06.01.09 Brennstabverhalten in der Wiederauffüll- und Flutphase eines Kühlmittelverluststörfalles (REBEKA-Programm)

06.01.09/01A Untersuchungen zur Wechselwirkung zwischen aufblähenden PNS 4238 Zircaloy-Hüllen und einsetzender Kernnotkühlung (REBEKA-Programm) (K. Wiehr, F. Erbacher, U. Harten, W. Just, H.J. Neitzel, P. Schäffner, He. Schmidt, IRB)

Zielsetzung des Vorhabens ist die Erarbeitung experimenteller Informationen über den Aufblähvorgang von Zirkaloyhüllen während der Niederdruckphase eines Kühlmittelverluststörfalles. Einzelstab- und Bündelexperimente liefern Meßwerte zur Überprüfung und Weiterentwicklung von Rechenprogrammansätzen des Codesystems SSYST zur Beschreibung des Brennstabverhaltens.

Im Berichtszeitraum lagen die Schwerpunkte auf der Durchführung folgender Arbeiten:

- Auswertung des Bündelversuchs 2 und Vergleich der Ergebnisse mit Bündelversuch 1
- theoretische Untersuchungen zum Einfluß der Kühlung auf Temperaturdifferenzen auf dem Hüllrohrumfang
- Ermittlung des Einflusses von auf der Hülle befestigten Thermoelementen auf die Genauigkeit der Temperaturmessung in der Flutphase und auf das Benetzungsverhalten der instrumentierten Hüllrohre
- Planungsarbeiten zur Erweiterung der REBEKA-Versuchsanlage für
   49 Stabbündel einschließlich rechnergesteuerter Meßdatenerfassungsanlage.
- Vorbereitung und Durchführung des Bündelversuchs 3

Die im Text genannten Abbildungsnummern 1-21 beziehen sich auf die Bilderserie 06.01.09/01A-1 bis 21.

# Auswertung des Bündelversuchs 2 und Vergleich der Ergebnisse mit Bündelversuch 1

## 1.1 Versuchsführung

Die Bündelversuche 1 und 2 mit Fluten an einer 5x5 Stabanordnung mit Brennstabsimulatoren voller Länge und axialem Leistungsprofil dienten der Untersuchung des Einflusses der Kühlung auf die Hüllrohrdeformation.

Abb. 1 zeigt die Testdaten und die Versuchsführungen beider Versuche. Schematisch dargestellt sind die Unterschiede der Hüllrohrtemperaturverläufe in Stabmitte, sowie der Innendruckverläufe.

Zum Zeitpunkt O Sekunden stehen die Brennstabsimulatoren mit Zirkaloyhülle bereits unter einem Innendruck von 70 bar, Temperaturunterschiede auf dem Hüllrohrumfang, die sich möglicherweise in der Aufheizphase auf 550<sup>°</sup>C, ausgebildet haben könnten, sind wieder ausgeglichen und die Leistung wird wieder zugeschaltet. Die Wiederaufheizphase beginnt. Während dieser Phase herrscht eine abwärtsgerichtete Dampfströmung von ca. 2 m/s, die einen Wärmeübergangskoeffizienten von ca. 30 W/m<sup>2</sup>K ergibt.

Bei Versuch 1 setzte die Flutung relativ früh bei einer mittleren Hüllrohrtemperatur auf dem höchstbelasteten mittleren Stabbereich von 760°C ein (FB 1). Durch eine unbeabsichtigte zu hohe Flutrate über einen Zeitraum von zwei Sekunden unmittelbar nach Flutbeginn entstand ein überhöhter Wärmeübergang zum Flutbeginn. Dadurch wurde ein weiterer Hüllrohrtemperaturanstieg in der Flutphase abgefangen. Dies hatte zur Folge, daß die überwiegende Deformation der Hüllrohre unter ausgeprägter Kühlwirkung des Zweiphasengemisches erfolgte.

Beim Bündelversuch 2 setzte die Flutung erst später und zwar bei einer maximal erreichten Hüllrohrtemperatur von 850<sup>°</sup>C, ein, (FB 2) so daß praktisch die gesamte Hüllrohrdeformation bis zum Bersten aller Hüllrohre während der Wiederaufheizphase unter relativ geringer Kühlwirkung der abwärtsgerichteten Dampfströmung stattfand.

# 1.2 Ergebnisse

## 1.2.1 Zweites Bündelexperiment

Findet die plastische Verformung unter Verhältnissen statt, wie sie beim 2. Bündelexperiment vorlagen, nämlich, Verformung unter nahezu konstantem Anstieg der Hüllrohrtemperatur in der Wiederaufheizphase bei nur schwacher Kühlung, so treten folgende zu erwartende Ergebnisse ein:

- das Bersten aller Hüllrohre erfolgt innerhalb weniger Sekunden (s.Abb, 2)
- Die sich maximal bis zum Berstzeitpunkt ausbildenden axialen Temperaturunterschiede zwischen zwei Abstandhaltern sind relativ klein (etwa 20 K s. Abb. 3).
- Die sich während der plastischen Verformung ausbildenden,bzw. vergrößernden Temperaturunterschiede auf dem Hüllrohrumfang sind ebenfalls relativ klein (s. Abb. 4)
- Das Benetzungsverhalten der verschiedenen Brennstabsimulatoren ist unterschiedlich. Abb. 5 zeigt die Temperaturverläufe der axialen Mittelpositionen von 5 Stäben in einer Bündeldiagonale. Die Stäbe 17 und 21 sind Eckstäbe und benetzen deutlich später als die Stäbe mit geborstenen Zirkaloyhüllen. Stab 40, ebenfalls ein Brennstabsimulator mit Zirkaloyhülle (BSS) zeigt jedoch gegenüber allen übrigen BSS ein abweichendes Verhalten im Hüllrohrtemperaturverlauf, Sämtliche Stäbe mit Zirkaloyhülle verlieren ihren Innendruck im Zeitraum zwischen der 51,8. und der 55,8. Sekunde, auch Stab 40 (s. Abb. 2). Alle Stäbe bersten mit einer weit aufreißenden Berstöffnung, bis auf Stab 40, dessen Hülle nur ein ca. 1 mm<sup>2</sup> großes Loch aufweist. Durch diese Öffnung kann die Vermischung des Heliums mit Wasserdampf nur sehr viel langsamer erfolgen, als bei den übrigen BSS. Da die Dehnung der Hülle des Stabes 40 in axialer Mitte (= Meßebene) geringfügig kleiner ist, als die der übrigen BSS-Hüllen, ist auch der Spalt zwischen Pelletsäule und Hülle geringer. Der Wärmewiderstand im Spalt zwischen Wärmequelle und Zirkaloyhülle, ist also überwiegend wegen der höheren Wärmeleitfähigkeit des Heliums (gegenüber He - H<sub>2</sub>O Dampfgemisch) und nur geringfügig wegen der kleineren Spaltweite wesentlich niedriger, was zu dem völlig andersartigen Hüllrohrtemperaturverlauf mit späterem Benetzen führt.

- Abb, 6 zeigt die Verformungen zwischen den inneren Abstandshaltern, wobei

die Brennstabsimulatoren der Umgebung (BSU) entfernt sind. Bereits dieses Bild vermittelt den Eindruck, daß im zweiten Bündelversuch die Dehnungen deutlich größer sind als im ersten.

Abb. 7 gibt die Berstdaten von Bündelversuch 2 an. Die in den inneren Brennstabsimulatoren angegebenen mm-Werte sind axiale Höhenangaben der Berststelle, wobei der Beginn des oberen beheizten Endes mit 0 mm zu setzen ist. Berstdruck und Bersttemperatur sind gemittelte Werte.

# 1.2.2 Vergleich zwischen 1. und 2. Bündelexperiment

In Abb. 8 ist ein Vergleich der Haupttestparameter und der wesentlichen Ergebnisse der beiden Bündelexperimente wiedergegeben,

## 1.2.2.1 Umfangsdehnung und Gesamtkühlkanalversperrung

Die Abb. 9 und 10 zeigen die Verläufe der Umfangsdehnung aller 9 Zirkaloyhüllen und die daraus resultierende Gesamtkühlkanalversperrung über die gesamte beheizte Länge von Experiment 1 und 2.

Folgende Hauptergebnisse lassen sich hieraus als Folgewirkung der Kühlung auf die Hüllrohrverformung ablesen:

#### - mäßige Dehnungen um die Abstandshalter

- eine axiale Verschiebung der Dehnungsmaxima jeweils zwischen zwei Abstandshaltern gegen den in Strömungsrichtung nächst höheren Abstandshalter hin.
- eine maximale Berstumfangsdehnung von 32 % im 1. Test und 64 % im
  2. Test.
- eine maximale Kühlkanalversperrung von 25 % in Test 1 und 60 % in Test 2.

# 1.2.2.2 Axiales Deformationsprofil

In beiden Bündelversuchen trat eine Verschiebung der Dehnungsmaxima in Strömungsrichtung zum nächsten Abstandshalter hin auf. Abb, 11 zeigt die axialen Deformationsprofile zwischen den beiden innersten Abstandshaltern von Test 1 und 2.

Die etwas unerwartete Verschiebung des Dehnungsmaximums in Test 1 war, wie bereits berichtet, die Folge eines thermodynamischen Ungleichgewichts in der zweiphasigen Strömung während der Flutphase, d.h. es existierte trotz Anwesenheit von Wasser überhitzter Dampf und zwar mit steigendem Überhitzungsgrad zwischen zwei Abstandshaltern in Strömungsrichtung. Im Bündeltest 2 lag während der plastischen Verformung nur einphasige Dampfkühlung vor, jedoch auch mit steigendem Überhitzungsgrad zwischen den Abstandshaltern in Strömungsrichtung. Das in beiden Fällen durch die Dampfüberhitzung hervorgerufene axiale Temperaturprofil führte zu einer Lokalisierung der maximalen Hüllrohrdeformationen im heißen Bereich und verhinderte axial ausgedehnte, große Umfangsdehnungen.

## 1.2.2.3 Azimutales Deformationsprofil

Abb. 12 vergleicht den Bündelquerschnitt von Test 1 und 2 jeweils an der Stelle maximaler Kühlkanalversperrung.

