

FZR-231

August 1998

Eckhard Krepper und Frank Schäfer

**Verifikation des ATHLET-Rechenprogramms im Rahmen der
externen Verifikationsgruppe ATHLET
BETHSY Test 5.2c - Totalverlust des Speisewassers**

**Verification of the Computer Code ATHLET in the
Framework of the External Verification Group ATHLET
BETHSY Test 5.2c - Total Loss of Feedwater**

Archiv-Ex.:

BFD

Herausgeber:
FORSCHUNGSZENTRUM ROSSENDORF
Postfach 51 01 19
D-01314 Dresden
Telefon (03 51) 26 00
Telefax (03 51) 2 69 04 61

Als Manuskript gedruckt
Alle Rechte beim Herausgeber

Abschlußbericht / Final Report

Reaktorsicherheitsforschung - Vorhaben-Nr.: 150 1032

Reactor Safety Research - Project-No.: 150 1032

Vorhabentitel / Project Title:

**Verifikation des ATHLET-Rechenprogramms im Rahmen der
externen Verifikationsgruppe ATHLET
BETHSY Test 5.2c - Totalverlust des Speisewassers**

**Verification of the Computer Code ATHLET in the
Framework of the External Verification Group ATHLET
BETHSY Test 5.2c - Total Loss of Feedwater**

Autor / Author:

Eckhard Krepper
Frank Schäfer

Arbeitsstelle des Autors / Performing Organization:

Forschungszentrum Rossendorf
Institut für Sicherheitsforschung
Postfach 510119
D-01314 Dresden

Berichtsdatum / Publication Date: Berichts-Nr. / Report-No.:

Mai 1998 / May 1998

FWS 39/98

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie unter dem Förderkennzeichen BMBF 150 1032 gefördert. Verantwortlich für den Inhalt sind die Autoren. Dieser Bericht darf nur mit Zustimmung des Auftraggebers zitiert, ganz oder teilweise vervielfältigt oder an Dritte weitergegeben werden.

Kurzfassung

Im Rahmen der externen Validierung des von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit entwickelten Störfallcodes ATHLET, der in der Version Mod 1.1 Cycle D vorlag, wurden zwei Experimente nachgerechnet und analysiert, die an der französischen Versuchsanlage BETHSY durchgeführt wurden.

Das Experiment 5.2c dient der Untersuchung der Notfallprozeduren beim Totalausfall der Speisewasserversorgung auf der Dampferzeugersekundärseite. Spezielles Interesse gilt hierbei den Möglichkeiten der Notkühlung durch primäres Bleed and Feed, dem Verhalten der Dampferzeuger bei sekundärseitiger Austrocknung und dem Langzeitverhalten der Anlage bis zum Einspeisen der einzelnen Notkühlsysteme. Im Verlauf der Transiente erfolgt die Einspeisung sowohl aus dem Hochdrucknotkühlsystem als auch aus den Druckspeichern und dem Niederdrucknotkühlsystem.

Die Auswertung der Rechnungen zeigt, daß praktisch alle wesentlichen Phänome im Verlauf der Transiente korrekt wiedergegeben werden. Als ein wesentlicher Einflußfaktor auf die Qualität der Rechnungen hat sich die Modellierung der Wärmeverluste, welche an der Versuchsanlage teilweise durch eine Zusatzheizung (Trace Heating) kompensiert werden, herausgestellt. Werden die Wärmeverluste im Primärkreis falsch berechnet, so ergeben sich signifikante Abweichungen im Verlauf des Primärdrucks. Da alle Prozesse im weiteren druckgesteuert erfolgen, wirken sich Abweichungen im Primärdruck besonders stark auf den Verlauf der Transiente aus.

Die Ergebnisse der Rechnungen zeigen darüberhinaus, daß die sicherheitsrelevante Aussage des Experiments durch den Code ATHLET reproduziert wird.

Abstract

In the framework of the external validation of the thermohydraulic code ATHLET Mod 1.1 Cycle D, which has been developed by the GRS, post test analyses of two experiments were done, which were performed at the french integral test facility BETHSY.

The BETHSY experiment 5.2c investigates the accident procedures in case of a total loss of feedwater at the steam generator secondary side, [3]. In such an accident the emergency cooling of the reactor core with primary bleed and feed, the behaviour of the steam generators in case of dry out and the long time behaviour of the test facility are special subjects of interest. During the experiment the high pressure injection system, the hydroaccumulators and the low pressure injection system were available.

The evaluation of the calculated results shows, that all main phenomena can be calculated in a good quality compared with the experiment. Resulting from various calculations it should be noticed that the quality of the results strongly depends on the modelling of the heat losses of the facility, which were partly compensated by the trace heating. This trace heating was changed several times in the experiment to compensate the changing heat losses. The exact modelling of the resulting heat losses has a strong influence on the course of the whole transient. In this test the insufficient modelling of the resulting heat losses may be the reason for deviations of the calculated transient from the observed transient.

The results show, that the safety relevant statement of the experiment could be reproduced by the code ATHLET.

Inhaltsverzeichnis

	Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen	9
1.	Einleitung	13
2.	Die Integrale Versuchsanlage BETHSY	14
	2.1 Kurzbeschreibung der Versuchsanlage	14
	2.2 Meßinstrumentierung	20
3.	Beschreibung des Experiments BETHSY Test 5.2c	22
	3.1 Versuchsziel	22
	3.2 Experimentelle Randbedingungen	23
	3.3 Thermohydraulische Phänomene im Verlauf des Experiments	24
4.	Modellierung des Experiments mit dem Code ATHLET	26
	4.1 Überblick zu den gewählten Modelloptionen	26
	4.2 Nodalisierung der Versuchsanlage	26
	4.3 Anfangs- und Randbedingungen	26
5.	Vergleich der Ergebnisse von Rechnung und Experiment	30
	5.1 Gesamtablauf der Transiente	30
	5.1.1 Überblick zu wesentlichen Phänomenen im Verlauf der Transiente	30
	5.1.2 Visualisierung anhand der berechneten örtlichen Dampfgehaltsverteilung	32
	5.2 Initialisierungsphase des Experiments	33
	5.3 Feed and Spill Phase	34
	5.4 Feed and Bleed Phase	35
	5.5 Niederdruckeinspeisung und Abfuhr der Restwärme	37
	5.6 Modellierung des Trace Heating	37
6.	Zusammenfassung	39
7.	Literatur	40
	Abbildungen 5.1 - 5.66	41

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 2.1:	Übersicht zur Meßinstrumentierung der Versuchsanlage BETHSY	20
Tabelle 3.1:	Anfangsbedingungen für das Experiment BETHSY Test 5.2c	23
Tabelle 3.2:	Ablauf des Experiments und thermohydraulische Phänomene	24
Tabelle 4.1:	Anfangsbedingungen im Primärkreis	28
Tabelle 4.2:	Anfangsbedingungen im Sekundärkreis	28
Tabelle 5.1:	Wesentliche Phänomene im Verlauf der Transiente	31
Tabelle 5.2:	Werte des Trace Heating im Experiment	38

Verzeichnis der Abbildungen

Bild 2.1:	Aufbau des Primärkreises der BETHSY Versuchsanlage	15
Bild 2.2:	Anordnung der 3 Schleifen im Primärkreis der Versuchsanlage	16
Bild 2.3:	Schematischer Aufbau des Reaktormodells	18
Bild 2.4:	Schematischer Aufbau eines Dampferzeugermodells	19
Bild 4.1:	Nodalisierung des Primär- und Sekundärkreises der 1. Schleife	27
Bild 4.2:	Speisewasser- (S1-FW) und Dampfmassenstrom (S1-SL) im DE1	29
Bild 4.3:	Dampferzeugerhöhenstände im Verlauf der Nulltransiente	29
Bild 5.1:	Zeitlicher Verlauf der Reaktorleistung (W02)	42
Bild 5.2:	Primärdruck (P02) und Sekundärdruck im DE 1 (P47)	42
Bild 5.3:	Höhenstand im Dampferzeuger 1 (ZT4R1)	43
Bild 5.4:	Höhenstand im Dampferzeuger 2 (ZT5R1)	43
Bild 5.5:	Höhenstand im Dampferzeuger 3 (ZT6R1)	44
Bild 5.6:	Einspeisung aus den Notkühlsystemen in die 1. Schleife	44
Bild 5.7:	Charakteristik der Hochdrucknoteinspeisung (HPSI)	45
Bild 5.8:	Charakteristik der Niederdrucknoteinspeisung (LPSI)	45
Bild 5.9:	Masseninventar im Primärkreis (MCP)	46
Bild 5.10:	Masseninventar im Sekundärkreis (DE 1 und DE 3)	46
Bild 5.11:	Masseninventar (Wasser/Dampf) im Primärkreis	47
Bild 5.12:	Masseninventar (Wasser/Dampf) im Sekundärkreis (DE 2)	47
Bild 5.13:	Nodalisierung der 1. Schleife (Primär- und Sekundärseite)	49
Bild 5.14:	Dampfgehaltsverteilung zum Zeitpunkt $t=13$ s	49
Bild 5.15:	Dampfgehaltsverteilung zum Zeitpunkt $t=2441$ s	51
Bild 5.16:	Dampfgehaltsverteilung zum Zeitpunkt $t=2627$ s	51
Bild 5.17:	Dampfgehaltsverteilung zum Zeitpunkt $t=2785$ s	53

Bild 5.18:	Dampfgehaltsverteilung zum Zeitpunkt $t=3583$ s	53
Bild 5.19:	Dampfgehaltsverteilung zum Zeitpunkt $t=4256$ s	55
Bild 5.20:	Dampfgehaltsverteilung zum Zeitpunkt $t=5500$ s	55
Bild 5.21:	Dampfgehaltsverteilung zum Zeitpunkt $t=7505$ s	57
Bild 5.22:	Dampfgehaltsverteilung zum Zeitpunkt $t=8200$ s	57
Bild 5.23:	Dampfgehaltsverteilung zum Zeitpunkt $t=8425$ s	59
Bild 5.24:	Dampfgehaltsverteilung zum Zeitpunkt $t=9800$ s	59
Bild 5.25:	Differenzdruck im DE 1 (Riser - Down Flow side)	61
Bild 5.26:	Differenzdruck im DE 3 (Riser - Down Flow Side)	61
Bild 5.27:	Druck im Sekundärkreis (P47) - Dampferzeuger 1	62
Bild 5.28:	Massenstrom in der Steam Line - DE 1	62
Bild 5.29:	Dampferzeugerleistung in verschiedenen Nodes (Up Flow Side)	63
Bild 5.30:	Dampferzeugerleistung in verschiedenen Nodes (Down Flow Side)	63
Bild 5.31:	Volumenstrom im Downcomer (Q05)	64
Bild 5.32:	Massenstrom der Hochdrucknoteinspeisung (1. Schleife)	64
Bild 5.33:	Differenzdruck im Druckhalter (DPP1)	65
Bild 5.34:	Höhenstand im Druckhalter (ZTP1)	65
Bild 5.35:	Temperaturen im Druckhalter (TFP1 - top, TFP2 - bottom)	66
Bild 5.36:	Pumpendrehzahl (VP1/2) - 1. und 2. Schleife	66
Bild 5.37:	Dampfgehalt in der Druckhalterabblaseleitung (ALP)	67
Bild 5.38:	Massenstrom in der Druckhalterabblaseleitung (QMP)	67
Bild 5.39:	Dampfgehalt in der Surge Line (ALB2 - bottom, ALB - top)	68
Bild 5.40:	Massenstrom in der Surge Line (QMB)	68
Bild 5.41:	Temperaturen am DE-Ein- und -austritt (1. Schleife)	69
Bild 5.42:	Temperaturen am DE-Ein- und -austritt (2. Schleife)	69
Bild 5.43:	Temperaturen auf der DE-Sekundärseite (DE1)	70
Bild 5.44:	Temperaturen auf der DE-Sekundärseite (DE2)	70
Bild 5.45:	Dampfgehalt am Eintritt in den heißen Strang (HL1)	71
Bild 5.46:	Dampfgehalt am Eintritt in den heißen Strang (HL2)	71
Bild 5.47:	Höhenstand im Reaktormodell (ZT0200)	72
Bild 5.48:	Dampfgehalt im Reaktorkern (AL0211 - top, AL0207 - middle)	72
Bild 5.49:	Brennstaboberflächentemperaturen ($z=3.46$ m)	73
Bild 5.50:	Brennstaboberflächentemperaturen ($z=1.83$ m)	73
Bild 5.51:	Primärdruck (P02) und Sekundärdruck (P47 - DE1)	74
Bild 5.52:	Dampferzeugerleistung in einzelnen Nodes	74

Bild 5.53:	Differenzdruck über den Dampferzeuger U-Rohren (DE1)	75
Bild 5.54:	Differenzdruck über den Dampferzeuger U-Rohren (DE2)	75
Bild 5.55:	Integraler Massenstrom der Druckspeichereinspeisung (MSMI)	76
Bild 5.56:	Primärdruck (P02) im Verlauf der Druckspeichereinspeisung	76
Bild 5.57:	Dampfgehalt im Bypass (AVBYP) und im Upper Head (AVUH1)	77
Bild 5.58:	Massenbilanz für den Primärkreis (Masseverluste über den Druckhalter (QMPI) und die aus der Notkühlung eingespeisten Massen)	77
Bild 5.59:	Massenstrom der Niederdrucknoteinspeisung in der 1. Schleife	78
Bild 5.60:	Massenstrom der Niederdrucknoteinspeisung in der 2. Schleife	78
Bild 5.61:	Integraler Massenstrom der Niederdruckeinspeisung (2. Schleife)	79
Bild 5.62:	CPU-Zeit	79
Bild 5.63:	Druckverlauf für die Rechnungen mit variiertem Trace Heating	80
Bild 5.64:	Druckspeichereinspeisung für die Rechnungen mit variiertem Trace Heating	80
Bild 5.65:	Primär- (P02) und Sekundärdruck (P47) für die Standardvariante und die Variante mit angepaßtem Trace Heating	81
Bild 5.66:	Verdampfungs- bzw. Kondensationsrate in der Steam Line für die Standardvariante und die Variante mit angepaßtem Trace Heating	81

1. Einleitung

Im Rahmen der externen Verifikation des von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit entwickelten Störfallcodes ATHLET, der in der Version Mod 1.1 Cycle D vorlag, wurden im Forschungszentrum Rossendorf zwei Experimente nachgerechnet und analysiert. Die an der französischen Integralanlage BETHSY durchgeführten Experimente hatten die Untersuchung von Accident Management-Maßnahmen in zwei verschiedenen Störfallszenarien zum Ziel.

Im ersten Experiment (Test 5.2c) wurde der Ausfall der Speisewasserversorgung simuliert, wobei als Notfallmaßnahmen die primärseitige Hochdrucknoteinspeisung und gleichzeitige Druckhalterentlastung (Bleed- and Feed) zur Verfügung standen.

In einem zweiten Experiment - Test 9.3 -, wurden die Konsequenzen untersucht, wenn bei einem Heizrohrbruch die Hochdruckeinspeisung versagt und nur die Druckspeicher sowie die Niederdruckeinspeisung zur Verfügung stehen. Als Accident Management Maßnahmen wurden die sekundäre Druckentlastung und schließlich die primäre Entlastung über den Druckhalter untersucht (s. Abschlußbericht Teil 2).

Im ersten Teil des Abschlußberichts werden die Rechnungen zum Experiment Test 5.2c - Totalverlust der Speisewasserversorgung - vorgestellt.

In dem zugrundeliegenden Szenarium kommt es in der Anfangsphase der Transiente zu einer Beeinträchtigung der Wärmeabfuhr über die Dampferzeuger. Die Abnahme des sekundärseitigen Masseninventars ist mit einer Abnahme der wirksamen Wärmeübertragerfläche verbunden. Der daraus resultierende Anstieg des Primärdrucks wird im ersten Teil der Transiente durch das Druckhaltersicherheitsventil begrenzt.

Durch das Versagen der Notspeisewasserversorgung für die Dampferzeuger kommt es zu einem weiteren Druckaufbau im Primärkreis. Somit ist der Einsatz zusätzlicher AM Maßnahmen erforderlich. Durch eine Druckentlastung über den Druckhalter und die Einspeisung aus dem Hochdrucknotkühlsystem bzw. im weiteren Verlauf der Transiente auch aus den Druckspeichern kann der Primärdruck im System wieder abgesenkt werden.

Das Ziel der hier vorgestellten Rechnungen war die Analyse der thermohydraulischen Phänomene und der Nachweis, daß die beobachteten physikalischen Effekte und relevanten sicherheitstechnischen Aussagen des Experiments mit der vorliegenden ATHLET Version modellierbar und reproduzierbar sind.

Im Verlauf der Untersuchungen zeigte sich, daß das Experiment ein sehr komplexes Szenario sich gegenseitig bedingender Schalthandlungen darstellt. Probleme ergaben sich dabei aus der Kopplung und gegenseitigen Bedingung aller Phänomene.

2. Die Integrale Versuchsanlage BETHSY

2.1 Kurzbeschreibung der Versuchsanlage

Die BETHSY Versuchsanlage ist ein im Verhältnis 1:100 skaliertes Modell eines Druckwasserreaktors (FRAMEATOME) von 900 MW elektrischer Leistung (2775 MW thermische Leistung). Die Anlage dient der Untersuchung verschiedener Störfalltransienten mit dem Ziel der Bereitstellung experimenteller Daten für die Code-Validierung und die Verifizierung von anlageninternen Notfallmaßnahmen. Der Standort der Versuchsanlage ist Grenoble.

In der BETHSY Versuchsanlage wurden alle 3 Schleifen der Referenzanlage mit je einem Dampferzeuger nachgebildet, vgl. Bild 2.1 und Bild 2.2. Die Versuchsanlage ermöglicht damit die Untersuchung von Störfallsituationen mit einem asymmetrischen Schleifenverhalten.

Die Auslegung der Versuchsanlage für hohe Drücke gestattet die Untersuchung von Transienten und Störfällen im gesamten Druckbereich. Der Primärkreis ist für einen Druck von 17.2 MPa und der Sekundärkreis für einen Druck von 8 MPa ausgelegt.

Die maximale Reaktorleistung beträgt 10 % der skalierten Nennleistung und ist damit auf das Niveau der Nachzerfallsleistung beschränkt. An der BETHSY Versuchsanlage können somit keine Untersuchungen zu ATWS Störfällen durchgeführt werden.

Die Auslegung der Hauptkühlmittelpumpen erfolgte so, daß die Versuchsanlage mit dem skalierten nominalen Massenstrom in allen 3 Schleifen betrieben werden kann.

Die volumetrische Skalierung der BETHSY Versuchsanlage liegt bei 1:100 (exakt 1:103.2). Für die Untersuchung von Prozessen bei Naturumlauf spielen geodätische Effekte eine große Rolle. Bei der BETHSY Versuchsanlage wurde auf eine höhenidentische Nachbildung der einzelnen Komponenten geachtet (Höhenskalierung 1:1).

Zusätzlich zu den 3 Schleifen mit Reaktormodell und Dampferzeugern werden an der Versuchsanlage auch folgende Systeme modelliert:

- Druckhalter mit Heizung, Sprühsystem, Sicherheits- und Entlastungsventilen
- Druckspeicher, Hoch- und Niederdrucknotkühlein speisung
- Dampferzeuger: Sicherheits- und Entlastungsventile, Speisewasser und Notspeisewasser, Abblaseleitungen.

Bild 2.1 zeigt am Beispiel einer einzelnen Schleife den prinzipiellen Aufbau des Primärkreises, bestehend aus dem Reaktormodell mit einem externen Ringschacht (Downcomer), dem heißen und kalten Strang, der Hauptkühlmittelpumpe, einem Dampferzeuger und dem Druckhalter. Die Anordnung aller 3 Schleifen geht aus Bild 2.2 hervor. Der Reaktorbehälter ist für maximal 17.2 MPa und 400 °C ausgelegt. Für einen Primärdruck kleiner 10 MPa liegt die maximal mögliche thermische Belastung der Reaktorkomponenten bei 600 °C, so daß auch Störfälle mit einer Freilegung des Reaktorkerns untersucht werden können. Der Reaktorkern selbst besteht aus 428 elektrisch beheizten Brennstäben in Originallänge. Mit einer Anschlußleistung von 3 MW können so 10 % der skalierten Nennleistung modelliert werden. Die Brennstäbe modellieren darüberhinaus eine kosinusförmige Leistungsverteilung in axialer Richtung mit einem axialen Ungleichmäßigkeitsfaktor von 1.6. Der Aufbau des Reaktormodells ist in Bild 2.3 dargestellt. Die Konstruktion der Rohrleitungen des Primärkreises erfolgte unter Einhaltung der Froude-Zahl für den heißen Strang, der Innendurchmesser der Rohrleitungen beträgt 118 mm. Der Druckhalter kann wahlweise in Schleife 1

