



# **Der Einfluß der hydrodynamischen Bedingungen auf die kritische Heizflächenbelastung beim Sieden**

von F. Mayinger, O. Schad und E. Weiß, Nürnberg

**M·A·N**

MASCHINENFABRIK AUGSBURG-NÜRNBERG AKTIENGESELLSCHAFT WERK NÜRNBERG

DK 621.18.016.7:532.542.013:536.423.1

# Der Einfluß der hydrodynamischen Bedingungen auf die kritische Heizflächenbelastung beim Sieden

Von F. Mayinger, O. Schad und E. Weiß, Nürnberg\*)

Bei Messungen der kritischen Heizflächenbelastung beim Sieden in zwangsdurchströmten Kanälen wurden zwei verschiedene Arten des „burnout“ beobachtet: Bei der einen Art treten kurz vor Einsetzen des Filmsiedens Schwankungen im Druck und im Mengenstrom auf („pulsierendes burnout“); die andere Art zeigt hydrodynamisch vollkommen stabiles Verhalten, bis das Filmsieden plötzlich einsetzt. Das pulsierende burnout, das nur im Bereich des unterkühlten Siedens zu beobachten war, führt zu kritischen Heizflächenbelastungen, die um 20 bis 50% unter denen bei hydrodynamisch stabiler Strömung liegen.

## Ziel der Untersuchungen

In den letzten zehn Jahren wurden zahlreiche Arbeiten über die Probleme auf dem umfangreichen und schwer überschaubaren Gebiet der Zweiphasenströmung veröffentlicht, von denen sich der größte Teil mit dem Filmsieden oder „burnout“ befaßt, wie die Siedekrise im amerikanischen Sprachgebrauch bezeichnet wird. Trotz der großen Zahl experimenteller und theoretischer Untersuchungen besteht noch kein klares Bild über den Einfluß wichtiger strömungsmechanischer und thermodynamischer Parameter auf den Übergang vom Blasen- zum Filmsieden.

Im Bestreben, einen Beitrag zum besseren Verständnis des Problems zu liefern, wurde der Einfluß der hydrodynamischen Verhältnisse auf den Übergang vom Blasen- zum Filmsieden untersucht, wobei, um das Problem leichter überschaubar zu gestalten, einfache Versuchsbedingungen gewählt wurden. Die Messungen wurden an runden, innengekühlten Einzelrohren von 7 bis 15 mm Durchmesser bei Drücken von 70 bis 140 at durchgeführt und überstreichen einen Bereich von 50 grd Unterkühlung bis zu 40% Dampfgehalt.

Wir haben zwei ihrer physikalischen Natur nach völlig verschiedene Arten des burnout beobachtet, wobei der Begriff „burnout“ im Rahmen dieser Ausführungen streng nach dem Sinn des Wortes zu verstehen ist, nämlich als Durchbrennen oder Schmelzen der beheizten Wand infolge unzulässiger Temperaturerhöhung, und nicht unbedingt gleichbedeutend ist mit Filmsieden oder Siedekrise. Die erste Art ist die aus dem Schrifttum bekannte Form, und die primäre Ursache dieses burnout ist eine echte Siedekrise, also das Filmsieden. Die zweite Art kann man zweckmäßig als das pulsierende burnout bezeichnen, da sie durch Mengenstrom- und Druckschwankungen und deren Folgen hervorgerufen wird. Die Heizflächenbelastung ist beim pulsierenden burnout 20 bis 50% niedriger als bei dem ersten Art.

## Versuchs- und Meßeinrichtungen

In der Versuchsanlage, Bild 1, zur Messung der maximalen Heizflächenbelastung wird vollentsalztes und entgastes Wasser von der Umwälzpumpe *a* über einen Durchflußmesser *b* in den Vorwärmer *c* gedrückt, wo es durch eine elektrische Widerstandsheizung auf den am Versuchskanaleintritt gewünschten Zustand erwärmt und auch teilweise verdampft wird. Von dort strömt das Fluid<sup>1)</sup> in die

Meßstrecke *d*, die den Versuchskanal für die Untersuchung der maximalen Heizflächenbelastung enthält. Das im Versuchskanal entstehende Wasser/Dampf-Gemisch wird schließlich im Kondensator *e* kondensiert und gekühlt und gelangt über einen weiteren Kühler *g* wieder zur Umwälzpumpe *a*. Um bei Versuchen mit dampffreiem Wasser den Druck im Kreislauf regeln zu können, ist der Druckerzeuger *h* vorgesehen. Die installierte elektrische Heizleistung beträgt 400 kW im Versuchskanal und 200 kW im Vorwärmer.

Die Meßstrecke, Bild 2, besteht im wesentlichen aus einem dickwandigen Autoklaven und dem eigentlichen Versuchskanal, einem innen vom Kreislaufwasser durchströmten Rohr, das von diesem Autoklaven druckdicht umschlossen wird. Zur Beheizung dient die Rohrwand des

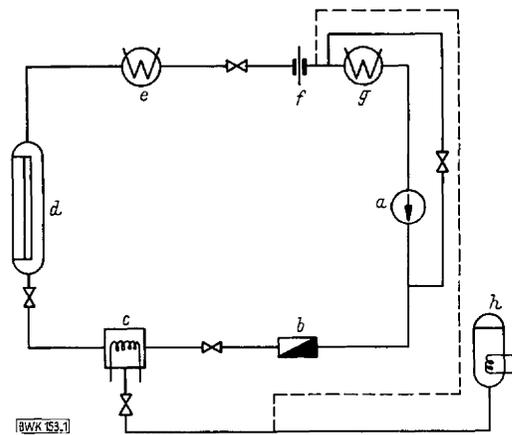


Bild 1. Vereinfachter Schaltplan des Siedewasser-Versuchstandes.

- |   |   |
|---|---|
| <i>a</i> Umwälzpumpe                    | <i>e</i> Kondensator                        |
| <i>b</i> Turbinendurchflußmesser        | <i>f</i> Durchflußmeßblende                 |
| <i>c</i> Elektrisch beheizter Vorwärmer | <i>g</i> Kühler                             |
| <i>d</i> Meßstrecke                     | <i>h</i> Elektrisch beheizter Druckerzeuger |

Versuchskanals als Ohmscher Widerstand. Zwischen Versuchskanal und Autoklavenwand ist ein zylindrischer Raum abgeteilt, der mit Stickstoff gefüllt ist. Der Gasdruck in diesem Raum wird über ein automatisch arbeitendes Druckausgleichssystem immer genau dem Druck des Kreislaufwassers angeglichen. Die Meßsonden sind außen an der 0,5 mm dicken Wand des Versuchskanals angebracht und werden durch den Stickstoffraum druckdicht ins Freie geführt.

