

WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE BERICHTE

**FZR-315**

März 2001

ISSN 1437-322X

**Archiv-Ex.:**

*Eckhard Krepper und Frank Schäfer*

**Verifikation des ATHLET-Rechenprogrammes  
anhand der Nachanalyse zweier Experimente  
an der CCTF-Versuchsanlage**

**Verification of the code ATHLET by post-test  
analysis of two experiments performed at the  
CCTF integral test facility**

Herausgeber:  
Forschungszentrum Rossendorf e.V.  
Postfach 51 01 19  
D-01314 Dresden  
Telefon +49 351 26 00  
Telefax +49 351 2 69 04 61  
<http://www.fz-rossendorf.de/>

Als Manuskript gedruckt  
Alle Rechte beim Herausgeber

*Eckhard Krepper und Frank Schäfer*

**Verifikation des ATHLET-Rechenprogrammes  
anhand der Nachanalyse zweier Experimente  
an der CCTF-Versuchsanlage**

**Verification of the code ATHLET by post-test  
analysis of two experiments performed at the  
CCTF integral test facility**

# **Abschlußbericht**

## **Final Report**

Reaktorsicherheitsforschung-Vorhaben-Nr./  
Reactor Safety Research-project No.:

**150 1201**

Vorhabentitel: **Verifikation des ATHLET-Rechenprogrammes anhand  
der Nachanalyse zweier Experimente an der CCTF-Ver-  
suchsanlage**

Project title: **Verification of the code ATHLET by post-test analysis of  
two experiments performed at the CCTF integral test  
facility**

Autoren / Author(s): **E. Krepper, F. Schäfer**

Dienststelle der Autoren/  
Performing Organisation: **Forschungszentrum Rossendorf e.V.  
Institut für Sicherheitsforschung**

Berichtsdatum: **März 2001**

Berichts-Nr./Report-No.: **FZR-315**

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie unter dem Förderkennzeichen 150 1201 gefördert. Verantwortlich für den Inhalt sind die Autoren.

## Berichtsblatt

|   |                                      |   |  |
|---|--------------------------------------|---|--|
| <b>1. ISBN oder ISSN</b>  | <b>2. Berichtsart: Schlußbericht</b> |   |  |
| <b>3a. Titel des Berichts</b><br>Verifikation des ATHLET-Rechenprogrammes anhand der Nachanalyse zweier Experimente an der CCTF-Versuchsanlage  |                                      |   |  |
| <b>3b. Titel der Publikation</b>  |                                      |   |  |
| <b>4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n))</b><br>Krepper, Eckhard; Schäfer, Frank  |                                      | <b>5. Abschlußdatum des Vorhabens</b><br>August 2000  |  |
|   |                                      | <b>6. Veröffentlichungsdatum</b><br>März 2001         |  |
| <b>4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n))</b><br>Krepper, Eckhard; Schäfer, Frank   |                                      | <b>7. Form der Publikation</b>                        |  |
| <b>8. Durchführende Institution</b><br><br>Forschungszentrum Rossendorf e.V.<br>Bautzner Landstr. 128<br><br>01328 Dresden  |                                      | <b>9. Ber. Nr. Durchführende Institution</b><br>FZR - |  |
|   |                                      | <b>10. Förderkennzeichen</b><br>GRS 150 1201          |  |
|   |                                      | <b>11a. Seitenzahl Bericht</b><br>70                  |  |
|   |                                      | <b>11b. Seitenzahl Publikation</b>                    |  |
| <b>13. Fördernde Institution (Name, Adresse)</b><br><br>Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie  |                                      | <b>12. Literaturangaben</b><br>7                      |  |
|   |                                      | <b>14. Tabellen</b><br>10                             |  |
|   |                                      | <b>15. Abbildungen</b><br>70                          |  |
| <b>16. Zusätzliche Angaben</b>  |                                      |   |  |
| <b>17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)</b>  |                                      |   |  |
| <b>18. Kurzfassung</b><br><p>Im Rahmen der externen Validierung des von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit entwickelten Störfallcodes ATHLET, der in der Version Mod 1.2 Cycle C vorlag, wurden zwei Experimente nachgerechnet und analysiert, die an der japanischen Versuchsanlage CCTF durchgeführt wurden. Die Versuchsanlage CCTF ist ein 1:25 volumenskaliertes Modell eines 1000 MW Druckwasserreaktors. Bei den Experimenten handelt es sich um Tests, in denen jeweils ein 2F-Bruch im kalten Strang mit kaltseitiger bzw. kombinierter Notkühlein speisung simuliert wurde.</p> <p>Die Auswertung der Rechnungen zeigt, daß die wesentlichen Phänomene im Verlauf der Transiente gut wiedergegeben werden. Das betrifft vor allem das zeitliche Verhalten der Wiederbenetzungsfront und die damit verbundene Kühlung der Brennelemente. Durch eine Zweikanal-Modellierung des Reaktorkerns ließ sich auch das radiale Verhalten der Wiederbenetzungsfront im Kern reproduzieren. Die Schwachstellen der Rechnungen liegen vor allem bei der Notkühlein speisung in der Anfangsphase der Transiente. Die Rechnungen liefern dabei zu hohe Kondensationsraten, welche mit einer unrealistischen Druckabsenkung verbunden sind. Desweiteren wird der Druckaufbau durch die Verdampfung beim Wiederbenetzen der Brennelemente offensichtlich unterschätzt.</p> |                                      |   |  |
| <b>19. Schlagwörter</b>   |                                      |   |  |
| <b>20. Verlag</b>   |                                      | <b>21. Preis</b>                                      |  |

## Document Control Sheet

|  |                                       |  |  |
|--|---------------------------------------|--|--|
| <b>1. ISBN or ISSN</b>   | <b>2. Type of Report</b> Final Report |  |  |
| <b>3a. Report Title</b><br>Verification of the code ATHLET by post-test analysis of two experiments performed at the integral test facility CCTF   |                                       |  |  |
| <b>3b. Title of Publication</b>  |                                       |  |  |
| <b>4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s))</b><br><br>Krepper, Eckhard; Schäfer, Frank  |                                       | <b>5. End of Project</b><br>August 2000    |  |
|  |                                       | <b>6. Publication Date</b><br>March 2001   |  |
| <b>4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s))</b><br>Krepper, Eckhard; Schäfer, Frank   |                                       | <b>7. Form of Publication</b>              |  |
| <b>8. Performing Organization(s) (Name, Adress)</b><br><br>Forschungszentrum Rossendorf e.V.<br>Bautzner Landstr. 128<br><br>01328 Dresden   |                                       | <b>9. Originator's Report No.</b><br>FZR - |  |
|  |                                       | <b>10. Reference No.</b><br>GRS 150 1201   |  |
|  |                                       | <b>11a. No. of Pages Report</b><br>70      |  |
|  |                                       | <b>11b. No. of Pages Publication</b>       |  |
| <b>13. Sponsoring Agency (Name, Adress)</b><br><br>Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie  |                                       | <b>12. No. of References</b><br>7          |  |
|  |                                       | <b>14. No. of Tables</b><br>10             |  |
|  |                                       | <b>15. No. of Figures</b><br>70            |  |
| <b>16. Supplementary Notes</b>   |                                       |  |  |
| <b>17. Presented at (Title, Place, Date)</b>   |                                       |  |  |
| <b>18. Abstract</b><br>In the framework of the external validation of the thermohydraulic code ATHLET Mod 1.2 Cycle C, which has been developed by the GRS, post test analyses of two experiments were done, which were performed at the japanese test facility CCTF. The test facility CCTF is a 1:25 volume-scaled model of a 1000 MW pressurized water reactor. The tests simulate a double end break in the cold leg of the PWR with ECC injection into the cold leg and with combined ECC injection into the hot and cold legs. The evaluation of the calculated results shows, that the main phenomena can be calculated in a good agreement with the experiment. Especially the behaviour of the quench front and the core cooling are calculated very well. Applying a two-channel representation of the reactor model the radial behaviour of the quench front could be reproduced. Deviations between calculations and experiment can be observed simulating the emergency injection in the beginning of the transient. Very high condensation rates were calculated and the pressure decrease in this phase of the transient is overestimated. Besides that, the pressurization due to evaporation in the refill phase is underestimated by ATHLET. |                                       |  |  |
| <b>19. Keywords</b>  |                                       |  |  |
| <b>20. Publisher</b>   |                                       | <b>21. Price</b>                           |  |

## Kurzfassung

Im Rahmen der externen Validierung des von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit entwickelten Störfallcodes ATHLET, der in der Version Mod 1.2 Cycle C vorlag, wurden zwei Experimente nachgerechnet und analysiert, die an der japanischen Versuchsanlage CCTF durchgeführt wurden.

Die Versuchsanlage CCTF ist ein 1:25 volumenskaliertes Modell eines 1000 MW Druckwasserreaktors. Bei den Experimenten handelt es sich um die Versuche C2-04/62 und C2-19/79, in denen jeweils ein 2F-Bruch im kalten Strang mit kaltseitiger bzw. kombinierter Notkühlein speisung simuliert wurde. Die Versuchsanlage wurde so ausgelegt, daß die Wiederfüll- bzw. Wiederflutphase bei Druckwasserreaktor-Störfällen mit großem Leck simuliert werden kann.

Die Auswertung der Rechnungen zeigt, daß die wesentlichen Phänomene im Verlauf der Transiente gut wiedergegeben werden. Das betrifft vor allem das zeitliche Verhalten der Wiederbenetzungsfront und die damit verbundene Kühlung der Brennelemente. Wie eine Analyse der experimentellen Daten zeigt, spielen im Reaktorkern radiale Effekte eine wesentliche Rolle. In der CCTF Anlage wird sowohl eine axiale als auch eine radiale Leistungsverteilung im Kern simuliert. Radiale Effekte treten insbesondere bei der kombinierten Notkühlein speisung auf. Hier wird die Einspeisung über das Obere Plenum durch den in Gegenrichtung strömenden Dampf teilweise behindert. Die Wiederbenetzungsfront schreitet in den Randbereichen schneller voran als im Zentrum. Dieses Verhalten wurde in den ATHLET-Rechnungen durch eine Zweikanal-Modellierung des Reaktorkerns nachgebildet. Die Ergebnisse der ATHLET Rechnungen zeigen sowohl für das Zentrum als auch für die Randbereiche des Kerns eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Daten.

Die Schwachstellen der Rechnungen liegen vor allem bei der Notkühlein speisung in der Anfangsphase der Transiente. Hier wird kaltes Notkühlwasser in Volumina mit reinem Dampf eingespeist. Die Rechnungen liefern dabei zu hohe Kondensationsraten, welche mit einer unrealistischen Druckabsenkung verbunden sind. Desweiteren wird der Druckaufbau durch die Verdampfung beim Wiederbenetzen der Brennelemente offensichtlich unterschätzt.

Die Ergebnisse der Rechnungen zeigen darüberhinaus, daß die sicherheitsrelevanten Befunde aus den Experimenten durch den Code ATHLET reproduziert werden.

## Abstract

In the framework of the external validation of the thermohydraulic code ATHLET Mod 1.2 Cycle C, which has been developed by the GRS, post test analyses of two experiments were done, which were performed at the Japanese test facility CCTF.

The test facility CCTF is a 1:25 volume-scaled model of a 1000 MW pressurized water reactor. The CCTF experiments C2-04/62 and C2-19/79 simulate a double end break in the cold leg of the PWR with ECC injection into the cold leg and with combined ECC injection into the hot and cold legs. CCTF was designed to investigate the refill-reflood phenomena after a large break loss of coolant accident.

The evaluation of the calculated results shows, that the main phenomena can be calculated in good agreement with the experiment. Especially the behaviour of the quench front and the core cooling are calculated very well. The experimental results show, that the thermohydraulic behaviour is influenced by radial effects. An axial and also a radial power profile is simulated at the CCTF facility. Radial effects can be observed especially in the experiment with combined ECC injection into the hot and cold legs. In this case the core cooling from the upper plenum is impeded by the steam flow from the core towards the upper plenum. Due to the three-dimensional effects the quench front formation at the periphery of the core is faster than in the centre. This behaviour was simulated by a two-channel representation of the reactor model. The results of the calculations show a good agreement with the experimental data both for the central region and for the periphery of the reactor model.

Deviations between calculations and experiment can be observed in the beginning of the transient. The injection of cold water into the hot and cold legs filled with pure steam leads to very high condensation rates. The pressure decrease in this phase of the transient is overestimated. Besides that, the pressurization due to evaporation in the refill phase is underestimated by ATHLET.

Nevertheless the results show, that the safety relevant findings of the experiments could be reproduced by the code ATHLET.

## **Inhaltsverzeichnis**

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>   | <b>6</b>  |
| <b>2</b> | <b>Gegenstand der Untersuchungen</b>  | <b>7</b>  |
| <b>3</b> | <b>Die Versuchsanlage CCTF</b>  | <b>12</b> |
|          | 3.1 Kurzbeschreibung der Versuchsanlage   | 12        |
|          | 3.2 Meßinstrumentierung   | 15        |
| <b>4</b> | <b>Rechnungen zum Experiment C2-19/79</b>   | <b>17</b> |
|          | 4.1 Beschreibung des Experiments  | 17        |
|          | 4.2 Modellierung mit ATHLET   | 20        |
|          | 4.3 Rechnungen mit ATHLET Mod 1.2 Cycle C und konstanten<br>Randbedingungen für das Containment | 24        |
|          | 4.4 Rechnungen mit ATHLET Mod 1.2 Cycle C und variablen<br>Randbedingungen für das Containment  | 39        |
| <b>5</b> | <b>Rechnungen zum Experiment C2-04/62</b>   | <b>45</b> |
|          | 5.1 Beschreibung des Experiments  | 45        |
|          | 5.2 Modellierung mit ATHLET   | 48        |
|          | 5.3 Rechnungen mit ATHLET Mod 1.2 Cycle C und konstanten<br>Randbedingungen für das Containment | 49        |
| <b>6</b> | <b>Zusammenfassung</b>  | <b>63</b> |
| <b>7</b> | <b>Literatur</b>  | <b>65</b> |
|          | <b>Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen</b>   | <b>66</b> |

## 1 Einleitung

Für die Störfallanalyse von Kernreaktoren werden best-estimate-Codes eingesetzt, die eine physikalisch weitgehend detaillierte Beschreibung der störfallrelevanten Phänomene ermöglichen. Bezüglich der Thermohydraulik ist der Stand durch die Anwendung von Zwei-Fluid-Modellen gekennzeichnet (RELAP, TRAC, CATHARE, ATHLET).

Ein wesentlicher Entwicklungsschritt des Codes ATHLET war die Einführung getrennter Impulsgleichungen als 6-Gleichungsversion. Dadurch wird die Aussagefähigkeit bei der Modellierung extremer Nichtgleichgewichtszustände, wie sie bei großen Lecks auftreten, verbessert. Auf den Test der diesbezüglichen Aussagefähigkeiten des Codes in einem komplexen Störfallszenarium zielt das vorliegende Vorhaben.

Im Rahmen der externen Validierung des von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit entwickelten Störfallcodes ATHLET, der in der Version Mod 1.2 Cycle C vorlag, wurden im Forschungszentrum Rossendorf zwei Experimente nachgerechnet und analysiert. Hierbei handelt es sich um die beiden Experimente C2-04/62 und C2-19/79 an der japanischen Versuchsanlage CCTF, in denen jeweils ein 2F-Bruch im kalten Strang mit kaltseitiger bzw. kombinierter Notkühlein speisung simuliert wurde. Ausgehend von einem durch die GRS bereitgestellten Basisdatensatz für das Programm FLUT wurde ein ATHLET-Datensatz für die Nachrechnung der beiden Experimente erstellt.

Das Ziel der hier vorgestellten Rechnungen war die Analyse der thermohydraulischen Phänomene in der Phase des Wiederflutens nach einem großen Leck und der Nachweis, daß die beobachteten physikalischen Effekte und relevanten sicherheitstechnischen Aussagen des Experiments mit der vorliegenden ATHLET Version modellierbar und reproduzierbar sind. Dabei wurden Rechnungen mit den ATHLET Versionen Mod 1.2 Cycle A, Cycle B und Cycle C durchgeführt. Im vorliegenden Bericht werden die Ergebnisse mit der aktuellen Version ATHLET Mod 1.2 Cycle C dargestellt. Um die Reproduzierbarkeit der sicherheitsrelevanten Aussagen unter den Bedingungen einer blinden Vorausrechnung zu überprüfen, wurden in der jeweils ersten Rechnung die Randbedingungen, wie z.B. der Containmentdruck, konstant vorgegeben. In jeweils weiteren Rechnungen wurde der Containmentdruck entsprechend den vorgefundenen experimentellen Ergebnissen variiert, um die Gültigkeit der physikalischen Modelle zu testen.

## 2 Gegenstand der Untersuchungen

Grundlage für die ATHLET-Validierungsstrategie ist die international abgestimmte CSNI Validierungs-Matrix zur Überprüfung und Einschätzung thermohydraulischer Codes. Einer der jüngsten Schritte bei der Entwicklung des Codes ATHLET war die Implementierung einer auf einem 6-Gleichungsmodell beruhenden Beschreibung der Thermohydraulik, bei der auch die Impulsgleichungen für die gasförmige und die flüssige Phase getrennt gelöst werden. Diese Beschreibung ermöglicht die Modellierung extremer Nichtgleichgewichtszustände, wie sie bei Störfällen mit großem Leck auftreten. Erneuter Validierungsbedarf entsteht dadurch, daß die Gültigkeit der an Einzeleffekten getesteten implementierten Modelle in ihrem Zusammenwirken durch die adäquate Beschreibung von integralen Störfallszenarien demonstriert werden muß.

Die meisten japanischen und US-amerikanischen Auslegungen von Druckwasserreaktoren sehen für den Fall eines großen Lecks ausschließlich eine kaltseitige Einspeisung vor. In den Konzepten deutscher Druckwasserreaktoren ist dagegen eine kombinierte heißseitige und kaltseitige Einspeisung vorgeschrieben, durch die der Störfall auch dann beherrscht werden muß, wenn sich ein Sicherheitssystem in Reparatur befindet und ein weiteres versagen sollte. In den beiden zu analysierenden Experimenten werden sowohl ausschließlich die kaltseitige Einspeisung (C2-04) als auch die kombinierte Einspeisung (C2-19) untersucht.

Die mögliche Entwicklung eines Störfalles mit großem Leck hängt von der Lage des Lecks und dem Ort der Noteinspeisung ab. Unter den Störfällen mit großem Leck bewirkt der Bruch des kalten Strangs den höchsten Leckmassenstrom, da das Fluid hier am meisten unterkühlt ist. Nach Öffnung des Lecks sinkt der Primärdruck relativ rasch und es setzt eine intensive Dampfbildung ein (Druckentlastungsphase). Die Ansprechdrücke der Hochdruckeinspeisung und der Druckspeicher werden relativ schnell erreicht. Bei der heißseitigen Einspeisung entweicht ein Teil des eingespeisten Notkühlwassers durch das Leck. Desweiteren wird das Vordringen des Notkühlwassers in die Spaltzone durch den im Ringspalt als auch im oberen Plenum in Gegenrichtung strömenden Dampf behindert. Der Verlauf der nachfolgenden Phasen wird wesentlich davon bestimmt (Wiederfüllphase). Diese Prozesse nehmen insbesondere dann einen dramatischen Verlauf, wenn das Notkühlwasser auf die überhitzten Brennelemente trifft (Wiederflutphase). Die dann einsetzende Dampfbildung bewirkt einerseits die Wärmeabführung von den überhitzten Brennelementen, behindert jedoch andererseits die Zuführung weiteren Notkühlwassers in die Spaltzone und ruft Oszillationen der Höhenstände in Spaltzone und Ringspalt hervor. Nach der Wiederbedeckung der Spaltzone wird die Restwärme durch die Niederdruckeinspeisung abgeführt.

Einen Überblick über die Phänomene während eines 2F Bruchs im kalten Strang gibt Tabelle 2.1.

Die thermohydraulischen Phänomene während der Wiederflutphase stehen im Mittelpunkt des Interesses der beiden Experimente. Es wird nicht das gesamte Störfallszenario simuliert, sondern die Experimente setzen bei der Wiederfüllphase ein.

Während des Störfallablaufes sind folgende Einzelphänomene in ihrem Zusammenwirken von Bedeutung:

- Leckmassenstrom
- Phasenseparation im Druckbehälter
- Mischung und Kondensation während der Noteinspeisung
- Dampf und Fluidverteilung in der Spaltzone
- Gegenstrombegrenzung
- Austrag des Notkühlmittels durch das Leck
- Wassermittelschlag durch Dampfaustritt aus der Spaltzone
- Ansammlung von Wasser im oberen Plenum
- Penetration von Notkühlwasser durch den entgegenströmenden Dampf
- Wärmeübertragung von überhitzten Wänden an das Fluid
- Voranschreiten der Quench-Front.

Die Vorteile einer 6-Gleichungs-Thermohydraulik werden insbesondere dort erwartet, wo sich abrupt ändernde Phänomene extreme Nichtgleichgewichtszustände hervorrufen, wie z.B. bei der Notkühleinspeisung und beim Wiederfluten. Eine Reihe der oben aufgeführten Phänomene werden durch dreidimensionale Effekte bestimmt. Eine wichtige Frage ist, inwiefern ein Code mit einer eindimensionalen Modellierung der Thermohydraulik in der Lage ist, diese Phänomene so zu beschreiben, wie es für eine Sicherheitsbewertung erforderlich ist. Die Aufgaben der vorliegenden Validierungsrechnungen sind daher:

- die qualitative Übereinstimmung zwischen Rechen- und Meßergebnissen einzuschätzen
- die richtige Simulation wesentlicher sicherheitsrelevanter Ereignisse zu beurteilen
- mögliche Ursachen von Abweichungen zwischen Versuchs- und Rechenergebnissen zu diskutieren
- gegebenenfalls Vorschläge für Modellverbesserungen oder weiterführende Validierungsrechnungen zu erarbeiten.

Einen Überblick zum Ablauf und zu den thermohydraulisch relevanten Phänomenen der Experimente C2-19/79 und C2-04/62 geben die Tabellen 2.2 und 2.3.

### **Blowdown-Phase (0 s)**

- Beginn: Lecköffnung
- Strömungsumkehr vom Druckbehälter zum Leck im betroffenen kalten Strang
- Primärdruck rasch auf Sättigung:  
Dampfbildung im Core, oberen Plenum, heißen Strängen, dann in den übrigen Regionen
- Minimum des Kühlmittelinventars im Primärkreis
- Ansprechen der Hochdruckeinspeisung und bei niedrigerem Primärdruck der Druckspeichereinspeisung

### **Wiederfüll-Phase (ca. 20 s)**

- Fortdauernde Noteinspeisung übersteigt Leckmassenstrom (größter Beitrag in dieser Phase durch Druckspeicher)
- Vordringen des Notkühlmittels wird durch entgegenströmenden Dampf im Ringraum und im oberen Plenum behindert
- Dampfbildung auch an überhitzten Wänden im Ringraum
- 3D-Effekte
- Kühlung der Spaltzone nur durch Dampf
- schließlich Durchbruch des Notkühlmittels durch den Dampf im Ringraum und allmähliches Füllen des unteren Plenums
- Ende dieser Phase: Kühlmittel erreicht Spaltzonenunterkante

### **Wiederbenetzungs-Phase (ca. 150 s)**

- sobald Kühlmittel auf die heißen Brennelemente trifft, bildet sich eine Wiederbenetzungsfront heraus
- intensive Dampfbildung mit gegensätzlichen Wirkungen:
  - (a) Wärmeabfuhr aus den Brennelementen
  - (b) Behinderung der Zuführung weiteren Kühlmittels
- starker Einfluß des Dampfgehaltes auf den Wärmeübertragungs-koeffizienten an der Brennelementoberfläche
- Höhenstandoszillationen
- Tropfenmitriß vom unteren Teil der Spaltzone in das obere Plenum, Verdampfung dieser Tropfen außerhalb der Spaltzone
- Akkumulation von Wasser im oberen Plenum (bei kombinierter Noteinspeisung)
- Niederdruckeinspeisung führt schließlich zum vollständigen Wiederbenetzen des Cores und zur Langzeitkühlung

**Tabelle 2.1: Phänomene während eines 2F Bruchs im kalten Strang**

| Experiment CCTF C2-19 |  | Leckmassenstrom | Phasenseparation | Vermischung und Kondensation bei Noteinspeisung | Void- und Fluidverteilung in der Spaltzone | Wasseransammlung im oberen Plenum | Bypass der heißseitigen Noteinspeisung zum Leck und Vordringen in die Spaltzone | Wassermitrieb aus dem Core ins obere Plenum | Wasserrücklauf aus dem oberen Plenum ins Core | Gegenstrombegrenzung | Steam Binding | Wärmeübertragung Brennelement-Fluid | Ausbreitung der Wiederbenetzungsfront |
|-----------------------|--|-----------------|------------------|---|--|-----------------------------------|---|---|---|----------------------|---------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| Zeit [s]              | Schalthandlung/Phänomene   |                 |                  |   |  |                                   |   |   |   |                      |               |                                     |                                       |
| 0.0                   | Testbeginn   | x               | x                |   | x  |                                   |   |   |   |                      |               | x                                   |                                       |
| 83.0                  | Leistungsabfall  | x               |                  |   | x  |                                   |   |   |   |                      |               | x                                   |                                       |
| 83.0                  | heißseitige Druckspeishereinspeisung                               | x               |                  | x   | x  |                                   | x   | x   |   | x                    |               | x                                   |                                       |
| 88.0                  | kaltseitige Druckspeishereinspeisung                               | x               |                  | x   | x  |                                   |   | x   |   |                      |               | x                                   |                                       |
| 85.0-105.0            | Kühlmittelansammlung im oberen Plenum                              | x               |                  | x   | x  | x                                 |   | x   |   |                      |               | x                                   |                                       |
| 105.0-115.0           | Abfließen in die Spaltzone   | x               | x                | x   | x  |                                   | x   | x   | x   |                      |               | x                                   |                                       |
| 125.0-185.0           | Oszillationen durch Dampfbildung und Kondensation im Dampferzeuger | x               | x                | x   | x  |                                   |   | x   |   |                      |               | x                                   |                                       |
| 120.0-370.0           | Wiederbenetzung der Spaltzone                                      | x               | x                | x   | x  |                                   |   | x   |   |                      | x             | x                                   | x                                     |
| 954.0                 | Ende des Experimentes  | x               | x                | x   | x  |                                   |   | x   |   |                      | x             | x                                   | x                                     |

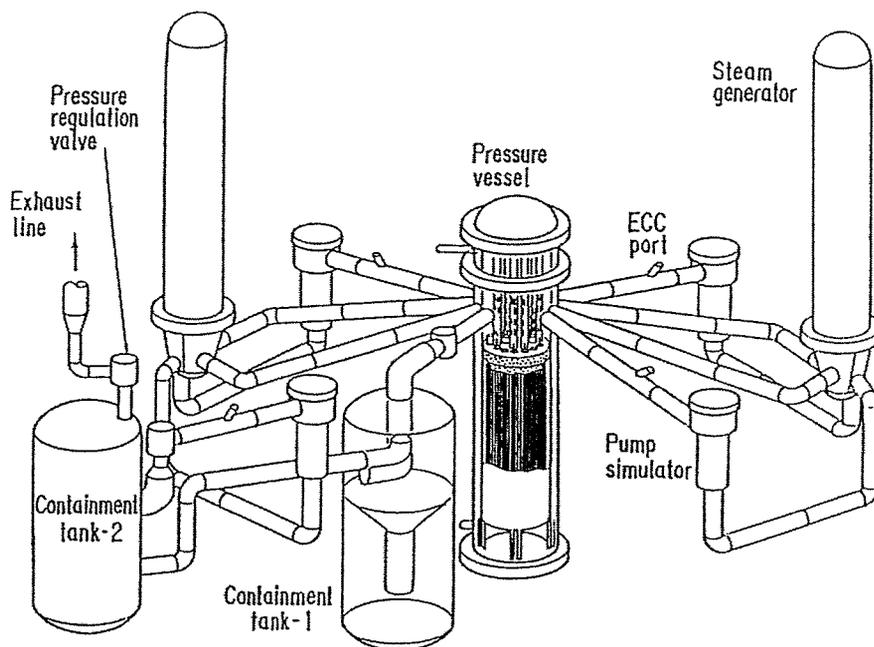
Tabelle 2.2: Thermohydraulische Phänomene beim Experiment C2-19



### 3 Die Versuchsanlage CCTF

#### 3.1 Kurzbeschreibung der Versuchsanlage

Die Versuchsanlage CCTF (Bild 3.1 bis 3.4) ist ein 1:25 volumenskaliertes Modell eines 1000 MW Druckwasserreaktors (Trojan/USA, Ohi/Japan). Die Auslegung erfolgte unter der Maßgabe, die Wiederfüll- bzw. Wiederflutphase bei Druckwasserreaktor-Störfällen mit großem Leck zu simulieren. Der Ringspalt wurde so ausgelegt, daß das Strömungsverhalten des Noteinspeisewassers dem Verhalten im Ringspalt der realen Anlage nahekommt. Die Höhenverhältnisse wurden der Originalanlage weitestgehend angepaßt. Auch das große Volumen unterstreicht die Eignung dieser Versuchsanlage für die Untersuchung derartiger Störfälle.

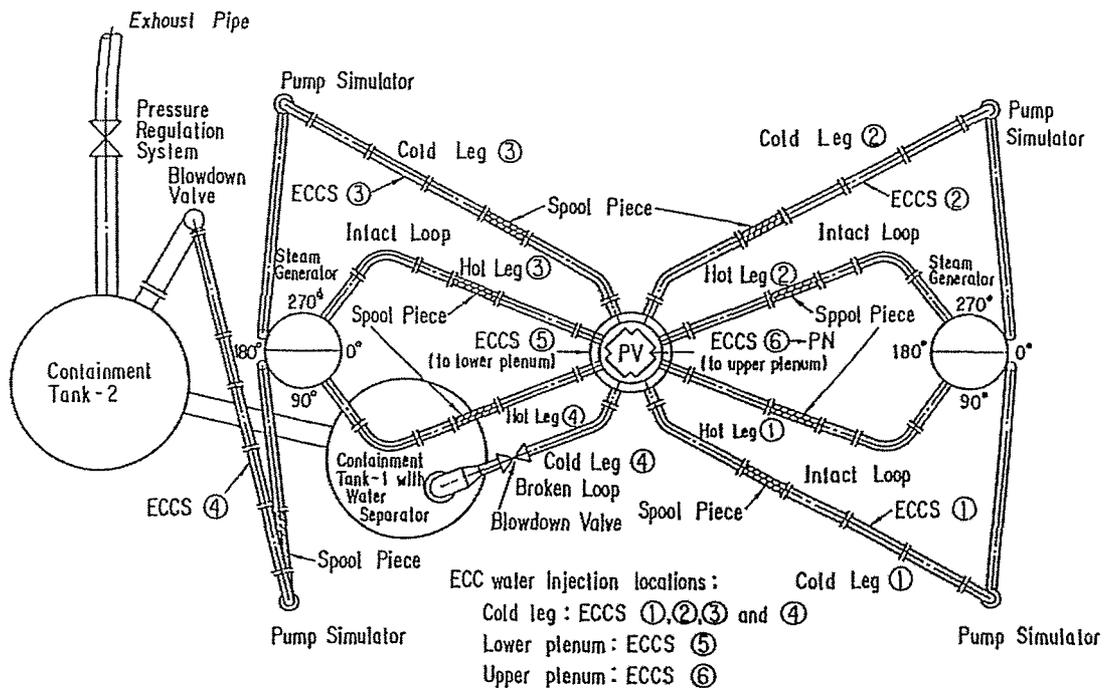


**Bild 3.1: Die Versuchsanlage CCTF**

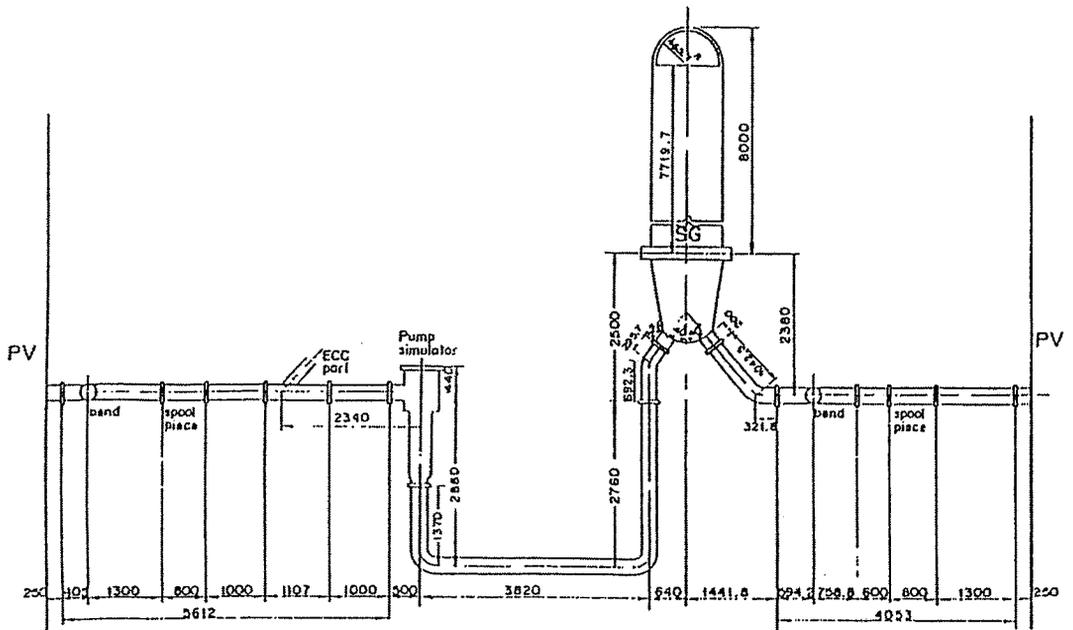
Entsprechend dem Referenzreaktor werden in der Anlage vier Schleifen (drei intakte Schleifen, eine Leckschleife) nachgebildet. Jede der Schleifen ist mit einem Dampfzeuger verbunden, jeweils zwei Dampfzeuger sind dabei in einem Behälter untergebracht. In alle vier Schleifen sind Pumpensimulatoren integriert. Der 2F Bruch wird im kalten Strang simuliert. Beide Teile der Leckschleife sind mit je einem Containment Tank verbunden. Der Druck in den Containment Tanks wird über ein Abblaseregulventil gesteuert. Der Maximaldruck im Primärsystem ist auf 0.6 MPa und die Maximaltemperatur auf 350 °C beschränkt.

