



KfK 2691
September 1978

Verhalten der Brennelemente beim Kühlmittelverluststörfall und Wechselwirkung mit der Kernnotkühlung

F. Erbacher
Institut für Reaktorbauelemente
Projekt Nukleare Sicherheit

Kernforschungszentrum Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE GMBH

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE
Institut für Reaktorbauelemente
Projekt Nukleare Sicherheit

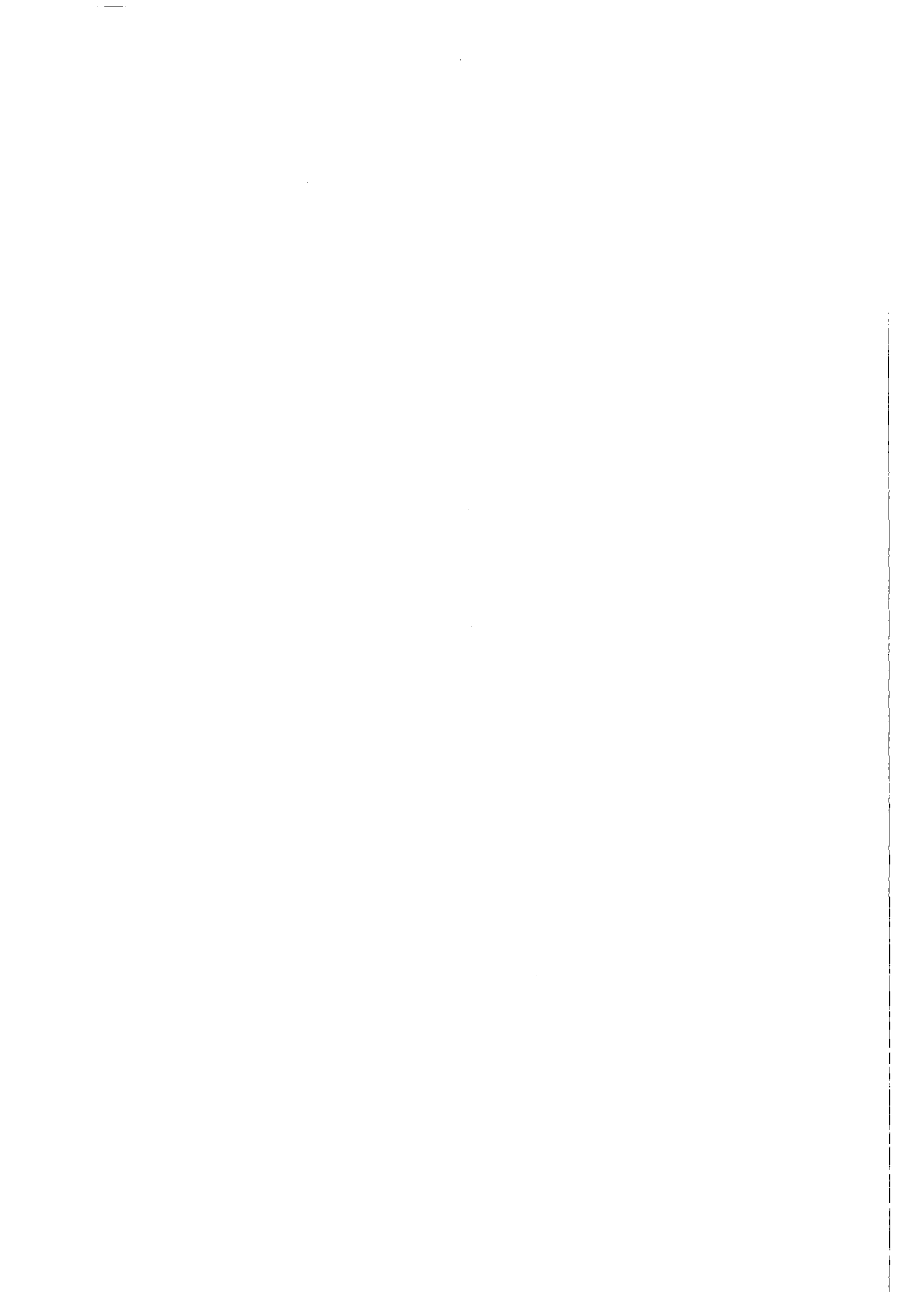
KfK 2691

Verhalten der Brennelemente beim Kühlmittel-
verluststörfall und Wechselwirkung mit der
Kernnotkühlung *

F. Erbacher

*Überarbeitete Fassung eines Vortrages beim KTG-Fortbildungsseminar
"Thermo- und Fluidynamische Auslegung von Kernkraftwerken mit Leicht-
wasserreaktoren" vom 10.-12. Mai 1978 bei der Firma KWU in Offenbach

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe



Zusammenfassung:

Es wird zunächst ein Überblick gegeben über die Kernnotkühlung eines Druckwasserreaktors beim Kühlmittelverluststörfall. Die thermohydraulischen Vorgänge im Reaktorkern sowie die Belastung der Brennstabhüllrohre werden beschrieben.

Anhand ausgewählter neuer Forschungsergebnisse zum Deformationsverhalten der Zirkaloyhüllrohre beim Kühlmittelverluststörfall wird gezeigt, daß axiale und azimutale Hüllrohrtemperaturdifferenzen, welche durch die Kühlung beim Fluten verstärkt werden, die Dehnungen der Zirkaloyhüllrohre sowie die entstehende Kühlkanalversperrung im Brennelement begrenzen.

Fuel Element Behavior during a Loss-of-Coolant Accident and Interaction with the Emergency Core Cooling

Abstract

The process of emergency core cooling in a LOCA of a pressurized water reactor is summarized. The thermohydraulics in the reactor core and the loading of the fuel rod claddings during a LOCA are covered in more detail.

Some recent experimental results on Zircaloy cladding deformation in a LOCA are discussed. They indicate that axial and azimuthal cladding temperature differences, which are enhanced by cooling during reflooding, are limiting the strains of the Zircaloy cladding tubes and the resulting coolant channel blockage in the fuel elements.

Inhaltsverzeichnis

Seite

1.	Einleitung	1
2.	Primärkreislauf des Druckwasserreaktors	2
3.	Aufbau des Kernnotkühlsystems	3
4.	Funktion des Kernnotkühlsystems	4
5.	Thermohydraulik im Reaktorkern	6
5.1	Nachwärmeerzeugung	6
5.2	Kühlmitteldurchsatz	7
5.3	Wärmeübergang	8
6.	Belastung und Deformation der Brennstabhüllrohre	10
7.	Kühlkanalversperrung im Brennelement	11
8.	Ausgewählte Forschungsergebnisse	11
8.1	Brennstabsimulator	11
8.2	Deformationsmechanismus	12
8.2.1	Deformationsform	13
8.2.2	Deformationsvorgang	13
8.3	Wechselwirkung zwischen Thermohydraulik und Hüllrohr- deformation	15
8.3.1	Wirksamkeit der Kühlung	16
8.3.2	Wärmeübergang Hülle-Fluid	17
8.3.3	Wärmeübergang im Spalt	18
8.3.4	Deformation im Stab Bündel und Kühlkanalversperrung	19
8.3.5	Axiales Temperatur- und Deformationsprofil	19
8.3.6	Azimutales Temperatur- und Deformationsprofil	21
8.4	Schlußfolgerungen	21
9.	Schlußbemerkung	22
	Literaturverzeichnis	24

Verzeichnis der Abbildungen

- 1 Primärkreislauf des Druckwasserreaktors
- 2 Notkühlsystem des KWU-Standard-Kernkraftwerks (1 von 4 gleichartigen Systemen)
- 3 Funktionsweise des Kernnotkühlsystems (2F-Bruch im kalten Strang)
- 4 Nachzerfallswärmeleistung
- 5 Kerndurchsatz während der Druckentlastungsphase
- 6 Wärmeübergang beim Fluten
- 7 Brennstabelastung beim Kühlmittelverluststörfall (2F-Bruch im kalten Strang)
- 8 Kühlkanalversperrung als Funktion der Hüllrohrdehnung
- 9 Brennstabsimulator
- 10 Prüfstand für Einzelstabversuche an verkürzten Brennstabsimulatoren
- 11 Deformationsform geborstener Zirkaloyhüllrohre
- 12 Azimutale Temperaturverteilung beim Aufblähvorgang
- 13 Röntgenbild eines Brennstabsimulators mit geborstener Hülle
- 14 Schlifffbilder geborstener Zirkaloyhüllrohre, Einfluß der azimutalen Temperaturdifferenz auf die Berstumfangsdehnung
- 15 Stabbündel vor Einbau in Kasten
- 16 Anordnung der Brennstabsimulatoren und Thermoelemente im Stabbündel
- 17 Versuchskreislauf für Bündelversuche an Brennstabsimulatoren voller Länge
- 18 Versuchsführung des ersten Bündelversuchs
- 19 Verlauf der axialen Hüllrohrtemperaturen am Stab 17
- 20 Wärmeübergang Hülle - Fluid am Stab 17
- 21 Hüllrohrtemperatur und Innendruck der Stäbe 36 und 67, Einfluß des Spaltes auf die Hüllrohrtemperatur
- 22 Verformtes Stabbündel nach Versuch, mittlere Abstandshalterbereiche nach Entfernung der Umgebungsstäbe
- 23 Umfangsdehnung der Zirkaloyhüllrohre und Kühlkanalversperrung
- 24 Mittlerer Abstandshalterbereich des verformten Stabbündels, axiales Deformationsprofil
- 25 Mechanismus des Wärmeübergangs Hülle - Fluid
- 26 Dampfüberhitzung am Austritt der Teststrecke und Wasserauswurf

- 27 Verlauf der axialen Hüllrohrtemperaturen im mittleren Abstandshalterbereich des Stabes 16
- 28 Querschnitte durch verformtes Stabbündel (1835 mm und 1880 mm von oben), azimutales Deformationsprofil

1. Einleitung

Im Rahmen des atomrechtlichen Genehmigungsverfahrens für Druckwasserreaktoren muß mittels einer Störfallanalyse u. a. der Nachweis geführt werden, daß die Auswirkungen aller im Primärkreislauf denkbaren Rohrleitungsbrüche beherrscht werden.

Bei den hypothetischen Kühlmittelverluststörfällen wird derzeit dem doppelendigen Bruch (2F-Bruch) der Hauptkühlmitteleitung im kalten Strang zwischen Hauptkühlmittelpumpe und Reaktordruckbehälter die größte Bedeutung im Sinne des schwerwiegensten Auslegungsstörfalles beigemessen. Dieser Bruch führt zu den größten Differenzdruckbelastungen der Druckbehältereinbauten, der Primärkreiskomponenten sowie im Sicherheitsbehälter. Je nach den getroffenen Annahmen werden für diesen doppelendigen Bruch im kalten Strang auch die größten Beanspruchungen der Brennstabhüllrohre errechnet.

Die folgenden Ausführungen befassen sich daher ausschließlich mit dem Ablauf dieses Störfalles und seinen Auswirkungen auf die Brennelemente und die Kernnotkühlung.

Die RSK-Leitlinien für Druckwasserreaktoren schreiben hinsichtlich der Wärmeabfuhr beim Kühlmittelverluststörfall u.a. folgendes vor:

"Die Kernnotkühlung muß geeignet sein, die Kerntemperaturen langfristig auf einem niedrigen Wert zu halten. Die Kernnotkühlung muß so ausgelegt sein, daß insbesondere

1. die berechnete maximale Brennstabhüllentemperatur 1.200°C nicht überschreitet,
2. die berechnete Oxidationstiefe der Hülle an keiner Stelle den Wert von 17 % der tatsächlichen Hüllrohrwandstärke überschreitet,
3. bei der Zirkon-Wasser-Reaktion nicht mehr als 1 % des gesamten in den Hüllrohren enthaltenen Zirkoniums reagiert,

4. infolge von Hüllrohrschäden nicht mehr als 10 % des Jodinventars und 0,1 % der festen Spaltprodukte freigesetzt werden,
5. keine Änderungen in der Geometrie des Reaktorkerns auftreten, die eine ausreichende Kühlung des Kerns verhindern".

Bei der Analyse des Kühlmittelverluststörfalles mit doppelendigem Bruch im kalten Strang kommt dem zuletzt genannten Kriterium besondere Bedeutung zu. Es gilt nachzuweisen, daß weder durch Verformungen an den Kerneinbauten noch durch Verformungen der Brennstabhüllrohre die Kühlung des Kerns unzulässig beeinträchtigt wird. Hierfür werden experimentell abgesicherte analytische Nachweise gefordert.

Zu diesem Zweck werden an verschiedenen Stellen in der Bundesrepublik Rechenprogramme entwickelt, die durch experimentelle Daten aus verschiedenen Versuchen verifiziert werden. Die entsprechenden experimentellen und theoretischen Arbeiten zum Brennstabverhalten beim Kühlmittelverluststörfall werden im wesentlichen im Rahmen des Projektes Nukleare Sicherheit im Kernforschungszentrum Karlsruhe sowie von der KWU durchgeführt.

2. Primärkreislauf des Druckwasserreaktors

Die Abb. 1 zeigt in vereinfachter Darstellung einen Kühlkreislauf des Primärsystems eines Druckwasserreaktors. Dieses besteht, je nach Leistungsgröße des Kernkraftwerkes, aus mehreren, voneinander unabhängigen und identischen Kühlkreisläufen. Der Primärkreis des 1300 MW Standardkraftwerkes mit KWU-Druckwasserreaktor besteht aus vier solchen Kühlkreisläufen.

Durch die in den Brennelementen bei der Kernspaltung entstehende Wärme wird das unter einem Betriebsdruck von etwa 155 bar stehende Primärkreiswasser auf etwa 325⁰C, d.h. etwa 20⁰C unter Sättigungstemperatur aufgeheizt. Das erwärmte Kühlwasser strömt über parallel geschaltete Rohrleitungen zu den Dampferzeugern, wo es die im Reaktor erzeugte Wärme an das zu verdampfende Sekundärkreiswasser abführt. Das auf etwa 290⁰C abgekühlte Primärkreiswasser wird über die in jeder Umwälzschleife angeordnete Kühlmittelpumpe in den

Reaktordruckbehälter (RDB) zurückgefördert.

Das von der Hauptkühlmittelpumpe zum Reaktor zurückgeförderte Kühlwasser tritt über die Eintrittsstutzen in den RDB ein, strömt in einem vom Kernmantel und RDB gebildeten Ringraum abwärts zur Bodenkalotte des RDB, wo sich die Strömungsrichtung nach oben umkehrt. Nach Aufnahme der im Reaktorkern erzeugten Wärme verläßt das Kühlwasser dann über die Austrittsstutzen den RDB.

Die Schleifenbereiche auf der Zuströmseite der Dampferzeuger werden als heiße Stränge, die auf der Abströmseite als kalte Stränge bezeichnet.

Um ein Sieden im Primärkreislauf zu verhindern, wird der Betriebsdruck stets um etwa 30 bar über dem Dampfdruck gehalten. Diese Aufgabe übernimmt der Druckhalter. Er enthält eine Wassermenge, die elektrisch so beheizt wird, daß sich ein Druckpolster mit dem im Primärkreislauf gewünschten Druck ausbildet. Der Druckhalter dient gleichzeitig auch als Puffer für Volumenänderungen, die das Primärwasser durch Temperaturänderungen erfahren kann.

3. Aufbau des Kernnotkühlsystems

Das von KWU für die heutigen Druckwasserreaktoren entwickelte Kernnotkühlsystem ist so ausgelegt, daß die Beherrschung aller im Primärkreislauf denkbaren Rohrleitungsbrüche sichergestellt ist. Es besteht aus einem Hochdrucksystem zur Kompensierung kleinerer Lecks sowie einem schnell einspeisenden Druckspeichersystem und Niederdrucksystem zur Beherrschung großer Lecks bis zum 2F-Bruch im kalten Strang.

Die Abb. 2 zeigt schematisch eines der vier Notkühlssysteme des KWU-Standard-Kernkraftwerkes. Alle vier Systeme sind identisch, voneinander völlig unabhängig und je einem Hauptkühlkreislauf zugeordnet. Jeder der vier Notkühlkreisläufe ist für 50 % der für die Notkühlung des Reaktors erforderlichen Einspeisemenge ausgelegt, so daß nur zwei Systeme gebraucht werden, um den Kühlmittelverluststörfall zu beherrschen.

Die Einspeisung des Notkühlwassers in den zugeordneten Loop des Primärkreises erfolgt bei den KWU-Druckwasserreaktoren jeweils über zwei Einspeiserrohrleitungen, wobei eine an den heißen Strang zwischen Reaktordruckbehälter und Dampferzeuger und eine Rohrleitung an den kalten Strang zwischen Hauptkühlmittelpumpe und Reaktordruckbehälter angeschlossen ist.

Beim doppelendigen Bruch im kalten Strang sprechen lediglich das Druckspeichersystem sowie das Niederdrucksystem bestehend aus den Nachkühlpumpen, den Nachkühlern und den Flutbehältern an. Das Hochdrucksystem mit den Sicherheitseinspeisepumpen hat für diesen Fall keine Bedeutung.

4. Funktion des Kernnotkühlsystems

Die Abb. 3 zeigt schematisch die Funktionsweise des Kernnotkühlsystems bei einem doppelendigen Bruch im kalten Strang. Der zeitlich gestaffelte Einsatz der einzelnen Notkühlkomponenten ist hierbei in vier Stufen dargestellt. Es ist jeweils der Sicherheitsbehälter mit einer Schleife des Primärkreises und einem Notkühlsystem dargestellt. Die in schwarz angelegte Schleife zeigt den Reaktor, einen Dampferzeuger, eine Hauptkühlmittelpumpe sowie den verbindenden Rohrstrang. Das Notkühlsystem ist in den Abbildungen durch Druckspeicher, Flutbehälter, Nachkühlpumpe, Nachkühler sowie die dazugehörigen Einspeiserrohrleitungen dargestellt.

1. Stufe : Entspannung

Nach Abriß der Hauptkühlmittelleitung schaltet sich der Reaktor infolge der Dampfbildung im Reaktorkern, d.h. einer Dichteverminderung des Moderators, unverzüglich automatisch ab, auch ohne daß die Schnellabschaltstäbe eingefahren werden. Die von diesem Moment an noch erzeugte Nachzerfallwärmeleistung erfordert jedoch auch weiterhin eine zuverlässige Kühlung des Reaktorkerns.

Während der Entspannung des Kühlmittels erfolgt die Kühlung des Reaktorkerns durch das sich entspannende Kühlmittelinventar im Reaktordruckbehälter. Notkühlssysteme sprechen im ersten Moment des Störungseintritts noch nicht an.

Das aus dem Leck austretende Wasser entspannt sich im Sicherheitsbehälter, der mit einem Durchmesser von etwa 50 m das gesamte Primärsystem des Kernkraftwerks umschließt und einen dichten Einschluß der Radioaktivität sicherstellt. Der Sicherheitsbehälter ist so ausgelegt, daß das gesamte an der Leckstelle austretende und verdampfende Primärwasser sich auf einen Gleichgewichtsdruck von wenigen Bar Überdruck entspannen kann.

2. Stufe : Druckspeicher-Einspeisung

Bereits vor Ende der völligen Entspannung beginnt die heiß- und kaltseitige Druckspeicher-Einspeisung, und zwar sobald der Primärkreisdruck unter etwa 26 bar abgefallen ist. Der in den Druckspeichern vorhandene, mittels Stickstoff auf Vordruck gehaltene borierte Wasservorrat reicht aus, um den Kern wieder teilweise zu fluten.

Die Druckspeicher sind gegen den Primärkreis lediglich durch Rückschlagarmaturen abgesperrt. Diese geben den Strömungsweg automatisch frei, sobald der Primärkreisdruck kleiner ist als der Druck im Druckspeicher.

3. Stufe : Fluten durch Pumpen

Sobald der Druck in den Druckspeichern auf etwa 10 bar abgesunken ist, werden diese durch selbsttätige Rückschlagklappen abgesperrt und die Niederdruck-Nachkühlpumpen laufen an. Sie fördern boriertes Wasser aus den Flutbehältern in den Reaktorkern, der nach etwa 150 s wieder völlig geflutet ist.

4. Stufe : Sumpfkreislauf-Betrieb

Der Vorrat der Flutbehälter ist bei voller Förderleistung nach etwa 20 Minuten Notkühlbetrieb erschöpft. Während dieser Zeit wird ständig Wasser durch den Reaktor gepumpt, fließt aus dem Leck und sammelt sich zusammen mit dem kondensierten Wasser des Primärkreislaufs im tiefsten Teil des Reaktorgebäudes, dem sogen. Gebäudesumpf.

Sobald die Flutbehälter leer sind, werden die Pumpen saugseitig auf den Gebäudesumpf geschaltet und fördern das dort gesammelte Wasser wieder in den Reaktor. Die Nachwärme wird mittels eines Nachkühlers an die Umgebung abgeführt. Dieser Sumpfkreislauf bleibt solange in Betrieb, bis die Nachwärmeentwicklung des Reaktorkerns abgeklungen ist.