Um Aussagen über die Vorgänge im Augenblick des burnout machen zu können, ist es notwendig, die Oberflächentemperatur des beheizten Versuchskanals verzögerungsfrei und genau zu messen. Herkömmliche Thermolement-Anordnungen sind, wenn sie elektrisch isoliert auf

\*) Die Arbeit wurde im Rahmen eines Forschungsvertrags mit Euratom im Versuchsfeld für Kernenergieanlagen der M. A. N. durchgeführt und auf dem Thermodynamik-Kolloquium des VDI in Bad Oeynhausen, Oktober 1965, vorgetragen. Dipl.-Ing. O. Schad und Ing. E. Weiß sind Mitarbeiter von Obering. Dr.-Ing. Franz Mayinger VDI.

<sup>1)</sup> Das in DIN 5492 genormte Wort Fluid steht hier sowohl für einphasige als auch für zweiphasige Flüssigkeiten, Gase und Dämpfe.

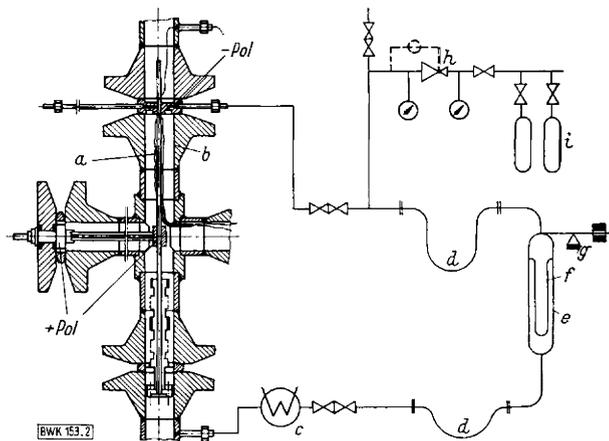


Bild 2. Aufbau der Meßstrecke.

- a Versuchsrohr d Hochdruckschlauch g Waage  
 b Druckrohr e Druckausgleicher h Reduzierventil  
 c Kühler f Membran i Stickstoffbehälter

die stromführende Versuchskanalwand aufgebracht werden, zu trägt, oder bei direktem Aufbringen überlagert sich der Thermospannung eine hohe Fehlerspannung, die vom Spannungsabfall infolge des Heizstroms in der Versuchskanalwand herrührt.

Es wurde deshalb ein Doppelthermoelement [1], Bild 3, gewählt, das aus drei Drähten besteht, die in einem gegenseitigen Abstand von rd. 0,5 mm auf die stromführende Oberfläche aufgeschweißt werden. Die beiden äußeren sind aus gleichem Material, für den inneren wird ein Werkstoff verwendet, der in der elektrischen Spannungsreihe von dem der äußeren abweicht. Die zwischen den Drähten liegenden Rohrstücke bilden zusammen mit den Widerständen  $R_1$  und  $R_2$  eine Wheatstonesche Brücke, die so abgeglichen wird, daß die vom Heizstrom herrührende Fehlerspannung zu Null wird und am Meßgerät nur mehr die Thermospannung ansteht. Diese Doppelthermoelemente befinden sich am oberen Ende auf der Außenseite des Versuchskanals. Während ein mittels einer 0,1 mm dicken Glimmerschicht von der stromführenden Wand isoliertes Thermoelement, das aus Drähten von 0,1 mm Dicke aufgebaut ist, rd. 280 ms benötigt, bis es zwei Drittel des tatsächlichen Wertes einer plötzlich angelegten Übertemperatur anzeigt, liefert das Doppelthermoelement dieselbe Anzeige schon in 7 ms.

Als Sicherheitseinrichtung zum Abschalten des Heizstroms beim Einsetzen des  $\alpha$  burnout wird ein Burnout-

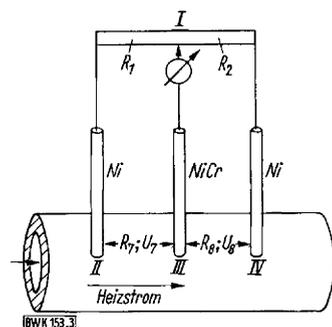


Bild 3. Schaltung des Doppelthermoelements.

Parameter ist das Verhältnis  $L/D$  der beheizten Länge zum Durchmesser

Mengenstrom $m$ g/cm <sup>2</sup> s	Pulsierendes burnout	burnout erster Art
230	▲	△
290	■	□
350	●	○

detektor verwendet. Hierbei wird zur Feststellung des unzulässigen Temperaturanstiegs die Änderung des elektrischen Widerstandes des Versuchskanals herangezogen. Im Prinzip handelt es sich bei diesem Gerät um eine Wheatstonesche Brücke, bei der der elektrische Widerstand der oberen Hälfte des Versuchskanals mit dem der unteren verglichen wird.

Zur Messung des Wasserstroms im Versuchskanal werden Normblenden, für instationäre Vorgänge Drehflügeldurchflußmesser verwendet, die es gestatten, auch rasche Mengenstromschwankungen zu erfassen.

## Übersicht über die Meßergebnisse

Wie erwähnt, wurden zwei Arten des burnout beobachtet. Den Unterschied in der maximal erreichbaren Heizflächenbelastung beim burnout erster Art und beim pulsierenden burnout zeigt Bild 4, in dem einige der Meßergebnisse für einen Druck von 70 at zusammengestellt sind. Die Werte sind für drei Mengenströme  $m$  über dem Dampfgehalt bzw. dem Unterkühlungsgrad am Eintritt des Versuchskanals aufgetragen, wobei der Unterkühlungsgrad genau wie der Dampfgehalt zu  $(i - i')/r = x_E$  definiert ist, mit  $i$  und  $i'$  als Enthalpien des Fluids beim Versuch bzw. der flüssigen Phase im Sättigungszustand und  $r$  als Verdampfungswärme.

Der Unterschied in der maximalen Heizflächenbelastung zwischen den beiden Arten des burnout nimmt mit wachsender Versuchskanallänge zu und verschwindet bei sehr kurzen Meßstrecken nahezu ganz.

Die Messungen über das burnout erster Art bestätigen die bekannte Tendenz des Abnehmens der maximalen Heizflächenbelastung mit steigendem Dampfgehalt am Versuchskanaleintritt. Im unterkühlten Bereich läßt sich durch Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit eine geringe Verbesserung in der kritischen Heizflächenbelastung erzielen, während von einem gewissen Dampfgehalt an die Geschwindigkeitszunahme negativen Einfluß hat. Bei höherem Dampfgehalt als rd. 10% herrscht „Ringströmung“ im beheizten Kanal, die dadurch gekennzeichnet ist, daß an der wärmeabgebenden Wand ein Wasserfilm fließt und in der Mitte des Versuchskanals Dampf strömt, der Wassertropfen mit sich führt. Zwischen beiden Strömungszonen herrscht ein Geschwindigkeitsunterschied. Die dem Dampf zugewandte Oberfläche des Wasserfilms zeigt eine starke Welligkeit, die mit steigendem Mengenstrom zunimmt. Dadurch wird der Wasserfilm leichter aufgerissen, was wiederum zu einem früheren Eintritt des burnout führt.