Im Reaktormodell sind 1824 elektrisch beheizte und 224 ungeheizte Brennstabsimulatoren untergebracht. Die Brennstabsimulatoren sind in 32 Kassetten von quadratischer Geometrie angeordnet. Die Brennstabhüllen sind für eine Maximaltemperatur von 900 °C ausgelegt. Die Beheizung des Kernsimulators erfolgt radial in drei verschiedenen Stufen, um so eine bestimmte radiale Leistungsdichteverteilung zu simulieren. In axialer Richtung ist eine kosinusförmige Leistungsdichteverteilung in 17 Abschnitten nachgebildet.

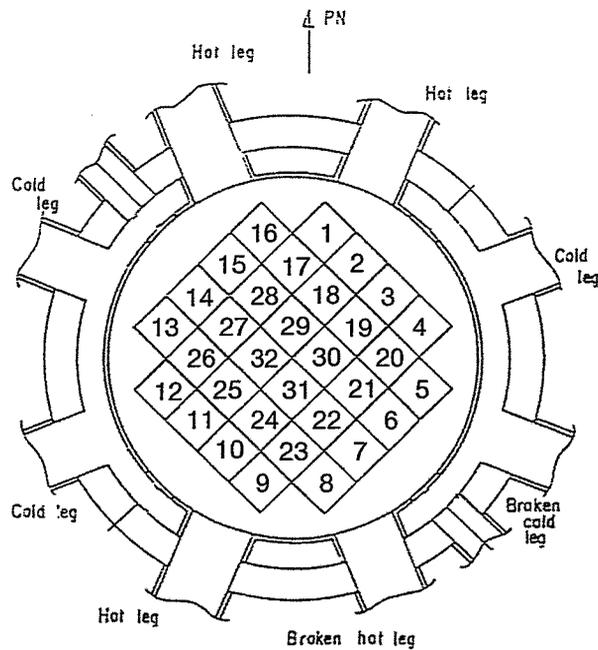
Bei der Notkühlein speisung werden die Druckspeicher und die Niederdruckeinspeisung simuliert. Dabei ist eine Einspeisung in das Obere und Untere Plenum sowie in den Downcomer und die kalten Stränge vorgesehen.



**Bild 3.2: Die vier Schleifen der Versuchsanlage mit den Positionen der Notkühlein speisung**



**Bild 3.3: Abmessungen einer Schleife der Versuchsanlage**



**Bild 3.4: Querschnitt des Kernsimulators mit den 32 Brennelementsimulatoren**

### 3.2 Meßinstrumentierung

Die Versuchsanlage CCTF weist neben dem aus 1338 Meßkanälen bestehenden Standardmeßsystem für Druck, Differenzdruck, Massenströme, Fluidtemperatur, Wandtemperatur und Brennstabtemperatur ein zusätzliches Meßsystem zur Identifizierung von Zweiphasenströmungen und 3D-Phänomenen im Core und dem oberen Plenum auf.

Die Standardinstrumentierung der Versuchsanlage (JAERI) stellt die in Tabelle 3.1 aufgelisteten Meßdaten zur Verfügung.

| 1. Temperaturmessungen |                    |     |            |
|------------------------|--------------------|-----|------------|
| downcomer              | fluid / wall       | 60  | Meßstellen |
| core                   | rod / fluid / wall | 723 | Meßstellen |
| upper plenum           | fluid / wall       | 156 | Meßstellen |
| lower plenum           | fluid / wall       | 12  | Meßstellen |
| primary loop           | fluid / wall       | 98  | Meßstellen |
| SG prim. side          | fluid              | 24  | Meßstellen |
| SG sec. side           | fluid              | 66  | Meßstellen |
| ECC injection          | fluid              | 2   | Meßstellen |
| containment            | fluid              | 2   | Meßstellen |

| 2. Differenzdruck und Höhenstände |   |    |            |
|-----------------------------------|---|----|------------|
| downcomer                         |   | 20 | Meßstellen |
| core                              |   | 28 | Meßstellen |
| lower / upper plenum              |   | 9  | Meßstellen |
| primary loop - hot leg            | } | 52 | Meßstellen |
| primary loop - cold leg           |   |    |            |
| primary loop - loop seal          |   |    |            |
| SG / ECC injection / leak system  |   | 8  | Meßstellen |

Tabelle 3.1: Meßdaten aus der Standardinstrumentierung (JAERI)

|   |               |
|---|---------------|
| <b>3. Druckmessungen</b>  |               |
| pressure vessel UP/LP<br>hot legs<br>steam generator<br>containment tank I / II | 11 Meßstellen |
| <b>4. Massenstrommessungen</b>  |               |
| ECC / leak system   | 34 Meßstellen |
| <b>5. Leistungsmessung</b>  |               |
| heater rod bundles  | 9 Meßstellen  |

**Tabelle 3.1: Meßdaten aus der Standardinstrumentierung (JAERI)**

Neben diesen Meßdaten gibt es noch ein sogenanntes "Advanced Instrumentation System" für Zweiphasenströmungen. Dazu gehören optische Sensoren, Massenstromsensoren und Leitfähigkeitsmessungen. Diese Daten lagen für die Untersuchungen im Rahmen dieses Projektes nicht vor.

## 4 Rechnungen zum Experiment C2-19/79

### 4.1 Beschreibung des Experiments

Beim Experiment C2-19 wird ein 2F Bruch im kalten Strang mit kombinierter Notkühl-einspeisung in 2 heiße Stränge und 3 kalte Stränge simuliert. Die Versuchsanlage ist zu Beginn der Transiente mit Dampf gefüllt. Im unteren Plenum wird vor dem Start des Experiments ein Füllstand von 0.8 m eingestellt. Über die Heizelemente im Reaktor-modell werden die spezifizierten Randbedingungen (Druck, Temperatur) eingeregelt.

|                                  |          |
|----------------------------------|----------|
| Reaktorleistung                  | 8.21 MW  |
| Druck im Primärkreis             | 0.6 MPa  |
| Druck im Containment             | 0.3 MPa  |
| Temperatur im Unteren Plenum     | 157.8 °C |
| Druck auf der Sekundärseite      | 5.2 MPa  |
| Temperatur auf der Sekundärseite | 266.8 °C |

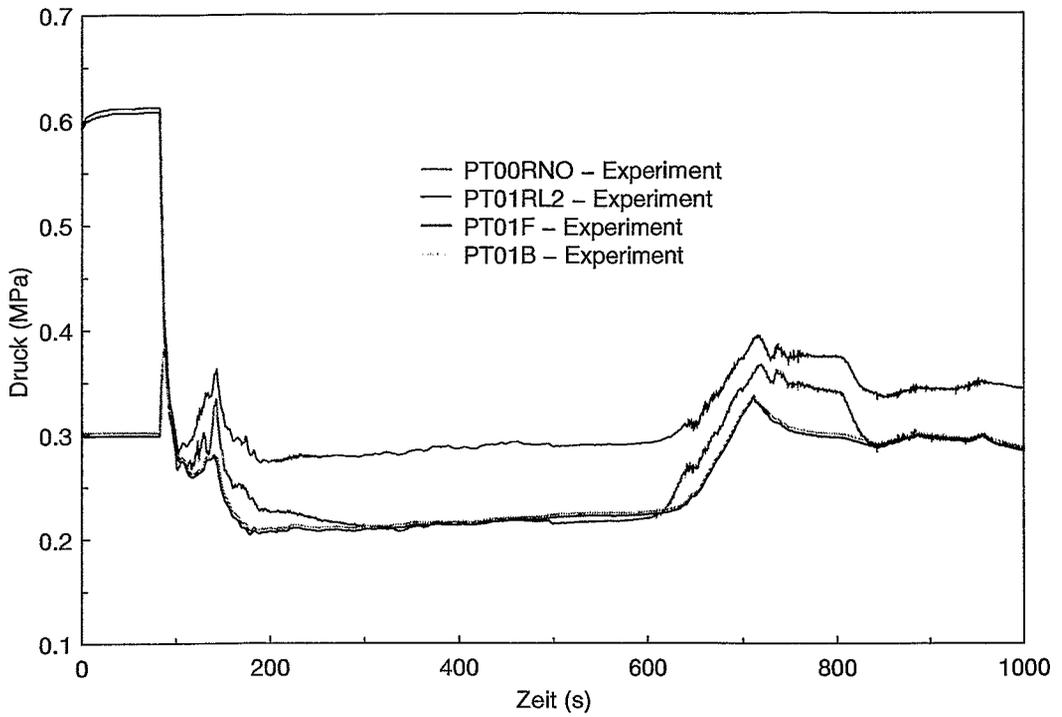
**Tabelle 4.1: Randbedingungen des Experiments C2-19**

|   |               |
|---|---------------|
| Beginn des Experiments                    | 0 s           |
| Druckentlastung und Leistungsabfall       | 83 s          |
| Druckspeichereinspeisung heißstrangseitig | 83 s - 498 s  |
| Druckspeichereinspeisung kaltstrangseitig | 88 s - 172 s  |
| Niederdruckeinspeisung                    | 174 s - 978 s |
| Ende des Experiments                      | 1000 s        |

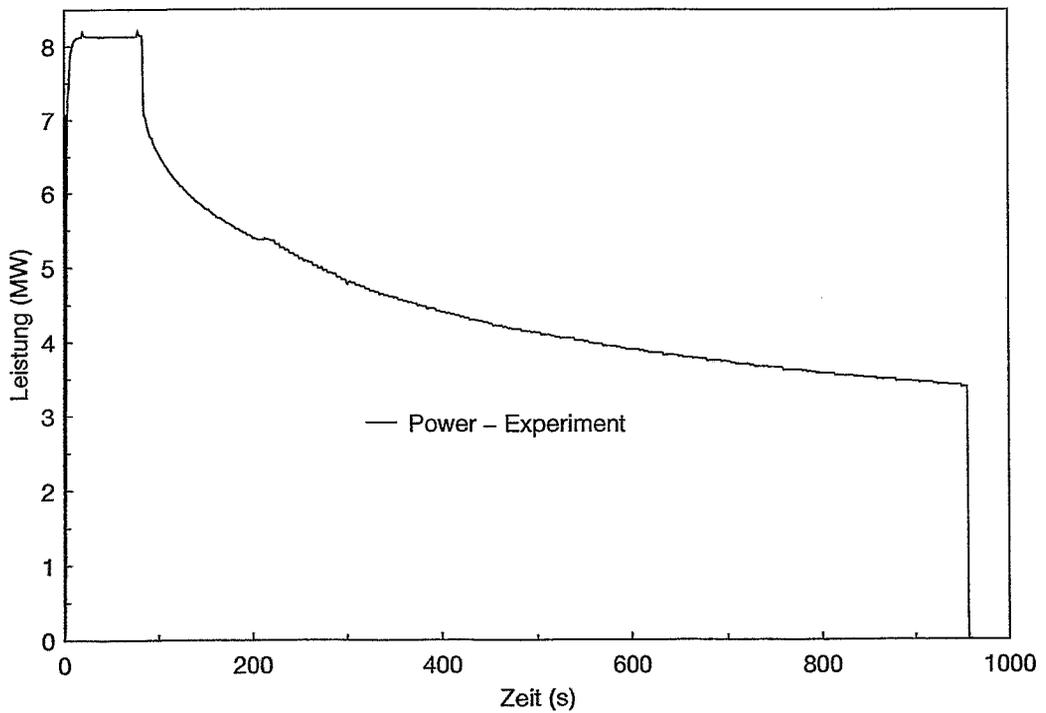
**Tabelle 4.2: Zeitlicher Ablauf des Experiments C2-19**

Mit dem Start des Experiments ( $t=0$  s) werden die Brennstabsimulatoren zugeschaltet und die Leistung wird entsprechend der Nachzerfallsleistung des Reaktors eingestellt. Bei  $t=83$  s werden die Ventile zu den Containment Tanks geöffnet und zeitgleich beginnt die Druckspeichereinspeisung in die heißen Stränge. Die Notkühl-einspeisung in die kalten Stränge startet bei  $t=88$  s. Die Niederdruckeinspeisung beginnt bei  $t=174$  s und endet bei  $t=978$  s. Das Experiment ist nach 1000 s beendet.

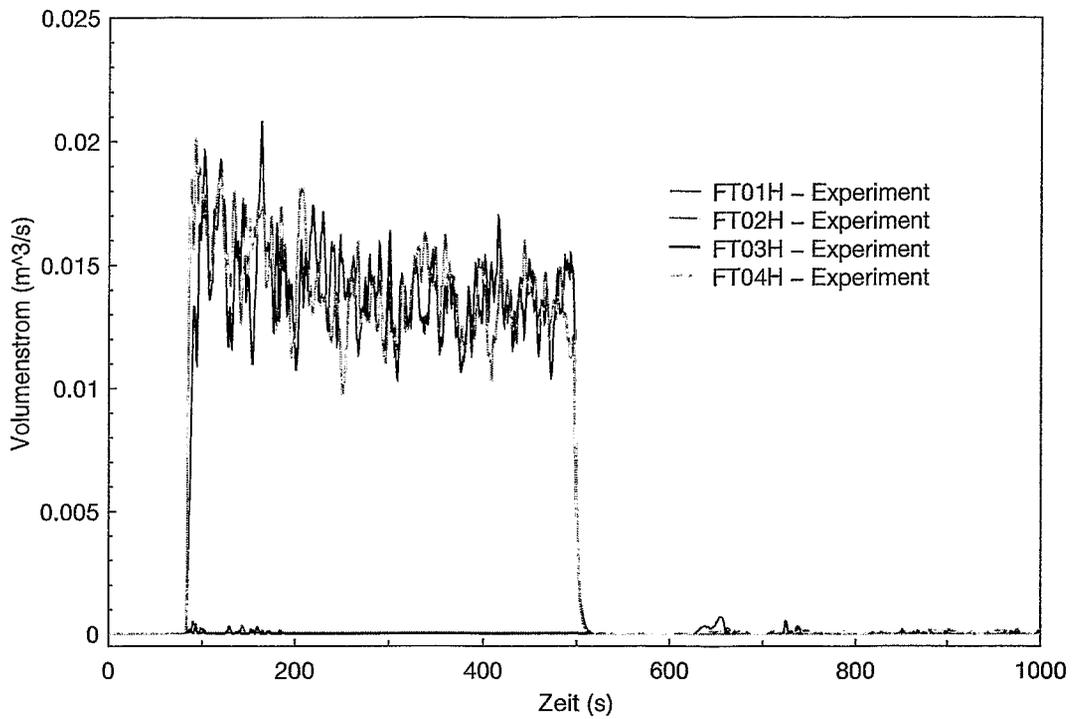
Die Randbedingungen des Experiments sind in Tabelle 4.1 zusammengefaßt, Tabelle 4.2 gibt einen Überblick über den zeitlichen Ablauf des Experiments. In den Bildern 4.1 bis 4.4 sind für das Experiment C2-19 der zeitliche Verlauf von Primärdruck, Reaktorleistung und die Notkühl-einspeisung dargestellt.



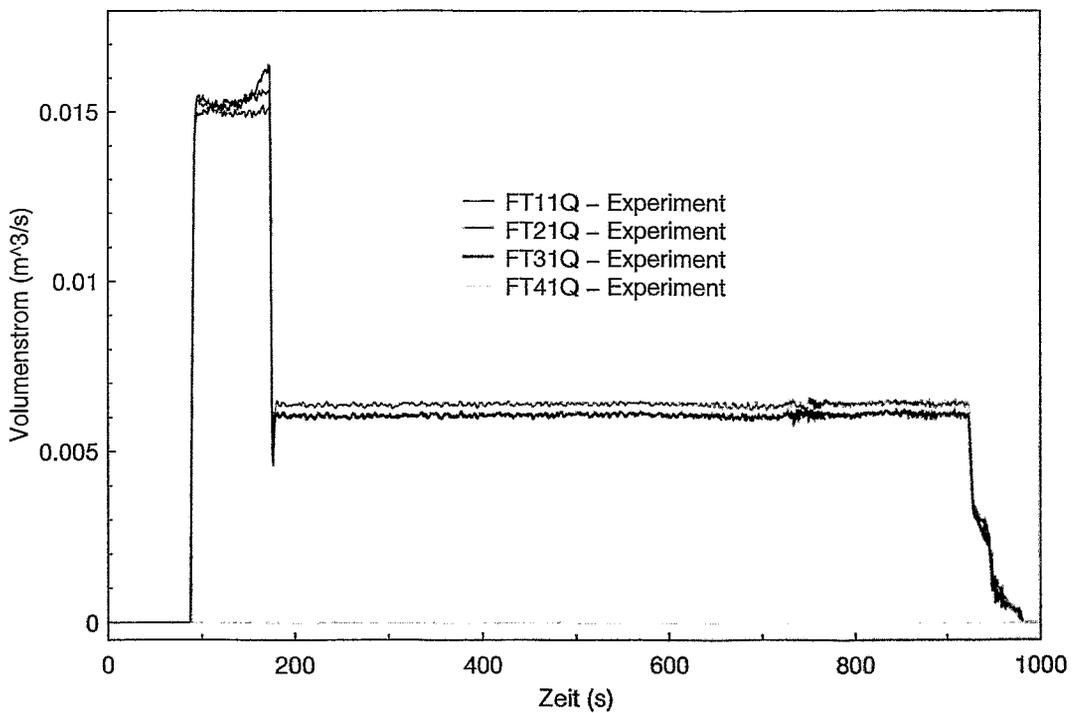
**Bild 4.1: Druck im Unteren Plenum (PT00RNO), Oberen Plenum (PT01RL2), Containment Tank 1 (PT01F) und Containment Tank 2 (PT01B)**



**Bild 4.2: Integrale Reaktorleistung (Power)**



**Bild 4.3: Heißseitige Notkühleinspeisung (FT01H-FT03H: intakte Schleifen, FT04H: Leckschleife) - FT02H und FT03H nicht verfügbar**



**Bild 4.4: Kaltseitige Notkühleinspeisung (FT11Q-FT31Q: intakte Schleifen, FT41Q: Leckschleife) - FT41Q nicht verfügbar**

## 4.2 Modellierung mit ATHLET

Ausgehend von einem FLUT-Datensatz für das Experiment C2-20, welcher von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS mbH) zur Verfügung gestellt wurde, wurde ein Datensatz für die ATHLET Version Mod 1.2 entwickelt. Die Nodalisierung der Versuchsanlage ist in den Bildern 4.5 und 4.6 dargestellt. Tabelle 4.3 gibt einen Überblick zu den einzelnen Prioritätsketten.

Die 4 Schleifen der CCTF Versuchsanlage werden in einer 2-Schleifen Anordnung modelliert. Dabei werden die 3 intakten Schleifen in einer Schleife zusammengefaßt, die zweite Schleife repräsentiert die Leckschleife. Im Reaktormodell sind in der hier betrachteten Phase des Störfalls keine ausgeprägten Asymmetrien durch unterschiedliche Einspeisungen in einzelne Schleifen zu beobachten, so daß die Schleifenzusammenfassung gerechtfertigt erscheint. Beide Schleifen sind kaltseitig mit je einem Downcomer verbunden, welcher in das untere Plenum mündet. Die beiden Downcomer sind über Querverbindungen ("Cross Connection Objects") gekoppelt. Die beiden heißen Stränge sind mit dem Oberen Plenum verbunden.

Das Reaktormodell besteht aus dem Unteren und Oberen Plenum sowie dem Reaktorkern. Das gesamte Reaktormodell ist axial sehr fein nodalisiert und besteht insgesamt aus 55 Nodes. Im Reaktorkern wurde die axiale Leistungsverteilung entsprechend den experimentellen Daten nachgebildet. Radial ist der Reaktorkern in zwei Zonen unterteilt. In der Randzone (C2) werden die Brennelemente Nr. 1-16 mit 38 % der Kernleistung und im Zentrum (C1) die Brennelemente Nr. 17-32 mit 62 % der Kernleistung simuliert (vgl. Bild 3.4). Im Reaktorkern wird für beide Kanäle das Quench Front Modell mit der Korrelation von Semeria/Martinet (Lower Quench Front) bzw. Yamanouchi (Upper Quench Front) zur Anwendung gebracht.

In der Versuchsanlage ist die Leckschleife mit den beiden Containment Tanks verbunden. Im Verlauf des Experiments wurde über Regelventile der Containmentdruck annähernd konstant gehalten. Daher wurden beide Containment Tanks als "Time Dependent Volumes" mit näherungsweise konstantem Druck und konstanter Temperatur definiert. In der betrachteten Phase des Experiments ist der Leckmassenstrom nicht mehr kritisch. In einer zweiten Rechnung wurden zeitabhängige Randbedingungen einschließlich der Regelabweichungen vorgegeben, um das Containmentverhalten realistischer nachzubilden.

Die Dampferzeugersekundärseite wurde für beide Schleifen in Form von Wärmeleitobjekten mit den vom Experiment bekannten Sekundärtemperaturen modelliert.

Entsprechend dem zeitlichen Verlauf des Experiments werden die folgenden Ereignisse durch GCSM Signale gesteuert:

- t=0 s: Start der Rechnung, Hochfahren der Reaktorleistung
- t=83 s: Öffnen der Ventile zu den Containment Tanks,  
Druckentlastung und Leistungsabfall,  
Druckspeichereinspeisung heißstrangseitig
- t=88 s: Druckspeichereinspeisung kaltstrangseitig
- t=174 s: Niederdruckeinspeisung

Die Massenströme der Notkühleinspeisung wurden in Anlehnung an die experimentellen Daten durch Tabellen definiert.

Für alle Rechnungen wurden die 6-Gleichungsversion von ATHLET und das strömungsformabhängige Kondensationsmodell verwendet.

|                |      |        |        |       |
|----------------|------|--------|--------|-------|
| ----- LP1-UH   |      |        |        |       |
| @              |      |        |        |       |
| @              | SBO0 | ANAMO  | SEO0   | IARTO |
|                | 0.0  | 'LP1'  | 0.900  | 2     |
|                | 0.0  | 'LP2'  | 0.000  | 2     |
|                | 0.0  | 'C1'   | 4.067  | 2     |
|                | 0.0  | 'UP1A' | 0.000  | 2     |
|                | 0.0  | 'UP1B' | 0.300  | 2     |
|                | 0.0  | 'UP3'  | 0.000  | 2     |
|                | 0.0  | 'UP4'  | 1.390  | 2     |
|                | 0.0  | 'UH'   | 0.000  | 2     |
| @              |      |        |        |       |
| ----- C2       |      |        |        |       |
| @              |      |        |        |       |
| @              | SBO0 | ANAMO  | SEO0   | IARTO |
|                | 0.0  | 'LP2'  | 0.000  | 2     |
|                | 0.0  | 'C2'   | 4.067  | 2     |
|                | 0.0  | 'UP1A' | 0.000  | 2     |
| @              |      |        |        |       |
| ----- LP1-DC3  |      |        |        |       |
| @              |      |        |        |       |
| @              | SBO0 | ANAMO  | SEO0   | IARTO |
|                | 0.0  | 'LP2'  | 0.000  | 2     |
|                | 0.0  | 'DC1'  | 5.810  | 2     |
|                | 0.0  | 'DC3'  | 0.000  | 2     |
|                | 0.0  | 'DC4'  | 1.330  | 2     |
| @              |      |        |        |       |
| ----- LP1-DC5  |      |        |        |       |
| @              |      |        |        |       |
| @              | SBO0 | ANAMO  | SEO0   | IARTO |
|                | 0.0  | 'LP2'  | 0.000  | 2     |
|                | 0.0  | 'DC2'  | 5.810  | 2     |
|                | 0.0  | 'DC5'  | 0.000  | 2     |
|                | 0.0  | 'DC6'  | 1.330  | 2     |
| @              |      |        |        |       |
| ----- DC3-SGIL |      |        |        |       |
| @              |      |        |        |       |
| @              | SBO0 | ANAMO  | SEO0   | IARTO |
|                | 0.0  | 'DC3'  | 0.000  | 2     |
|                | 0.0  | 'ICL'  | 17.583 | 2     |
|                | 0.0  | 'SGIL' | 18.450 | 2     |
|                | 0.0  | 'IHL'  | 5.8665 | 2     |
|                | 0.0  | 'UP3'  | 0.000  | 2     |

**Tabelle 4.3 Aufteilung der Prioritätsketten**

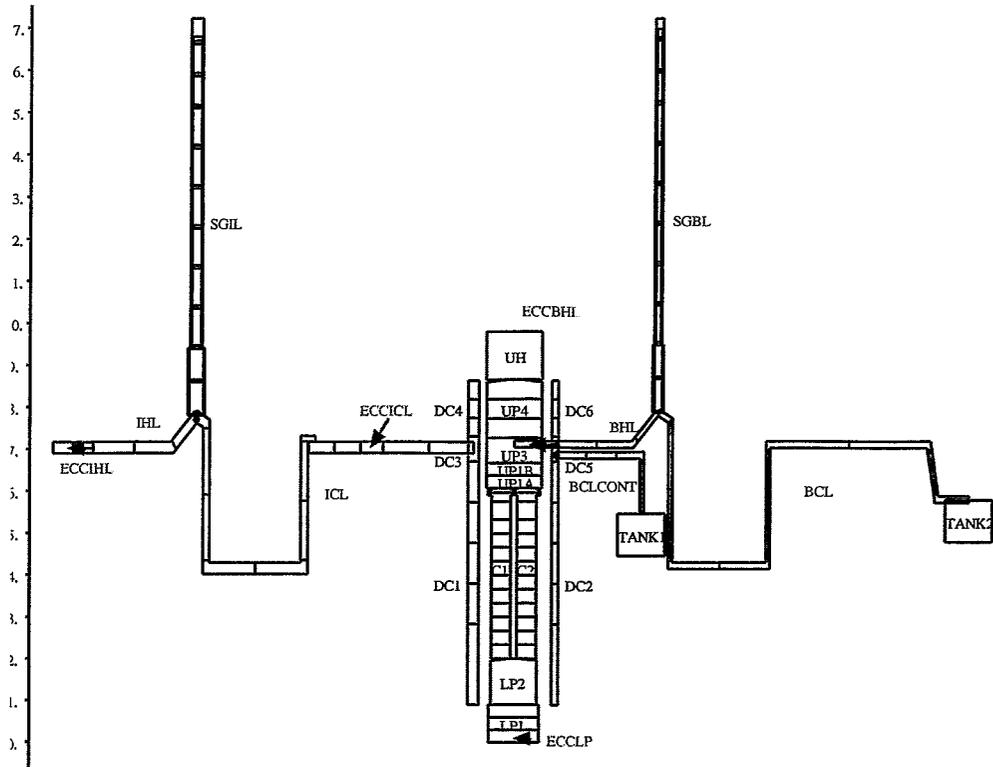
```

----- DC5-TANK1
@
@ SBO0      ANAMO      SEO0      IARTO
  0.0      'DC5'      0.000    2
  0.0      'BCLCONT'  4.779    2
  0.0      'TANK1'    0.000    2
@
----- UP3-SGBL
@
@ SBO0      ANAMO      SEO0      IARTO
  0.0      'UP3'      0.000    2
  0.0      'BHL'      5.8665   2
  0.0      'SGBL'     18.400   2
  0.0      'BCL'      19.556   2
  0.0      'TANK2'    0.000    2
@
----- DC1-DC2
@
@ SBO0      ANAMO      SEO0      IARTO
  0.0      'DC1'      0.000    2
  0.0      'DC1-DC2'  1.500    2
  0.0      'DC2'      0.000    2
@
----- DC4-DC6
@
@ SBO0      ANAMO      SEO0      IARTO
  0.0      'DC4'      0.000    2
  0.0      'DC4-DC6'  1.500    2
  0.0      'DC6'      0.000    2
@
----- ECC-ICL
@
@ SBO0      ANAMO      SEO0      IARTO
  0.0      'ICL'      4.060    2
  1.0      'ECCICL'  0.0      2
@
----- ECC-IHL
@
@ SBO0      ANAMO      SEO0      IARTO
  5.8665   'IHL'      5.299    2
  1.0      'ECCIHL'   0.0      2
@
----- ECC-BHL
@
@ SBO0      ANAMO      SEO0      IARTO
  0.000    'BHL'      0.5675   2
  1.0      'ECCBHL'  0.0      2
@
----- ECC-LP
@
@ SBO0      ANAMO      SEO0      IARTO
  0.0      'LP1'      0.225    2
  1.0      'ECCLP'   0.0      2

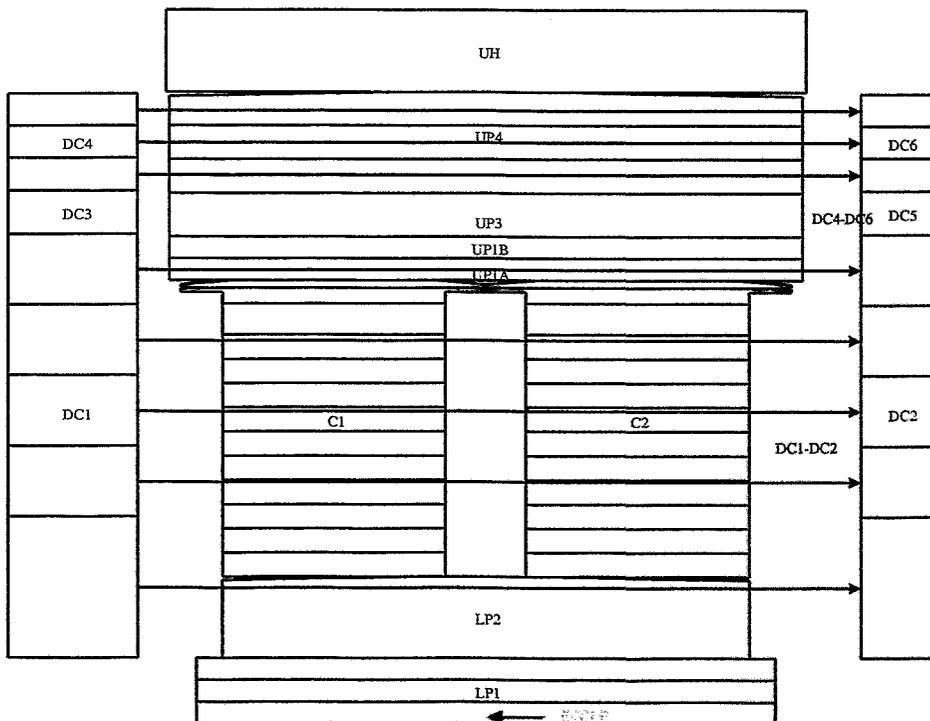
```

(nur bei Experiment C2-04)

**Tabelle 4.3 Aufteilung der Prioritätsketten**



**Bild 4.5: Nodalisierung der Versuchsanlage CCTF**



**Bild 4.6: Nodalisierung des Reaktormodells**

### 4.3 Rechnungen mit ATHLET Mod 1.2 Cycle C und konstanten Randbedingungen für das Containment

Die hier vorgestellten Rechnungen wurden mit ATHLET Mod 1.2 Cycle C durchgeführt. Die Transiente startet bei  $t=0$  s. Zu Beginn liegt der Primärdruck bei 0.6 MPa und der Druck im Containment bei 0.3 MPa. Mit Beginn der Transiente wird die Reaktorleistung entsprechend den experimentellen Randbedingungen hochgefahren, vgl. Bild 4.10. Bei  $t=83$  s werden die Ventile zu den Containment Tanks geöffnet. Zeitgleich beginnt der Leistungsabfall im Reaktor und es wird die Notkühleinspeisung in die heißen Stränge initiiert. Mit einer Verzögerung von 5 s startet die Notkühleinspeisung in die kalten Stränge. Die Niederdruckeinspeisung wird wie im Experiment bei  $t=174$  s gestartet.

In Bild 4.7 ist der Druckverlauf im Oberen und Unteren Plenum dargestellt. Bild 4.8 zeigt den Druck in den Containment Tanks. In der Rechnung wurden Druck und Temperatur in den Containment Tanks durch konstante Randbedingungen als "Time Dependent Volume" simuliert.

Die Erhöhung der Reaktorleistung führt bis  $t=83$  s zu einem Druckanstieg im Primärkreis. Mit dem Öffnen der Ventile kommt es zu einer starken Druckentlastung. Die Druckabsenkung im Primärkreis wird infolge sehr hoher Kondensationsraten mit beginnender Notkühleinspeisung von ATHLET überschätzt. Die Massenströme der Notkühleinspeisung in die heißen und kalten Stränge zeigt Bild 4.9. Durch den zeitlich konstant vorgegebenen Druck in den Containment Tanks von 0.3 MPa liegt der Primärdruck im weiteren Verlauf der Transiente höher als im Experiment.