Für die Beschreibung eines Kühlmittelverluststörfalls ist die Unterteilung in folgende drei aufeinander folgende Notkühlphasen üblich:

- die Druckentlastungsphase, die beendet ist, sobald ein Druckausgleich zwischen Primärkreis und Sicherheitsbehälter erreicht und der Primärkreis weitgehend entleert ist,
- die Wiederauffüllphase, während der der Primärkreis und das untere Plenum des Reaktordruckbehälters bis zur Kernunterkante wieder aufgefüllt werden, und
- die Flutphase, die vom Erreichen der Kernunterkante durch den wieder ansteigenden Wasserspiegel bis zur völligen Flutung des Reaktorkerns dauert.

5. Thermohydraulik im Reaktorkern

Bei der Analyse des Verhaltens der Brennelemente beim Kühlmittelverluststörfall spielen die thermohydraulischen Vorgänge eine entscheidende Rolle. Sie bestimmen auf Grund der sich einstellenden Hüllrohrtemperatur das Verformungsverhalten der Zirkaloy-Hüllrohre. Der Verlauf der maximalen Brennstabhüllentemperatur wird im wesentlichen durch die Nachwärmeerzeugung, den Kühlmitteldurchsatz und den Wärmeübergang bestimmt.

5.1 Nachwärmeerzeugung

Bei akuten Störfällen wird der Reaktor durch das Schnellabschaltsystem unterkritisch gemacht bzw. schaltet sich bei großen Rohrbrüchen infolge der

Dichteverminderung des Moderators infolge der Dampfblasenbildung automatisch ab. Das Abschalten des Reaktors beendet jedoch nur die Energieerzeugung durch die prompten Prozesse, nicht aber die sog. Nachwärmeerzeugung infolge der Spaltung durch die verzögerten Neutronen sowie durch den β - und γ -Zerfall der Spalt- und Aktivierungsprodukte.

Die Abb. 4 zeigt den Verlauf der Nachzerfallswärmeleistung, bezogen auf die ursprüngliche Reaktorleistung in einem Zeitraum bis 100 s nach der Abschaltung. Die dargestellten Kurven sind die ANS-Standardkurve sowie die um 20 % erhöhte Kurve.

Die dem Genehmigungsverfahren in der Bundesrepublik zugrunde gelegten RSK-Leitlinien für Druckwasserreaktoren verlangen, für die Berechnungen bis zum Abschluß des Wiederauffüllvorganges die Nachzerfallsleistung nach dem ANS-Standard zuzüglich eines Sicherheitszuschlages von 20 % zu verwenden.

Bei Zugrundelegung dieser Vorschrift ist die relative Nachzerfallswärmeleistung bis zum Ende der Druckentlastungsphase nach etwa 30 s bereits auf etwa 5 % der ursprünglichen Reaktorleistung abgefallen. Sie reduziert sich in der Flutphase weiter bis auf etwa 4 %.

5.2 Kühlmitteldurchsatz

Die Abb. 5 zeigt als Beispiel einen errechneten Massenstrom im Kern während der Druckentlastungsphase.

Der Primärdruck des unterkühlten Reaktorkühlmittels sinkt innerhalb etwa 100 ms nach Störfalleintritt auf den Sättigungsdruck, der sich entsprechend den unterschiedlichen Kühlmitteltemperaturen im oberen Plenum bei etwa 100 bar und im unteren Plenum bei etwa 80 bar einstellt. Demzufolge ändert der Kerndurchsatz, der im stationären Betrieb von unten nach oben durch den Reaktorkern gerichtet war, sofort nach dem Bruch seine Durchflußrichtung und durchströmt den Reaktorkern nunmehr von oben nach unten.

Der Kerndurchsatz wird nach erfolgter Strömungsumkehr im wesentlichen durch die Ausströmwiderstände in der gebrochenen Schleife und insbesondere das Pumpenverhalten in den noch intakten Schleifen bestimmt. Während die Bruchöffnung im kalten Strang die Beibehaltung der Kerndurchströmung von oben nach unten begünstigt, wirken die abgeschalteten und langsam auslaufenden Hauptkühlmittelpumpen diesem negativen Kerndurchsatz entgegen. Solange an den Pumpen noch keine Kavitationserscheinungen auftreten, sind diese in der Lage, über die drei noch intakten Schleifen einzuspeisen. Hierdurch kann nach wenigen Sekunden eine Stagnation des Kerndurchsatzes auftreten und der Dampfgehalt im Kern kurzzeitig auf Sattedampfwerte ansteigen. Dies bewirkt eine kurzzeitige Temperaturspitze des Hüllrohrs in der beginnenden Druckentlastungsphase.

Im weiteren Verlauf der Druckentlastung kann sich wieder eine Erhöhung des Kerndurchsatzes von oben nach unten ergeben, sobald die Förderleistung der Pumpen infolge Kavitation zusammengebrochen ist. Hiernach wirken die Pumpen als Widerstand in den intakten Schleifen, so daß der Strömungsausgleich nunmehr überwiegend direkt über den Kern zum Leck erfolgt. Mit dem sich dadurch erholenden Kerndurchsatz wird die Wärmeabfuhr an den Brennstäben wieder verbessert, so daß die Hüllrohrtemperaturen bis zum Ende der Druckentlastungsphase wieder absinken.

5.3 Wärmeübergang

Die beschriebenen hydraulischen Vorgänge während des Kühlmittelverluststörfalls haben zur Folge, daß sich während des Störfallablaufs sowohl örtlich wie auch zeitlich verschiedene Wärmeübertragungsmechanismen einstellen. Die Abb. 6 verdeutlicht beispielsweise qualitativ die unterschiedlichen Wärmeübergangsbereiche beim Fluten. Beim 2F-Bruch im kalten Strang erreicht der Kerndurchsatz bei der Strömungsumkehr bereits innerhalb von etwa 100 ms so niedrige Werte, daß hierbei die kritische Wärmestromdichte überschritten wird. Dabei erfolgt ein Übergang vom Blasensieden zum Filmsieden. Im Filmsiedebereich, der durch einen Dampffilm an der heißen Brennstaboberfläche charakterisiert ist, sind die Wärmeübergangszahlen um nahezu zwei Größenordnungen kleiner als im Bereich des Blasensiedens. Diese Verschlechterung

des Wärmeübergangs in der beginnenden Druckentlastungsphase trägt zu dem raschen Anstieg der Hüllrohrtemperaturen bei. Der Bereich des Filmsiedens bleibt bis zum Ende der Druckentlastungsphase erhalten, wobei sich jedoch die Hüllrohrtemperaturen infolge des sich erholenden Kerndurchsatzes wieder erniedrigen.

Für die Wiederauffüllphase, d.h. den Zeitraum vom Ende der Druckentlastungsphase bis zum Erreichen der Kernunterkante durch das vom Notkühlsystem eingespeiste Kühlwasser, ergibt sich infolge sehr geringer Kühlwirkung ein zweiter Anstieg der Hüllrohrtemperatur infolge des Temperatenausgleichs innerhalb des Brennstabes. In dieser Phase liegt bei den KWU-Druckwasserreaktoren infolge der Heißeinspeisung bis zu einem gewissen Grad Nebelkühlung vor.

In der beginnenden Flutphase verhindern die hohen Temperaturen der Brennstäbe zunächst eine rasche Wiederbenetzung durch das eingespeiste Wasser. Brennstab und Kühlmittel sind im unteren gefluteten Bereich der Brennstäbe wiederum zunächst durch einen Dampffilm getrennt, so daß der Wärmeübergang durch Filmsieden erfolgt. Die Wärmezufuhr an das Kühlmittel führt zunehmend zur Bildung von Dampfblasen im Kühlmittel und dazu, daß die Dampfgeschwindigkeit so groß wird, daß der Dampf Wassertröpfchen mitreißen kann. Hierdurch entsteht auch für den gesamten oberen heißen Kernbereich eine wirksame Nebelkühlung, so daß der weitere Temperaturanstieg verlangsamt bzw. verhindert wird.

Mit ansteigendem Wasserspiegel in die oberen heißen Brennstabbereiche erfolgt in diesen ein Übergang zum Filmsieden und ein langsamer Abfall der Hüllrohrtemperatur. Gegen Ende des Filmsiedebereichs hat die Brennstabhülle bereits eine Vorkühlung auf eine Temperatur erfahren, bei welcher die Brennstaboberfläche vom Kühlmittel benetzt werden kann.

Nach der Wiederbenetzung der Brennstäbe liegt wieder ein sehr guter Wärmeübergang durch Blasensieden vor und die weitere Langzeitkühlung kann durch Zwangskonvektion von Wasser vorgenommen werden.

6. Belastung und Deformation der Brennstabhüllrohre

Die Hüllrohrbelastung beim Kühlmittelverluststörfall mit 2F-Bruch im kalten Strang ist in Abb. 7 verdeutlicht. Sie ist im wesentlichen durch die Hüllrohrtemperatur sowie den auf das Hüllrohr wirkenden Differenzdruck bestimmt.

Die Druckbelastung des Hüllrohres ergibt sich als Differenz zwischen dem aus Vorinnendruck und Spaltgasdruck resultierenden Brennstabinnendruck und dem Systemdruck im Primärkreis. Die Abbildung verdeutlicht den Abfall des Systemdruckes während der Druckentlastungsphase vom Betriebsdruck von etwa 155 bar auf den Ausgleichsdruck im Sicherheitsbehälter von etwa 4 bar. Bei dem derzeit für KWU-Druckwasserreaktoren angewendeten Vorinnendruck ergibt sich bei Betriebstemperatur ein Brennstabinnendruck von etwa 70 bar. Da der Systemdruck etwa 10 s nach Störfalleintritt auf etwa 70 bar abgefallen ist, ergibt sich erst ab diesem Zeitpunkt eine Innendruckbelastung der Hüllrohre, die sich bis zum Ende der Druckentlastungsphase nach etwa 30 s voll ausgebildet hat.

In der Abbildung 7 ist ein Bereich markiert, in dem mit bleibenden Verformungen der Brennstabhüllrohre zu rechnen ist. Dieser Bereich basiert weitgehend auf experimentellen Ergebnissen.

Die Abbildung zeigt, daß die maximale Hüllrohrtemperatur von Normalstäben in keinem Falle Werte erreicht, bei denen mit bleibenden Hüllrohrverformungen zu rechnen ist.

Für Heißstäbe, die jedoch nur mit etwa 1 % im Reaktorkern vertreten sind, wird in der Druckentlastungsphase eine kurzzeitige Temperaturspitze von etwa 930°C errechnet. Da sich zu diesem Zeitpunkt jedoch erst eine geringe Innendruckbelastung des Hüllrohres aufgebaut hat, ist höchstens in der abklingenden Druckentlastungsphase mit kleineren Hüllrohrabhebungen zu rechnen. In der Flutphase kann sich hingegen ein Temperaturplateau bei Temperaturen von über 900°C für einen längeren Zeitraum einstellen. Da sich zu diesem Zeitpunkt der Druck im Primärkreis und im Sicherheitsbehälter ausgeglichen haben, stehen die Brennstabhüllrohre nunmehr unter voller Differenzdruckbelastung. Die erreichten Hüllrohrtemperaturen reichen daher aus,

um plastische Verformungen bzw. Bersten der Hüllrohre zu bewirken. Dies kann zu lokalen Kühlkanalversperrungen in den Brennelementen führen.

7. Kühlkanalversperrung im Brennelement

Die Größe der entstehenden Kühlkanalversperrung wird durch das Ausmaß der Umfangsdehnung der Zirkaloy Hüllrohre sowie deren axialen Erstreckung und Verteilung bestimmt. Die Abb. 8 zeigt die Kühlkanalversperrung als Funktion der Umfangsdehnung der Hüllrohre. Die Versperrung wurde unter der pessimistischen Annahme errechnet, daß alle Hüllrohre an der gleichen Stelle gleichstark dehnen. Eine gleichmäßige Umfangsdehnung der Hüllrohre von 33 % würde zu einer gegenseitigen Berührung benachbarter Stabhüllen und einer Kühlkanalversperrung von 61 % führen.

Im Rahmen des FLECHT Programms durchgeführte Flutexperimente an blockierten Stabanordnungen geben einen Hinweis darauf, daß offensichtlich nur Kühlkanalversperrungen, die größer als 75 % sind zu einer Verschlechterung der Kühlbarkeit führen /1/.

8. Ausgewählte Forschungsergebnisse

Im Folgenden werden als Beispiel einige neuen Ergebnisse des REBEKA-Programms erläutert. Es handelt sich hierbei um experimentelle Arbeiten zum Brennstabverhalten beim Kühlmittelverluststörfall, die im Kernforschungszentrum Karlsruhe im Rahmen des Projektes Nukleare Sicherheit im Institut für Reaktorbaulemente (IRB) durchgeführt werden.

Alle beschriebenen Arbeiten orientieren sich an Leistungs-, Temperatur- und Drucktransienten wie sie bei einem 2F-Bruch im kalten Strang erwartet werden.

8.1 Brennstabsimulator

Voraussetzung für die Durchführung des Versuchsprogrammes war die Entwicklung eines Brennstabsimulators, dessen thermisches und fluiddynamisches Verhalten weitgehend einem nuklearen Brennstab entsprechen. Die Abb. 9 zeigt den im IRB

entwickelten und gefertigten Brennstabsimulator mit einer beheizten Länge von 3,90 m sowie einem axialen Leistungsprofil.

Die Zirkaloyhülle wird indirekt von innen beheizt. Die von einem elektrisch isolierten Heizstab erzeugte Wärme wird überwiegend durch Wärmeleitung über den Spalt zwischen Pellets und Hüllrohr an dieses übertragen. Eine derartige Beheizungsart simuliert die Verhältnisse eines nuklearen Brennstabes am besten insbesondere bei sich vergrößerndem Spalt während der Deformation in der Flutphase.

Die Anordnung der Pellets zwischen Heizstab und Hüllrohr und die Einhaltung der im Brennstab vorliegenden Spaltweiten ermöglichen darüberhinaus auch eine Simulation der Gasströmung im Spalt von den Plena zur aufblähenden Stelle.

8.2 Deformationsmechanismus

Die Versuche zur Untersuchung des Deformationsmechanismus wurden mit verkürzten Brennstabsimulatoren des beschriebenen Entwurfes durchgeführt. Die Brennstabsimulatoren haben eine beheizte Länge von 325 mm und eine konstante axiale Leistung. Sie sind senkrecht innerhalb eines zur Simulation der Umgebungsbedingungen beheizbaren Kühlmittelführungsrohr angeordnet.

Die Abb. 10 zeigt schematisch den Versuchsstand und die Meßeinrichtungen. Die zeitabhängige Verformung des Zirkaloyhüllrohres wird mittels einer Röntgendurchleuchtungsanlage und Filmaufzeichnung registriert. Diese Technik ermöglicht die Beobachtung des Aufblähvorganges und das Verhalten von Heizstab, Pellets und Hüllrohr innerhalb der Teststrecke.

Durch Kombination der äußeren Wärmeübergangsbedingungen mit der Stableistung des Brennstabsimulators können Temperaturtransienten simuliert werden, wie sie für die Wiederauffüll- und Flutphase eines hypothetischen Kühlmittelverluststörfalles für Stäbe unterschiedlicher Leistung berechnet werden.

8.2.1 Deformationsform

Die in Abb. 11 dargestellte Deformationsform ist typisch für alle in der α - und $\alpha+\beta$ -Phase des Zirkaloy durchgeführten Berstversuche:

- konisches Abheben der Hülle zu beiden Seiten der Berststelle mit relativ kleinen Dehnungen sowie einer überlagerten kleinen und kurzen, lokalen Beule an der Berststelle.
- unsymmetrisches Aufblähen infolge einer durch azimutale Temperaturdifferenzen verursachten Verbiegung des Hüllrohres: kein Abheben auf der heißen Berstseite, deutliches Abheben auf der gegenüberliegenden kalten Seite.

Die Mehrzahl der ausgewerteten Versuche ergab relativ kleine Umfangsdehnungen im Bereich von 30 %.

8.2.2 Deformationsvorgang

Die im Vergleich zu den an anderen Stellen mit direkt beheizten Hüllrohren durchgeführten Berstexperimenten niedrigen Berstumfangsdehnungen erklären sich durch azimutale Temperaturunterschiede auf dem Hüllrohrumfang und den dadurch bestimmten Deformationsvorgang.

Die Abb. 12 zeigt u.a. 5 Hüllrohrtemperaturen auf dem Hüllrohrumfang während des Aufblähvorganges.

Auf Grund einer meist vorhandenen exzentrischen Lage der Pelletsäule gegenüber der Zirkaloyhülle existieren unterschiedlich große Spaltweiten über dem Umfang. Diese verursachen bei Aufheizung der Hülle von innen azimutale Temperaturdifferenzen auf der Zirkaloyhülle. Mit Beginn der plastischen Verformung führt dies infolge von Textur- und Anisotropie-Effekten des Zirkaloy zu einer Verbiegung des Zirkaloy-Hüllrohres in Verbindung mit einem Schließen des Spaltes auf der heißen Seite sowie einem Öffnen des Spaltes auf der kalten Seite.

Da infolgedessen die wärmere Seite des Hüllrohres auch weiterhin an der Pelletsäule anliegt, die gegenüberliegende kältere Seite jedoch zunehmend abhebt, führt dies zu einer Vergrößerung der azimuthalen Temperaturdifferenzen auf dem Zirkaloy-Hüllrohr während seiner plastischen Verformung. Der Bereich maximaler Verformung bleibt hierdurch auf einen relativ kleinen Bereich des heißeren Hüllrohrumfangs begrenzt, wodurch große mittlere Umfangsdehnungen verhindert werden.

Die Abb. 13 ist ein Röntgenbild eines Brennstabsimulators mit geborstener Zirkaloyhülle. Die Seitenansicht verdeutlicht die typische unsymmetrische Deformationsform und die Rohrverbiegung. Die heiße Hüllrohrseite, auf der das Bersten erfolgte, hat sich an die Pellets angelegt und somit den Spalt geschlossen, während die gegenüberliegende kältere Seite des Hüllrohres deutlich abgehoben und den Spalt geöffnet hat.

Zur Untermauerung des Deformationsmechanismus wurden grundlegende Experimente mit einem Stabinnendruck von etwa 70 bar durchgeführt, bei denen die Ausbildung azimuthaler Temperaturunterschiede gezielt beeinflusst wurde. Die Abb. 14 zeigt Schnittbilder der geborstenen Hüllrohre aus diesen drei Versuchen, im oberen Teil an der Berststelle, darunter einen Schnitt 10 mm oberhalb der Berstebene.

Das Hüllrohr mit den großen Temperaturunterschieden auf dem Umfang aus Versuch 60 zeigt im Bereich der Berstmantellinie die größte Hüllrohrwandstärkenabnahme. Hier herrschten der enge Spalt, die höhere Temperatur und demzufolge auch die größte Verformung. Die gegenüberliegende, kältere Seite zeigt praktisch noch die Ausgangswandstärke. Die Umfangsdehnung entsteht also überwiegend durch eine örtlich auf einen Teil des Gesamtumfangs begrenzte Wandstärkenverschwächung. Das Hüllrohr aus Versuch 61, das während des Versuchs die geringeren azimuthalen Temperaturdifferenzen aufweist, zeigt bereits eine gleichmäßigere Abnahme der Hüllrohrwandstärke über dem Umfang und birst bei einer Umfangsdehnung von 67 %. Im Fall des Versuchs 63 mit einer ganz geringen azimuthalen Temperaturdifferenz findet die Wandstärkenabnahme noch gleichmäßiger auf dem ganzen Umfang statt, und bis zum Bersten werden 83 % Umfangsdehnung erreicht.

Eine gleichmäßige Wandstärkenverschwächung auf dem Umfang wie beim Versuch 63 liegt auch bei direkt beheizten Hüllrohrexperimenten vor. Die Versuchsführung des direkten Beheizens verhindert die Ausbildung azimuthaler Temperaturdifferenzen und führt daher zwangsläufig zu den bekannten großen Berstumfangsdehnungen.

Aus den bisherigen Versuchen läßt sich folgende Tendenz ableiten:

- Kleine Temperaturdifferenzen auf dem Umfang ergeben große Berstumfangsdehnungen,
- große Temperaturdifferenzen ergeben kleine Umfangsdehnungen.

8.3 Wechselwirkung zwischen Thermohydraulik und Hüllrohrdeformation

Zur Ermittlung des Einflusses der in der Flutphase eines Kühlmittelverluststörfalles vorliegenden Kühlungsbedingungen auf die Hüllrohrdeformation wurde ein erster Bündelversuch mit Fluten durchgeführt.

Die Abb. 15 zeigt eine photographische Ansicht des etwa 5 m langen Stabbündels vor Einbau in den Kasten und in die Teststrecke. Die Abb. 16 zeigt einen Querschnitt durch das Stabbündel sowie die Nummerierung der Stäbe und die Typen der Thermoelemente.

Das Bündel besteht aus 25 Brennstabsimulatoren in einer quadratischen 5x5-Anordnung mit einem Stabmittenabstand von 14,3 mm. Sämtliche Brennstabsimulatoren haben Original-DWR-Abmessungen, einen Außendurchmesser von 10,75 mm, eine beheizte Länge von 3900 mm sowie ein axiales Leistungsprofil (Abb. 9). Das Helium-Gasvolumen ist in einem radialen Spalt von 50 μ m sowie im unteren und oberen Plenum von Originalgröße eingeschlossen.