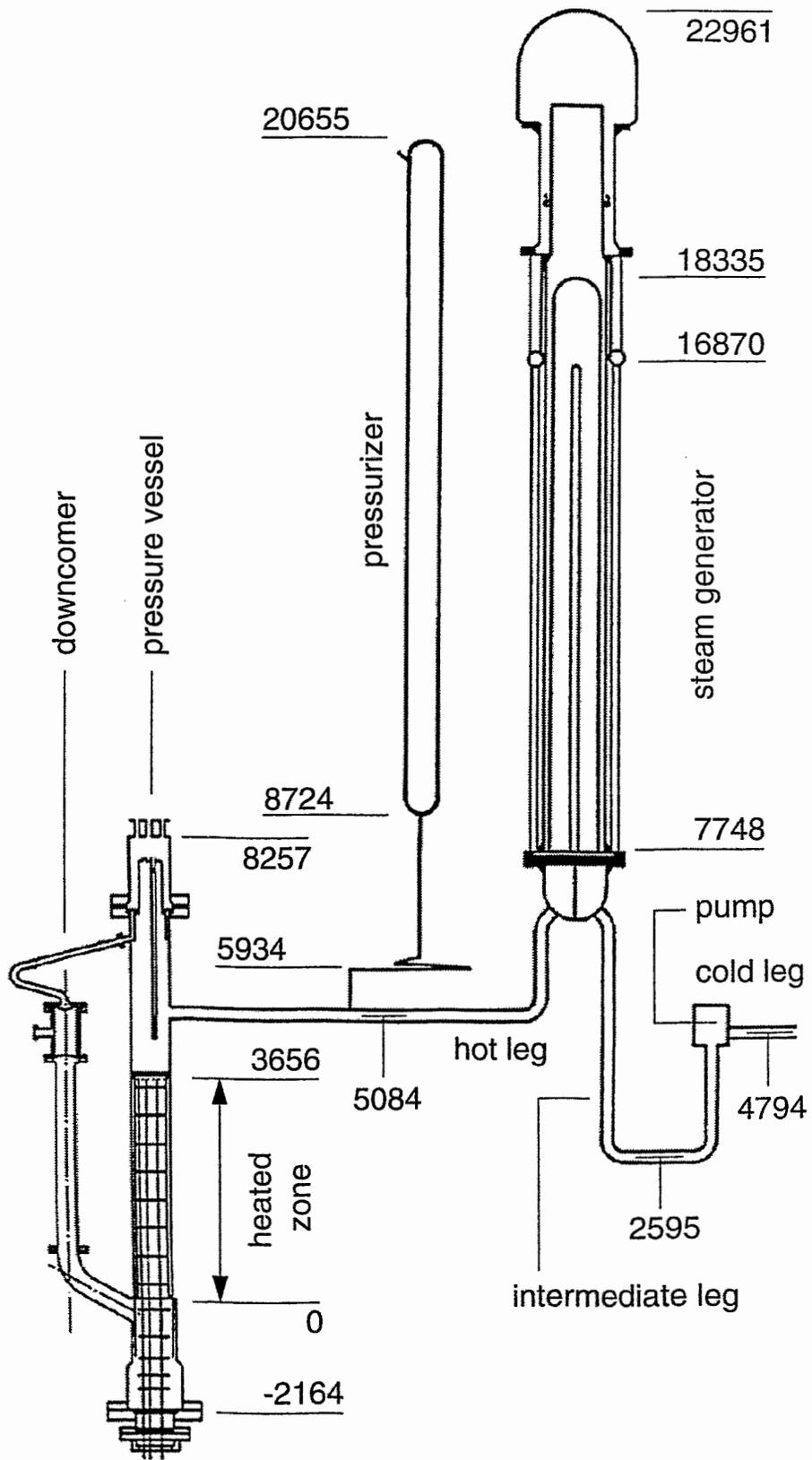


Bild 2.1: Aufbau des Primärkreises der BETHSY Versuchsanlage

SG1, SG2, SG3 ... steam generator
 P1, P2, P3 ... main coolant pump

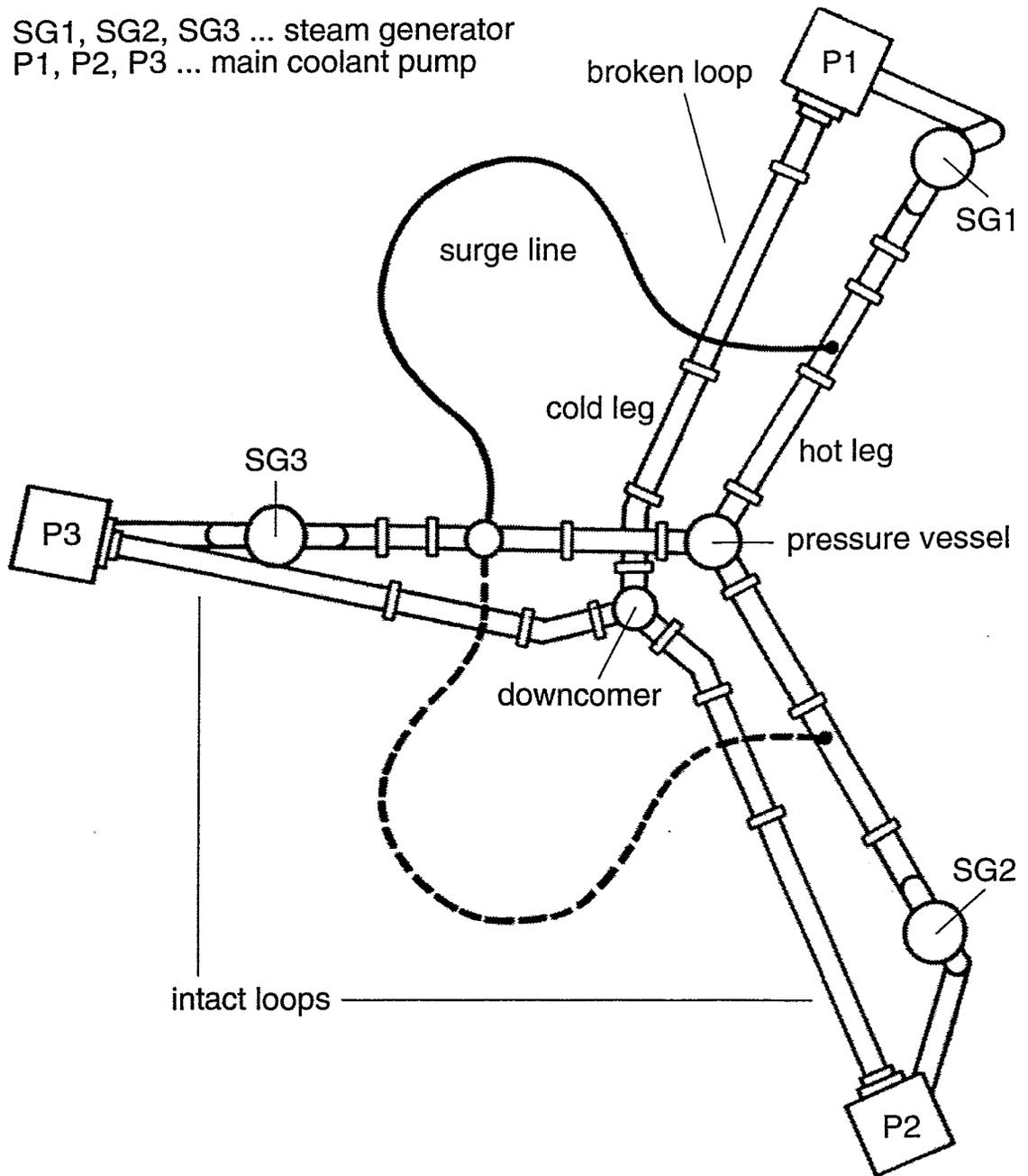


Bild 2.2: Anordnung der 3 Schleifen im Primärkreis der Versuchsanlage

(Leckschleife) oder in Schleife 2 (intakte Schleife) eingebunden werden. Die Skalierung des Druckhalters folgt der Skalierung des Primärkreises mit einer höhenidentischen Nachbildung der Komponenten. Zur Druck- und Höhenstandsregelung ist der Druckhalter mit einer elektrischen Heizung (6 mal 2.5 kW) ausgestattet. Die Anordnung der Druckentlastungsarmaturen entspricht der Originalanlage. Die Druckentlastung kann über Atmosphäre oder in einen Abblasetank zur Messung des integralen Massenstroms erfolgen.

Der Sekundärkreis besteht aus den 3 Dampferzeugern, den Dampfleitungen, einem Sprühkondensator, dem Speisewasser- und Notspeisewassersystem sowie den Sicher-

heits- und Abblaseventilen. Der prinzipielle Aufbau eines Dampferzeugermodells ist aus Bild 2.4 ersichtlich. Der Dampferzeuger enthält 34 U-Rohre mit denselben radialen und axialen Abmessungen wie in der Originalanlage. Die Höhenausdehnung der U-Rohre liegt zwischen 9 und 10.5 m. Die Anordnung der U-Rohre erfolgte unter Einhaltung des hydraulischen Durchmessers auf der Sekundärseite.

Die Systeme zur Notkühleinspeisung werden ebenfalls in der Versuchsanlage modelliert. Die Hoch- und Niederdrucknotkühleinspeisung ist mit einem Wassertank von 25 m³ Volumen gekoppelt. Die maximalen Einspeiseraten liegen bei 3 bzw. 20 m³/h. Die Druckspeichereinspeisung und die Einspeisung aus dem Hoch bzw. Niederdrucknotkühlsystem erfolgt normalerweise in die kalten Stränge. Darüberhinaus sind aber noch zusätzliche Einspeisepunkte in den heißen Strängen, dem oberen und unteren Plenum vorgesehen.

Verglichen mit der Originalanlage treten in einer volumenskalierten Versuchsanlage Abweichungen in den Wärmeverlusten und dem Wärmeübergang zwischen Struktur und Fluid (größere Wärmespeicherung, geringere Zeitkonstanten) auf, die u.a. durch ein größeres Oberflächen- zu Volumen-Verhältnis und zusätzlichen Wärmeverluste infolge mechanischer Verbindungen und Durchführungen (Instrumentierung) verursacht werden. Um den Einfluß dieser Effekte auf den Verlauf einer Transiente zu minimieren, wurde die Versuchsanlage mit einer Zusatzheizung (Trace Heating) zur Regulierung der Wärmeverluste ausgestattet.

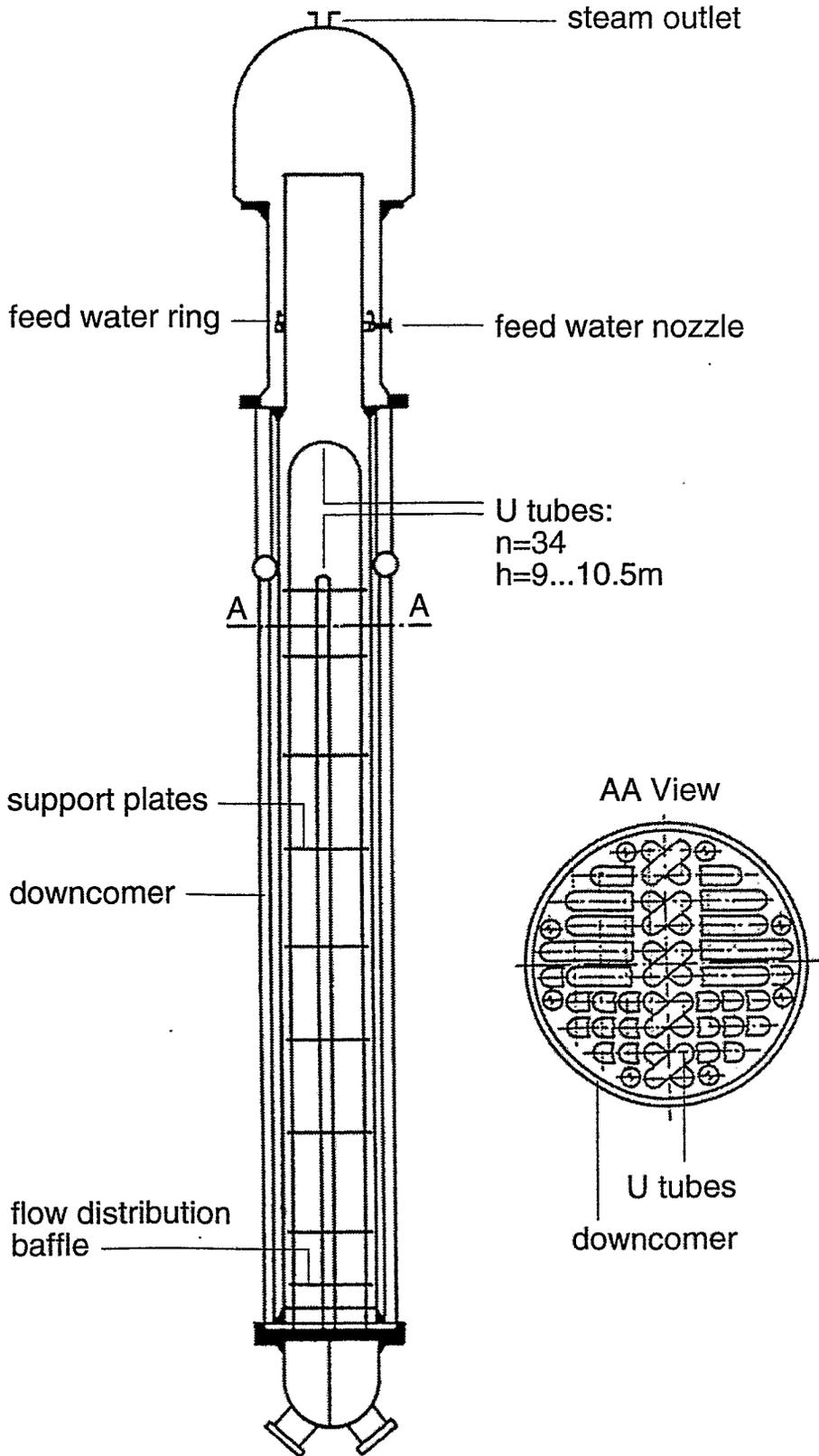


Bild 2.4: Schematischer Aufbau eines Dampferzeugermodells

2.2 Meßinstrumentierung

Die BETHSY Versuchsanlage ist mit einer sehr umfangreichen Instrumentierung ausgestattet. Insgesamt sind 1486 Meßaufnehmer vorhanden. Die Instrumentierung untergliedert sich in zwei Gruppen: physikalische Instrumentierung und Instrumentierung des Steuersystems. Die erste Gruppe liefert Meßdaten zu den physikalisch relevanten Vorgängen in der Versuchsanlage, sie wird für die phänomenologische Beschreibung der Prozesse und zur Code-Validierung genutzt. Die zweite Gruppe liefert Signale für Steuer- und Regelprozesse und damit zur Steuerung der Anlage selbst. Einen Überblick zur Instrumentierung einzelner Komponenten der Versuchsanlage gibt Tabelle 2.1.

Tabelle 2.1: Übersicht zur Meßinstrumentierung der Versuchsanlage BETHSY

	P	DP	TF	TP	TQ-TZ	Q	V	AL
Reaktormodell	x	x	x	x	x	x	-	x
Druckhalter	x	x	x	x	-	x	-	x
Heißer Strang	x	x	x	x	-	-	x	x
COL	-	x	x	x	-	-	x	-
Kalter Strang	x	x	x	x	-	-	x	x
DE Primärseite	-	x	x	x	-	-	-	-
DE Sekundärseite	x	x	x	x	-	x	-	-
Accumulator	x	x	x	-	-	-	-	-
HPSI	-	-	x	-	-	x	-	-
LPSI	-	-	x	-	-	x	-	-

Im Reaktormodell wird der Primärdruck an zwei unterschiedlichen Positionen und in verschiedenen Meßbereichen bestimmt. Zur Messung des Masseninventars und zur Verfolgung von Gemischspiegelbewegungen dienen die über die gesamte Höhe des Reaktormodells verteilten Differenzdruckmeßstellen. Neben den Fluid- und Wandtemperaturen werden auch eine ganze Reihe von Brennstabtemperaturen bestimmt. Die Anordnung der Meßstellen gestattet sowohl die Messung der radialen als auch der axialen Verteilung der Brennstabtemperaturen im Reaktorkern. Meßstellen für den Volumenstrom befinden sich im Ringspalt (downcomer). Zusätzlich zu den Differenzdruckmeßstellen wurde auch die axiale Verteilung des Dampfgehalts im Reaktorkern bestimmt.

Das Druckhaltermodell ist mit Meßstellen für Druck, Differenzdruck, Fluid- und Wandtemperaturen ausgestattet. Dampfgehaltsmessungen sowie die Messung von Massen- und Volumenströmen erfolgen sowohl im Bereich der Surge Line als auch in der Druckhalterabblaseleitung (Vent Line).

In den Rohrleitungen des Primärkreises (Hot Leg, Cross Over Leg und Cold Leg) werden an ausgewählten Positionen Fluid- und Wandtemperaturen gemessen. In den horizontalen Abschnitten der Rohrleitungen werden die Fluidtemperaturen darüberhinaus auch in zwei unterschiedlichen radialen Positionen bestimmt (Stratifizierungseffekte). Die vertikalen Abschnitte der Rohrleitungen sind mit Differenzdruckmeßstellen versehen. Zusätzliche Informationen im Falle asymmetrischen Schleifenverhaltens liefern die Differenzdrücke zwischen den einzelnen Schleifen. Für eine detaillierte Untersuchung der verschiedenen Strömungsformen in horizontalen Rohrleitungen wurden im heißen und kalten Strang sogenannte Spool Pieces angeordnet. Diese Meßstellen gestatten die Messung von Druck, Differenzdruck zwischen kaltem und heißem Strang einer Schleife, Differenzdruck über dem Radius der Rohrleitung, Dampfgehalt in der Rohrleitung (3-Strahl Gamma Densitometer) und Strömungsgeschwindigkeit. Im Bereich der Pumpen werden Differenzdrücke zwischen Saug- und Druckseite, Positionsmessungen zu Veränderungen der axialen Position von mit den Pumpen gekoppelten Rohrleitungen und die Rotationsgeschwindigkeiten der Pumpen selbst bestimmt.

Die Dampferzeugermodelle sind sowohl auf der Primär- als auch auf der Sekundärseite mit Meßstellen für Differenzdruck, Fluid- und Wandtemperaturen ausgerüstet. Die Differenzdruckmessungen auf der Sekundärseite erfolgen über die gesamte Höhe sowohl im Downcomer als auch im Riser. Auf der Primärseite sind nur ausgewählte U-Rohre mit Differenzdruckgebern ausgestattet. In allen drei Dampferzeugern wird der Differenzdruck über Ein- und Austritt auf der Primärseite bestimmt. Die Messung des Sekundärdrucks erfolgt mit zwei Meßaufnehmern in unterschiedlichen Meßbereichen im Dome. In den Dampfleitungen aller drei Dampferzeuger können zudem die Massenströme im Fall einer sekundärseitigen Druckentlastung ermittelt werden.

Die mit dem Primärkreis verbundenen Notkühlsysteme sind mit Meßstellen für die Fluidtemperatur und im Fall der Hoch- und Niederdrucknoteinspeisung mit einer Massenstrommessung ausgestattet. In den Druckspeichern werden der Absolutdruck und der Differenzdruck über der Höhe gemessen. Letzterer dient der Ermittlung des Masseninventars in den Druckspeichern.

Neben den in Tabelle 2.1 aufgeführten Meßdaten werden noch eine Reihe weiterer Meßgrößen wie Heizleistung im Reaktormodell und Druckhalter oder die integrale Leistung der Zusatzheizung (Trace heating) bestimmt. Darüberhinaus werden abgeleitete Größen wie integraler Masseverlust durch das Leck sowie durch Abblaseventile auf der Primär- und Sekundärseite, Höhenstände in Behältern oder Rohrleitungen und das integrale Masseninventar der Versuchsanlage zur Verfügung gestellt.

3. Beschreibung des Experiments BETHSY Test 5.2c

3.1 Versuchsziel

Der Verlust der Speisewasserversorgung auf der Dampferzeugersekundärseite kann durch den Ausfall der Pumpen, durch die Fehlfunktion eines Ventils oder durch den Verlust der Stromversorgung ausgelöst werden. In einem derartigen Störfall kommt es zu einer Beeinträchtigung der Wärmeabfuhr über die Dampferzeuger. Die Abnahme des sekundärseitigen Masseninventars ist hierbei mit einer Abnahme der wirksamen Wärmeübertragerfläche verbunden. Dies führt zu einem Anstieg des Primärdrucks, welcher durch das Druckhaltersicherheitsventil begrenzt wird. Durch den abgesenkten Höhenstand in den Dampferzeugern wird über das Reaktorschutzsystem die Reaktorschnellabschaltung initiiert und die Notspeisewasserversorgung für die Dampferzeuger eingeleitet.

Die Notspeisewasserversorgung der Dampferzeuger ist für die Abfuhr der Nachzerfallswärme ausgelegt und ein derartiger Störfall ist sicher beherrschbar. Im Fall eines Versagens der Notspeisewasserversorgung kommt es aber zu einem weiteren Druckaufbau im Primärkreis. Somit ist der Einsatz zusätzlicher AM Maßnahmen erforderlich. Durch primäres Feed and Bleed kann der Primärdruck wieder abgesenkt werden. Dies geschieht durch eine Druckentlastung über den Druckhalter und die Einspeisung aus dem Hochdrucknotkühlsystem bzw. im weiteren Verlauf der Transiente auch aus den Druckspeichern.

Das BETHSY Experiment Test 5.2c zielt auf die Untersuchung eines Störfalls mit dem Totalverlust der sekundärseitigen Speisewasserversorgung. Gegenstand der Untersuchungen waren folgende Punkte:

- Untersuchung der Notfallprozeduren beim Totalverlust der Speisewasserversorgung
- Möglichkeiten der Notkühlung des Reaktors durch die Notkühlsysteme und durch primäres Feed and Bleed
- Verhalten der Dampferzeuger bei sekundärseitiger Austrocknung
- Langzeitverhalten der Anlage im Feed and Bleed Mode

Das Untersuchungsziel der Nachanalyse mit Hilfe des Codes ATHLET bestand in der Überprüfung, ob der Code in der Lage ist, alle sicherheitsrelevanten thermohydraulischen Phänomene richtig zu beschreiben, so daß die im Experiment gewonnene sicherheitstechnische Aussage durch die Rechnung reproduziert werden kann. Dabei waren eventuell vorhandene Schwachstellen des Codes aufzudecken.

Es zeigt sich, daß das Experiment ein sehr komplexes Szenario sich gegenseitig bedingender Schalthandlungen darstellt. Die Beschreibung der thermohydraulischen Phänomene für sich genommen dürfte für einen Störfallcode wie ATHLET keine Schwierigkeit darstellen. Probleme ergeben sich aus der Kopplung und gegenseitigen Bedingung aller Phänomene und Ereignisse sowie aus den zu erwartenden langen Rechenzeiten.

3.2 Experimentelle Randbedingungen

Der Start des Experiments erfolgt bereits im Verlauf der Transiente bei einer Leistung, welche etwa 4 % der skalierten Nennleistung entspricht. Die Startbedingungen für das Experiment wurden von Seiten der Experimentatoren in entsprechenden Modellrechnungen ermittelt. Das Masseninventar der Dampferzeuger wurde den Modellrechnungen angepaßt (Höhenstand 5.76 m). Der Speisewassermassenstrom vor Beginn der Transiente beträgt 0.24 kg/s bei 270°C. Die Wärmeverluste der Versuchsanlage wurden mit Hilfe der Zusatzheizung (Trace Heating) eingestellt. Die Wärmeverluste und die Heizleistung sind wie folgt verteilt:

- Wärmeverluste 102 kW total:
 - 41 kW Primärkreislauf
 - 6 kW Druckhalter
 - 55 kW Sekundärkreislauf
- Trace Heating 102 kW total:
 - 44 kW Primärkreislauf
 - 6 kW Druckhalter
 - 52 kW Sekundärkreislauf

Vor dem Start des Experiments wurde die Anlage über etwa 1 Stunde entsprechend der gewählten Anfangsbedingungen stabilisiert. Einen Überblick zu den Anfangsbedingungen des Experiments gibt Tabelle 3.1.

Tabelle 3.1: Anfangsbedingungen für das Experiment BETHSY Test 5.2c

Parameter	Experiment	Parameter	Experiment
Reaktorleistung	1094 kW	Druck im Cold Leg 1	14.73 MPa
Primärdruck	14.49 MPa	Druck im Cold Leg 2	14.64 MPa
DH Höhenstand	4.43 m	Druck im Cold Leg 3	14.73 MPa
Reaktor Eintrittstemp.	286.5 °C	mittl. Temp. Cold Leg 1	286.6 °C
Reaktor Austrittstemp.	287.9 °C	mittl. Temp. Cold Leg 2	286.7 °C
DC Massenstrom	150.9 kg/s	mittl. Temp. Cold Leg 3	286.3 °C
Sekundärdruck DE1	6.99 MPa	mittl. Temp. Hot Leg 1	287.9 °C
Sekundärdruck DE2	6.99 MPa	mittl. Temp. Hot Leg 2	288.2 °C
Sekundärdruck DE3	6.97 MPa	mittl. Temp. Hot Leg 3	288.1 °C
Höhenstand DE1	5.75 m	Hot Leg 1 flow	6.6 m/s
Höhenstand DE2	5.78 m	Hot Leg 2 flow	6.9 m/s
Höhenstand DE3	5.76 m	Hot Leg 3 flow	7.2 m/s

3.3 Thermohydraulische Phänomene im Verlauf des Experiments

In Tabelle 3.2 sind die wesentlichen Ereignisse des Experiments, die physikalischen Bedingungen der verschiedenen Schalthandlungen und die in den einzelnen Phasen des Experiments relevanten thermohydraulischen Phänomene dargestellt.

Mit dem Start des Experiments wird die Reaktorleistung abgesenkt und der Druck auf der Sekundärseite wird im Turbinen-Bypass-Mode auf einen Wert von 7.03 MPa geregelt. Sinken zwei der drei Dampferzeugerhöhenstände unter 3 m, so werden mit dem SI-Signal der Pumpenauslauf und die Hochdrucknoteinspeisung aktiviert.

Beim Erreichen eines Primärdrucks von 16.3 MPa beginnt die Feed and Spill Phase im Primärkreis. Diese Phase ist durch die Einspeisung aus dem Hochdruckknotkühlsystem und das geregelte Abblasen über den Druckhalter charakterisiert. 300 s nach dem SI-Signal werden auf der Sekundärseite die Dampfleitungen isoliert und eine geregelte Druckentlastung stabilisiert den Sekundärdruck auf 7.17 MPa.