Ein wesentlicher Aspekt bei der Nachrechnung des Experiments ist das Verhalten der Wiederbenetzungsfront. Bei der hier vorliegenden kombinierten Notkühleinspeisung wird das Vordringen des Notkühlwassers aus den heißen Strängen durch die starke Dampfgegenströmung im oberen Plenum teilweise behindert. Der zeitliche Verlauf der Wiederbenetzungsfront kann im Experiment durch die Differenzdruckmessungen im Reaktormodell nachgewiesen werden. Die Bilder 4.11 bis 4.14 geben einen Vergleich von experimentellen Daten und Ergebnissen der ATHLET Rechnung.

Bild 4.11 zeigt den Differenzdruck im Downcomer. In der ATHLET Rechnung bleibt der Downcomer in der Anfangsphase länger mit Dampf gefüllt. Das Auffüllen mit Notkühlwasser erfolgt hier verzögert, das Maximum wird ca. 80 s später wie im Experiment erreicht. Im Gegensatz zur Rechnung bleibt der Downcomer im Experiment bis zum Ende mit Wasser gefüllt.

In Bild 4.12 ist der Differenzdruck im Oberen Plenum dargestellt. Die Ergebnisse von Rechnung und Experiment zeigen hier eine gute Übereinstimmung. In der Phase bis ca. 250 s steigt der Differenzdruck im Mittel allmählich auf sein Maximum. Diese Phase ist durch Oszillationen gekennzeichnet, wobei Notkühlwasser im Oberen Plenum akkumuliert wird und mehrfach zum Reaktorkern durchbricht. Dieses Verhalten ist anhand der berechneten Dampfgehalte im Oberen Plenum und im oberen Bereich des Reaktorkerns für beide Kernkanäle in Bild 4.15 und 4.16 dargestellt. In der Randzone (C2) mit geringerer Leistung erfolgt der Durchbruch von Notkühlwasser bereits bei 230 s, dagegen im Zentrum mit höherer Leistung (C1) erst bei 420 s.

Die Bilder 4.13 und 4.14 zeigen den Differenzdruck im Reaktor zwischen Unterem Plenum und Kernoberkante. Ähnlich wie im Downcomer wird auch hier das Vordringen des Notkühlwassers später als im Experiment nachgewiesen. Die Randzone des Reaktorkerns (C2) wird schneller geflutet als das Zentrum (C1). Durch die geringere Leistung im Randbereich kann das Notkühlwasser schneller vordringen. Die Gegenstrombegrenzung währt hier bis ca. 250 s, im Zentrum dagegen bis ca. 450 s (Bild 4.15 und 4.16). Nach etwa 600 s sinkt der Höhenstand im Kern analog zum Experiment wieder ab. Bis zum Ende der Transiente steigt der Höhenstand wieder auf seinen Maximalwert an.

Durch die Ausbreitung der Wiederbenetzungsfront im Reaktormodell werden die Brennelemente gekühlt. Ein Vergleich der berechneten Brennstabtemperaturen und der Temperaturverteilung im Reaktormodell mit den experimentellen Daten liefert wichtige Aussagen zur Qualität der Nachrechnungen mit ATHLET.

An der CCTF Versuchsanlage wurde eine radiale und axiale Leistungsverteilung im Reaktorkern simuliert. Die experimentellen Daten liefern hier sehr detaillierte Informationen für jedes einzelne Brennelement in verschiedenen axialen Positionen.

Die Zweikanal-Modellierung des Kerns in ATHLET erlaubt eine gute Näherung für die Vorgabe radialer Asymmetrien in der Leistungsverteilung des Kerns. Rückwirkungen eines asymmetrischen Verhaltens der vier Schleifen im auf das Geschehen im Reaktormodell waren jedoch in der zu betrachtenden Phase des Tests, wie die Analyse der experimentellen Daten zeigte, nicht zu beobachten. Die Differenzdruckmessungen und die Temperaturmessungen in den vier Quadranten des Downcomer liefern keine signifikanten Abweichungen voneinander.

In Bild 4.17 und 4.18 sind gemessene und berechnete Fluidtemperaturen im oberen bzw. unteren Bereich des Downcomer dargestellt. Die Bilder 4.19 bis 4.22 zeigen die Dampf- bzw. Fluidtemperaturen im Reaktor in unterschiedlicher axialer Position für die beiden in ATHLET modellierten Kernkanäle. Den berechneten Temperaturen sind die experimentellen Ergebnisse für zwei unterschiedliche radiale Positionen gegenübergestellt. Für die Kernmitte wurde das Brennelement Nr. 22 und für den Randbereich das Brennelement Nr. 06 gewählt.

Die Messungen der Brennstabtemperaturen erfolgten im Experiment sowohl in unterschiedlichen Höhen (vgl. Tabelle 4.4) als auch in unterschiedlicher radialer Position. Die Bilder 4.23 bis 4.26 zeigen einen Vergleich von berechneten Brennstabtemperaturen mit experimentellen Werten für drei unterschiedliche axiale Positionen (unterer, mittlerer und oberer Kernbereich). Die berechneten Temperaturen für den mittleren Kernkanal (C1) sind im Vergleich zu den Brennelementen Nr. 32 und Nr. 29 dargestellt. Für den Randkanal (C2) werden die berechneten Temperaturen mit den Brennelementen Nr. 03 und Nr. 11 verglichen. Die gemessenen Temperaturen zeigen deutlich, daß die Wiederbenetzungsfront am Rand schneller voranschreitet als in der Mitte des Reaktorkerns. Dieser Effekt wird durch die ATHLET Rechnung im Rahmen der Zweikanal-Nodalisierung sehr gut reproduziert.

Generell kann festgestellt werden, daß die berechneten Temperaturverläufe gut mit den experimentellen Daten übereinstimmen. Die Temperaturen im Downcomer und im Reaktorkern spiegeln die experimentellen Ergebnisse im Verlauf der Transiente gut

wieder. Die Wiederbenetzung der Brennelemente und damit die Begrenzung der maximalen Brennstabtemperaturen werden sowohl für das Zentrum als auch für den Randbereich des Reaktorkerns von ATHLET in guter Übereinstimmung mit dem Experiment berechnet.

Den mit ATHLET berechneten Verlauf der Wiederbenetzungsfront zeigen die Bilder 4.27 und 4.28 für beide Kernkanäle. Durch die geringere Leistung im Randbereich des Reaktorkerns schreitet die Wiederbenetzungsfront im Randkanal (CORE2) deutlich schneller voran. In den Bildern 4.29 und 4.30 sind die mit ATHLET berechneten Wärmeübergangskoeffizienten für die Brennstäbe im mittleren Kernkanal und im Randkanal dargestellt. Die axialen Positionen entsprechen den Temperaturmessungen in Bild 4.23 bis 4.26, vgl. Tabelle 4.4.

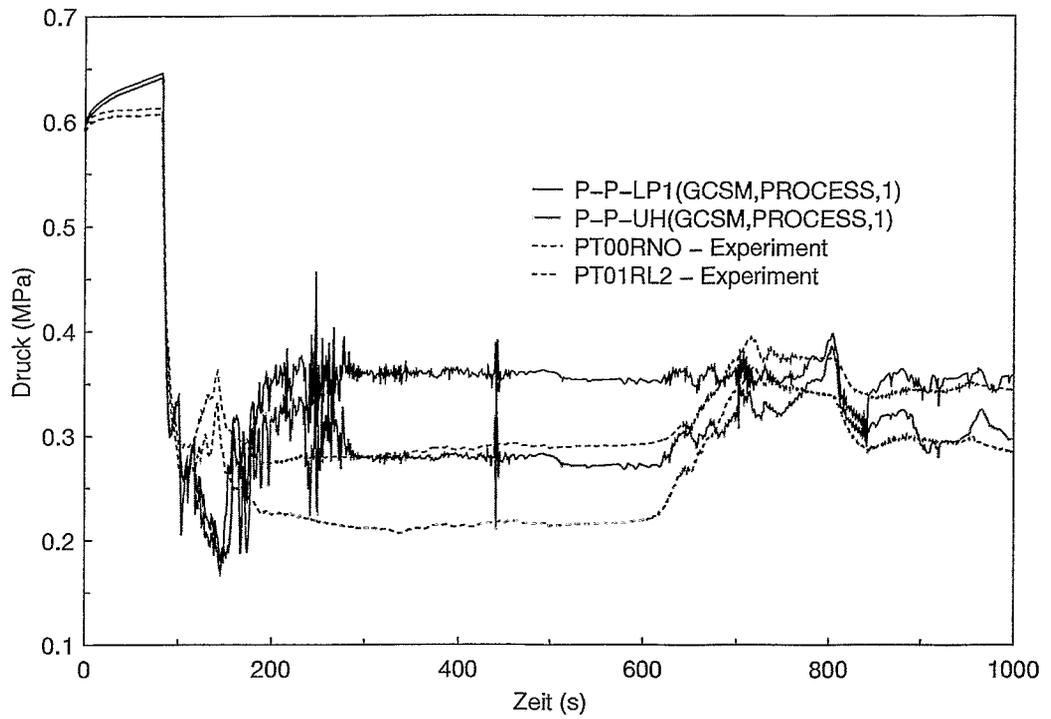
Bei  $t=498$  s ist die Druckspeichereinspeisung beendet. Von diesem Zeitpunkt an ist nur noch die Niederdruckeinspeisung wirksam. Sowohl das Experiment als auch die ATHLET Rechnung zeigen, daß es ab etwa 600 s zu einem Absinken des Reaktorhöhenstandes kommt (vgl. Bild 4.13 und 4.14). In dieser Phase steigen die Brennstabtemperaturen erneut an (Bild 4.23 bis 4.26). Bis zum Ende der Transiente wird der Reaktorkern durch die Niederdruckeinspeisung wieder aufgefüllt.

Wie der Vergleich zwischen Rechnung und Experiment zeigt, können die sicherheitstechnisch relevanten Aussagen des Experiments durch die ATHLET Rechnung reproduziert werden.

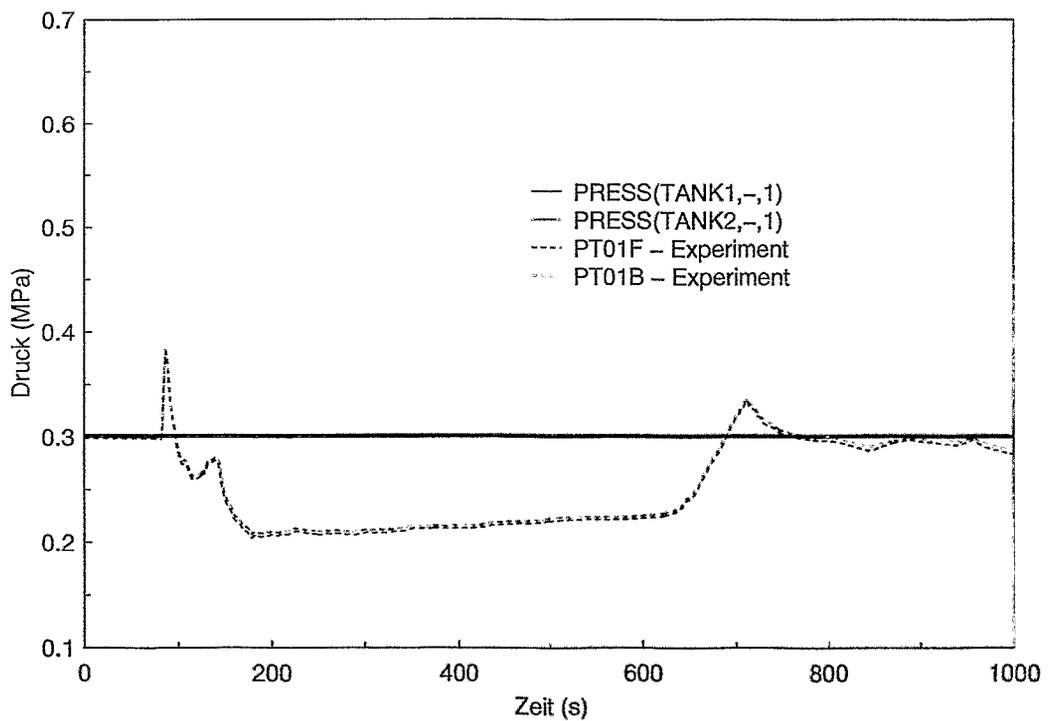
| Meßwert                             |           | Höhe über Kernunterkante |
|-------------------------------------|-----------|--------------------------|
| Dampf-<br>temperaturen              | TE**SC5   | 1.015 m                  |
|                                     | TE**SCA   | 3.050 m                  |
| Fluid-<br>temperaturen              | TE**N33   | 0.380 m                  |
|                                     | TE**N3A   | 3.050 m                  |
| Brennstab-<br>temperaturen          | TE**Y13   | 0.380 m                  |
|                                     | TE**Y17   | 1.830 m                  |
|                                     | TE**Y1A   | 3.050 m                  |
| Wärmeüber-<br>gangskoeffi-<br>zient | HTCR - 3  | 0.380 m                  |
|                                     | HTCR - 11 | 1.830 m                  |
|                                     | HTCR - 19 | 3.050 m                  |

**Tabelle 4.4: Axiale Positionen der Meßstellen im Reaktorkern**

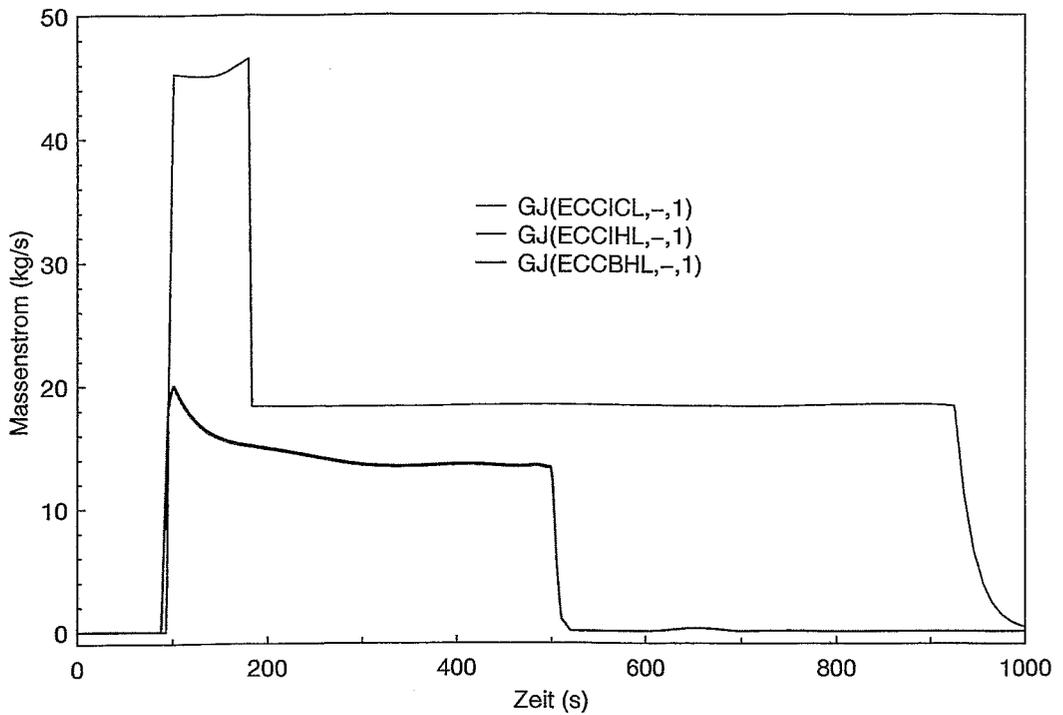
\*\* radiale Position des Brennelements / Kühlkanals (vgl. Bild 3.4)



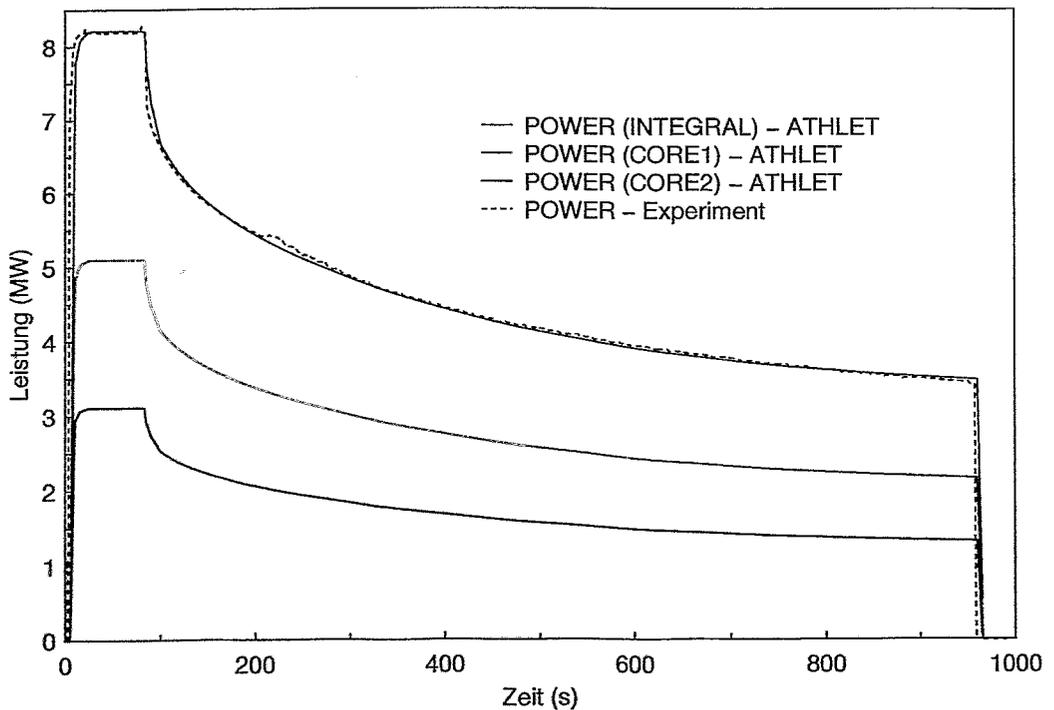
**Bild 4.7: Druck im Unteren Plenum (PT00RNO) und Oberen Plenum (PT01RL2)**



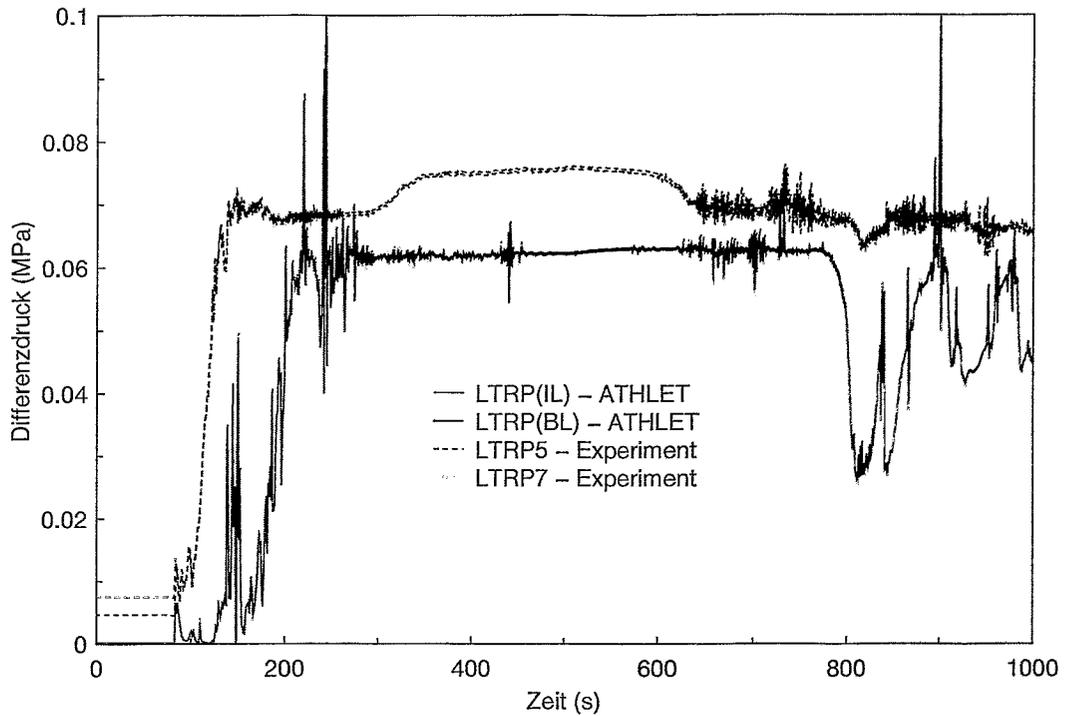
**Bild 4.8: Druck im Containment Tank 1 (PT01F) und Tank 2 (PT01B)**



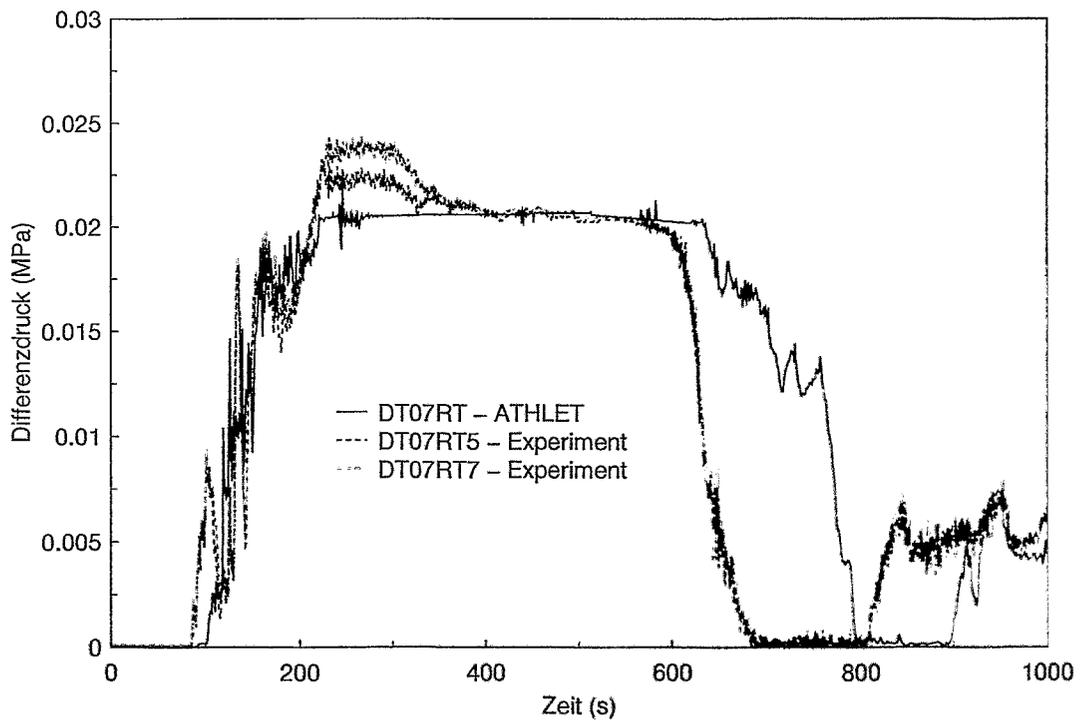
**Bild 4.9:** In der Rechnung vorgegebene Notkühleinpeisung in den intakten kalten Strang (ECCICL) und in den heißen Strang der intakten und der Leckschleife (ECCIHL und ECCBHL) - vgl. Bild 4.3 und 4.4 für das Experiment



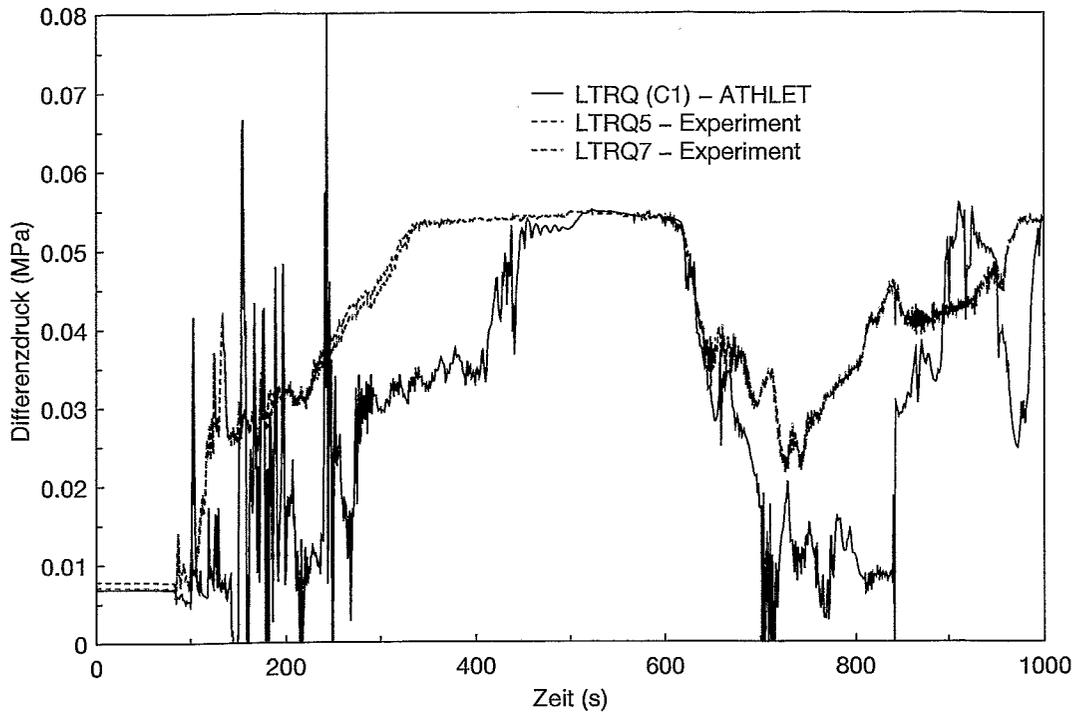
**Bild 4.10:** Integrale Reaktorleistung und Leistung in den beiden Kernkanälen



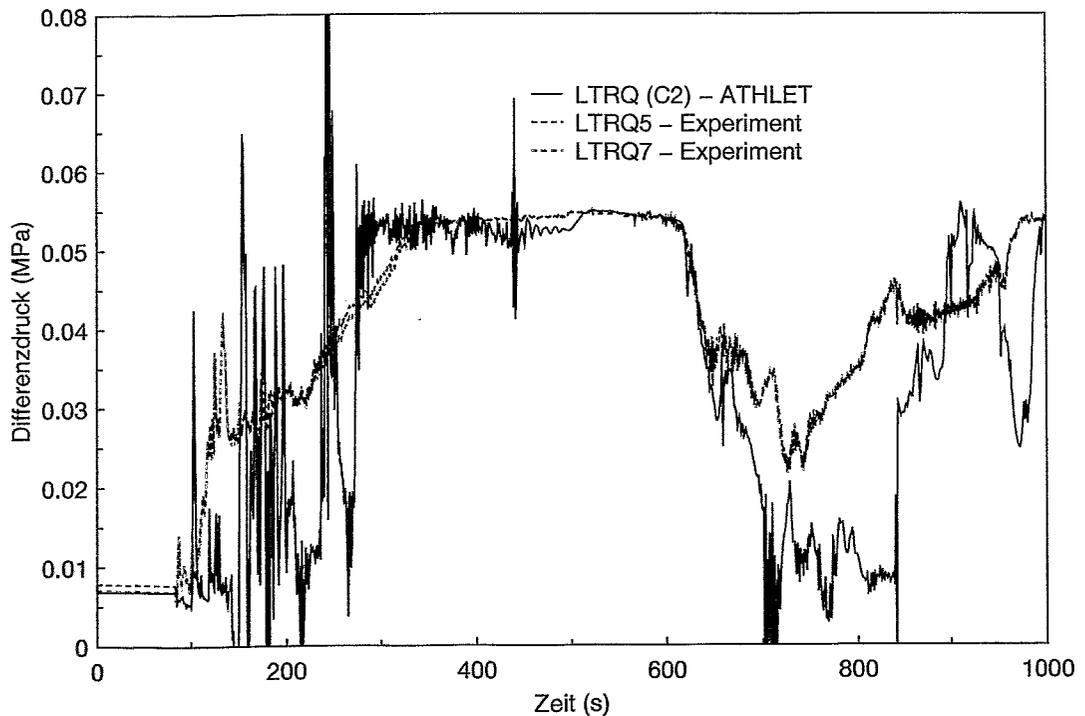
**Bild 4.11: Differenzdruck im Downcomer (ATHLET - intakte Schleife (IL) und Leckschleife (BL), Experiment - Quadrant Nr. 5 und 7)**



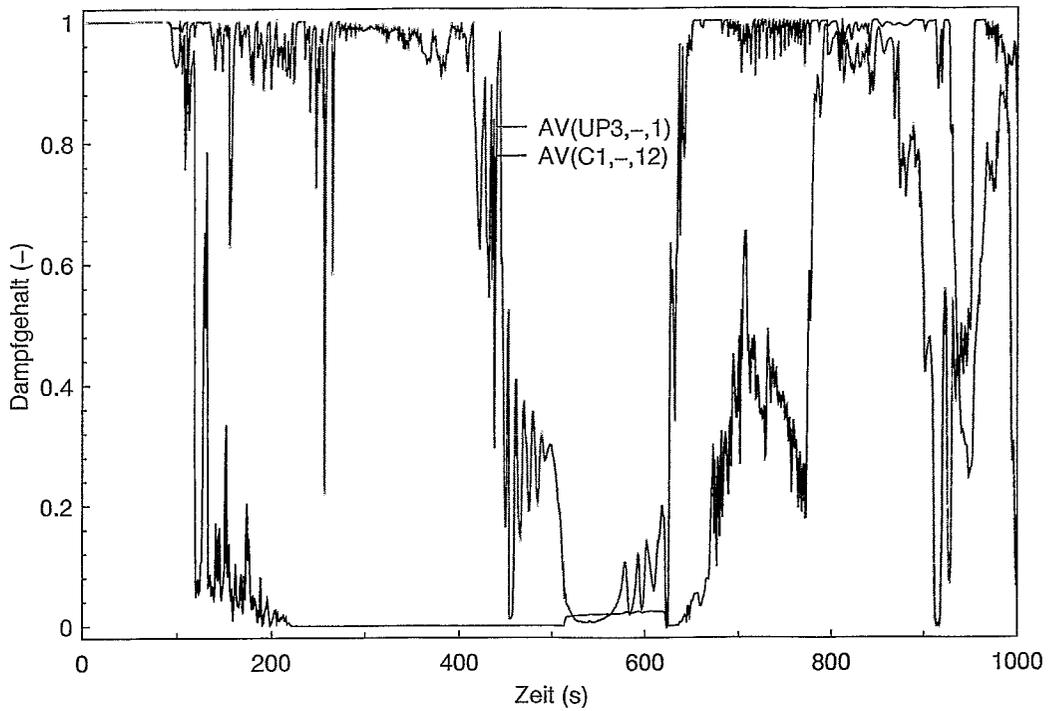
**Bild 4.12: Differenzdruck im Oberen Plenum (Experiment - Quadrant Nr. 5 und 7)**



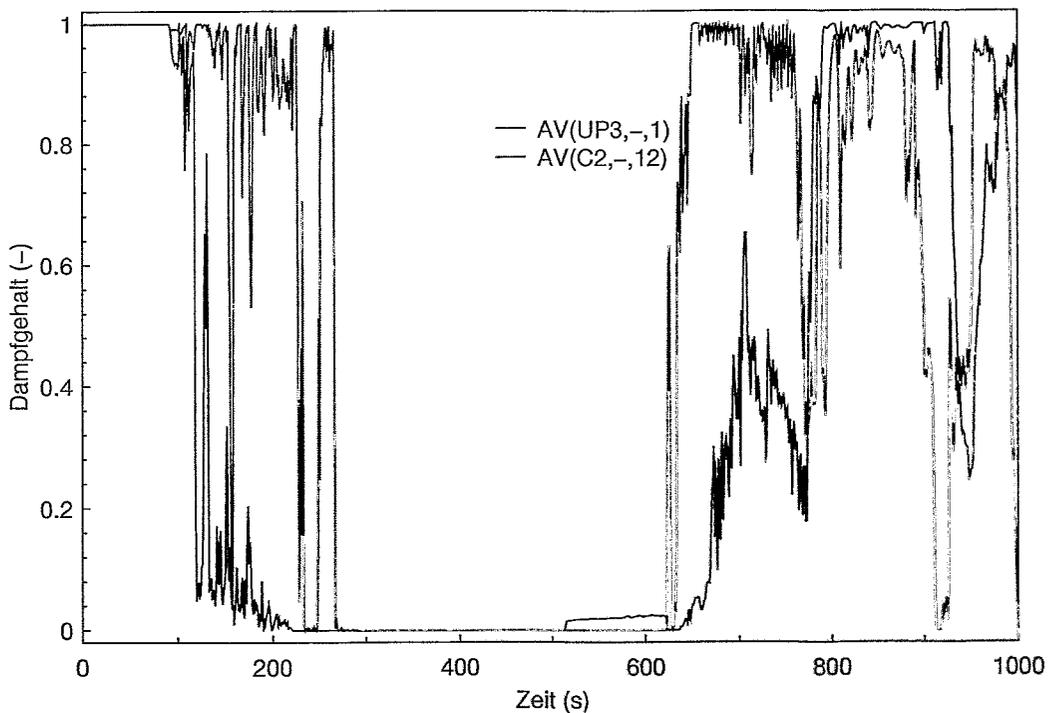
**Bild 4.13: Differenzdruck im Reaktor zwischen Unterem Plenum und Kernoberkante (ATHLET - Core 1, Experiment - Quadrant Nr. 5 und 7)**