Die äußere Stabreihe im Bündel unterscheidet sich von den inneren 9 Stäben dadurch, daß sie einen Helium-Innendruck von nur 2 bar enthalten und eine Hülle aus Inconel besitzen, die sich während des Versuchsablaufes nicht verformt. Diese Stäbe dienen der Simulation der thermischen Umgebung.

Die Brennstabsimulatoren werden in einem dünnwandigen, längs zugeschweißten Kasten aus Inconel durch Original-Abstandshalter geführt. Dieser Kasten sitzt im eigentlichen Druckrohr der Teststrecke.

Die Abb. 17 zeigt das Schaltbild des für die Bündelversuche verwendeten Versuchskreislaufes.

Die Abb. 18 zeigt im unteren Teil des Bildes schematisch die Versuchsführung. Der obere Kurvenzug zeigt den typischen Verlauf einer Hülltemperatur. Ausgehend von einem isothermen Zustand in der ganzen Teststrecke von etwa 175°C wird die Teststrecke bei leichter Dampfströmung durch Hochheizen der Brennstabsimulatoren auf etwa 520°C gebracht. Die elektrische Leistung wird dann wieder abgeschaltet und der Innendruck von 70 bar aufgegeben. Zwanzig Sekunden später wird das Druckaufgabesystem abgeschlossen. Nach etwa 1 Minute wird die elektrische Leistung auf die Brennstabsimulatoren wieder zugeschaltet und bleibt bis zum Versuchsende stehen. Hiermit wird die Wiederaufheizphase eingeleitet und mit der Einspeisung des Notkühlwassers beginnt die Flutphase.

Temperatur- und Druckverläufe stellen sich bei anstehender Leistung durch die Einwirkung des Flutens und das Verformen der Zirkaloyhülle automatisch ein. Die Verformung der Zirkaloyhüllen endet mit dem Bersten, spätestens jedoch mit dem Quenchen der Hüllrohre.

Die für das Experiment ausgewählten Versuchsdaten sind im oberen Teil der Abbildung angegeben.

8.3.1 Wirksamkeit der Kühlung

Die Abb. 19 zeigt als Beispiel die sich unter der Einwirkung der Kühlung einstellenden Hüllrohrtemperaturen des nicht-blähfähigen Umgebungsstabes 17 mit Inconelhülle und mit einem Spalt zwischen Pellet und Hüllrohr von etwa $50\ \mu\text{m}$. Die Thermoelemente sind jeweils in der Mitte der einzelnen axialen Leistungsstufen in Nuten des Hüllrohres eingelötet.

Die Abbildung zeigt an der Reihenfolge der gequenchten Positionen von 7 nach 1 die axial von unten nach oben fortschreitende Quenchfront. Da die Datenerfassung nur bis zu einer Versuchsdauer von 400 s erfolgte, ist das Quenchen des obersten Stabbereiches nicht mehr aufgezeichnet.

Zwei Auswirkungen der Flutung sind für das Brennstabverhalten von besonderer Bedeutung:

- eine nach Flutbeginn fast unverzögert über die gesamte Stablänge sich auswirkende Kühlung infolge des beim Fluten und Quenchen der untersten beheizten Stufe entstehenden Zweiphasengemisches
- eine starke Kühlwirkung des Zweiphasengemisch, so daß ein weiteres Ansteigen der Hüllrohrtemperatur nach Flutbeginn verringert bzw. verhindert wird.

8.3.2 Wärmeübergang Hülle-Fluid

Die Abb. 20 zeigt als Beispiel die unterschiedlichen Wärmeübergangsbereiche und die aus dem angegebenen Hüllrohrtemperaturverlauf und der Stableistung errechnete Wärmeübergangszahl zwischen Hülle und Fluid.

Die errechneten Wärmeübergangszahlen stimmen für einen Zeitraum ab etwa 20 Sekunden nach Flutbeginn gut mit den aus Flutexperimenten (FLECHT, FEBA) bekannten Wärmeübergangszahlen überein. Abweichend ist jedoch ein relativ hoher kurzzeitiger Anstieg und Wiederabfall der Wärmeübergangszahl unmittelbar nach Flutbeginn.

Diese Wärmeübergangsspitze deutet auf eine erhöhte Dampfentwicklung beim einsetzenden Fluten hin. Dieser Effekt wurde erstmals bei dem beschriebenen Experiment beobachtet. Weitere Experimente dienen u.a. der Klärung, ob es sich hierbei um eine Auswirkung des Spaltes zwischen Pellet und Hüllrohr der Brennstabsimulatoren oder um einen durch die Versuchsdurchführung bedingten Effekt handelt.

8.3.3 Wärmeübergang im Spalt

Die Abb. 21 zeigt den Verlauf der Hüllrohrtemperatur und des Innendrucks von zwei sich verformenden Stäben mit Zirkaloyhülle - dem Zentralstab 36 und dem Stab 67.

Das Diagramm im oberen Teil der Abbildung verdeutlicht das Verhalten des Zentralstabes 36. Er wurde von der gleichen Starttemperatur aus durch eine höhere Leistung etwas rascher aufgeheizt, um zum Flutbeginn eine um etwa 30°C höhere Hüllentemperatur aufzuweisen. Mit Beginn der Aufheizrampe steigt der Stabinnendruck an. Bereits 10 Sekunden vor Flutbeginn beginnt der Druck deutlich abzufallen, was ein Hinweis darauf ist, daß sich die Zirkaloyhülle bereits zu diesem Zeitpunkt verformt. Die abgehobene Hülle hat keinen guten Wärmekontakt mehr zu ihrer Wärmequelle, was beim Einsetzen des Flutens wegen der relativ geringen Wärmekapazität der Zirkaloyhülle zu einer drastischen Reduzierung der Hüllrohrtemperatur um 187°C führt. Die Hüllrohrtemperatur steigt zwar noch einmal an, kann jedoch infolge der stark ausgeprägten Kühlwirkung keine Werte mehr erreichen, die noch zum Bersten führen.

Das untere Diagramm der Abbildung zeigt im Vergleich dazu das Verhalten des Stabes 67, der zu Flutbeginn eine um 30°C geringere Hüllrohrtemperatur als der Zentralstab hat. Daher setzt bei diesem Stab die Verformung der Hülle erst 7 Sekunden vor Flutbeginn ein. Die Hülle hat demzufolge zum Zeitpunkt des Flutbeginns weniger stark abgehoben als diejenige des Zentralstabes. Das Abfallen der Hüllrohrtemperatur nach Flutbeginn ist infolgedessen mit 75°C deutlich niedriger, so daß die Hüllrohrtemperatur wegen der noch stärkeren Ankoppelung der Hülle an die Wärmequelle wieder Werte erreicht, die zum Bersten der Hülle führen.

Das unterschiedliche Verhalten der Stäbe 36 und 67 verdeutlicht, daß der Spalt zwischen Pellets und Hüllrohr einen entscheidenden Einfluß auf die sich in der Flutphase einstellende Hüllrohrtemperaturen und das Verformungsverhalten der Zirkaloyhüllrohre hat.

8.3.4 Deformation im Stabbündel und Kühlkanalversperrung

Die Abb. 22 zeigt die höchstbelastete Zone des verformten Stabbündels von allen vier Seiten nach Entfernung der Umgebungsstäbe.

Die Abb. 23 ist eine Auftragung der gemessenen Umfangsdehnungen aller 9 Zirkaloyhüllen über der beheizten Stabblänge von 3,90 m sowie der daraus errechneten Kühlkanalversperrung.

Vier im wesentlichen durch die Wechselwirkung zwischen Beheizung von innen, Kühlung und Verformung erklärbaren Effekte sind erkennbar:

1. Eine Verschiebung der Dehnungsmaxima in Flutrichtung zum nächst höher gelegenen Abstandshalter.
2. Eine dehnungsvermindernde Wirkung der Abstandshalter.
3. Relativ geringe maximale Umfangsdehnungen der Zirkaloy-Hüllrohre zwischen etwa 7 % und 32 %.
4. Eine maximale Gesamtkühlkanalversperrung von nur 24 %.

8.3.5 Axiales Temperatur- und Deformationsprofil

Die Abb. 24 zeigt in einer Ausschnittsvergrößerung den zentralen Bündelbereich zwischen zwei Abstandshaltern von zwei Seiten. Das Anwachsen der Umfangsdehnungen in Strömungsrichtung sowie die dehnungsvermindernde Wirkung der Abstandshalter sind deutlich zu erkennen.

Die Verschiebung der Dehnungsmaxima in Flutrichtung zum nächsten Abstandshalter läßt darauf schließen, daß trotz Anwesenheit von Wasser eine Überhitzung des Dampfes stattgefunden haben muß, die zu einem axialen Profil der Hüllrohrtemperaturen geführt hat.

Zur Klärung dieses Effektes wurde eine theoretische Untersuchung zur Zweiphasenströmung der Flutphase durchgeführt /2/. Es konnte gezeigt werden, daß der Wärmeübergang zwischen den Brennstäben und dem Dampf-Wassertropfen-Gemisch fast ausschließlich durch Konvektion erfolgt und der Strahlungsanteil vernachlässigt werden kann. Der konvektive Wärmestrom von der Hüllrohrwand zum Dampf ist größer als der Wärmestrom vom Dampf zum Tropfen. Dies führt zu einem thermischen Ungleichgewicht und einer Dampfüberhitzung längs des Kühlkanals. Die Abb. 25 zeigt schematisch den "Mechanismus des Wärmeübergangs und verdeutlicht, daß der überwiegende Teil der übertragenen Wärme zur Dampfüberhitzung und nur der geringere Teil zur Vorwärmung und Verdampfung der Wassertropfen dienen. Für einen Kühlkanal von 3 m Länge wurde beispielsweise eine Dampfüberhitzung bis zu etwa 500°C errechnet.

Die turbulenz erhöhende Wirkung der Abstandshalter führt zur Verkleinerung des Dampfüberhitzungsgrades hinter jedem Abstandshalter.

Bis zum nächsten Abstandshalter in Strömungsrichtung vergrößert sich jedoch der Überhitzungsgrad wieder, was zur Ausbildung eines axialen Temperaturprofils zwischen zwei Abstandshaltern führt.

Die Abb. 26 zeigt die während des Versuchs gemessene Dampfüberhitzung am Teststreckenaustritt sowie den Wasserauswurf. Die maximale Dampfüberhitzung beträgt an dieser Stelle etwa 150°C.

Die Abb. 27 zeigt den Hüllrohrtemperaturverlauf von zwei im Abstand von 400 mm zwischen zwei Abstandshaltern angebrachten Thermoelementen. Die beiden Kurven zeigen ein zeitlich sich ausbildendes axiales Temperaturprofil bis etwa 80°C während der Flutphase.

Ein derartiges axiales Profil der Hüllrohrtemperaturen führt zu einer Lokalisierung der maximalen Hüllrohrdeformation im heißen Bereich und verhindert axial ausgedehnte Umfangsdehnungen.

8.3.6 Azimutales Temperatur- und Deformationsprofil

Die Abb. 28 zeigt zwei Querschnitte in den im Abstand von 45 mm voneinander entfernt liegenden Ebenen der beiden geborstenen Stäbe (1835 mm und 1880 mm von oben) in deren Bereich auch die größte Kühlkanalversperrung auftrat. In der Abbildung sind auf dem Umfang der Zirkaloyhüllrohre die Stellen maximaler und minimaler Hüllrohrwandstärke markiert.

Die Abbildung macht deutlich, daß die Verteilung der Wandstärkenverschwächung auf dem Hüllrohrumfang sehr ungleichförmig ist - insbesondere bei den stärker verformten Hüllrohren 67, 29 und 76. Dieses Erscheinungsbild ist identisch mit dem der Einzelstabversuche (Abb. 14).

Die aufgetretenen Verformungen erlauben den Schluß, daß auch im Stabbündel Ungleichförmigkeiten im Spalt zwischen Pellet und Hüllrohr sowie deren Verstärkung während der plastischen Verformung zu sich verstärkt ausbildenden Temperaturdifferenzen auf dem Hüllrohrumfang führen. Hierdurch bleibt die maximale Wandstärkenverschwächung auf den heißen Bereich des Hüllrohrumfangs begrenzt, wodurch große Umfangsdehnungen und Kühlkanalversperrungen verhindert werden.

Die sich beim Fluten verstärkt ausbildende äußere Kühlwirkung vergrößert infolge von Exzentrizitäten vorhandene azimutale Temperaturdifferenzen und trägt infolgedessen zur Verhinderung großer Umfangsdehnungen und Kühlkanalversperrungen bei.

8.4 Schlußfolgerungen

Die bislang im Rahmen des REBEKA-Programms durchgeführten Forschungsarbeiten zum Deformationsmechanismus von Zirkaloyhüllrohren sowie zur Wechselwirkung zwischen Thermohydraulik und Hüllrohrdeformation beim Fluten erlauben folgende generelle Schlußfolgerungen:

- der Deformationsmechanismus der Zirkaloyhüllrohre beim Kühlmittelverluststörfall wird entscheidend durch Lokaleffekte infolge ungleichförmiger Temperaturverteilungen auf den Hüllrohren bestimmt
- im Falle ungleichförmiger Temperaturverteilungen bleiben die maximalen Dehnungen auf Heißstellen begrenzt, wodurch große und ausgedehnte Umfangsdehnungen verhindert werden
- die sich beim Fluten verstärkt ausbildende Kühlwirkung des Zweiphasengemisches vergrößert axiale und azimutale Temperaturdifferenzen auf dem Hüllrohr und trägt auf diese Weise zur Begrenzung ausgedehnter und großer Dehnungen und Kühlkanalversperrungen bei.

9. Schlußbemerkung

Die beschriebenen Forschungsarbeiten dienen dazu, die das Verhalten der Brennelemente während eines Kühlmittelverluststörfalls bestimmenden Mechanismen zu untersuchen und experimentelle Daten zur Weiterentwicklung und Verifizierung von Rechenprogrammen zu erstellen.

Die bisher erzielten ersten Ergebnisse bedürfen weiterer Quantifizierung und Untermauerung. Darüberhinaus müssen folgende Einflüsse auf das Brennelementverhalten näher untersucht werden: Kühlung, Regelstabführungsrohre, Art der Flutung, Flutrata, Leistungsunterschied im Stabbündel, Stab zu Stab Wechselwirkung, Propagation, axiales Leistungsprofil (cosinusförmig, asymmetrisch) usw.

Bevor die Ergebnisse der beschriebenen out-of-pile Experimente zur Beurteilung des Brennelementverhaltens bei Reaktorverhältnissen herangezogen werden, sind entsprechende in-pile Experimente erforderlich. Diese müssen insbesondere nachweisen, inwieweit auch bei einem nuklearen Brennstab mit ungleichförmigen Temperaturverteilungen auf dem Hüllrohr zu

rechnen ist.

Erste in-pile Versuche am FR2-Reaktor im Kernforschungszentrum Karlsruhe, die mit frischem Brennstoff und als transiente Berstversuche in Dampf-atmosphäre durchgeführt wurden, zeigten in den Querschliffen der Hüllrohre ebenfalls ungleichförmige Wandstärkenverschwächungen auf dem Hüllrohrumfang. Diese sind identisch mit den beschriebenen out-of-pile Ergebnissen und lassen auf ausgeprägte azimutale Temperaturdifferenzen auf dem Hüllrohrumfang schließen /3/. Die in-pile Berstdaten - Temperatur, Druck, Umfangsdehnung - sind in guter Übereinstimmung mit den out-of-pile Ergebnissen. Die zerstörungsfreie Nachuntersuchung ergab bisher ebenfalls keine Hinweise auf einen Einfluß der nuklearen Umgebung auf die Mechanismen des Brennstabverhaltens beim Kühlmittelverluststörfall.

Weitere in-pile Versuche mit für Leistungsreaktoren repräsentativ vorbestrahltem Brennstoff und unter repräsentativen Kühlungsbedingungen und Temperaturtransienten müssen zeigen, ob bzw. inwieweit bei vorbestrahltem Brennstoff Einflüsse der nuklearen Umgebung auf das Verhalten der Brennelemente beim Kühlmittelverluststörfall zu erwarten sind.

Literaturverzeichnis

- /1/ P.E. Mac Donald; J.M. Broughton "Status and Problems to be solved concerning the Interaction between Thermohydraulics and Fuel Behaviour during a Loss-of-Coolant Accident".
CSNI Report No. 13, Proceedings of Specialist Meeting on the Behaviour of Water Reactor Fuel Elements under Accident Conditions, Spatind, Norway, 13.-16. September 1976
- /2/ I. Gaballah
"Ein Beitrag zur theoretischen Untersuchung der Zweiphasenströmung mit Phasenwechsel und Wärmezufuhr in einem Kühlkanal eines LWR-Brennstabbündels beim Kühlmittelverluststörfall"
KfK 2657
- /3/ E. Karb
"Ergebnisse von in-pile-Experimenten im FR2 zum Brennstabverhalten bei Kühlmittelverluststörfällen".
KfK 2570, Dezember 1977
- /4/ K. Wiehr, F. Erbacher, U. Harten, W. Just, H.J. Neitzel, P. Schäffner, H. Schmidt
"Brennstabverhalten in der Wiederauffüll- und Flutphase eines Kühlmittelverluststörfalles",
Jahreskolloquium 1977 des Projektes Nukleare Sicherheit,
KfK 2570, Dezember 1977
- /5/ F. Erbacher, H.J. Neitzel, K. Wiehr
"Studies on Zircaloy Fuel Clad Ballooning in a LOCA. Results of Burst Tests with Indirectly Heated Fuel Rod Simulators",
ASTM Fourth International Conference on Zirconium in the Nuclear Industry, June 27-29, 1978, Stratford-on-Avon, England

