich die stationären Burnoutbeziehungen heranziehen.

1. Einleitung - Trotz der in der Literatur der letzten 10 Jahre nachgewiesenen großen Zahl von Arbeiten über die kritische Heizflächenbelastung beim Sieden sind eine Reihe spezieller Fragen über das Wärmeübergangsverhalten in den hydro- und thermodynamisch kompliziert zu berechnenden Brennelementbündeln von wassergekühlten Reaktoren noch weitgehend ungeklärt. In der Praxis läßt sich in der Regel wegen des aus Fertigungsgründen notwendigen Einbaues von Konstruktionselementen oder durch das Einbringen von Absorberstäben keine völlig gleichmäßige Wärme flu ß ver teil ung über dem Querschnitt des Bündels erzielen. Weitgehend unbekannt sind auch noch die erreichbaren Werte in der kritischen Heizflächenbelastung bei den für die Praxis in Betracht zu ziehenden instationären Vorgängen, worunter z. B. plötzliche Leistungsexkursionen oder auch der Ausfall der Hauptumwälzpumpen eines Reaktorkreislaufes zu zählen sind.

Bei M.A.N. wurden an Brennelementsegmenten von 4 und 9 Stäben hierzu Untersuchungen *) durchgeführt, deren Messungen einen Bereich von 70 bis 140 bar überdecken und die konstruktiven, hydro- und thermodynamischen Gegebenheiten von modernen Druck- und Siedewasserreaktoren imitieren. Einzelheiten dieser Meßergebnisse sind in /1/ ausführlich dargestellt. Hier soll ein kurzer Überblick über die wichtigsten Ergebnisse vermittelt werden, und es wird der Versuch unternommen, die sich daraus ergebenden Tendenzen und Gesetzmäßigkeiten aufzuzeigen.

*) Diese Arbeiten wurden im Auftrag des Bundesministeriums für wissenschaftliche Forschung (Forschungsvertrag RS 14) und der Gesellschaft für Kernenergieverwertung in Schiffbau und Schifffahrt mbH durchgeführt.

2. Kritische Heizflächenbelastung bei ungleichmäßiger radialer Leistungsverteilung

Die von jeweils drei bzw. vier Brennstoffstäben umrandeten Strömungszonen in einem Brennelementbündel sind keineswegs untereinander als strömungstechnisch völlig getrennt zu betrachten, sondern es wird sich je nach Abstand der Stäbe, Turbulenzgrad der Strömung und Enthalpieunterschied zwischen den einzelnen Zonen ein Queraustausch, das sog. Mixing, einstellen. Der Einfluß dieses Mixings auf die kritische Heizflächenbelastung beim Sieden wird umso höher sein, je ungleichmäßiger die radiale Leistungsverteilung über dem Querschnitt des Bündels ist. Aus der Literatur sind für diesen Queraustausch umfangreiche, auf einer Unterkanalanalyse aufbauende theoretische Berechnungsmodelle bekannt, die die Verteilung von Dampfgehalt und Mengenstromdichte im Bündel zu erfassen suchen, z. B. die Arbeiten von Bowring /2/, das COBRA-Rechenprogramm /3/ oder auch das Modell von van der Ros /4/.

Bild 1 zeigt anhand eines 4-Stabebündels ein willkürlich ausgewähltes Beispiel für den Einfluß unterschiedlicher Beheizung der einzelnen Stäbe auf die kritische Wärmestromdichte.

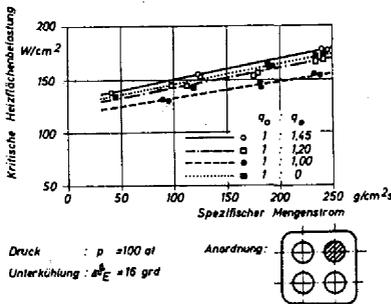


Bild 1
Einfluß des Heizkanalfaktors auf die kritische Heizflächenbelastung

Von den 4 Stäben im Bündel wiesen - wie die Skizze im Bild andeutet - jeweils 3 untereinander die gleiche Wärmestromdichte auf, während der vierte in der Regel höher belastet war und nur in einem Fall nicht beheizt wurde. Wie zu erwarten, läßt sich am heißen Stab eine umso höhere kritische Heizflächenbelastung erreichen, je niedrigeren Wärmefluß die umgebenden Stäbe aufweisen. In diesem Bild sind Verhältnisse in der radialen Leistungsverteilung dargestellt, wie sie in Druck- und Siedewasserreaktoren für Extremfälle zu erwarten sind. Eingetragen ist hier auch noch - wie die punktierte Linie zeigt - der Fall eines einzelnen, keine Energie freisetzenden Absorberstabes im Bündel.