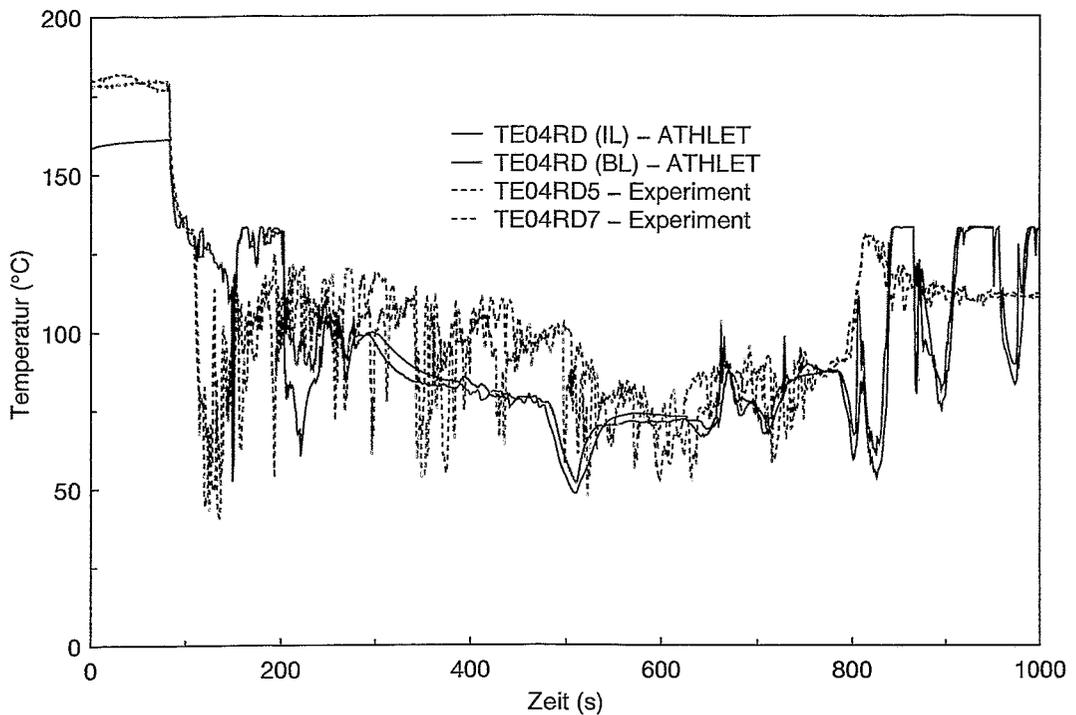
**Bild 4.14: Differenzdruck im Reaktor zwischen Unterem Plenum und Kernoberkante (ATHLET - Core 2, Experiment - Quadrant Nr. 5 und 7)**



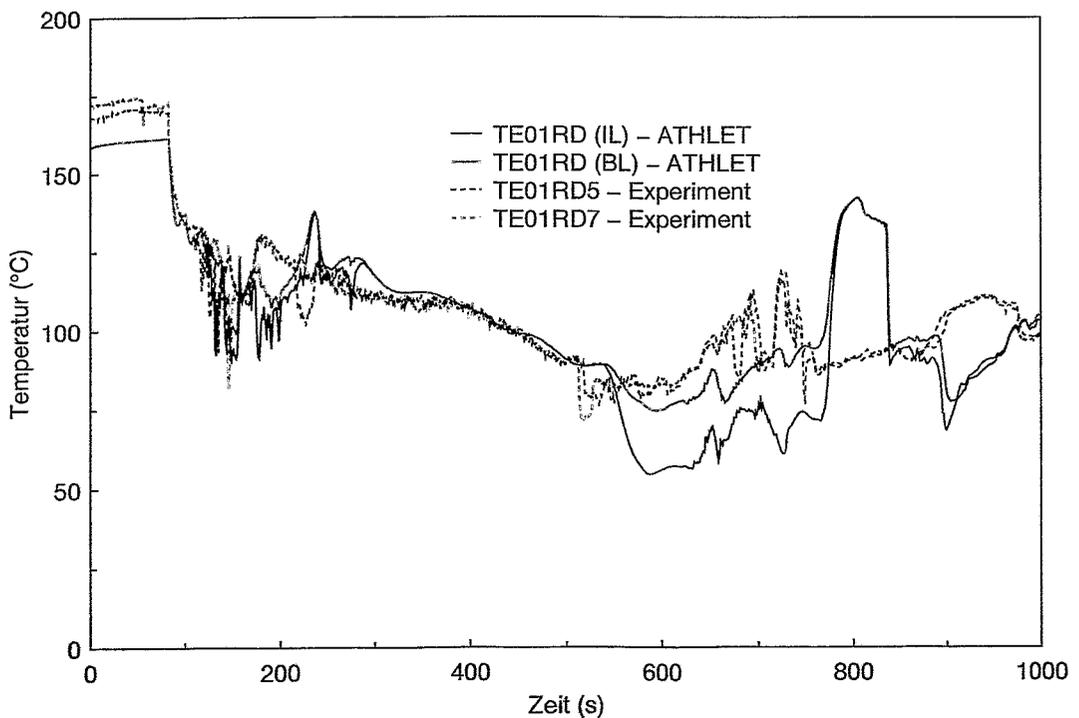
**Bild 4.15: Mit ATHLET berechneter Dampfgehalt im oberen Teil des Reaktorkerns (C1 - mittlerer Kernkanal) und im Oberen Plenum (UP3)**



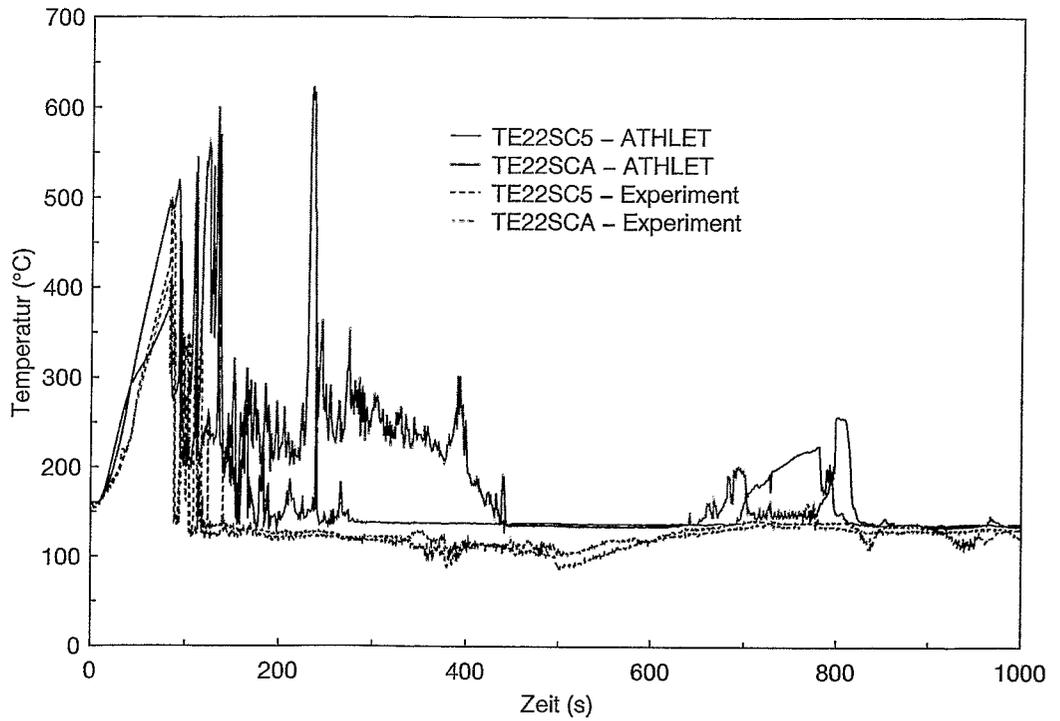
**Bild 4.16: Mit ATHLET berechneter Dampfgehalt im oberen Teil des Reaktorkerns (C2 - Randkanal) und im Oberen Plenum (UP3)**



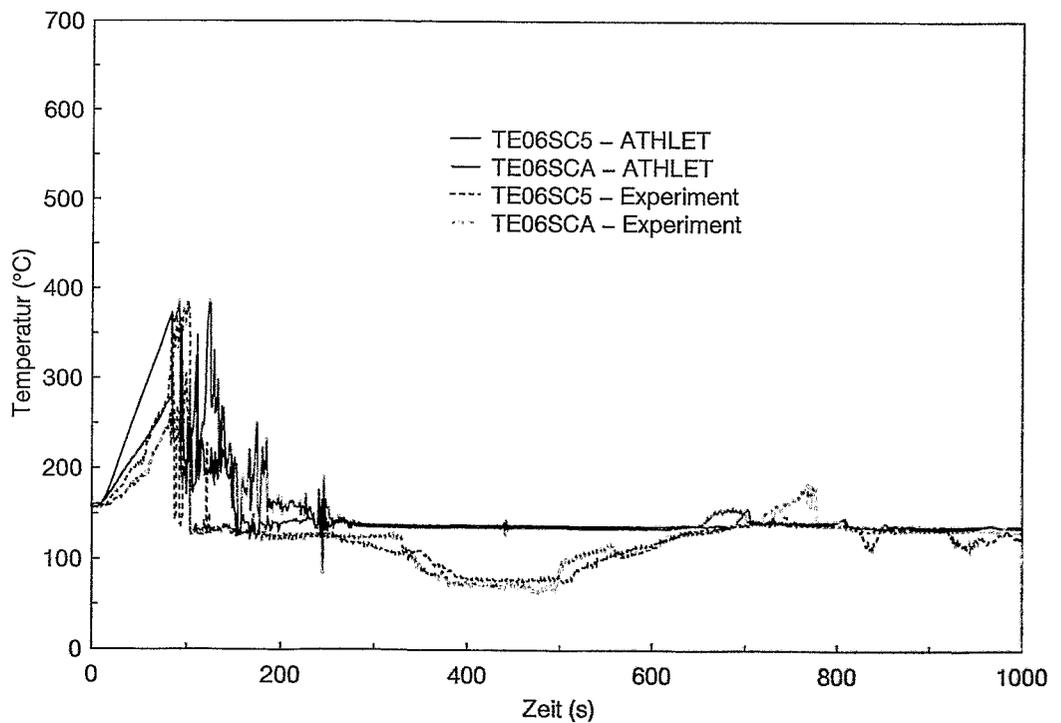
**Bild 4.17: Fluidtemperaturen im oberen Teil des Downcomer (ATHLET - intakte Schleife (IL) und Leckschleife (BL), Experiment - Quadrant Nr. 5 und 7)**



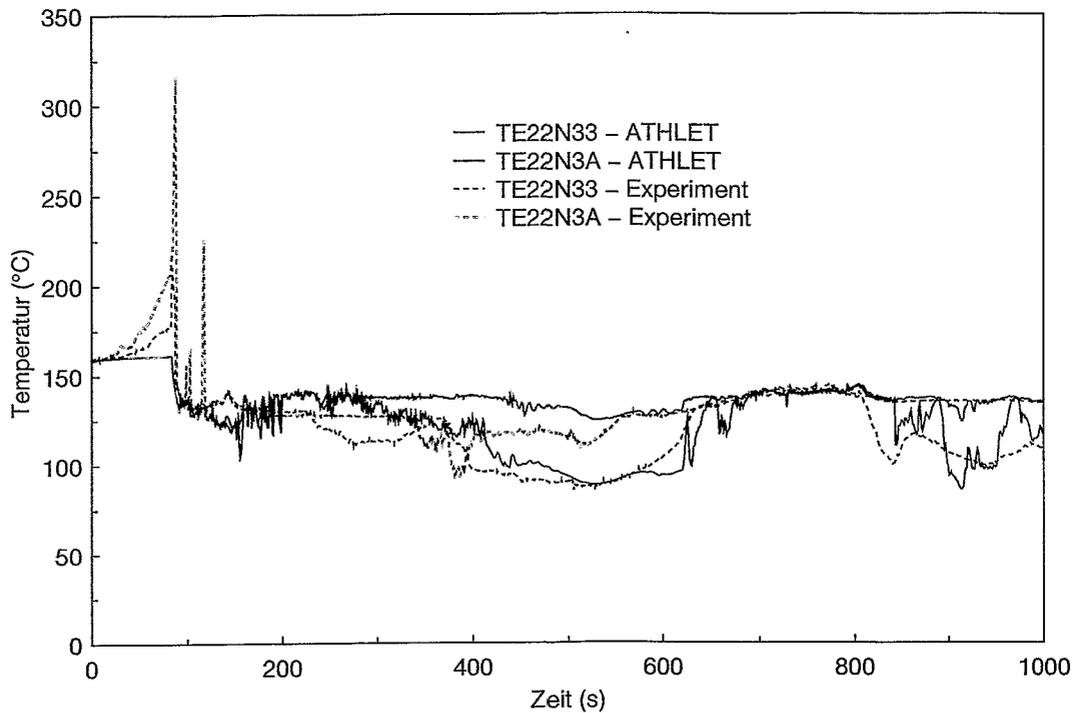
**Bild 4.18: Fluidtemperaturen im unteren Teil des Downcomer (ATHLET - intakte Schleife (IL) und Leckschleife (BL), Experiment - Quadrant Nr. 5 und 7)**



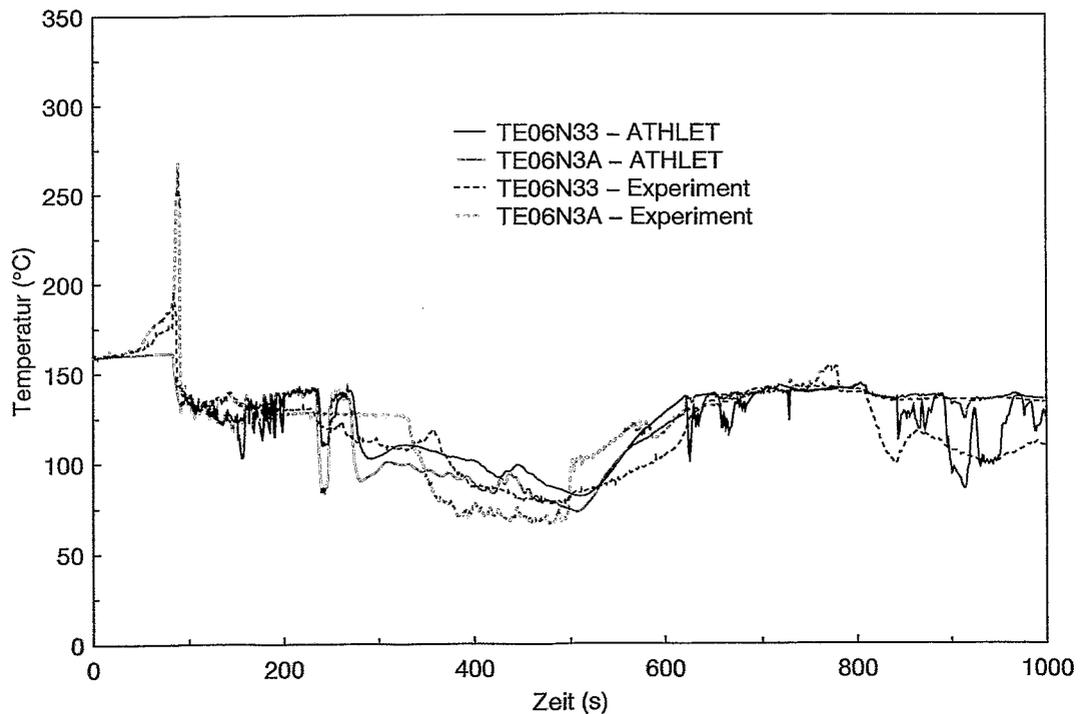
**Bild 4.19: Dampftemperaturen im unteren Bereich (SC5) und oberen Bereich (SCA) des Reaktorkerns (ATHLET - C1, Experiment - Brennelement Nr. 22)**



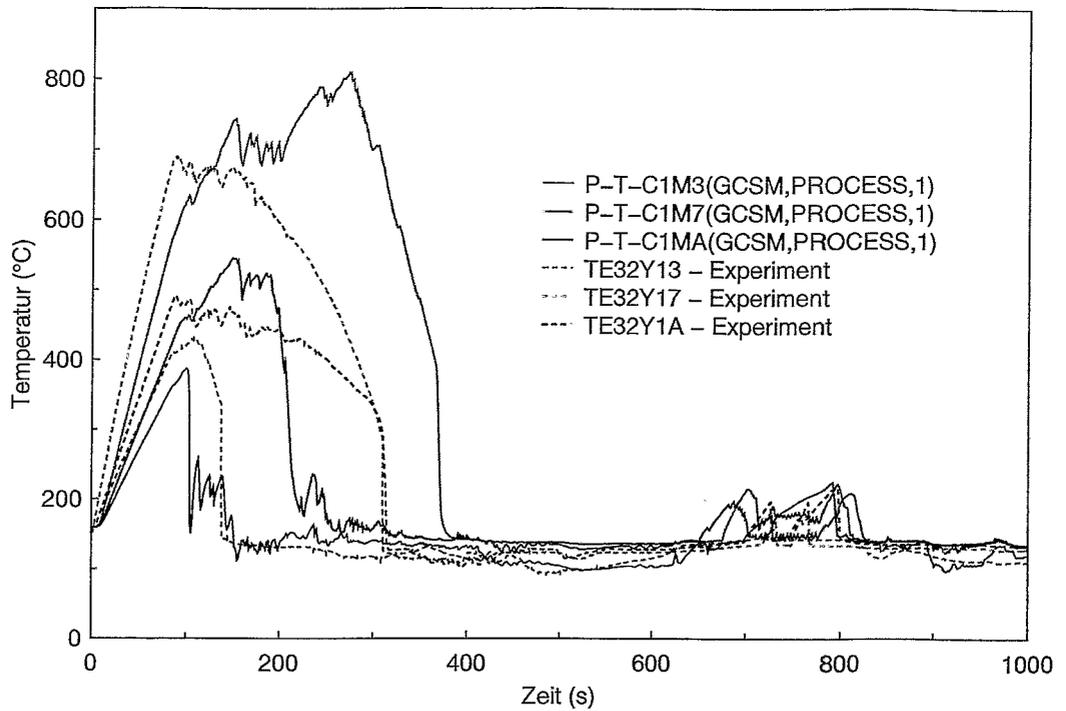
**Bild 4.20: Dampftemperaturen im unteren Bereich (SC5) und oberen Bereich (SCA) des Reaktorkerns (ATHLET - C2, Experiment - Brennelement Nr. 06)**



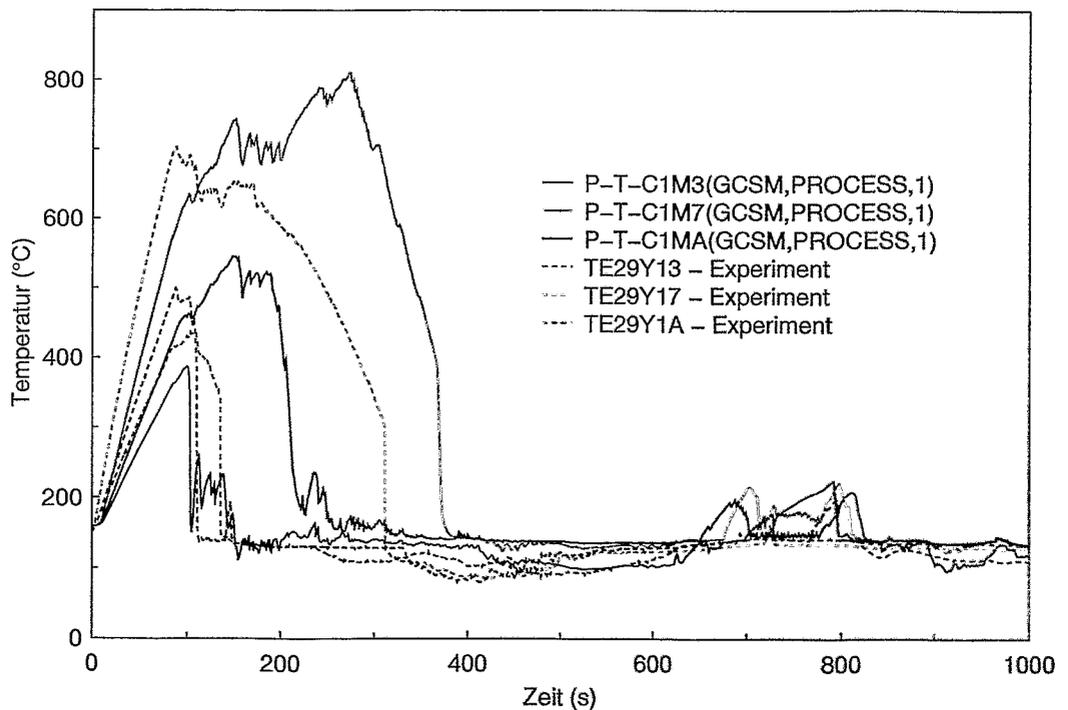
**Bild 4.21: Fluidtemperaturen im unteren Bereich (N33) und oberen Bereich (N3A) des Reaktorkerns (ATHLET - C1, Experiment - Brennelement Nr. 22)**



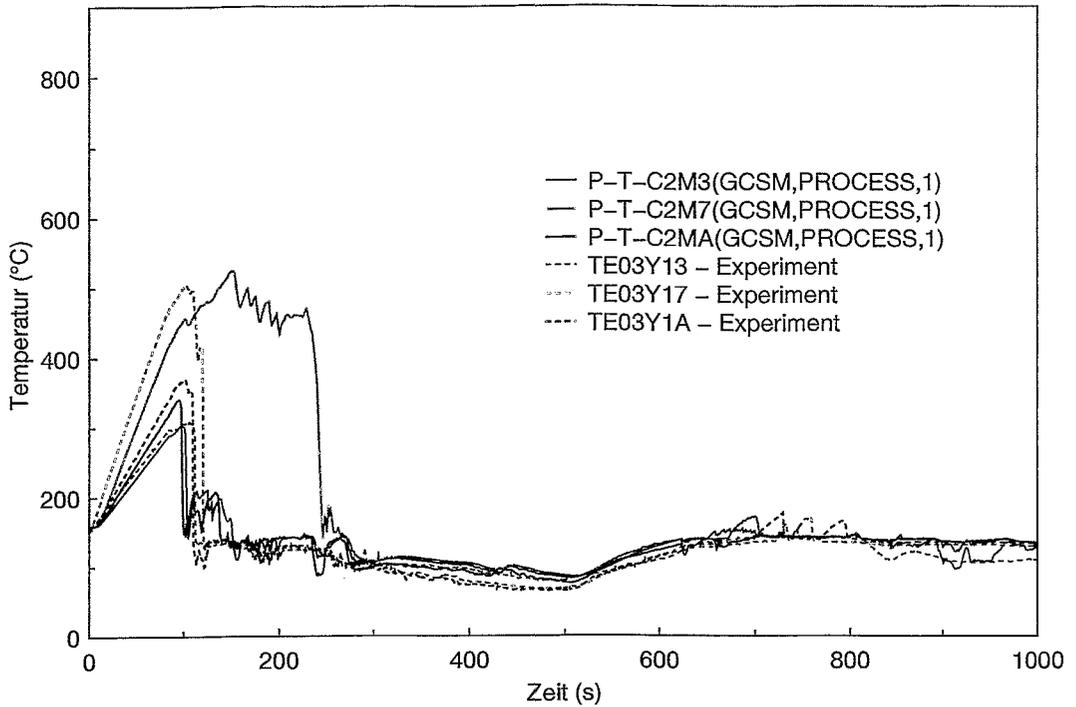
**Bild 4.22: Fluidtemperaturen im unteren Bereich (N33) und oberen Bereich (N3A) des Reaktorkerns (ATHLET - C2, Experiment - Brennelement Nr. 06)**



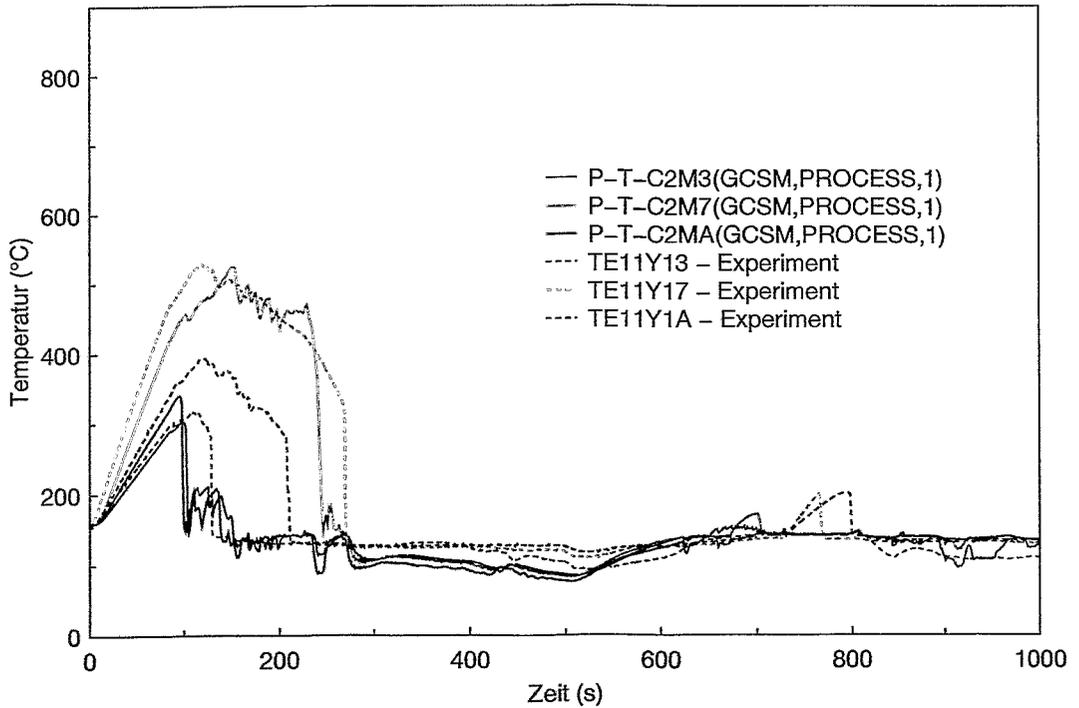
**Bild 4.23: Brennstabtemperaturen im unteren Bereich (Y13), in der Mitte (Y17) und im oberen Bereich (Y1A) des Reaktorkerns (ATHLET - C1, Experiment - Brennelement Nr. 32)**



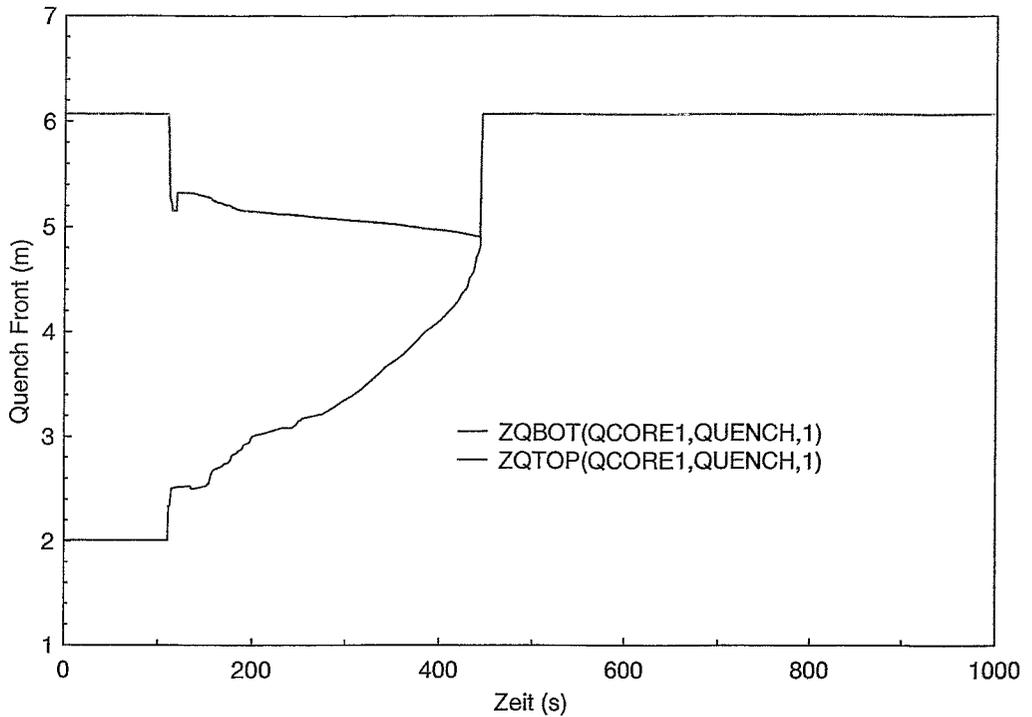
**Bild 4.24: Brennstabtemperaturen im unteren Bereich (Y13), in der Mitte (Y17) und im oberen Bereich (Y1A) des Reaktorkerns (ATHLET - C1, Experiment - Brennelement Nr. 29)**



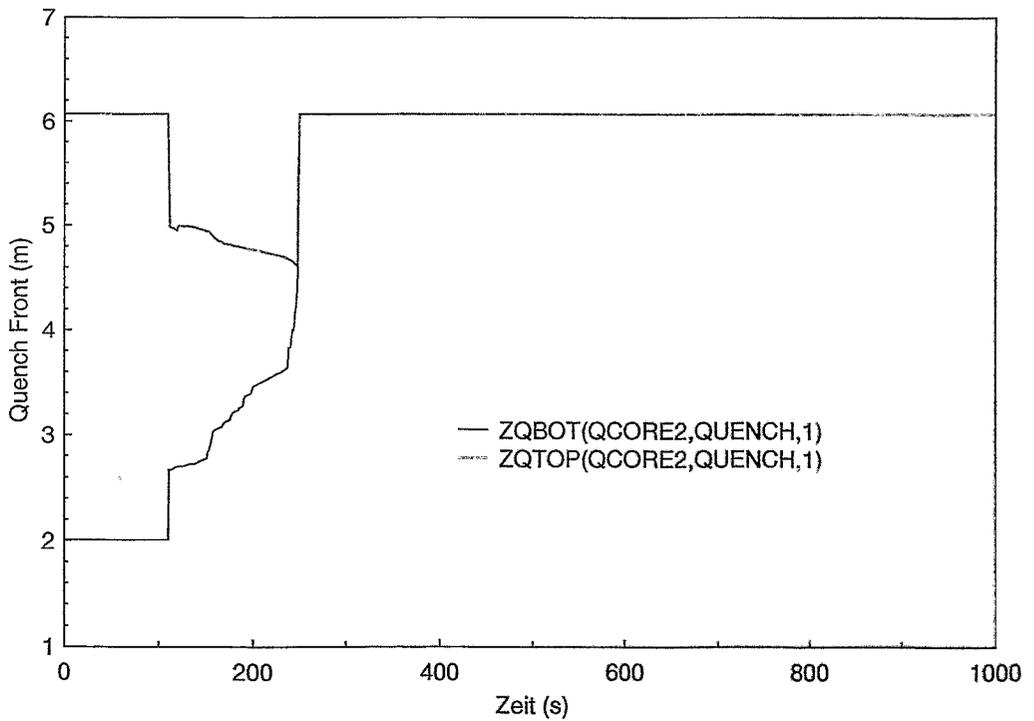
**Bild 4.25: Brennstabtemperaturen im unteren Bereich (Y13), in der Mitte (Y17) und im oberen Bereich (Y1A) des Reaktorkerns (ATHLET - C2, Experiment - Brennelement Nr. 03)**



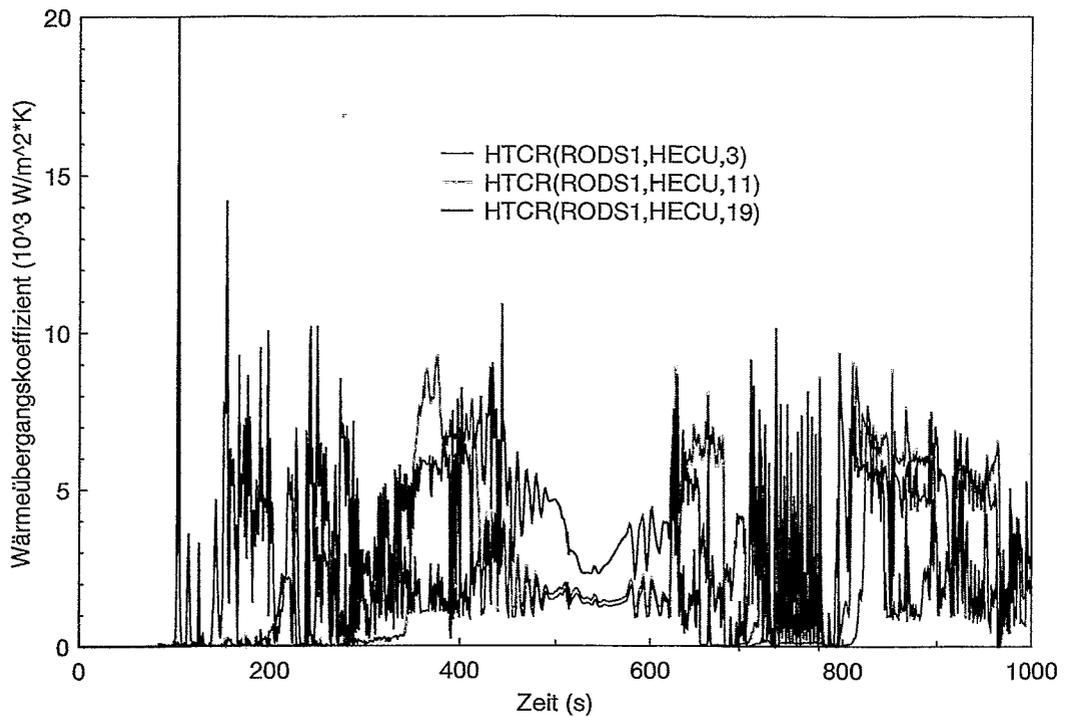
**Bild 4.26: Brennstabtemperaturen im unteren Bereich (Y13), in der Mitte (Y17) und im oberen Bereich (Y1A) des Reaktorkerns (ATHLET - C2, Experiment - Brennelement Nr. 11)**