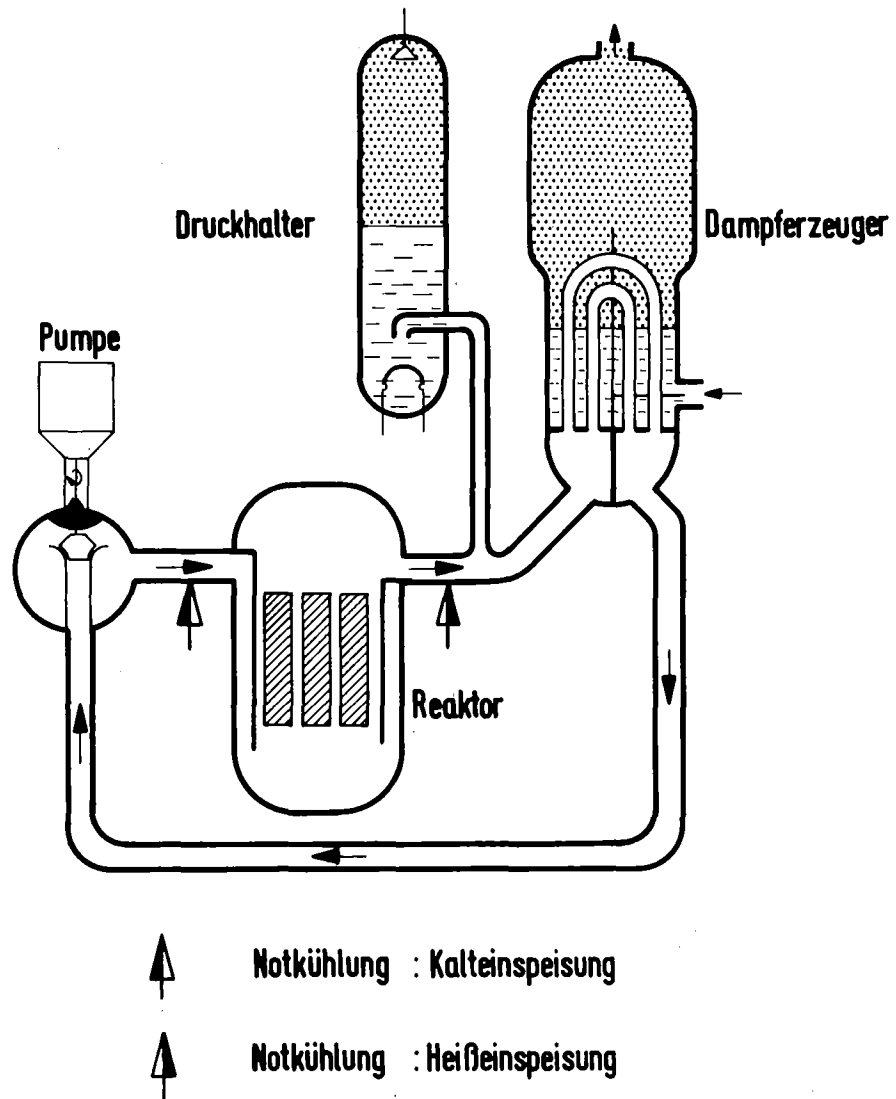


Abb. 1: Primärkreislauf des Druckwasserreaktors

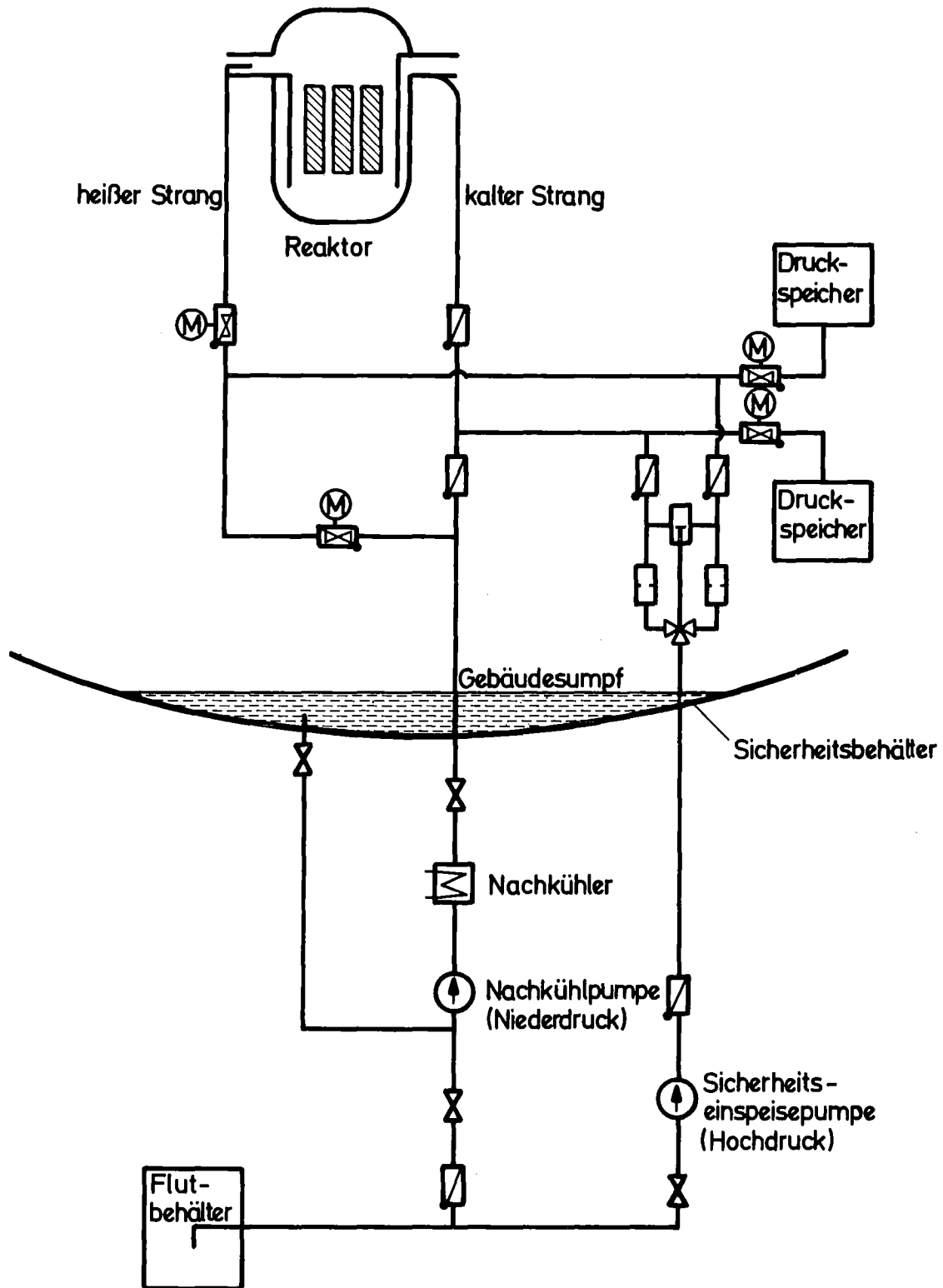
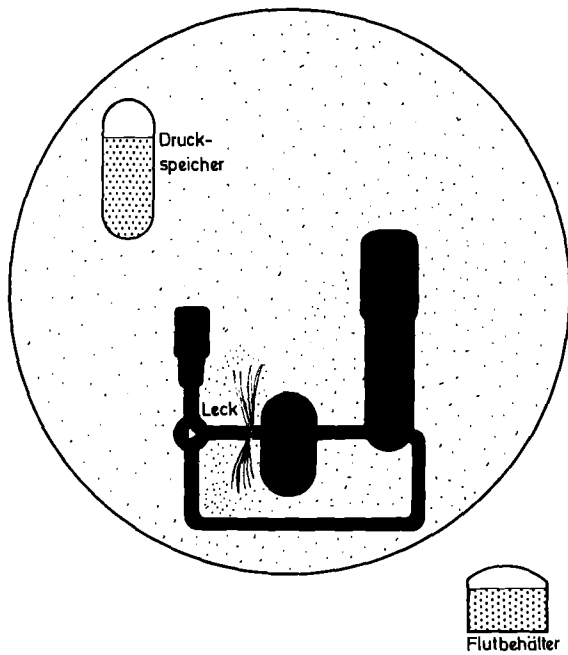
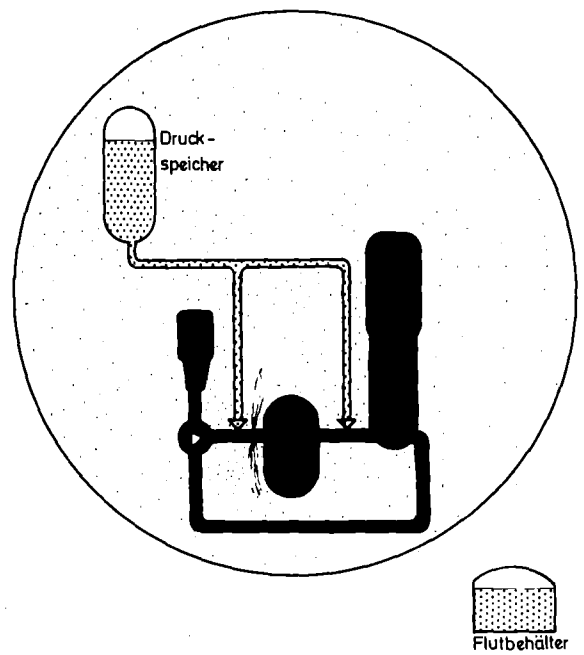


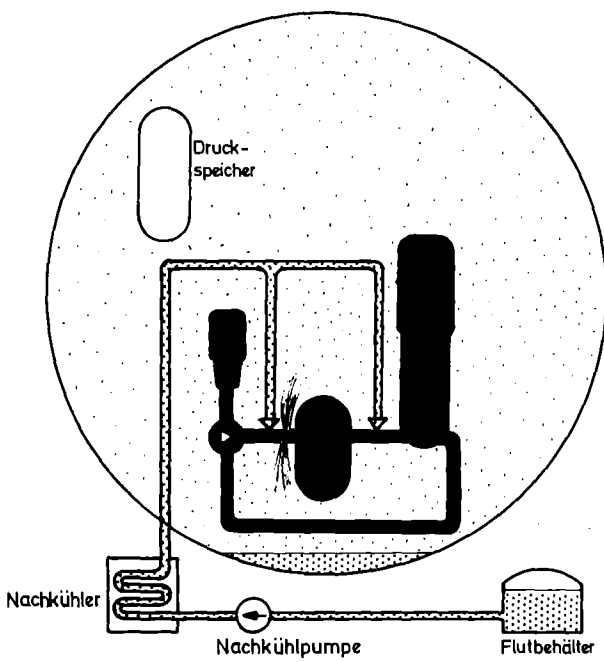
Abb. 2: Notkühlsystem des KWU-Standard-Kernkraftwerks (1 von 4 gleichartigen Systemen)



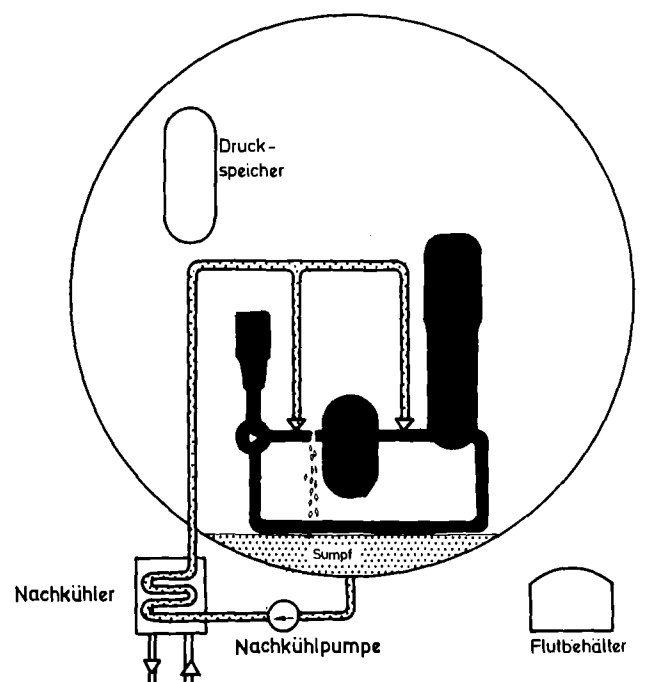
1. Stufe Entspannung:



2. Stufe: Druckspeicher-Einspeisung



3. Stufe: Fluten durch Pumpen



4. Stufe: Sumpfkreislauf -Betrieb

Abb. 3: Funktionsweise des Kernotkühlsystems (2F-Bruch im kalten Strang)