Für theoretische Überlegungen und für eine mehr grundsätzliche Analyse des Problem es ist es zweckmäßig, die Faktoren in der radialen Leistungsverteilung wesentlich stärker als in

der Praxis üblich zu erhöhen. Ergebnisse solcher Untersuchungen, die an einem 9-Stabbündel durchgeführt wurden, sind in Bild 2 dargestellt. Es zeigt sich hier eine stark mengenstrom-

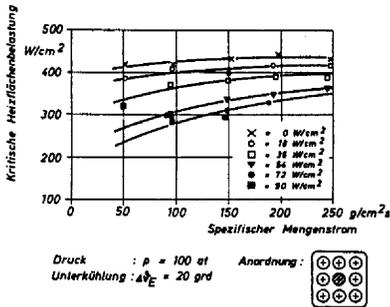


Bild 2
Kritische Heizflächenbelastung bei radialer Leistungsverteilung

abhängige Auswirkung der radialen Leistungsverteilung. Bei großen Geschwindigkeiten ist dieser Einfluß geringer, während sich bei kleinen Massenstromdichten im Bereich 50 bis 100 $\text{g/cm}^2\text{s}$ sehr unterschiedliche kritische Wärmestromdichten am zentralen Stab ergeben. Daraus ist abzuleiten, daß die Mischung und damit der Enthalpie- bzw. Dampfgehaltsausgleich über den Bündelquerschnitt mit zunehmendem Mengenstrom abnimmt, da die Verbesserung in der erreichbaren kritischen Heizflächenbelastung durch Zumischen Fluids geringerer Enthalpie aus den Nachbarkanälen mit größerer Strömungsgeschwindigkeit kleiner wird. Dies erscheint zunächst wegen des mit wachsender Reynolds-Zahl ansteigenden Turbulenzgrades der Strömung widersprüchlich. Offensichtlich hat jedoch der Dampfgehalt im Bündel, der in diesem Bild bei kleinen Strömungsgeschwindigkeiten wegen der konstanten Eintrittsunterkühlung wesentlich größere Werte aufweist als bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten, wesentlich größeren Einfluß auf den Mischungsgrad.

Im Bemühen, die Verhältnisse bei radial unterschiedlicher Wärmeflußverteilung besser zu verstehen, wurden in Bild 3 am Beispiel des bereits in Bild 1 untersuchten 4-Stabbündels für den gesamten theoretisch möglichen Bereich im Verlauf der radialen Verteilung die kritischen Werte der Wärmestromdichte und der abgegebenen Leistung des Bündels aufgetragen. Als Abszisse ist das Verhältnis der Heizflächenbelastungen zwischen Einzelstab und den übrigen drei Stäben des Bündels gewählt. Rechts von der Linie $q_w/q_0 = 1$ ist der Einzelstab, links sind die drei Bündelstäbe höher belastet; längs dieser Linie sind alle vier Stäbe gleichmäßig beheizt. Das Bild zeigt, daß ein einzelner heißer Stab auf die Energiefreisetzung in seiner Umgebung wesentlich stärker reagiert als mehrere gleichmäßig beheizte Stäbe, denen nur ein kälterer Stab gegenübersteht. Man sieht, daß in der Nähe eines einzelnen kalten Stabes die Umgebung eine um kaum mehr als 10 % höhere kritische Heizflächenbelastung erwarten läßt. Trotz des fla-

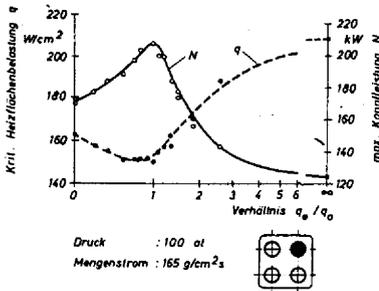


Bild 3
 Kritische Heizflächenbelastung und abgegebene Kanalleistung bei radialer Leistungsverteilung

chen Minimums in der Wärmestromdichte weist die Leistungskurve an derselben Stelle wegen der großen gleichmäßig beheizten Fläche ein ausgeprägtes Maximum auf.