1800 s nach dem SI-Signal beginnt die Feed and Bleed Phase im Primärkreis durch das vollständige Öffnen des Druckhalterabblaseventils. Die Einspeisung aus den Druckspeichern beginnt bei einem Primärdruck von 4.2 MPa und endet bei 1.5 MPa.

Sinkt der Primärdruck unter den Wert von 1.0 MPa, so beginnt die Einspeisung aus dem Niederdruckknotkühlsystem.

Tabelle 3.2: Ablauf des Experiments und thermohydraulische Phänomene

Aktion	Bedingung	Zeit s	Thermohydraulische Phänomene
1. Initialisierungsphase des Experiments			
Start des Experiments: Ausfall der Speisewasserversorgung Reaktorabschaltung und Leistungsabsenkung Turbinen-Bypass-Mode (7.03 MPa geregelt)	-	0	sekundäres Aufsieden, schnelle Entleerung der Dampferzeuger, Verschlechterung der Wärmeübertragung im Dampferzeuger
SI Signal:	2 DE Höhenstände < 3 m	788	einphasiger Naturumlauf, Druckaufbau im Primärkreis
Beginn Pumpenauslauf (... 1420 s)		793	
Start der HPSI Einspeisung		799	

Aktion	Bedingung	Zeit s	Thermohydraulische Phänomene
2. Feed and Spill Phase			
Primäre Druckregelung VRDP11 (PORV)	P+P=16.3MPa	1033	Feed and Spill, Thermohydraulik des Druckhalters, Ausströmverhalten
Isolation der Dampferzeuger Dampfleitungen geregelt Druckentlastung d. Dampferzeuger (7.17 MPa)	300 s nach SI Signal	1095	Ausströmverhalten, Wärmeübertragung bei reduziertem Masseninventar
3. Feed and Bleed Phase			
vollständiges Abblasen über Druckhalter Trace Heating variiert	1800 s nach SI Signal	2590	Feed and Bleed, schnelle Druckentlastung und Verdampfung im Primärkreis, zweiphasiger Naturumlauf
Beginn der Druckspeichereinspeisung Trace Heating variiert	P+P=4.2 MPa	4440 4449	Vermischung und Kondensation
Ende der Druckspeichereinspeisung	P+P=1.5 MPa	8278	Vermischung und Kondensation
4. Stabile Niederdruckeinspeisung und Gewährleistung der langfristigen Nachwärmeabfuhr			
Start der LPSI Einspeisung	P+P=1.0 MPa	8815	Vermischung und Kondensation
Ende des Experiments (stabile RHRS Bedingungen)	-	10025	Wärmeabfuhr aus der Spaltzone

P+P Primärdruck (Gemessen im Druckhalter)

4. Modellierung des Experiments mit dem Code ATHLET

4.1 Überblick zu den gewählten Modelloptionen

Für die Nachrechnung des Experiments BETHSY Test 5.2c konnte von Datensätzen ausgegangen werden, welche von der GRS für die Nachanalyse der Experimente BETHSY 4.3b, BETHSY 5.2d sowie des CSNI-Standardproblems ISP-38 erstellt worden waren.

Die Rechnungen zum Experiment 5.2c - Totalausfall der Speisewasserversorgung - wurden mit ATHLET Mod 1.1 Cycle D durchgeführt.

In allen Kontrollvolumen wurde das 5-Gleichungsmodell mit separaten Erhaltungsgleichungen für Masse und Energie sowie einer Impulsbilanz für das Zweiphasengemisch angewandt. In den hier vorgestellten Rechnungen wurde das neue strömungsformabhängige Kondensationsmodell verwendet. Die Modellierung der primären Druckentlastung über den Druckhalter erfolgte unter Anwendung des 1-dimensionalen Modells für kritisches Ausströmen (CDR1D) und für die Berechnung der Massenströme während der Druckentlastung auf der Sekundärseite wurde das Homogene Gleichgewichtsmodell (Moody-Modell) verwendet.

Die Modellierung der Dampferzeuger wurde in der empfohlenen Weise mit Hilfe von normalen Thermofluidobjekten, dem Dampferzeugermodell zur Festlegung eines U-Rohr-Leistungsprofils während der Startrechnung sowie mit dem Separatormodell auf der Sekundärseite vorgenommen. Da beim vorliegenden Experiment das Verhalten der Dampferzeuger von besonderem Interesse war, wurde gegenüber dem Ausgangsdatensatz die Nodalisierung der U-Rohre verfeinert (0,5 - 1,5 m Nodelänge anstelle von 2 - 2,5 m Nodelänge).

Zur Modellierung der Druckspeicher wurde das Akkumulator-Modell eingesetzt.

4.2 Nodalisierung der Versuchsanlage

Der Datensatz modelliert alle 3 Schleifen der Versuchsanlage sehr detailliert und besteht aus 87 Thermofluidobjekten mit insgesamt 504 Kontrollvolumen. Bei der Modellierung der Wärmeverluste wurde die Zusatzheizung (Trace Heating) berücksichtigt. Entsprechend den experimentellen Randbedingungen wurde diese Zusatzheizung in 4 Gruppen über den Verlauf der Transiente geregelt: Primärkreis, Sekundärkreis, Druckhalter und Surge Line.

Bild 4.1 gibt einen Überblick über die gewählte Nodalisierung am Beispiel des Primär- und Sekundärkreises der ersten Schleife.

4.3 Anfangs- und Randbedingungen

Die Startrechnung des Codes ATHLET verlangt einen vollständig abgeglichenen Dampferzeuger im Gleichgewicht. Sie konnte deshalb nur bei der skalierten Nennleistung erfolgen. Die Anfangsbedingungen des Experiments wurden durch eine Nulltransiente mit Leistungsreduzierung und konstant geregelten Randbedingungen eingestellt.

Die in der ATHLET-Rechnung nach einer Nulltransiente von 10000 s erzielten Anfangsbedingungen sind in den Tabellen 4.1 und 4.2 den experimentellen Ergebnissen gegenübergestellt. Der Schwerpunkt des Abgleichs lag auf den Kernein- und Kernaustrittstemperaturen (Primärkreis) sowie dem Fluidinventar (Sekundärkreis).

Da im Experiment die Reaktorleistung auf maximal 10 % der skalierten Nennleistung beschränkt ist, startet die Transiente mit deutlich reduziertem Masseninventar der Dampferzeugersekundärseiten. In der ATHLET-Rechnung wurden daher die Höhenstände der Dampferzeuger im Verlauf einer Nulltransiente über den Speisewassermassenstrom auf einen Wert von 5.76 m eingeregelt. Den Verlauf des Speisewasser- und Dampfmassenstroms für den ersten Dampferzeuger und den Verlauf der Dampferzeugerhöhenstände zeigt Bild 4.2 und Bild 4.3.

Tabelle 4.1: Anfangsbedingungen im Primärkreis

	Einheit	Symbol	Experiment	Rechnung
Reaktorleistung	kW	W+02	1094	1094
Primärdruck	MPa	P+P	14.49	14.57
Druckhalter Höhenstand	m	ZTP1	4.43	4.43
Core Eintrittstemperatur	°C	TF0201	286.5	286.4
Core Austrittstemperatur	°C	TF0215	287.9	287.8
Downcomer Massenstrom	kg/s	Q+05m	150.9	148.0
Masseninventar Accu 1	kg	MSM1	279.2	284.5
Masseninventar Accu 2	kg	MSM2	275.1	284.5
Masseninventar Accu 3	kg	MSM3	279.3	284.5
DE1 Eintritts-/Austrittstemp.	°C	TF41/44	288.2/287.0	287.7/286.3
DE2 Eintritts-/Austrittstemp.	°C	TF51/54	289.9/286.8	287.7/286.3
DE3 Eintritts-/Austrittstemp.	°C	TF61/64	289.0/287.7	287.7/286.3

Tabelle 4.2: Anfangsbedingungen im Sekundärkreis

	Einheit	Symbol	Experiment		Rechnung	
			DE1	DE3	DE1	DE3
Sekundärdruck	MPa	P+i7	6.99	6.97	6.85	6.85
DE Höhenstand	m	ZTIR1	5.75	5.76	5.80	5.80
Speisewassermassenstrom	kg/s	Q+AN3i	0.24	0.24	0.235	0.235
Dampfmassenstrom	kg/s	QMGV1i	0.228	0.234	0.235	0.235
Steigraum Eintrittstemperatur	°C	TFi61	286.5	286.7	284.9	284.9
Masseninventar	kg	MGVi	318.5	323.2	330.4	330.4

i=4 (1) Dampferzeuger 1, i=5 (2) Dampferzeuger 2, i=6 (3) Dampferzeuger 3

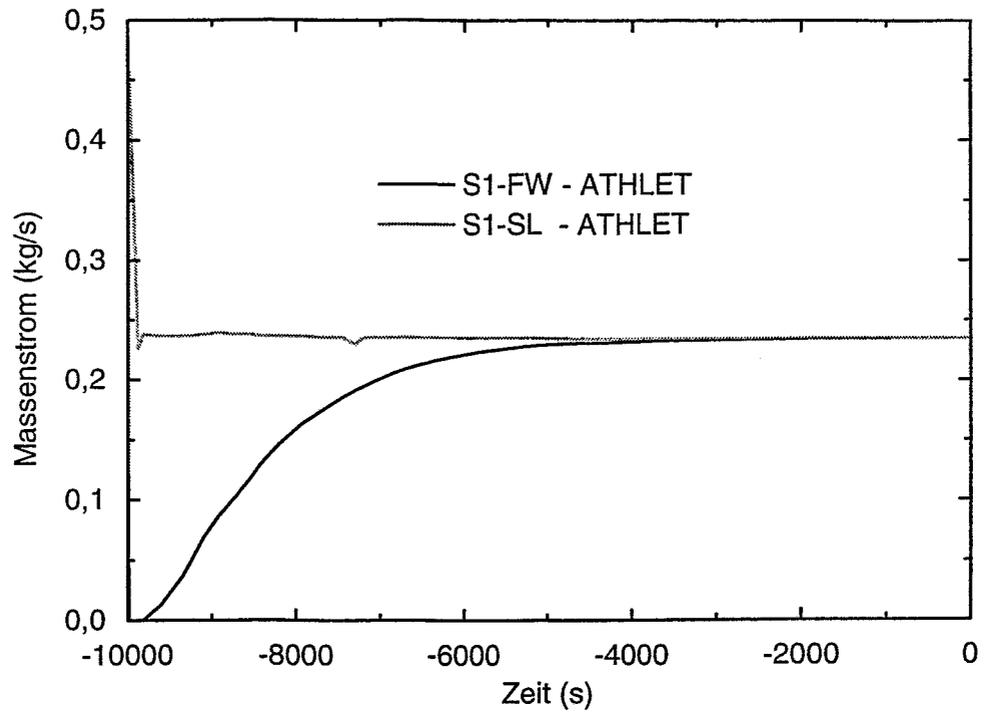


Bild 4.2: Speisewasser- (S1-FW) und Dampfmassenstrom (S1-SL) im DE1

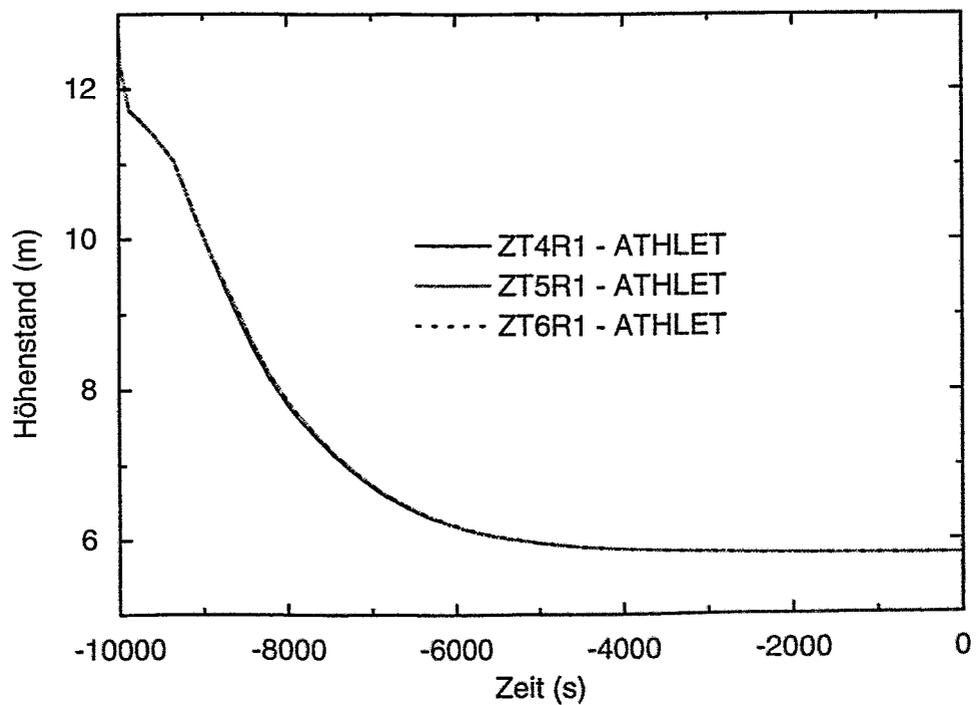


Bild 4.3: Dampferzeugerhöhenstände im Verlauf der Nulltransiente

5. Vergleich der Ergebnisse von Rechnung und Experiment

5.1 Gesamtablauf der Transiente

5.1.1 Überblick zu wesentlichen Phänomenen im Verlauf der Transiente

An dieser Stelle soll ein Überblick über die Ergebnisse der ATHLET Rechnungen gegeben werden. Anhand von physikalischen Größen, die den Gesamtablauf der Transiente charakterisieren, werden die wesentlichen Ergebnisse der Rechnungen dargestellt. Einen Vergleich der zeitlichen Abfolge der wesentlichen Phänomene in Experiment und Rechnung zeigt Tabelle 5.1. In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Phasen des Experiments näher betrachtet.

Da das Experiment bereits im Verlauf der Transiente startet, befinden sich die Dampferzeugerhöhenstände unterhalb ihres nominalen Höhenstandes (vgl. Bild 4.3 und Bild 5.3-5.5). Mit dem Start der Transiente wird die Reaktorleistung abgesenkt. Zum Zeitpunkt $t=0$ s liegt die Reaktorleistung mit 1094 kW bei etwa 3.5 % der Nennleistung. Der zeitliche Verlauf der Reaktorleistung ist in Bild 5.1 dargestellt.

Die erste Phase des Experiments ist im wesentlichen durch die Prozesse auf der Dampferzeugersekundärseite charakterisiert. Infolge des Ausfalls der Speisewasserversorgung kommt es zum Aufsieden und zu einer schnellen Entleerung der Dampferzeuger, vgl. Bild 5.3-5.5. Bei 700 s (Experiment) bzw. 730 s (Rechnung) unterschreiten die Höhenstände den Wert für die Auslösung des SI-Signals (3 m) und damit verbunden starten der Pumpenauslauf und die Hochdrucknoteinspeisung (Bild 5.6). Die schnelle Absenkung der Dampferzeugerhöhenstände hat eine deutliche Verschlechterung des Wärmeübergangs von der Primär- zur Sekundärseite zur Folge. In der Anfangsphase steigt der Primärdruck daher weiter an und erreicht bei 1033 s (Experiment) bzw. 955 s (Rechnung) den Ansprechdruck für die primäre Druckregelung bei 16.3 MPa (Feed and Spill), vgl. Bild 5.2.

1800 s nach dem SI-Signal startet die primäre Druckentlastung über das Druckhalterabblaseventil (Feed and Bleed), wodurch der Primärdruck innerhalb kürzester Zeit auf ca. 8 MPa absinkt (Bild 5.2). Verbunden mit dieser Druckabsenkung ist eine Erhöhung der Einspeiserate der Hochdrucknoteinspeisung (Bild 5.6). Bei der Modellierung der Hochdrucknoteinspeisung (als auch der Niederdrucknoteinspeisung) wurde die Abhängigkeit der Einspeisemenge vom Primärdruck berücksichtigt. Die Druckabhängigkeit des eingespeisten Volumenstroms ist in Bild 5.7 und 5.8 dargestellt.

Bei 4450 s (Experiment) bzw. 4393 s (Rechnung) unterschreitet der Primärdruck den Ansprechdruck der Druckspeicher (Bild 5.2). Der Einspeisemassenstrom aus den Druckspeichern wird in der Anfangsphase der Einspeisung zu hoch berechnet, so daß der Primärdruck hier zu stark absinkt. Im weiteren Verlauf geht der Einspeisemassenstrom etwas zurück, insgesamt wird aber mehr Notkühlwasser eingespeist als im Experiment (Bild 5.6). Zum Ende der Transiente liegt der berechnete Druck im Primärkreis geringfügig höher als im Experiment. Der Start der Niederdrucknoteinspeisung erfolgt im Experiment bei $t=8815$ s, in der Rechnung bei $t=8970$ s (Bild 5.6). In der Rechnung wurde die Druckabhängigkeit des Einspeisemassenstroms exakt modelliert. Im Gegensatz zum Experiment ergeben sich hier starke Schwankungen des Einspeisemassenstroms, welche zu einer signifikanten Verlängerung der Rechenzeit führen.

Die Bilder 5.9 und 5.10 zeigen den Verlauf des Masseninventars auf der Primär- und Sekundärseite. Der Verlauf des sekundärseitigen Masseninventars wird durch die Rechnung sehr gut wiedergegeben. Bis $t=7700$ s ist ebenfalls eine sehr gute Überein-

stimmung des primärseitigen Masseninventars mit den experimentellen Ergebnissen zu verzeichnen. Danach wird die Zunahme des Masseninventars durch die Rechnung deutlich überschätzt. Die Ursachen hierfür werden in den folgenden Abschnitten analysiert.

Tabelle 5.1: Wesentliche Phänomene im Verlauf der Transiente

Phänomene	Experiment	Rechnung
Start des Experiments:		
Ausfall der Speisewasserversorgung	0 s	0 s
Reaktorabschaltung (Leistungsabsenkung)	0 s	0 s
Turbinen-Bypass-Mode (7.03 MPa geregelt)	0 s	0 s
2 Dampferzeugerhöhenstände < 3m:		
SI Signal	700 s	730 s
Beginn Pumpenauslauf	793 s	757 s
Start der HPSI Einspeisung	799 s	757 s
Primärdruck = 16.3 MPa:		
Primäre Druckregelung (PORV)	1033 s	955 s
300 s nach SI Signal:		
Isolation der DE Dampfleitungen und geregelte Druckentlastung der DE (7.17 MPa)	1095 s	1088 s
1800 s nach SI Signal:		
vollständiges Abblasen über Druckhalter	2593 s	2590 s
Primärdruck = 4.2 MPa:		
Beginn der Druckspeichereinspeisung	4450 s	4393 s
Primärdruck = 1.5 MPa:		
Ende der Druckspeichereinspeisung	8278 s	8735 s
Primärdruck = 1.0 MPa:		
Start der LPSI Einspeisung	8815 s	8970 s
Ende des Experiments	10025 s	10050 s

5.1.2 Visualisierung anhand der berechneten örtlichen Dampfgehaltsverteilung

Ein guter Überblick über die wesentlichen Phänomene im Verlauf der Transiente ergibt sich bei der Betrachtung der örtlichen Verteilung des berechneten Dampfgehalts. In den Bildern 5.14-5.24 ist diese Verteilung für ausgewählte Zeitpunkte am Beispiel der ersten Schleife dargestellt. Das den Abbildungen zugrundeliegende Nodalisierungsschema geht aus Bild 5.13 hervor.

Die Anfangsbedingungen zum Start der Transiente zeigt Bild 5.14. Die Höhenstände im Druckhalter und Dampferzeuger entsprechen den experimentellen Randbedingungen. Im gesamten Primärkreis liegt ansonsten ein einphasiger Zustand (Wasser) vor. Der Verlust der Speisewasserversorgung auf der Dampferzeugersekundärseite führt zu einer Entleerung der Dampferzeuger. Zum Zeitpunkt $t=2441$ s sind die Dampferzeuger praktisch entleert (Bild 5.15). Die geregelte Druckentlastung auf der Primärseite hat bis zu diesem Zeitpunkt ein kontinuierliches Auffüllen des Druckhalters zur Folge.

1800 s nach dem SI-Signal (in der ATHLET-Rechnung bei $t=2530$ s) startet die vollständige Druckentlastung über den Druckhalter. Von diesem Zeitpunkt an sinkt der Höhenstand im Druckhalter wieder ab (Bild 5.16). Die starke Druckentlastung des Primärkreises führt ebenfalls zu Verdampfung in der Surge Line, in Teilen des heißen Strangs und dem oberen Teil der Dampferzeuger U-Rohre sowie im Oberen Plenum und dem Reaktorkern (Bild 5.17). 1000 s nach der vollständigen Öffnung des Druckhalterentlastungsventils läßt sich eine verstärkte Dampfbildung im Reaktormodell und heißen Strang sowie in den Dampferzeuger U-Rohren beobachten (Bild 5.18). Wie im Experiment erfolgt auch in der Rechnung die Freilegung der Dampferzeuger U-Rohre zeitlich versetzt, d.h. der Down-Flow Part wird vor dem Up-Flow Part entleert. Die Entleerung der Dampferzeuger U-Rohre ist bei $t=3750$ s abgeschlossen. Etwa 4250 s nach dem Start der Transiente erreicht auch der Druckhalterfüllstand sein Minimum (Bild 5.19). Zum selben Zeitpunkt läßt sich Verdampfung auch im Pumpenbogen (Intermediate Leg) beobachten.

Beim Erreichen eines Primärdrucks von 4.2 MPa beginnt die Einspeisung aus den Druckspeichern. Dadurch geht die Verdampfung im Reaktormodell, im heißen Strang und im Pumpenbogen zurück (Bild 5.20). Gleichzeitig beginnt der Füllstand im Druckhalter wieder stärker zu steigen. Etwa 3000 s nach dem Start der Druckspeichereinspeisung ist die Verdampfung im Reaktorkern und der Surge Line beendet und der Druckhalterfüllstand ist stark angestiegen (Bild 5.21). Im Gegensatz zu den experimentellen Ergebnissen zeigt die Rechnung ab etwa $t=7700$ s eine diskontinuierliche Einspeisung aus den Druckspeichern. Dabei spielen Kondensationseffekte im Bypass zwischen kaltem Strang und oberem Plenum eine Rolle. Der Dampfgehalt im Bypass schwankt dabei zwischen 0 und 100 % (Bild 5.22 und 5.23).

Zum Ende der Transiente ist die Anlage durch die kombinierte Einspeisung aus Druckspeichern und Niederdrucknotkühlsystem nahezu vollständig aufgefüllt. Ausgenommen davon sind die Dampferzeugersekundärseiten und die Dampferzeuger U-Rohre (Bild 5.24). Eine sichere Kühlung des Reaktorkerns ist damit gewährleistet.

5.2 Initialisierungsphase des Experiments ($t=0-1033$ s)

Mit dem Start der Transiente ($t=0$ s) werden die folgenden Prozesse eingeleitet:

- Verlust der Speisewasserversorgung in allen 3 Dampferzeugern
- Übergang der Dampferzeuger in den Turbinen-Bypass-Mode.
- Absenkung der Reaktorleistung

Wie bereits dargelegt, ist der Verlust der Speisewasserversorgung mit einer sehr schnellen Entleerung der Dampferzeuger verbunden (Bild 5.3-5.5). Die berechneten und gemessenen Differenzdrücke auf der Sekundärseite zeigt Bild 5.25 und 5.26 am Beispiel des ersten und dritten Dampferzeugers.

Mit Initialisierung des Experiments gehen die Dampferzeuger in den Turbinen-Bypass-Mode, wobei der Sekundärdruck auf konstantem Niveau geregelt wird. Der Verlauf des Sekundärdrucks und des Massenstroms in der Steam Line ist für den ersten Dampferzeuger in Bild 5.27 und 5.28 dargestellt. Insgesamt wird das Verhalten der Dampferzeuger in der ersten Phase des Experiments sehr gut durch die ATHLET Rechnung wiedergegeben, alle drei Dampferzeuger zeigen ein analoges Verhalten.