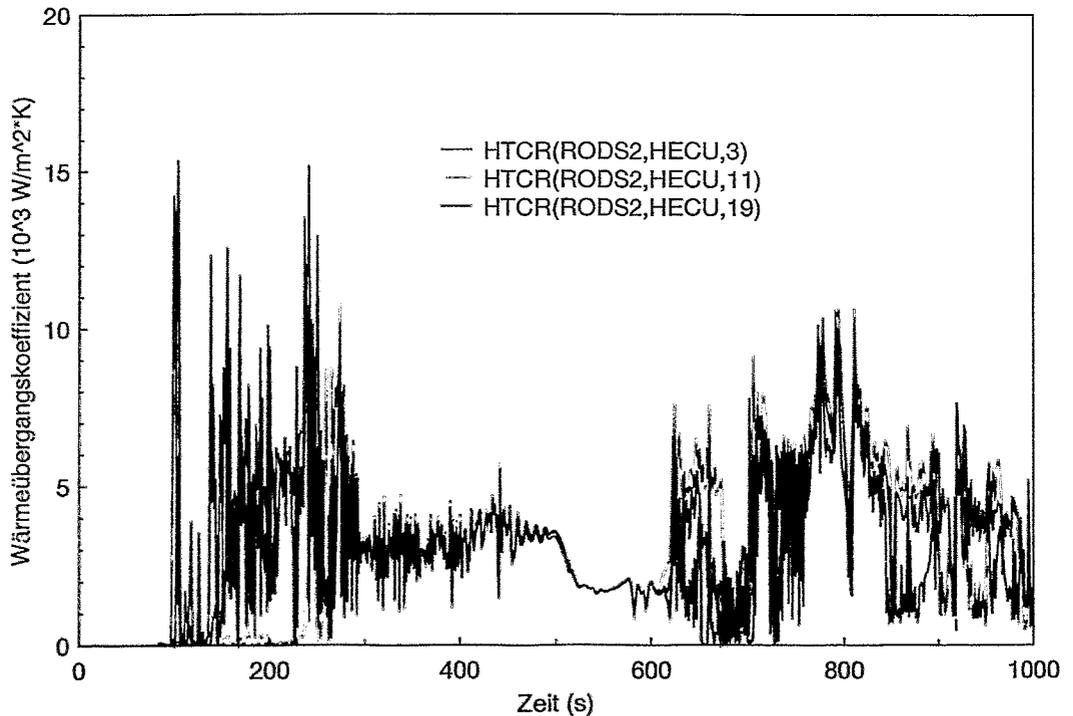
**Bild 4.27: Verlauf der mit ATHLET berechneten Quench Front im Zentrum des Reaktorkerns (CORE1)**



**Bild 4.28: Verlauf der mit ATHLET berechneten Quench Front in der Randzone des Reaktorkerns (CORE2)**



**Bild 4.29: Mit ATHLET berechnete Wärmeübergangskoeffizienten (unterer Teil, Mitte und oberer Teil der Brennelemente) - Zentrum (RODS1)**



**Bild 4.30: Mit ATHLET berechnete Wärmeübergangskoeffizienten (unterer Teil, Mitte und oberer Teil der Brennelemente) - Randzone (RODS2)**

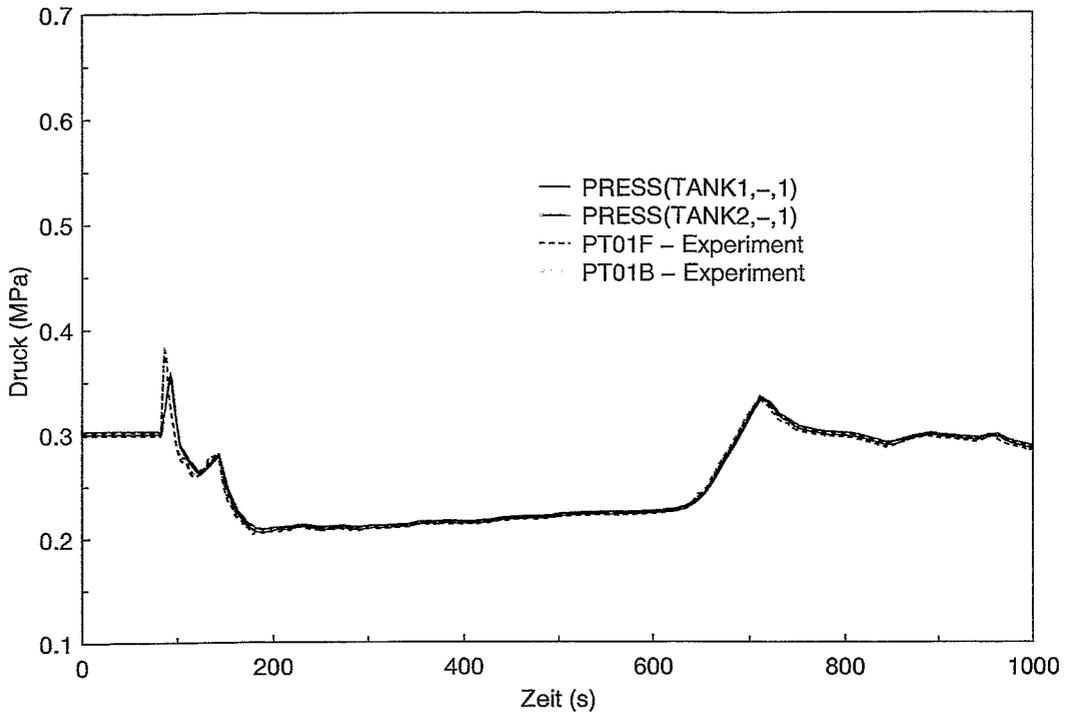
#### 4.4 Rechnungen mit ATHLET Mod 1.2 Cycle C und variablen Randbedingungen für das Containment

In der ersten ATHLET Rechnung wurden für die Containment Tanks konstante Randbedingungen angenommen. Da in der betrachteten Phase des Experiments der Leckmassenstrom nicht mehr kritisch ist, wird dieser durch den Containmentdruck beeinflusst. Um den Einfluß des Containmentdrucks auf den Verlauf der Transiente zu untersuchen, wurden in einer zweiten Rechnung Druck und Temperatur im Containment anhand der experimentellen Daten als Zeitfunktion definiert.

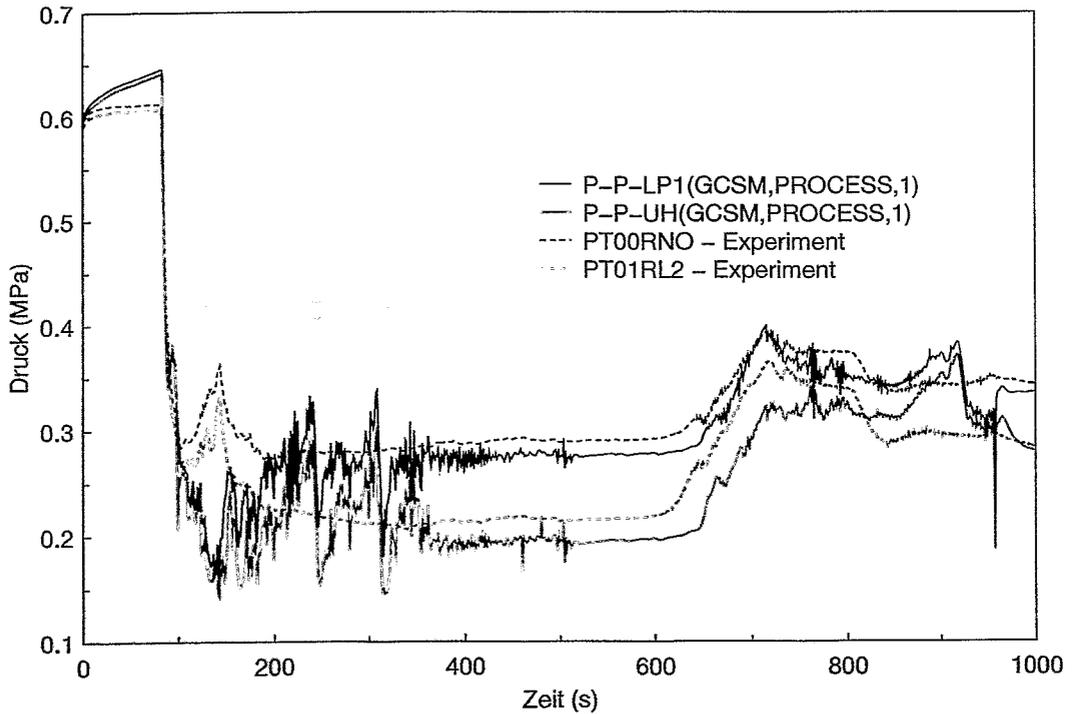
Der Druckverlauf in beiden Containment Tanks ist in Bild 4.31 dargestellt. Einen Vergleich von gemessenem und berechnetem Druck im Reaktormodell gibt Bild 4.32. Die Bilder 4.33 bis 4.36 zeigen die berechneten und gemessenen Differenzdrücke im Ringspalt, Oberen Plenum sowie im Reaktormodell für beide Kernkanäle. Die Brennstabtemperaturen für den mittleren Kernkanal (C1) und den Randkanal (C2) sind in den Bildern 4.37 bis 4.40 dargestellt.

Im Vergleich zu der Rechnung in Abschnitt 4.3 wird der zeitliche Verlauf des Primärdrucks im Reaktormodell realistischer berechnet. Die Druckabsenkung durch die Notkühlein speisung bis etwa 200 s wird auch hier überschätzt. Die Nachbildung des Druckverlaufs im Containment bringt keine signifikant bessere Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen im Vergleich zur vorhergehenden Rechnung. Die vereinfachte Modellierung der Containment Tanks mit konstanten Randbedingungen ist daher für die Modellierung des Containment-Verhaltens ausreichend.

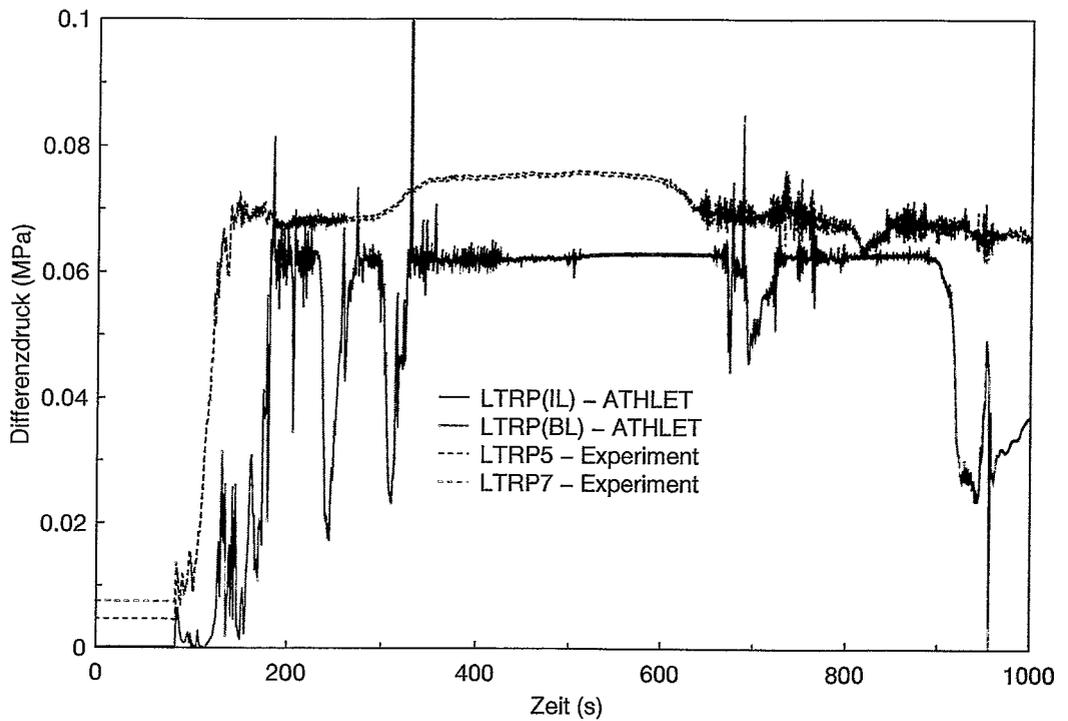
Eine noch realitätsnähere Nachbildung der experimentellen Ergebnisse wäre nur bei einer Modellierung des Regelverhaltens der Druckentlastung der Containment Tanks zu erwarten, wofür jedoch die Beschreibung des Experimentes keine ausreichenden Anhaltspunkte liefert.



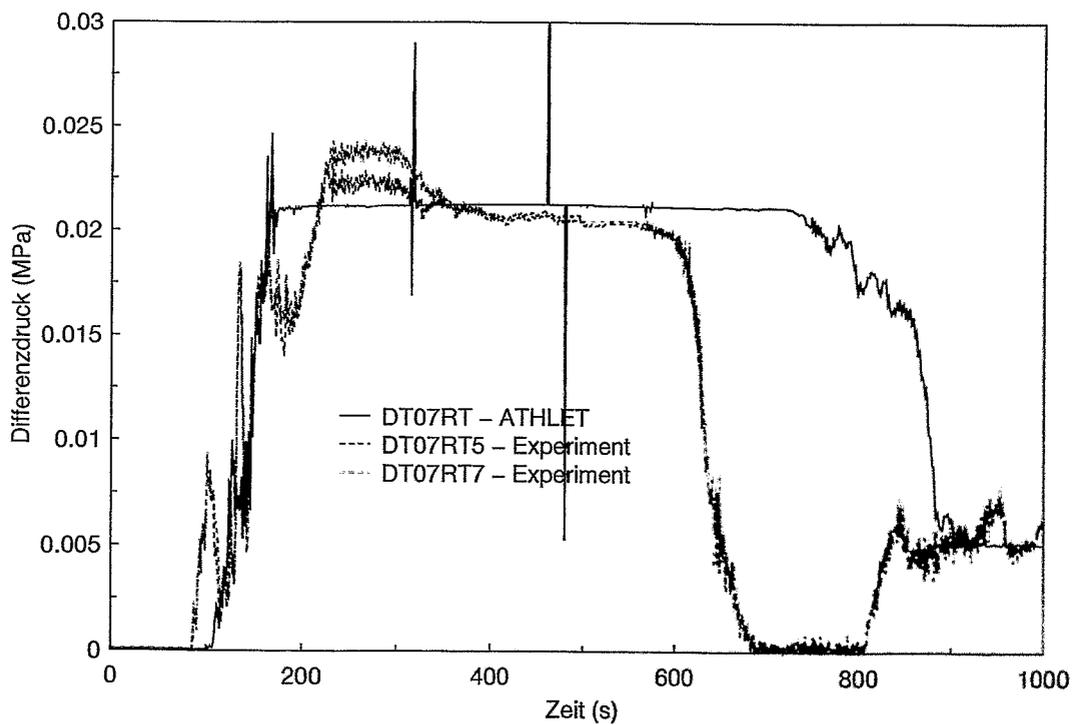
**Bild 4.31: Druck im Containment Tank 1 (PT01F) und Tank 2 (PT01B)**



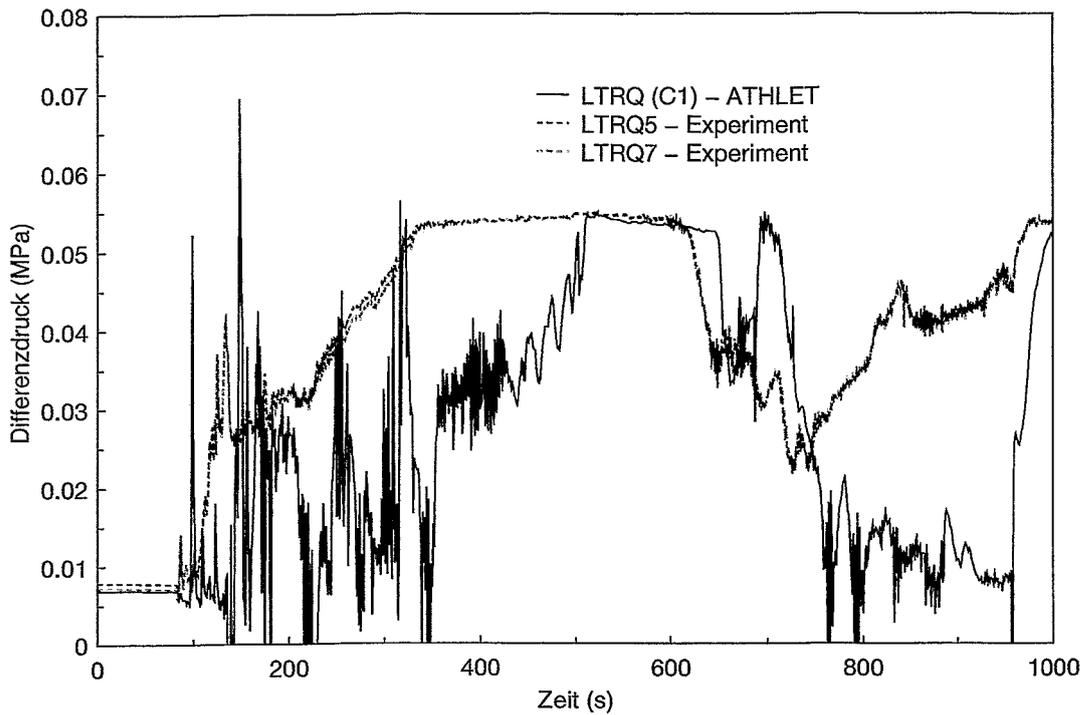
**Bild 4.32: Druck im Unteren Plenum (PT00RNO) und Oberen Plenum (PT01RL2)**



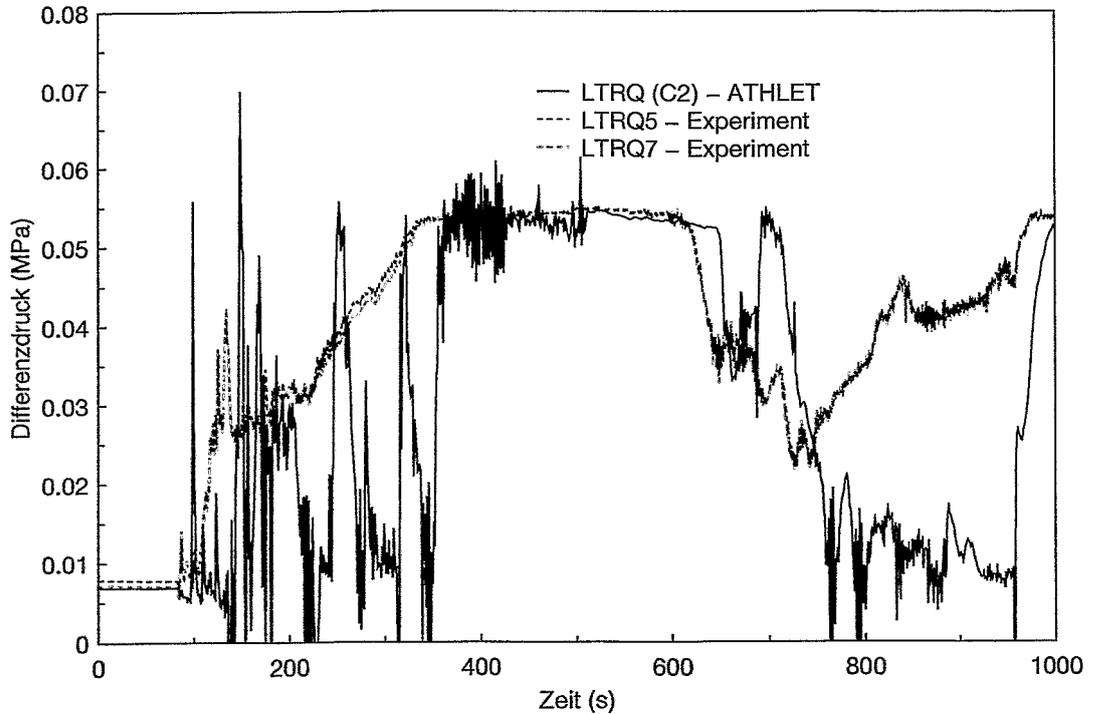
**Bild 4.33: Differenzdruck im Downcomer (ATHLET - intakte Schleife (IL) und Leckschleife (BL), Experiment - Quadrant Nr. 5 und 7)**



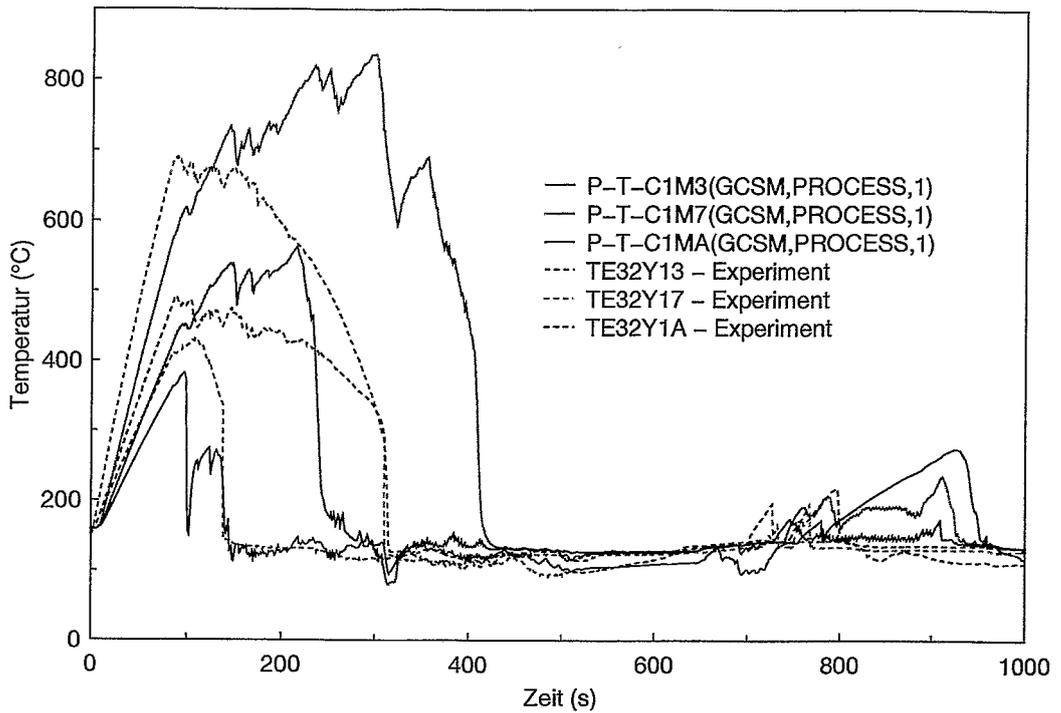
**Bild 4.34: Differenzdruck im Oberen Plenum (Experiment - Quadrant Nr. 5 und 7)**



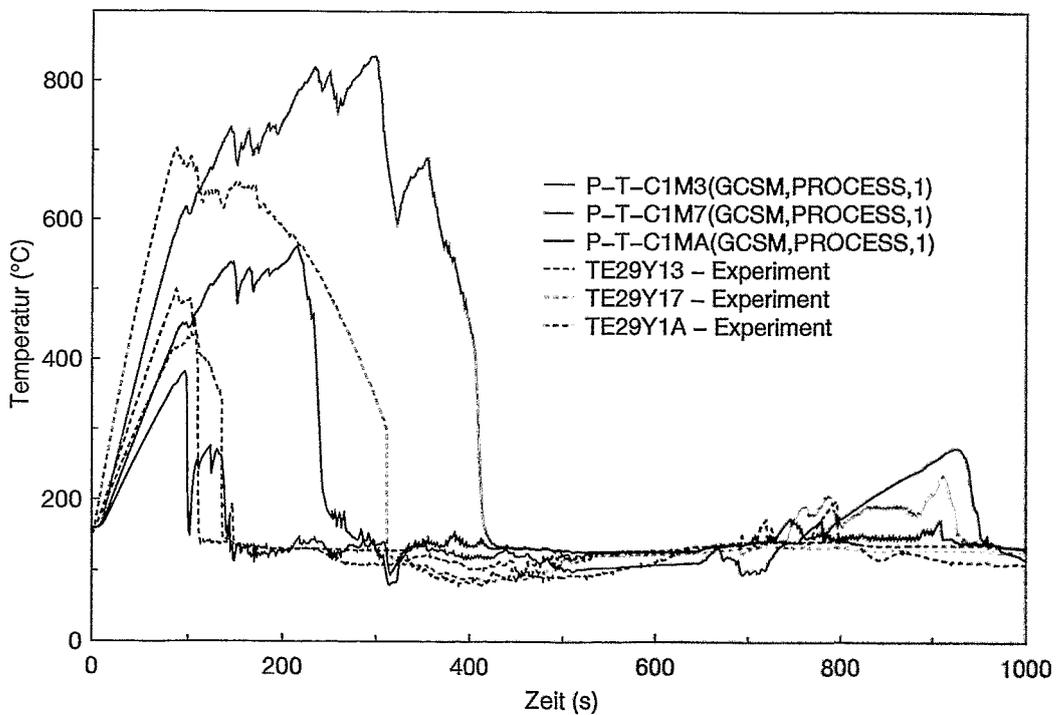
**Bild 4.35: Differenzdruck im Reaktor zwischen Unterem Plenum und Kernoberkante (ATHLET - Core 1, Experiment - Quadrant Nr. 5 und 7)**



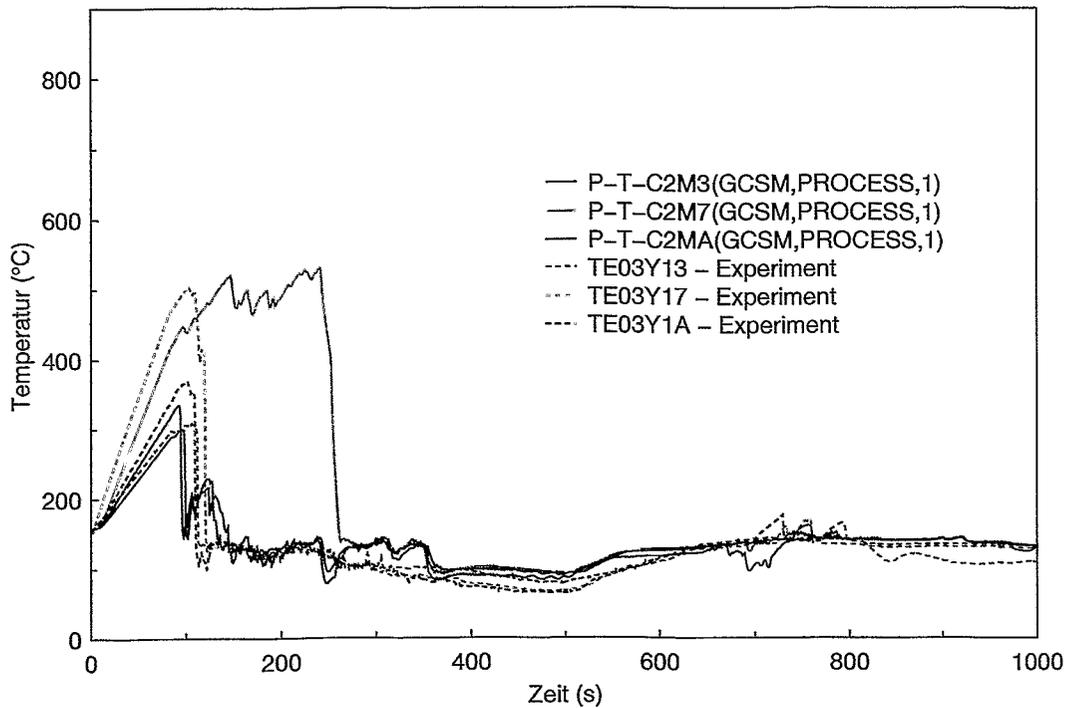
**Bild 4.36: Differenzdruck im Reaktor zwischen Unterem Plenum und Kernoberkante (ATHLET - Core 2, Experiment - Quadrant Nr. 5 und 7)**



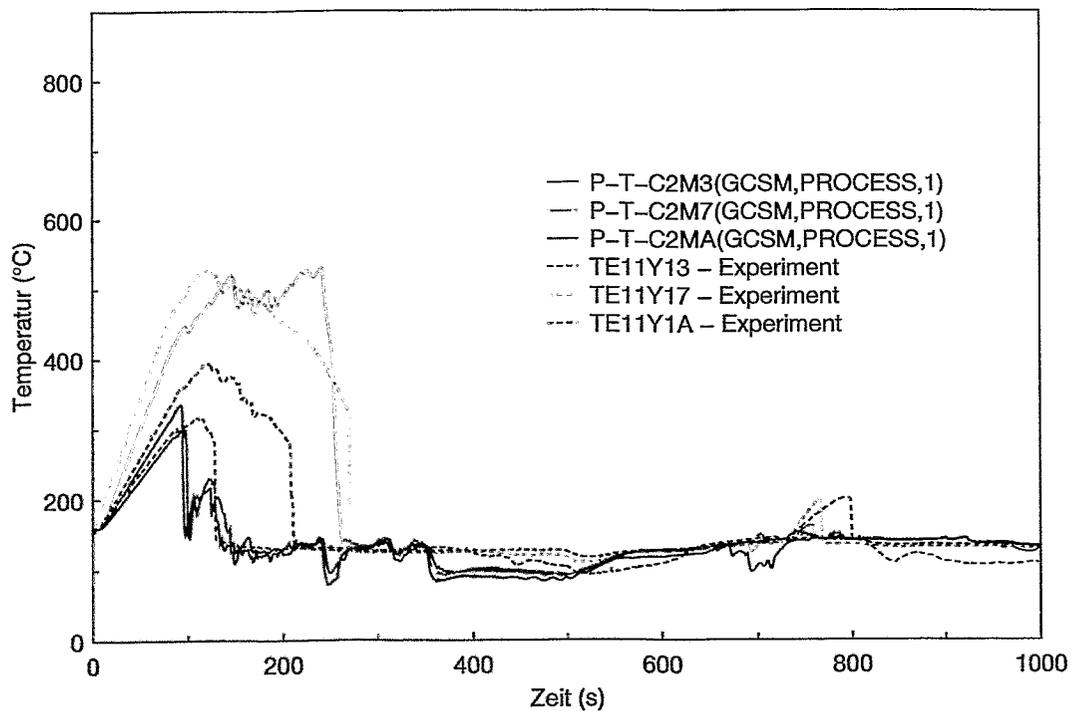
**Bild 4.37: Brennstabtemperaturen im unteren Bereich (Y13), in der Mitte (Y17) und im oberen Bereich (Y1A) des Reaktorkerns (ATHLET - C1, Experiment - Brennelement Nr. 32)**



**Bild 4.38: Brennstabtemperaturen im unteren Bereich (Y13), in der Mitte (Y17) und im oberen Bereich (Y1A) des Reaktorkerns (ATHLET - C1, Experiment - Brennelement Nr. 29)**



**Bild 4.39: Brennstabtemperaturen im unteren Bereich (Y13), in der Mitte (Y17) und im oberen Bereich (Y1A) des Reaktorkerns (ATHLET - C2, Experiment - Brennelement Nr. 03)**



**Bild 4.40: Brennstabtemperaturen im unteren Bereich (Y13), in der Mitte (Y17) und im oberen Bereich (Y1A) des Reaktorkerns (ATHLET - C2, Experiment - Brennelement Nr. 11)**

## 5 Rechnungen zum Experiment C2-04/62

### 5.1 Beschreibung des Experiments

Beim Experiment C2-04 wird ein 2F Bruch im kalten Strang mit ausschließlich kaltseitiger Notkühleinspeisung simuliert. Die Versuchsanlage ist zu Beginn der Transiente mit Dampf gefüllt. Im unteren Plenum wird vor dem Start des Experiments ein Füllstand von 0.8 m eingestellt. Über die Heizelemente im Reaktormodell werden die spezifizierten Randbedingungen (Druck, Temperatur) eingeregelt.

|                                    |                 |
|------------------------------------|-----------------|
| Reaktorleistung                    | 9.37 MW         |
| Druck im Primärkreis / Containment | 0.26 / 0.20 MPa |
| Temperatur im Unteren Plenum       | 120.8 °C        |
| Druck auf der Sekundärseite        | 5.3 MPa         |
| Temperatur auf der Sekundärseite   | 265.8 °C        |