Für eine klare und umfassendere Aussage über die Burnoutverhältnisse bei diesen komplizierten Vorgängen der Zweiphasenströmung in ungleichmäßig belasteten Bündeln bedarf es jedoch einer zuverlässigen Mischungstheorie und zusätzlich eines Vergleichs und einer Korrektur dieser Theorie anhand von Meßergebnissen. Für einige Meßwerte ist ein solcher Vergleich in Bild 4 dargestellt. Die theoretischen Berechnungen

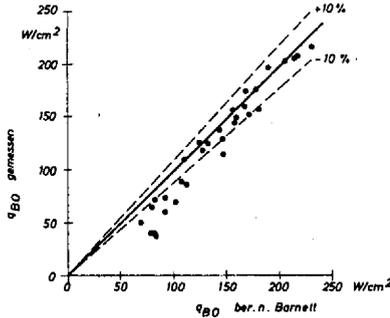


Bild 4
 Vergleich berechneter und gemessener Werte der kritischen Heizflächenbelastung bei radialer Wärme-flußverteilung

wurden von Bowring /2/ anhand seines Mixingmodells HAMBO durchgeführt. In diesem Bild sind als Abszisse die von Bowring berechneten, als Ordinate bei M.A.N. gemessenen Burnoutwerte

aufgetragen. Als Burnoutbeziehung hat Bowring die Gleichung von Barnett /5/ zugrunde gelegt. Bei diesem Vergleich ergab sich, daß für Mengenstromdichten über 150 g/cm²s Rechnung und Messung sehr gut übereinstimmen. Im Bild sind dies diejenigen Werte, die im Bereich der Heizflächenbelastung zwischen 100 und 250 W/cm² liegen. Bei niedrigen Mengenströmen gab die Rechnung höhere kritische Heizflächenbelastung als die Messung. Das bedeutet, daß das Rechenmodell zu einer intensiveren Mischung zwischen den Unterkämen gelangte als es in Wirklichkeit gegeben ist. Es ist hier nochmals zu erkennen, wie es bereits im oben diskutierten Bild 2 angedeutet wurde, daß gerade bei geringen Mengenströmen und dem dabei in der Regel vorhandenen größeren Dampfgehalt die Mischung problematisch und die Kenntnisse über die Strömungsvorgänge noch wenig fundiert sind.

Interessant ist es in diesem Zusammenhang, in welchem Maße durch Einbau von Turbulenzerzeugern das Burnoutverhalten, sei es über eine intensivere Mischung oder auch durch Änderung der Strömungsgrenzschichten, beeinflusst wird. Solche Turbulenzerzeuger können in einfachster Weise in den ohnehin notwendigen Abstandshaltern eines Bündels durch angebrachte verdrillte Bänder von rund 50 mm Länge dargestellt werden. Da der Drall im Nachlauf hinter dem Spacer nach rund 30 D abklingt, müssen diese Drallfahnen in entsprechenden Abständen angeordnet werden. In Bild 5 ist am Beispiel eines 9-Stabbündels der durch solche kurze Drallbänder erzielbare Ver-

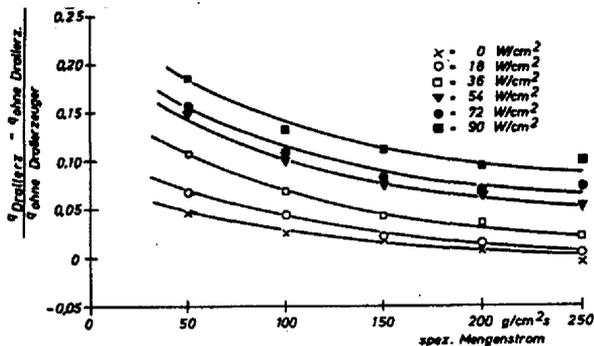


Bild 5
Erhöhung der kritischen Heizflächenbelastung durch Dralllerzeuger

Druck : 100 at
Unterkühlung : 20 grd



besserungsgrad in der kritischen Heizflächenbelastung aufgetragen. Als generelle Tendenz zeigten die Messungen, daß die Wirksamkeit dieser Dralllerzeuger mit steigendem Dampfgehalt im Bündel zunächst zunimmt. In diesem Sinne sind auch die in Bild 5 aufgetragenen Ergebnisse zu interpretieren, die Verbesserungen im Burnoutverhalten bis zu 20 % aufweisen. Wegen des höheren Dampfgehaltes ist eine Auffächerung der Kurven bei kleinen Mengenströmen zu beobachten und mit zunehmendem Gleichmäßigkeitsgrad in der radialen Wärmeflußverteilung ergeben sich höhere Werte. Die Antwort auf die Frage, ob diese Verbesserung in stärkerem Maße auf eine zunehmende Mischung oder eher auf Veränderungen im wandnahen Grenzschichtprofil zurückzuführen sind, muß zunächst offen bleiben.

