

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG DER BEANSPRUCHUNG VON Brennelementkästen DURCH SIEDE- UND KONDENSATIONSSTÖSSE IN Natrium

M. CRAMER, B. DORR, R.A. MÜLLER,

Institut für Reaktorentwicklung, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Karlsruhe, Germany

ABSTRACT

The report describes the first series of sodium boiling experiments performed on a full-sized fuel element of the DEBENELUX Fast Breeder Reactor which is presently in the final phase of design. These experiments relate to the general safety experiments carried out in our Institute with respect to sodium-cooled fast reactors. It was the aim of this work to obtain information about the boiling behavior of fuel-element bundles made of a large number of pins and, in particular, to investigate into the stress conditions prevailing at the walls of the hexagonal fuel-element box.

Boiling was initiated in two different ways:

by heating of sodium under constant pressure up to the boiling temperature or, in case of delayed boiling, beyond the boiling temperature,

by rapid reduction of pressure after sodium heating to a predetermined temperature under increased pressure.

During the boiling process the temperature distribution and the pressure behavior within the fuel-element bundle were recorded by an automatic data acquisition system. For some experiments, the characteristics of the boiling processes are discussed on the basis of measured results.

The experiments showed that the pressure loading exerted through boiling and condensation impact on the wall of the fuel-element box is kept at such a low level that a destruction or unacceptable deformation of these parts should not be anticipated.

1. EINLEITUNG

Schnelle natriumgekühlte Reaktoren großer Leistung haben im zentralen Bereich des Reaktorkernes meist einen negativen Kühlmitteldichtekoeffizienten der Reaktivität, so daß eine örtliche Verdünnung des Kühlmittels in diesem Bereich zu einer Erhöhung der Reaktivität führt. Außerdem können auch Geometrieänderungen der Brennstoffanordnung zu einer Erhöhung der Reaktivität führen. Der Erforschung aller in diesem Zusammen-

hang maßgebenden Mechanismen und Ablaufketten, insbesondere aller bestehenden Möglichkeiten einer gegenseitigen Verstärkung dieser Mechanismen bzw. des Übergreifens einer Störung auf benachbarte Brennelemente (die sog. Schadenspropagation), kommt deshalb eine besondere Bedeutung zu.

Die Natrium-Siedevorgänge in den Brennstoffelementen, die die Folge einer Kühlungsstörung sind, spielen dabei meist eine zentrale Rolle. Verschärft wird so eine Kühlmittelstörung durch die Eigenschaft des Natriums, daß es bei Fehlen von Siedekeimen zu hohen Siedeverzügen neigt [1]. Auch im Zusammenhang mit dem Problem einer thermischen Reaktion zwischen Brennstoff und Natrium können Siedevorgänge eine gewisse Rolle spielen. Die Vorgänge des Natrium-Siedens, die dabei auftretenden Siedestöße wurden deshalb bereits in zahlreichen Arbeiten theoretisch und experimentell untersucht [2;3;4]. Die experimentellen Untersuchungen beschränken sich dabei allerdings bisher auf idealisierte Geometrien oder auf verkürzte Stab Bündel mit nur wenigen Einzelstäben.

Bei den Versuchen, über deren erste Phase im folgenden berichtet werden soll, wurde demgegenüber erstmals ein aus 169 Einzelstäben bestehendes Brennelementbündel in Originalgröße des SNR-Prototypreaktors eingesetzt. Diese BEVUS-Versuche ("Brennelementverhalten unter Siedeverzug") dienen der Ermittlung der tatsächlich auftretenden Siede- und Kondensationsstöße in einem derartigen Brennelementbündel bei vollständiger Kühlkanalblockade. Versuchsziel ist die Aussage, ob es bereits hierdurch zu einer Gefährdung bzw. Deformation der Kastenwände des Brennelementes kommen kann. Die Erforschung der Beanspruchungsverhältnisse der Kernbauteile unter derartigen dynamischen Belastungen ist die zentrale Aufgabe im Hinblick auf das vorstehend erwähnte Propagationsproblem. Gerade hier stößt aber die theoretische Behandlung vorerst auf sehr große Schwierigkeiten, insbesondere deshalb, weil die Festigkeitseigenschaften der infrage kommenden Werkstoffe bei den auftretenden Temperaturen und Kurzzeitbelastungen noch weitgehend unbekannt sind.

Die Heizleistung des Bündels konnte den realen Reaktorbedingungen, bedingt durch die erforderlich große Anschlußleistung, aus technischen Gründen nicht angepaßt werden. Da eine vollständige Blockade des Kühlmittels simuliert wurde, reichte eine Heizleistung von 40 W/cm Stab für die Durchführung der Siedeveruche aus.

Die verwendete Versuchseinrichtung, die eine Ergänzung der Natrium-Behälter-Versuchsanlage (NABEA) [5] darstellt, erlaubte es, den Siedevorgang auf zwei Arten einzuleiten:

- durch Aufheizung unter konstantem Druck bis auf Siedetemperatur bzw. bei auftretendem Siedeverzug über die Siedetemperatur
- durch schnelle Druckabsenkung nach Aufheizung auf eine vorgegebene Temperatur unter Überdruck.

Mit dem ersten Testelement wurden bisher sechs Versuche bei konstantem Druck und vier Versuche mit schneller Druckabsenkung durchgeführt.

2. ANLAGENBESCHREIBUNG

Auf der Abb. 1 wird schematisiert der Aufbau der Versuchsanlage gezeigt.