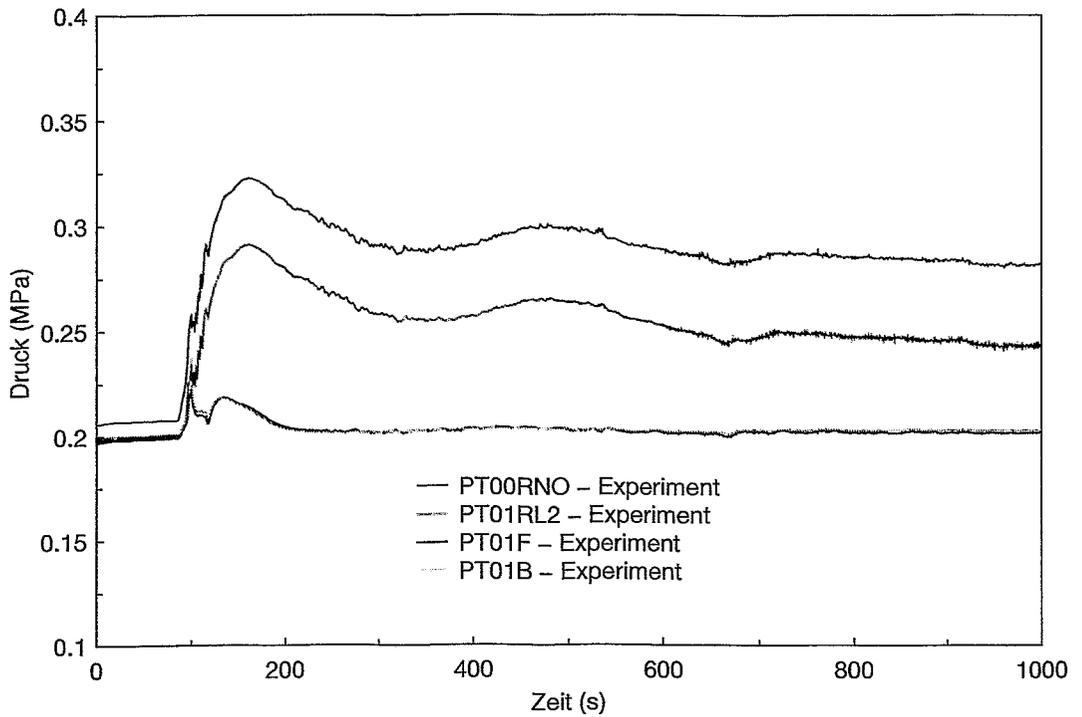
**Tabelle 5.1: Randbedingungen des Experiments C2-04**

|   |                |
|---|----------------|
| Beginn des Experiments                        | 0 s            |
| Druckentlastung                               | 84.5 s         |
| Druckspeichereinspeisung in das Untere Plenum | 84.5 s - 97 s  |
| Leistungsabfall                               | 93.5 s         |
| Druckspeichereinspeisung kaltstrangseitig     | 99.5 s - 111 s |
| Niederdruckeinspeisung                        | 120 s - 1000 s |
| Ende des Experiments                          | 1000 s         |

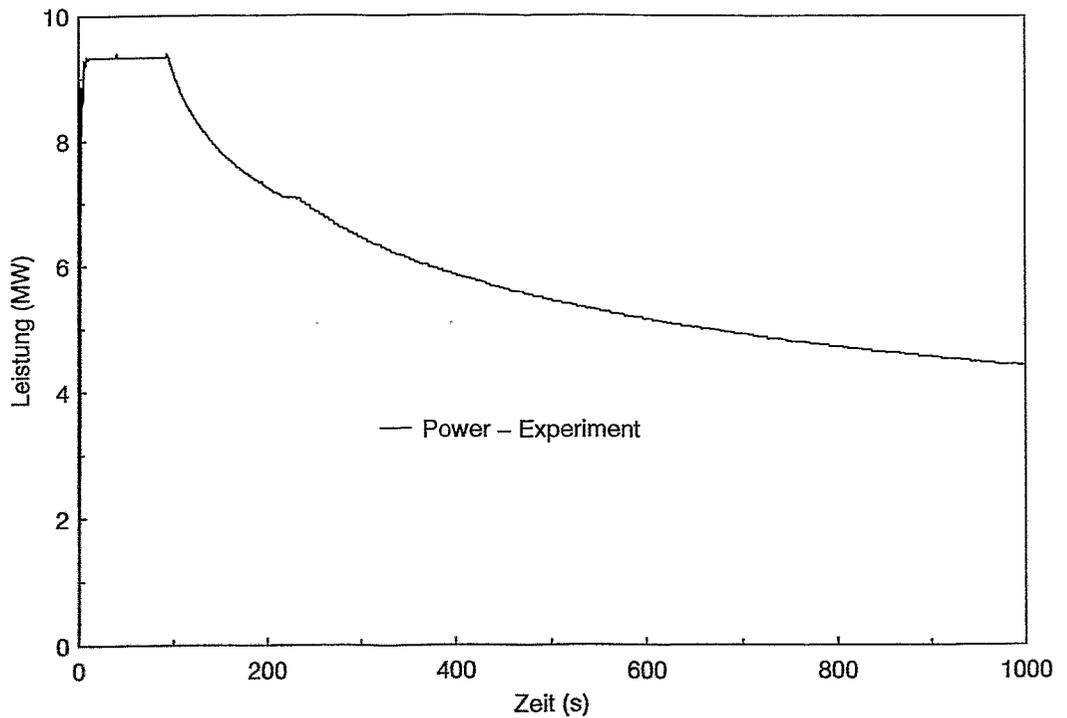
**Tabelle 5.2: Zeitlicher Ablauf des Experiments C2-04**

Mit dem Start des Experiments ( $t=0$  s) werden die Brennstabsimulatoren zugeschaltet und die Leistung wird entsprechend der Nachzerfallsleistung des Reaktors eingestellt. Bei  $t=84.5$  s werden die Ventile zu den Containment Tanks geöffnet und zeitgleich beginnt die Druckspeichereinspeisung in das Untere Plenum. Der Leistungsabfall startet bei  $t=93.5$  s. Die Notkühleinspeisung in die drei intakten kalten Stränge beginnt bei  $t=99.5$  s. Die Niederdruckeinspeisung beginnt bei  $t=120$  s und dauert bis zum Ende der Transiente. Das Experiment ist nach 1000 s beendet.

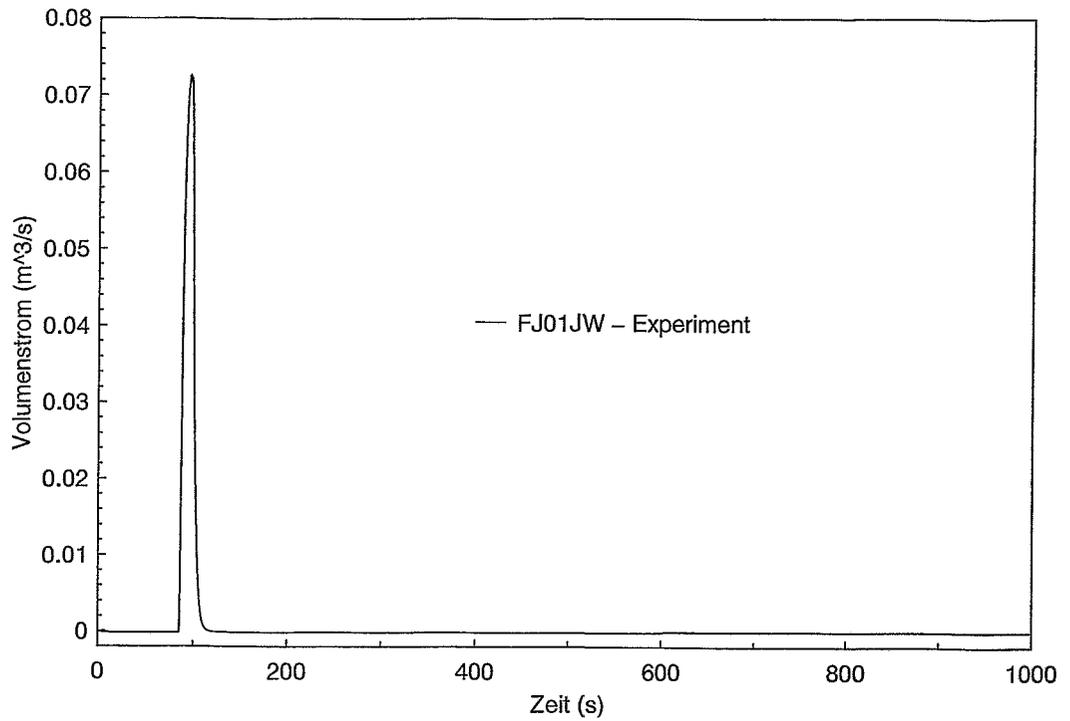
Die Randbedingungen des Experiments sind in Tabelle 5.1 zusammengefaßt, Tabelle 5.2 gibt einen Überblick über den zeitlichen Ablauf des Experiments. In den Bildern 5.1 bis 5.4 sind für das Experiment C2-04 der zeitliche Verlauf von Primärdruck, Reaktorleistung und die Notkühleinspeisung dargestellt.



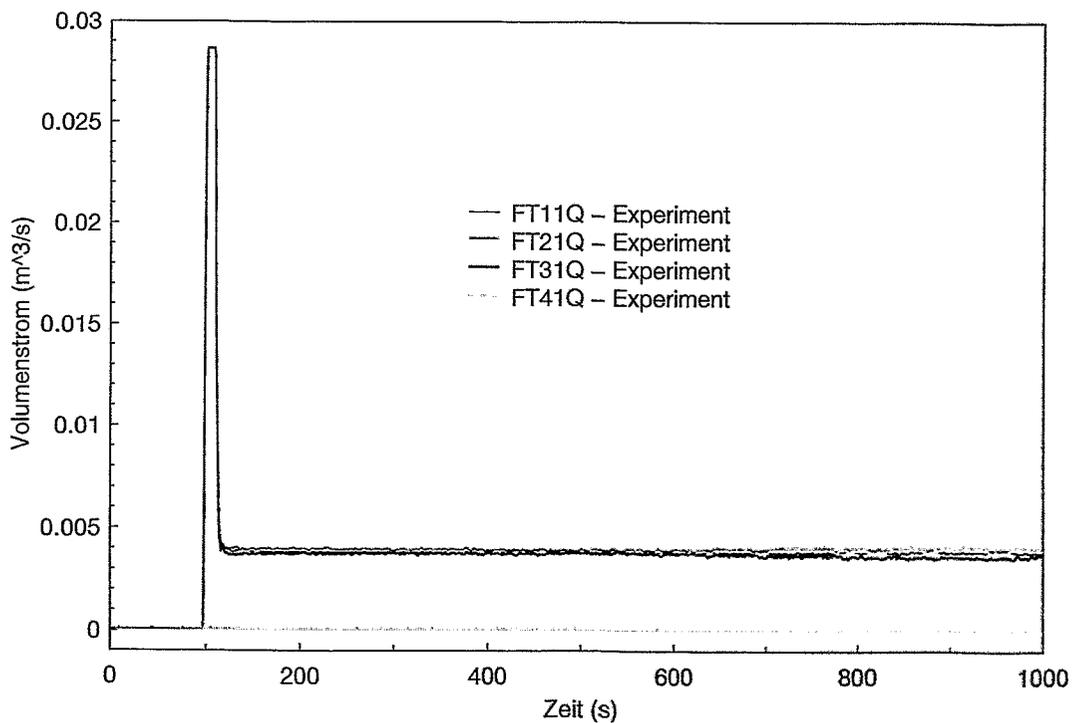
**Bild 5.1: Druck im Unteren Plenum (PT00RNO), Oberen Plenum (PT01RL2), Containment Tank 1 (PT01F) und Containment Tank 2 (PT01B)**



**Bild 5.2: Integrale Reaktorleistung (Power)**



**Bild 5.3: Notkühleinspeisung in das Untere Plenum (FJ01JW)**



**Bild 5.4: Kaltseitige Notkühleinspeisung (FT11Q-FT31Q: intakte Schleifen, FT41Q: Leckschleife) - FT41Q nicht verfügbar**

## 5.2 Modellierung mit ATHLET

Der ATHLET Datensatz für das Experiment C2-04 nutzt die gleiche Nodalisierung wie der Datensatz für das Experiment C2-19, vgl. Tabelle 4.3, Bild 4.5 und Bild 4.6 (Abschnitt 4.2). Für die Rechnungen wurde ebenfalls eine Unterteilung des Reaktorkerns in zwei radiale Kanäle vorgenommen. In der Randzone werden 38 % und im Zentrum 62 % der nominalen Kernleistung simuliert. Für beide Kanäle kommt das Quench Front Modell mit der Korrelation von Semeria/Martinet (Lower Quench Front) zur Anwendung.

Im Datensatz wurden die Anfangs- und Randbedingungen des Experiments C2-04 berücksichtigt.

Beim Experiment C2-04 erfolgt die Notkühleinspeisung ausschließlich kaltstrangseitig in das Untere Plenum und in die drei intakten kalten Stränge. Die Modellierung der Notkühleinspeisung wurde dem Szenarium des Experiments C2-04 angepaßt.

In der Versuchsanlage ist die Leckschleife mit den beiden Containment Tanks verbunden. Im Verlauf des Experiments wurde versucht, über Regelventile den Containmentdruck annähernd konstant zu halten. Wie bei der Rechnung zum Experiment C2-19 wurden auch hier beide Containment Tanks als "Time Dependent Volumes" mit konstantem Druck und konstanter Temperatur definiert.

Entsprechend dem zeitlichen Verlauf des Experiments werden die folgenden Ereignisse durch GCSM Signale gesteuert:

- t=0 s: Start der Rechnung, Hochfahren der Reaktorleistung
- t=84.5 s: Öffnen der Ventile zu den Containment Tanks,  
Druckspeichereinspeisung in das Untere Plenum
- t=93.5 s: Leistungsabfall
- t=99.5 s: Druckspeichereinspeisung kaltstrangseitig
- t=120 s: Niederdruckeinspeisung

Die Massenströme der Notkühleinspeisung wurden in Anlehnung an die experimentellen Daten durch Tabellen definiert.

Für alle Rechnungen wurden die 6-Gleichungsversion von ATHLET und das neue strömungsformabhängige Kondensationsmodell verwendet.

### 5.3 Rechnungen mit ATHLET Mod 1.2 Cycle C und konstanten Randbedingungen für das Containment

Die Rechnungen zum Experiment C2-04 wurden mit ATHLET Mod 1.2 Cycle C durchgeführt. Die Transiente startet bei  $t=0$  s. Zu Beginn liegt der Primärdruck bei 0.26 MPa. Mit Beginn der Transiente wird die Reaktorleistung entsprechend den experimentellen Randbedingungen hochgefahren, vgl. Bild 5.2 und Bild 5.8. Zum Zeitpunkt  $t=84.5$  s werden die Ventile zu den Containment Tanks geöffnet. Zeitgleich beginnt die Druckspeichereinspeisung in das Untere Plenum. Ab  $t=93.5$  s wird die Reaktorleistung entsprechend dem zeitlichen Verlauf der Nachzerfallswärme abgesenkt. Die Druckspeichereinspeisung in die drei intakten kalten Stränge wird bei  $t=99.5$  s initiiert. Die Niederdruckeinspeisung wird wie im Experiment bei  $t=120$  s gestartet.

Einen Vergleich von gemessenem und berechnetem Druckverlauf im Oberen und Unteren Plenum zeigt Bild 5.5. In Bild 5.6 ist der Druck in den Containment Tanks 1 und 2 dargestellt. In der Rechnung wurden Druck und Temperatur in den Containment Tanks durch konstante Randbedingungen als "Time Dependent Volume" simuliert.

Die Erhöhung der Reaktorleistung führt bis  $t=84.5$  s zu einem Druckanstieg im Primärkreis. Mit dem Öffnen der Ventile kommt es zu einem Druckausgleich zwischen Primärkreis und Containment. Im Experiment steigen der Systemdruck und der Druck im Containment ab  $t=85$  s sofort an. In der ATHLET Rechnung kommt es mit dem Beginn der kaltstrangseitigen Notkühleinspeisung zu einer vorübergehenden Druckabsenkung. Die Ursache hierfür sind die zu hoch berechneten Kondensationsraten im kalten Strang. Die Massenströme der Notkühleinspeisung in das Untere Plenum und in den kalten Strang zeigt Bild 5.7.

Im weiteren Verlauf der Transiente liegt der berechnete Primärdruck niedriger als im Experiment. Die wesentlichen Ursachen für die Abweichungen der Druckverläufe dürften in den zu hoch berechneten Kondensationsraten zu suchen sein. Der schnelle Druckanstieg im Experiment wird durch die Ausbildung der Wiederbenetzungsfront im Reaktormodell verursacht. Das Notkühlwasser trifft hier auf die heißen Brennelemente, was zu einer verstärkten Dampfbildung führt. Der damit verbundene Druckanstieg wird von ATHLET zu niedrig berechnet.

Die Ausbildung der Wiederbenetzungsfront kann durch die Differenzdruckmessungen im Reaktormodell nachgewiesen werden. Vom Experiment stehen detaillierte Differenzdruckmessungen aus dem Downcomer, dem Reaktorkern und dem Oberen Plenum in jeweils vier Quadranten zur Verfügung. Wie bereits beim Experiment C2-19 kann auch hier kein asymmetrisches Verhalten in den Differenzdruckmessungen der vier Quadranten beobachtet werden. Die Bilder 5.9 bis 5.12 geben einen Vergleich von experimentellen Daten und Ergebnissen der ATHLET Rechnung.

Bild 5.9 zeigt den Differenzdruck im Downcomer. In der ATHLET Rechnung setzt das Auffüllen des Downcomer mit einer geringen Verzögerung ein. Das Maximum wird zum selben Zeitpunkt wie im Experiment erreicht. Nach 100 s sinkt der Differenzdruck im Experiment leicht ab. In der Rechnung ist eine wesentlich stärkere Abnahme zu beobachten.

Bild 5.10 zeigt den Differenzdruck im Oberen Plenum. Ab etwa  $t=125$  s ( $t=100$  s im Experiment) wird auch im Oberen Plenum Wasser akkumuliert. Durch die fehlende heißseitige Notkühleinspeisung findet aber kein Auffüllen des Reaktors vom Oberen Plenum statt. Im Experiment steigt der Differenzdruck zum Ende der Transiente stärker an als in der Rechnung.

In Bild 5.11 und 5.12 ist der Differenzdruck im Reaktor zwischen Unterem Plenum und Kernoberkante dargestellt. Im Gegensatz zum Experiment erfolgt das Auffüllen des Reaktors in der Rechnung zeitlich verzögert. Bis zum Ende der Transiente steigt der Höhenstand im Reaktor allmählich an. Die berechneten Differenzdrücke zeigen für beide Kernkanäle keine signifikanten Unterschiede.

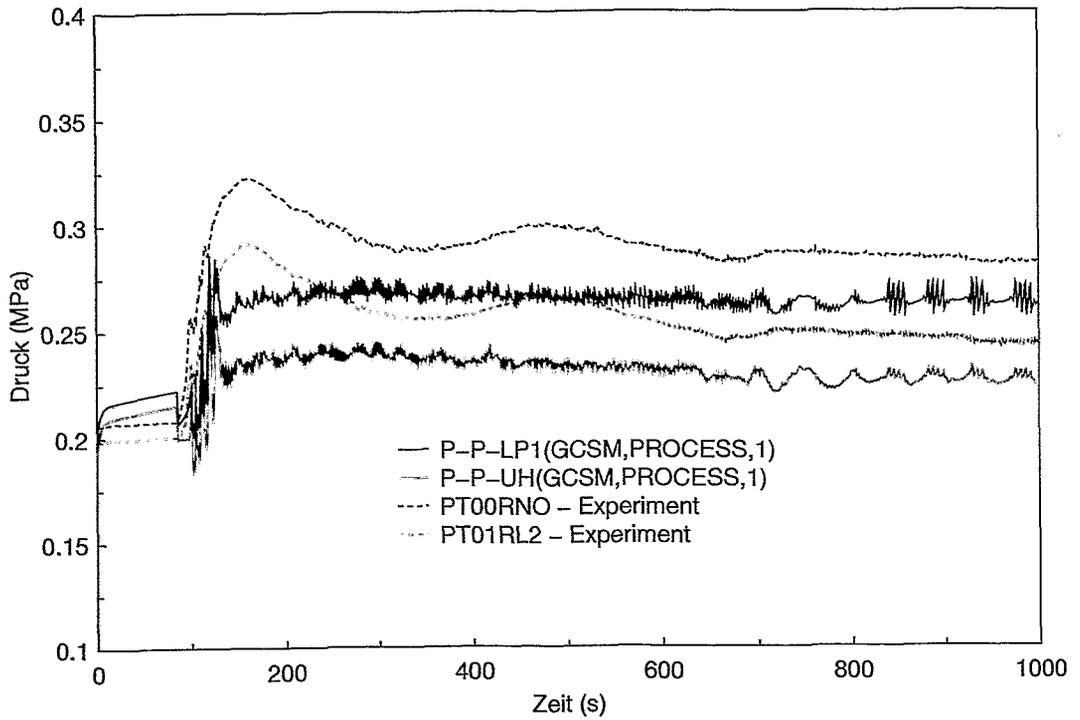
Durch die Ausbreitung der Wiederbenetzungsfront im Reaktormodell werden die Brennelemente gekühlt. Da beim Experiment C2-04 nur die kaltseitige Notkühleinspeisung wirksam ist, erfolgt die Wiederbenetzung der Brennelemente durch das in den Downcomer und das Untere Plenum eingespeiste Notkühlwasser. Die Qualität der Nachrechnung mit ATHLET kann anhand der Fluid- und Brennstabtemperaturen beurteilt werden. An der CCTF Versuchsanlage wurde auch bei diesem Test eine radiale und axiale Leistungsverteilung im Reaktorkern simuliert. Mit der Zweikanal-Modellierung in ATHLET können Effekte, welche durch radiale Verteilung der Leistung im Kern bedingt sind, in guter Näherung berechnet werden.

In Bild 5.13 und 5.14 sind gemessene und berechnete Fluidtemperaturen im oberen bzw. unteren Bereich des Downcomer dargestellt. Die Bilder 5.15 bis 5.18 zeigen die Dampf- bzw. Fluidtemperaturen im Reaktor in unterschiedlicher axialer Position für die beiden in ATHLET modellierten Kernkanäle im Vergleich mit experimentellen Daten. Die Messungen der Brennstabtemperaturen erfolgten im Experiment sowohl in unterschiedlicher axialer als auch in unterschiedlicher radialer Position (vgl. hierzu Tabelle 4.4, S. 25 und Bild 3.4, S. 14). Die Bilder 5.19 bis 5.22 zeigen einen Vergleich von berechneten Brennstabtemperaturen mit experimentellen Werten für drei unterschiedliche axiale Positionen (unterer, mittlerer und oberer Kernbereich). Die berechneten Temperaturen für den mittleren Kernkanal (C1) sind im Vergleich zu den Brennelementen Nr. 32 und Nr. 29 dargestellt. Für den Randkanal (C2) werden die berechneten Temperaturen mit den Brennelementen Nr. 03 und Nr. 11 verglichen. Anhand von Rechnung und Experiment kann festgestellt werden, daß die kaltseitige Einspeisung keine so stark ausgeprägten radialen Asymmetrien der Brennstabtemperaturen zur Folge hat, wie die kombinierte Notkühleinspeisung beim Experiment C2-19 (vgl. Bild 4.23 bis 4.26). Der zeitliche Verlauf und die Maximalwerte der Brennstabtemperaturen für das Zentrum und den Rand des Reaktorkerns werden durch die ATHLET-Rechnung in guter Näherung wiedergegeben.

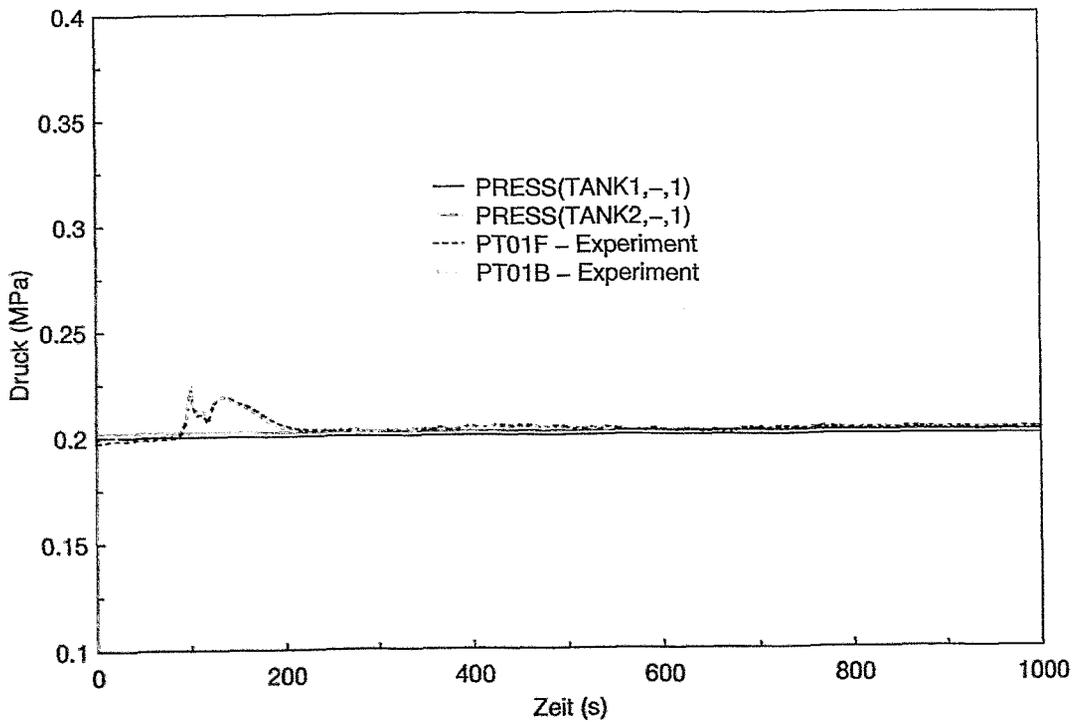
Die berechneten Temperaturverläufe zeigen über die gesamte Transiente eine recht gute Übereinstimmung mit den experimentellen Daten. Die ATHLET Rechnung liefert insgesamt zu niedrige Werte bei den Fluidtemperaturen im Downcomer, die Dampf- und Fluidtemperaturen im Reaktorkern entsprechen dagegen gut den experimentellen Ergebnissen. Die Wiederbenetzung der Brennelemente und damit die Begrenzung der maximalen Brennstabtemperaturen werden von ATHLET im unteren und mittleren Bereich der Brennelemente in guter Übereinstimmung mit dem Experiment berechnet. Größere Abweichungen zeigen sich am oberen Ende der Brennelemente. Durch die geringere Leistung in der Randzone werden die Brennelemente schneller gekühlt als

im Zentrum des Kerns. Dieser Effekt wird auch durch den berechneten Verlauf der Wiederbenetzungsfront in beiden Kernkanälen (Bilder 5.23 und 5.24) und durch die berechneten Wärmeübergangskoeffizienten für die Brennstäbe (Bilder 5.25 und 5.26) nachgewiesen.

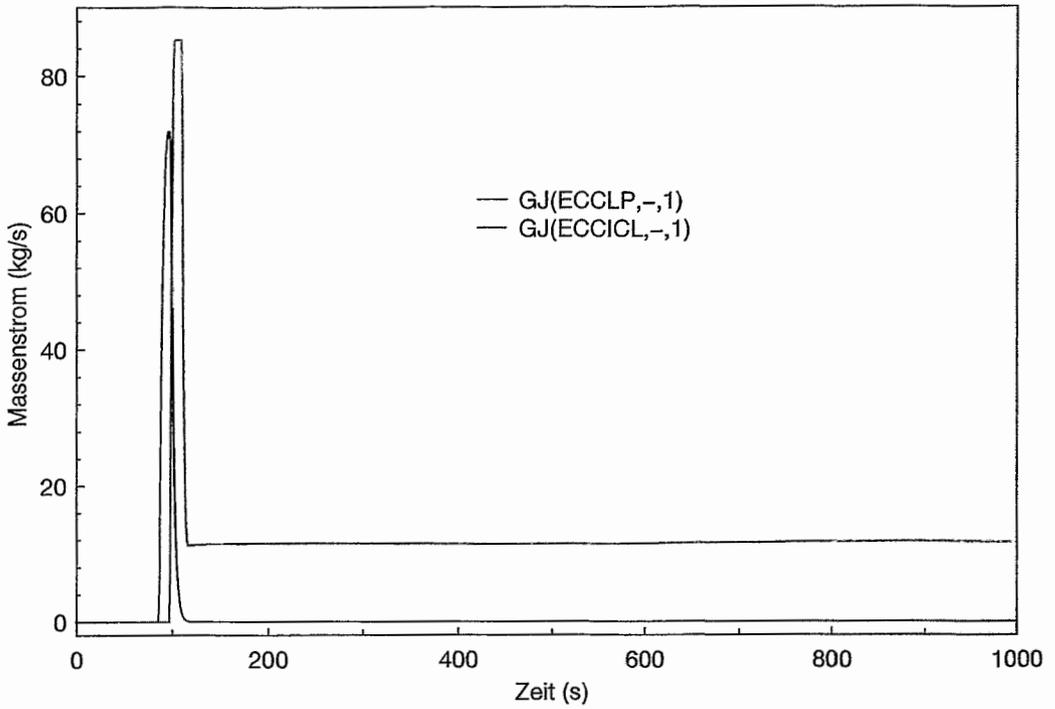
Wie der Vergleich zwischen Rechnung und Experiment zeigt, können die sicherheitstechnisch relevanten Aussagen des Experiments durch die ATHLET Rechnung reproduziert werden. Abweichungen zwischen Experiment und Rechnung werden durch zu hohe Kondensationsraten am Anfang der Transiente und durch eine geringere Dampfproduktion im Reaktor beim Wiederbenetzen der Brennelemente verursacht.