3. Kritische Heizflächenbelastung bei Leistungsexkursionen

Leistungsexkursionen sind in die allgemeine Kategorie der instationären Vorgänge einzureihen, und es taucht als erstes die Frage auf, ob diese Vorgänge in Bezug auf das Burnoutverhalten als Kette quasistationärer Zustände betrachtet werden kann. Versucht man auf diese Frage aus der Literatur eine Antwort zu bekommen, so sind zunächst die Untersuchungen von Schrock /6/ sowie von Westinhouse /7/ heranzuziehen. Die Mes-

sungen von Schrock /6/ wurden an längsangeströmten Bändern bei Exkursionszeiten zwischen 5 und 50 ms durchgeführt. Westinghouse machte seine Messungen zusammen mit der Columbia Universität an Bündeln von 19 Stäben, deren Heizleistung innerhalb von 3 bis 13 Sekunden von einem gewählten Nennzustand aus hochgeregelt wurde.

Versucht man aus diesen Messungen eine Antwort auf die oben aufgeworfene Frage zu finden, so ließe sich daraus der Schluß ziehen, daß für längere Exkursionszeiten - wie sie bei Westinghouse vorlagen - der Transientvorgang durchaus als eine Kette quasistationärer Bedingungen behandelt werden kann. Bei den Messungen von Schrock dagegen, die im ms-Bereich lagen, zeigte sich eine starke Abhängigkeit von zeitlichen Gradienten der Leistungsexkursion. Von den hydro- und thermodynamischen Vorgängen beim Einsetzen des Burnout haben sicher der Siedeverzug und beim unterkühlten Sieden die Dampfblasenrückkondensation den wesentlichsten Einfluß. Offenbar ist der Siedeverzug so gering und die Dampfblasenbildung so rasch, daß dies nur in Extremfällen berücksichtigt werden muß. Aus stationären Messungen ist bekannt, daß die Dampfblasen eine merkliche Zeit zur Rückkondensation benötigen. Diese fehlende Rückkondensation hat aber auf den Burnout unter stationären Betriebsbedingungen nahezu denselben Einfluß wie bei Transientvorgängen, da durch die Strömung ein Längstransport erfolgt und im Bereich der kritischen Heizflächenbelastung an der Burnoutstelle in der Regel sehr großer Dampfgehalt vorliegt und damit kein Unterkühlungsgrad vorhanden ist.

Messungen der kritischen Heizflächenbelastung bei raschen Transientvorgängen erfordern einen speziellen messtechnischen Aufwand. Wesentlich ist hierbei vor allem die absolut exakte Zeitzuordnung der gemessenen kalorischen und strömungstechnischen Größen beim Einsetzen des Filmsiedens. Der genaue Beginn des Filmsiedens ist am ehesten noch durch eine trägheitsfreie Temperaturmessung an der Heizfläche zu erfassen. Hierfür bedurfte es der Entwicklung spezieller Thermolemente /8/ die auch auf elektrischem Strom führenden Heizflächen, frei von Fremdspannungen, trägheitslos anzeigen.

Ein Beispiel für ein bei diesen Messungen von den an der Heizfläche angebrachten Thermolementen aufgezeichnetes Oszillogramm zeigt Bild 6. Hierbei war der schraffiert gezeichnete Eckstab der Leistungsexkursion unterworfen. Die Thermolemente befanden sich jeweils 120° über den Umfang versetzt am oberen Ende des Stabes. Die Leistung wurde - wie aus der Kurve I für den elektrischen Strom hervorgeht - in Abhängigkeit von der Zeit nach einer Parabel hochgeregelt. Im Temperaturverlauf ϑ_{w1} bis ϑ_{w3} der drei Meßstellen ist deutlich zu sehen, daß mit der Beheizung die Temperatur der Heizfläche zunächst exponentiell ansteigt. Mit Beginn des Blasen siedens wird dieser Temperaturanstieg wegen der verbesserten Wärmeübergangsverhältnisse deutlich flacher, um beim Einsetzen des Filmsiedens mit einem scharfen Knick rasch nach oben zu ver-