Die Verteilung der Wandstärkenverschwächung auf dem Hüllrohrumfang war beim Test I sehr ungleichförmig, was auf azimutale Temperaturdifferenzen hinweist. Bei gleichen Wandstärkenverteilungen auf dem Umfang wurden bei Einzelstabexperimenten, die unter vergleichbaren Kühlbedingungen durchgeführt wurden, azimutale Temperaturdifferenzen zur Berstzeit von etwa 70 K gemessen. Dabei bleibt die maximale Wandstärkenverschwächung auf den heißen Feil des Hüllrohres begrenzt, wodurch große Umfangsdehnungen und größere Kühlkanalversperrungen verhindert werden.

Bei Bündelversuch 2 herrschte während der Phase der plastischen Verformung nur eine relativ geringe Kühlung. Es konnten sich dadurch auch nur relativ kleine azimutale Temperaturunterschiede bis zum Berstzeitpunkt ausbilden (s. Abb. 4), was eine recht gleichmäßige Wandstärkenverschwächung auf dem ganzen Umfang zur Folge hatte. Dies führte zu deutlich höheren Berstumfangsdehnungen und zu einer maximalen Kühlkanalversperrung von 60 %.

Dies ist ein Hinweis darauf, daß die aufgrund von exzentrischer Lage der

# 2. <u>Theoretische Untersuchungen zum Einfluß der Kühlung auf Temperatur-</u> differenzen auf dem Hüllrohrumfang

In Abb. 13 ist das Ergebnis einer abschätzenden theoretischen Untersuchung zum Einfluß von exzentrischer Lage zwischen Pellet und Hülle sowie der Wärmeübergangszahl im Kühlmedium auf die azimutale Temperaturdifferenz des Hüllrohres dargestellt.

Die Untersuchung wurde unter folgenden Annahmen durchgeführt:

Stationärer Wärmetransport; eindimensionale Betrachtung; Anliegen des Pellets auf der einen Seite, Spalt zwischen Pellet und Hülle auf der anderen Seite; Wärmewiderstände in Hülle und Pellet sehr viel kleiner als der des Helium-Spaltes.

Für einige Punkte des Diagramms wurde die abschätzende Rechnung mit einem genaueren Rechenmodell wiederholt und bestätigt.

# Als Ergebnis ist folgendes festzuhalten:

Die Temperaturdifferenz  $\Delta T_{az}$  auf dem Hüllrohrumfang steigt logischerweise bei festgehaltenem Wärmeübergangskoeffizienten h (und festgehaltenen  $T_{f1}$ ) des Kühlmediums mit wachsendem einseitigen Spalt S.

Bei festgehaltenem S und wachsendem h weist  $\Delta T_{az}$  ein Maximum auf. Das anfängliche Ansteigen von  $\Delta T_{az}$  ist allein eine Folge der Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitzahl k<sub>He</sub> des Heliums. Wäre k<sub>He</sub> eine Konstante, so würde  $\Delta T_{az}$  mit steigendem h fallen, wie man an der in der Abbildung angegebenen Formel ablesen kann. Nun ist es jedoch so, daß bei größerem h des Kühlmediums die Temperatur des Heliums kleiner und damit k<sub>He</sub> ebenfalls kleiner ist. Eine Vergrößerung von h steht folglich einer Verkleinerung von k<sub>He</sub> gegenüber. Dies hat das Auftreten eines Maximums im  $\Delta T_{az}$ -Verlauf zur Folge, Als wesentlicher Punkt ist festzuhalten, daß für Wärmeübergangskoeffizienten im Kühlmedium etwa im Bereich bis zu 150 W/m<sup>2</sup>K die azimutale Temperaturdifferenz auf der Hülle mit wachsendem Wärmeübergangskoeffizienten steigt.

Der untere Teil der Abb. 14 veranschaulicht dies noch einmal: Im Falle einer exzentrischen Ausgangslage der Pellets in der Hülle und einer sich dadurch ausbildenden Temperaturdifferenz auf dem Hüllrohrumfang vergrößert eine in der Flutphase ansteigende Wärmeübergangszahl diese azimutalen Temperaturunterschiede und führt dann zu kleineren Umfangsdehnungen der Hüllrohre.

Der obere Teil der Abb. 14 zeigt, wie auch bei Zweiphasenkühlung über thermodynamisches Ungleichgewicht und die turbulenzerhöhende Wirkung der Abstandshalter ein axiales Hüllrohrtemperaturprofil auftreten kann, welches axial ausgedehnte größere Umfangsdehnung verhindert.

3. <u>Vergleich der Temperaturverläufe von eingebetteten und aufgepunkteten</u> Thermoelementen auf Brennstabsimulatoren

In den bisher durchgeführten drei Bündelexperimenten in 5x5-Stabanordnung wurden jeweils zwei Typen von Brennstabsimulatoren verwendet.

- Die inneren 9 Stäbe sind mit Zirkaloyhülle und Helium-Innendruck versehene blähfähige Brennstabsimulatoren (BSS)
- Die äußere Stabreihe besteht aus 16 Brennstabsimulatoren, die eine Hülle aus Inconel 600 besitzen, die sich während des Versuchsablaufs nicht verformt (BSU). Diese Stäbe dienen der Simulation der thermischen Umgebung.