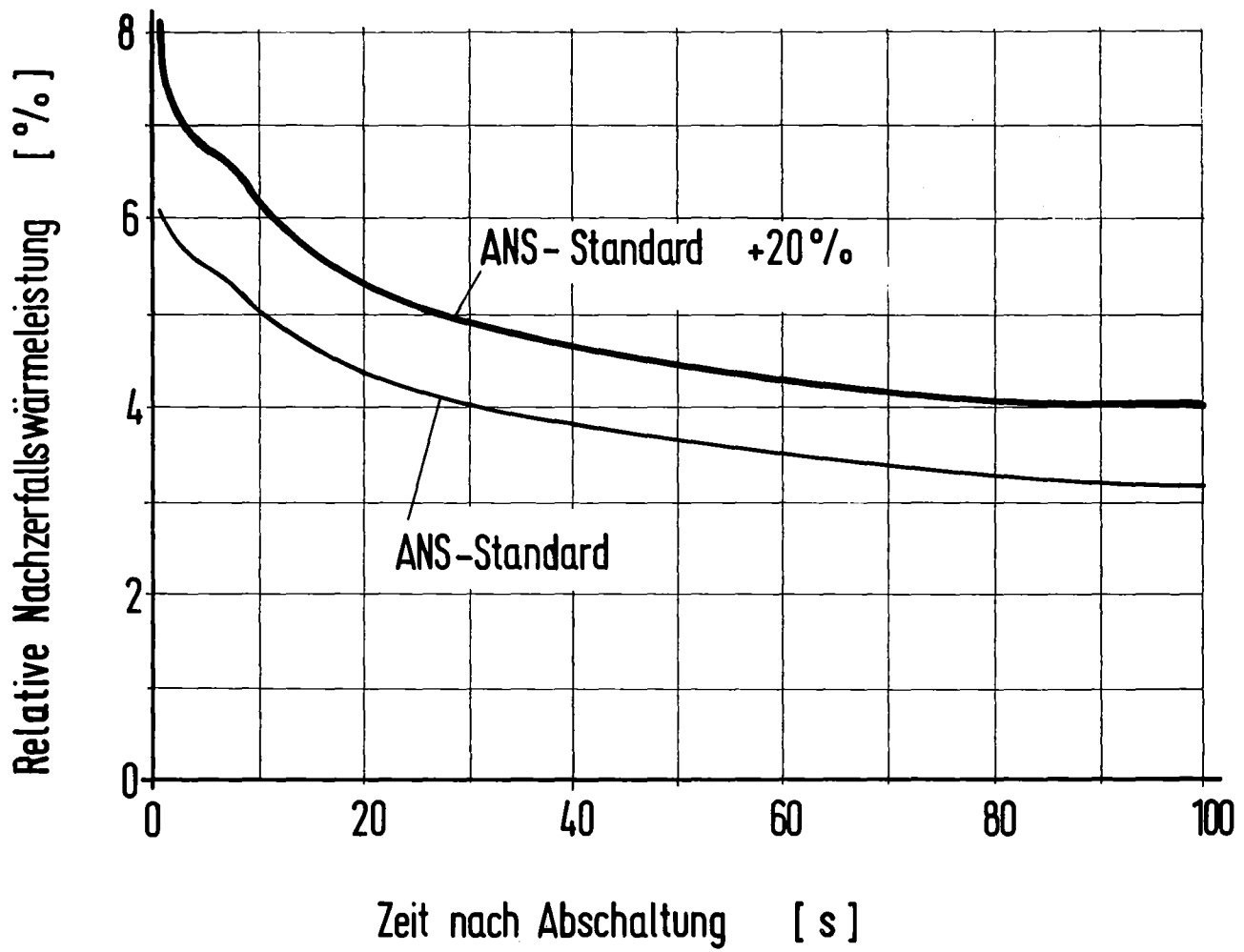


Abb. 4: Nachzerfallswärmeleistung

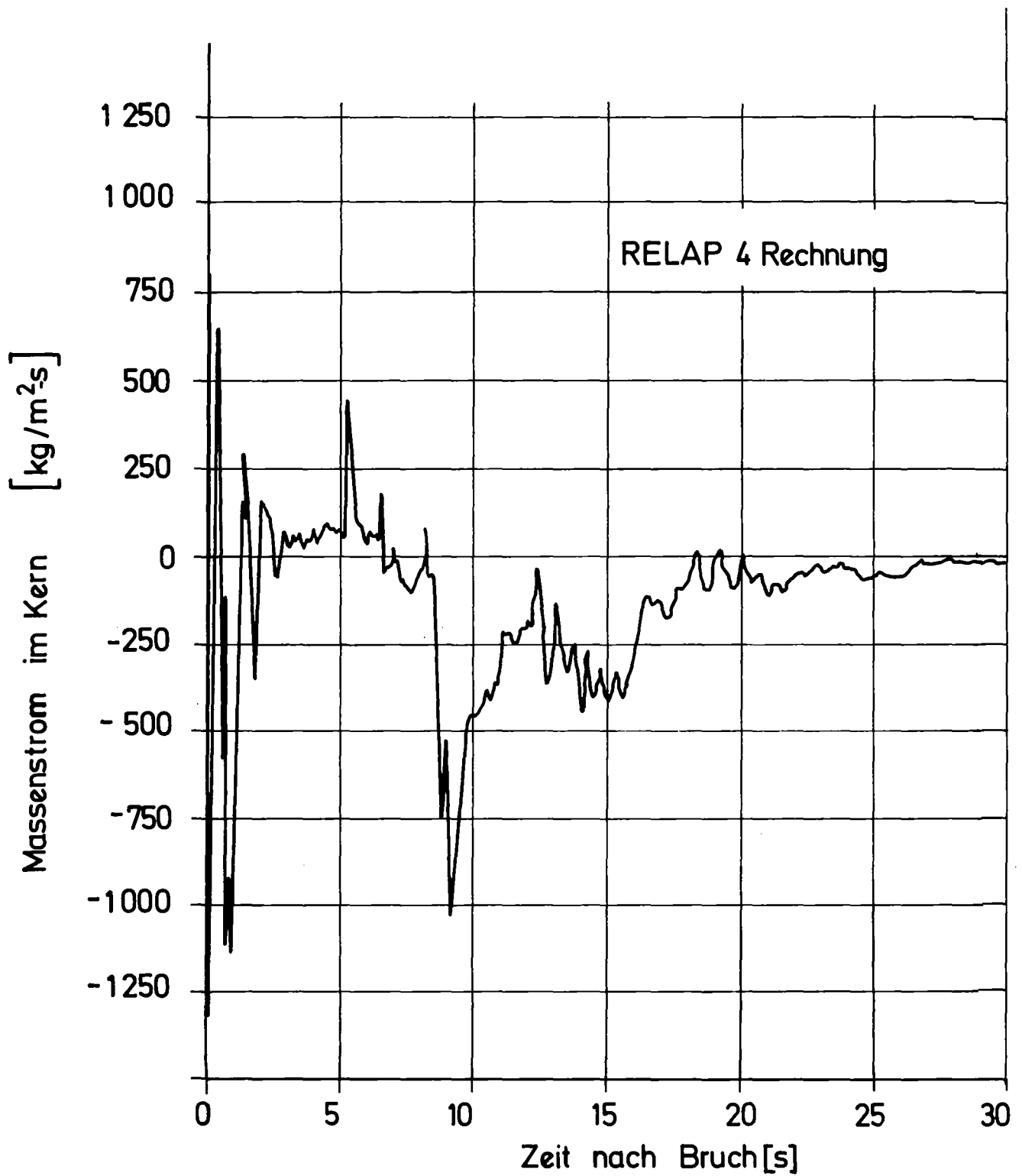


Abb. 5: Kerndurchsatz während der Druckentlastungsphase

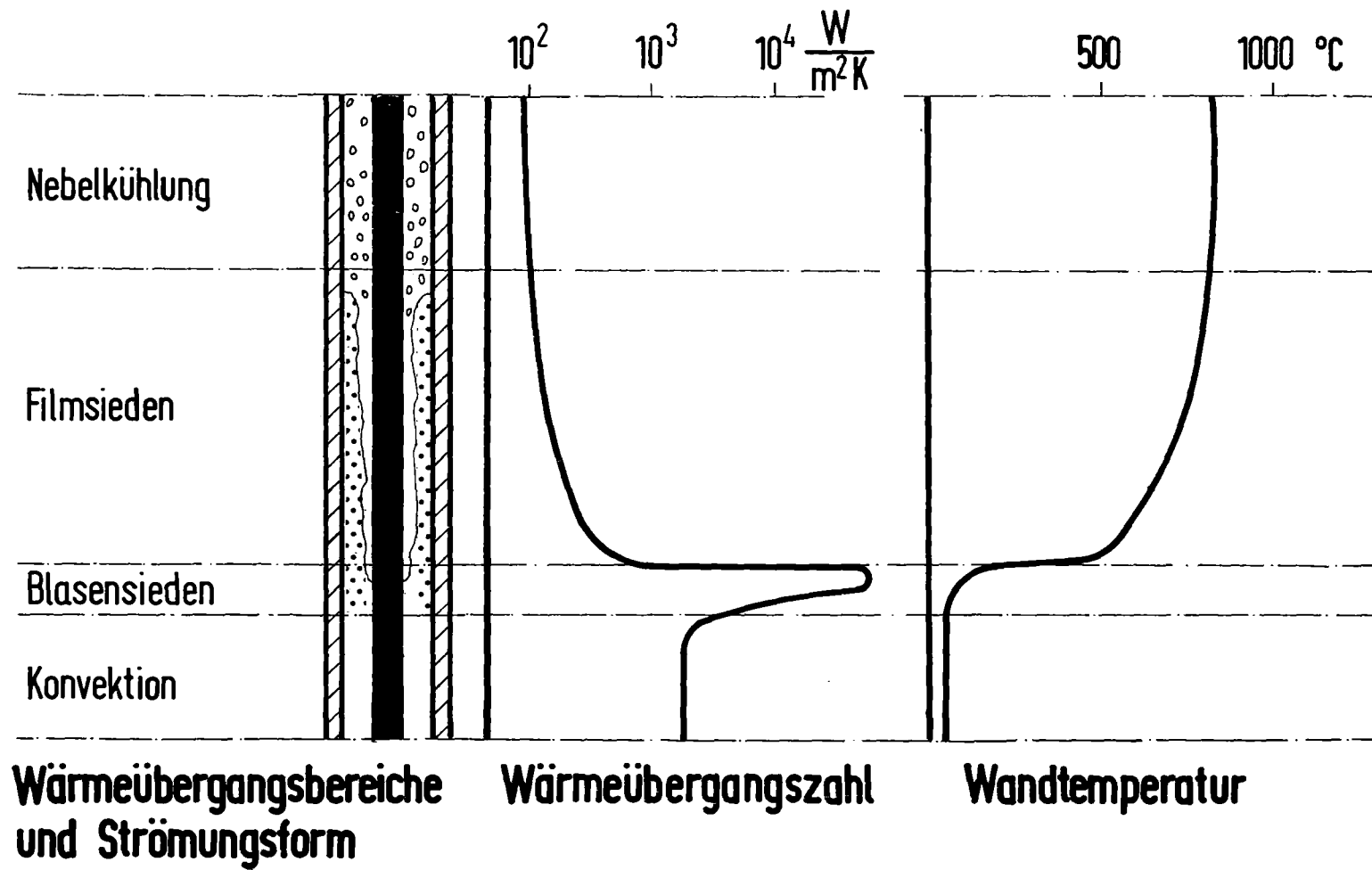


Abb. 6: Wärmeübergang beim Fluten

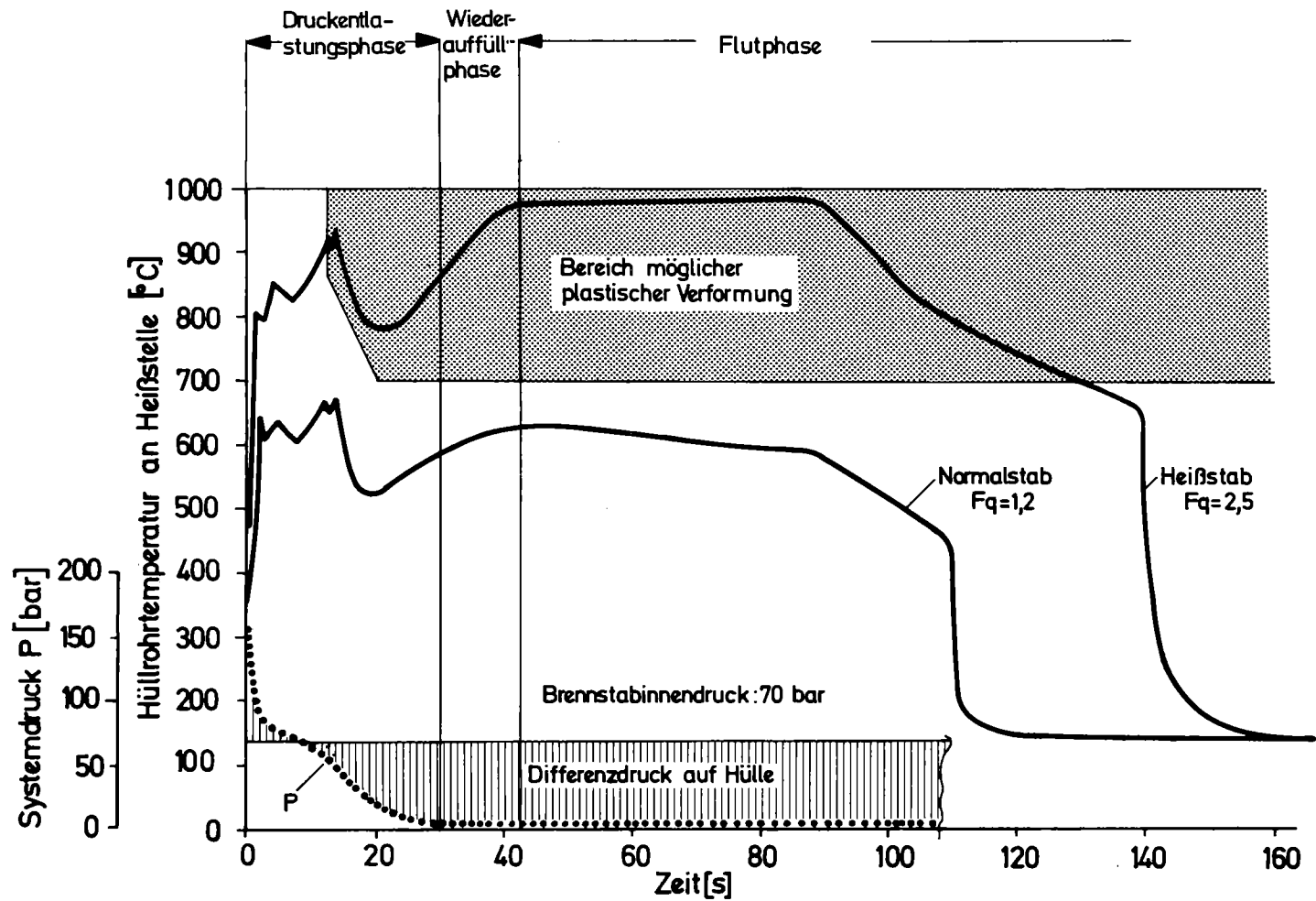


Abb. 7: Brennstabelastung beim Kühlmittelverluststörfall (2F-Bruch im kalten Strang)

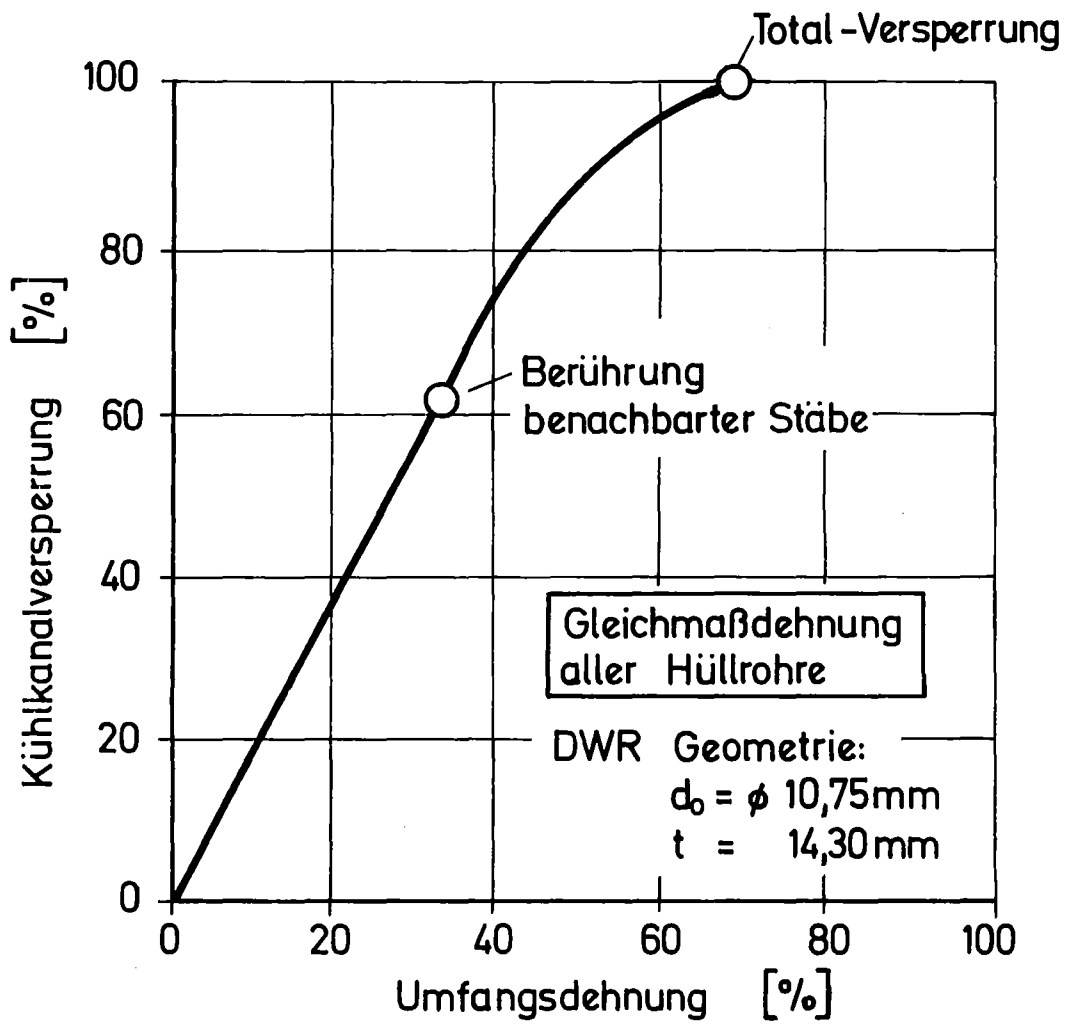
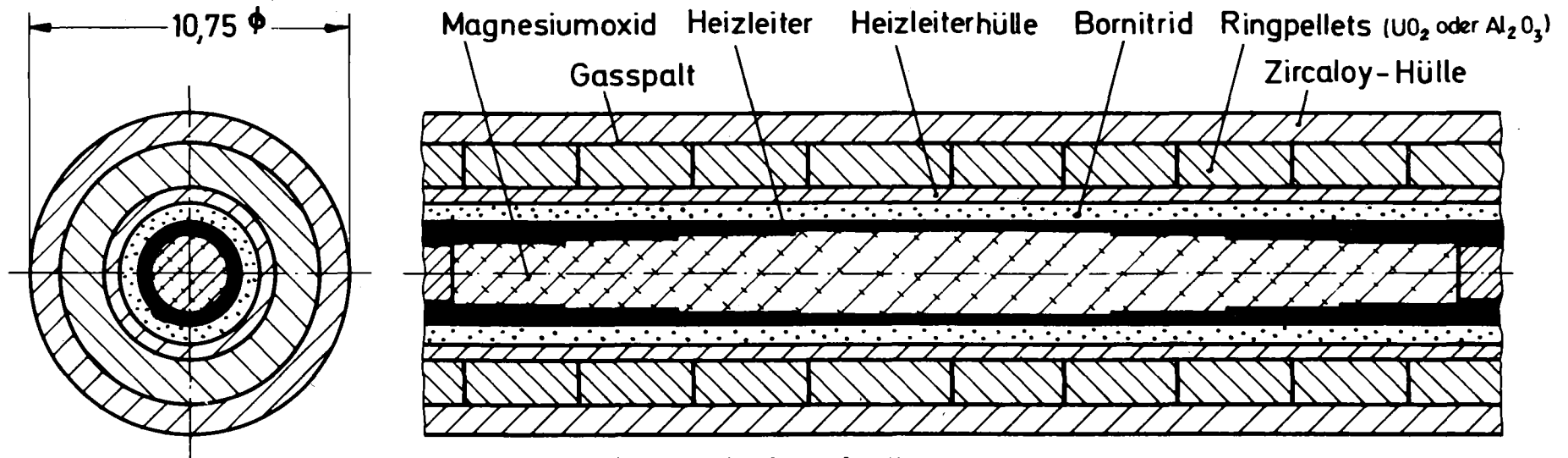
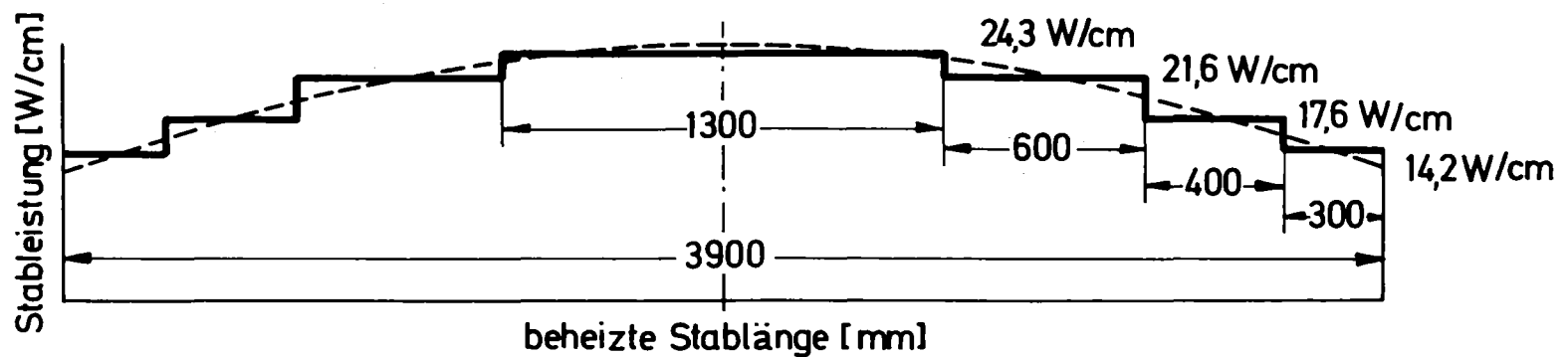


Abb. 8: Kühlkanalversperrung als Funktion der Hüllrohrdehnung



Schematischer Aufbau



axiale Leistungsverteilung

Abb. 9: Brennstabsimulator

Versuchsatmosphäre:
Luft, Dampf

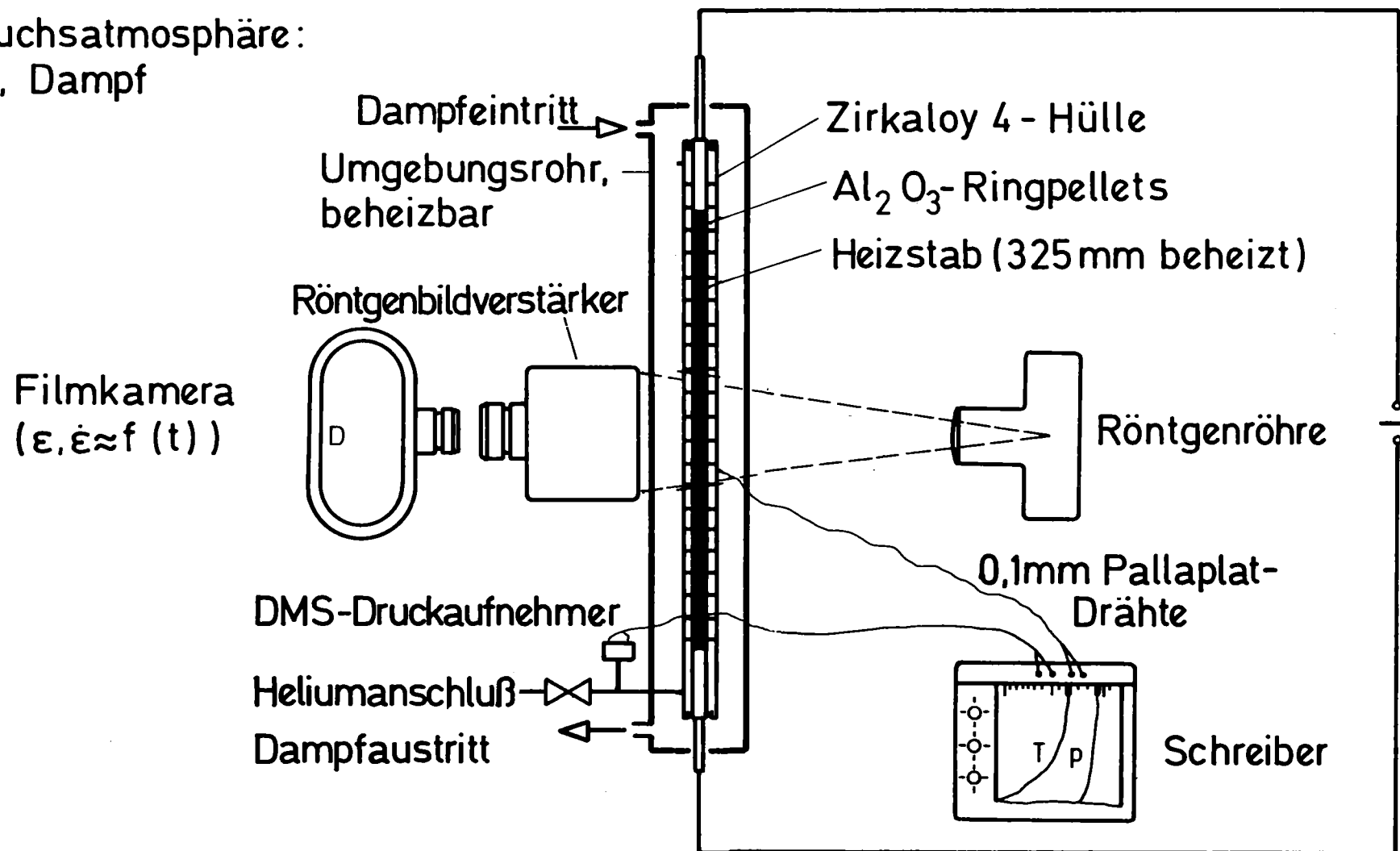
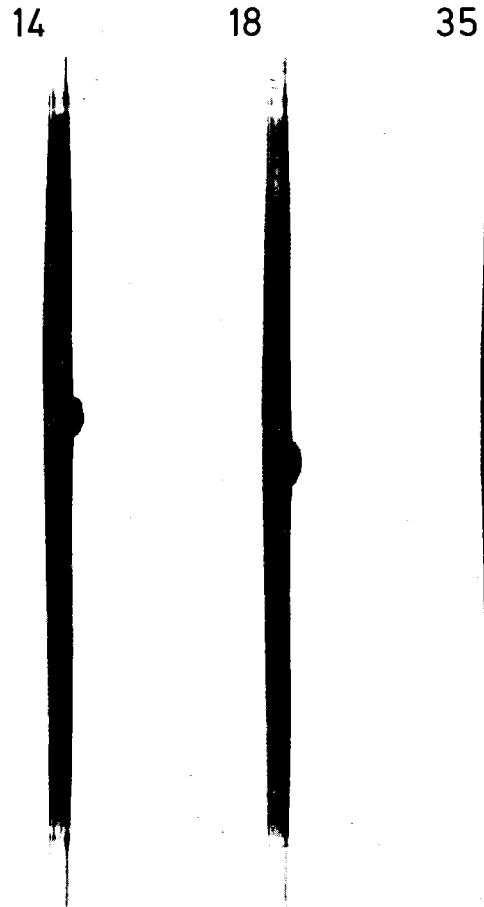
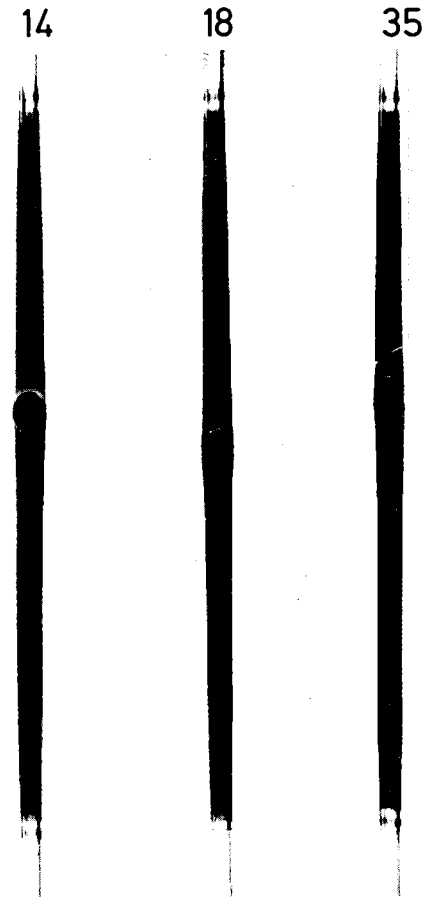


Abb. 10: Prüfstand für Einzelstabversuche an verkürzten Brennstabsimulatoren

Seitenansicht



Draufsicht



Hüllrohr Nr.	Berst-Daten		
	p [bar]	T [°C]	ϵ [%]
14	98	811	38
18	98	823	33
35	95	794	27

beheizte Länge:	325 mm
axial konstante Stableistung:	50W/cm
Stabinnendruck:	100 bar
Atmosphäre :	Luft