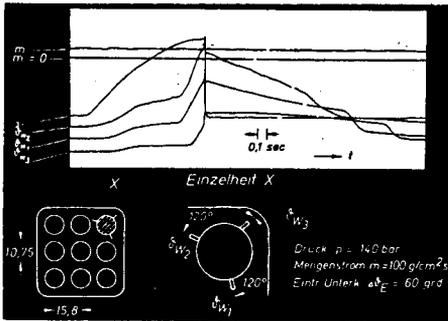


Bild 6
Verlauf der Heizflächen-
temperatur bei einer Lei-
stungsexkursion mit ein-
setzendem Filmsieden

laufen. Die Energiezufuhr muß schließlich, um eine Zerstörung des Stabes zu vermeiden, unterbrochen werden und die Heizflächen kühlen sich allmählich durch Wiederbenetzen auf den Ausgangszustand ab. Durch das gleichzeitige Registrieren von Heizflächentemperatur und Heizstrom ist die in jedem Augenblick im Stab erzeugte Wärmemenge bekannt und kann eindeutig dem Zeitpunkt des Einsetzens des Filmsiedens zugeordnet werden. Bei genauerer Betrachtung zeigt das Oszillogramm, daß das Filmsieden zuerst an der Innenseite des Stabes auftritt, die den Nachbarstäben gegenüberliegt und eine Zone höherer Enthalpie darstellt.

Zur eindeutigen Zuordnung zwischen transitorischem und stationärem Burnout sowie zur Elimination aller versuchstechnischen Einflüsse wurde zu jeder transitorischen Burnoutmessung ein Versuch im stationären Betrieb bei gleichen thermo- und hydrodynamischen Parametern vorgenommen. Die Zeitspanne der Leistungsexkursion betrug zwischen 0,5 und 3 Sekunden.

In Bild 7 sind Messergebnisse bei 140 bar für verschiedene Bündelanordnungen aufgetragen. Als Abszisse wurde die Mengen-

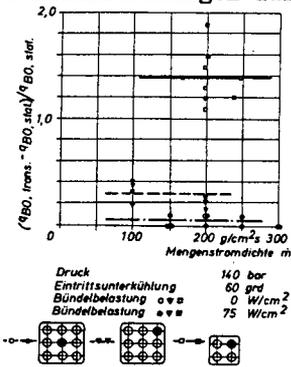


Bild 7
Einfluß der Bündelgeome-
trie auf die kritische
Heizflächenbelastung bei
Leistungsexkursionen

stromdichte, als Ordinate ein Verhältnisfaktor zwischen kritischer Heizflächenbelastung beim Transient und bei stationären Bedingungen gewählt. Die Messungen wurden an zwei 9-Stab-

bündeln von 1 m Länge sowie an einem 4-Stabbündel von 2 m Länge durchgeführt. Bei den in diesem Beispiel gezeigten Bündel war jeweils nur ein Stab der Leistungsexkursion unterworfen, während die übrigen Stäbe auf konstantem Niveau belassen wurden. Die Transientburnoutmessungen am zentralen Stab im 9-Stabbündel unterscheiden sich in ihren Ergebnissen kaum von den aus stationären Untersuchungen bekannten Werten. Unterwirft man den Eckstab im gleichen Bündel und sonst identischen hydro- und thermodynamischen Bedingungen der Leistungsexkursion, so ist eine Verbesserung im Burnoutverhalten von rund 30 % zu beobachten. Geht man schließlich auf das doppelt so lange und engere 4-Stabbündel über, so ließen sich Erhöhungen in der kritischen Heizflächenbelastungen von rund 150 % erreichen. Das Niveau der Heizflächenbelastung der stationär belassenen, also der Leistungsexkursion nicht unterworfenen Stäbe, hatte zwar auf den Absolutwert der kritischen Heizflächenbelastung einen Einfluß, wirkte sich jedoch nicht auf den Verhältnisfaktor zwischen Transientburnout und stationären Burnout aus, d. h. der Verbesserungsgrad blieb hiervon unberührt.