Die schnelle Entleerung der Dampferzeuger führt zu einer Verringerung der effektiven Wärmeübertragerfläche und damit zu einer Verringerung der in den Dampferzeugern übertragenen Leistung. Die in den einzelnen Nodes übertragene Leistung ist am Beispiel des zweiten Dampferzeugers in Bild 5.29 und 5.30 dargestellt. Die übertragene Leistung sinkt zuerst in den oberen und später auch in den unteren Bereichen der Dampferzeuger U-Rohre. Die Darstellung in Bild 5.29 entspricht dem Up Flow Part und in Bild 5.30 dem Down Flow Part der U-Rohre.

Ebenfalls mit der Initialisierung des Experiments wird die Reaktorleistung abgesenkt. Der zeitliche Verlauf der Reaktorleistung (Bild 5.1) entspricht dem Verlauf der Nachzerfallswärme und wurde entsprechend der experimentellen Daten in der Rechnung modelliert.

Unterschreiten 2 von 3 Dampferzeugerhöhenständen den Wert von 3 m, so wird das SI-Signal ausgelöst. Im Experiment unterschreiten die Höhenstände den Wert von 3 m bei $t=700$ s, in der Rechnung bei $t=730$ s. Mit der Auslösung des SI-Signals sind (zeitlich verzögert) folgende Prozesse verbunden:

- Start des Pumpenauslaufs
- Start der Hochdrucknoteinspeisung.

Der Pumpenauslauf wird im Experiment bei $t=793$ s gestartet, in der ATHLET Rechnung bei $t=757$ s. Den Verlauf des gemessenen und berechneten Volumenstroms im Downcomer gibt Bild 5.31 wieder. Der Pumpenauslauf ist bei $t=1400$ s beendet. Ebenfalls bei $t=757$ s wird in der Rechnung die Hochdrucknoteinspeisung aktiviert (Experiment $t=799$ s). Der Einspeisemassenstrom in der ersten Schleife ist für Experiment und Rechnung in Bild 5.32 dargestellt. Die Einspeisung aus dem Hochdrucknotkühlsystem führt zu einem Ansteigen des primären Masseninventars (vgl. Bild 5.9) und in dieser Phase zu einem leichten Ansteigen des Druckhalterfüllstandes.

Im Verlauf der Initialisierungsphase steigt der Primärdruck anfangs langsam (infolge der noch aktiven Druckhalterheizung) und zum Ende der Phase stärker (reduzierter Wärmeübergang im Dampferzeuger) an (Bild 5.2). Dieses Verhalten entspricht gut den experimentellen Ergebnissen.

5.3 Feed and Spill Phase ($t=1033-2590$ s)

Zu Beginn der Feed and Spill Phase erreicht der Primärdruck den Ansprechdruck der primären Druckregelung ($P_{02}=16.3$ MPa, Bild 5.2). Folgende Prozesse spielen in dieser Phase eine Rolle:

- Primäre Druckregelung (Druckhalterentlastungsventil)
- Auffüllen des Druckhalters
- Isolation der Steam Line (Atmospheric Dump Mode - alle 3 Dampferzeuger)
- Ende des Pumpenauslaufs
- vollständige Entleerung der Dampferzeuger

Die Feed and Spill Phase ist durch die Einspeisung aus dem Hochdrucknotkühlsystem und das geregelte Abblasen über den Druckhalter charakterisiert. Dabei wird der Primärdruck auf einem konstanten Wert von 16.3 MPa geregelt. Im Experiment startet die Druckentlastung bei $t=1033$ s, in der Rechnung wird der Ansprechdruck etwas eher erreicht ($t=955$ s).

In der Feed and Spill Phase kommt es zum Auffüllen des Druckhalters. Ein Vergleich von gemessenem und berechnetem Differenzdruck bzw. Höhenstand im Druckhalter ist in Bild 5.33 und 5.34 dargestellt. Das Verhalten des Druckhalters wird in dieser Phase sehr gut durch die Rechnung wiedergegeben. Während der primären Druckregelung gelangt kaltes Fluid aus dem Primärkreis in den Druckhalter, so daß sich im unteren Bereich des Druckhalters ein unterkühlter Zustand einstellt. Auch dieser Effekt wird durch die ATHLET Rechnung sehr gut wiedergespiegelt (Bild 5.35). Der Massenstrom in der Surge Line während des Auffüllens des Druckhalters liegt annähernd konstant bei etwa 0.18 kg/s (Bild 5.40).

Zum Zeitpunkt $t=1095$ s wird die Steam Line in allen 3 Dampferzeugern isoliert und die Dampferzeuger werden im Atmospheric Dump Mode betrieben. Dabei wird der Sekundärdruck auf einem Wert von 7.2 MPa geregelt, vgl. Bild 5.27 und 5.28. Bei $t=1420$ s ist der Pumpenauslauf beendet (Bild 5.36) und der Massenstrom in den Schleifen und im Downcomer stabilisiert sich auf annähernd konstantem Niveau (Bild 5.31).

Etwa bei $t=1850$ s erreicht der Gemischspiegel im Druckhalter das Niveau des Druckhalterentlastungsventils (Bild 5.33 und 5.34). Damit kommt es zu einem Übergang von einem einphasigen Strömungszustand (Dampf) zu einer Zweiphasenströmung in der Druckhalterabblaseleitung. Bild 5.37 zeigt den gemessenen und berechneten Dampfgehalt nach dem Entlastungsventil. Mit dem Übergang zur Zweiphasenströmung steigt auch der Massenstrom in der Druckhalterabblaseleitung leicht an (Bild 5.38). Dieser Anstieg des Massenstroms ist in der Rechnung weniger stark ausgeprägt.

Bis zum Ende der Feed and Spill Phase wird der Druckhalter kontinuierlich aufgefüllt (Bild 5.33 und 5.34). Zum Zeitpunkt $t=2590$ s sind die Dampferzeuger auf der Sekundärseite nahezu entleert (Bild 5.3-5.5, Bild 5.12) und die Wärmeübertragung in den Dampferzeugern bricht praktisch zusammen (Bild 5.29-30). Die stark reduzierte Wärmeübertragung in den Dampferzeugern spiegelt sich auch in den Ein- und Austrittstemperaturen auf der Dampferzeugerprimärseite wieder. Die Temperaturen sind am Beispiel der ersten und zweiten Schleife in Bild 5.41 und 5.42 dargestellt. Bild 5.43 und 5.44 zeigt die Verhältnisse auf der Dampferzeugersekundärseite im unteren und oberen Teil des ersten und zweiten Dampferzeugers. Die hier beobachteten Abweichungen zwischen Experiment und Rechnung lassen sich auf Ungenauigkeiten in der Modellierung der Wärmeverluste auf der Sekundärseite zurückführen.

5.4 Feed and Bleed Phase ($t=2590-8815$ s)

Da eine Wärmeübertragung in den Dampferzeugern nicht mehr möglich ist, kann der weitere Druckaufbau im System nur noch durch eine zusätzliche Druckentlastung im Primärkreis gestoppt werden. Diese Druckentlastung wird zum Zeitpunkt $t=2590$ s über den Druckhalter eingeleitet. Die Feed and Bleed Phase ist durch folgende Prozesse gekennzeichnet:

- primäre Druckentlastung über den Druckhalter und damit schnelle Druckabsenkung im Primärkreis
- Verdampfung im Primärkreis und Übergang zu zweiphasigem Naturumlauf
- Primärdruck unterschreitet den Sekundärdruck
- Entleerung der Dampferzeuger U-Rohre
- Notkühleinseisung aus den Druckspeichern

Die Feed and Bleed Phase wird mit dem vollständigen Öffnen des Druckhalterentlastungsventils eingeleitet. Dadurch sinkt der Primärdruck innerhalb kürzester Zeit von 16.3 MPa auf ca. 8 MPa (Bild 5.2). Verbunden mit dieser Druckabsenkung ist eine Erhöhung der Einspeiserate der Hochdrucknoteinspeisung (Bild 5.32). Bis zum Zeitpunkt der primären Druckentlastung wurde der Druckhalter kontinuierlich gefüllt. Mit der einsetzenden Druckentlastung beginnt der Füllstand im Druckhalter wieder zu sinken (Bild 5.33 und 5.34).

Die schnelle Druckentlastung führt zur Verdampfung in Teilen des Primärkreises und somit zu einem zweiphasigen Naturumlauf. Der Massenstrom in den Schleifen und im Downcomer (Bild 5.31) sinkt dabei nochmals ab. Die Verdampfung beginnt im Druckhalter und der Surge Line sowie im oberen Plenum des Reaktormodells, dem oberen Teil der Dampferzeuger U-Rohre und Teilen des heißen Strangs, vgl. Bild 5.16 und 5.17. Die verstärkte Dampfbildung läßt sich in der ATHLET Rechnung sehr gut im Verlauf des Masseninventars nachweisen (Bild 5.11). Das integrale Masseninventar des Primärkreises sinkt allmählich ab, wobei die Bildung von Dampf zunimmt.

Durch die vollständige Öffnung des Druckhalterentlastungsventils steigt der Massenstrom in der Druckhalterabblaseleitung anfangs sehr schnell an (Bild 5.38). Mit zunehmender Druckentlastung steigt auch der Dampfgehalt in der Abblaseleitung (Bild 5.37) und der Massenstrom sinkt nach einer Übergangsphase wieder langsam ab. Die Verdampfung im Bereich der Surge Line läßt sich sowohl in der Rechnung als auch im Experiment anhand des Dampfgehaltes nachweisen (Bild 5.39), den Massenstrom in der Surge Line zeigt Bild 5.40.

Etwa 2000 s nach der primären Druckentlastung kommt es zu starken Oszillationen im Dampfgehalt und Massenstrom in der Druckhalterabblaseleitung. Diese Oszillationen sind die Folge einer Rückkopplung zwischen dem Massenstrom in der Abblaseleitung und dem Druckgradient im Druckhalter. Die Periode der Oszillationen wird dabei durch die Länge der Abblaseleitung bestimmt. In der ATHLET-Rechnung lassen sich diese Oszillationen ebenfalls nachweisen (Bild 5.37-5.38). Die Oszillationen spiegeln sich ebenfalls in Dampfgehalt und Massenstrom der Surge Line wieder (Bild 5.39-5.40). Insgesamt wird das Verhalten des Druckhalters und der mit ihm gekoppelten Komponenten in dieser Phase der Transiente sehr gut durch die Rechnung wiedergegeben.

Die Verdampfung im heißen Strang beginnt bei etwa $t=2600$ s. Im Experiment wurden Dampfgehaltsmessungen am Eintritt in den heißen Strang vorgenommen. Einen Vergleich von Experiment und Rechnung zeigt Bild 5.45 und 5.46 am Beispiel des Dampf-

gehalten in der ersten und zweiten Schleife. Die Verdampfung im Reaktormodell führt zu einer Abnahme des Reaktorhöhenstandes (Bild 5.47). Ebenfalls ab etwa $t=2600$ s läßt sich Dampf auch im Reaktorkern nachweisen. Bild 5.48 zeigt einen Teil des Dampfgehaltsprofils im Reaktorkern. Die Dampfbildung im Reaktorkern ist mit einer geringen Erhöhung der Brennstaboberflächentemperaturen verbunden. In Bild 5.49 und 5.50 sind die Brennstaboberflächentemperaturen im oberen und mittleren Teil des Reaktorkerns dargestellt.

Zum Zeitpunkt $t=3580$ s ($t=3550$ s im Experiment) unterschreitet der Primärdruck den Sekundärdruck (Bild 5.51). Ab diesem Zeitpunkt ist eine Wärmeabfuhr über die Dampferzeuger praktisch nicht mehr möglich. Im weiteren Verlauf der Transiente kehrt sich der Wärmestrom sogar um (Bild 5.52), so daß die Dampferzeuger U-Rohre nach ihrer Entleerung bis zum Ende der Transiente mit Dampf gefüllt bleiben, vgl. Bild 5.19-5.24).

Die Freilegung der Dampferzeuger U-Rohre beginnt bei $t=2580$ s. Die Entleerung des Up Flow Parts und des Down Flow Parts erfolgt hierbei zeitlich versetzt. Dieser Effekt wird durch die ATHLET Rechnung korrekt modelliert (Bild 5.17-5.18). In Bild 5.53 und 5.54 sind die Differenzdrücke über den Dampferzeuger U-Rohren am Beispiel des ersten und zweiten Dampferzeugers dargestellt. Bis $t=3750$ s ist die Entleerung der U-Rohre abgeschlossen.

Bei 4450 s (Experiment) bzw. 4393 s (Rechnung) unterschreitet der Primärdruck den Ansprechdruck der Druckspeicher (4.2 MPa), vgl. Bild 5.2. Der Einspeisemassenstrom wird in der Anfangsphase der Einspeisung zu hoch berechnet, so daß der Primärdruck hier zu stark absinkt. Im weiteren Verlauf geht der Einspeisemassenstrom etwas zurück, insgesamt wird aber mehr Notkühlwasser eingespeist als im Experiment (Bild 5.55 und 5.56). Die Druckspeichereinspeisung führt zu einem Wiederanstieg der Höhenstände im Reaktor (Bild 5.47) und im Druckhalter (Bild 5.33 und 5.34) sowie zu einem Rückgang der Verdampfung im heißen Strang (Bild 5.45-46) und im Reaktorkern (Bild 5.48). Verbunden mit dem Wiederanstieg des Füllstandes im Druckhalter ist auch eine Abnahme des Dampfgehalts in der Druckhalterabblaseleitung (Bild 5.37). Dadurch steigt der Massenstrom nach dem Entlastungsventil im Verlauf der Druckspeichereinspeisung leicht an (Bild 5.38) und die Druckabsenkung im Primärkreis wird verlangsamt (Bild 5.56). Auch das Verhalten im Bereich der Surge Line wird in dieser Phase korrekt durch die ATHLET Rechnung modelliert (Bild 5.39 und 5.40).

Ab etwa $t=7700$ s zeigt die Einspeisung aus den Druckspeichern ein diskontinuierliches Verhalten (Bild 5.55). Dieser Effekt wurde im Experiment nicht beobachtet. Die Ursache für dieses Verhalten sind Kondensationseffekte. Ab $t=7700$ s gelangt sporadisch Notkühlwasser aus dem kalten Strang über den ansonsten mit Dampf gefüllten Bypass in das obere Plenum, vgl. Bild 5.57, 5.22 und 5.23. Durch Kondensation sinkt der Primärdruck (Bild 5.56) und die Druckspeichereinspeisung wird vorübergehend forciert. Dieser Prozess wiederholt sich mehrmals bis zum Ende der Druckspeichereinspeisung. Das Ende der Druckspeichereinspeisung wird über den Primärdruck gesteuert und wird im Experiment bei $t=8278$ s, in der Rechnung bei $t=8735$ s erreicht. In der zweiten Hälfte der Druckspeichereinspeisung liegt der Dampfgehalt in der Druckhalterabblaseleitung deutlich niedriger als im Experiment (Bild 5.37). Durch den geringeren Volumenstrom am Abblaseventil wird die Druckabsenkung im Primärkreis unterschätzt, und die Druckspeichereinspeisung wird später beendet. Dies ist die Hauptursache für das deutlich zu hoch berechnete Masseninventar im Primärkreis (Bild 5.9). Die Massenbilanz für den Primärkreis ist anhand der Ergebnisse der ATHLET Rechnung in Bild 5.58 dargestellt.

5.5 Niederdruckeinspeisung und Abfuhr der Restwärme ($t=8815-10000$ s)

Ab etwa 5500 s stagniert der Primärdruck in der Rechnung stärker als im Experiment. Die Ursachen hierfür wurden im vorhergehenden Abschnitt erläutert. Durch die Überschätzung des Primärdrucks wird auch der Ansprechdruck für die Niederdrucknoteinspeisung ($P_{02}=1.0$ MPa) zu einem späteren Zeitpunkt erreicht. Im Experiment wird die Niederdrucknoteinspeisung bei $t=8815$ s initiiert, im Experiment dagegen erst bei $t=8970$ s.

Der Einspeisemassenstrom wird in der Rechnung über den Primärdruck geregelt. Diese Regelung führt zu unrealistischen Schwankungen im Verlauf der Niederdruckeinspeisung (Bild 5.59 und 5.60), welche die Rechenzeit zum Ende der Transiente stark erhöhen (Bild 5.62). Die integral eingespeiste Masse ist für Experiment und Rechnung in Bild 5.61 am Beispiel der Niederdruckeinspeisung in die zweite Schleife dargestellt. Die bis zum Ende der Transiente eingespeiste Fluidmasse entspricht den experimentellen Ergebnissen.

Zum Ende der Transiente ist nahezu der gesamte Primärkreis wieder aufgefüllt, mit Ausnahme der Dampferzeuger U-Rohre, vgl. Bild 5.24. Der Druckhalterfüllstand hat dann sein Maximum erreicht (Bild 5.33 und 5.34) und die sichere Abfuhr der Nachzerfallswärme aus dem Reaktorkern ist gewährleistet.

5.6 Modellierung des Trace Heating

Als ein wesentlicher Einflußfaktor auf die Qualität der Rechnungen hat sich die Modellierung der Wärmeverluste, welche an der Versuchsanlage teilweise durch eine Zusatzheizung (Trace Heating) kompensiert werden, herausgestellt. Werden die Wärmeverluste im Primärkreis falsch berechnet, so ergeben sich Abweichungen im Verlauf des Primärdrucks. Da alle wesentlichen Prozesse im weiteren druckgesteuert erfolgen, wirken sich Abweichungen im Primärdruck besonders stark auf den Verlauf der Transiente aus.

Die Zusatzheizung zur Regulierung der Wärmeverluste wurde im Experiment zweimal variiert, ein erstes mal mit dem Start der primären Druckentlastung und ein zweites mal beim Start der Druckspeichereinspeisung. Tabelle 5.2 zeigt die aus dem Experiment bekannten Werte für das Trace Heating in den verschiedenen Anlagenteilen. In der ATHLET Rechnung wurde die Zusatzheizung direkt über die Wärmeverluste der Komponenten des Primärkreises, des Druckhalters und der Surge Line sowie der Dampferzeugersekundärseiten modelliert.

Die Wärmeverluste wurden in mehreren Variationsrechnungen optimal angepaßt. In den hier vorgestellten Ergebnissen der Standardvariante wurden diese optimalen Werte verwendet. Bild 5.63 zeigt den Einfluß des Trace Heating auf den Primärdruck anhand von zwei der durchgeführten Variationsrechnungen. Bei der Variante V1 wurde das Trace Heating erhöht, d.h. die integralen Wärmeverluste der Anlage wurden vermindert. In Variante V2 wurde das Trace Heating vermindert und die Wärmeverluste somit erhöht. Besonders deutlich wird der Einfluß am Beispiel der Druckspeichereinspeisung. In Bild 5.64 ist der integral eingespeiste Massenstrom für die Standardvariante und die beiden Variationsrechnungen dargestellt.

In der Standardvariante der Rechnungen trat ein weiterer Effekt auf, der auf den Einfluß der Zusatzheizung zurückzuführen ist. Etwa ab $t=9400$ s konnte eine starke Absenkung des Sekundärdrucks (Bild 5.2) und ein damit verbundener Wiederanstieg der Dampferzeugerhöhenstände (Bild 5.3-5.5) beobachtet werden. Im Experiment trat die-

ser Effekt nicht auf. Die Ursache für die Abweichungen in der Rechnung liegt in der Kondensation von Dampf im Bereich der Steam Line, welche in der letzten Phase der Transiente zum Wiederanstieg der Dampferzeugerhöhenstände führt. In einer entsprechend angepaßten Variationsrechnung wurden die Wärmeverluste etwas erhöht, so daß die Kondensation vermieden und der Sekundärdruck besser wiedergegeben wird (Bild 5.65 und 5.66). Damit wird allerdings der Primärdruck überschätzt und der Ansprechdruck für die Niederdruckeinspeisung wird bis zum Ende der Transiente nicht erreicht.

Tabelle 5.2: Werte des Trace Heating im Experiment

Zone Nr.	0s	2593s	4449s	Zone Nr.	0s	2593s	4449s
1 LP	3050	const.	0	22 SG2	3300	const.	const.
2 Core byp.	2200	const.	0	23 SG2	3450	const.	const.
3 Core byp.	2200	const.	1500	24 SG2	2850	const.	const.
4 UP	4200	const.	2800	25 SG2	4400	const.	const.
5 UH	1850	const.	1200	26 SG2 inlet	1400	const.	950
6 DC	1000	const.	0	27 HL2	1200	const.	800
7 DC	4800	const.	0	28 CL3	1400	const.	0
8 CL1	1400	const.	0	29 LS3	2350	const.	0
9 LS1	2350	const.	0	30 SG3 outl.	1400	const.	950
10 SG1 outl.	1350	const.	900	31 SG3	3400	const.	const.
11 SG1	3400	const.	const.	32 SG3	3300	const.	const.
12 SG1	3300	const.	const.	33 SG3	3450	const.	const.
13 SG1	3450	const.	const.	34 SG3	2850	const.	const.
14 SG1	2850	const.	const.	35 SG3	4400	const.	const.
15 SG1	4400	const.	const.	36 SG3 inlet	1400	const.	950
16 SG1 inlet	1400	const.	950	37 HL3	1200	const.	800
17 HL1	1200	const.	800	38 Surge line	1400	const.	1000
18 CL2	1400	const.	0	39 Pressur.	2150	1800	1200
19 LS2	2350	const.	0	40 Pressur.	2010	1800	1150
20 SG2 outl.	1400	const.	950	41 Pressur.	2000	1700	1100
21 SG2	3400	const.	const.	48 Vent line	1000	0	0

6. Zusammenfassung

Gegenstand der hier vorgestellten Nachrechnungen mit dem Code ATHLET war das BETHSY Experiment Test 5.2c. Das Experiment zielte auf die Untersuchung eines Störfalls mit dem Totalverlust der sekundärseitigen Speisewasserversorgung. In einem derartigen Störfall kommt es zu einer Beeinträchtigung der Wärmeabfuhr über die Dampferzeuger, wobei der Primärdruck stark ansteigt. In dem zugrundeliegenden Szenarium wurden zusätzliche Accident Management Maßnahmen in Form von kombiniertem Feed and Spill bzw. Feed and Bleed realisiert. Im Experiment konnte gezeigt werden, daß ein derartiger Störfall beherrschbar ist.

Die Nachanalyse mit dem Code ATHLET diente der Überprüfung, ob der Code in der Lage ist, alle sicherheitsrelevanten thermohydraulischen Phänomene richtig zu beschreiben, so daß die im Experiment gewonnene sicherheitstechnische Aussage durch die Rechnung reproduziert werden kann. Dabei waren eventuell vorhandene Schwachstellen des Codes aufzudecken.

Die Auswertung der Rechnungen zeigt, daß praktisch alle wesentlichen Phänomene im Verlauf der Transiente korrekt wiedergegeben werden. In der ATHLET Rechnung wurden die aus dem Experiment bekannten Schalthandlungen über eine adäquate Form der GCSM Steuerung umgesetzt. Dabei treten zeitliche Abweichungen, insbesondere bei der Niederdrucknoteinspeisung auf. Diese Abweichungen konnten durch eine angepaßte Modellierung des Trace Heating minimiert werden. In den Rechnungen zeigte sich, daß insbesondere das Verhalten des Druckhalters und der mit ihm gekoppelten Komponenten im Bereich der Druckentlastung sowie das Verhalten der Dampferzeuger sehr gut modelliert wird.