## 3.1 Temperaturmessung der BSU-Hülle

Die ein Millimeter starke Inconel-600-Hülle des BSU wird mit Mantelthermoelementen mit Inconelmantel von 0,5 mm Außendurchmesser instrumentiert. Die Thermopaarung ist NiCr/Ni, die Isolierung MgO, die Spitze isoliert. Die Thermoelemente sind in Nuten der Hüllrohre eingelegt, zugestemmt und im Bereich der Meßspitze von ca. 30 mm mit Nicrobraze 900 eingelötet.

Abb. 15 zeigt einen Schnitt durch einen BSU, In der Außenhülle sind 2 eingelegte Thermoelemente zu erkennen. Links im Bild ist eine Ausschnittsvergrößerung eines solchen eingelegten und eingelöteten Thermoelementes zu sehen.

## 3.2 Temperaturmessung der Zirkaloyhülle

Zur Messung der Temperaturen der Zirkaloyhüllen werden Mantelthermoelemente verwendet, deren vorderes Ende an der Meßspitze mit einer etwa 30 mm langen Platinhülse versehen ist (s. Abb. 16). Es handelt sich dabei ebenfalls um NiCr/Ni-Mantelthermoelemente mit isolierter Meßspitze und einem Außendurchmesser von 0,5 mm, über die jedoch ein Platinröhrchen der Abmessung 0,75x0,12 mm geschoben und auf einen Enddurchmesser von 0,72 mm  $\phi$  heruntergehämmert wird. Dieses Thermoelement wird mit Hilfe einer kleinen Spezialpunktschweißmaschine durch fünf Punktschweißungen im Bereich der Platinhülse auf der Hülle befestigt, wodurch ein enger Kontakt zwischen Brennstabsimulatorhülle, Platinhülse und Thermoelement entsteht. Der Schweißstrom fließt dabei überwiegend durch die Platinhülse, ohne das Thermoelement zu beschädigen. Das nach unten bzw. oben aus der Platinhülse austretende Mantelthermoelement wird auf kürzestem Wege in die äußeren Kühlkanäle des Bündels geführt, um zwischen der BSU-Außenseite und der Kastenwand das Bündel zu verlassen. Rechts in Abb. 15 ist eine Ausschnittsvergrößerung eines mit Platinhülse versehenen Thermoelementes gezeigt. Die wiedergegebene Schnittstelle liegt zwischen zwei Punktschweißungen. Sie zeigt einen guten Kontakt in diesem Fall zwischen BSU-Hülle, Platinhülse und Thermoelement.

# 3.3 <u>Vergleichende Temperaturmessung zwischen eingebettetem und aufge-</u> punktetem Thermoelement am BSU

Zur Klärung der Frage, welchen Meßfehler eine Anordnung eines auf die Hülle aufgepunkteten Thermoelementes und dies speziell in der Flutphase mit sich bringen kann, werden bei jedem Bündelexperiment auf einem bzw. auf zwei Brennstabsimulatoren mit Inconelhülle zusätzlich zu den eingebetteten TE's je ein Thermoelement mit Platinhülse aufgepunktet. Das Aufpunkten auf der Inconelhülle erfolgt nach den gleichen Richtlinien wie bei der Zirkaloyhülle, d.h. es sollen möglichst ähnliche Kontaktverhältnisse bei der Anbringung der TE's gewährleistet sein.

Abb. 16 gibt zwei Arten der Lage des eingebetteten TE's zum aufgepunkteten

TE mit Platinhülse an. Die linke Seite der Abb. 16 zeigt die Anordnung, wenn beide TE's nach unten aus dem Bündel geführt werden. Beide Thermoelementmeßspitzen sitzen auf gleicher axialer Höhe, jedoch um 45<sup>°</sup> versetzt. Die rechte Seite der Abb. 16 zeigt die Anordnung der beiden TE's, wenn die Meßspitzen auf einer gemeinsamen Mantellinie der BSU-Hülle sitzen. Der axiale Abstand der beiden Meßspitzen voneinander beträgt dann 15 mm. Durch diese Anordnung wird erreicht, daß das aufgepunktete Thermoelement den Meßwert des eingebetteten möglichst wenig beeinflußt, falls dieses unter extremen Bedingungen als Kühlrippe wirken sollte.

#### 3.4 Meßergebnisse

# Temperaturunterschied zwischen eingebettetem und aufgepunktetem Thermoelement

## 3.4.1 Erster Bündelversuch

Die Abb. 17 soll nur der Vollständigkeit halber gezeigt werden, ohne jedoch noch einmal diskutiert zu werden.