Abb. 11: Deformationsform geborstener Zirkaloyhüllrohre

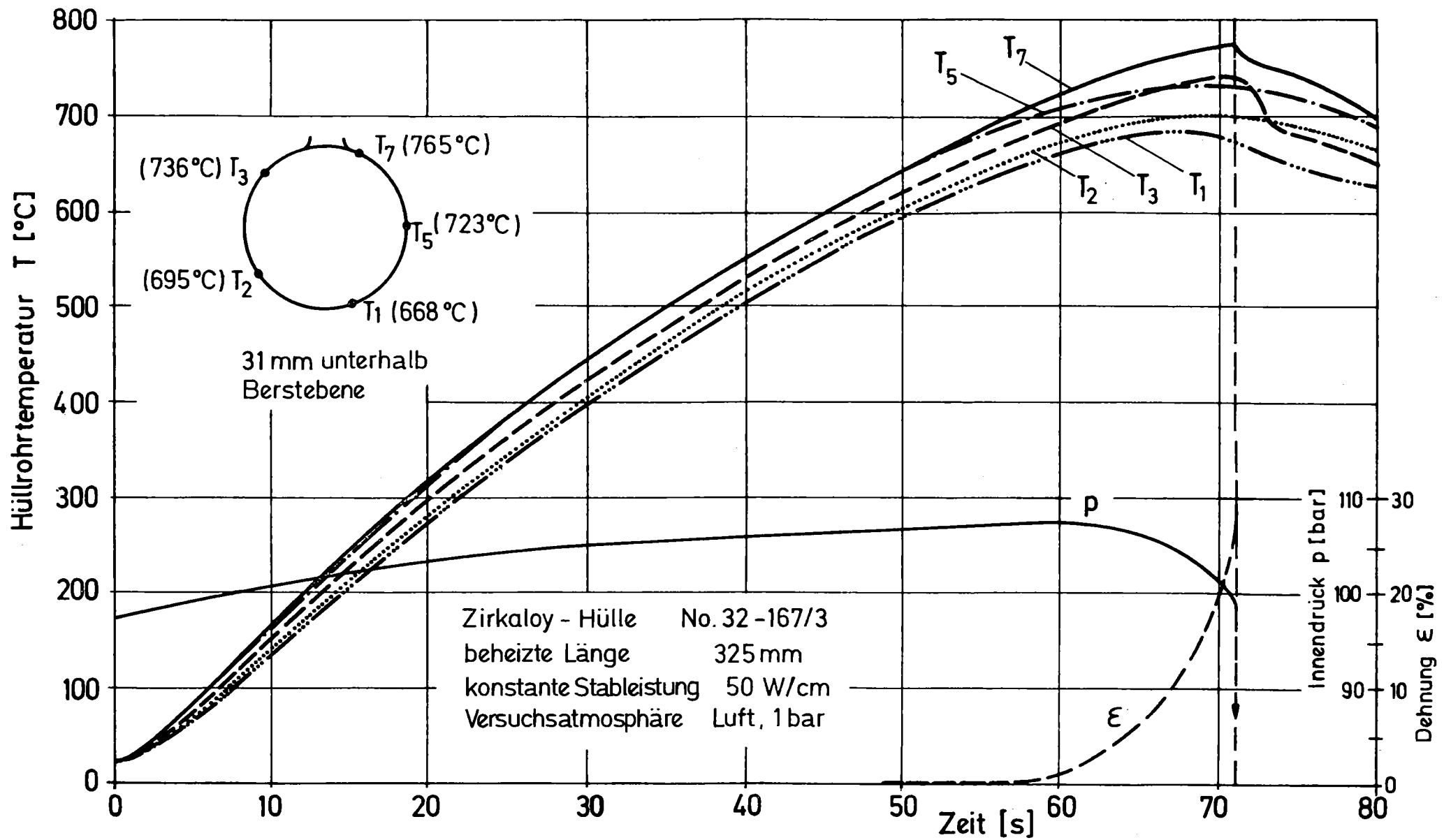
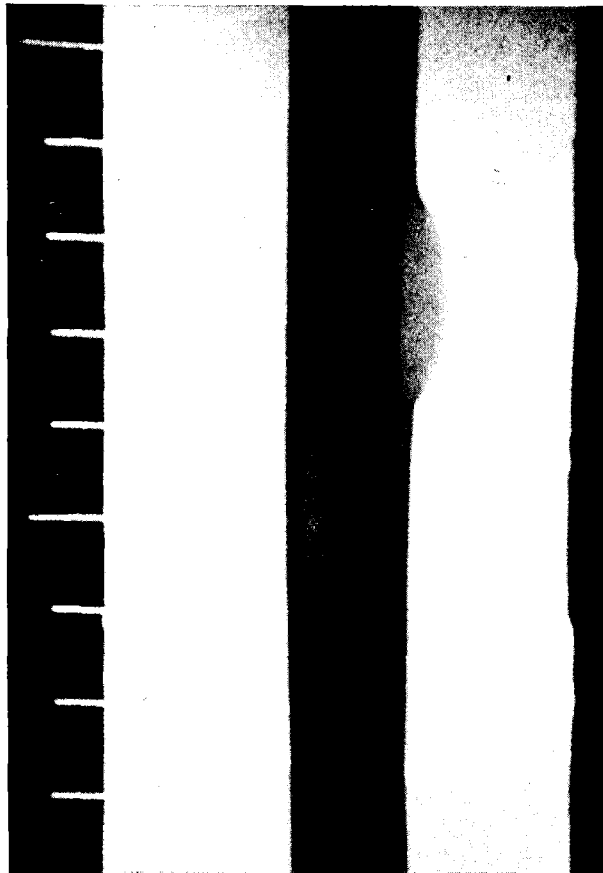
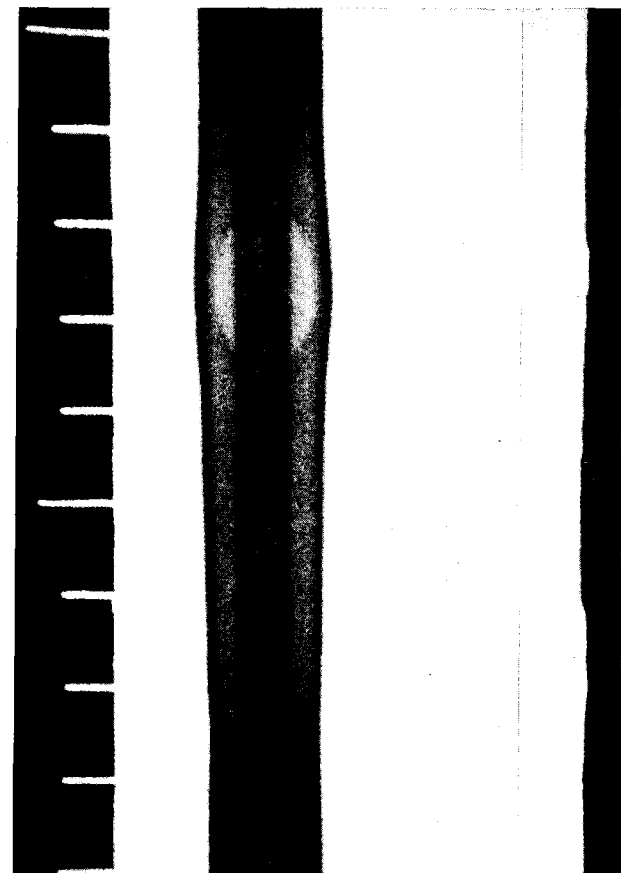


Abb. 12: Azimutale Temperaturverteilung beim Aufblähvorgang



Seitenansicht



Draufsicht

Abb. 13: Röntgenbild eines Brennstabsimulators mit geborstener Hülle

Versuch Nr. 60
 $\Delta T_{az} = 64^\circ\text{C}, \epsilon_B = 39\%$

Versuch Nr. 61
 $\Delta T_{az} = 18^\circ\text{C}, \epsilon_B = 67\%$

Versuch Nr. 63
 $\Delta T_{az} = 3^\circ\text{C}, \epsilon_B = 83\%$

10mm oberhalb Berststelle an Berststelle

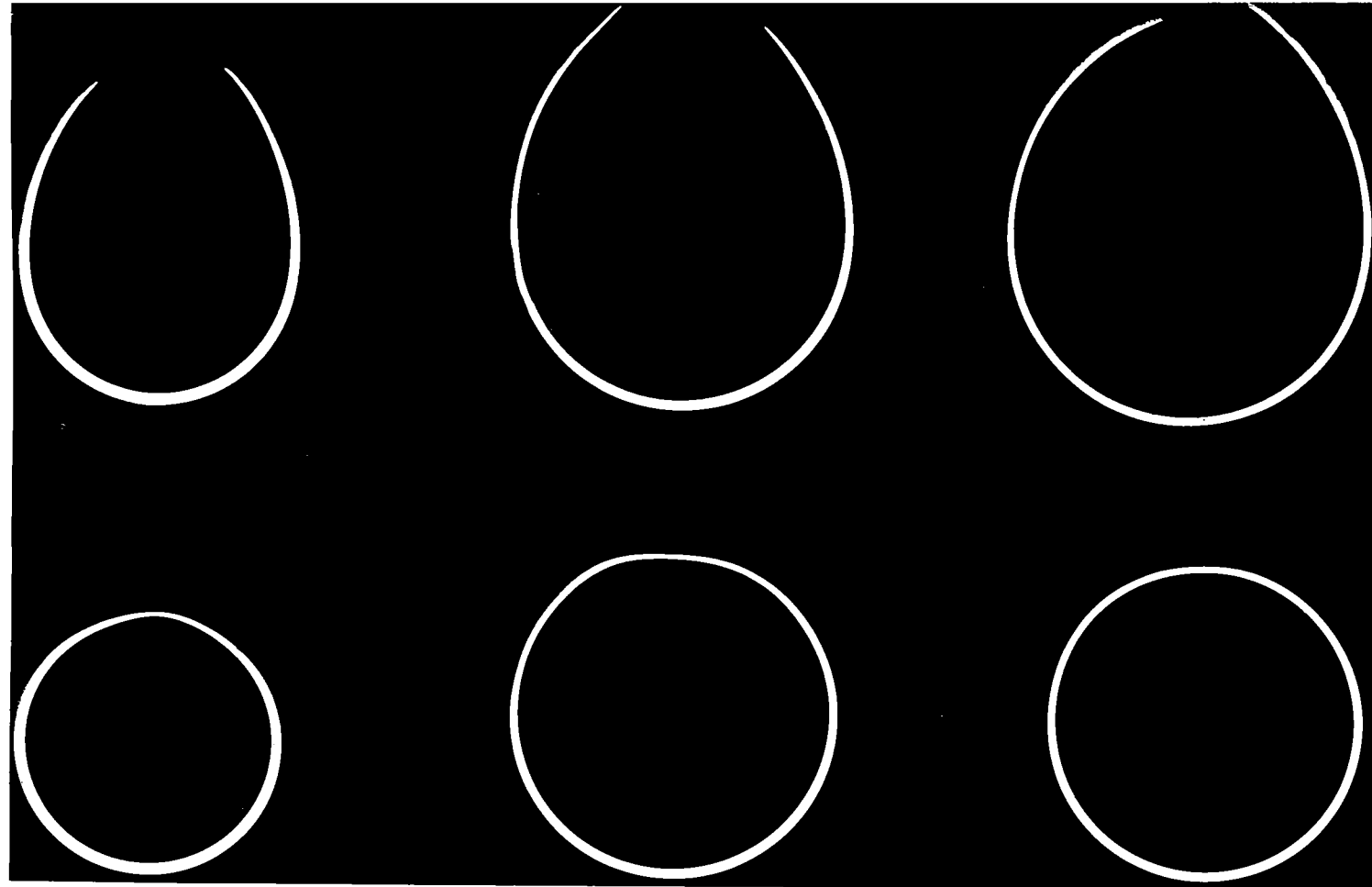
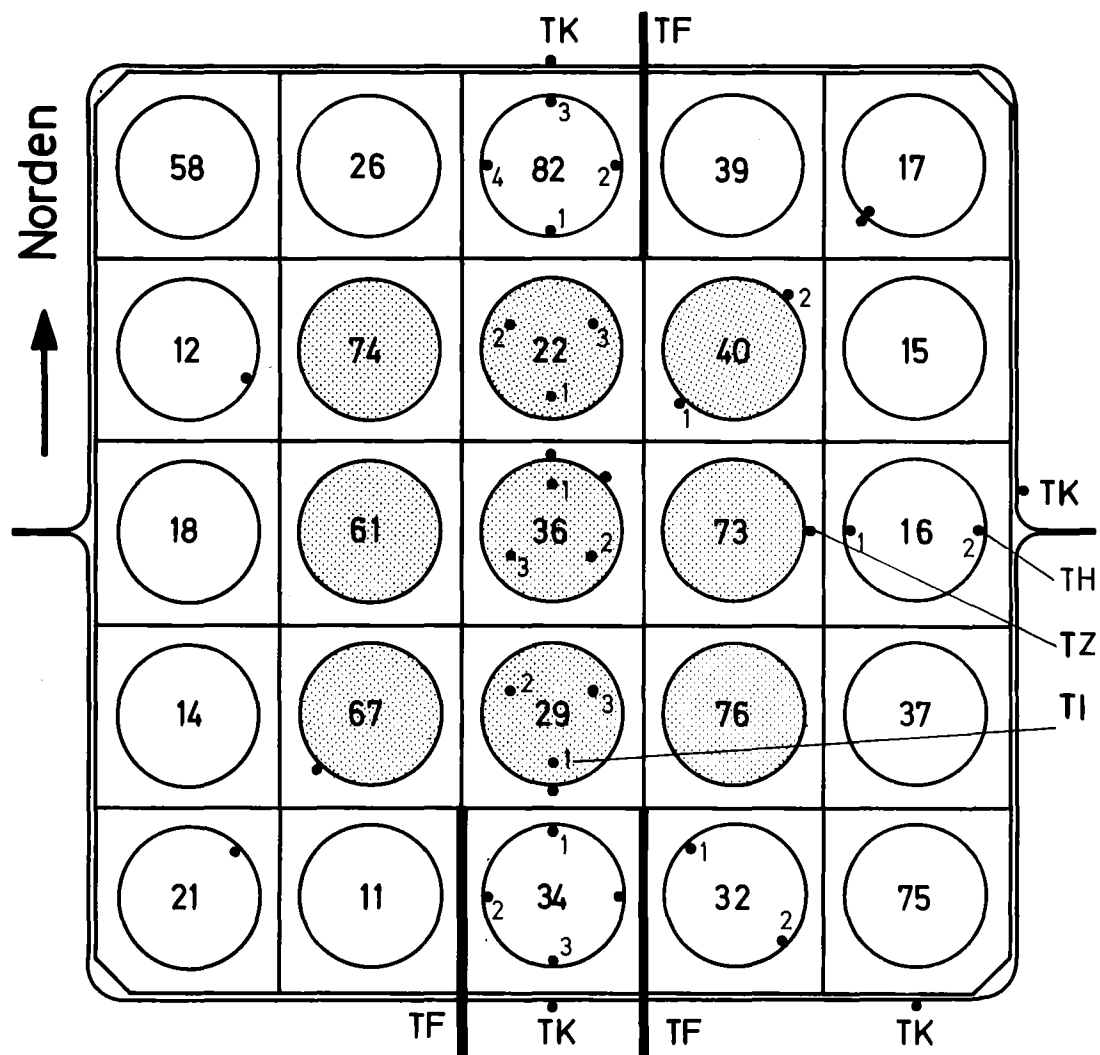


Abb. 14: Schlifffbilder geborstener Zirkaloyhüllrohre,
Einfluß der azimuthalen Temperaturdifferenz auf die Berstumfangsdehnung

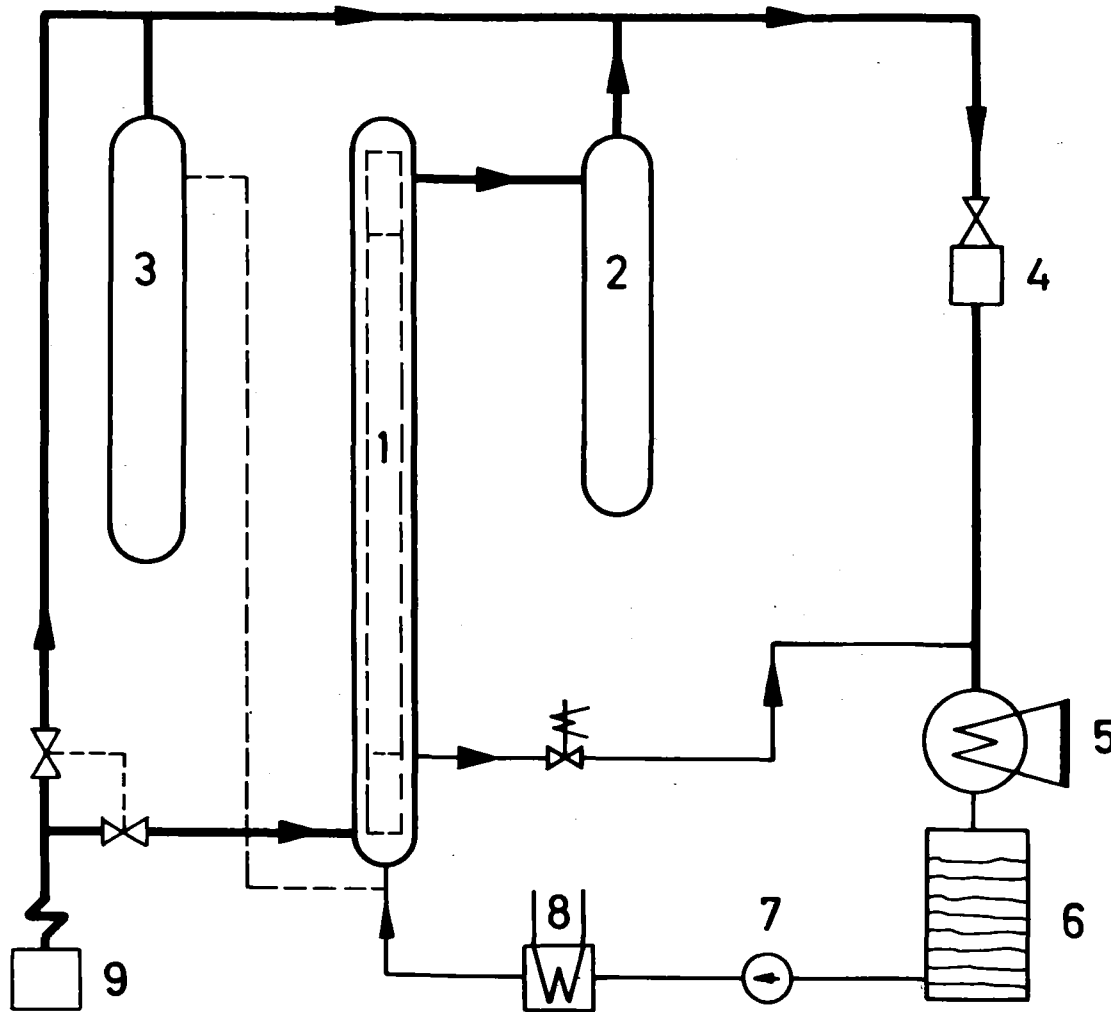


Abb. 15: Stabbündel vor Einbau in Kasten



- TH auf Außenstäben, TE in Simulatorhülle eingelötet
- TZ auf Innenstäben, TE auf Zirkaloyhülle angepunktet
- TI auf Innenstäben, TE in Heizstabhülle eingelötet
- TK Kastenthermoelemente
- TF Fluidthermoelemente

Abb. 16: Anordnung der Brennstabsimulatoren und Thermoelemente im Stabbündel



- 1 Teststrecke
- 2 Abscheidebehälter
- 3 Containmentsimulator
- 4 Dampfumformer
- 5 Kondensator
- 6 Wasserbehälter
- 7 Einspeisepumpe
- 8 Vorwärmer bzw. Kühler
- 9 Dampferzeuger

Abb. 17: Versuchskreislauf für Bündelversuche an Brennstabsimulatoren voller Länge

- Stabinnendruck 70 bar
- Nachwärmeleistung 20 W/cm
- Wärmeübergangszahl in Wiederauffüllphase $\sim 30 \text{ W/m}^2 \text{ K}$
- Hüllrohrtemperatur bei Flutbeginn 760 - 790 °C
- Flutrate, kalt $\sim 3 \text{ cm/s}$
- Flutwassertemperatur 130 °C
- Systemdruck 4 bar