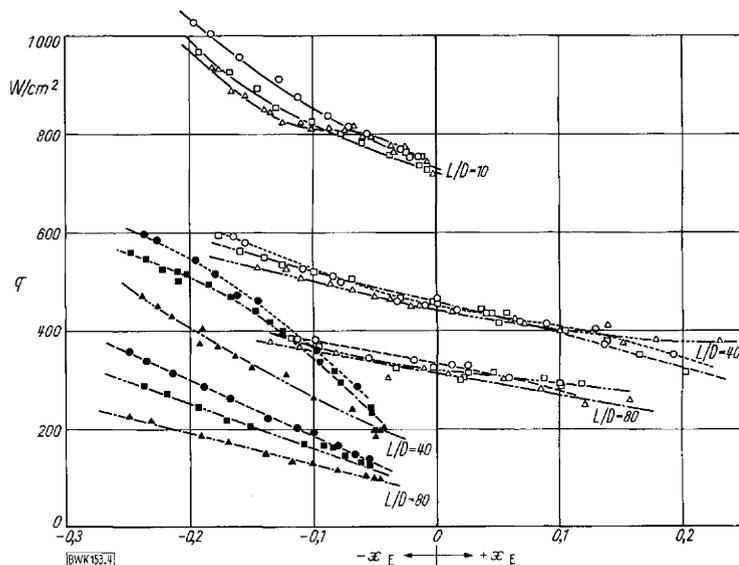


Bild 4. Kritische Heizflächenbelastung  $q$  an innen gekühlten Röhren von 7 mm Innendmr. bei verschiedenen Mengenströmen  $m$  und bei einem Druck von 70 at, abhängig vom Unterkühlungsgrad (Dampfgehalt)  $x_E$ .

## Hydrodynamische Einflüsse auf das burnout erster Art

Bei nicht zu langen Versuchskanälen bestimmen die Einlaufbedingungen das thermische Profil sowie das Geschwindigkeitsprofil am Ort der Siedekrisis. Wir haben versucht, das Geschwindigkeitsprofil durch Vorschalten verschiedener Anlaufstrecken und unterschiedlich gestalteter Störkörper zu verändern. Weiterhin wurde das Längen/Durchmesser-Verhältnis der beheizten Länge des Versuchskanals in weiten Grenzen variiert. Bei den Ergebnissen in Bild 4 befand sich vor Beginn der beheizten Länge eine ungestörte Anlaufstrecke, deren Länge rund das 200fache des Durchmessers betrug, so daß sich das Geschwindigkeitsprofil voll ausbilden konnte.

Für die Auslegung hochbelasteter Heizflächen, wie sie die Brennstoffelemente in Kernreaktoren darstellen, interessiert die Frage, wie sich die maximale Heizflächenbelastung ändert, wenn sich statt dieser Anlaufstrecke unmittelbar vor der beheizten Länge Turbulenzerzeuger, z. B. kurze Drallbleche oder Lochblenden, befinden. Diese Störkörper wirken sich natürlich nur bei kurzen Versuchskanälen aus, bei denen die Störung bis zum Ort der Siedekrisis noch nicht abgeklungen ist.

Entfernt man die Anlaufstrecke und läßt man die Strömung über einen scharfkantigen Eintritt, jedoch ohne zusätzliche Störkörper, in den Versuchskanal eintreten, so erhöht sich bei einem Verhältnis der beheizten Länge  $L$  zum Durchmesser  $D$  des Versuchskanals von 10 die kritische Heizflächenbelastung um 20%. Bei  $L/D = 40$  ist die Verbesserung bereits kaum mehr meßbar.

Der Einfluß von Lochblenden, die unmittelbar vor Beginn der beheizten Länge im Versuchskanal angebracht sind, ist ebenfalls gering, Bild 5. Die Lochblende hatte ein

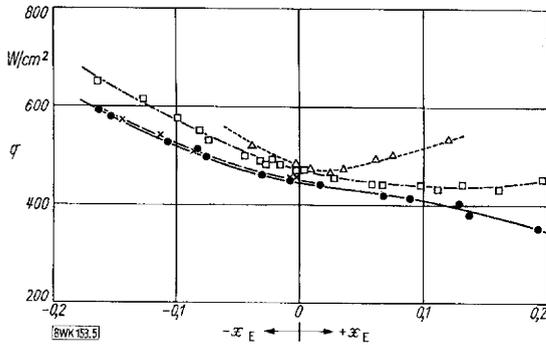


Bild 5. Einfluß verschiedener Störkörper auf die kritische Heizflächenbelastung  $q$  beim Sieden.

$m = 350 \text{ g/cm}^2\text{s}$ ;  $L/D = 40$ ;  $p = 70 \text{ at}$

□ Mit Drallblech, Drallwinkel  $56^\circ$     × Mit Lochblende  
△ Mit Drallblech, Drallwinkel  $48^\circ$     ● Ohne Einbauten

Öffnungsverhältnis der Flächen von 0,18. Kurze, am Eintritt zur beheizten Strecke angeordnete verdrehte Bleche, die der Strömung eine Drallkomponente erteilen, die auf dem Weg durch den beheizten Kanal je nach Intensität mehr oder weniger wieder abklingen kann, verändern dagegen das Burnoutverhalten erheblich. Solche Drallbleche bieten sich als einfachste und billigste Bauelemente im Reaktorkern an, da sie leicht an Stelle der ohnehin notwendigen Distanzhalter in bestimmten Abständen zwischen die Brennstoffstäbe gesetzt werden können.

Der Einfluß der Drallströmung auf das burnout kann positiv oder negativ sein und hängt in hohem Maße von hydro- und thermodynamischen Parametern der Strömungsverhältnisse sowie vom Drallwinkel ab. Betrachtet man zunächst die Verhältnisse bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten, so ist, wie Bild 5 für einen Mengenstrom von  $350 \text{ g/cm}^2\text{s}$  (Wassergeschwindigkeit rd.  $4 \text{ m/s}$ ) zeigt, sowohl im unterkühlten Bereich als auch bei Dampfgehalt immer eine verbessernde Wirkung zu beobachten.

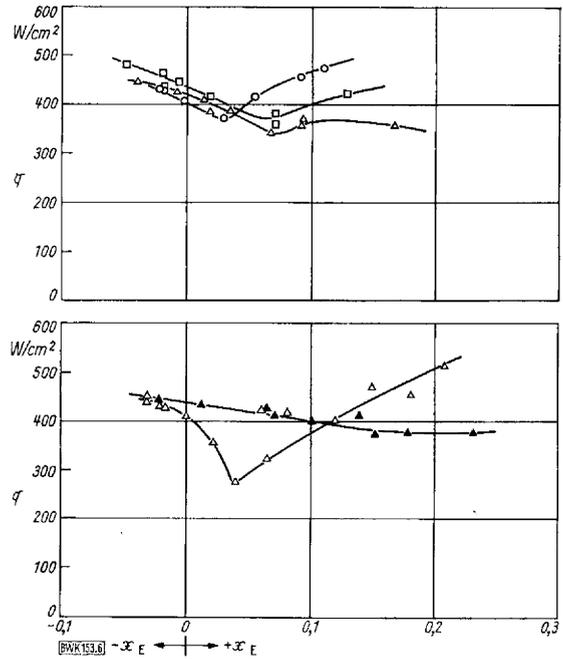


Bild 6. Kritische Heizflächenbelastung  $q$  mit und ohne Drallblech.  
 $L/D = 40$ ;  $D = 0,7 \text{ cm}$ ;  
 $p = 70 \text{ at}$

Mengenstrom $m$ $\text{g/cm}^2\text{s}$	
△	230 Ohne Drallblech
△	230 Mit Drallblech
□	290 Mit Drallblech
○	340 Mit Drallblech

Sie nimmt mit steigendem Drallwinkel zunächst zu, erreicht bei rd.  $45^\circ$  ein Optimum, um darüber wieder abzufallen.