Schrock /6/ fand bei seinen Messungen als wichtigste Einflußgröße den zeitlichen Gradienten der Leistungsexkursion. Die Messungen bei Westinghouse zeigten Ergebnisse, die zu der Empfehlung führten, für Auslegungsrechnungen bei transitorischen Vorgängen die unter stationären Bedingungen gefundenen Gleichungen anzuwenden. Dies wurde einleitend dieses Kapitels dazu verwendet, bei nicht zu raschen Transienten den Burnout über eine Kette quasistationärer Zustände zu behandeln. Bei unseren Untersuchungen scheint sich nun als wesentliche neue Einflußgröße die Geometrie des Bündels herauszustellen. Die geometrischen Verhältnisse können sich jedoch nur über die durch sie hervorgerufenen Strömungsformen und Beschleunigungseffekte auswirken. Aus den in Bild 7 als Beispiel dargestellten Messungen ließ sich leicht ersehen, daß die Verbesserung in der kritischen Heizflächenbelastung umso größer ist, je schlanker und umschlossener die den Burnoutstab umgebende Strömungszone ist. Eine einfache Überlegung wird einmal den durch die explosionsartige starke Dampfblasenbildung hervorgerufenen Beschleunigungseffekt, das andere Mal die dadurch ebenfalls bewirkte Mischung dafür verantwortlich zu machen versuchen. Beim zentralen Stab im 9-Stabbündel kann sich die Explosionswirkung bei der Dampfentwicklung kugelförmig nach allen Seiten ausbreiten, während im schlanken und engen 4-Stabbündel die gesamte Expansionsenergie in Strömungsrichtung wirkt, was eine stärkere Beschleunigung des Fluids in Richtung der Kanalachse und damit eine große Zunahme der Strömungsgeschwindigkeiten von Wasser und Dampf bedeutet. Die Strömungs- und Beschleunigungsverhältnisse bei diesen drei unterschiedlichen Geometrien gehen aus Tabelle 1, in der drei Meßpunkte herausgegriffen sind, etwas deutlicher hervor. Die dort aufgetragenen Werte wurden, ausgehend von den bekannten und gemessenen Zuständen am Eintritt des Kanales und von der gemessenen Leistungsexkursion, mittels eines Rechenprogram-

mes über die Kanallänge integriert und somit die Verhältnisse am Burnoutpunkt ermittelt. Am aufschlußreichsten ist hierbei ein Vergleich zwischen Zunahme der kritischen Heizflächenbelastung und Verhältnis der am Ein- und am Austritt herrschenden kinetischen Energie des Dampf-Wasser-Gemisches. Für die Berechnung der Strömungsverhältnisse in den beiden Phasen wurde das Schlupfmodell von Banksiff-Jones /9/ herangezogen.

Aus diesen Messungen und den theoretischen Überlegungen geht hervor, daß die Beschleunigung den primären Einfluß auf das Burnoutverhalten hat. Vermutlich führt sie gegenüber stationären Bedingungen zu einem stark unterschiedlichen Grenzschichtprofil von Dichte und Temperatur. Der Mischeffekt im Bündel ist hierbei wohl nur als untergeordnete Folgeerscheinung des Expansionsvorganges aufzufassen. Sein geringerer Einfluß auf die Relativverbesserung im Burnoutverhalten beim Transient kann auch daraus abgeleitet werden, daß die Meßpunkte keinerlei Abhängigkeit von der stationären Bündelbelastung aufwiesen.

4. Kritische Heizflächenbelastung bei Mengenstromtransienten

Bei Mengenstromtransienten erhebt sich, ähnlich wie bei den oben besprochenen Leistungsexkursionen, wieder die Frage, sind die Burnoutwerte durch die für stationäre Bedingungen bekannten Gleichungen vorauszusagen, d. h. kann das Problem quasistationär behandelt werden. Hinzu kommt hiernoch, daß Mengenstromtransienten in der Praxis in der Regel wesentlich langsamer verlaufen als Leistungsexkursionen. In einer ersten Meßreihe wurden bei unseren Untersuchungen, ausgehend von einem stationären Zustand, der Mengenstrom bei konstant gehaltener Wärmestromdichte innerhalb von 3 bis 15 Sekunden solange abgesenkt, bis Burnout eintrat. Die Heizleistung lag hierbei 10 bis 50 % unter der kritischen Wärmestromdichte des stationären Ausgangszustandes. Bild 8 zeigt ein Beispiel der