Der Versuch wird in einem Versuchsbehälter von 0,6 m Durchmesser und 8,3 m Länge durchgeführt. Dieser Behälter ist von einem Schutzbehälter umgeben, damit im Falle von Leckagen ein Natriumbrand vermieden wird. Der Versuchsbehälter enthält in seinem unteren Teil den Versuchseinsatz, darüber einen Natriumpool von ca. 2 m Höhe und in seinem oberen Teil einen Schutzgasraum, dessen Größe so dimensioniert ist, daß beim Ausdampfen von Natrium aus dem Heizelement kein merklicher Druckanstieg im Behälter entsteht. Bei der zweiten Versuchsart ist während der Aufheizphase der Schutzgasraum vom Pool durch einen Ventilteller getrennt. Der Ventilteller ist mit einer pneumatischen Vorrichtung verbunden, durch deren Auslösen ein Druckausgleich zwischen Pool und Schutzgasraum stattfindet und damit die Druckabsenkung im Natrium herbeigeführt wird.

Kernstück des Versuchseinsatzes ist das Heizelement, das in seinem Aufbau und seinen Abmessungen einem Prototypreaktor-Brennelement entspricht. Das Stabbündel besteht aus 162 elektrisch beheizten Widerstandsheizstäben und 7 Meßstäben mit Thermoelementfühler. Der Durchmesser der Heizstäbe und auch der Meßstäbe beträgt 6 mm. Die Orientierung der Stäbe erfolgt durch Waben-Gitterabstandshalter. Umschlossen wird das Bündel von einem Sechskantkasten aus dem Werkstoff Nr. 4919 von 110 mm Schlüsselweite, einer Wandstärke von 2,5 mm und einer Länge von 2400 mm. Lage und Länge der beheizten Zone entsprechen dem Reaktorcore.

Umgeben wird das Heizelement von 6 weiteren Elementen. Ihre Anordnung wurde so gewählt, daß sie einen Ausschnitt des Reaktorkernverbandes darstellen. Sie sind lediglich Attrappen, die die Festigkeit des Kernverbandes simulieren.

Die im Element auftretenden Siedeabläufe werden durch Druck- und Temperaturmeßstellen registriert. Die Versuchsinstrumentierung ist auf Abb. 2 dargestellt. Die Temperaturen werden an 28 Stellen im Heizelement, an 6 Stellen am Heizelementkasten und 9 Stellen an der Querlanze oberhalb des Heizelementes mit 0,5 mm Durchmesser mantelverschweißten Thermoelementen gemessen. Diese Anzahl von Meßstellen hat sich als nützlich erwiesen, um die räumliche Situation im Element analysieren zu können. Der Druck wird oberhalb des Heizbündels gemessen. Als Druckfühler dient ein Quarzaufnehmer, der wegen seiner Temperaturempfindlichkeit außerhalb des Versuchsbehälters angeordnet ist. Quarzdruckaufnehmer, vorgeschaltetes Druckaufnehmerrohr und das Natrium als Druckübertrager bilden zusammen ein Drucksystem, das eine Eigenfrequenz von ca. 50 Hz aufweist. Je nach zeitlichem Druckgradienten des Druckverlaufes ist das Ausgangssignal analog diesem Druckverlauf oder eine gedämpfte Schwingung des Drucksystems. Die Schwingungsform wird durch die Anstehzeit und dessen Abklingverhalten bestimmt.

Während der Versuchszeit von 5 min wurden die Temperaturmeßwerte mit einer Abfragefrequenz von 200 Hz und die Druckmeßwerte mit einer Abfragefrequenz von 3,2 kHz von einer Datenerfassungsanlage aufgenommen. Die Meßwerte wurden auf Magnetband gespeichert und mit einer Rechenanlage zur Auswertung aufbereitet.

3. VORGÄNGE BEIM NATRIUM-SIEDEN IN SENKRECHTEN KANÄLEN

Im folgenden werden zwei wichtige Teilabläufe beim Natriumsieden, die allen ausgeführten Versuchen gemeinsam sind und die auch an anderen Stellen [1;2] bereits behandelt wurden, kurz beschrieben:

3.1 Entstehung und Verhalten einer Natriumblase

Jede beim Sieden entstehende Blase erzeugt am Ort ihrer Entstehung eine Druckerhöhung, die dem Sättigungsdruck der dort vorhandenen Überhitzungstemperatur entspricht. Diese so entstandene Druckdifferenz zwischen Blase und Pool beschleunigt - unter den mit der verwendeten Versuchsapparatur gegebenen Bedingungen - die über der Blase befindliche Natriumsküle nach oben. Je größer die Überhitzungstemperatur ist, desto größer ist die Druckdifferenz und damit die Beschleunigung.

Gleichzeitig mit der Beschleunigung der Natriumsküle dehnt sich die Blase aus. Hierbei bleibt jede Stelle der Blasenrandzone im thermodynamischen Gleichgewicht mit der Phasengrenze. Eine räumlich ungleiche Temperaturverteilung im Natriumraum, in dem die Blase wächst, hat demnach ein Druckgefälle innerhalb der Blase zur Folge. Dieses verursacht in der Blase eine Dampfströmung von der siedenden zur kondensierenden Blasen- und Blasenseite. Die Dampfgeschwindigkeit wird dabei durch den Druckverlust bestimmt, den der Dampf auf seinem Strömungsweg erleidet.

Wächst die Blase schließlich in Gebiete, in denen der Sättigungsdruck unter dem bezogenen Pooldruck liegt, dann setzt der Kondensationsvorgang ein. Die Bewegung der Natriumsküle wird hierdurch verzögert, so daß es schließlich zu einer Umkehr der Bewegungsrichtung kommt.