Bei kleineren Geschwindigkeiten und ungünstigeren Drallwinkeln kann sich der Drall, wie der untere Teil von Bild 6 zeigt, auch nachteilig auswirken. Zum Vergleich ist hier das Burnoutverhalten eines Versuchskanals mit und ohne Drall eingezeichnet. Bei leichter Unterkühlung und bis zu einem Dampfgehalt von 11%, gemessen am Eintritt zur beheizten Strecke, verringert die Drallströmung die kritische Heizflächenbelastung. Das Minimum liegt bei rd. 5% Dampfgehalt, ein Gebiet, in dem nach Messungen von Baker [2], Collier [3] und Hewitt [4] Kolbenblasenströmung herrscht, also eine Strömungsform, bei der große, nahezu den ganzen Kanalquerschnitt einnehmende Dampfblasen mit Flüssigkeitspfropfen abwechseln.

Kommt man zu höherem Dampfgehalt im Versuchskanal, so wird die Verbesserung durch die Drallströmung deutlich. Sie erreicht, wie Bild 7 zeigt, in dem das Verhältnis der kritischen Heizflächenbelastung mit und ohne Drall

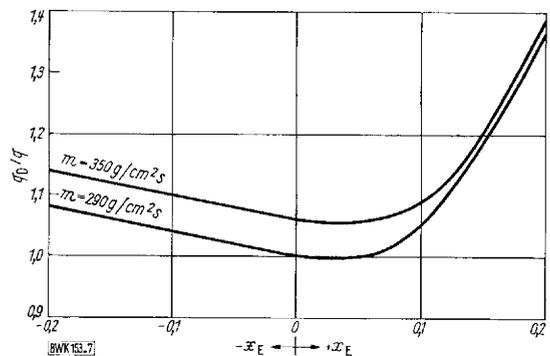


Bild 7. Erhöhung der kritischen Heizflächenbelastung des Rohrs bei Drallströmung.

$L/D = 40$ ;  $D = 0,7 \text{ cm}$ ;  $p = 70 \text{ at}$

$q_D$  Kritische Heizflächenbelastung mit Drallblech ( $56^\circ$ )  
 $q$  Kritische Heizflächenbelastung ohne Drallblech

aufgetragen ist, bei einem Dampfgehalt  $x_E = 0,2$ , was am Ort der Siedekrisis  $x_A = 0,4$  entspricht, Werte von 30 bis 40%. Fouré und Moussez [5] wiesen in einer Reihe von Messungen sogar nach, daß bei noch höherem Dampfgehalt im Bereich  $0,5 < x_A < 0,9$  die Verbesserung durch die Drallströmung noch wesentlich höhere Werte erreichen kann.

Die Erklärung für diese Verbesserung bei hohem Dampfgehalt läßt sich aus der Zentrifugalwirkung der Drallströmung ableiten. Bei hohem Dampfgehalt ist im Versuchskanal eine Ringströmung vorhanden, wobei der im Zentrum strömende Dampf noch Wassertröpfchen mit sich führt. Diese werden an die Wand geschleudert und erhöhen dadurch die Flüssigkeitszufuhr an die Heizfläche. Die bei hohen Geschwindigkeiten auch im unterkühlten Bereich beobachtete Verbesserung ist mit der erhöhten Turbulenz und der damit verstärkten Durchwirbelung der wandnahen Grenzschicht sowie mit dem Geschwindigkeitszuwachs infolge der Drallkomponente zu begründen. Weiterhin kann man sich vorstellen, daß auch im unterkühlten Bereich ein sich bildender Dampffilm zunächst infolge der Zentrifugalwirkung in der Strömung immer wieder von Flüssigkeit durchsetzt wird, wodurch sich das Filmsieden zu höheren Heizflächenbelastungen verschiebt.

Die Unterschiede in den thermo- und hydrodynamischen Vorgängen der Siedekrisis bei Drallströmung und drallfreier Strömung lassen sich meßtechnisch nur indirekt erfassen. Es wurde versucht, durch Messen der Wandtemperatur an der Burnoutstelle hierüber Aufschluß zu bekommen.

Bild 8 zeigt den Verlauf der Temperatur an der Versuchskanalwand sowie den Verlauf des Mengenstroms im Augenblick des Übergangs vom Blasen- zum Filmsieden für eine drallfreie Strömung mit ausgebildetem hydraulischen und

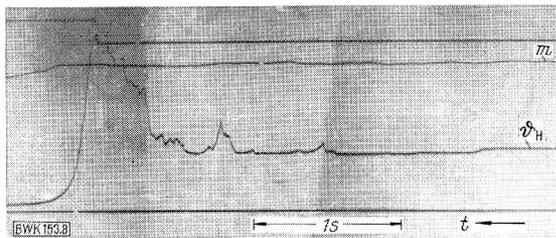


Bild 8. Heizflächentemperatur  $\varphi_H$  und Mengenstrom  $m$  beim burnout erster Art mit ungestörter Strömung. Zeit  $t$  von rechts nach links

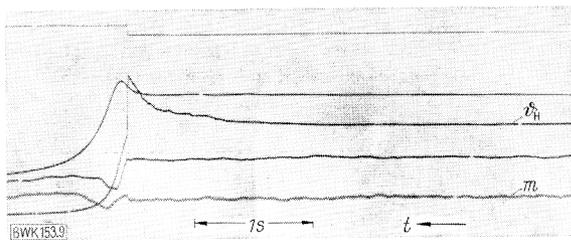


Bild 9. Heizflächentemperatur  $\varphi_H$  und Mengenstrom  $m$  bei Drallströmung.