Signifikante Abweichungen zwischen Experiment und Rechnung traten bei der Modellierung der Druckspeichereinspeisung (Überschätzung der Druckabsenkung, diskontinuierliche Einspeisung) und bei der Modellierung der Niederdrucknoteinspeisung (unrealistische Massenstromschwankungen) auf. In Vergleichsrechnungen mit dem DRUFAN-Kondensationsmodell wurden diese Effekte ebenfalls beobachtet.

Insgesamt konnte gezeigt werden, daß die sicherheitstechnische Aussage des Experiments in der Rechnung verifiziert werden konnte. Die beschriebenen Abweichungen haben hierauf keinen Einfluß. Für weitere Rechnungen zu Experimenten der BETHSY Versuchsanlage ist eine verbesserte und verfeinerte Modellierung des Trace Heating empfehlenswert. Möglicherweise kann dadurch die Qualität der Nachrechnungen nochmals verbessert werden.

7. Literatur

P. Bazin: BETHSY: Data Base. Departement des Reacteurs a Eau, Service d' Etudes Thermohydrauliques, Centre d' Etudes Nucleaires de Grenoble, March 1988

E. Ercolani, Ph. Gully: BETHSY - Measurement System, Update of the initial Report and of its Addendum. Departement de Thermohydraulique et de Physique Service de Thermohydraulique des Reacteurs

T. Chataing, P. Clement: BETHSY Test 5.2c.2, Total Loss of Feedwater, Data Report. Departement de Thermohydraulique et de Physique Service d' Etudes Thermohydrauliques, Centre d' Etudes Nucleaires de Grenoble, July 1990

Abbildungen

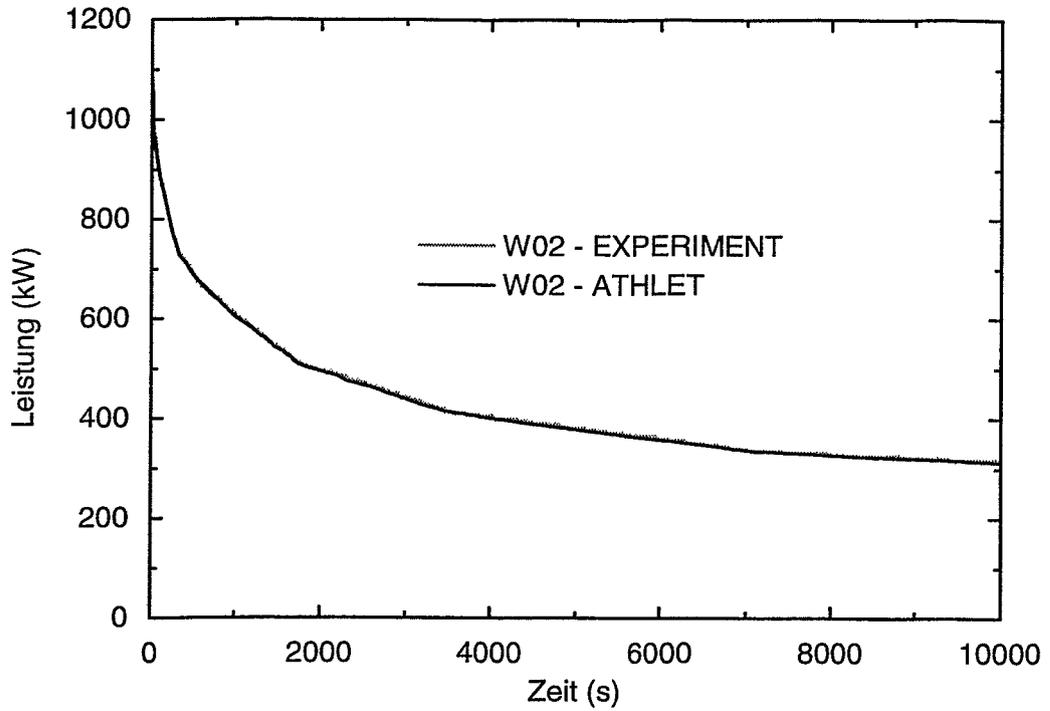


Bild 5.1: Zeitlicher Verlauf der Reaktorleistung (W02)

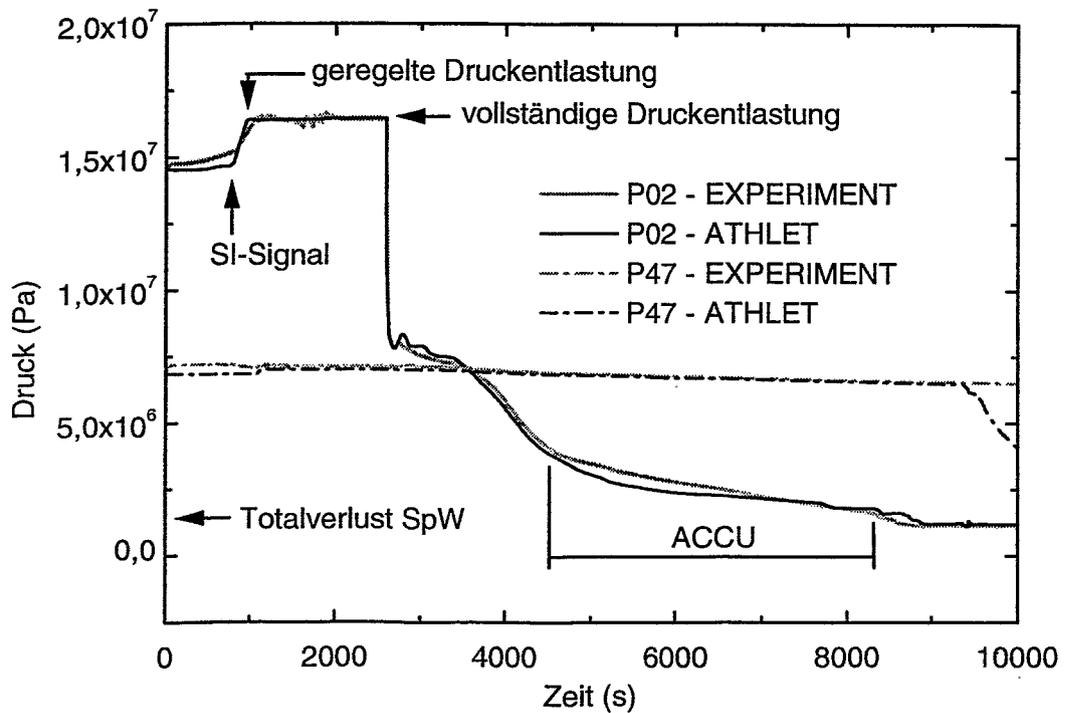


Bild 5.2: Primärdruck (P02) und Sekundärdruck im DE 1 (P47)

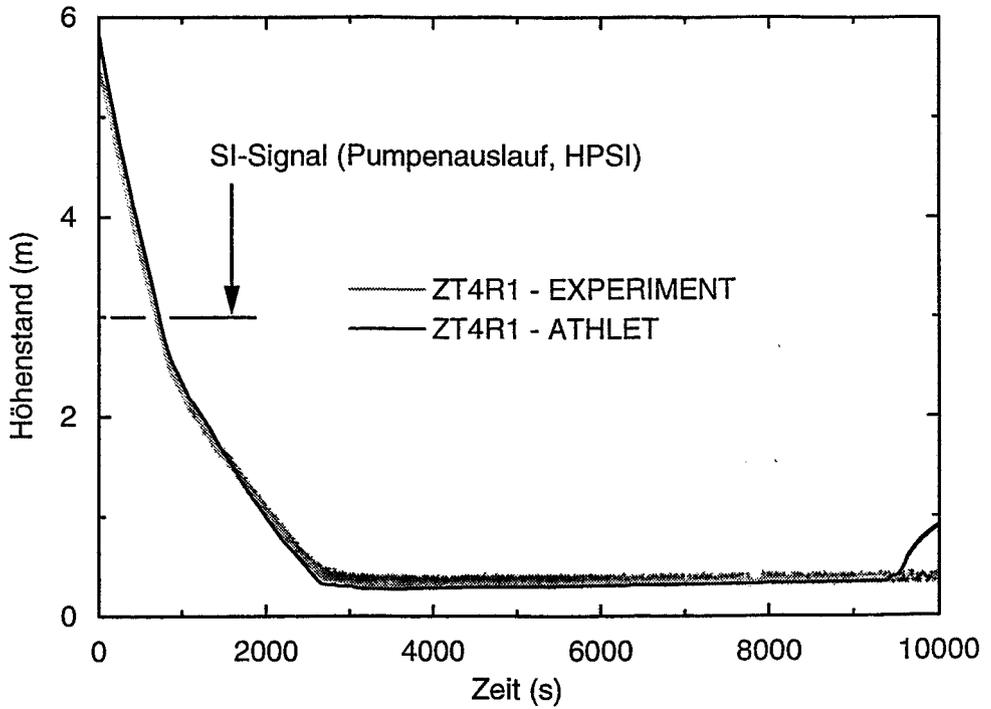


Bild 5.3: Höhenstand im Dampferzeuger 1 (ZT4R1)

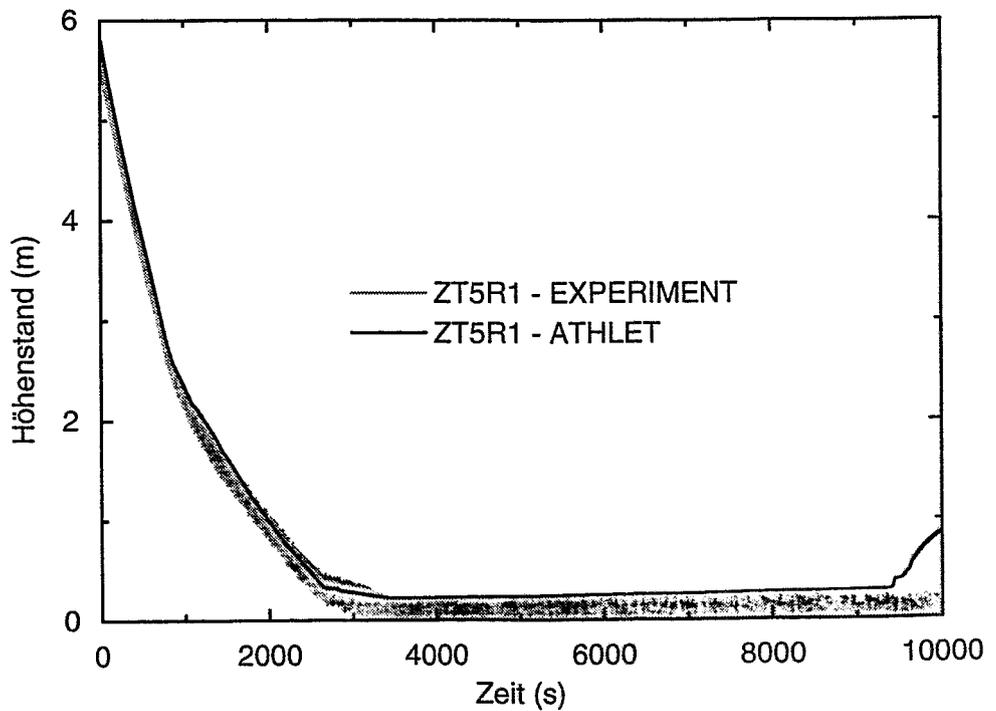


Bild 5.4: Höhenstand im Dampferzeuger 2 (ZT5R1)

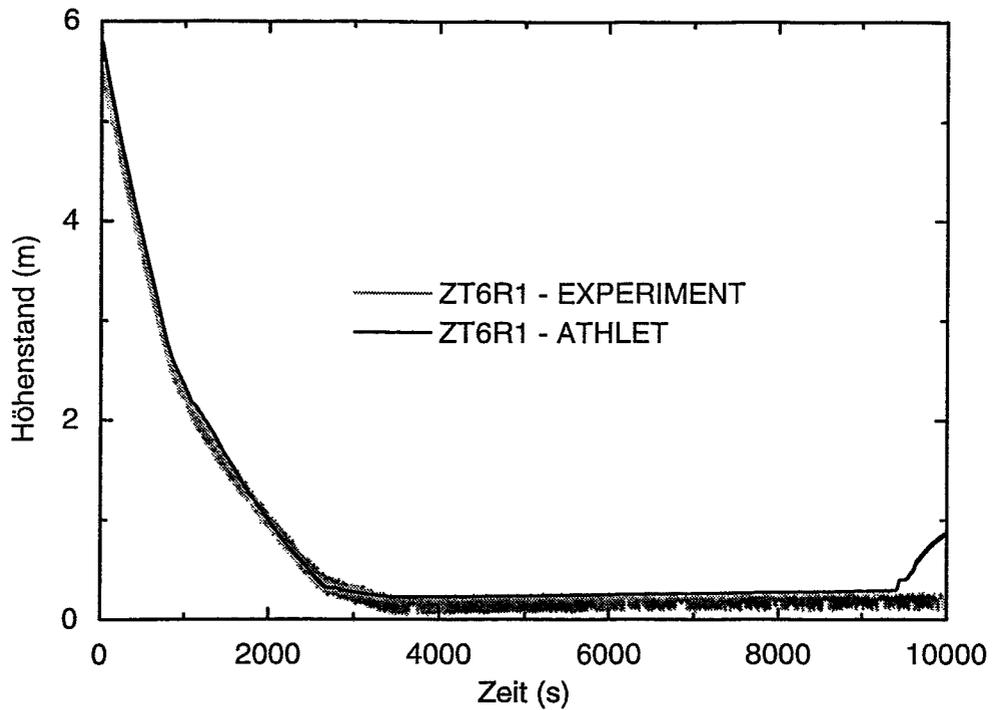


Bild 5.5: Höhenstand im Dampferzeuger 3 (ZT6R1)

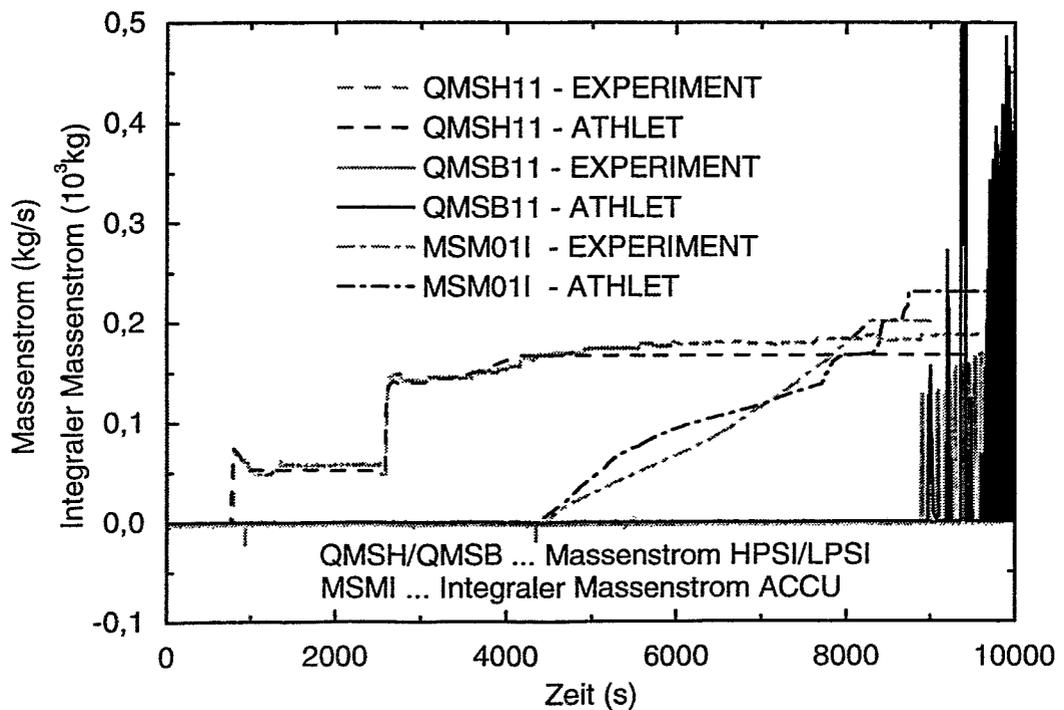


Bild 5.6: Einspeisung aus den Notkühlsystemen in die 1. Schleife

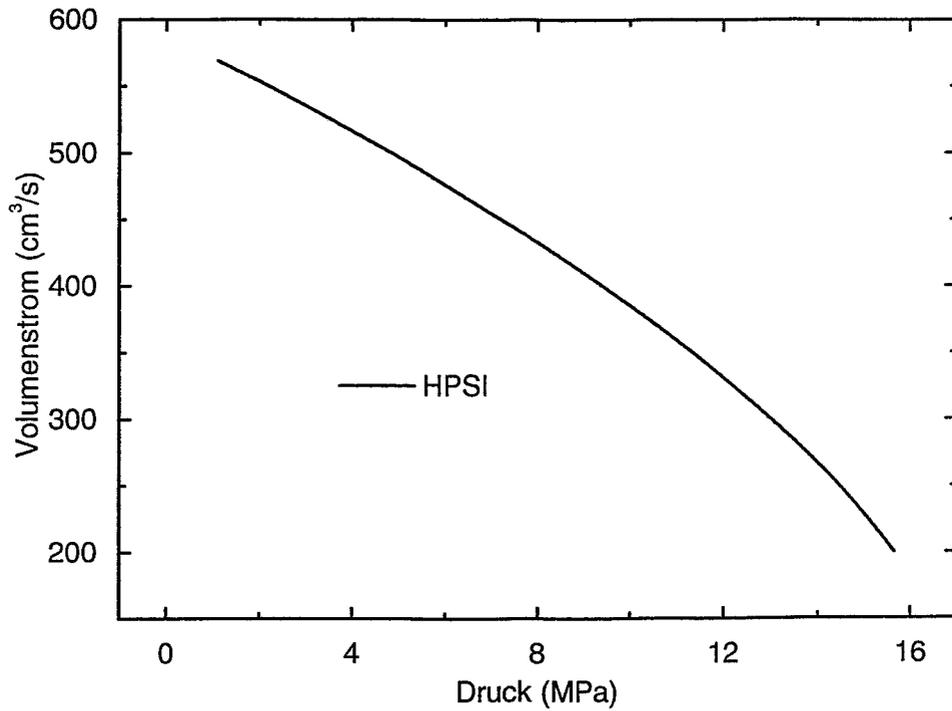


Bild 5.7: Charakteristik der Hochdrucknoteinspeisung (HPSI)

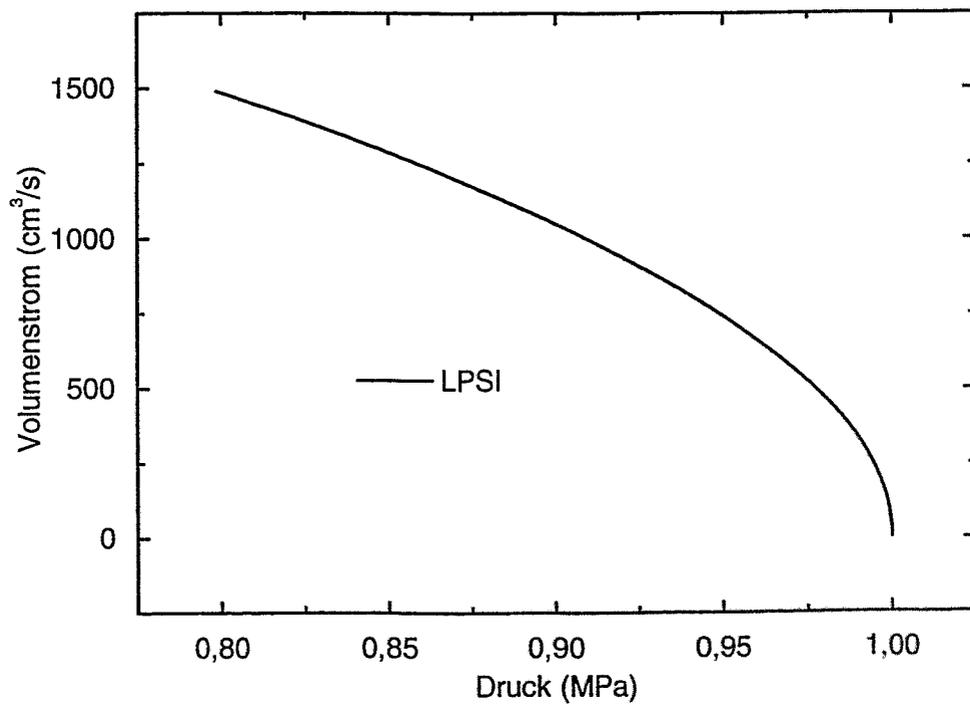


Bild 5.8: Charakteristik der Niederdrucknoteinspeisung (LPSI)

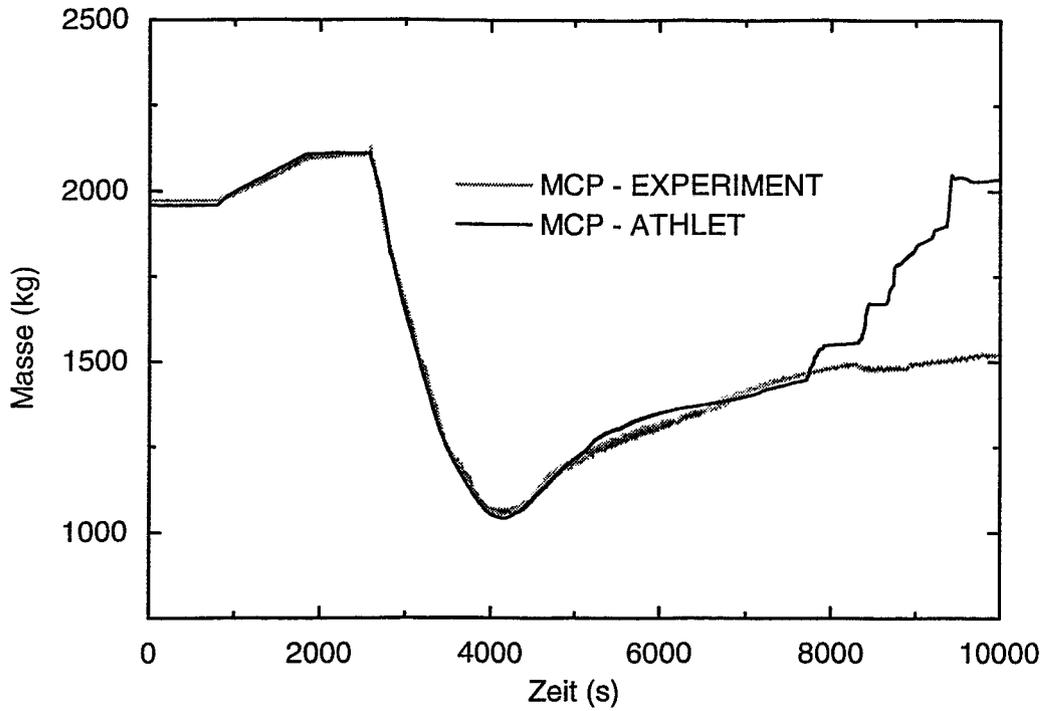


Bild 5.9: Masseninventar im Primärkreis (MCP)