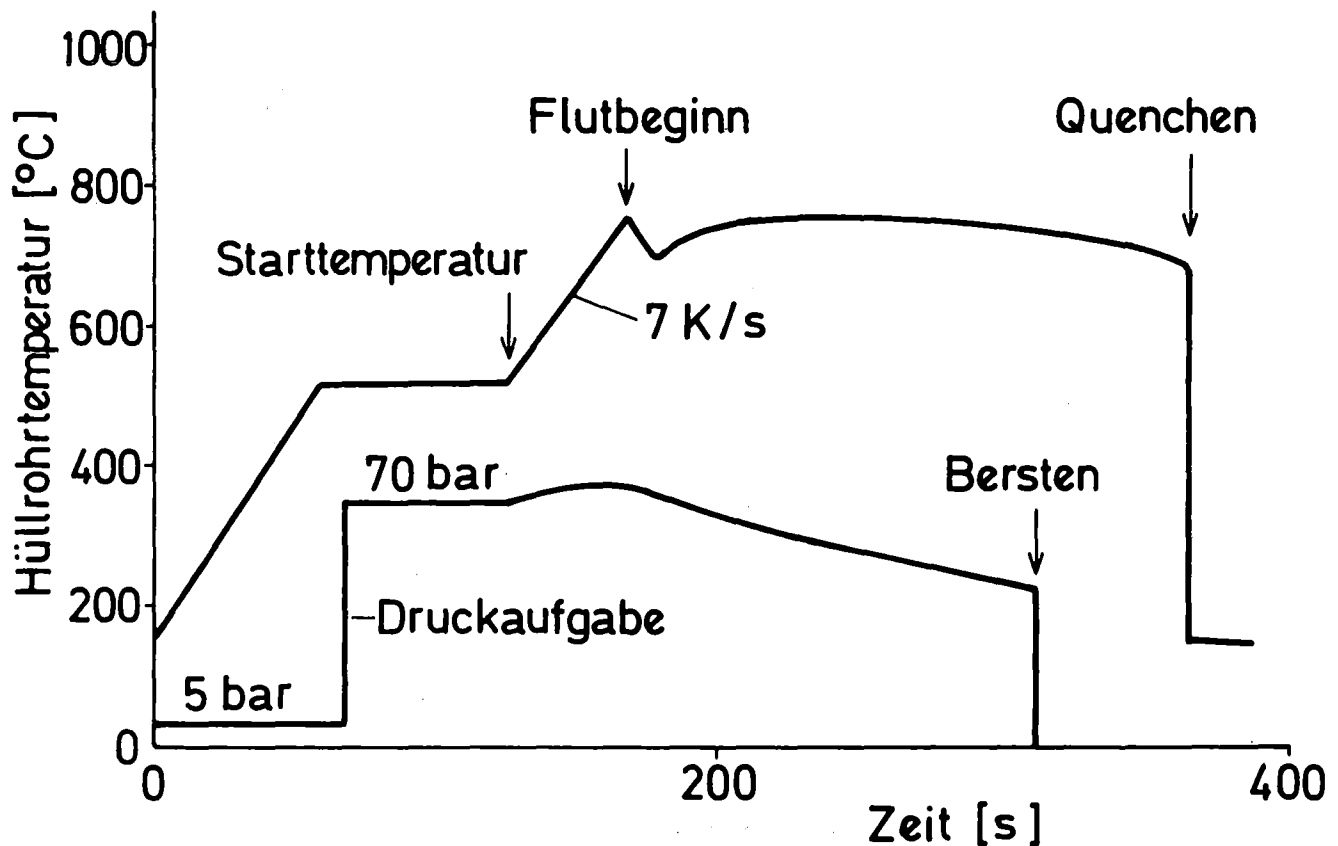


Abb. 18: Versuchsführung des ersten Bündelversuchs

Position der
Thermoelemente

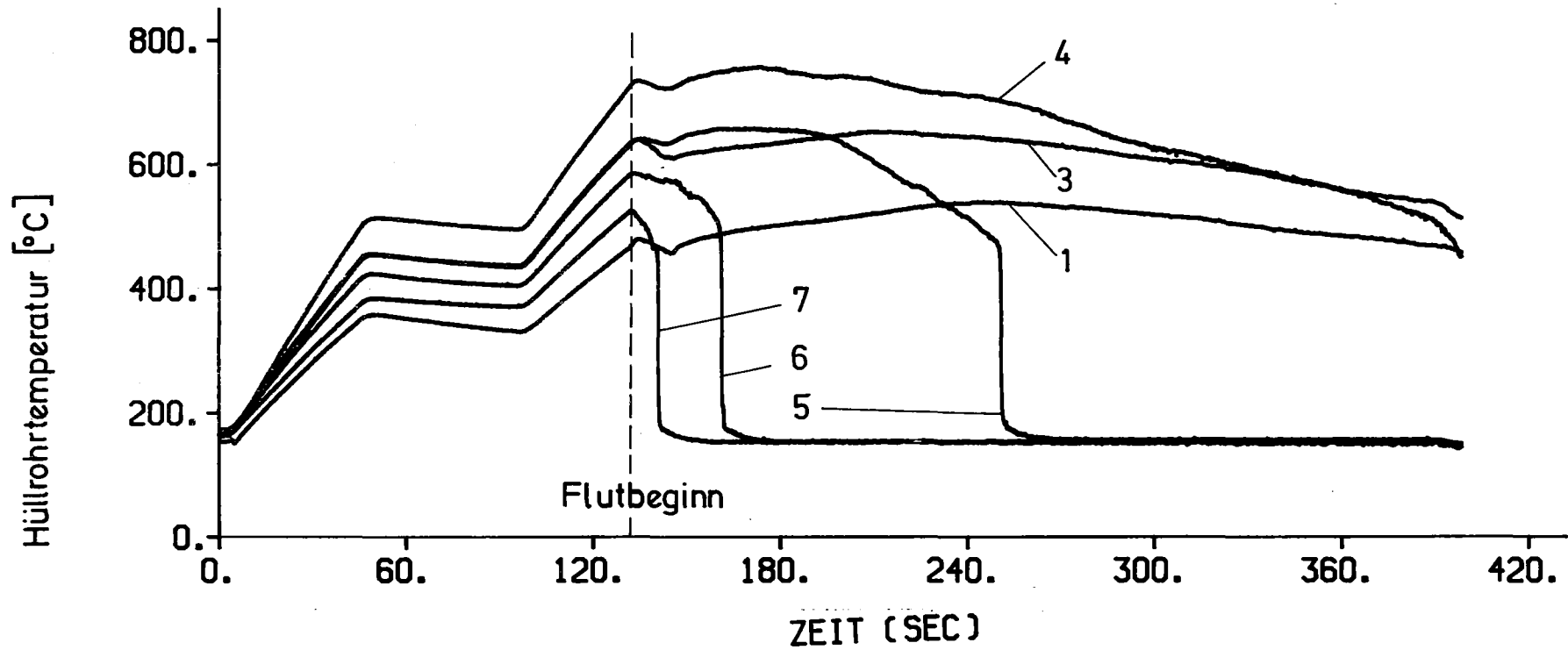
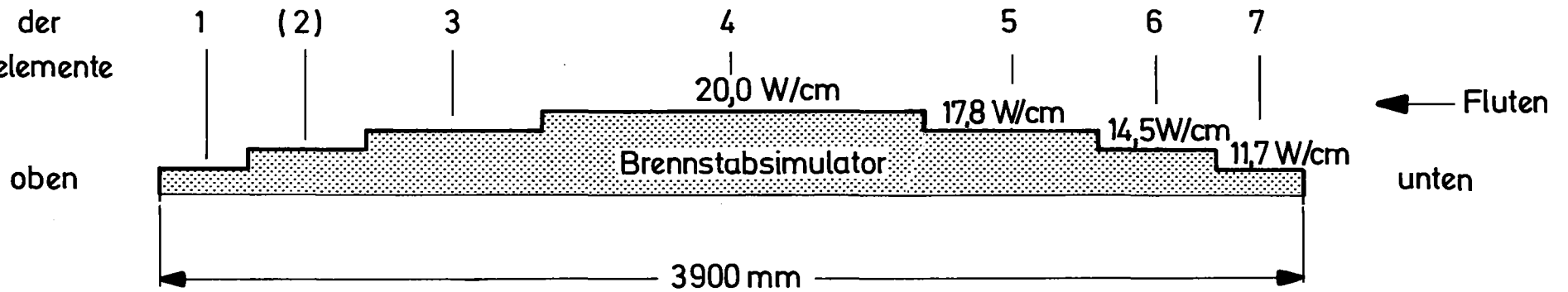


Abb. 19: Verlauf der axialen Hüllrohrtemperaturen am Stab 17

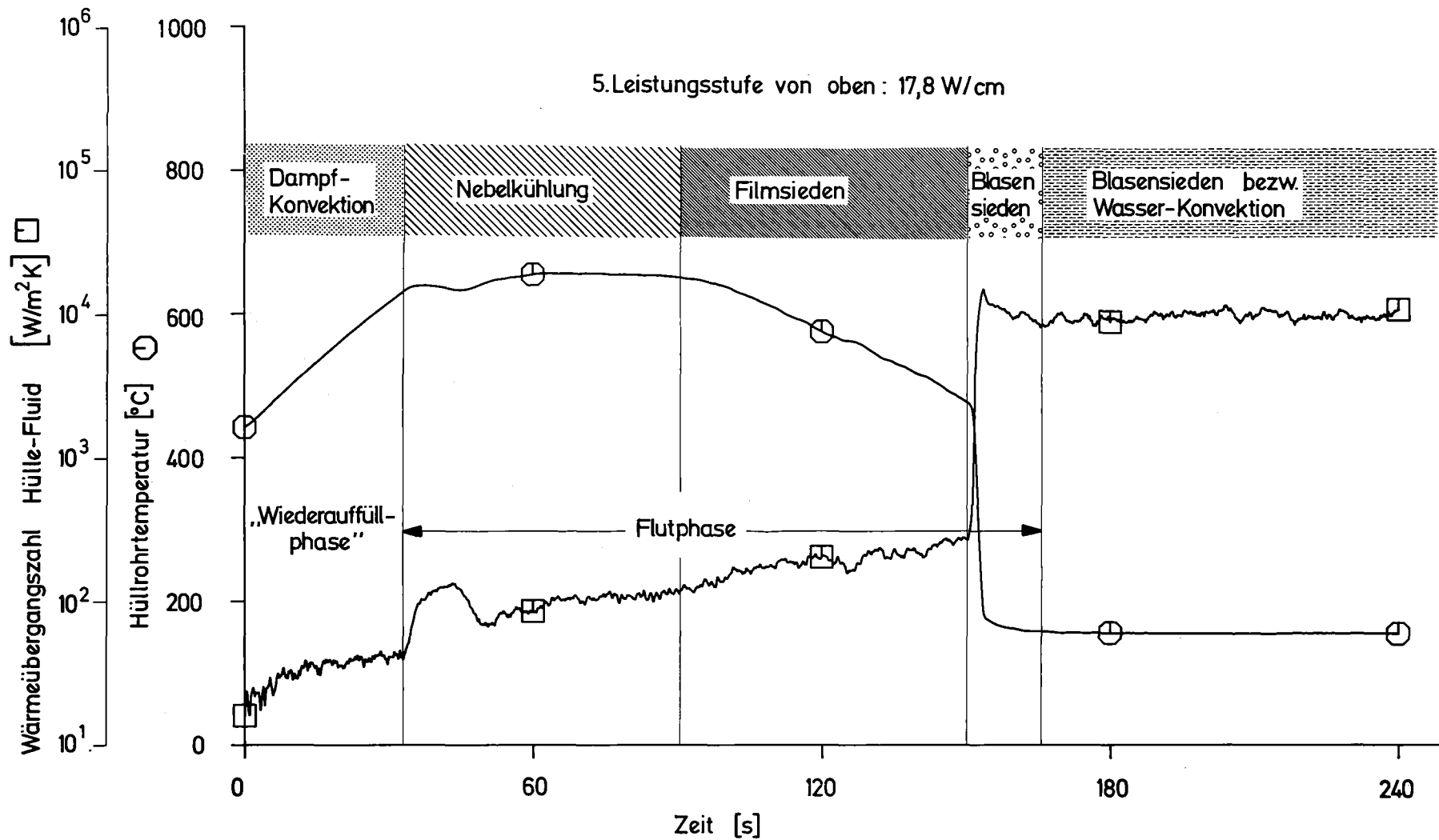


Abb. 20: Wärmeübergang Hülle - Fluid am Stab 17

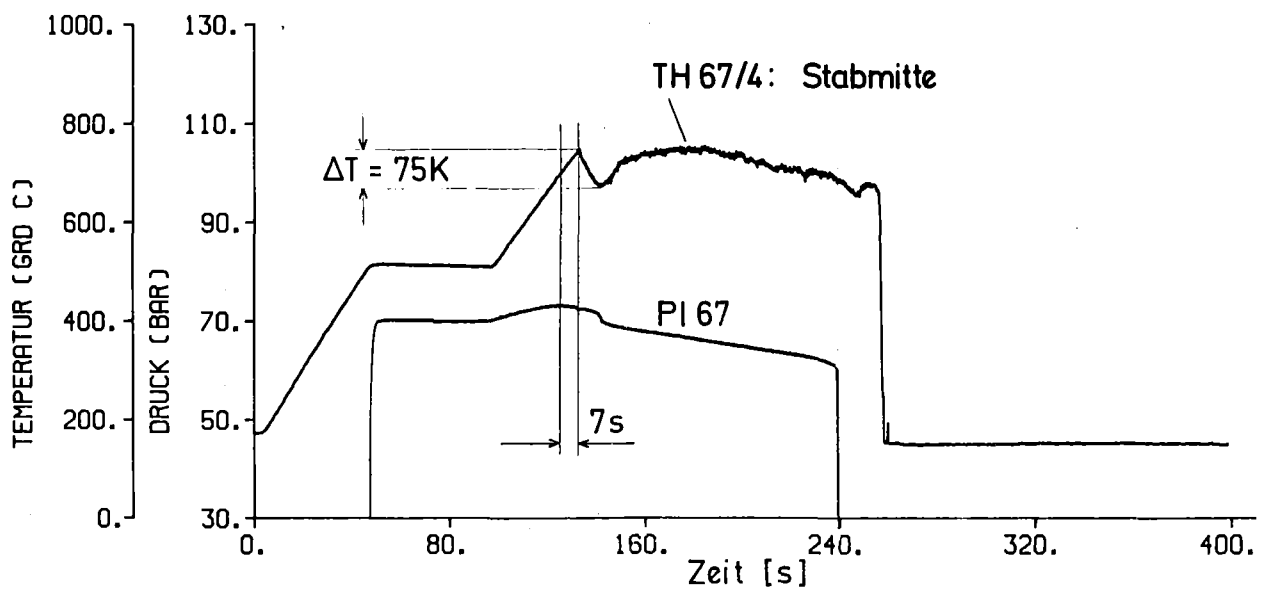
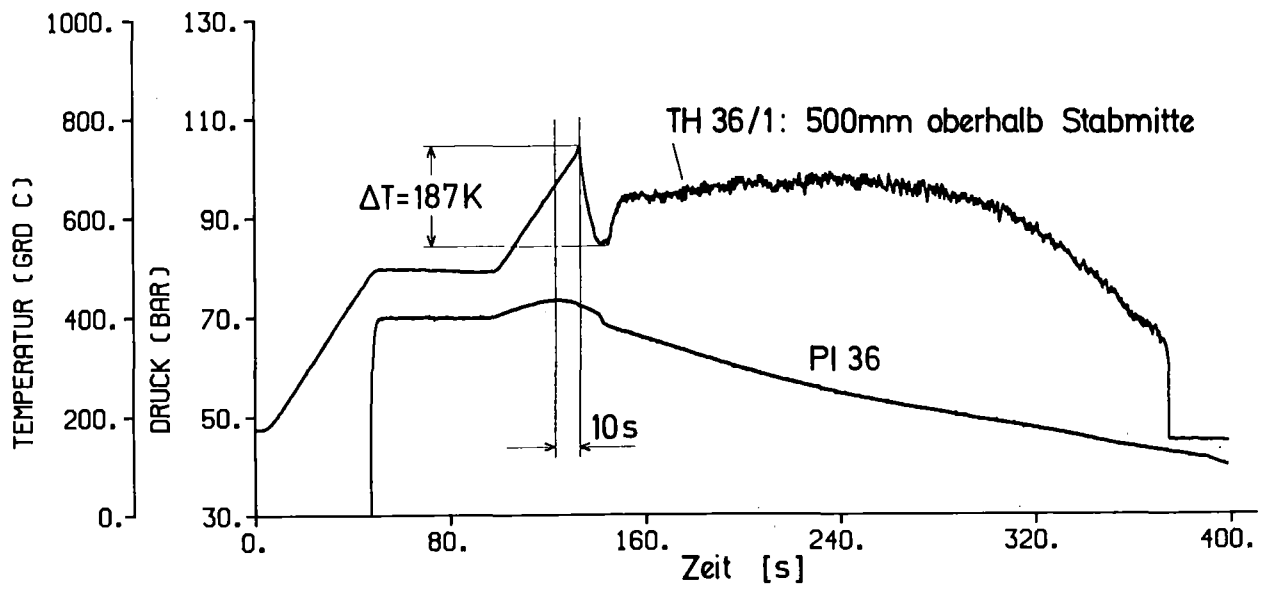


Abb. 21: Hüllrohrtemperatur und Innendruck der Stäbe 36 und 67,
 Einfluß des Spaltes auf die Hüllrohrtemperatur

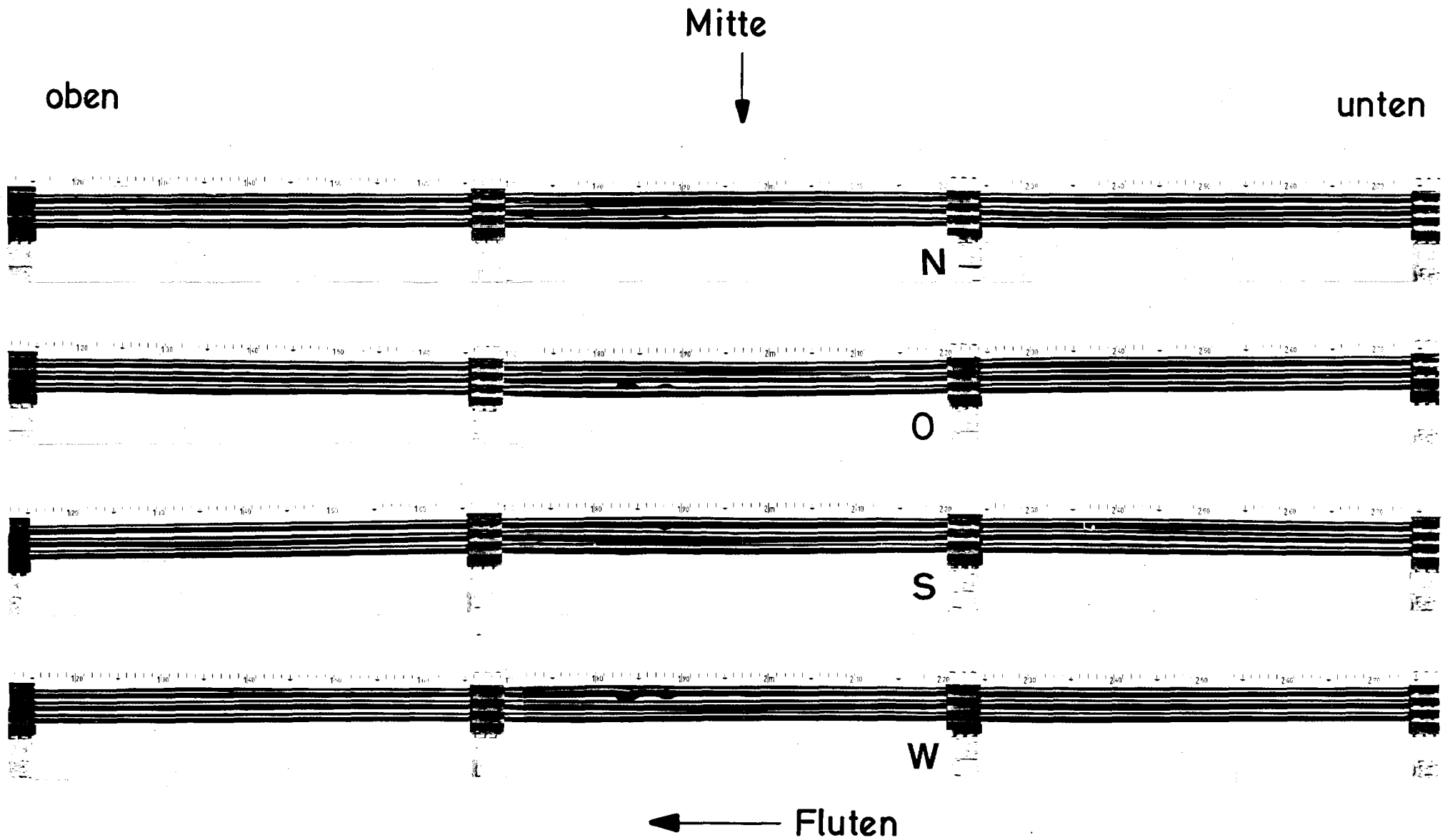


Abb. 22: Verformtes Stabbündel nach Versuch, mittlere Abstandshalterbereiche nach Entfernung der Umgebungsstäbe