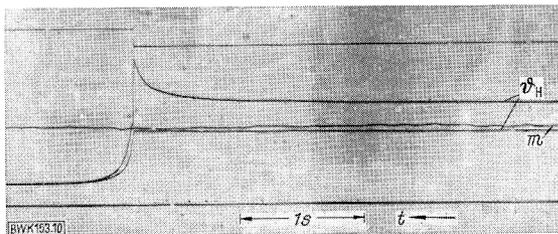


Bild 10. Heizflächentemperatur  $\varphi_H$  und Mengenstrom  $m$  beim burnout erster Art in einem kurzen Versuchskanal.

thermischen Profil. Durch die Stufe in der Linie am oberen Rand des Bildes ist der Zeitpunkt gekennzeichnet, in dem der Burnoutdetektor den Strom abschaltet, der den Versuchskanal elektrisch beheizt. Rechts ist zu sehen, daß die Wandtemperatur plötzlich um einen kleinen Betrag, rd. 5 bis 10 grad, abnimmt. Dies läßt auf eine Verbesserung des Wärmeübergangs durch völliges Verdampfen der zweiphasigen Grenzschicht schließen. Die anschließenden statistischen Temperaturschwankungen, die in einem fast

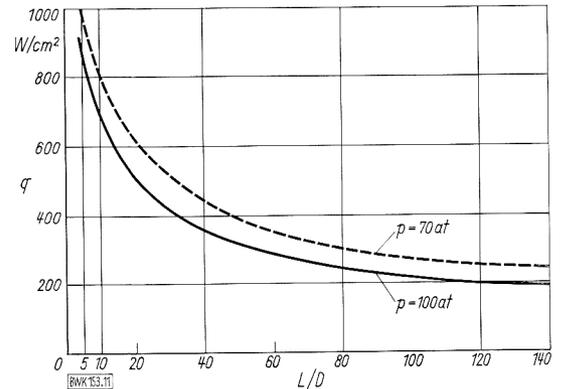


Bild 11. Kritische Heizflächenbelastung in Abhängigkeit vom Verhältnis  $L/D$  des Versuchstrohrs.

$D = 0,7 \text{ cm}$ ; Mengenstrom  $m = 230 \text{ g/cm}^2\text{s}$ ;  $x_A = 0,15$

stufenförmigen Anstieg zum Filmsieden führen, weisen darauf hin, daß auf der Heizfläche örtliche Dampfflecke und damit heiße Stellen sich auszubilden beginnen, die zu Anfang immer wieder mit Flüssigkeit benetzt werden, bis schließlich Filmsieden herrscht. Für einen späteren Vergleich ist noch zu beachten, daß der Mengenstrom von der Siedekrisis unbeeinflusst bleibt.

In einer Drallströmung, Bild 9, fehlen sowohl der kleine Temperaturabfall, der vorher den Beginn der Siedekrisis charakterisierte, als auch die statistischen Schwankungen. Die Temperatur steigt mit glattem Verlauf nach einer Exponentialkurve an. Dies weist auf stabileren Wärmeübergang bei Drallströmung als bei drallfreier Strömung hin. Es scheint infolge des Dralls eine gleichmäßig unterkühlte Kernströmung vorhanden zu sein, die durch eine nur dünne überhitzte Grenzschicht von der Heizfläche getrennt ist. Ähnliche Verhältnisse liegen auch in der thermischen Einlaufzone vor, da das thermische Profil einer einphasigen Strömung (und um eine solche handelt es sich im wesentlichen bei unterkühltem Sieden) bekanntlich zu Beginn in Wandnähe einen sehr steilen Verlauf hat, der sich stromabwärts abflacht.

Da die Siedekrisis aber bei gleichmäßiger Beheizung immer am Ende des Versuchskanals auftritt, muß man, um sie in den thermischen Einlaufbereich zu legen, kurze Versuchskanäle wählen. Bild 10 gibt den Temperaturverlauf der Wand eines solchen kurzen Versuchskanals mit  $L/D=10$  wieder. Es zeigt sich der gleiche stetige exponentielle Anstieg wie bei der Drallströmung, obwohl sich hier das normale turbulente Geschwindigkeitsprofil in einer langen unbeheizten Anlaufstrecke voll ausbilden konnte, also drallfreie Strömung herrschte.

Nachdem die Erscheinungsform des burnout in der thermischen Einlaufzone die gleiche ist wie bei Drallströmung, ist auch eine ähnlich verbessernde Wirkung auf die Höhe der kritischen Heizflächenbelastung zu erwarten. Aus dem Vergleich für verschiedene Längen des beheizten Versuchskanals, Bild 11, geht hervor, daß sich bei thermisch nicht ausgebildetem Profil in der Burnoutstelle, also mit Versuchskanälen mit  $L/D$  gleich 5 und 10, zwei- bis vierfache Werte der kritischen Heizflächenbelastung erzielen lassen, wie sie mit langen Versuchskanälen erreicht werden.

## Hydrodynamische Vorgänge bei pulsierendem burnout

Erst in jüngster Zeit wurde erkannt, daß burnout auch als Folge von Pulsationen in der Strömung auftreten kann, während man vorher meist geneigt war, Ergebnisse, die nach den bis dahin als gültig angesehenen Erfahrungen zu tief lagen, als Meßfehler abzutun. *Lowdermilk* [6] und *Aladiev* [7] gehören zu den ersten, die feststellten, daß burnout auch durch Pulsation in der Strömung hervorgerufen werden kann. *Silvestri* [8], stellte hierüber bereits eine Reihe gezielter Messungen an.

Die Pulsationen setzen bei Erreichen einer bestimmten Heizflächenbelastung plötzlich ein, ohne daß (mit Ausnahme der langsamen und gleichmäßigen Erhöhung des Wärmestroms) irgend ein anderer Eingriff in den Kreislauf vorgenommen wird. Mengenstrom, Druck und Temperatur waren bis dahin völlig stabil. **Bild 12** zeigt zwei Oszillogramme der Vorgänge vom Beginn der Pulsationen bis zum burnout.

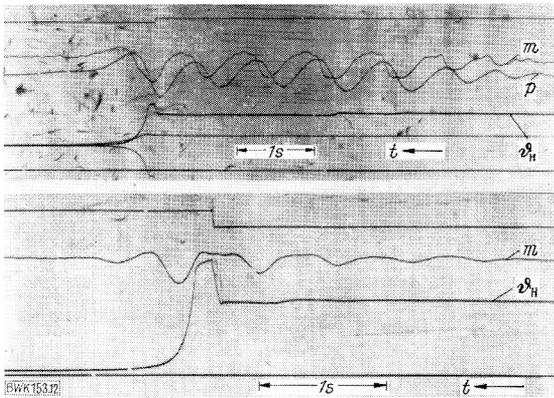
Mit Erhöhung der Heizflächenbelastung treten plötzlich Mengenstrom- und Druckschwankungen auf, die nach wenigen Perioden stark zunehmen. Bei der Heizflächentemperatur ist zwar wie beim burnout erster Art vor dem eigentlichen Temperaturanstieg der leichte Temperatureinknick zu beobachten, der Anstieg selbst erfolgt hier jedoch wesentlich steiler und ohne statistische Schwankungen.