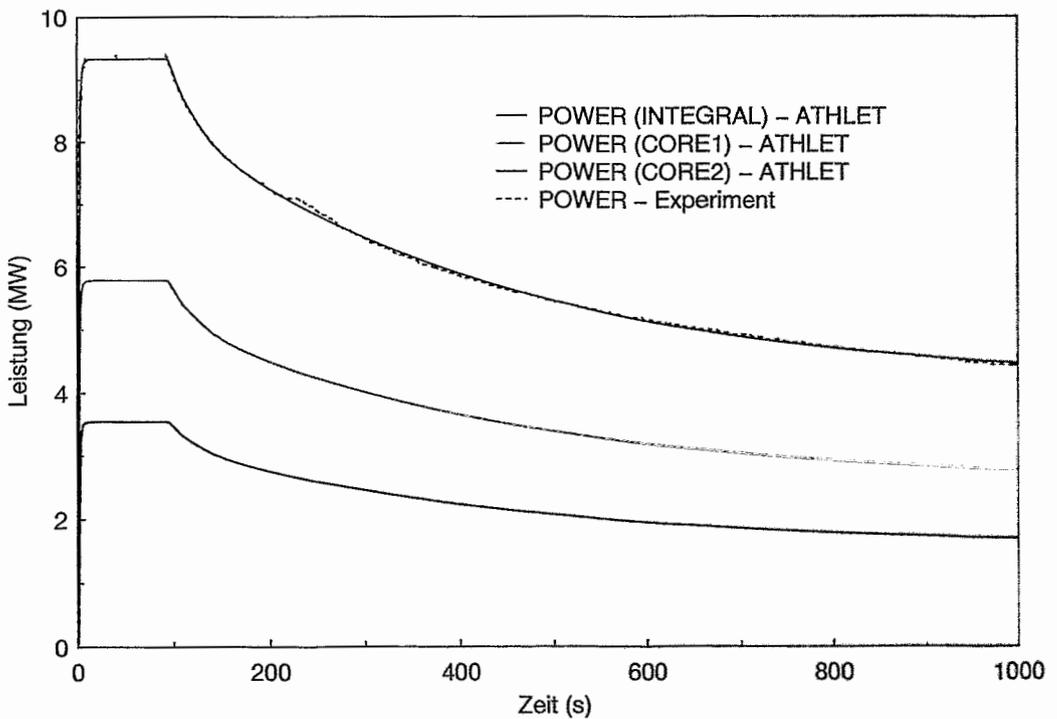
**Bild 5.5: Druck im Unteren Plenum (PT00RNO) und Oberen Plenum (PT01RL2)**



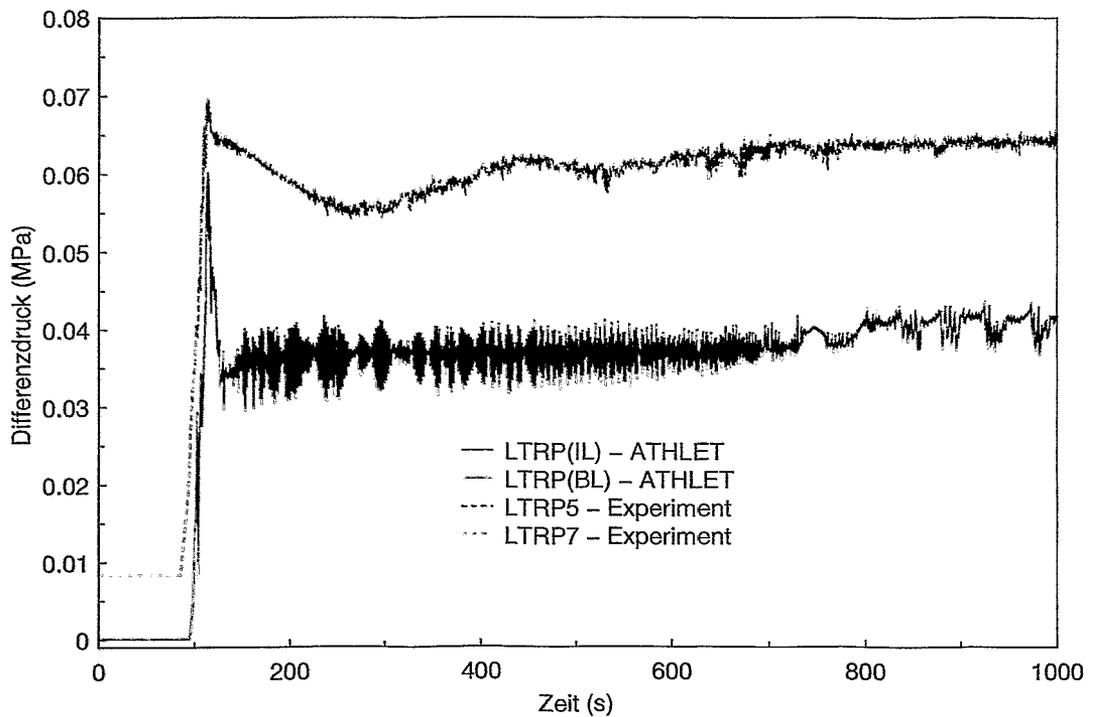
**Bild 5.6: Druck im Containment Tank 1 (PT01F) und Tank 2 (PT01B)**



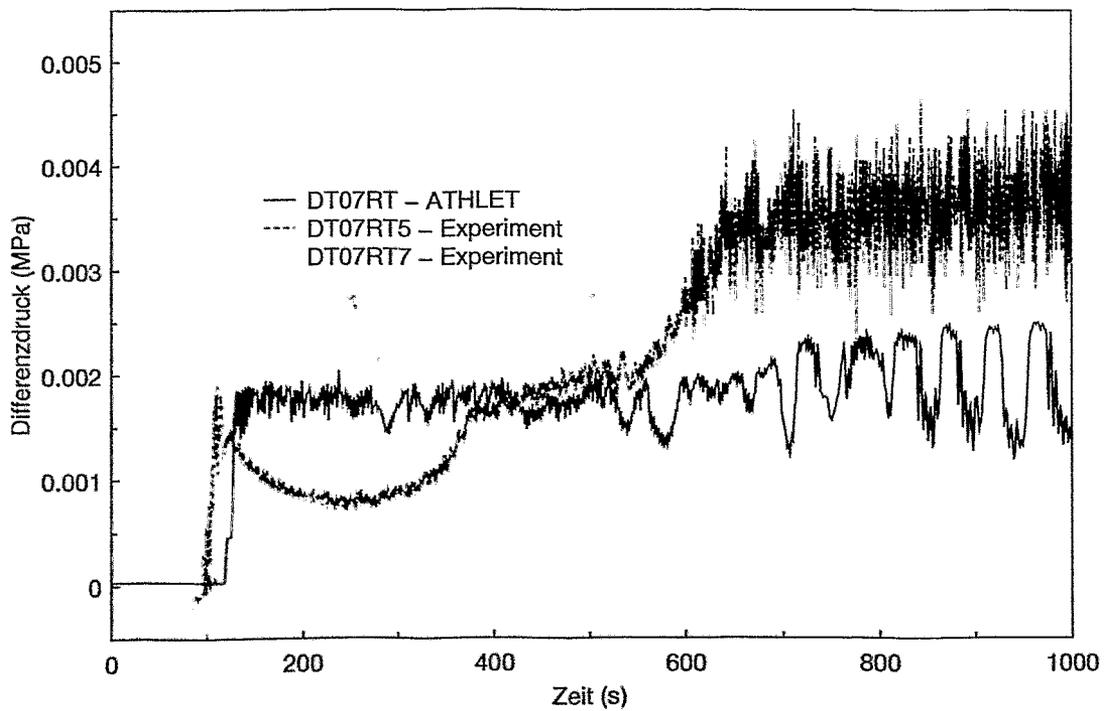
**Bild 5.7: In der Rechnung vorgegebene Notkühlein speisung in das Untere Plenum (ECCLP) und in den kalten Strang der intakten Schleife (ECCICL) - vgl. Bild 5.3 und 5.4 für das Experiment**



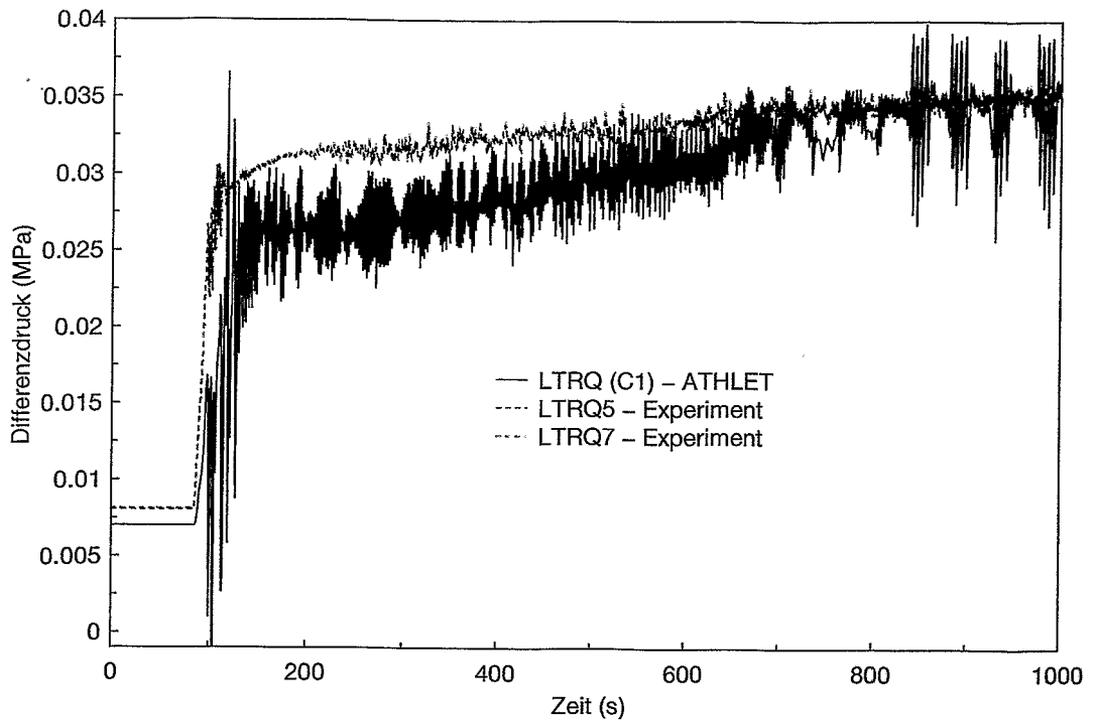
**Bild 5.8: Integrale Reaktorleistung und Leistung in den beiden Kernkanälen**



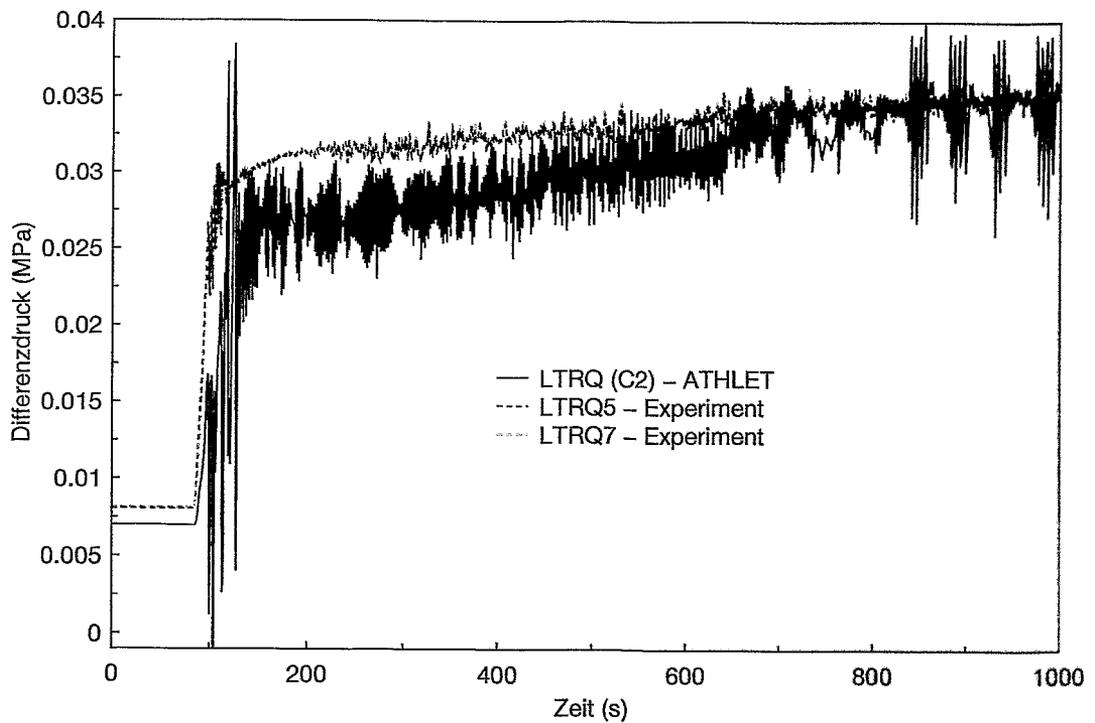
**Bild 5.9: Differenzdruck im Downcomer (ATHLET - intakte Schleife (IL) und Leckschleife (BL), Experiment - Quadrant Nr. 5 und 7)**



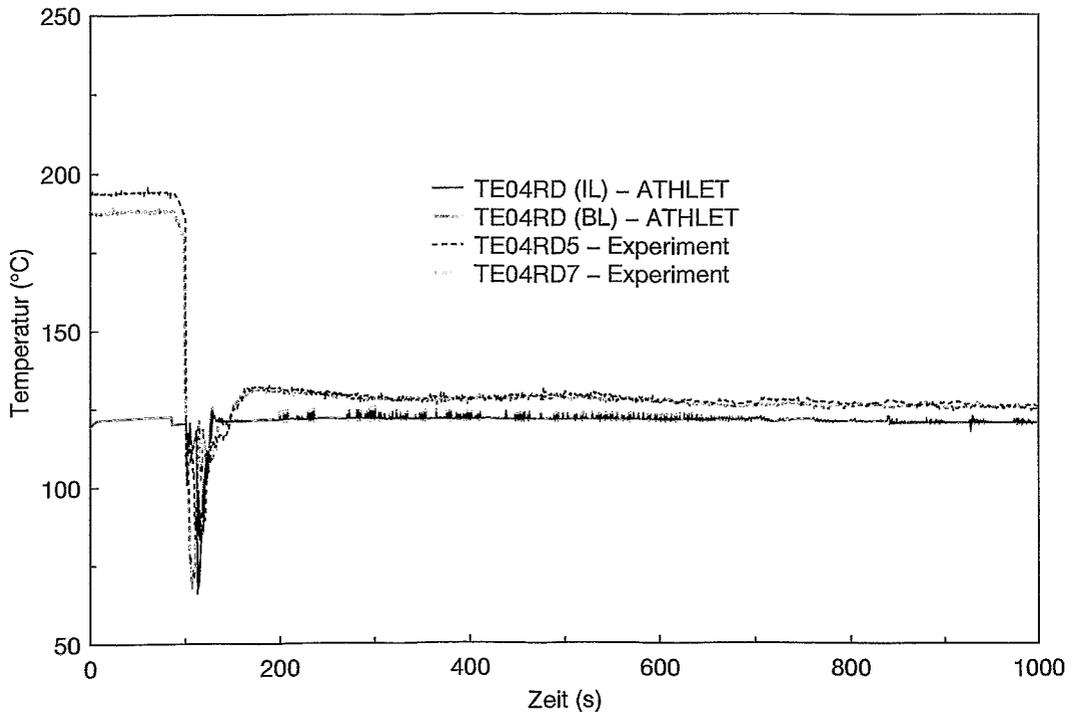
**Bild 5.10: Differenzdruck im Oberen Plenum (Experiment - Quadrant Nr. 5 und 7)**



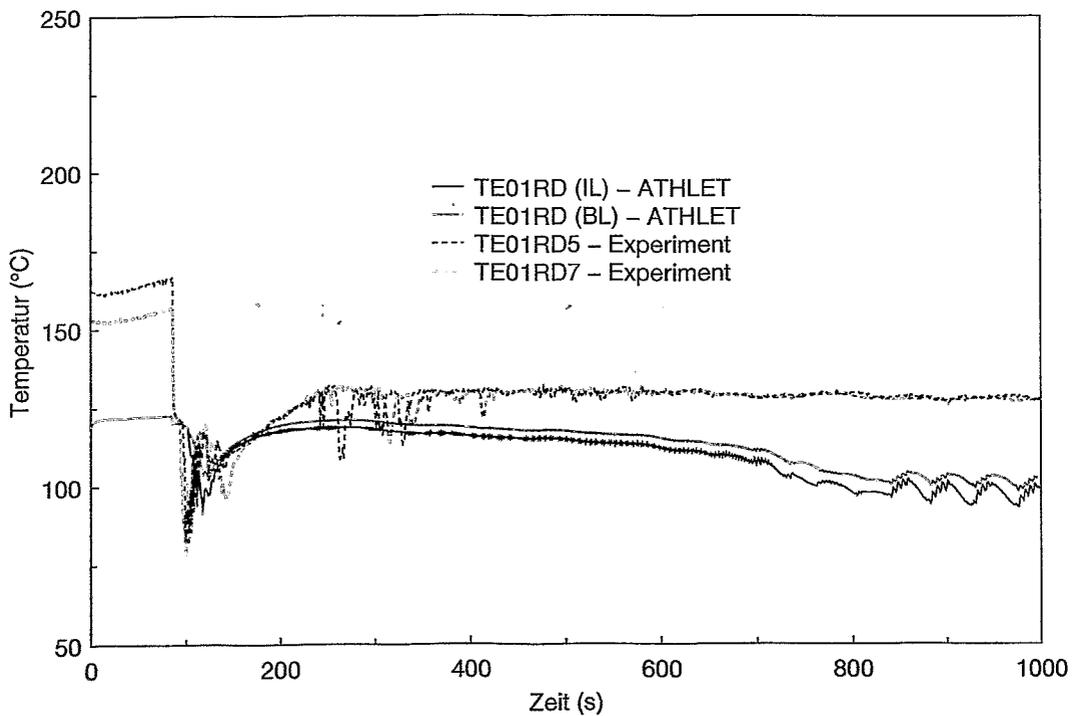
**Bild 5.11: Differenzdruck im Reaktor zwischen Unterem Plenum und Kernoberkante (ATHLET - Core 1, Experiment - Quadrant Nr. 5 und 7)**



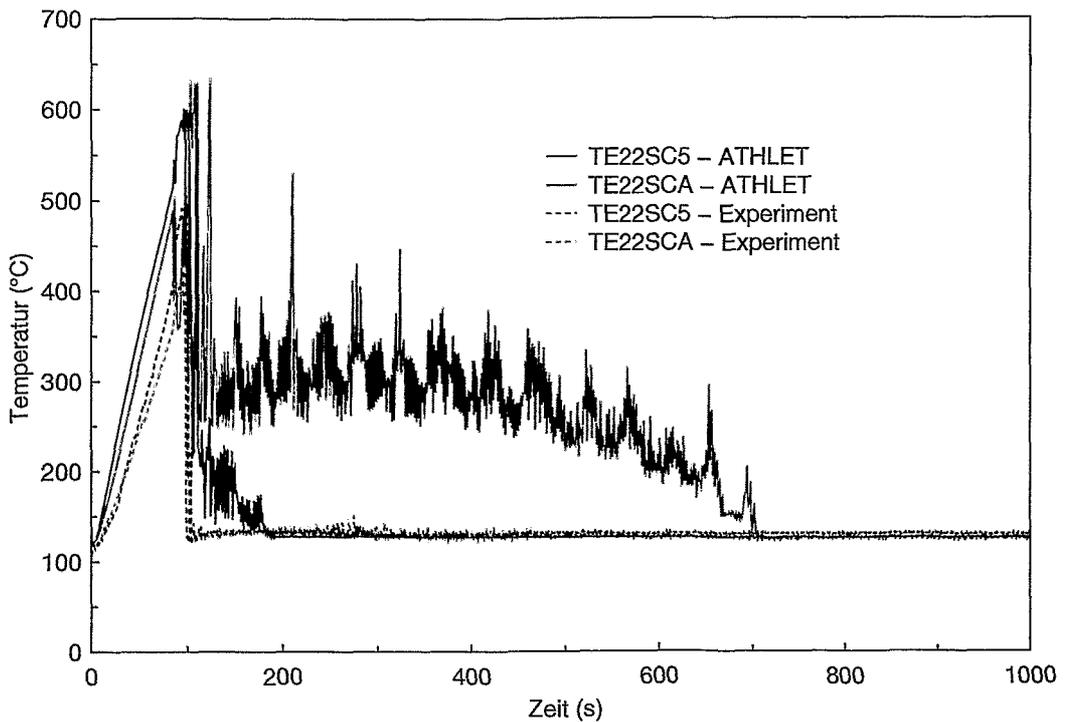
**Bild 5.12: Differenzdruck im Reaktor zwischen Unterem Plenum und Kernoberkante (ATHLET - Core 2, Experiment - Quadrant Nr. 5 und 7)**



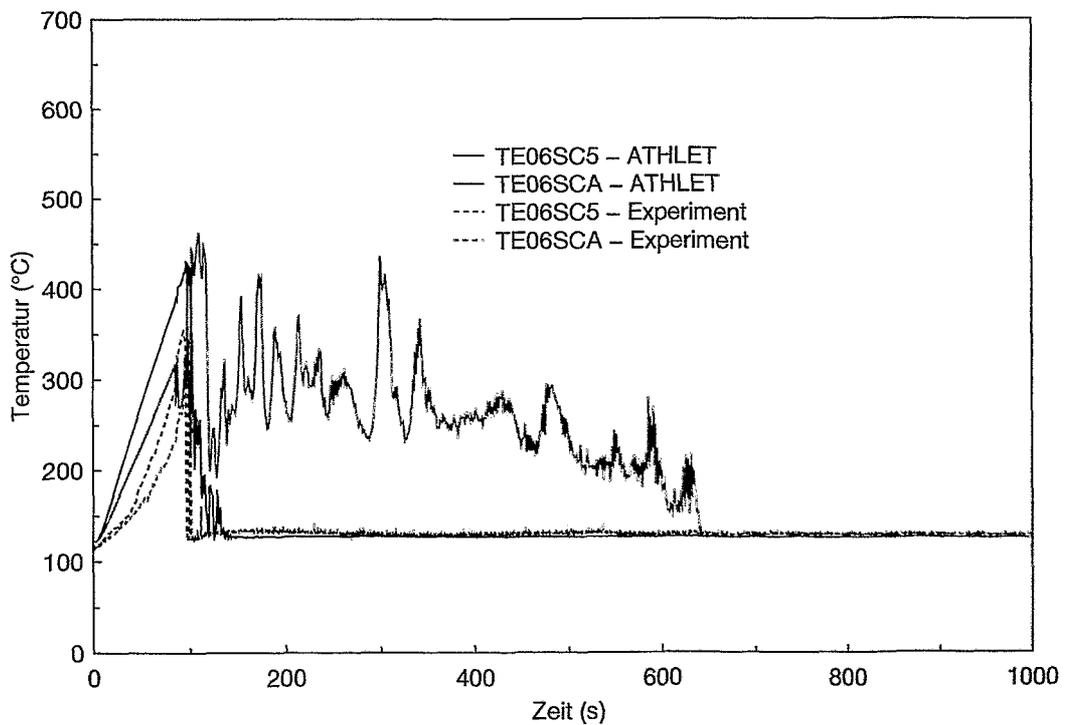
**Bild 5.13: Fluidtemperaturen im oberen Teil des Downcomer (ATHLET - intakte Schleife (IL) und Leckschleife (BL), Experiment - Quadrant Nr. 5 und 7)**



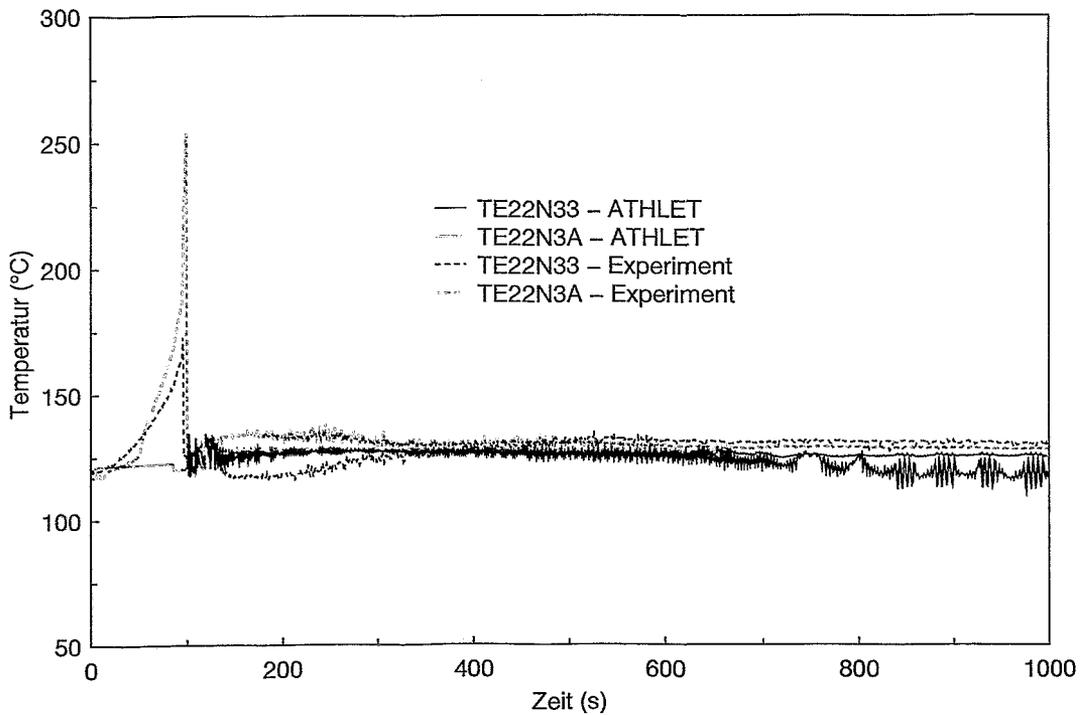
**Bild 5.14: Fluidtemperaturen im unteren Teil des Downcomer (ATHLET - intakte Schleife (IL) und Leckschleife (BL), Experiment - Quadrant Nr. 5 und 7)**



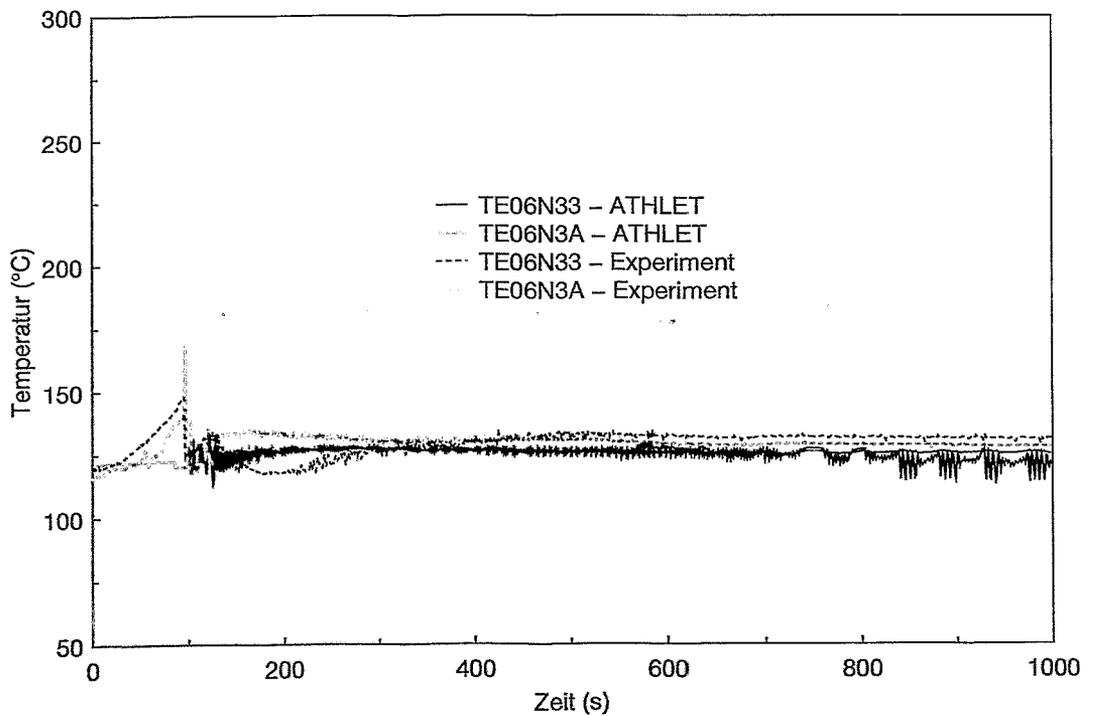
**Bild 5.15: Dampftemperaturen im unteren Bereich (SC5) und oberen Bereich (SCA) des Reaktorkerns (ATHLET - C1, Experiment - Brennelement Nr. 22)**



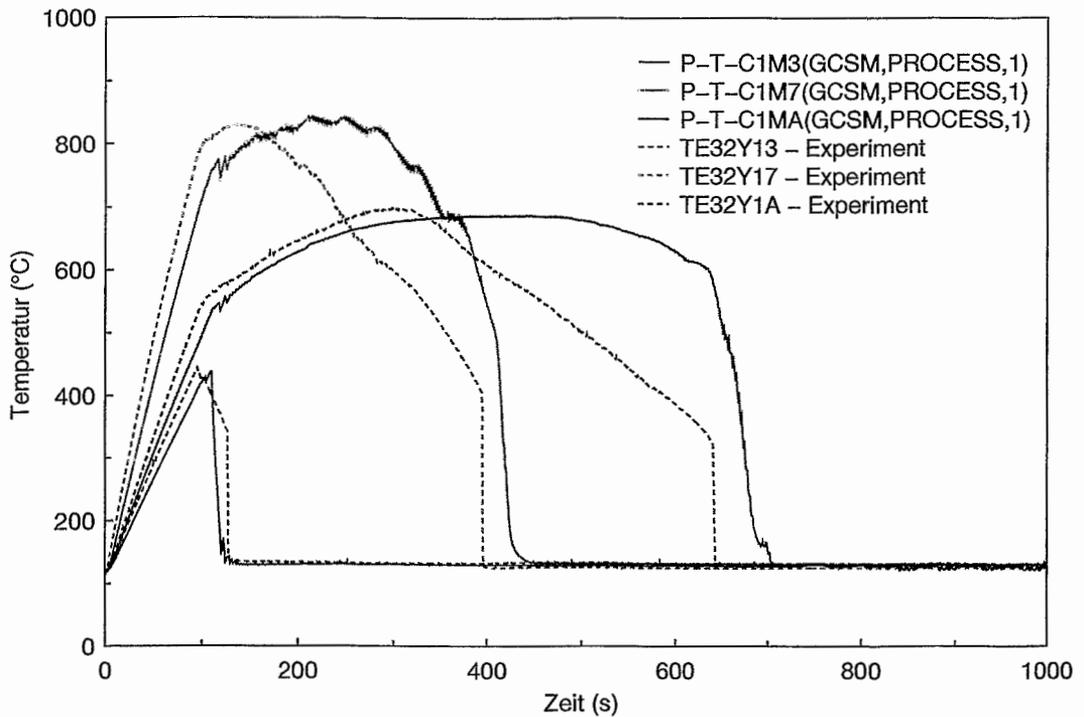
**Bild 5.16: Dampftemperaturen im unteren Bereich (SC5) und oberen Bereich (SCA) des Reaktorkerns (ATHLET - C2, Experiment - Brennelement Nr. 06)**



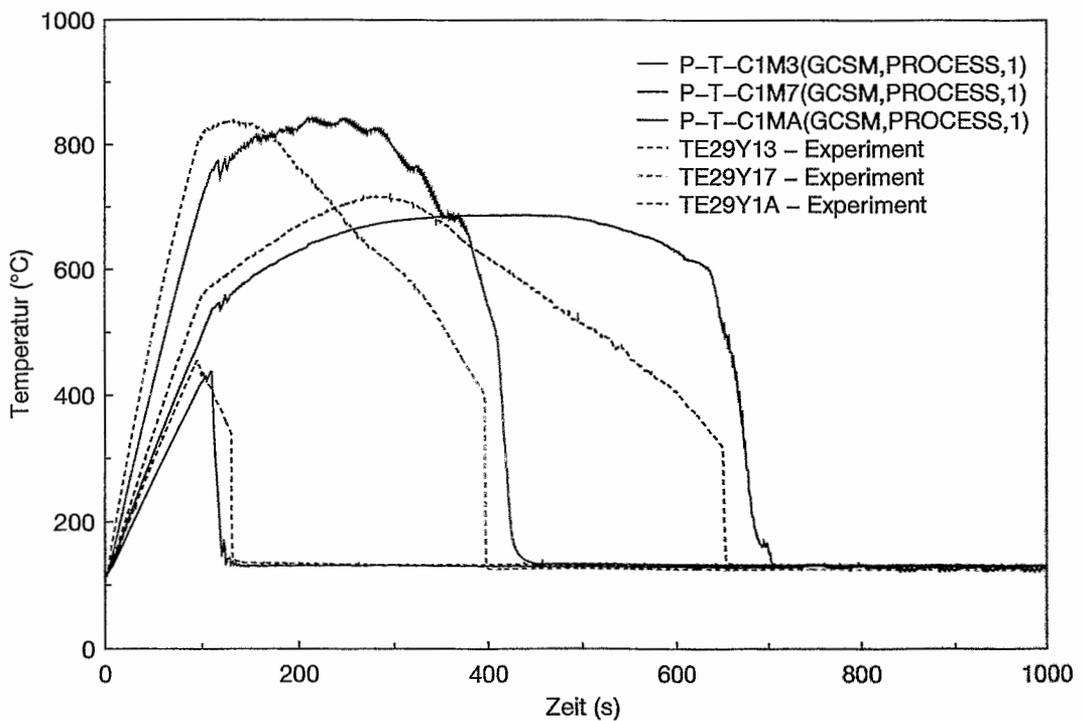
**Bild 5.17: Fluidtemperaturen im unteren Bereich (N33) und oberen Bereich (N3A) des Reaktorkerns (ATHLET - C1, Experiment - Brennelement Nr. 22)**



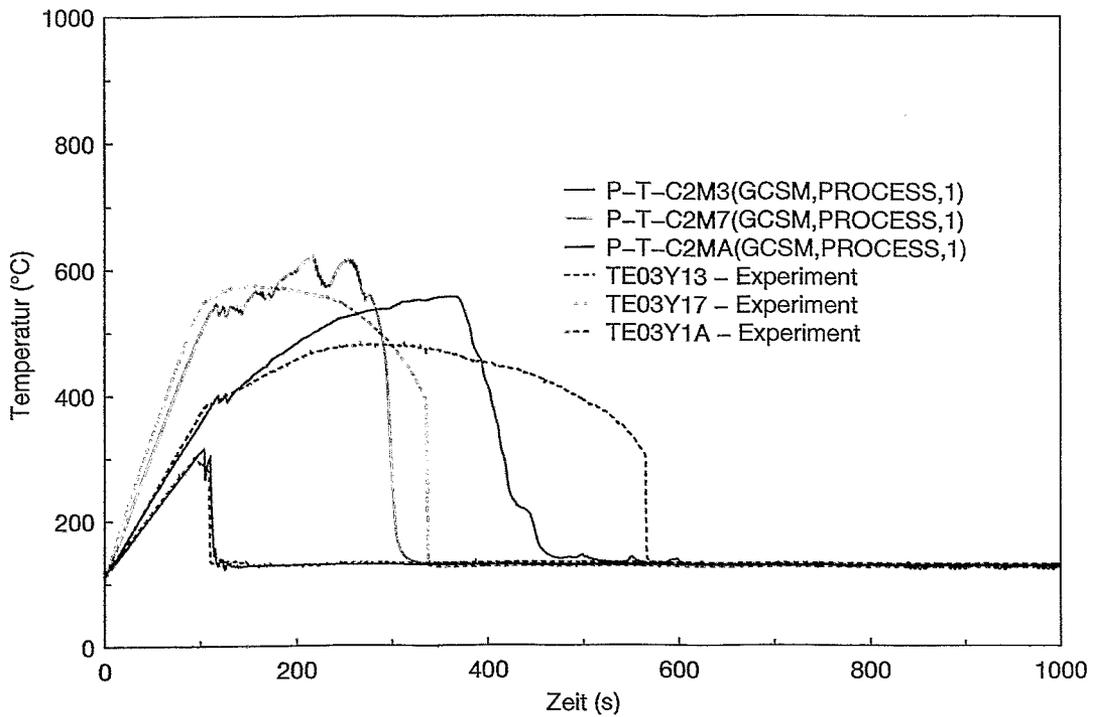
**Bild 5.18: Fluidtemperaturen im unteren Bereich (N33) und oberen Bereich (N3A) des Reaktorkerns (ATHLET - C2, Experiment - Brennelement Nr. 06)**