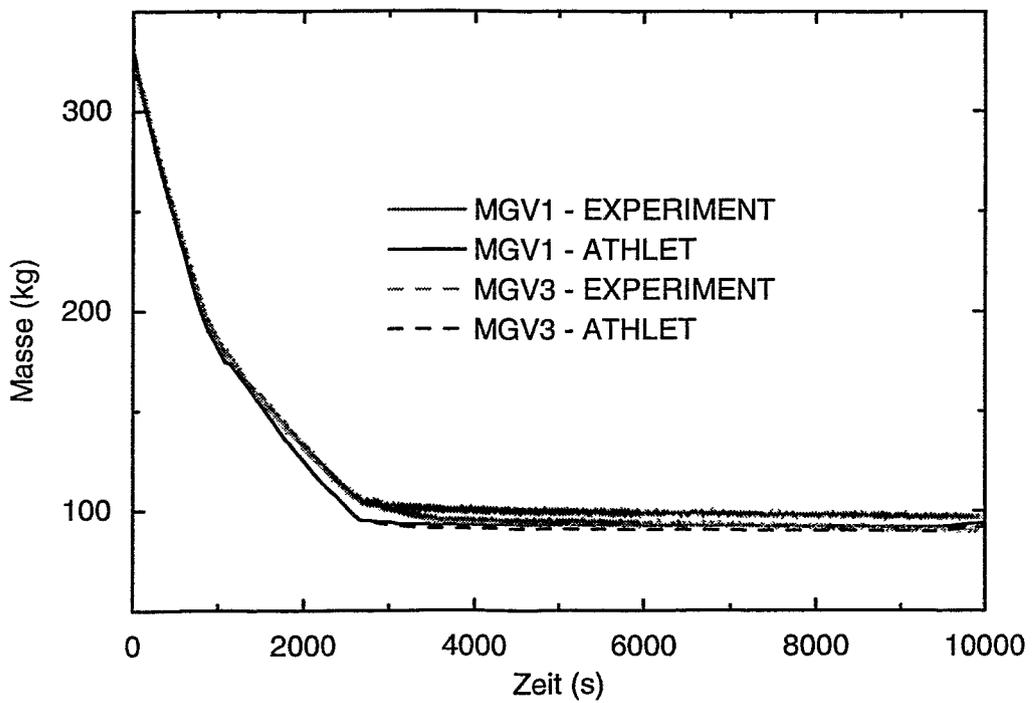


Bild 5.10: Masseninventar im Sekundärkreis (DE 1 und DE 3)

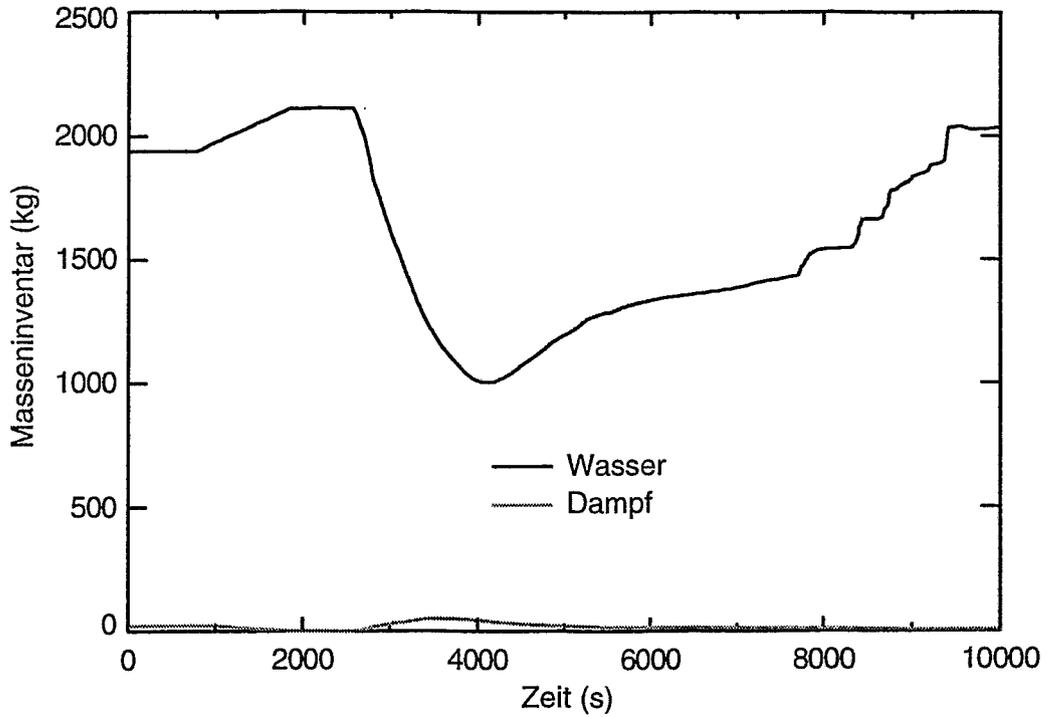


Bild 5.11: Masseninventar (Wasser/Dampf) im Primärkreis

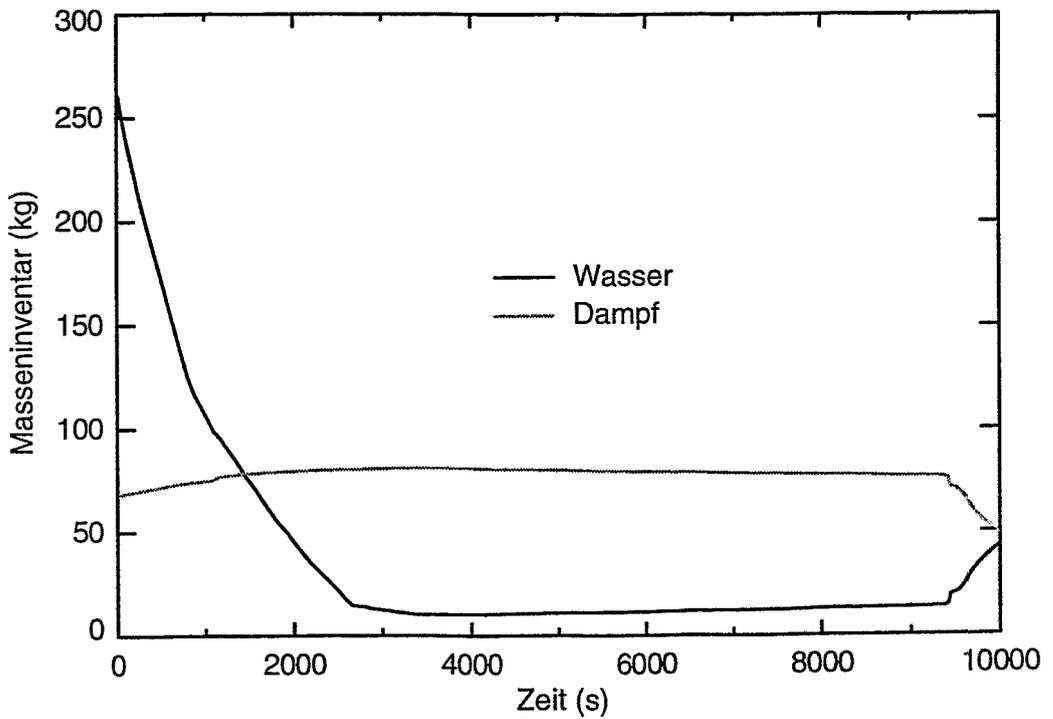


Bild 5.12: Masseninventar (Wasser/Dampf) im Sekundärkreis (DE 2)

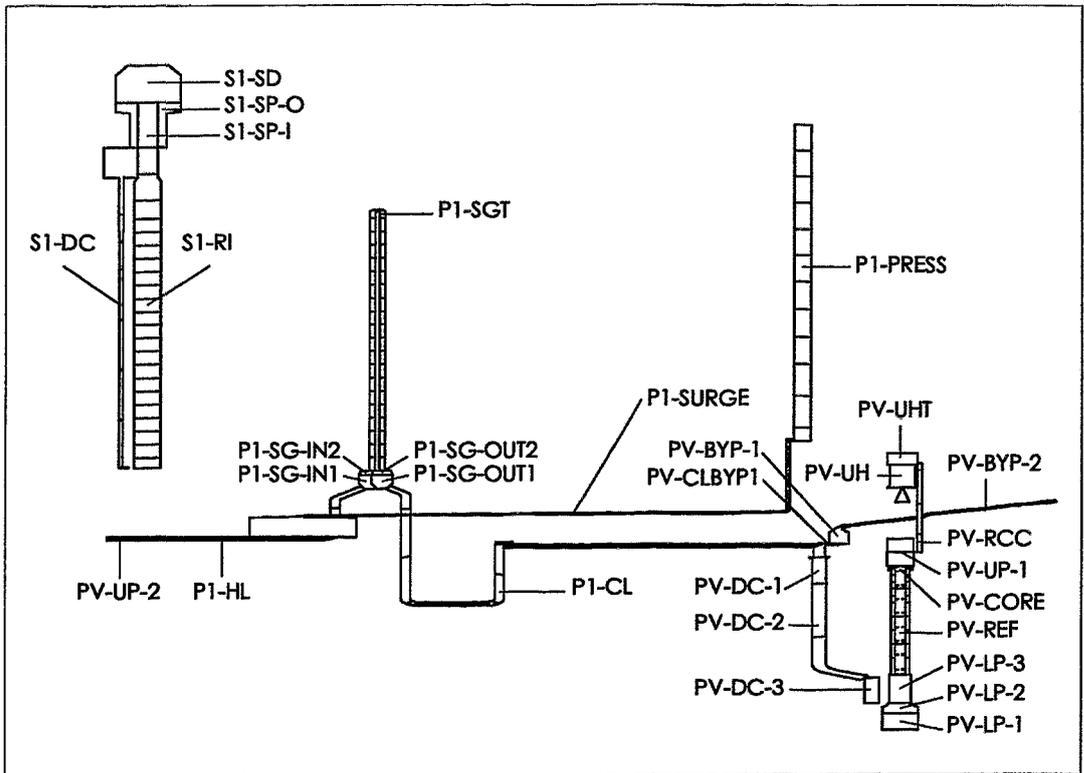


Bild 5.13: Nodalisierung der 1. Schleife (Primär- und Sekundärseite)