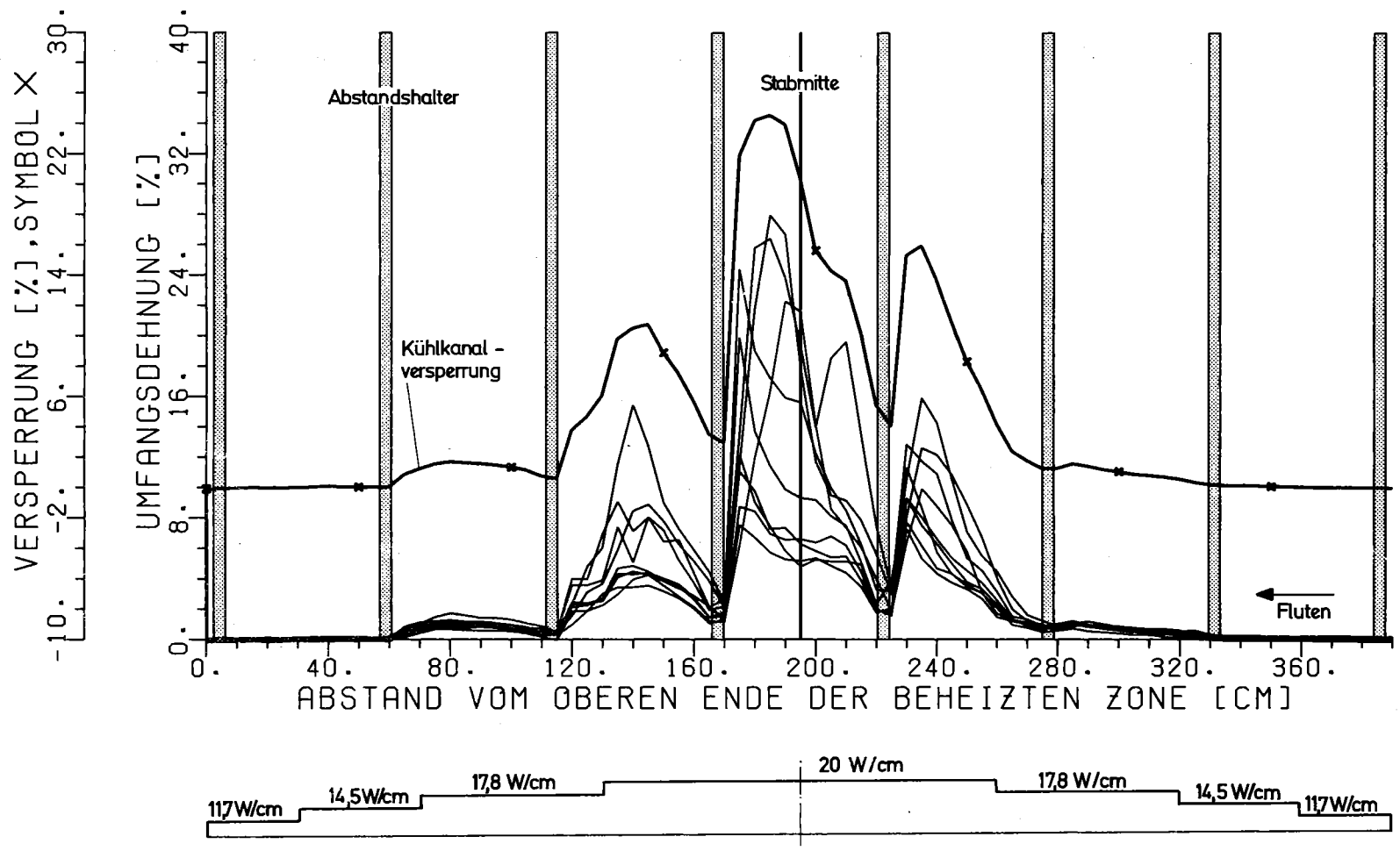


Abb. 23: Umfangsdehnung der Zirkaloyhüllrohre und Kühlkanalsperrung

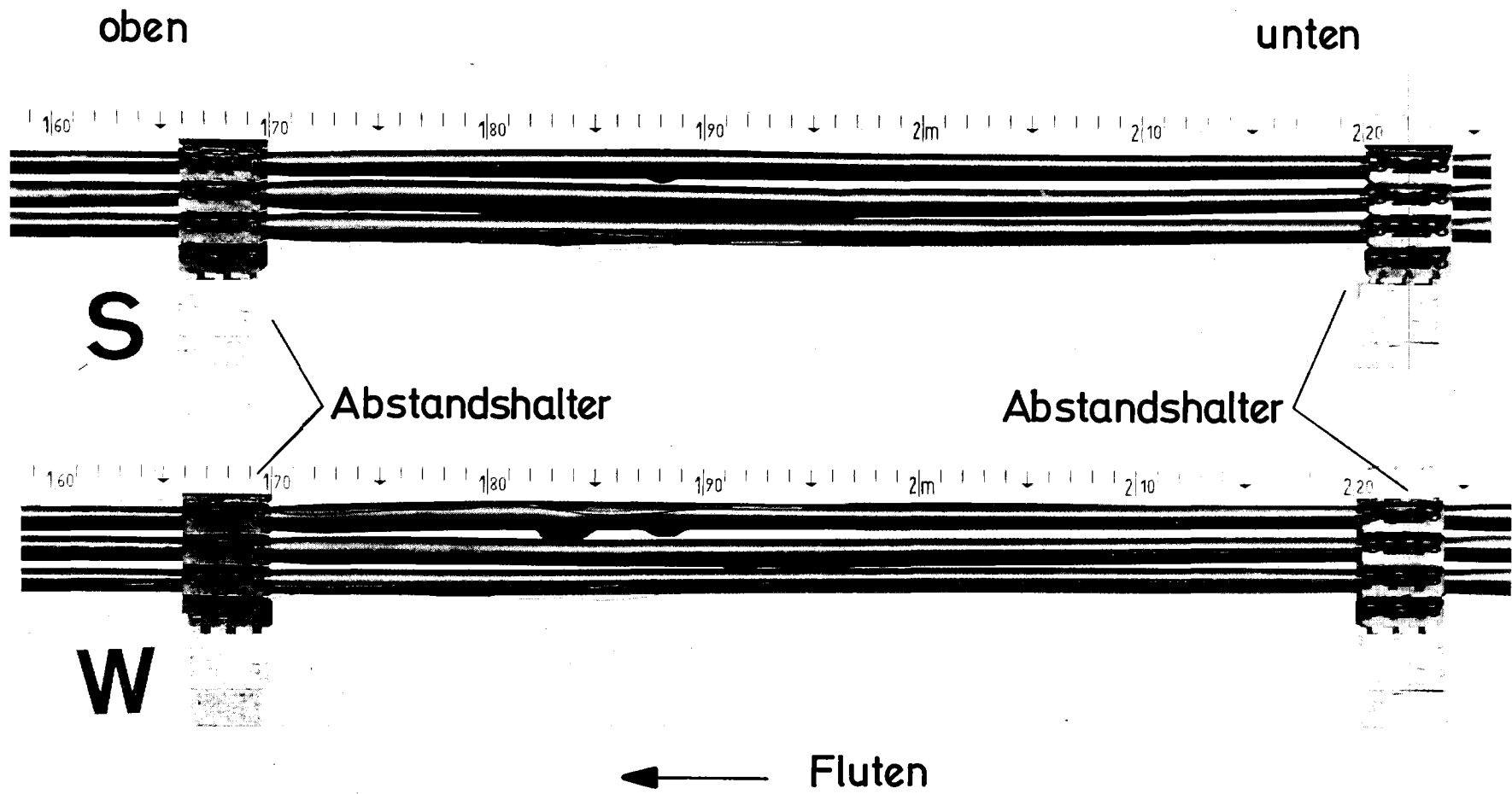


Abb. 24: Mittlerer Abstandshalterbereich des verformten Stabbündels, axiales Deformationsprofil

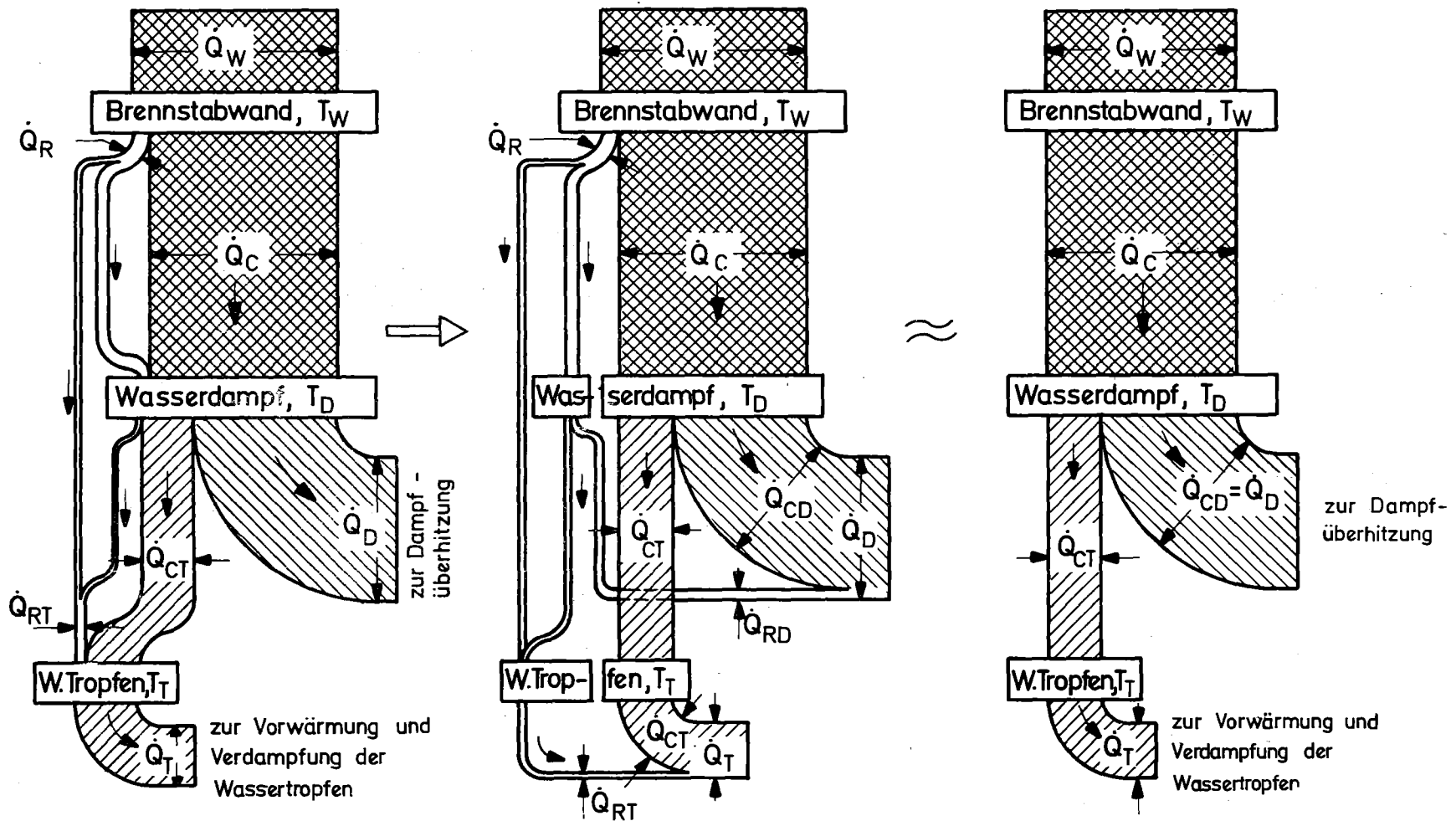


Abb. 25: Mechanismus des Wärmeübergangs Hülle - Fluid

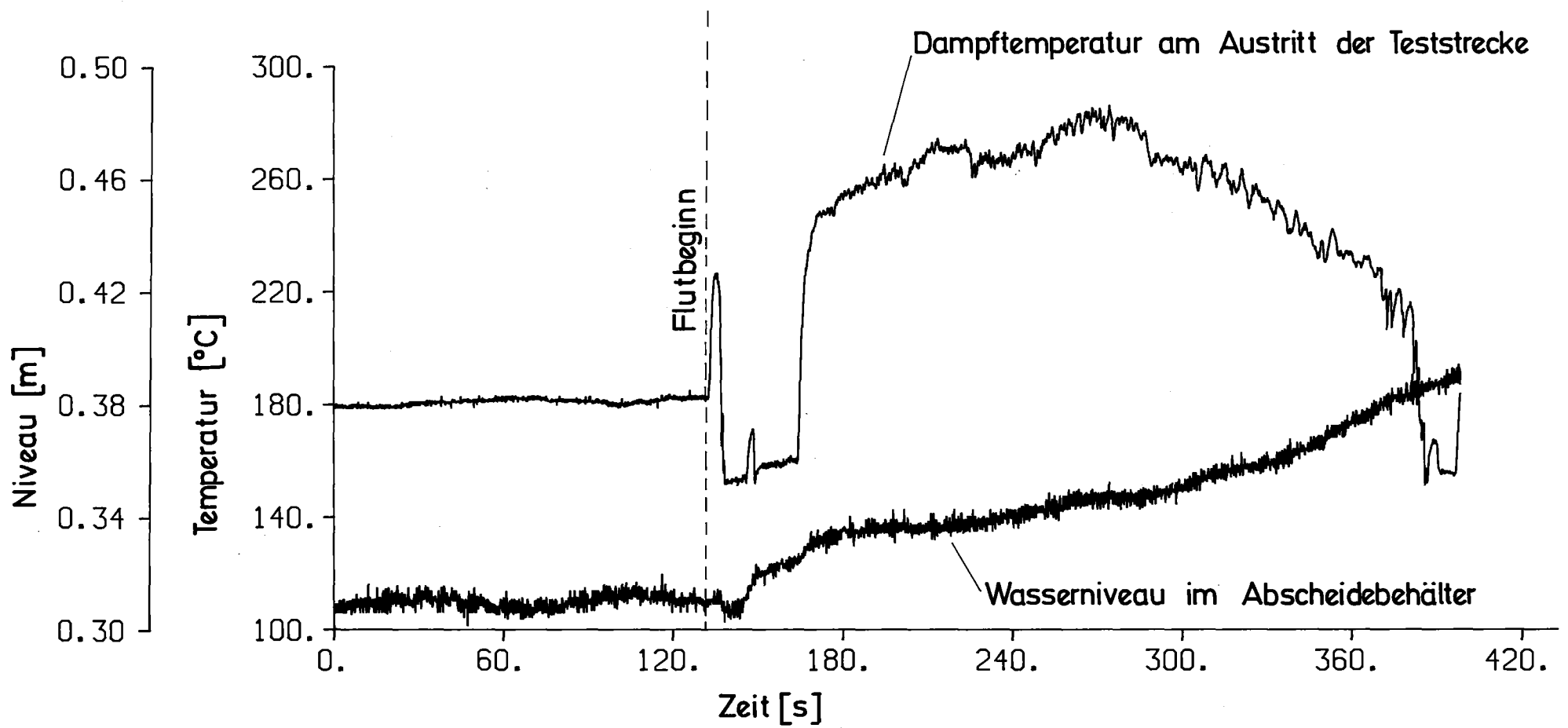


Abb. 26: Dampfüberhitzung am Austritt der Teststrecke und Wasserauswurf

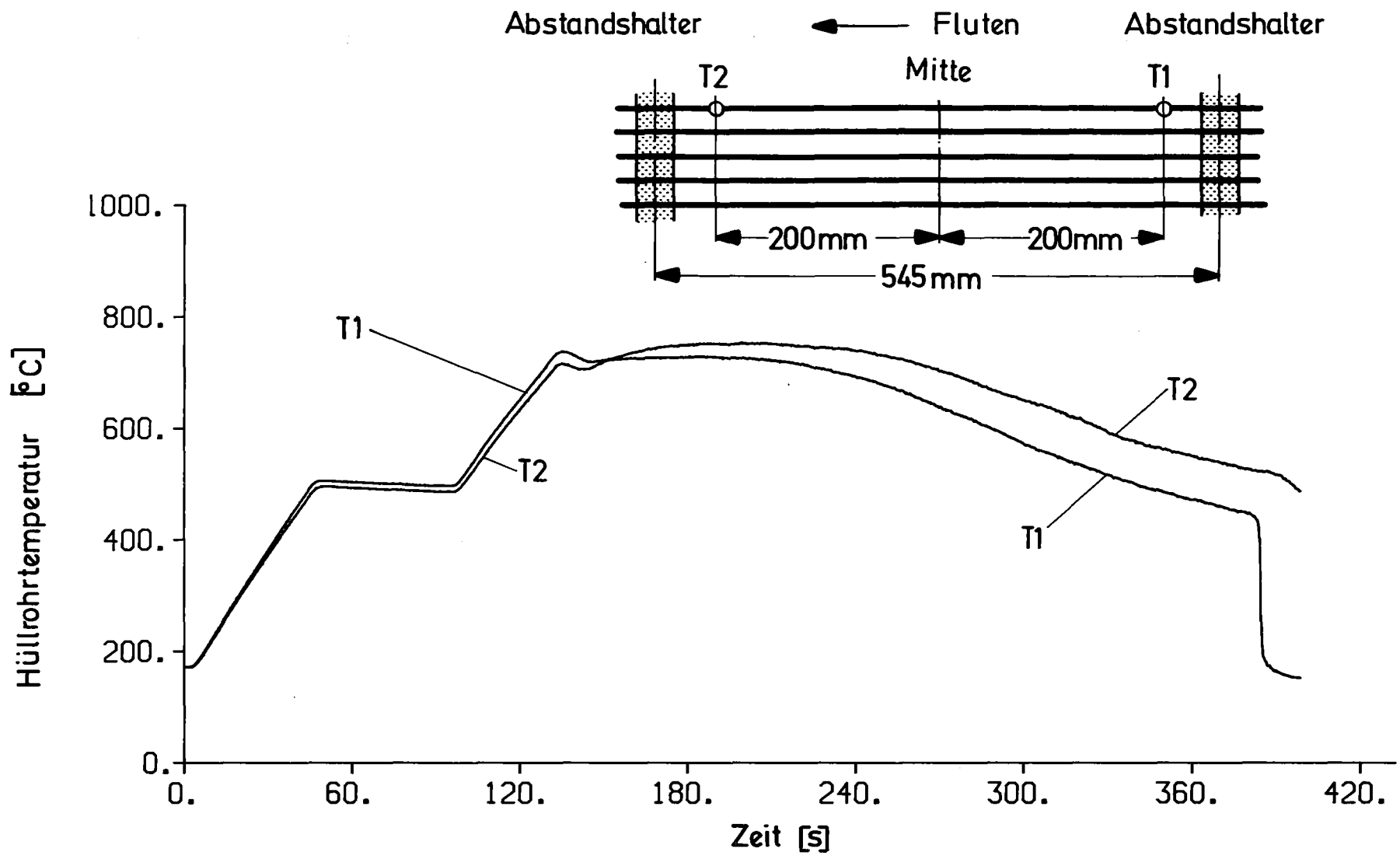


Abb. 27: Verlauf der axialen Hüllrohrtemperaturen im mittleren Abstandshalterbereich des Stabes 16

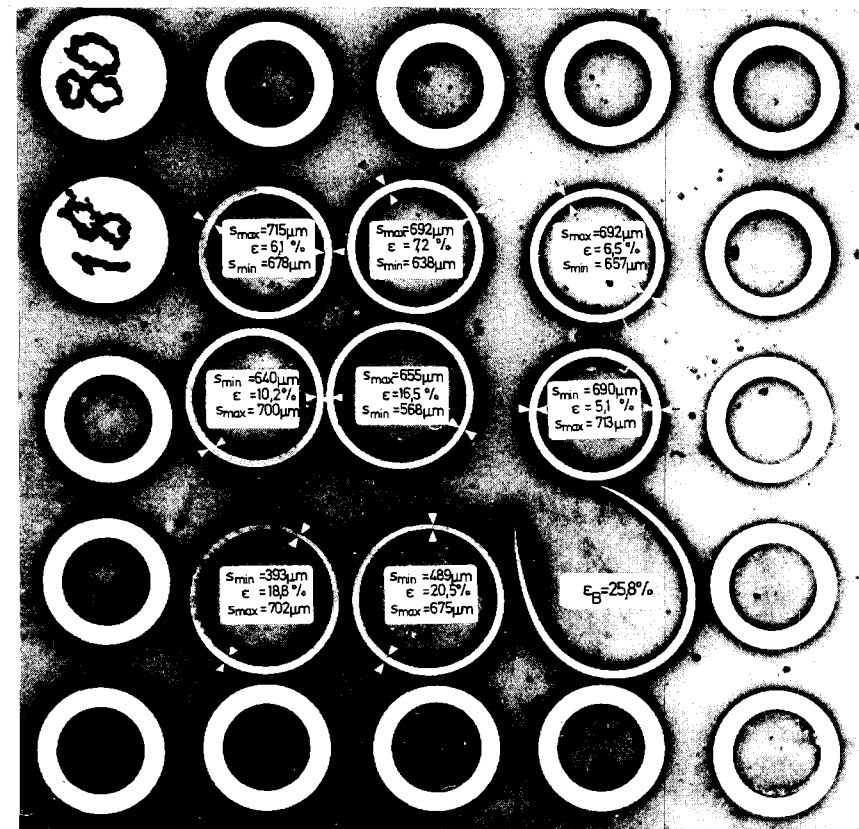
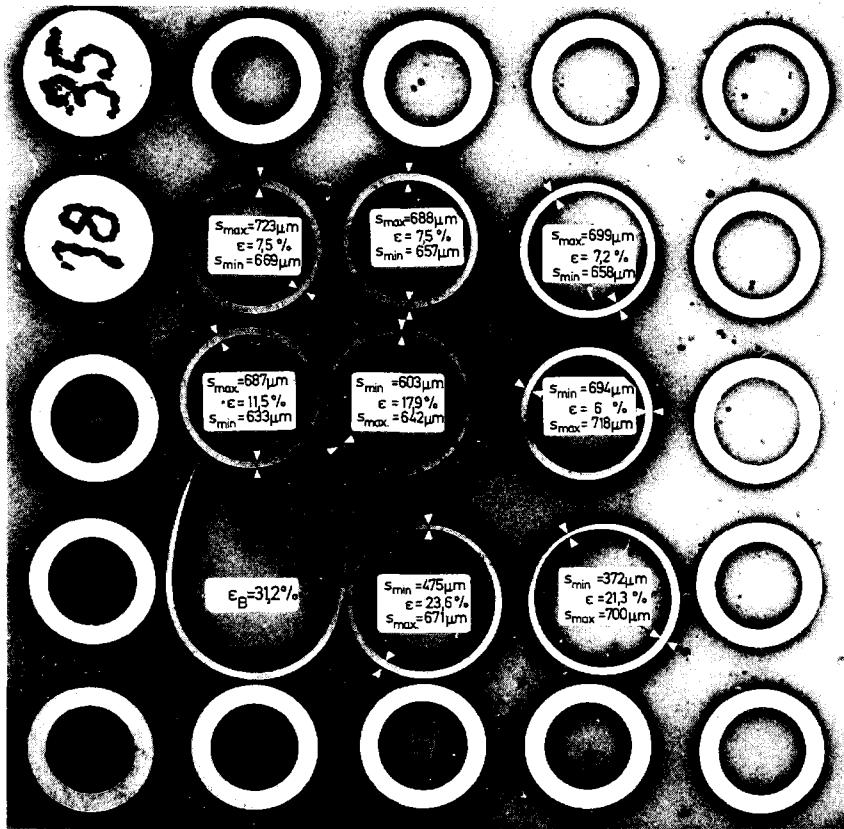


Abb. 28: Querschnitte durch verformtes Stabbündel (1835 mm und 1880 mm von oben), azimuthales Deformationsprofil