## 3.4.1 Zweiter Bündelversuch vom 1.6.78

Die Abb. 18 zeigt drei Verläufe von Temperaturen über der Zeit. TH 82/1 und TH 82 A befinden sich auf einer gemeinsamen Mantellinie des BSU Nr. 82, wobei die Meßspitze des aufgepunkteten Thermoelementes TH 82 A 15 mm unterhalb derjenigen des eingebetteten Thermoelementes TH 82/1 (axiale Mitte) sitzt (s. Abb. 15 rechte Seite). TH 22 zeigt den Temperaturverlauf des diesen beiden TE's gegenüberstehenden BSU Nr. 22 ebenfalls in axialer Stabmitte. In diesem Experiment findet die plastische Verformung sowie das Bersten der Zirkaloyhüllen in der Wiederaufheizphase statt. Der Berstbereich sämtlicher Zirkaloyhüllen liegt zwischen der 52. und 56. Sekunde,der Beginn der Flutphase liegt bei 56 Sekunden. In dem Zeitraum zwischen der 82. und 85. Sekunde quenchen die axialen Mitten von acht Zirkaloyhüllen (bis auf Hülle des Stabes 40). Kurz nach Beginn der Wiederaufheizphase (0 sec) zeigt der Temperaturverlauf des TH 82/1 zwischen 10 und 20 Sekunden einen unkorrekten Verlauf, dessen Ursache noch nicht völlig geklärt werden konnte. Der weitere Verlauf (nach 20 sec) kann jedoch als korrekt angesehen werden. Die Abb. 18 zeigt eine um ca. 10 K höher verlaufende Temperatur des aufgepunkteten TE's gegenüber dem eingebetteten in der Wiederaufheizphase. Die höher verlaufende Temperatur des TH 82 A ist erklärlich, da der benachbarte Stab 22 eine deutlich höhere Temperatur zeigt, und somit das aufgepunktete TE durch Strahlungswärme höher aufgeheizt wird als das eingebettet. Mit einsetzendem Fluten wird die Differenz deutlich kleiner. Die abgehobene Zirkaloyhülle des Stabes 22 ist geborsten, demzufolge von ihrer Wärmequelle stark entkoppelt, und die Temperatur der Hülle zeigt eine stark fallende Tendenz. Mit abnehmender Temperatur des TH 22 sinkt die Temperatur von TH 82/A unter die von TH 82/1. Mit dem Quenchen der Hülle des Stabes 22 vergrößert sich die Temperaturdifferenz zwischen dem eingebetteten und aufgepunkteten Thermoelement auf Stab 82 auf einen nahezu konstanten Wert. Unmittelbar vor dem Wiederbenetzen der Staboberfläche des Stabes 82 in axialer Mitte wird diese Differenz noch etwas größer. Die Hüllrohroberfläche an der Stelle des aufgepunkteten TE's benetzt etwa 0,5 sec früher, da die Meßspitze 15 mm tiefer sitzt als die des eingebetteten.

Abb. 19 zeigt eine weitere Paarung von eingebettetem und aufgepunktetem TE auf Stab 15 sowie den Temperaturverlauf des benachbarten Stabes 40. Alle Thermoelemente sitzen auf dem höchstbelasteten Stabbereich, jedoch etwa 150 mm oberhalb der axialen Mitte. Diese axiale Position benetzt auch etwa 30 Sekunden später als die Mittelposition dieses Stabes.

Die Temperaturverläufe von TH 15/3 und TH 15/A zeigen ein stark abweichendes Bild gegenüber den Verläufen von TH 82/1 und TH 82/A der Abb. 18 aus demselben Experiment. Verantwortlich dafür ist, der völlig unterschiedliche Temperaturverlauf des Nachbarstabes, der nicht wie die Hüllen aller anderen Zirkaloystäbe zwischen der 82. und 85. Sekunde benetzt. Er verliert zwar seinen Innendruck ebenfalls durch Hüllrohrversagen, im gleichen Zeitintervall (52.-56. Sekunde) wie die übrigen Stäbe, jedoch nicht durch eine weitaufklaffende Berststelle, sondern nur durch ein relativ kleines Loch von ca. 1 mm  $\phi$ . Dies führt dazu, daß die Abnahme der Wärmeleitfähigkeit des Heliums durch Vermischung mit dem Dampf nur sehr viel langsamer vor sich geht. Die Folge davon ist ein sehr viel späteres Wiederbenetzen dieser Zirkaloyhülle. Hierdurch sieht der Stab 15 über eine längere Zeitspanne in der Flutphase eine hohe Temperatur seines Nachbarstabes. Zum einen wird dadurch der Charakter des Temperaturverlaufs von Stab 15 beeinflußt, zum anderen ist die sich ausbildende Temperaturdifferenz zwischen eingebetteten und aufgepunkteten TE sehr viel kleiner. Erst mit dem Benetzen der Hülle des Stabes 40 wächst die Temperaturdifferenz. Bei etwa 233 Sekunden benetzt das aufgepunktete TE vorzeitig, obwohl die axiale Position der Hülle erst etwa 87 Sekunden später zum Benetzen kommt. Bei Demontage des Bündels wurde festgestellt, daß sich die Punktschweißung an der Spitze des TH 15/A gelöst hatte und damit ein vorzeitiges lokales Benetzen der Spitze des TE möglich war. Solange die Hülle selbst an dieser Stelle noch nicht benetzt ist, zeigt auch das TH 15/A noch Temperaturspitzen über Sattdampftemperatur.

Abb. 18 und 19 zeigen, daß selbst nach mehr als 100 Sekunden andauernder Flutphase der Temperaturverlauf und die Temperaturdifferenz zwischen eingebettetem und aufgepunktetem Thermoelement auf einem BSU von dem Temperaturverlauf des Nachbarstabes beeinflußt werden.