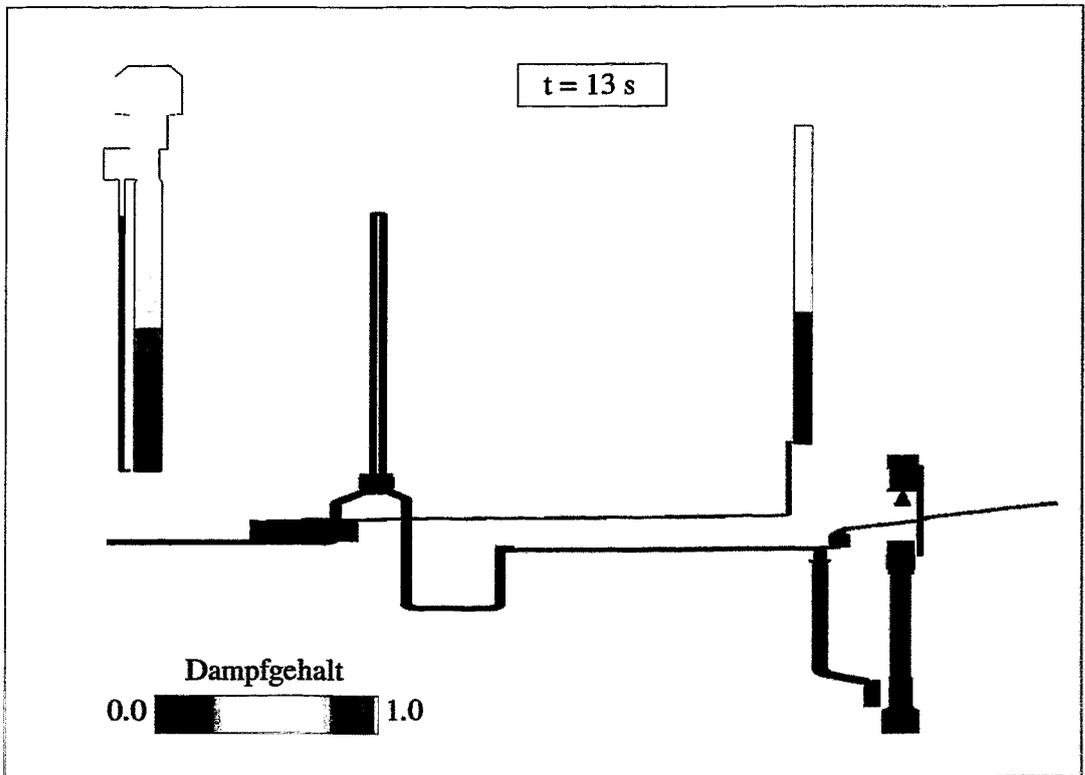


Bild 5.14: Dampfgehaltsverteilung zum Zeitpunkt $t=13$ s

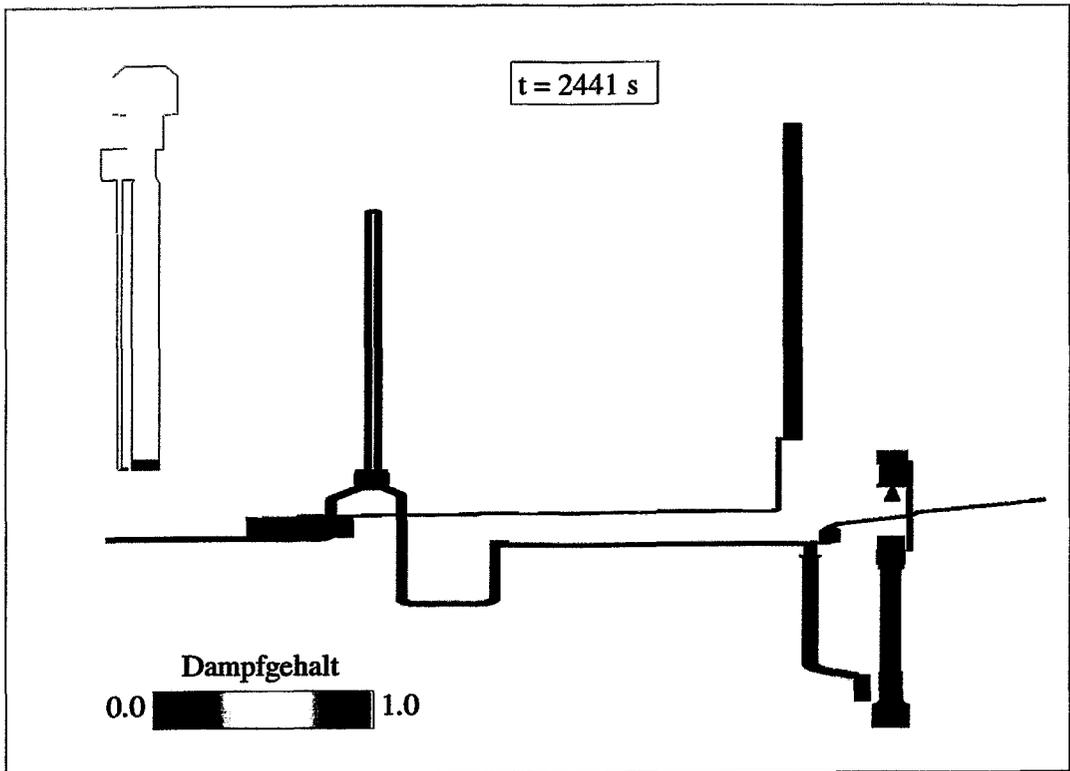


Bild 5.15: Dampfgehaltsverteilung zum Zeitpunkt $t=2441$ s

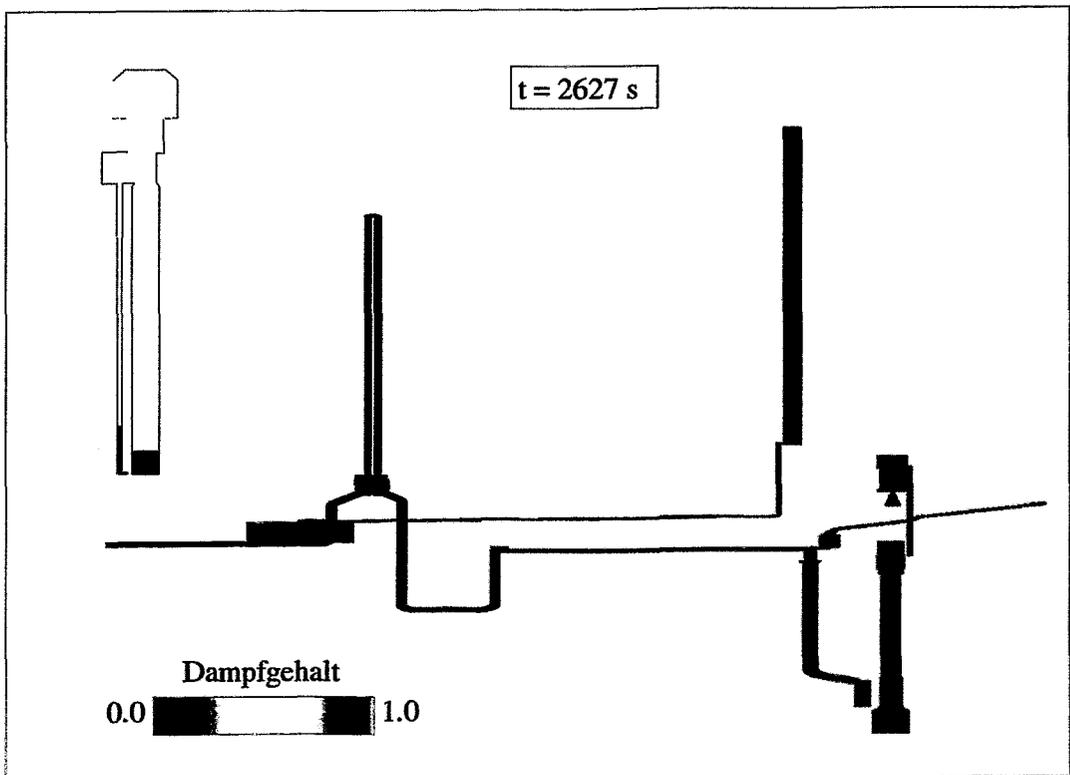


Bild 5.16: Dampfgehaltsverteilung zum Zeitpunkt $t=2627$ s

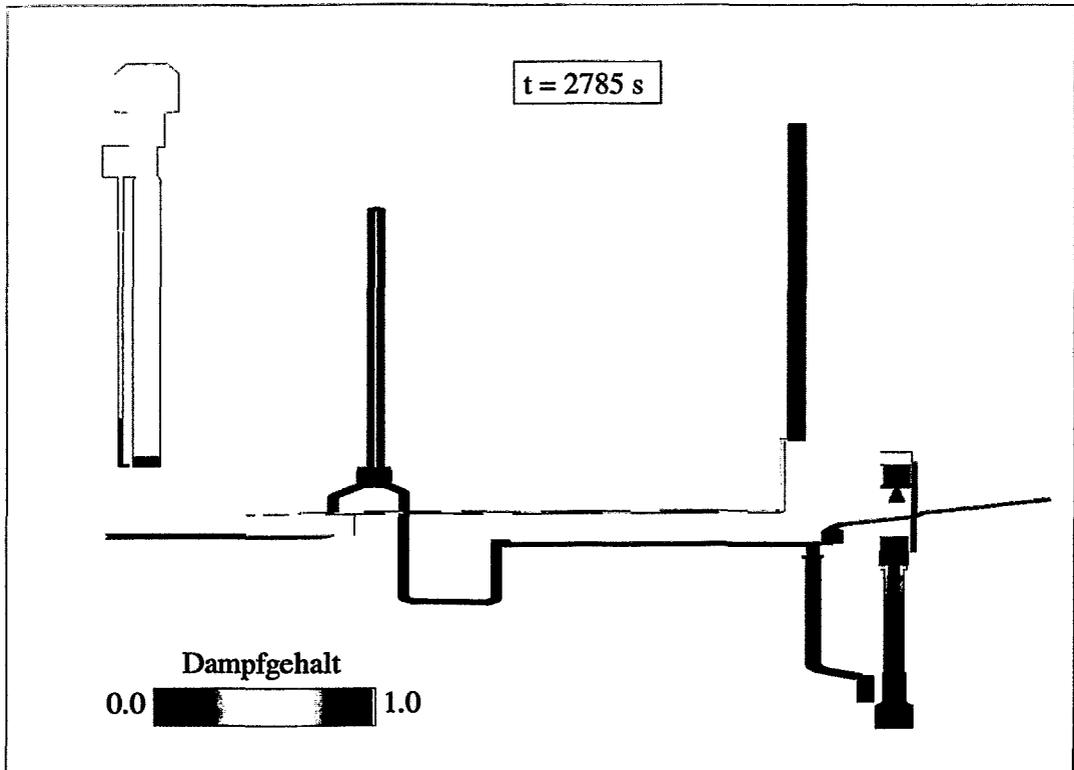


Bild 5.17: Dampfgehaltsverteilung zum Zeitpunkt t=2785 s

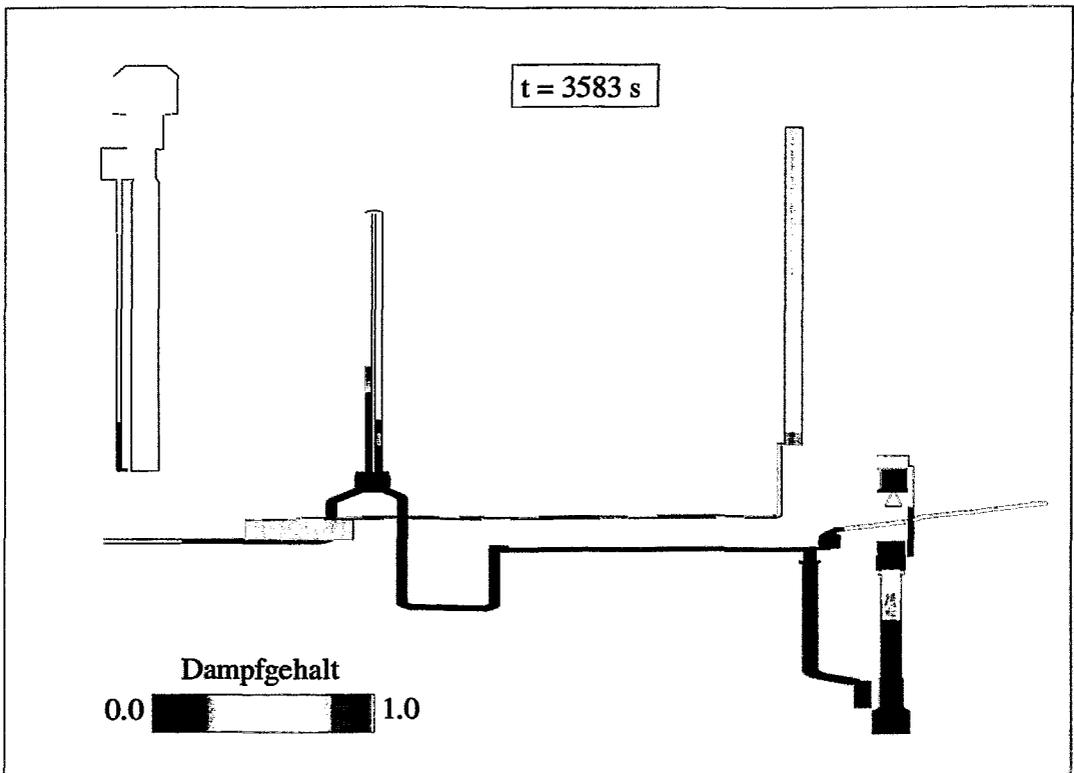


Bild 5.18: Dampfgehaltsverteilung zum Zeitpunkt t=3583 s

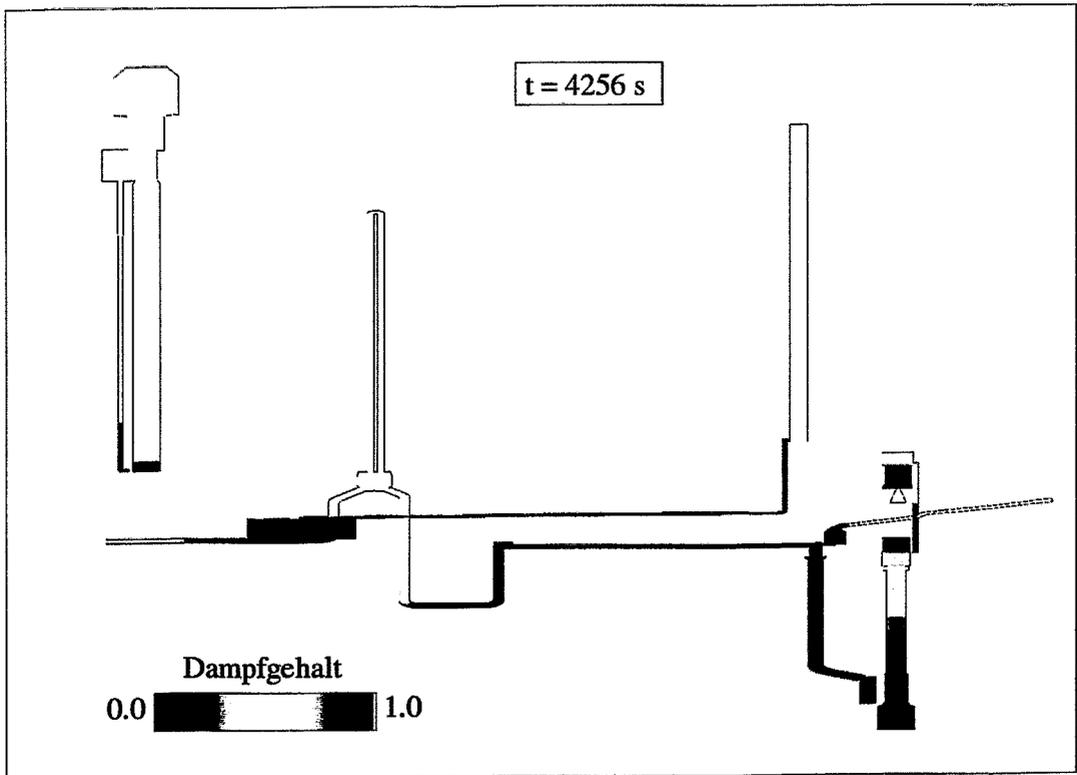


Bild 5.19: Dampfgehaltsverteilung zum Zeitpunkt $t=4256 \text{ s}$

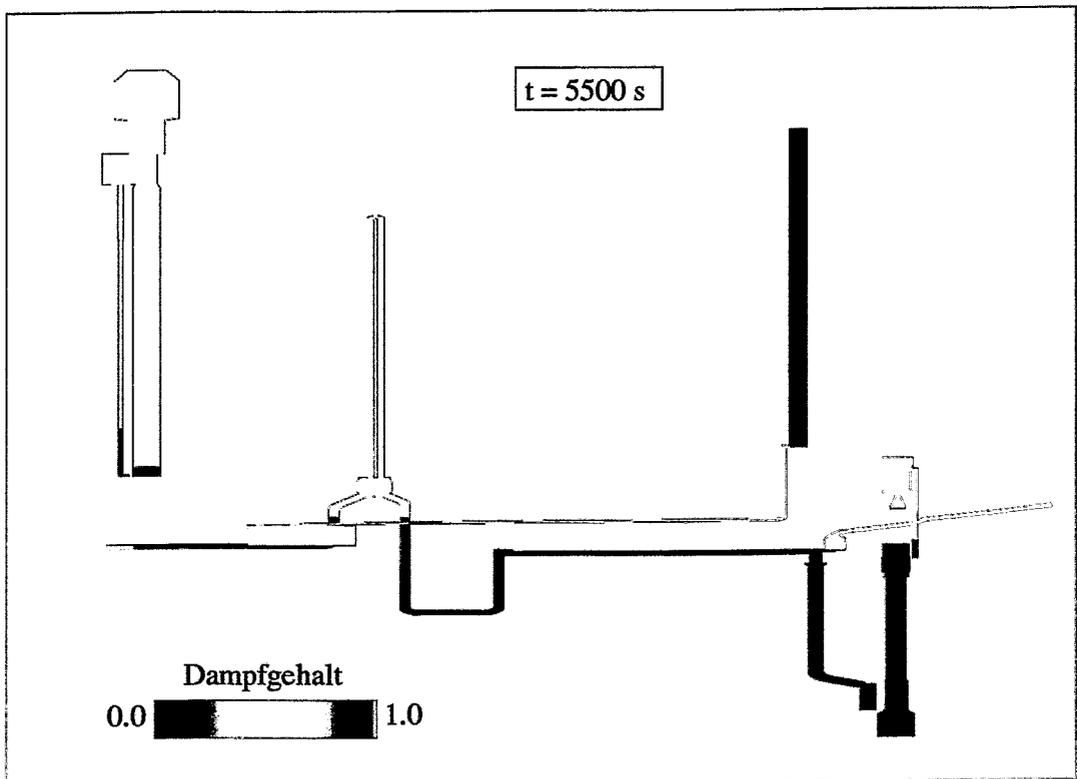


Bild 5.20: Dampfgehaltsverteilung zum Zeitpunkt $t=5500 \text{ s}$

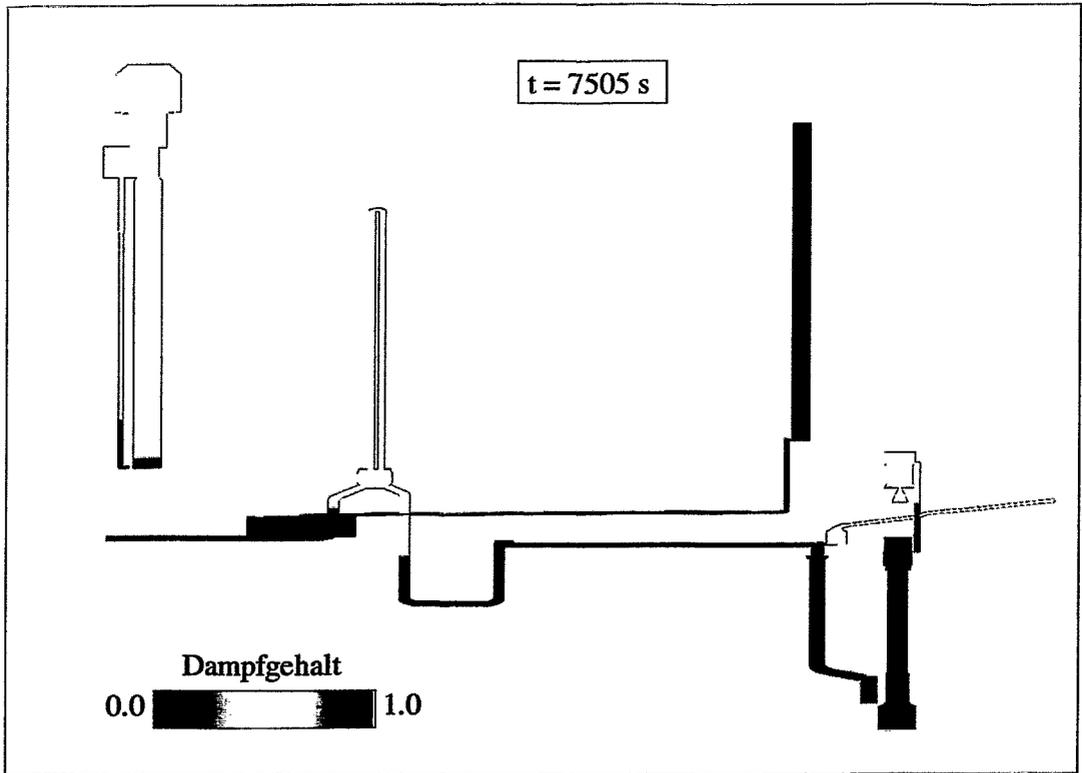


Bild 5.21: Dampfgehaltsverteilung zum Zeitpunkt $t=7505 \text{ s}$

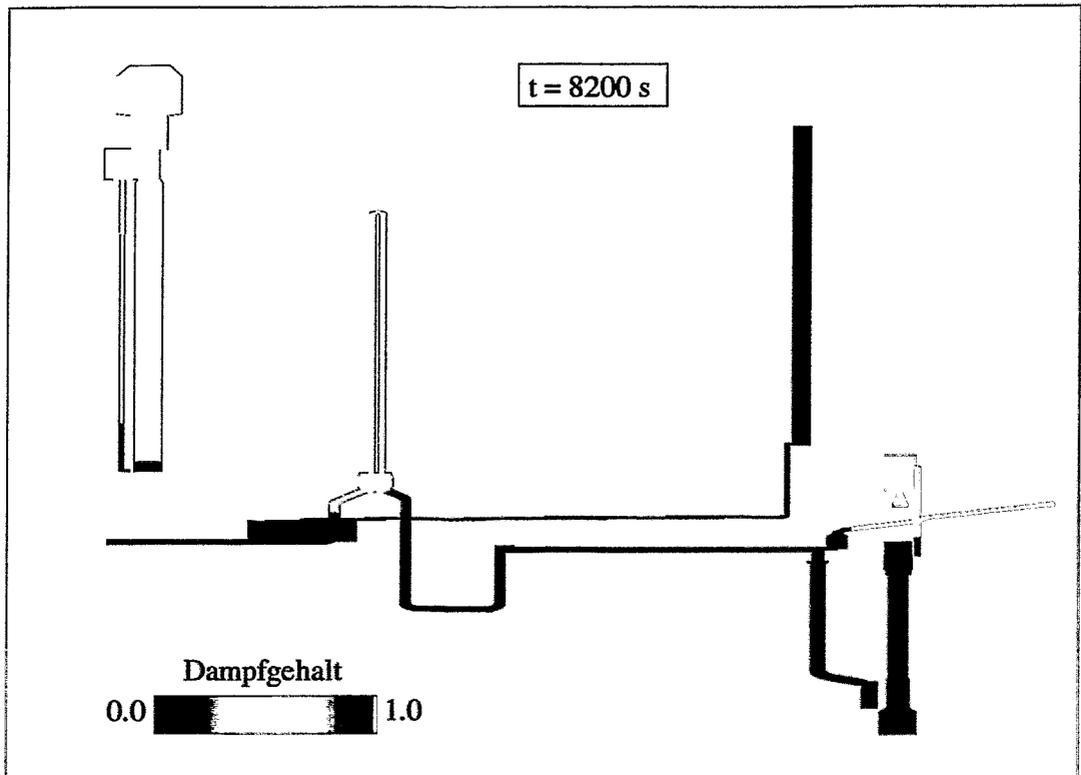


Bild 5.22: Dampfgehaltsverteilung zum Zeitpunkt $t=8200 \text{ s}$

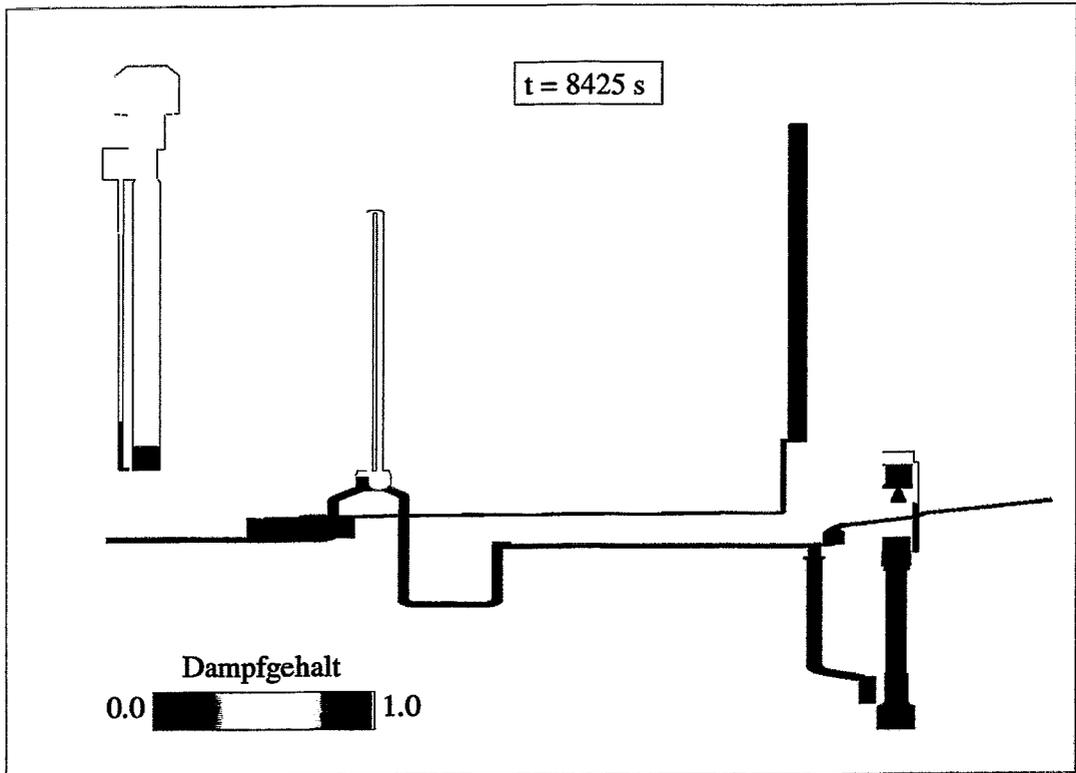


Bild 5.23: Dampfgehaltsverteilung zum Zeitpunkt $t=8425 \text{ s}$

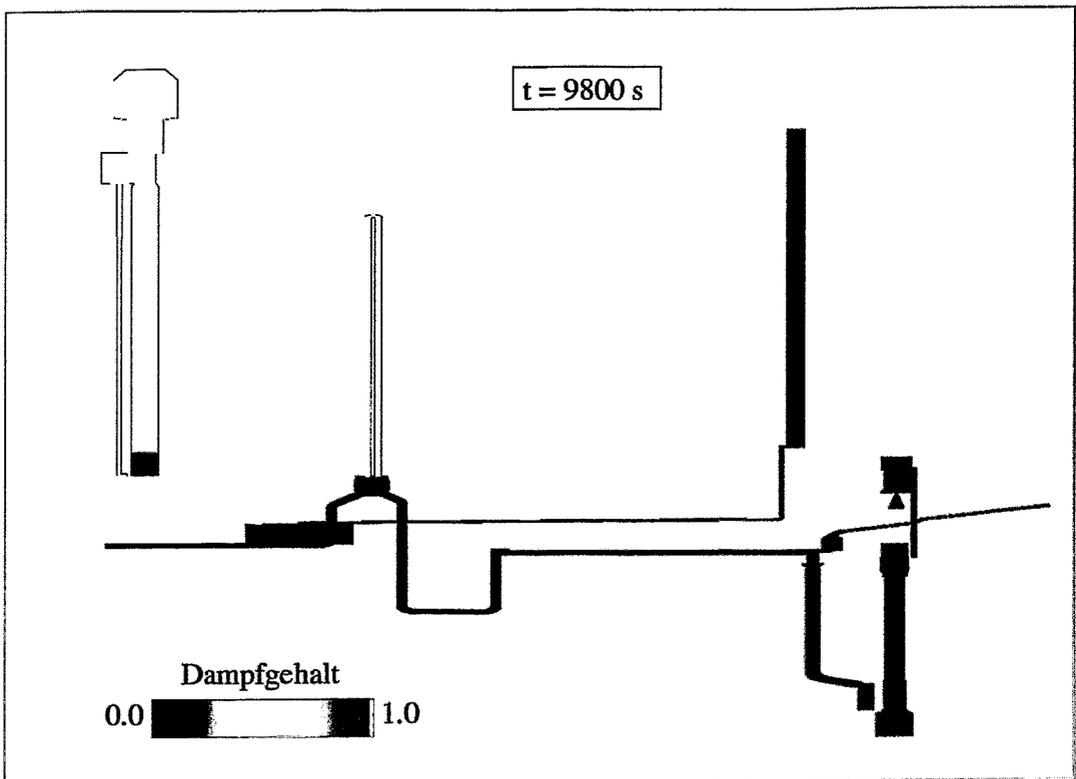


Bild 5.24: Dampfgehaltsverteilung zum Zeitpunkt $t=9800 \text{ s}$

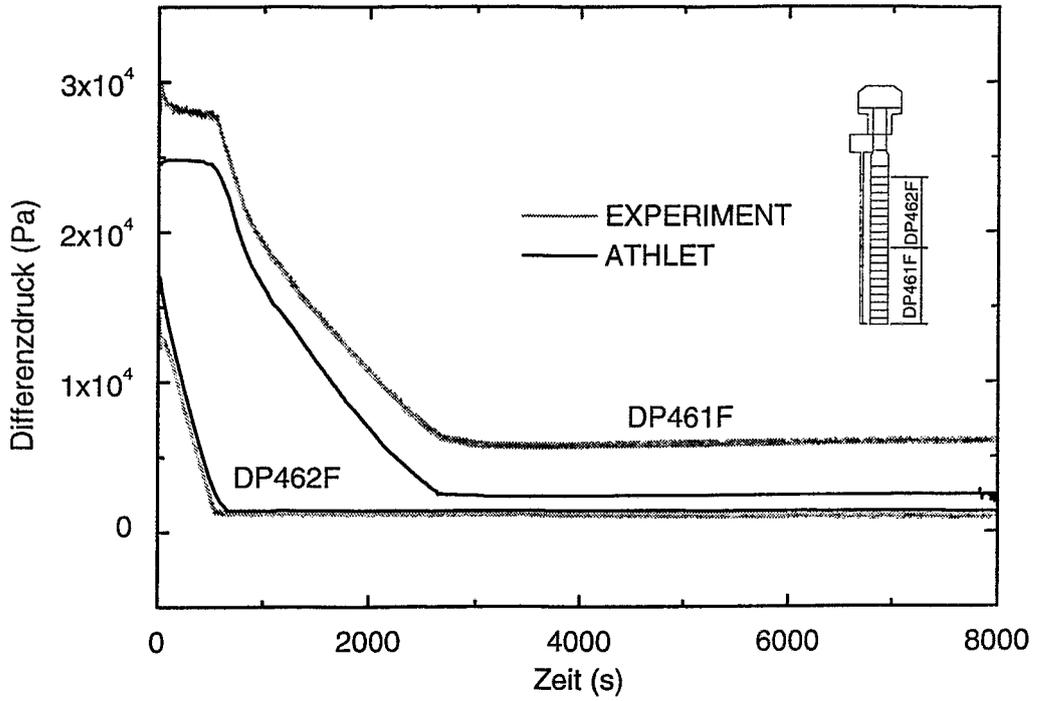


Bild 5.25: Differenzdruck im DE 1 (Riser - Down Flow side)

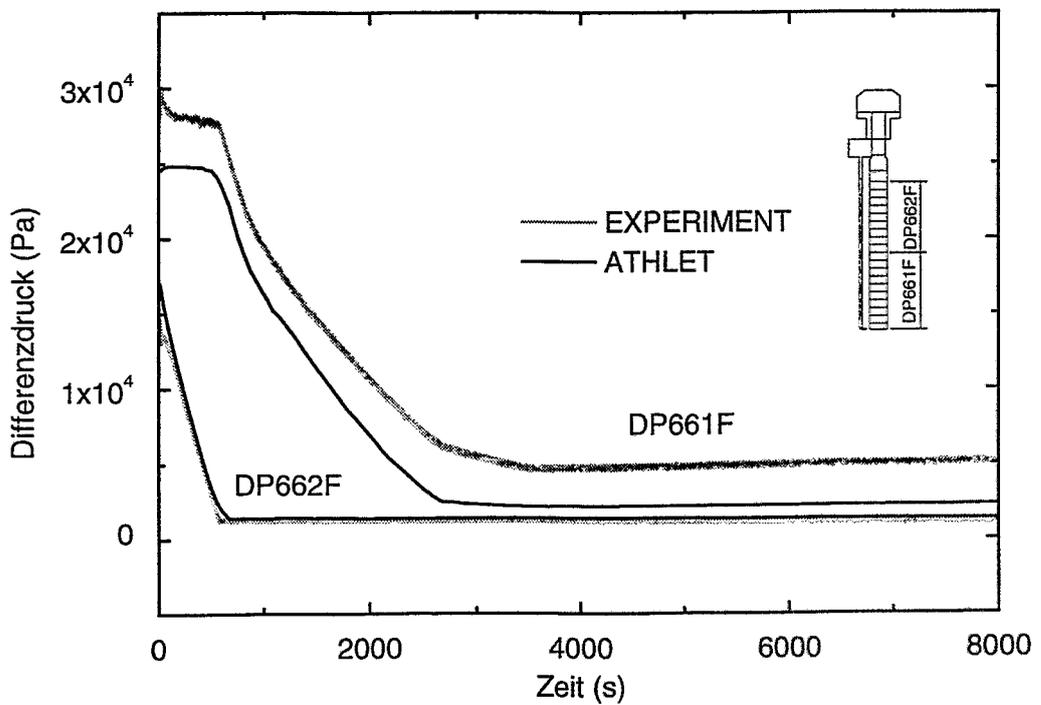


Bild 5.26: Differenzdruck im DE 3 (Riser - Down Flow Side)