Unter dem bezogenen Pooldruck wird dabei der Druck am Natriumspiegel plus der statischen Höhe, bezogen auf den Ort des Geschehens, verstanden. Erhöht sich der Druck in der Blase wieder über den bezogenen Pooldruck, dann wird das rückströmende Natrium erneut verzögert und wieder ausgetrieben.

Die durch den Siede- und Kondensationsvorgang bedingte Bewegung des Natriums flacht die ungleiche Temperaturverteilung im Brennelement ab. Unterstützt wird dies außerdem durch den Wärmetransport innerhalb der Blase infolge der dort auftretenden Verdampfungs- und Kondensationsvorgänge.

3.2 Pulsieren der Natriumsküle

Hierunter wird die eben beschriebene Auf- und Abwärtsbewegung der Natriumsküle verstanden. Maßgebend für die wirksame Druckdifferenz und damit für den Bewegungsablauf ist dabei vor allem der Sättigungsdruck am oberen Blasenrand.

Die Pulsation unterliegt einer bestimmten Frequenz. Diese wird im wesentlichen durch die folgenden Einflüsse bestimmt:

- die zugeführte Wärmeleistung, die in die Ausdehnungsgeschwindigkeit der Blase eingeht
- den Temperaturgradienten, den die Blase durchläuft. Er ist für den Beginn des Kondensationsvorganges und die Kondensationsgeschwindigkeit verantwortlich.

- Die Größe der Blasenoberfläche, die für den Wärmeaustausch verantwortlich ist.

Bei den vorliegenden Versuchen traten Frequenzen zwischen 0,5 und 2 Hz auf, solange sich die Blase noch innerhalb des Brennelementbündels befand. War das Brennelement hingegen nach oben ausgedampft, so daß die Blase bis in den Pool reichte, dann betrug die Frequenz ca. 10 Hz.

Bei der Pulsation wurden große örtliche Temperaturänderungen gemessen, deren Amplituden durch den ständig stattfindenden Wärmeausgleich mit jeder Pulsation kleiner wurden.

Die maximale Temperaturveränderung betrug bei dem ersten Austrieb 120 °C.

Wie die durchgeführten Versuche weiterhin gezeigt haben, gibt es zwei unterschiedliche Übergänge von der Kondensationsphase zur Ausdampfphase. Es kann einmal eine Restblase erhalten bleiben, zum anderen kann diese Blase auch vollständig kollabieren. Beide Vorgänge lassen sich aus den aufgenommenen Meßwerten eindeutig ablesen. Hierauf wird unter 4. noch näher eingegangen.

4. VERSUCHE BEI KONSTANTEM DRUCK

Bei einem auf Mitte Heizelement bezogenen Pool-Druck von 1,3 ata ergaben sich Siedeverzüge zwischen 0 und 70 °C. Sie liegen weit unter dem $\sqrt{2}$ für ideale Bedingungen angegebenen theoretisch möglichem Grenzwert von 400 °C. Der Unterschied dürfte in den mit Flüssigkeit gefüllten engen Hohlräumen, die durch die konstruktive Gestaltung der verwendeten Gitterabstandshalter des Brennelementes als kritische Keime in genügender Form vorliegen, zu suchen sein. Diese Annahme wird auch dadurch bestätigt, daß das Sieden im Brennelement nicht unbedingt an der heißesten Stelle einsetzte, wie die Aufzeichnungen der Temperaturmeßstellen erkennen lassen. Es wurden maximale Temperaturunterschiede von 30 °C gemessen.

Der maximale Siedeverzug von 70 °C wurde nur bei einem der sechs ausgeführten Versuche erreicht. Dieser Wert wurde nicht direkt gemessen, da sich am Ort der Blasenentstehung kein Thermoelement befand, konnte aber übereinstimmend sowohl aus der Druckanzeige (Druckanstieg um 1 at) als auch durch Extrapolation der Temperaturverläufe anderer Meßstellen bestimmt werden. Direkt ablesbar auf Abb. 3 ist ein Siedeverzug von max. 45 °C. Ferner ist zu erkennen, daß der Druckverlauf durch kleinere Druckspitzen unterbrochen wird, die auf neu entstandene Blasen schließen lassen. Die Kondensation endete hier mit dem Kollabieren der Blase. Hierdurch entsteht eine scharfe Druckspitze mit einem Maximalwert von 0,9 at, die etwa 10 msec ansteht. Wie Abschätzungen zeigen, entspricht dieser Druckstoß der Masse und der Geschwindigkeit der herabfallenden Natriumsäule. Der Zeitraum zwischen Siedebeginn und Kollabieren betrug 460 msec (bei anderen Versuchen 280 bis 500 msec).

Das Auftreten von einerseits mehreren Siedestößen und andererseits nur einem Kollabierungsstoß läßt darauf schließen, daß sich alle entstandenen Einzelblasen vor dem Kollabieren zu einer einzigen Blase zusammengeschlossen haben.

Die durch den Siede- und Kondensationsvorgang verursachte Natrium-Vermischung verminderte das Temperaturniveau im Brennelement unter die Siedetemperatur. Durch weitere

Leistungszufuhr über die Heizstäbe erreicht das Natrium erneut Siedetemperatur und beginnt ohne Siedeverzug zu siedeln.

Abb. 4 zeigt zu Beginn den Siedeverzug, der 20-fach zeitlich gedehnt in Abb. 3 dargestellt wurde. Die nach dem Kollabierungsstoß ablaufenden Vorgänge sind typische Siedeverläufe ohne Siedeverzug.