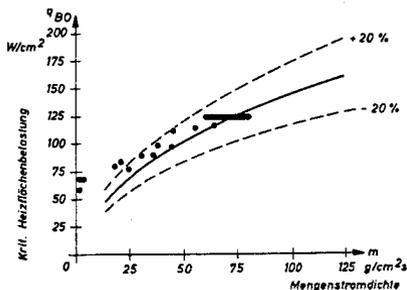
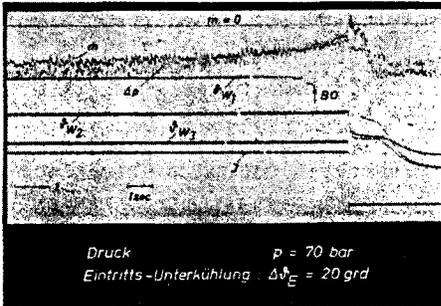


Bild 8
Kritische Heizflächenbelastung bei Mengenstromtransienten verglichen mit stationären Werten

dabei gewonnenen Meßergebnisse. Die unter quasistationären Bedingungen zu erwartende kritische Heizflächenbelastung ist als ausgeogene Linie eingezeichnet. Auch bei diesen Messungen wurde der Beginn des Filmsiedens durch direkte Tempera-

turmessung an der Heizfläche festgestellt. Die Meßergebnisse zeigen mit zunehmendem Ausgangsmengenstrom eine besser werdende Übereinstimmung mit den stationär zu erwartenden Burnoutwerten, liegen insgesamt jedoch etwas höher. Erst bei ganz kleinen Mengenstromdichten überschreiten sie die Plustoleranzen von 20 %. Hier war ein Ausdampfen im Strömungskanal zu beobachten, d. h. die Temperaturerhöhung an der Heizfläche setzte nicht infolge Filmsiedens, sondern durch Kühlmittelmangel im Strömungskanal ein.



Ein Meßwert ist nicht als Punkt, sondern als breiter waagrechter Balken, der eine merkliche Meßunsicherheit andeutet, eingetragen. Diese Meßunsicherheit soll anhand des in Bild 9

Bild 9
Verlauf der Heizflächentemperatur beim Mengenstromtransienten

dargestellten Oszillogrammes erläutert werden. Hier sind über der Zeit als Abszisse die Heizflächentemperatur, der momentane Mengenstrom sowie der Druckabfall im beheizten Kanal aufgetragen. Betrachtet man den Verlauf der Heizflächentemperatur während des Transientvorganges, so beobachtet man rund 1,5 Sekunden vor der mit dem Pfeil B0 gekennzeichneten Stelle einen plötzlichen geringen Temperaturrückgang, der - wie unsere Erfahrungen zeigten - bei stationären Betriebsbedingungen immer charakteristisch für das unmittelbar bevorstehende Einsetzen des Filmsiedens ist. Daran anschließend treten heftige Temperaturschwankungen auf, die 3 bis 4 Sekunden später zu unzulässigen Werten führen, was eine Abschaltung der Wärmezufuhr erfordert. Je nachdem, welchen Moment innerhalb dieses Zeitintervalls man als Burnoutzeitpunkt auffaßt, ergibt sich ein erheblicher Toleranzbereich, wie man aus dem Verlauf des Mengenstromes leicht ersehen kann.

Der nächste Schritt ist nun die Untersuchung von Vorgängen, wie sie bei einem Ausfall der Hauptumwälzpumpen mit anschließender Schnellabschaltung des Reaktors zu erwarten sind. Dem Mengenstromrückgang ist jetzt eine verzögert einsetzende Leistungsreduktion überlagert. Wegen der Vielfalt der Parameter lassen sich diese Messungen nur schwer pauschal und übersichtlich darstellen. In Bild 10 sind die Ergebnisse von zwei Beispielen aufgeführt. Über der Zeit als Abszisse ist einmal die kritische, bzw. die in jedem Augenblick vorhandene Heizflächenbelastung, das andere Mal die Mengenstromdichte auf-

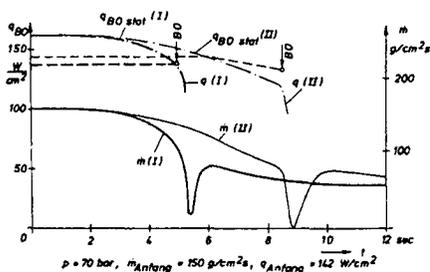


Bild 10
Kritische Heizflächenbelastung beim Pumpenausfall verglichen mit stationären Werten