## 3.4.3 Dritter Bündelversuch vom 25.10.78

Abb. 20 zeigt die Temperaturverläufe von einem eingebetteten und einem unter 45<sup>°</sup> versetzt aufgepunkteten Thermoelement auf Stab 82 (siehe auch linke Seite der Abb. 15). Zusätzlich ist der Temperaturverlauf des BSS Nr. 22 geplottet. Alle Temperaturmeßstellen befinden sich auf gleicher axialer Höhe in Stabmitte.

Der Stab 22 zeigt zum Zeitpunkt O sec bereits eine um etwa 20<sup>°</sup>C höhere Temperatur als der Stab 82, die er auch während der Wiederaufheizphase und zu Beginn der Flutphase aufweist. Es ist zu erkennen, daß das auf Stab 82 außen aufgepunktete Thermoelement TH 82/A gegen Ende der Wiederaufheizphase eine etwa 5<sup>°</sup>C höhere Temperatur als TH 82/2 angenommen hat. Zum Beginn der Wiederaufheizphase lag kein Temperaturunterschied zwischen eingebettetem und aufgepunktetem TE auf Stab 82 vor. Dies macht deutlich, daß in Phasen geringer Kühlwirkung, das aufgepunktete TE sogar höhere Temperaturen anzuzeigen vermag, als ein eingebettetes, falls die Umgebung also Nachbarstäbe höhere Temperaturen aufweisen. Kurz vor dem Bersten berührt die Zirkaloyhülle von Stab 22 sogar die Inconelhülle von Stab 82. Die Dehnungsmaxima liegen beim Bündeltest 3 nämlich praktisch in der axialen Mittelposition. Zwischen der 67. und 89, Sekunde bersten alle Stäbe (Berstintervall). Eine klare Zuordnung der Temperaturverläufe ist in dieser Phase der erhöhten Strömungsturbulenzen nicht möglich. Im weiteren Verlauf der Flutphase (nach 90 sec) wird der Temperaturverlauf des auf den Stab 82 aufgepunkteten TE's wieder durch den Nachbarstab beeinflußt. Das Thermoelement TH 82/A sitzt in einem Keil, gebildet von Stab 82 und der stark gedehnten Hülle des Stabes 22, berührt jedoch die Zirkaloyhülle direkt nicht.

Etwa um die 200. Sekunde benetzen sämtliche BSS in der Nachbarschaft des Stabes 82 und er sieht nun die kältere Umgebung. Das Bild ändert sich sofort und im weiteren Verlauf der Flutphase zeigt nun, wie man dies auch erwartet, das aufgepunktete Thermoelement TH 82 A die niedrigere Temperatur gegenüber dem eingebetteten TH 82/2 an.

Abb. 21 zeigt Temperaturverläufe von einer weiteren Paarung eines eingebetteten und aufgepunkteten TE's zusammen mit dem Temperaturverlauf des benachbarten Umgebungsstabes. Die Meßspitze des aufgepunkteten TE's sitzt etwa 15 mm höher als diejenige des eingebetteten in axialer Mittelposition.

In der Wiederaufheizphase zeigt auch hier der Nachbarstab (TH 40) eine etwas höhere Temperatur, so daß auch hier das aufgepunktete TE gegen Ende der Wiederaufheizphase einen geringfügig höheren Wert zeigt, als das eingebettete TE. Mit einsetzender Flutphase zeigen TH 40 und TH 15/4 nahezu gleiche Temperaturen und TH 15/A einen geringfügig niedrigeren Wert und zwar bis zum Einsetzen des Berstens der Zirkaloyhüllen. Die Zirkaloyhülle des Stabes 40 hat sich in der axialen Mittelposition, der Meßebene,ebenfalls so stark gedehnt, daß sie das Thermoelement TH 15/A berührt. Die niedrigere Temperatur der Zirkaloyhülle beeinflußt nun zusammen mit dem Zweiphasengemisch den weiteren Temperaturverlauf des TH 15/A maßgeblich. Mit dem Wiederbenetzen der Hülle des Stabes 40 vergrößert sich die Temperaturdifferenz zwischen TH 15/4 und TH 15/A weiter, um kurz vor dem Benetzen des Stabes 15 sogar etwa 100°C aufzuweisen. Die sich einstellende Temperatur von TH 15/A ist das Ergebnis der Wärmezufuhr von Stab 15 und dem Wärmeentzug von Stab 40.

Da TH 15/4 etwa 15 mm tiefer sitzt als TH 15/A, benetzt das eingebettete TE auch früher als das aufgepunktete.

## 3.5. Schlußfolgerungen

## Eine Bemerkung vorweg:

Gemäß der Aufgabenstellung dieses Vorhabens, den Aufblähvorgang der Zirkaloyhüllen, und der ist mit dem Bersten beendet, zu untersuchen, haben die aufgepunkteten Thermoelemente auf der Zirkaloyhülle die Aufgabe, die Zirkaloyhüllrohrtemperatur bis zum Berstzeitpunkt möglichst genau zu messen. Die Doppelinstrumentierung auf den Umgebungsstäben mit eingebettetem und aufgepunktetem Thermoelement soll bis zu diesem Zeitpunkt eine mögliche, durch Kühlrippenwirkung hervorgerufene Temperaturdifferenz zwischen gemessener und wahrer Hüllrohroberflächentemperatur aufzeigen.