Bei drei Versuchen trat sofort zu Beginn Sieden ohne Siedeverzug auf. Die hierbei entstehenden Blasen haben nicht meßbar kleine Druckdifferenzen zum bezogenen Pool-Druck. Die Entstehung vieler kleiner Blasen ist an den Temperaturverläufen der zahlreichen Meßstellen in der Siedezone ersichtlich, da, bedingt durch den großen Temperaturgradienten im Element, bereits kleine Natriumverschiebungen zu erfaßbaren Temperaturänderungen an den Meßstellen in der Nähe einer Blase führen. Gleichzeitig zu diesen Temperaturänderungen wird auch das Kollabieren einiger Blasen vom Druckmeßsystem registriert.

Im weiteren Verlauf des Siedevorganges kommt es zu einem Wachsen der Blasen und zur Vergrößerung ihrer Lebensdauer. Hierfür sind im wesentlichen zwei Gründe maßgebend:

- Abbau großer Temperaturgradienten durch das bereits begonnene Sieden
- Erhöhung des mittleren Temperaturniveaus im Element durch das weitere Aufheizen des Natriums

Je größer die Einzelblasen werden, um so wahrscheinlicher ist es, daß sie sich zu einer großen Blase vereinigen. Diese bestimmt dann weitgehend das Geschehen im Element.

Der Übergang von der Kondensations- zur Ausdampfphase erfolgt nicht einheitlich, es treten sowohl "weiche" Übergänge, bei denen eine Restblase erhalten bleibt, als auch deutlich erkennbare Druckspitzen auf, die auf ein vollständiges Kollabieren der Blase hindeuten.

Dieser Unterschied wird auch von den Temperaturmeßstellen registriert. Hier verursacht das bei der Kondensation einfallende Natrium, bedingt durch den Temperaturgradienten im Natrium, zunächst einen Temperaturabfall. Verbleibt eine Blase, so wird die einfallende Natriumsäule stetig abgebremst und wieder nach oben beschleunigt. Dieser Vorgang bildet sich an den Temperaturmeßstellen als kontinuierlicher Übergang von Temperaturabfall zum Temperaturanstieg ab. Beim Kollabieren einer Blase erfolgt das Abbremsen der Natriumsäule demgegenüber abrupt mit einem sofortigen anschließenden Austriebsbeginn. Die entsprechenden Meßstellen zeigen bei diesem Vorgang einen schlagartigen Übergang vom Temperaturabfall zum Temperaturanstieg.

Diese Temperaturverläufe sind außerdem von Temperaturänderungen überlagert, die auf plötzlich erhöhte Dampfproduktion schließen lassen. Die Ursache hierfür ist entweder die Entstehung einer separaten Blase oder das intensive Aussieden heißer Gebiete, die von der großen Blase berührt werden.

5. VERSUCHE MIT SCHNELLER DRUCKABSENKUNG

Bei diesen Versuchen wird das Natrium im Element unter Druck auf eine vorgegebene Temperatur aufgeheizt, deren Höhe so gewählt ist, daß durch die anschließende schnelle Druckabsenkung der Siedevorgang eingeleitet und dabei der gewünschte Siedeverzug simuliert wird. Die dabei eingestellten hohen Siedeverzugwerte (bis zu 175 °C) sind nicht als typisch für die wirkliche Situation in einem Reaktor anzusehen. Sie dienen dazu, den spezifischen Einfluß des Siedeverzuges auf den gesamten Siedevorgang besonders deutlich auszuprägen. Bei dem hierbei beispielsweise diskutierten Versuch wurde ein Siedeverzug von 175 °C durch eine Aufheizung auf 1010 °C unter einem bezogenen Pool-Druck von 3,7 at und durch schnelles Entspannen auf 0,65 ata erzielt. 15 msec nach Beginn der Druckentlastung zeigte das Druckmeßsystem einen Druck von 1 ata an. Der Aufheiztemperatur von 1010 °C ist ein Siededruck von 3,0 ata zugeordnet. Dies bedeutet, daß die Kastenwand nach der Entspannung einem inneren Überdruck von 2,35 at ausgesetzt war.

Die Heizleistung wurde gleichzeitig mit dem Auslösen der Druckentlastung abgeschaltet, um die Heizstäbe nicht unnötig zu gefährden.

Die gemessenen Temperatur- und Druckverläufe sind auf Abb. 5 dargestellt. Das Sieden beginnt im heißesten Bereich, etwa an der Oberkante der beheizten Zone, jedoch nicht an der heißesten Stelle. Bei der hohen simulierten Überhitzungstemperatur konnte etwa 100 msec nach den ersten Blasenbildungen eine große Blase festgestellt werden, die etwa die Hälfte der freien Querschnittsfläche des Elementes ausfüllte und mindestens 40 cm hoch war. Infolge des vorhandenen Temperaturgefälles entstand in der Blase, wie in Abschnitt 3.1 erläutert, ein Druckgefälle und eine intensive Dampfströmung. Die Größe der Blase und die verhältnismäßig große Zahl von Temperaturmeßstellen erlaubte dabei eine Messung des Temperaturfeldes innerhalb der Blase. Der Temperaturgradient innerhalb der Blase betrug 1 °C/cm. Die Entstehung weiterer sep. Blasen kann mittels der Druckanzeige, der Temperaturmeßstellen im Bereich ihrer Entstehung und der Änderung des Temperaturgradienten innerhalb der Blase nachgewiesen werden.

Die Dampfgeschwindigkeit in der Blase wird bei der vorliegenden Temperaturverteilung durch eine starke Ausdampfung am unteren Blasenrand aufrechterhalten. Durch diesen Vorgang siedet das Element nach unten hin aus.