getragen. Im ersten Beispiel, das durch die dicker ausgezogenen Linien gekennzeichnet ist, wurde der Mengenstrom innerhalb rund 5 Sekunden von 100 % auf rund 10 %, im zweiten innerhalb rund 9 Sekunden von 100 % auf 0 reduziert. Die gestrichelten Linien stellen die tatsächlich im Bündel vorhandene Heizflächenbelastung dar, wobei alle Stäbe im Bündel gleichmäßig beheizt waren. Die strichpunktieren Linien bezeichnen den zu erwartenden Verlauf der kritischen Heizflächenbelastung bei quasistationärer Betrachtung. Der Zeitpunkt an dem bei der Messung der Burnout einsetzte, ist durch einen Pfeil gekennzeichnet. Man sieht, daß die quasistationäre Betrachtung den Burnoutzeitpunkt und die kritische Heizflächenbelastung relativ gut vorhersagt.

Damit zeigen diese Ergebnisse geschlossener und eindeutiger als vorher die Messungen der Leistungstransienten, daß für Mengenstromtransientendurchwegs die stationären Burnoutbeziehungen herangezogen werden können. Dadurch ergeben sich in der wärmetechnischen Analyse und der praktischen Auslegung hochbelasteter Heizflächen erhebliche Vereinfachungen.

5. Schlußbetrachtungen - Der Ausgangspunkt der hier dargelegten Messungen war das Bestreben, für die komplizierten Gegebenheiten in Brennelementbündeln von Druck- und Siedewasserreaktoren bessere Auslegungskriterien zu erarbeiten. Man sieht sich dabei bald einer Vielzahl von Parametern gegenüber, die eine geschlossene Aussage ohne eine äußerst umfangreiche theoretische Analyse nicht zulassen.

Bestrebungen der weiteren Arbeiten wird es deshalb sein, an einfacheren und strömungstechnisch sowohl theoretisch als auch experimentell besser zugänglichen Kanalquerschnitten Versuche durchzuführen und diese Meßergebnisse zunächst mit den aus der Literatur bekannten Berechnungsmodellen zu vergleichen. Hieraus ergeben sich Hinweise über die Gültigkeit der darin gemachten Ansätze und Möglichkeiten für Korrekturen der theoretischen Analysen.

Tabelle 1:
Berechnete Strömungsbedingungen bei Einsetzen des Filmsiedens

	L	x_A	α_A	w_{WA}	w_{DA}	E_A/E_E	$\left(\frac{q \cdot t}{q \cdot s} - 1\right) \cdot 100$
	m	-	-	m/s	m/s	-	%
	1.9	0.502	0.835	11.6	17.9	23.5	140
	1.1	0.058	0.312	5.5	6.1	5.0	22
	1.1	0.072	0.357	5.5	6.2	4.8	5

Indices:

A Austritt t transient
E Eintritt s stationär
D Dampf o Bündelstäbe
W Wasser • Burnoutstab

Parameter:

p = 140 bar $\Delta \vartheta_E^0 = 60 \text{ grad}$
 $\dot{m}_D = 200 \text{ g/cm}^2 \text{ s}$ $q_o = 0 \text{ W/cm}^2$
 $w_E = 2,6 \text{ m/s}$

Literatur

- /1/ W.Kastner, F.Mayinger: Burnoutmessungen im Rahmen von sicherheitstechnischen Untersuchungen. BMWF-Forschungsvertrag RS 14, Bericht-Nr. 45.03.01, Oktober 1969
- /2/ R.W.Bowring: HAMBO-A computer programme for the sub-channel analysis of the hydraulic and burnout characteristics of rod-clusters, part 1-3, AEEW-R 524,582 und unveröffentlicher Bericht (1967)
- /3/ D.S.Rowe: Cross-flow mixing between parallel flow channels during boiling, part 1-3, BNWL-371, (1967)
- /4/ T.van der Ros: Mixing model THE, private Mitteilung
- /5/ P.G.Barnett: A correlation of burnout data for uniformly heated annuli and its use for predicting burnout in uniformly heated bundles. AEEW-R 463 (1966)
- /6/ V.E.Schrock u.a.: Transient boiling phenomena, Vol 1,2 USAEC, Report SAN-1013 (1968)
- /7/ L.S.Tong u.a.: Transient DNB test on CVTR fuel assembly CVNA-232, (1965)
- /8/ F.Mayinger, O.Schad, E.Weiß: Investigations into the critical heat flux in boiling water. EUR 3347e (1967)
- /9/ A.B.Jones u. A.G.Dight: Hydrodynamic stability of a boiling channel, part 2,3; KAPL-2290 (1962, 1963)