## Schlußfolgerung aus den 3 bisherigen Bündeltests:

- Der für den ersten Bündeltest ermittelte Korrekturfaktor von +40°C auf die gemessene Bersttemperatur ist möglicherweise zu hoch, da die Vergleichsmeßebene etwa 950 mm unterhalb der zu korrigierenden Bersttemperaturmeßebene lag, und sich damit zu gleichen Zeiten in einer Zone intensiver Kühlung, d.h. mit höheren Wasseranteilen und geringeren Dampfüberhitzungsgraden befand. Außerdem lag die Vergleichsebene auf niedrigerem Leistungsniveau. Die Vergleichsmessung muß auf jeden Fall auf gleicher axialer Höhe wie die zu korrigierende Temperaturmessung liegen, wie dies im Bündeltest 2 und 3 der Fall ist.
- Die Hüllrohrtemperaturmessungen im Bündeltest 2 sind nicht zu korrigieren.
- Die Hüllrohrtemperaturkorrektur für Bündeltest 3 ist kleiner als + 20°C.
- Die detaillierte Betrachtung hat gezeigt, daß für eine sehr genaue Bersttemperaturbestimmung jedes einzelnen Stabes, jeweils die Temperatur der Umgebung mit ins Calcul einbezogen werden muß.
- Das Benetzungsverhalten der Brennstabsimulatoren mit Inconelhülle (BSU) wird durch die aufgepunkteten Thermoelemente nicht beeinflußt (die mittlere Benetzungszeit aller BSU ohne äußere TE's lag z.B. im 3. Bündeltest bei 320 Sekunden und ist zeitgleich mit derjenigen der Stäbe 82 und 15).

Wichtige Fragen bleiben jedoch noch offen:

- Unter welchen Verhältnissen (z.B. äußere Kühlung, stark verformtes Hüllrohr) tritt eine ausgeprägte Kühlrippenwirkung durch die Anbringung eines aufgepunkteten TE's auf der Zirkaloyhülle auf ? - Kann ein aufgepunktetes TE auf einer geborstenen Zirkaloyhülle das Benetzungsverhalten dieser Hülle beeinträchtigen ? Unter welchen Verhältnissen und wenn ja, in welcher Größenordnung ?

Eine Teilbeantwortung der ersten Frage liefert Bündelversuch 3. Anhand von gemessenen Temperaturverläufen auf Inconel- sowie Zirkaloyhüllen (im Bereich großer Verformungen) kann bis zum Berstzeitpunkt keine Kühlrippenwirkung festgestellt werden. Wie dies jedoch bei intensiver Kühlung aussieht ist bisher unbekannt.

Zur Klärung dieser und der zweiten Frage wird ein zusätzliches speziell auf diese Fragestellung zugeschnittenes Bündelexperiment durchgeführt werden.

#### 4. Planungsarbeiten zur Erweiterung der REBEKA - Anlage für 49-Stabbündel

Die konstruktiven Arbeiten an der Teststrecke für das 49-Stabbündel wurden abgeschlossen und die neue Teststrecke bestellt.

Eine geeignete rechnergesteuerte Meßdatenerfassunganlage wurde ausgewählt und ebenfalls bereits bestellt.

## 5. Vorbereitung und Durchführung des Bündelversuchs 3

Während der Vorversuche für Bündelversuch 3 konnte eindeutig die Ursache für die erhöhte Flutrate über 2 Sekunden unmittelbar nach Flutbeginn beim Bündelexperiment 1 festgestellt werden. Der untere Teil der Teststrecke wurde daraufhin umgebaut.

Der Bündelversuch 3 wurde mit gleichen Bedingungen durchgeführt wie der Bündelversuch 1, jedoch mit konstanter kalter Flutwassersteiggeschwindigkeit über die gesamte Flutphase. Die Instrumentierung an Brennstabsimulatoren mit Zirkaloyhülle wurde erweitert, z.B. auf axiale und azimutale Temperaturmessung an Zirkaloyhüllen im höchstbelasteten Stabbereich. Eine Thermoelement-Instrumentierung an Abstandshaltern (AH) zur Beantwortung der Frage nach dem Mechanismus der Dampfenthitzung an den AH's wurde montiert. Der Versuch fand am 25.10.78 statt. Alle 9 Zirkaloyhüllrohre barsten, wobei die Berstumfangsdehnungen erwartungsgemäß geringer waren als beim Bündelversuch 2. Die genaue Auswertung der Meßergebnisse ist im Gange.



💳 Versuch1: Flutbeginn bei 760°C (FB1)

- Hüllrohrverformung überwiegend während Flutphase

PRE: Versuch2: Flutbeginn bei 850°C (FB2)

gesamte Hüllrohrverformung während Aufheizphase



Abb. 06.01.09/01A-1:

REBEKA-Bündelversuche 1 und 2. Versuchsrandbedingungen und schematische Versuchsführung.



Abb. 06.01.09/01A-2: REBEKA 2; Innendruckverläufe aller 9 Brennstabsimulatoren.

4200-125



Abb. 06.01.09/01A-3: REBEKA 2; Verlauf der axialen Hüllrohrtemperaturen im mittleren Abstandshalterbereich des Stabes 16.