Mit dem Entstehen der Blase wird das über ihr befindliche Natrium aus dem Element ausgetrieben. 260 msec nach Expansionsbeginn füllte die Blase den gesamten freien Querschnitt des Elementes aus und reichte von der Mitte der beheizten Zone bis zum Elementkopf. Zu diesem Zeitpunkt begann die Pulsation mit 10 Hz am oberen Blasenrand, da die Blase jetzt bis in den Pool reicht. Diese Pulsation wird durch die Temperaturmeßstellen der Querlanze (Abb. 5, Temperaturverlauf 10) eindeutig registriert.

1,75 sec nach der Druckentlastung beginnt das Natrium wieder in das Element einzutreten. Diesem Einfall sind allerdings mehrere erneute Ausstöße, die in Abständen von 1 bis 1,5 sec aufeinander folgen, überlagert. Nach Eintritt des Natriums in das Bündel stellt sich die für den normalen Siedeablauf typische Pulsation von 0,5 bis 1 Hz ein. Etwa 25 sec nach Kondensationsbeginn ist das Element wieder vollständig mit Natrium gefüllt.

Der während des Versuches vom Druckfühler registrierte Druckverlauf stellt unmittelbar nach Beginn der Druckentlastung den Abfall des bezogenen Pool-Druckes am Meßort dar. Sobald der Druckaufbau der ersten sich bildenden Blase sich an der Meßstelle auswirkt, steigt die Druckverlaufkurve wieder an. Jetzt wird der an der Blasenoberfläche herrschende Druck angezeigt, wobei die Einflüsse der Übertragung (Beschleunigungs- und Reibungsdruckabfall, geodätische Höhe) zu berücksichtigen sind.

Die zeitliche Dehnung des auf der Abb. 5 dargestellten Druckverlaufes zeigt, daß jede Blasenbildung als Druckspitze registriert wird. Die Maximalwerte der Druckspitze entsprechen dem jeweiligen Sättigungsdruck der am Ort der Blasenentstehung vorliegenden Natrium-Temperatur. Die den Druckspitzen im weiteren Verlauf folgenden "kleineren" Druckänderungen geben den Verlauf des Innendruckes der Blase wieder, da der Druckfühler während dieser Zeit von der Blase umschlossen war.

Die den Natriumeinfall begleitenden Druckänderungen sind kleiner als 0,1 at und werden deshalb nicht mehr erfaßt.

Die beim Einfallbeginn gemessene Druckspitze von 0,5 at könnte durch das Kollabieren einer kleinen Blase im Druckmeßrohr verursacht werden, da der Fühler vorher sich in der Blase befand.

Die den Kondensationsvorgang beendende, abschließende Druckspitze wurde bei diesem Versuch nicht mehr registriert, da die Druckmeßapparatur wegen der auftretenden verhältnismäßig starken Drift nach etwa 8 sec abgeschaltet wurde.

Ebenso konnte der bei dieser Versuchsart tatsächlich aufgetretene Siedeverzug nicht ermittelt werden, da der Siedebeginn als Folge der Druckentlastung sehr schnell eintrat und die gewählte Abfragefrequenz der Temperaturmeßstellen eine ausreichend feine Auflösung nicht zuließ. Der Siedebeginn wird etwa 10 msec nach Expansionsbeginn von den Thermoelementen, die eine Totzeit von 5 msec haben, registriert. In dieser Zeitspanne liegen nur zwei Temperaturmeßpunkte vor.

Immerhin konnte bei einem Versuch in Höhe des Siedebereiches eine Zone mit höherer Temperatur identifiziert werden, die erst später zu sieden begann. Hier lag eindeutig ein Siedeverzug von ca. 20 °C, bezogen auf die erste registrierte Blasenbildung, vor.

Es ist vorgesehen, bei den bevorstehenden Versuchen des zweiten Versuchsabschnittes die Abfragefrequenz der Thermoelemente und die Druckmeßeinrichtung in geeigneter Weise zu ändern, so daß auch zu diesen Fragen genauere Aussagen möglich sind.

6. BELASTUNG DER ELEMENTKASTENWAND

Während der Versuche lagen zwei Belastungsarten vor:

Druckbelastung und
Thermoschockbelastung.

Eine Druckbelastung des Elementkastens liegt von der Entstehung einer Blase bis zu ihrem Kollabieren vor. Diese Beanspruchung resultiert aus der Druckdifferenz zwischen dem im Element anstehenden Sättigungsdruck der Blase und dem außerhalb des Kastens

herrschenden bezogenen Pool-Druck. Während der Versuche traten sowohl Kurzzeitbelastungen von ca. 10 msec, zu denen die Siede- und Kollabierungsstöße gehören, als auch stationäre Belastungen bis 25 sec, entsprechend der Lebensdauer der Blase, auf.

Der max. auf die Kastenwand wirkende Differenzdruck betrug bei den Versuchen mit Druckentlastung 2,35 at. Der maximale Kollabierungsstoß wurde mit 1,6 at bei den Versuchen mit const. Druck gemessen.

Der Druck von 2,35 at erzeugt in der Kastenwand eine max. Spannung von $6,8 \text{ kp/mm}^2$. Die Beanspruchung bleibt damit noch unterhalb der für die in Betracht kommenden Temperaturen geltenden 0,2 % Dehngrenze. Mit einer bleibenden Deformation ist deshalb nicht zu rechnen.

Neben der Druckbeanspruchung werden die beteiligten Bauteile durch Thermoschocks, die bei der Pulsation auftreten, belastet.