Auffallend ist der nach Abschalten der Wärmezufuhr zunächst sehr langsame Rückgang der Heizflächentemperatur, während beim stabilen burnout der Abfall nahezu verzögerungsfrei erfolgte. Diese Verzögerung läßt sich nur dadurch erklären, daß sich im Versuchskanal ein ausgedehntes Dampfpolster gebildet hat, das nach Abschalten der Wärmezufuhr von der Strömung erst verdrängt werden muß, ehe die Heizfläche wieder intensiv gekühlt werden kann. Setzt man die Verdrängungsgeschwindigkeit für das Dampfpolster gleich der mittleren Geschwindigkeit des Fluids vor dem burnout, so läßt sich daraus ableiten, daß der Versuchskanal nahezu auf seiner ganzen Länge mit Dampf ge-

füllt war. Die Druckschwankungen erreichen Amplituden von rd. 2 at bei einem Gesamtdruck von 70 at. Die Frequenz dieser Druck- und Mengenstromschwankungen wird im wesentlichen von der Länge des beheizten Kanals sowie von dem mittleren thermodynamischen Zustand des Fluids im Versuchskanal bestimmt. Sie ist umgekehrt proportional der Länge des Versuchskanals und steigt mit zunehmender Unterkühlung. Bei geringem Dampfgehalt kann die Schwingungsperiode so groß werden, daß man eigentlich nicht mehr von einer Pulsation sprechen kann, da beim ersten Rückgehen des Mengenstroms bereits das burnout eintritt. **Bild 13** zeigt Pulsationen mit geringerer Frequenz, wie sie in der Nähe der Sättigungslinie entstehen.

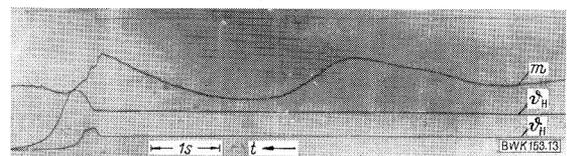
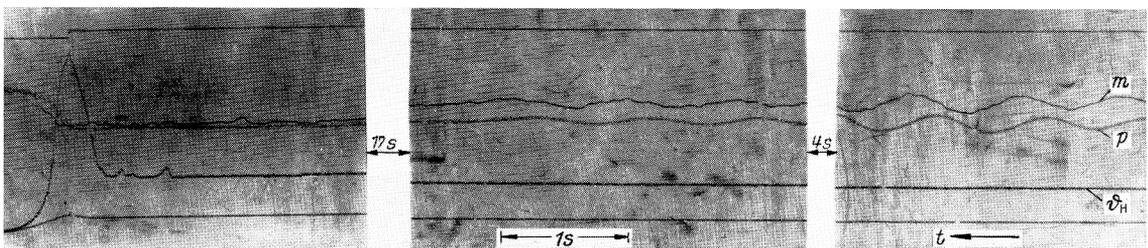
Nicht in allen Fällen haben die Pulsationen genügend Energie, um zum burnout zu führen. Bei entsprechenden schwingungs- und strömungstechnischen Vorkehrungen können die Pulsationen mit weiterer Erhöhung der Heizflächenbelastungen auch wieder abklingen, und der Wärmefluß läßt sich dann bis zum burnout erster Art steigern, **Bild 14**.

Noch deutlicher ist das Oszillogramm, **Bild 15**, das mit Hilfe einer „Blasensonde“ aufgenommen wurde. Sie besteht im wesentlichen aus einem bis auf eine schlanke Spitze glasumhüllten Platindraht. Diese Spitze wird dem Dampf/Wasser-Strom im Versuchskanal ausgesetzt; über eine elektronische Schaltung wird die elektrische Leitfähigkeit des an der Spitze in jedem Augenblick anstehenden Fluids gemessen. Die Meßergebnisse mit dieser Sonde in einer pulsierenden Zweiphasenströmung atmosphärischen Drucks zeigen, wie kurze Perioden einer Wasserströmung mit längeren Zeiten reiner Dampfströmung abwechseln. Zwischen beiden herrscht ganz kurzzeitig eine Zweiphasenströmung, wobei die Unregelmäßigkeiten im Oszillogramm darauf schließen lassen, daß die Dampfblasen im Wasser nicht homogen verteilt sind, sondern sich zu größeren Einheiten, sog. Kolbenblasen, agglomeriert haben. In Phase dazu verläuft der am Eintritt zum Versuchskanal gemessene Druck. Die Pulsationen waren hier so ausgeprägt,

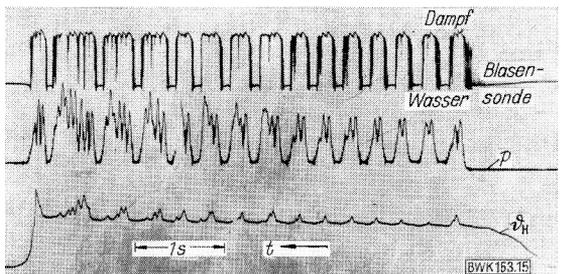


**Bild 12.** Heizflächentemperatur  $\vartheta_H$ , Mengenstrom  $m$  und Druck  $p$  am Kanaleintritt bei pulsierendem burnout.

**Bild 14.** Abklingen der Pulsation und anschließendes Filmsieden.



**Bild 13.** Niedrige Frequenz Mengenstromschwankungen beim pulsierenden burnout nahe dem Sättigungszustand.

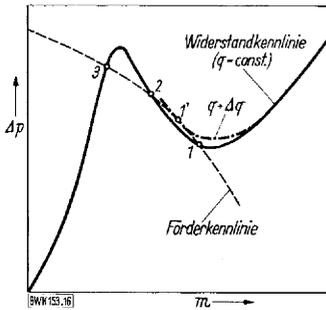


**Bild 15** (oben). Pulsationsströmung.

daß sie sich als Temperaturschwankungen auf die Heizflächen übertragen.

Es interessiert nun, wodurch diese Pulsationen verursacht werden und welche Kräfte für ihre Erregung und Dämpfung von Bedeutung sind. Ein wesentliches Stabilitätskriterium ergibt sich aus dem Zusammenwirken von Förder- und Widerstandkennlinie. Bild 16 zeigt die Widerstandkennlinie für einen beheizten Kanal, dem am Eintritt unterkühltes Wasser zuströmt und der an das Fluid einen konstanten Wärmestrom abgibt. Als Abszisse ist der Mengenstrom, als Ordinate die Druckdifferenz zwischen Eintritt und Austritt zum Kanal aufgetragen.

Bei großen Mengenströmen, bei denen die Heizleistung nicht ausreicht, einen merklichen Anteil zu verdampfen,



**Bild 16.**  
Zusammenwirken von Förder- und Widerstandkennlinie.

folgt die Widerstandkennlinie im wesentlichen dem parabolischen Verlauf der einphasigen flüssigen Strömung. Verringert sich der Mengenstrom, so tritt stärkeres Verdampfen ein und die dadurch hervorgerufene Zweiphasenströmung führt trotz kleiner werdendem Durchsatz zum Wiederanstiegen des Druckverlustes im Kanal. Bei noch geringerem Mengenstrom wird schließlich alles Wasser verdampft, und die Widerstandkennlinie folgt jetzt der Parabel für die Reibungsverluste bei Dampfströmung. Trägt man in Bild 16 noch die Förderkennlinie des durch die Pumpe erzeugten treibenden Druckes ein, so ergeben sich die Betriebspunkte als Schnittpunkte zwischen Förder- und Widerstandkennlinie.