Abb. 06.01.09/01A-4: REBEKA 2; Verlauf der Hüllrohrtemperaturen auf dem Umfang 120<sup>0</sup> versetzt von Stab 29 in axialer Mittelposition.

4200-127

1



Abb. 06.01.09/01A-5: REBEKA 2; Unterschiede im Benetzungsverhalten von Brennstabsimulatoren mit Inconel- bzw. Zirkaloyhülle (axiale Mittelposition).



Abb. 06.01.09/01A-6: REBEKA 2; Bündelverformung zwischen den mittleren Abstandshaltern, äußere Reihe der Brennstabsimulatoren (BSU) entfernt.



I

Abb. 06.01.09/01A--7: REBEKA 2; Berstumfangsdehnungen und Lage der Berststellen.

Haupt-Merkmale	Bündel Test 1	Bündel Test 2
Haupt-Testgegenstand	Einfluß der Kühlung auf die Verformung	Einfluß der Kühlung auf die Verformung
Haupt-Testparameter	frühzeitiges Fluten	spätes Fluten
Verformungsgeschichte	überwiegend Verformung während der Flutphase	gesamte Verformung während der Wieder- aufheizungsphase, Bersten bei Flutbeginn
Kühlung während der Verformung	starke Kühlung (Nebelkühlung) Fluten von unten	gemäßigte Kühlung (überhitzter Dampf) Dampfstrom von oben
Axiale Temperatur- differenz zwischen zwei Abstandshaltern	50 <sup>0</sup> C beim Bersten Verschiebung des Tempe- raturmaximums in Strö- mungsrichtung (Flut- richtung) gegen den nächsten Abstandshalter	20 <sup>0</sup> C beim Bersten Verschiebung des Tempe- raturmaximums in Strö- mungsrichtung gegen den nächsten Abstands- halter
azimutale Temperatur- differenz	nicht gemessen (~70 <sup>0</sup> C)	5 <sup>0</sup> C/20 <sup>0</sup> C
maximale Berstum- fangsdehnung	32 %	64 %
maximale Gesamt- Kühlkanalversperrung	25 %	60 %

# REBEKA Bündel Test 1 und 2 Vergleich der Haupt-Test-Daten

Abb. 06.01.09/01A-8: REBEKA 1-2; Gegenüberstellung der Haupttestparameter und der wesentlichen Ergebnisse.



Abb. 06.01.09/01A-9: REBEKA 1; Umfangsdehnung der 9 Zirkaloyhüllrohre und Kühlkanalversperrung.



Abb. 06.01.09/01A-10: REBEKA 2; Umfangsdehnung der 9 Zirkaloyhüllrohre und Kühlkanalversperrung.





Abb. 06.01.09/01A-11: REBEKA 1-2; axiale Verformungsprofile zwischen den beiden mittleren Abstandshaltern.



test 1, blockage ratio: 25%

test 2, blockage ratio: 60 %

Abb. 06.01.09/01A-12: REBEKA 1-2; Bündelquerschnitte bei maximaler Kühlkanalversperrung.



Abb. 06.01.09/01A-13: Einfluß der Kühlung (Wärmeübergangszahl) auf azimutale Temperaturunterschiede.

- 4200-136

![](_page_28_Figure_0.jpeg)

Abb. 06.01.09/01A-14: Einfluß der Kühlung auf die Kühlkanalversperrung.

![](_page_29_Picture_0.jpeg)

![](_page_29_Picture_1.jpeg)

![](_page_29_Picture_2.jpeg)

detail A,B: thermocouple brazed in clad groove guard fuel rod simulator with Inconel cladding detail C: thermocouple spot welded with Platinum sheath

Abb. 06.01.09/01A-15: Schnitt durch einen Brennstabsimulator mit in die Inconelhülle eingebetteten TEs sowie einem aufgepunktetem TE.

![](_page_30_Figure_0.jpeg)

Abb. 06.01.09/01A-16: Lage des eingebetteten zum aufgepunkteten TE.

location of measurement: 950 mm below midpoint of tube. lower power rating step: 17.8 W/cm

![](_page_31_Figure_1.jpeg)

Abb. 06.01.09/01A-17: REBEKA 1; Unterschiede im Temperaturverlauf von eingebettetem und aufgepunktetem TE auf Stab Nr. 17.

![](_page_32_Figure_0.jpeg)

Abb. 06.01.09/01A-18: REBEKA 2; Einfluß der direkten Umgebung auf Unterschiede im Temperaturverlauf vom eingebetteten und aufgepunkteten TE

- 4200-141 -

![](_page_33_Figure_0.jpeg)

Abb. 06.01.09/01A-19: REBEKA 2; Einfluß der direkten Umgebung auf Unterschiede im Temperaturverlauf vom eingebetteten und aufgepunkteten TE

![](_page_34_Figure_0.jpeg)

Abb. 06.01.09/01A-20: REBEKA 3; Einfluß der direkten Umgebung auf Unterschiede im Temperaturverlauf vom eingebetteten und aufgepunkteten TE

![](_page_35_Figure_0.jpeg)

Abb. 06.01.09/01A-21: REBEKA 3; Einfluß der direkten Umgebung auf Unterschiede im Temperaturverlauf vom eingebetteten und aufgepunkteten TE