Nach Abschluß der ersten Versuchsserie wurde der Elementkasten erneut vermessen. Obwohl sämtliche Versuche mit demselben Elementkasten bei Temperaturen von ca. 750 °C durchgeführt wurden, konnten keine Verformungen festgestellt werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die Druckbeanspruchung der Elementkastenwand durch die beim Sieden auftretenden Siede- und Kondensationsstöße ausreichend niedrig bleibt, so daß mit einer Zerstörung oder unzulässigen Deformation nicht gerechnet werden muß.

REFERENCEN

- 1 SCHULTHEISS, G.F., Experimentelle Untersuchung des Siedeverzuges von Natrium an künstlichen Oberflächenrauigkeiten, KFK 1332, Dezember 1970
- 2 SCHLECHTENDAHL, E.G., Sieden des Kühlmittels in natriumgekühlten schnellen Reaktoren, KFK 1020, EUR 4302 d, Juni 1969
- 3 GAST, K., Die Ausbreitung örtlicher Störungen im Kern Schneller Natriumgekühlter Reaktoren und ihre Bedeutung für die Reaktorsicherheit, KFK 1380, 1971
- 4 PEPPLER, W., SCHLECHTENDAHL, E.G., SCHULTHEISS, G.F., Investigation on dynamic boiling in sodium cooled fast reactors, Nuclear Engineering and Design 14, 1970, pp. 23-42
- 5 HUBER, F., MÜLLER, R.A., The Karlsruhe Sodium Tank Test Facility, KFK 1203, Juli 1970