Sie können stabilen oder instabilen Charakter haben. Das Stabilitätskriterium ergibt sich [9] aus der Bilanz der auf die Strömung wirkenden Kräfte, und die Strömung ist stabil, wenn

$$\frac{\partial \Delta p_f}{\partial m} - \frac{\partial \Delta p_w}{\partial m} \leq 0.$$

ist. Hierin bedeuten

$\Delta p_f$  die durch den treibenden Druck erzeugte Druckdifferenz,  
 $\Delta p_w$  den Strömungswiderstand.

In Bild 16 stellen die Punkte 1 und 3 stabile Zustände, der Punkt 2 einen instabilen Zustand dar. Erhöht man die Heizflächenbelastung in einem System des Betriebszustands 1, so setzt bei schon höherem Mengenstrom Verdampfen ein, der wieder ansteigende Ast der Widerstandkennlinie verschiebt sich nach rechts oben; dadurch ist die Möglichkeit gegeben, daß für den neuen Schnittpunkt 1' das Stabilitätskriterium nicht mehr erfüllt ist. Dies führt zu einer starken Verringerung des Mengenstroms bis in den Bereich der reinen Dampfströmung mit wesentlich schlechteren Wärmeübergangsbedingungen. Dies wird zwar ein burnout zur Folge haben, ist jedoch keine hinreichende Bedingung für das Entstehen der Pulsationen, die Schwingungsvorgänge sind und die durch das Zusammenwirken von erregenden und dämpfenden Kräften sowie Trägheits- und Federkräften bestimmt werden.

Vielfach wird die Erregung aus dem Verdampfungsvorgang beim Blasensieden erklärt. Wenn der Überhitzungsgrad der an der wärmeabgebenden Wand angelagerten Grenzschicht große Werte annimmt, wird die aus einem Siedekeim sich bildende Blase sehr rasch anwachsen, was

zu starken Volumänderungen und Druckschwankungen führt. Heizflächen für technische Zwecke haben jedoch fast immer eine (durch das Herstellungsverfahren bedingte) genügend große Rauigkeit, so daß solche großen Übertemperaturen nicht entstehen und die Intensität des Vorgangs der Blasenbildung nicht ausreicht, um merkliche Druckschwankungen im Kanal hervorzurufen.

Bei geringen Dampfgehalten von 3 bis 10% und kleinen bis mittleren Mengenströmen herrscht im Versuchskanal Kolbenblasenströmung, bei der flüssige Zonen mit großen Blasen abwechseln, wodurch Schwankungen im Druck, Mengenstrom und auch im Wärmeübergangskoeffizienten entstehen, da der thermodynamische Zustand raschen Änderungen unterworfen ist. Unsere Messungen lassen darauf schließen, daß diese Strömungsform zwar zu Pulsationen führen kann, jedoch nicht die einzig mögliche Erregungskraft darstellt, da wir auch Pulsationen in Gebieten beobachteten, in denen nach den aus dem Schrifttum zu entnehmenden Erfahrungen keine Kolbenblasenströmung herrscht.

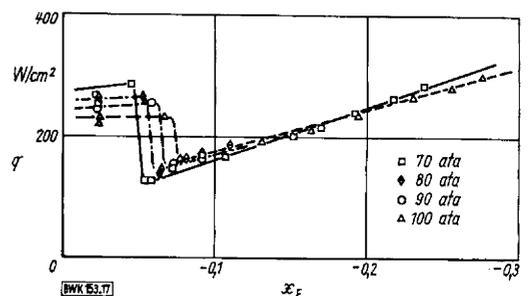
Im allgemeinen wird in einer unter Wärmezufuhr stehenden Siedewasserströmung thermodynamisches Gleichgewicht angenommen. Bei den hohen Heizflächenbelastungen und der damit verbundenen intensiven Dampfbildung dürfte diese Annahme jedoch kaum mehr der Wirklichkeit entsprechen. Es müssen vielmehr Vorgänge wie Siede- und Kondensationsverzögerung beachtet werden. Über diese Größen liegen besonders im Bereich hoher Drücke noch keine hinreichend zuverlässigen Messungen vor, so daß eine Abschätzung ihres Einflusses auf die Erregung von Pulsationen nicht möglich ist.

Die rückstellend wirkenden Federkräfte werden bei diesem schwingenden System durch verschiedenartige Energiespeicherung gebildet. Die Verdampfungswärme der Dampfblasen, Druckaufbau in mit kompressiblem Medium gefüllten Apparaten sowie Wärmestau infolge Temperaturerhöhung der wärmeabgebenden Wand stellen solche Speichermöglichkeiten dar. Dämpfend auf die Pulsationen wirken Drosselstellen und die Reibung des Wasser/Dampf-Gemisches im Kanal.

Aus den verschiedenen konstruktiven und strömungstechnischen Möglichkeiten, das pulsierende burnout zu vermeiden, bieten sich vom praktischen Gesichtspunkt vor allem zwei an:

- 1) die „Steifheit“ des schwingenden Systems zu erhöhen, indem man die Kompressibilität im Kreislauf verringert, und
- 2) die dämpfenden Kräfte durch Anbringen von Drosselstellen zu vergrößern.

Steigender Druck vermindert die Kompressibilität des im Heizkanal gebildeten Dampfes und gleichzeitig wird die durch das Verdampfen entstehende Volumänderung kleiner. Dadurch verschiebt sich die Grenze für das pulsierende burnout zu größeren Unterkühlungsgraden, Bild 17. Ein wesentlich größeres kompressibles Volum stellt der Druck-



**Bild 17.** Druckeinfluß auf den Umschlag vom burnout erster Art zum pulsierenden burnout, gezeigt in der kritischen Heizflächenbelastung in Abhängigkeit von der Eintrittunterkühlung bei verschiedenen Drücken und  $m = 300 \text{ g/cm}^2\text{s}$ .

$L/D = 80$ , Rohr ohne Anlaufstrecke

halter mit seinem Dampfraum dar, der ein notwendiger Bestandteil jedes Druckwasserreaktors ist und als Windkessel wirkt. Die Messungen ergaben, daß die Pulsation auf strömungs- und schwingungstechnische Eingriffe stromaufwärts des Versuchskanals weit stärker reagieren als stromabwärts. Verlegt man einen stromaufwärts angeschlossenen Druckerzeuger stromabwärts und entfernt damit sein großes kompressibles Volum in der Kreislaufstrecke zwischen Umwälzpumpe und Versuchskanal, so nimmt die Neigung zu Pulsationen stark ab.