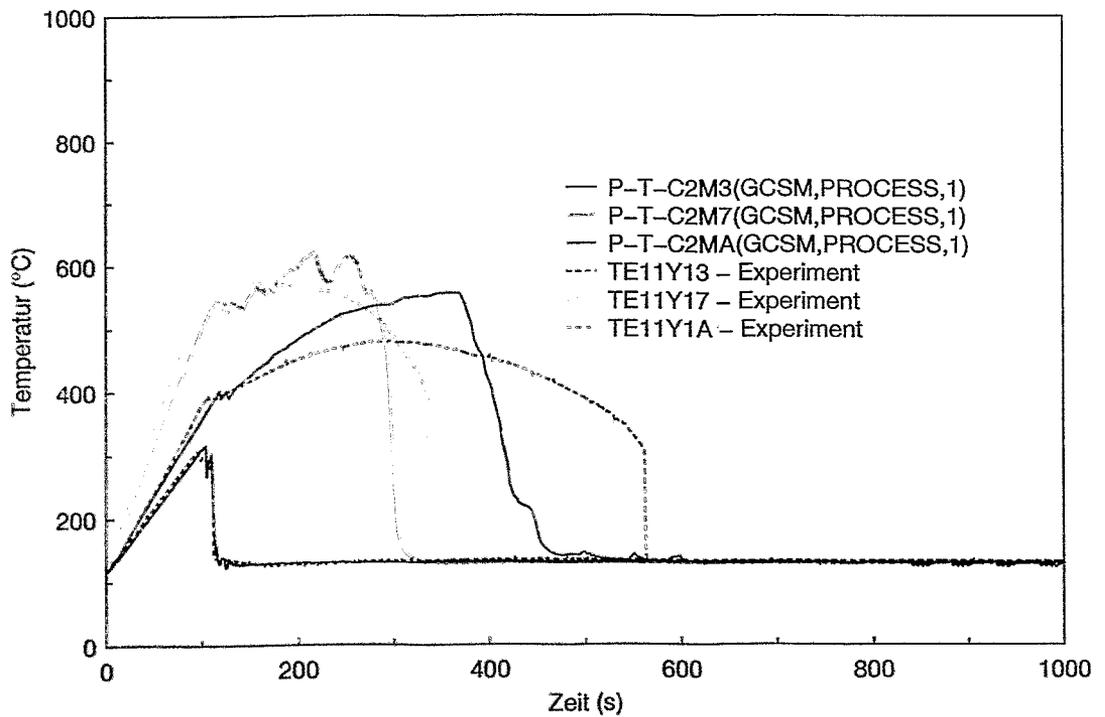
**Bild 5.19: Brennstabtemperaturen im unteren Bereich (Y13), in der Mitte (Y17) und im oberen Bereich (Y1A) des Reaktorkerns (ATHLET - C1, Experiment - Brennelement Nr. 32)**



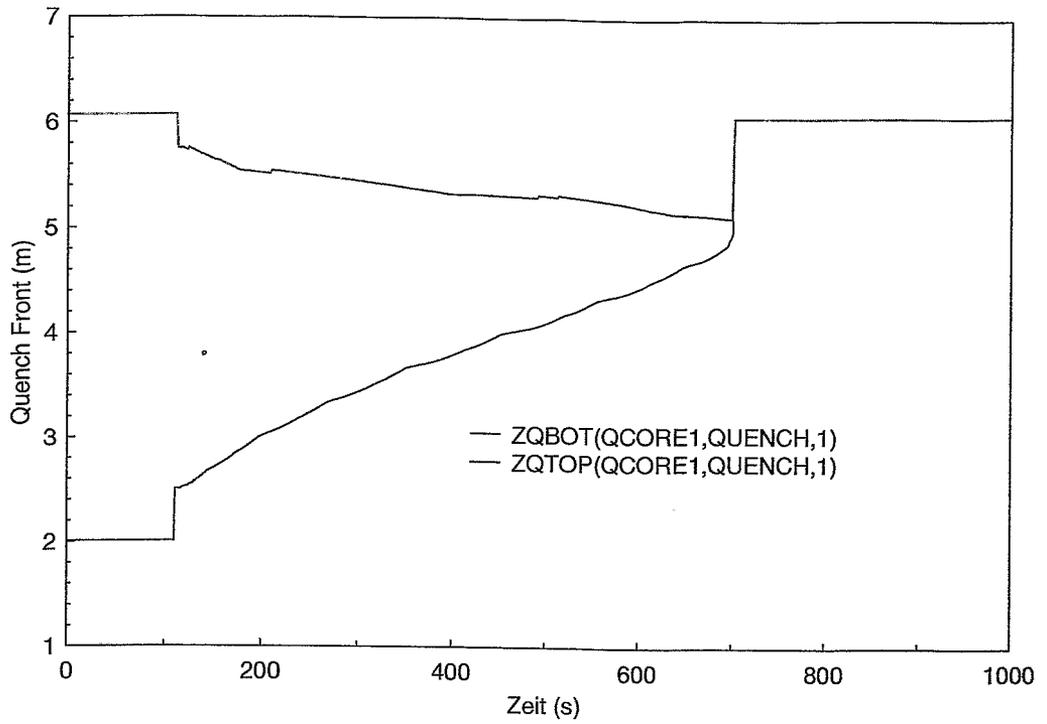
**Bild 5.20: Brennstabtemperaturen im unteren Bereich (Y13), in der Mitte (Y17) und im oberen Bereich (Y1A) des Reaktorkerns (ATHLET - C1, Experiment - Brennelement Nr. 29)**



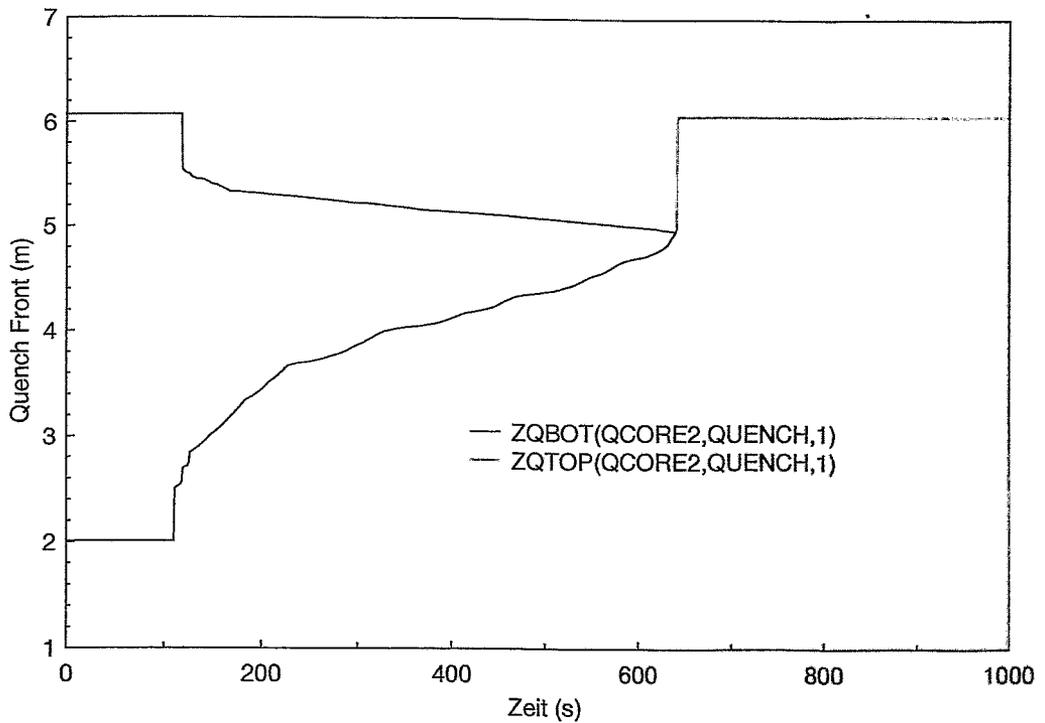
**Bild 5.21: Brennstabtemperaturen im unteren Bereich (Y13), in der Mitte (Y17) und im oberen Bereich (Y1A) des Reaktorkerns (ATHLET - C2, Experiment - Brennelement Nr. 03)**



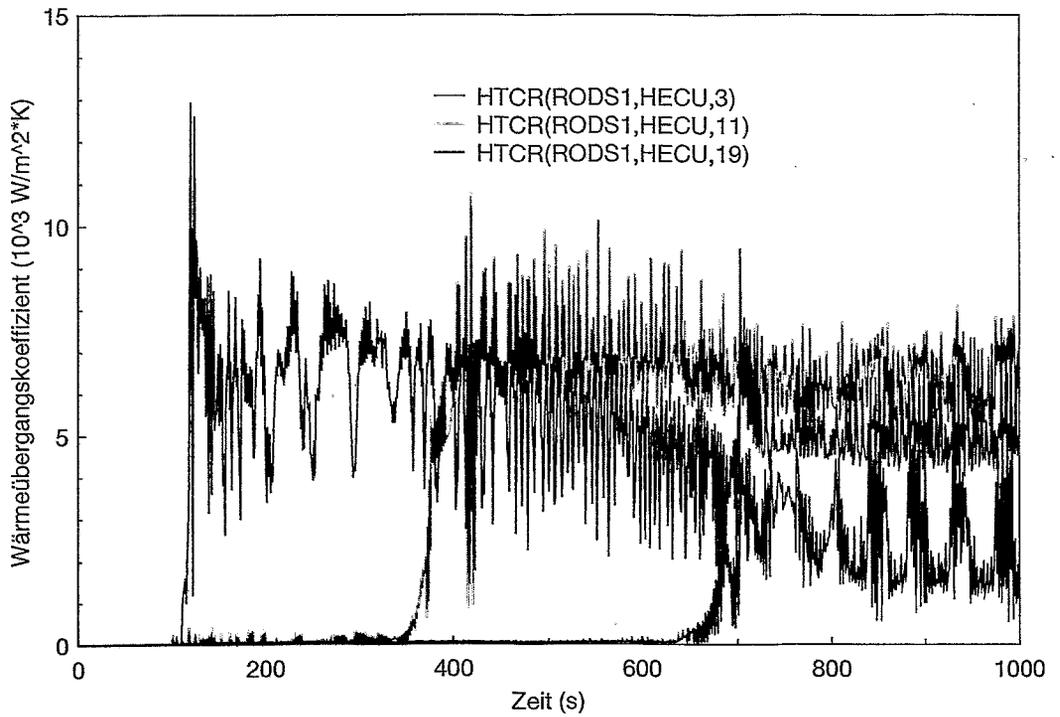
**Bild 5.22: Brennstabtemperaturen im unteren Bereich (Y13), in der Mitte (Y17) und im oberen Bereich (Y1A) des Reaktorkerns (ATHLET - C2, Experiment - Brennelement Nr. 11)**



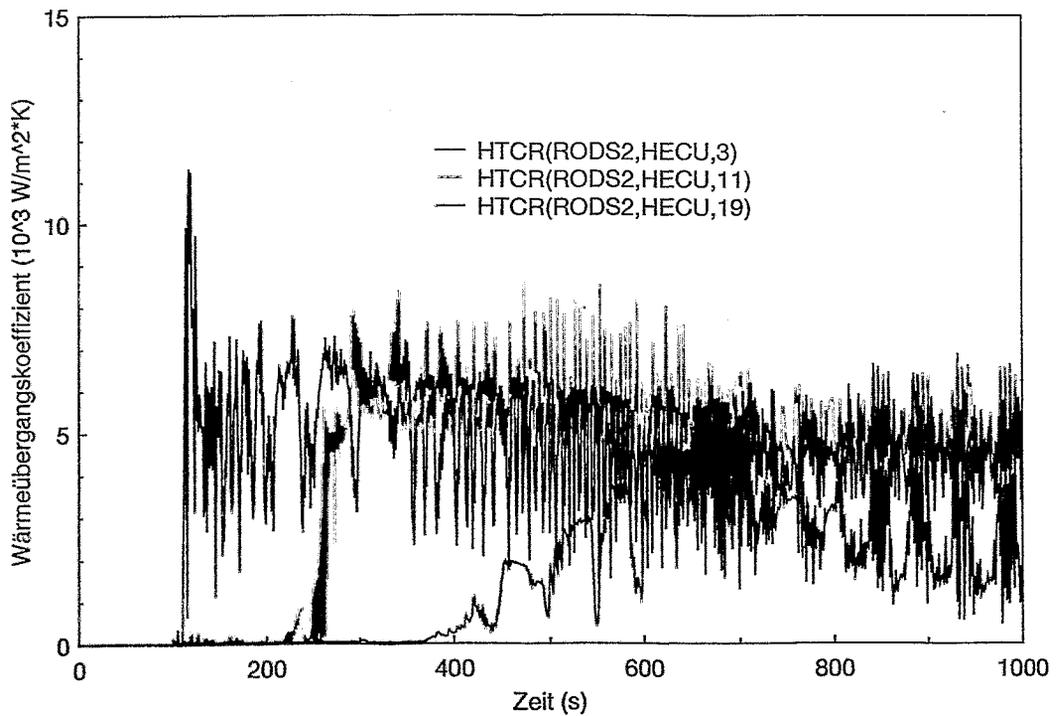
**Bild 5.23: Verlauf der mit ATHLET berechneten Quench Front im Zentrum des Reaktorkerns (CORE1)**



**Bild 5.24: Verlauf der mit ATHLET berechneten Quench Front in der Randzone des Reaktorkerns (CORE2)**



**Bild 5.25: Mit ATHLET berechnete Wärmeübergangskoeffizienten (unterer Teil, Mitte und oberer Teil der Brennelemente) - Zentrum (RODS1)**



**Bild 5.26: Mit ATHLET berechnete Wärmeübergangskoeffizienten (unterer Teil, Mitte und oberer Teil der Brennelemente) - Randzone (RODS2)**

## 6 Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts "Verifikation des ATHLET-Rechenprogrammes anhand der Nachanalyse zweier Experimente an der CCTF-Versuchsanlage" wurden die Experimente C2-04/62 und C2-19/79 nachgerechnet und analysiert.

Die Versuchsanlage CCTF ist ein 1:25 volumenskaliertes Modell eines 1000 MW Druckwasserreaktors und dient der Untersuchung der Wiederfüll- bzw. Wiederflutphase bei Druckwasserreaktor-Störfällen mit großem Leck. Bei den Experimenten wurde jeweils ein 2F-Bruch im kalten Strang mit kaltseitiger bzw. kombinierter Notkühlein speisung simuliert.

Die Rechnungen wurden mit den ATHLET Versionen Mod 1.2 Cycle A, B und C durchgeführt. Diese ATHLET Versionen sind insbesondere durch die Implementierung und Weiterentwicklung einer auf einem 6-Gleichungsmodell beruhenden Beschreibung der Thermohydraulik, bei der auch die Impulsgleichungen für die gasförmige und die flüssige Phase getrennt gelöst werden, gekennzeichnet. Die Vorteile einer 6-Gleichungs-Thermohydraulik werden insbesondere bei extremen Nichtgleichgewichtszuständen erwartet, wie sie z.B. bei der Notkühlein speisung und beim Wiederfluten auftreten. Im vorliegenden Bericht werden die Ergebnisse mit der aktuellen ATHLET Version Mod 1.2 Cycle C präsentiert.

Ausgehend von einem FLUT Datensatz wurde für die Rechnungen zur CCTF Versuchsanlage ein ATHLET Datensatz entwickelt. Hierzu waren eine ganze Reihe von Variationsrechnungen und Nodalierungsstudien nötig. Das Szenarium der Experimente ist durch sehr komplexe und rechenzeitintensive thermohydraulische Vorgänge gekennzeichnet. Durch eine konsequente Optimierung des ATHLET Datensatzes konnten die Rechenzeiten erheblich reduziert werden.

Die Auswertung der Rechnungen zeigt, daß die wesentlichen Phänome im Verlauf der Transiente gut wiedergegeben werden. Das betrifft vor allem das zeitliche Verhalten der Wiederbenetzungsfront und die damit verbundene Kühlung der Brennelemente. Die radiale Leistungsverteilung im Reaktorkern der Versuchsanlage wurde in den ATHLET-Rechnungen durch eine Zweikanal-Modellierung angenähert. In beiden Kanälen (Zentrum und Randkanal) wurde der axiale Verlauf der Reaktorleistung nachgebildet. Mit der gewählten Nodalierung kann das zeitliche Verhalten der Wiederbenetzungsfront im Zentrum und im Randbereich des Reaktormodells sehr gut modelliert werden.

Die vier Schleifen der Versuchsanlage wurden in der ATHLET Rechnung durch zwei Schleifen wiedergegeben. Die drei intakten Schleifen wurden dabei zu einer Schleife zusammengefaßt. Die Auswertung der experimentellen Daten ergab, daß ein asymmetrisches Verhalten der vier Schleifen im Reaktormodell nicht nachweisbar ist. Durch die ATHLET Rechnungen konnten die sicherheitsrelevanten Aussagen der Experimente reproduziert werden.

Die Schwachstellen der Rechnungen liegen vor allem bei der Notkühlein speisung in der Anfangsphase der Transiente. Hier wird kaltes Notkühlwasser in Volumina mit reinem Dampf eingespeist. Die Rechnungen liefern dabei zu hohe Kondensationsraten,

welche mit einer unrealistischen Druckabsenkung verbunden sind. Desweiteren wird der Druckaufbau durch die Verdampfung beim Wiederbenetzen der Brennelemente offensichtlich unterschätzt.

Mit der Codeversion 1.2 Cycle B war die Beschreibung der Einspeisung von kaltem Notkühlwasser in reinen Dampf für das Experiment mit beidseitiger Einspeisung C2-19 auf Grund numerischer Probleme nicht möglich. Nach weiteren Arbeiten der Codeentwickler und der Freigabe der Codeversion 1.2 Cycle C konnten diese Probleme jedoch behoben werden.

In den Experimenten wurde das Containment durch zwei Abblasetanks modelliert. Dabei wurde versucht, den Druck in den Abblasetanks über Druckentlastungsventile zu stabilisieren. Da zu dieser Regelung keine detaillierten Angaben vorlagen, wurde der Containmentdruck in den Rechnungen mit Hilfe von Time-Dependent Volumes bzw. als Zeitfunktion mit den experimentellen Daten vorgegeben. Bei genauerer Kenntnis der Abblaseregulung wäre hier eine realitätsnähere Modellierung möglich.

## 7 Literatur

- [1] Data Report on Large Scale Reflood Test-82  
CCTF CORE-II Test C2-4 (Run 62)  
JAERI - memo - 59 - 450, Februar 1985
- [2] Evaluation Report on CCTF CORE II Reflood Test C2-4 (Run 62)  
JAERI - memo - 85 - 026, March 1985
- [3] Data Report on Large Scale Reflood Test-128  
CCTF CORE-II Test C2-19 (Run 79)  
JAERI - memo - 63 - 081, March 1988
- [4] Evaluation Report on CCTF CORE II Reflood Test C2-19 (Run 79)  
JAERI - memo - 62 - 334, September 1987
- [5] L. Krey  
Post Test Calculation of CCTF-Test C2-20, Run 80 with the code system  
ATHLET/FLUT N08a, TÜV Bayern, Oktober 1991
- [6] G. Lerchl, H. Austregesilo  
ATHLET Mod 1.2 Cycle A: User's Manual  
Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, March 1998
- [7] G. Lerchl, H. Austregesilo  
ATHLET Mod 1.2 Cycle B: User's Manual  
Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, August 1999

## Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen

### Abbildungen

#### 3 Die Versuchsanlage CCTF

##### 3.1 Kurzbeschreibung der Versuchsanlage

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Bild 3.1: | Die Versuchsanlage CCTF   | 12 |
| Bild 3.2: | Die vier Schleifen der Versuchsanlage mit den Positionen der Notkühleinspeisung | 13 |
| Bild 3.3: | Abmessungen einer Schleife der Versuchsanlage                                   | 14 |
| Bild 3.4: | Querschnitt des Kernsimulators mit den 32 Brennelementsimulatoren               | 14 |

#### 4 Rechnungen zum Experiment C2-19/79

##### 4.1 Beschreibung des Experiments

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Bild 4.1: | Druck im Unteren Plenum (PT00RNO), Oberen Plenum (PT01RL2), Containment Tank 1 (PT01F) und Containment Tank 2 (PT01B)  | 18 |
| Bild 4.2: | Integrale Reaktorleistung (Power)  | 18 |
| Bild 4.3: | Heiseitige Notkühleinspeisung (FT01H-FT03H: intakte Schleifen, FT04H: Leckschleife) - FT02H und FT03H nicht verfügbar | 19 |
| Bild 4.4: | Kaltseitige Notkühleinspeisung (FT11Q-FT31Q: intakte Schleifen, FT41Q: Leckschleife) - FT41Q nicht verfügbar           | 19 |

##### 4.2 Modellierung mit ATHLET

|           |                                       |    |
|-----------|---------------------------------------|----|
| Bild 4.5: | Nodalisierung der Versuchsanlage CCTF | 23 |
| Bild 4.6: | Nodalisierung des Reaktormodells      | 23 |

##### 4.3 Rechnungen mit ATHLET Mod 1.2 Cycle C und konstanten Randbedingungen für das Containment

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Bild 4.7:  | Druck im Unteren Plenum (PT00RNO) und Oberen Plenum (PT01RL2)   | 27 |
| Bild 4.8:  | Druck im Containment Tank 1 (PT01F) und Tank 2 (PT01B)  | 27 |
| Bild 4.9:  | In der Rechnung vorgegebene Notkühleinspeisung in den intakten kalten Strang (ECCICL) und in den heißen Strang der intakten und der Leckschleife (ECCIHL und ECCBHL) - vgl. Bild 4.3 und 4.4 für das Experiment | 28 |
| Bild 4.10: | Integrale Reaktorleistung und Leistung in den beiden Kernkanälen  | 28 |
| Bild 4.11: | Differenzdruck im Downcomer (ATHLET - intakte Schleife (IL) und Leckschleife (BL), Experiment - Quadrant Nr. 5 und 7)   | 29 |
| Bild 4.12: | Differenzdruck im Oberen Plenum (Experiment - Quadrant Nr. 5 und 7)   | 29 |
| Bild 4.13: | Differenzdruck im Reaktor zwischen Unterem Plenum und Kernoberkante (ATHLET - Core 1, Experiment - Quadrant Nr. 5 und 7)  | 30 |
| Bild 4.14: | Differenzdruck im Reaktor zwischen Unterem Plenum und Kernoberkante (ATHLET - Core 2, Experiment - Quadrant Nr. 5 und 7)  | 30 |

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Bild 4.15: | Mit ATHLET berechneter Dampfgehalt im oberen Teil des Reaktorkerns (C1 - mittlerer Kernkanal) und im Oberen Plenum (UP3)  | 31 |
| Bild 4.16: | Mit ATHLET berechneter Dampfgehalt im oberen Teil des Reaktorkerns (C2 - Randkanal) und im Oberen Plenum (UP3)  | 31 |
| Bild 4.17: | Fluidtemperaturen im oberen Teil des Downcomer (ATHLET - intakte Schleife (IL) und Leckschleife (BL), Experiment - Quadrant Nr. 5 und 7)                        | 32 |
| Bild 4.18: | Fluidtemperaturen im unteren Teil des Downcomer (ATHLET - intakte Schleife (IL) und Leckschleife (BL), Experiment - Quadrant Nr. 5 und 7)                       | 32 |
| Bild 4.19: | Dampftemperaturen im unteren Bereich (SC5) und oberen Bereich (SCA) des Reaktorkerns (ATHLET - C1, Experiment - Brennelement Nr. 22)                            | 33 |
| Bild 4.20: | Dampftemperaturen im unteren Bereich (SC5) und oberen Bereich (SCA) des Reaktorkerns (ATHLET - C2, Experiment - Brennelement Nr. 06)                            | 33 |
| Bild 4.21: | Fluidtemperaturen im unteren Bereich (N33) und oberen Bereich (N3A) des Reaktorkerns (ATHLET - C1, Experiment - Brennelement Nr. 22)                            | 34 |
| Bild 4.22: | Fluidtemperaturen im unteren Bereich (N33) und oberen Bereich (N3A) des Reaktorkerns (ATHLET - C2, Experiment - Brennelement Nr. 06)                            | 34 |
| Bild 4.23: | Brennstabtemperaturen im unteren Bereich (Y13), in der Mitte (Y17) und im oberen Bereich (Y1A) des Reaktorkerns (ATHLET - C1, Experiment - Brennelement Nr. 32) | 35 |
| Bild 4.24: | Brennstabtemperaturen im unteren Bereich (Y13), in der Mitte (Y17) und im oberen Bereich (Y1A) des Reaktorkerns (ATHLET - C1, Experiment - Brennelement Nr. 29) | 35 |
| Bild 4.25: | Brennstabtemperaturen im unteren Bereich (Y13), in der Mitte (Y17) und im oberen Bereich (Y1A) des Reaktorkerns (ATHLET - C2, Experiment - Brennelement Nr. 03) | 36 |
| Bild 4.26: | Brennstabtemperaturen im unteren Bereich (Y13), in der Mitte (Y17) und im oberen Bereich (Y1A) des Reaktorkerns (ATHLET - C2, Experiment - Brennelement Nr. 11) | 36 |
| Bild 4.27: | Verlauf der mit ATHLET berechneten Quench Front im Zentrum des Reaktorkerns (CORE1)   | 37 |
| Bild 4.28: | Verlauf der mit ATHLET berechneten Quench Front in der Randzone des Reaktorkerns (CORE2)  | 37 |
| Bild 4.29: | Mit ATHLET berechnete Wärmeübergangskoeffizienten (unterer Teil, Mitte und oberer Teil der Brennelemente) - Zentrum (RODS1)                                     | 38 |
| Bild 4.30: | Mit ATHLET berechnete Wärmeübergangskoeffizienten (unterer Teil, Mitte und oberer Teil der Brennelemente) - Randzone (RODS2)                                    | 38 |
| <br>       |   |    |
| <b>4.4</b> | <b>Rechnungen mit ATHLET Mod 1.2 Cycle C und variablen Randbedingungen für das Containment</b>  |    |
| Bild 4.31: | Druck im Containment Tank 1 (PT01F) und Tank 2 (PT01B)  | 40 |
| Bild 4.32: | Druck im Unteren Plenum (PT00RNO) und Oberen Plenum (PT01RL2)   | 40 |
| Bild 4.33: | Differenzdruck im Downcomer (ATHLET - intakte Schleife (IL) und Leckschleife (BL), Experiment - Quadrant Nr. 5 und 7)   | 41 |

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Bild 4.34: | Differenzdruck im Oberen Plenum (Experiment - Quadrant Nr. 5 und 7)   | 41 |
| Bild 4.35: | Differenzdruck im Reaktor zwischen Unterem Plenum und Kernoberkante (ATHLET - Core 1, Experiment - Quadrant Nr. 5 und 7)  | 42 |
| Bild 4.36: | Differenzdruck im Reaktor zwischen Unterem Plenum und Kernoberkante (ATHLET - Core 2, Experiment - Quadrant Nr. 5 und 7)  | 42 |
| Bild 4.37: | Brennstabtemperaturen im unteren Bereich (Y13), in der Mitte (Y17) und im oberen Bereich (Y1A) des Reaktorkerns (ATHLET - C1, Experiment - Brennelement Nr. 32) | 43 |
| Bild 4.38: | Brennstabtemperaturen im unteren Bereich (Y13), in der Mitte (Y17) und im oberen Bereich (Y1A) des Reaktorkerns (ATHLET - C1, Experiment - Brennelement Nr. 29) | 43 |
| Bild 4.39: | Brennstabtemperaturen im unteren Bereich (Y13), in der Mitte (Y17) und im oberen Bereich (Y1A) des Reaktorkerns (ATHLET - C2, Experiment - Brennelement Nr. 03) | 44 |
| Bild 4.40: | Brennstabtemperaturen im unteren Bereich (Y13), in der Mitte (Y17) und im oberen Bereich (Y1A) des Reaktorkerns (ATHLET - C2, Experiment - Brennelement Nr. 11) | 44 |

## **5 Rechnungen zum Experiment C2-04/62**

### **5.1 Beschreibung des Experiments**

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Bild 5.1: | Druck im Unterem Plenum (PT00RNO), Oberem Plenum (PT01RL2), Containment Tank 1 (PT01F) und Containment Tank 2 (PT01B) | 46 |
| Bild 5.2: | Integrale Reaktorleistung (Power)   | 46 |
| Bild 5.3: | Notkühleinspeisung in das Untere Plenum (FJ01JW)  | 47 |
| Bild 5.4: | Kaltseitige Notkühleinspeisung (FT11Q-FT31Q: intakte Schleifen, FT41Q: Leckschleife) - FT41Q nicht verfügbar          | 47 |

### **5.3 Rechnungen mit ATHLET Mod 1.2 Cycle C und konstanten Randbedingungen für das Containment**

|            |  |    |
|------------|--|----|
| Bild 5.5:  | Druck im Unterem Plenum (PT00RNO) und Oberem Plenum (PT01RL2)  | 52 |
| Bild 5.6:  | Druck im Containment Tank 1 (PT01F) und Tank 2 (PT01B)   | 52 |
| Bild 5.7:  | In der Rechnung vorgegebene Notkühleinspeisung in das Untere Plenum (ECCLP) und in den kalten Strang der intakten Schleife (ECCICL) - vgl. Bild 5.3 und 5.4 für das Experiment | 53 |
| Bild 5.8:  | Integrale Reaktorleistung und Leistung in den beiden Kernkanälen   | 53 |
| Bild 5.9:  | Differenzdruck im Downcomer (ATHLET - intakte Schleife (IL) und Leckschleife (BL), Experiment - Quadrant Nr. 5 und 7)  | 54 |
| Bild 5.10: | Differenzdruck im Oberen Plenum (Experiment - Quadrant Nr. 5 und 7)  | 54 |
| Bild 5.11: | Differenzdruck im Reaktor zwischen Unterem Plenum und Kernoberkante (ATHLET - Core 1, Experiment - Quadrant Nr. 5 und 7)   | 55 |
| Bild 5.12: | Differenzdruck im Reaktor zwischen Unterem Plenum und Kernoberkante (ATHLET - Core 2, Experiment - Quadrant Nr. 5 und 7)   | 55 |
| Bild 5.13: | Fluidtemperaturen im oberen Teil des Downcomer (ATHLET - intakte Schleife (IL) und Leckschleife (BL), Experiment - Quadrant Nr. 5 und 7)                                       | 56 |

|  |    |
|--|----|
| Bild 5.14: Fluidtemperaturen im unteren Teil des Downcomer (ATHLET - intakte Schleife (IL) und Leckschleife (BL), Experiment - Quadrant Nr. 5 und 7)                       | 56 |
| Bild 5.15: Dampftemperaturen im unteren Bereich (SC5) und oberen Bereich (SCA) des Reaktorkerns (ATHLET - C1, Experiment - Brennelement Nr. 22)                            | 57 |
| Bild 5.16: Dampftemperaturen im unteren Bereich (SC5) und oberen Bereich (SCA) des Reaktorkerns (ATHLET - C2, Experiment - Brennelement Nr. 06)                            | 57 |
| Bild 5.17: Fluidtemperaturen im unteren Bereich (N33) und oberen Bereich (N3A) des Reaktorkerns (ATHLET - C1, Experiment - Brennelement Nr. 22)                            | 58 |
| Bild 5.18: Fluidtemperaturen im unteren Bereich (N33) und oberen Bereich (N3A) des Reaktorkerns (ATHLET - C2, Experiment - Brennelement Nr. 06)                            | 58 |
| Bild 5.19: Brennstabtemperaturen im unteren Bereich (Y13), in der Mitte (Y17) und im oberen Bereich (Y1A) des Reaktorkerns (ATHLET - C1, Experiment - Brennelement Nr. 32) | 59 |
| Bild 5.20: Brennstabtemperaturen im unteren Bereich (Y13), in der Mitte (Y17) und im oberen Bereich (Y1A) des Reaktorkerns (ATHLET - C1, Experiment - Brennelement Nr. 29) | 59 |
| Bild 5.21: Brennstabtemperaturen im unteren Bereich (Y13), in der Mitte (Y17) und im oberen Bereich (Y1A) des Reaktorkerns (ATHLET - C2, Experiment - Brennelement Nr. 03) | 60 |
| Bild 5.22: Brennstabtemperaturen im unteren Bereich (Y13), in der Mitte (Y17) und im oberen Bereich (Y1A) des Reaktorkerns (ATHLET - C2, Experiment - Brennelement Nr. 11) | 60 |
| Bild 5.23: Verlauf der mit ATHLET berechneten Quench Front im Zentrum des Reaktorkerns (CORE1)   | 61 |
| Bild 5.24: Verlauf der mit ATHLET berechneten Quench Front in der Randzone des Reaktorkerns (CORE2)  | 61 |
| Bild 5.25: Mit ATHLET berechnete Wärmeübergangskoeffizienten (unterer Teil, Mitte und oberer Teil der Brennelemente) - Zentrum (RODS1)                                     | 62 |
| Bild 5.26: Mit ATHLET berechnete Wärmeübergangskoeffizienten (unterer Teil, Mitte und oberer Teil der Brennelemente) - Randzone (RODS2)                                    | 62 |

## **Tabellen**

### **2 Gegenstand der Untersuchungen**

|   |    |
|---|----|
| Tabelle 2.1: Phänomene während eines 2F Bruchs im kalten Strang | 9  |
| Tabelle 2.2: Thermohydraulische Phänomene beim Experiment C2-19 | 10 |
| Tabelle 2.3: Thermohydraulische Phänomene beim Experiment C2-04 | 11 |

### **3 Die Versuchsanlage CCTF**

|  |    |
|--|----|
| Tabelle 3.1: Meßdaten aus der Standardinstrumentierung (JAERI) | 15 |
|--|----|

### **4 Rechnungen zum Experiment C2-19/79**

|  |    |
|--|----|
| Tabelle 4.1: Randbedingungen des Experiments C2-19           | 17 |
| Tabelle 4.2: Zeitlicher Ablauf des Experiments C2-19         | 17 |
| Tabelle 4.3 Aufteilung der Prioritätsketten                  | 21 |
| Tabelle 4.4: Axiale Positionen der Meßstellen im Reaktorkern | 26 |

### **5 Rechnungen zum Experiment C2-04/62**

|  |    |
|--|----|
| Tabelle 5.1: Randbedingungen des Experiments C2-04   | 45 |
| Tabelle 5.2: Zeitlicher Ablauf des Experiments C2-04 | 45 |