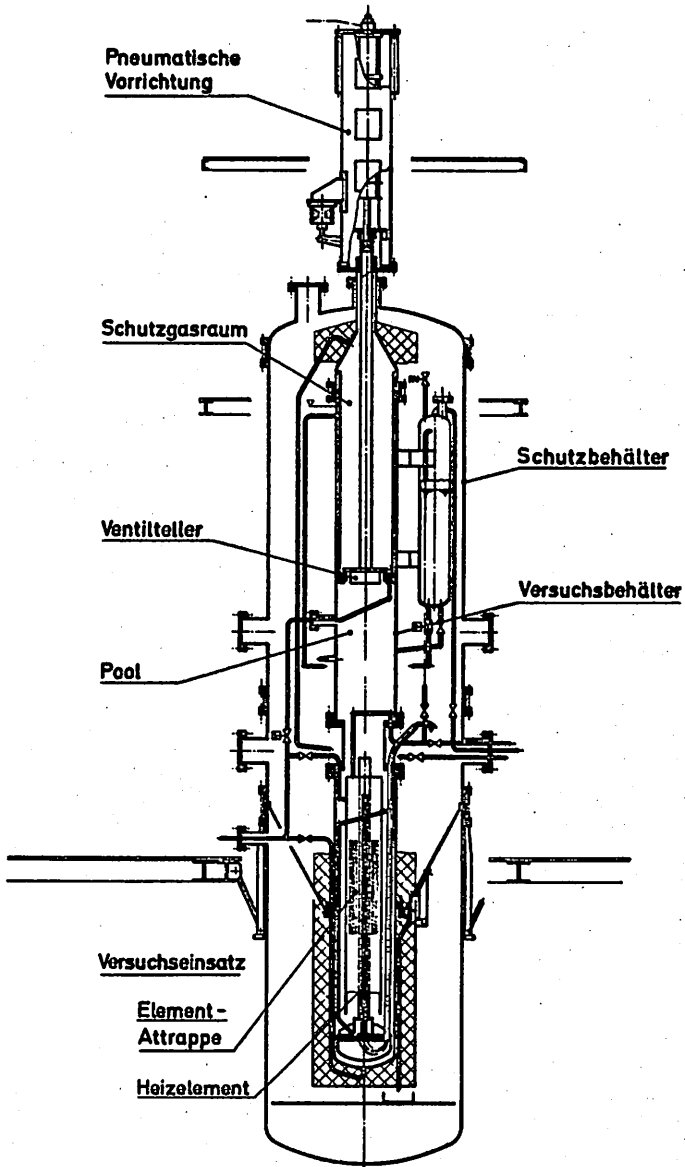


Abb. 1 Aufbau der Versuchsanlage

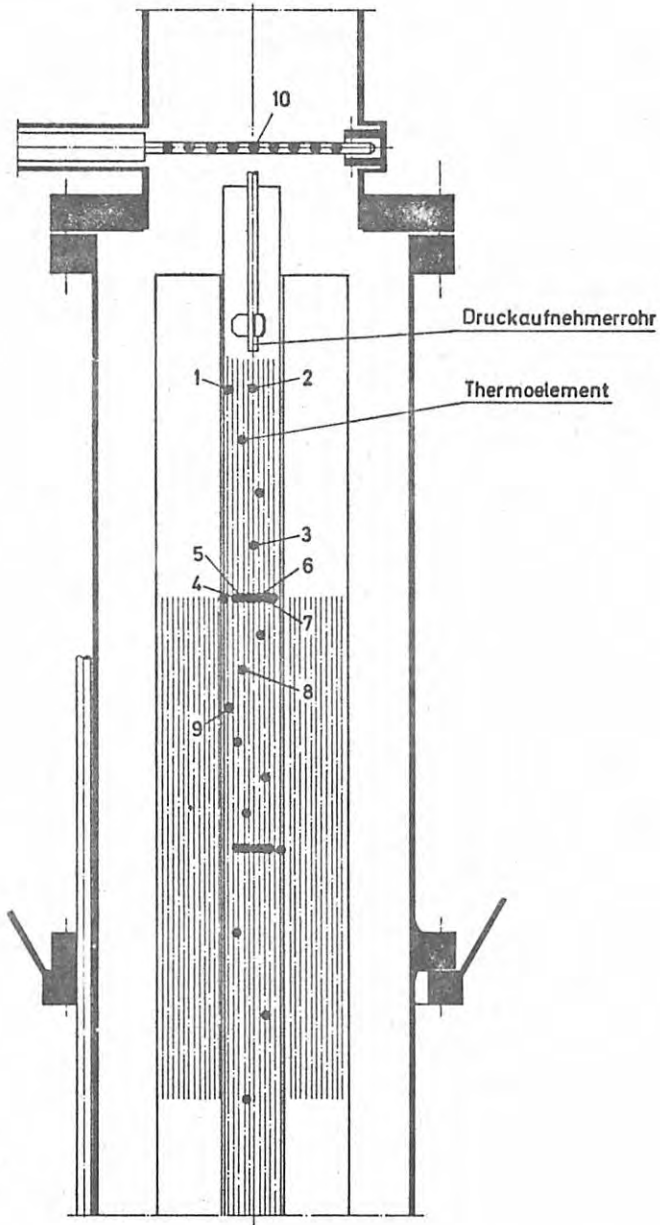


Abb. 2 Versuchsinstrumentierung

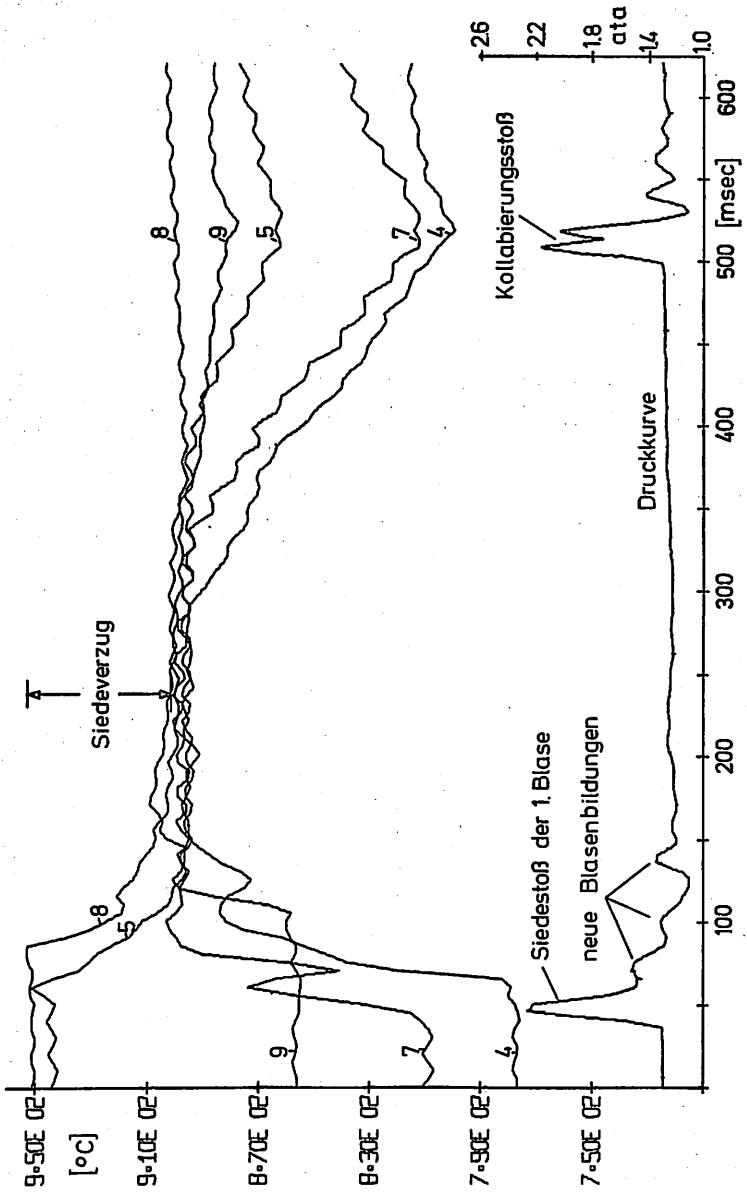


Abb. 3 BEVUS 8 Druck- und Temperaturverlauf als Funktion der Zeit

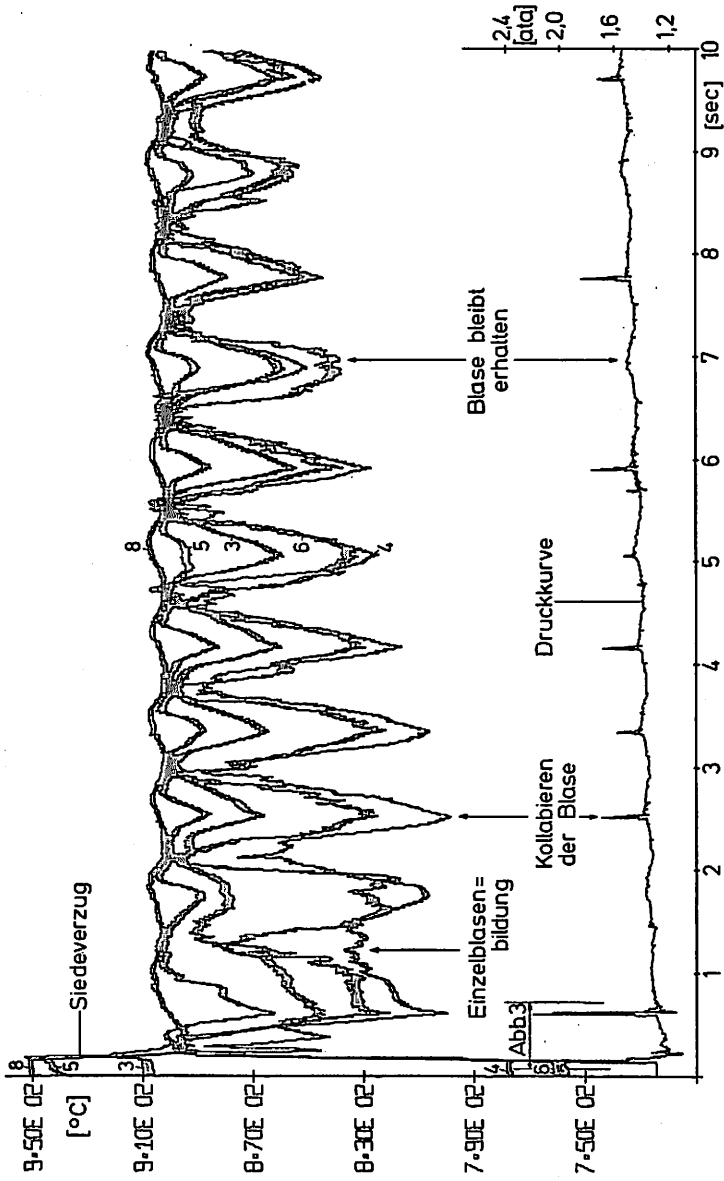


Abb. 4 BEVUS 8 Druck- und Temperaturverlauf als Funktion der Zeit

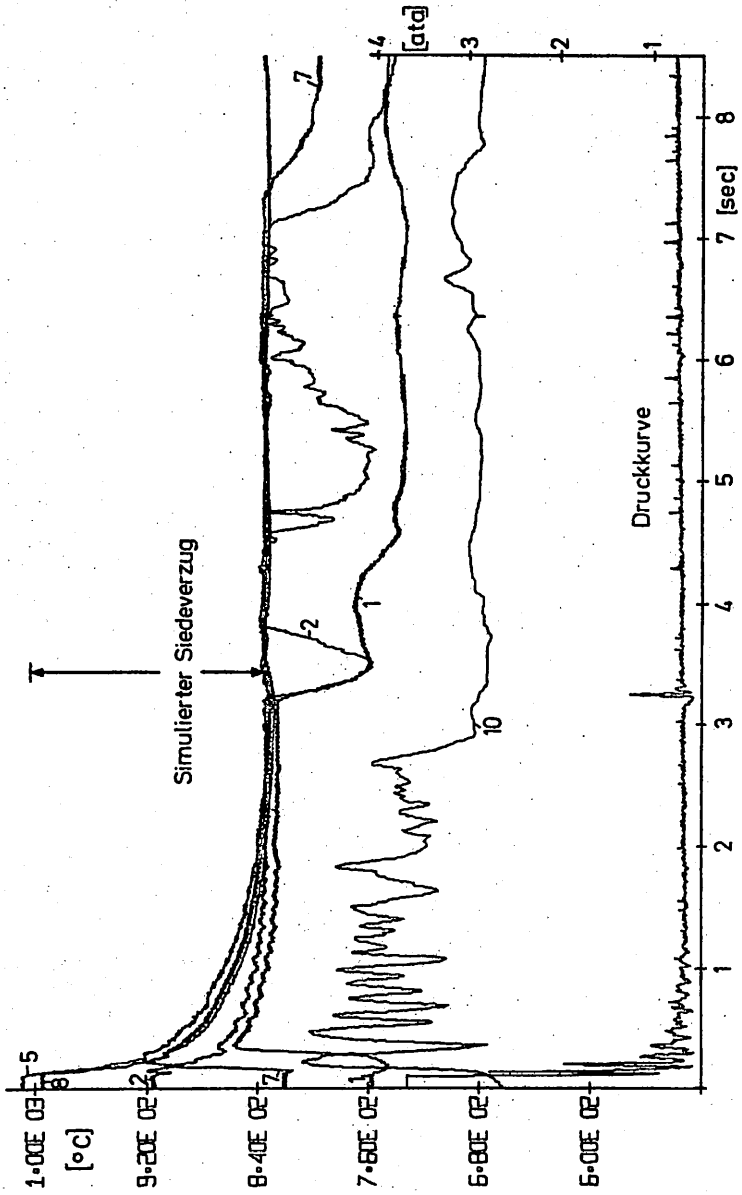


Abb. 5 BEVUS 3 Druck- und Temperaturverlauf als Funktion der Zeit

DISCUSSION

Q H. HOLTBECKER, JRC Ispra, Italy

Do you feel that the scanning time of 5 msec is sufficient in order to record the pressures correctly ?

A R. A. MÜLLER, Germany

We feel that the temperature and pressure behaviour are recorded adequately with this scanning time. However, to study some second order effects, a shorter scanning time would be necessary. This will be done during the experiments with the second test element. With respect to the limited capacity of the process computer some compromises are necessary, however.

C K. GAST, Germany

It should be noted that besides boiling and condensation pressure pulses in a fuel element other mechanisms of fault propagation are being considered at Karlsruhe. Among these, the so-called fuel-sodium interaction, i. e. rapid generation of sodium vapor following contact between overheated fuel and sodium, is thought to be the most important, even though it is very unlikely to occur. A special program is being performed to investigate the effect of such a hypothetical vapor explosion on the core structure.