Drosselung und damit Vergrößerung des Druckverlustes unmittelbar am Eintritt zum Heizkanal ist jedoch ein zuverlässigeres, wenn auch unwirtschaftlicheres Mittel, das pulsierende burnout zu vermeiden. Da eine erhöhte Drosselung immer zusätzliche Pumpenleistung kostet, ist man bestrebt, diesen aus Gründen der Pulsationssicherheit eingebrachten Druckverlust so gering wie gerade notwendig zu halten. Wir haben diese minimal notwendige Drosselung für verschiedene konstruktive thermo- und hydrodynamische Gegebenheiten untersucht. Ein Beispiel der dabei gewonnenen Meßergebnisse zeigt Bild 18. Am Meßstrecken-eintritt befand sich eine verstellbare Drosselvorrichtung, die

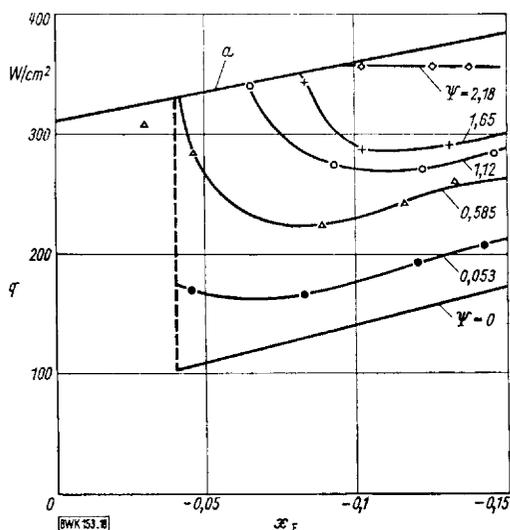


Bild 18. Einfluß des Druckabfalls am Heizkanaleintritt auf die maximale Heizflächenbelastung.

$m = 240 \text{ g/cm}^2\text{s}$ ;  $L/D = 71,5$ ;  $p = 70 \text{ at}$   
*a* Kritische Heizflächenbelastung bei der Siedekrise ohne vorhergehende Instabilitäten  
 Drosselgrad  $\psi = 2 \Delta p / m^2$

es gestattete, den Druckverlust in weiten Grenzen stufenlos zu ändern. Aus den Linien gleichen Drosselgrads  $\psi = 2 \Delta p / m^2$  ist zu sehen, wie das pulsierende burnout mit wachsender Drosselung zu immer höherer Unterkühlung verschoben wird, bis es schließlich nicht mehr auftritt.

### Folgerungen für die thermodynamische Auslegung hochbelasteter, wassergekühlter Heizflächen

Aus den vorliegenden Messungen ergeben sich eine Reihe theoretischer und praktischer Folgerungen. So ist es bis heute nicht geklärt, ob das Filmsieden in erster Linie thermodynamischer oder hydrodynamischer Natur ist, d. h. ob es dadurch hervorgerufen wird, daß mit Erreichen einer

gewissen Übertemperatur der wärmeabgebenden Wand keine Siedekeime mehr vorhanden sind und damit die Voraussetzungen für das Blasensieden entfallen, oder aber, von einer gewissen Verdampfungsrates an, die ja direkt proportional dem Wärmefluß ist, das Strömungsgleichgewicht zwischen dem der Heizfläche zuströmenden Wasser und dem abströmenden Dampf gestört ist, so daß sich ein geschlossener Dampffilm bildet. Die Messungen legen den Schluß nahe, daß das burnout in erster Linie hydrodynamischer Natur ist und daher auch durch strömungstechnische Mittel wesentlich beeinflußt werden kann.

Deshalb ist die strömungstechnische Gestaltung der wärmeabgebenden Heizfläche besonders wichtig. Normale Einlaufstörungen, wie sie an scharfkantigen Einströmöffnungen entstehen, klingen, wie die Untersuchungen gezeigt haben, nach einer Strecke, die gleich dem 10- bis 20fachen Durchmesser ist, rasch ab und verbessern damit das Burnoutverhalten nur über eine kurze Distanz.

Nachhaltigere Wirkung bei Siedewasserreaktoren haben Drallbleche, die zweckmäßig in einem gegenseitigen Abstand vom 40- bis 50fachen Durchmesser in ein Reaktor-brennelement eingebaut werden und dabei gleichzeitig als Distanzhalter dienen. Für Druckwasserreaktoren hat ihre Verwendung nur dann Sinn, wenn die Wassergeschwindigkeit im Kern hinreichend groß ist.

Verschiedentlich wird heute die Verwendung von Plutonium in thermischen Reaktoren studiert, wobei man in erster Linie an Mischoxiden aus Uran-dioxid und Plutonium-dioxid denkt. Dabei besteht jedoch die Schwierigkeit, diese beiden Komponenten völlig homogen zu mischen, und örtliche Konzentrationsunterschiede können Zonen hohen Wärmeflusses hervorrufen. Daraus erhebt sich die Frage, ob bei der wärmetechnischen Auslegung für die Burnoutsicherheit diese eng begrenzten örtlichen Wärmeflußspitzen maßgebend sind, was eine erhebliche Beschränkung in der mittleren Wärmestromdichte des Reaktorkerns bedeuten würde. Die Messungen an kurzen Versuchskanälen lassen den Schluß zu, daß diese heißen Stellen den Reaktorkern nicht gefährden und daß die Burnoutrechnung im wesentlichen auf der normalen sinusähnlichen Wärmeflußverteilung aufgebaut werden kann.

BWK 153

### Schrifttum

- [1] Henkel, D.: Messungen der Oberflächentemperatur von mit Gleichstrom beheizten Kanälen mittels Doppelthermoelement. Bericht: M. A. N. 09.32.01. Nov. 1963, der Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg AG, Werk Nürnberg, Abt. Kernkraftanlagen. (Usaac-Euratom Forschungsvertrag 057-61-RDD).
- [2] Baker, O.: Simultaneous flow of oil and gas. Oil and Gas J. **53** (1954) Juli, S. 185/95.
- [3] Collier, J. G.: Burnout in liquid cooled power reactors. Nuclear Power **6** (1961) Juli, S. 64/67.
- [4] Hewitt, G. F.: Private Mitteilung, Mai 1965; siehe auch Burnout and nucleation in climbing film flow. AERE R 4374, Aug. 1963, und The breakdown of the liquid film in annular two-phase flow. AERE R 4303, Aug. 1963.
- [5] Fouré, C., u. M. Moussez: Private Mitteilung sowie Bericht: SNECMA-Euratom No. 22/20528.
- [6] Lowdermilk, W. H., C. D. Lanzo u. B. L. Siegel: Investigation of boiling burnout and flow stability for water flowing in tubes. NACA TN 4382, Sept. 1958.
- [7] Abudiev, I. T., Z. I. Mirovolskij, V. E. Doroshtchuk u. M. A. Styrikovich: Boiling crisis in tubes. Internat. Heat Transfer Conf. Boulder (Colorado), Aug. 1961.
- [8] Silvestri, M., u. a.: Heat transfer crises with steam-water mixtures. Energia Nucleare **12** (1965) Nr. 3, S. 121/72.
- [9] Griffith, P., u. J. S. Maupetch: A study of system-induced instabilities in forced convection flows with subcooled boiling. Dept. of Mech. Eng., Mass. Inst. Technology, Report No. 5382-35, April 1965.