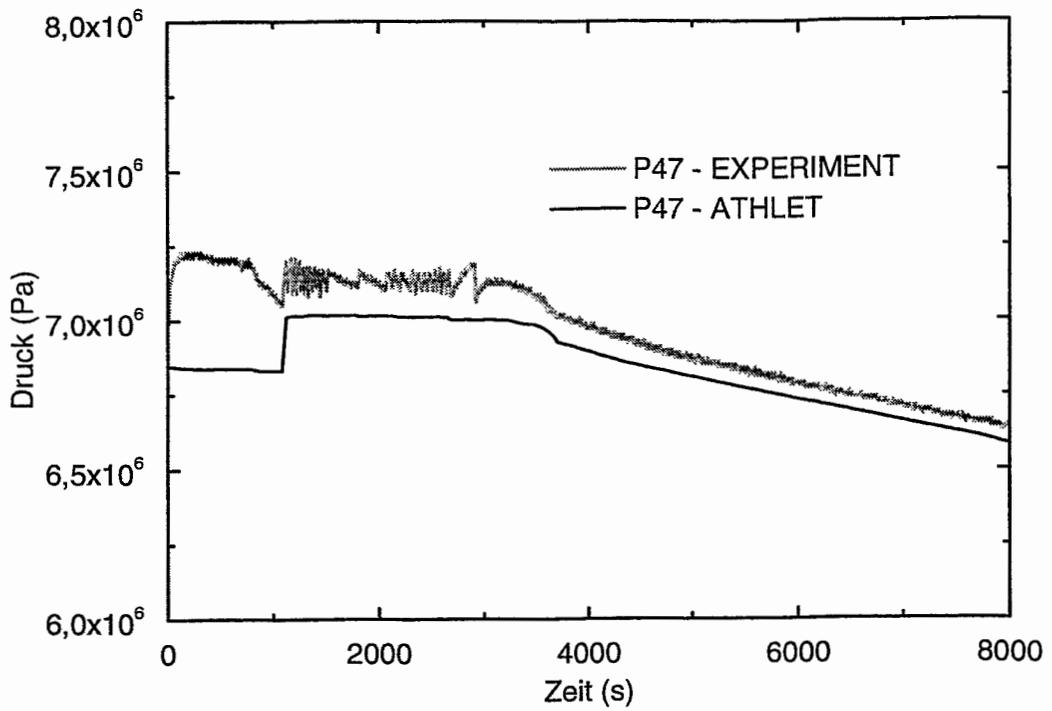


Bild 5.27: Druck im Sekundärkreis (P47) - Dampferzeuger 1

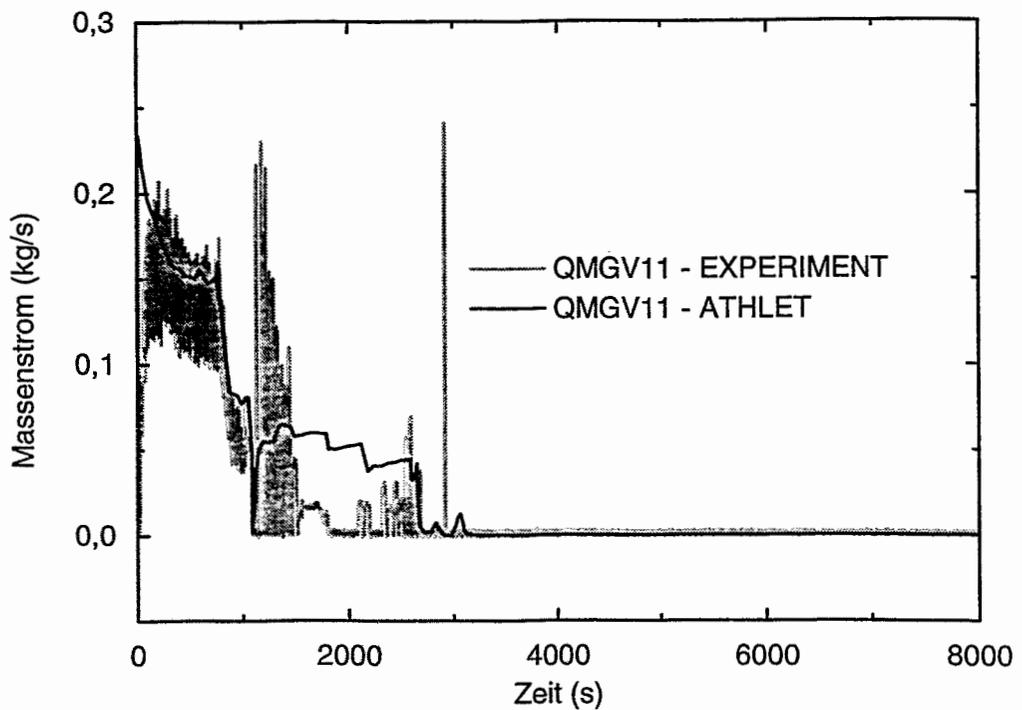


Bild 5.28: Massenstrom in der Steam Line - DE 1

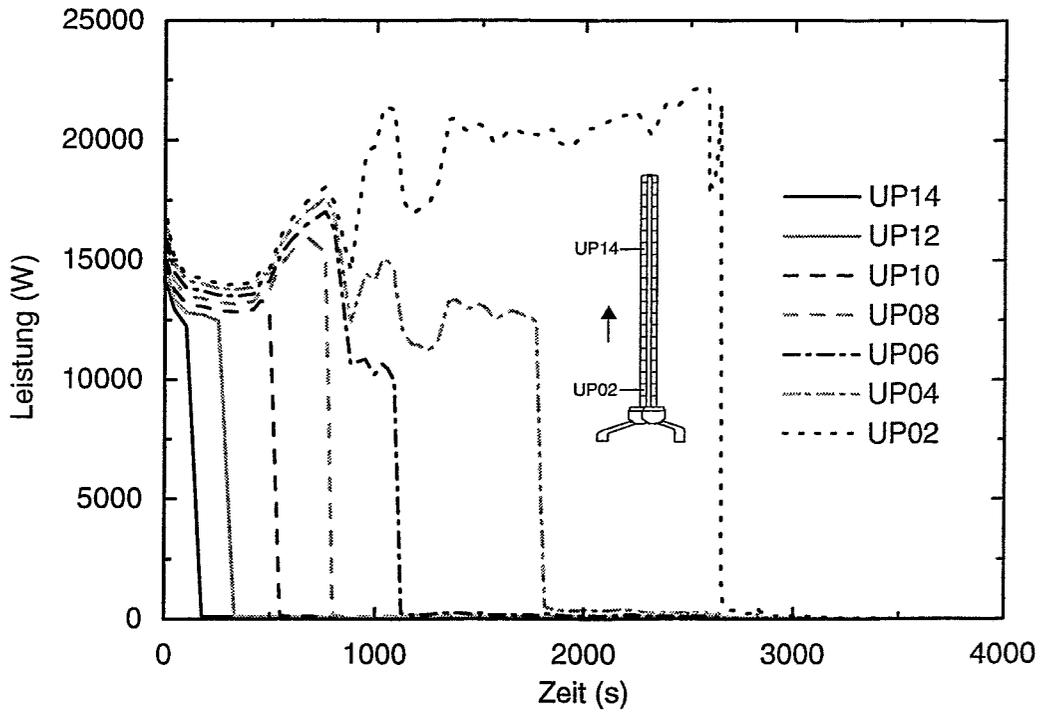


Bild 5.29: Dampferzeugerleistung in verschiedenen Nodes (Up Flow Side)

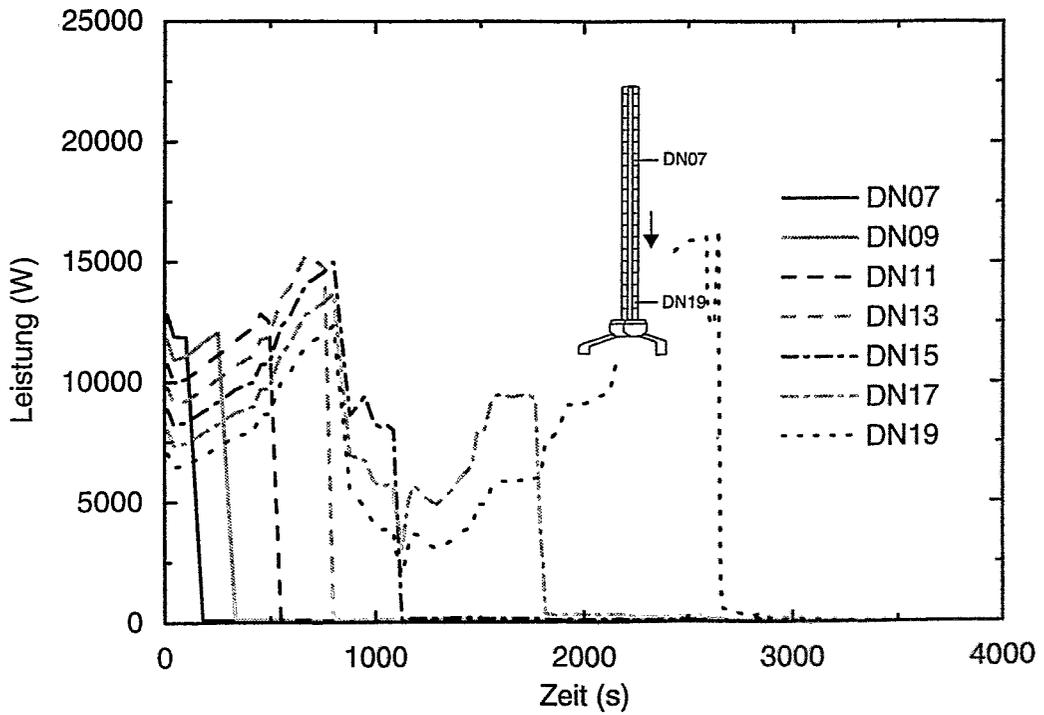


Bild 5.30: Dampferzeugerleistung in verschiedenen Nodes (Down Flow Side)

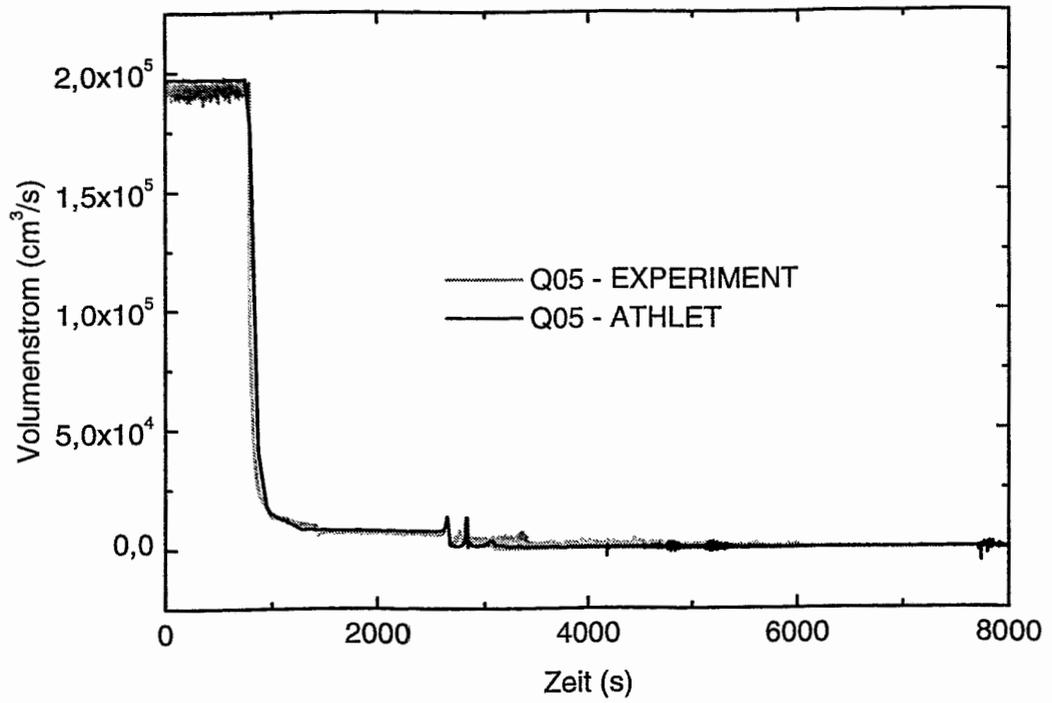


Bild 5.31: Volumenstrom im Downcomer (Q05)

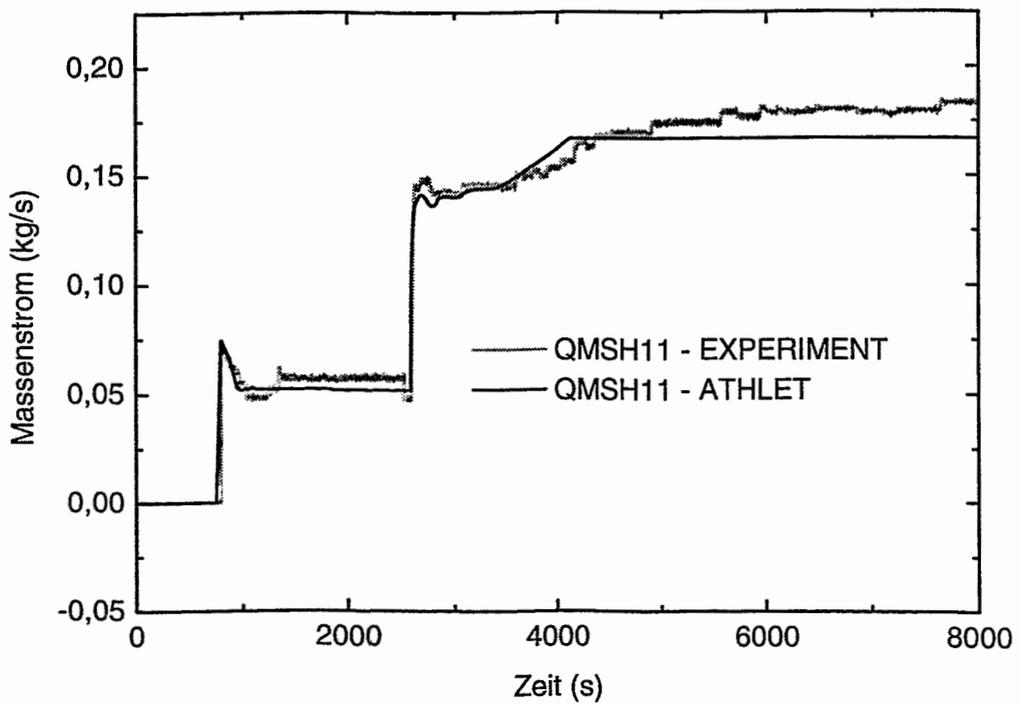


Bild 5.32: Massenstrom der Hochdrucknoteinspeisung (1. Schleife)

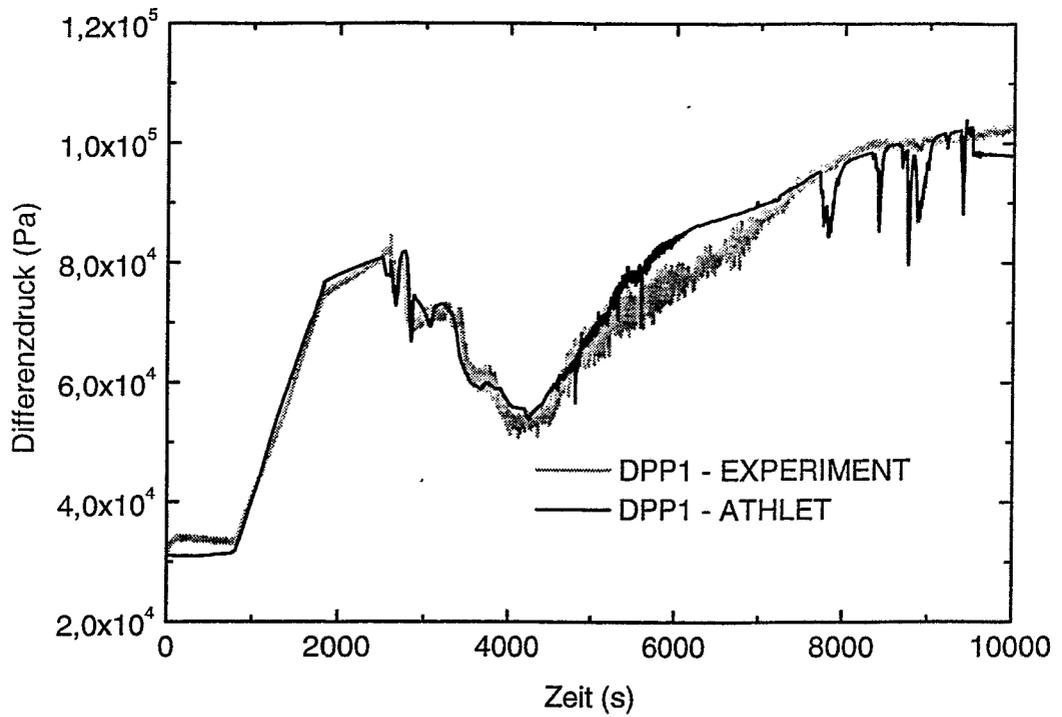


Bild 5.33: Differenzdruck im Druckhalter (DPP1)

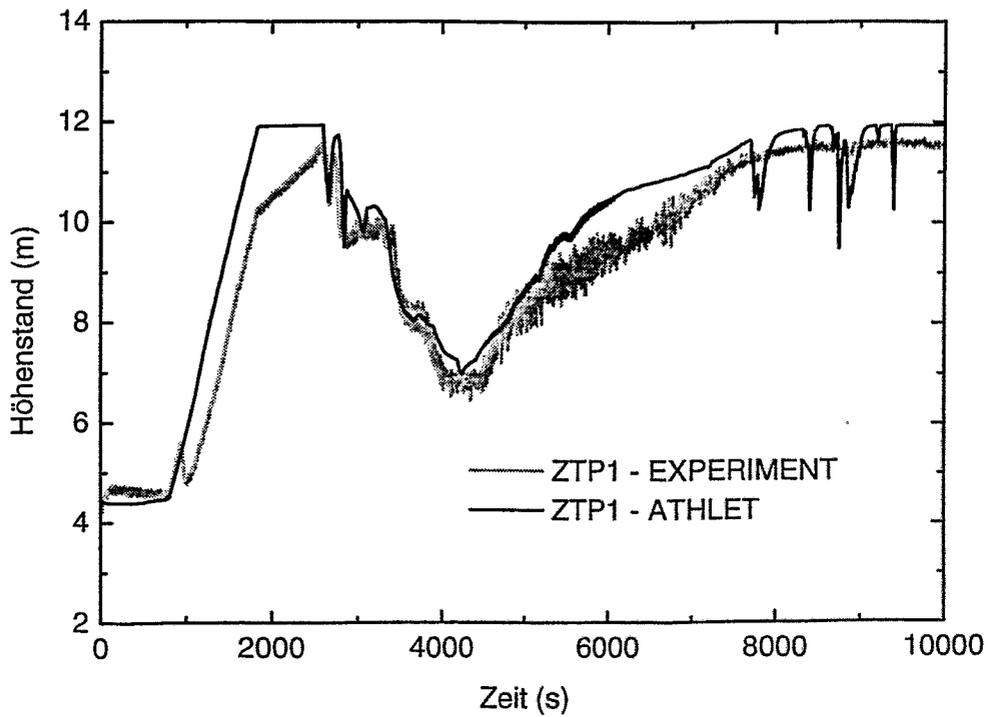


Bild 5.34: Höhenstand im Druckhalter (ZTP1)

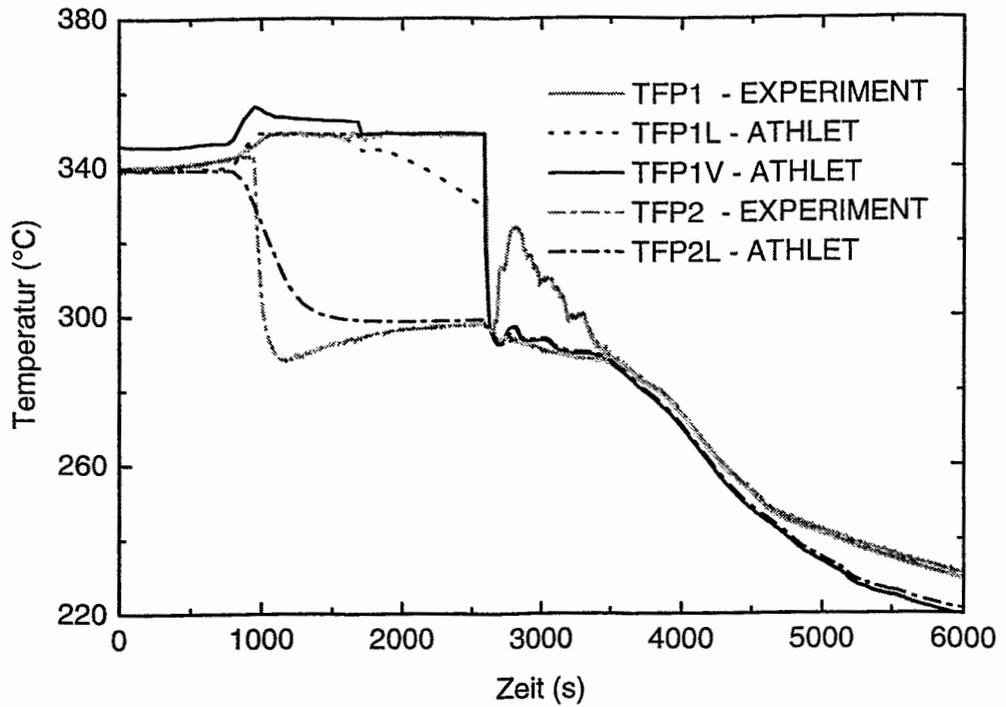


Bild 5.35: Temperaturen im Druckhalter (TFP1 - top, TFP2 - bottom)

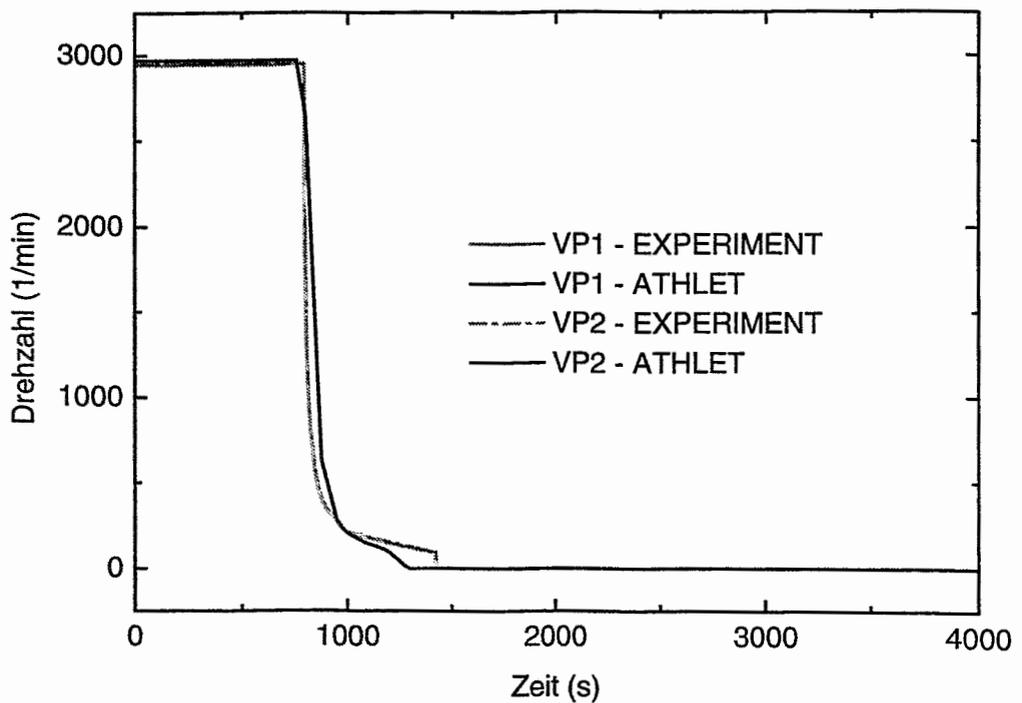


Bild 5.36: Pumpendrehzahl (VP1/2) - 1. und 2. Schleife

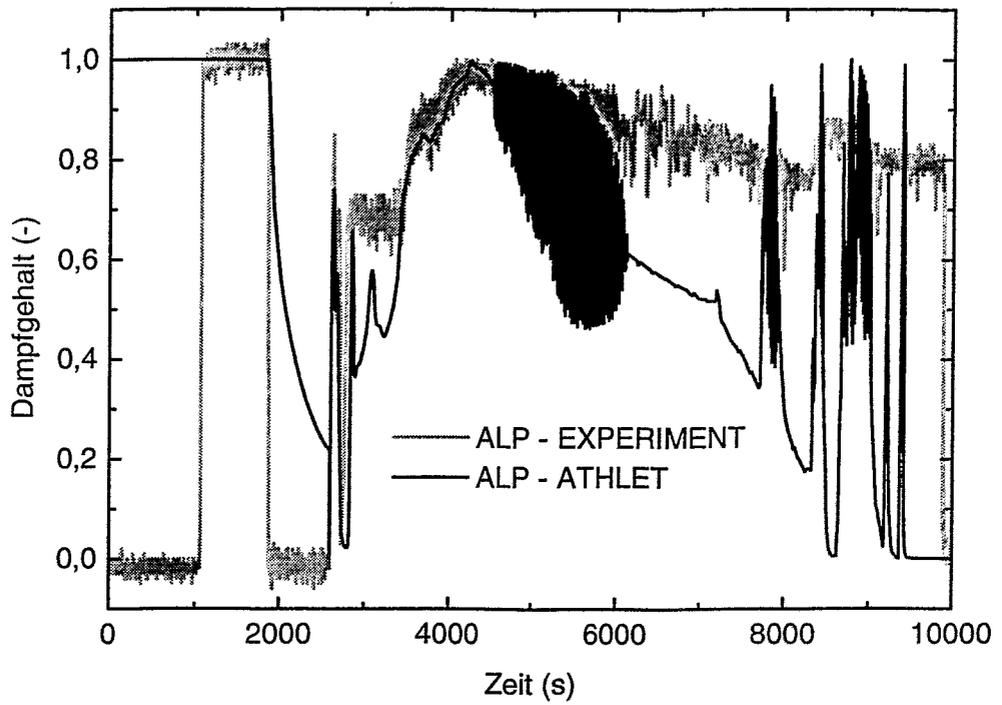


Bild 5.37: Dampfgehalt in der Druckhalterabblaseleitung (ALP)

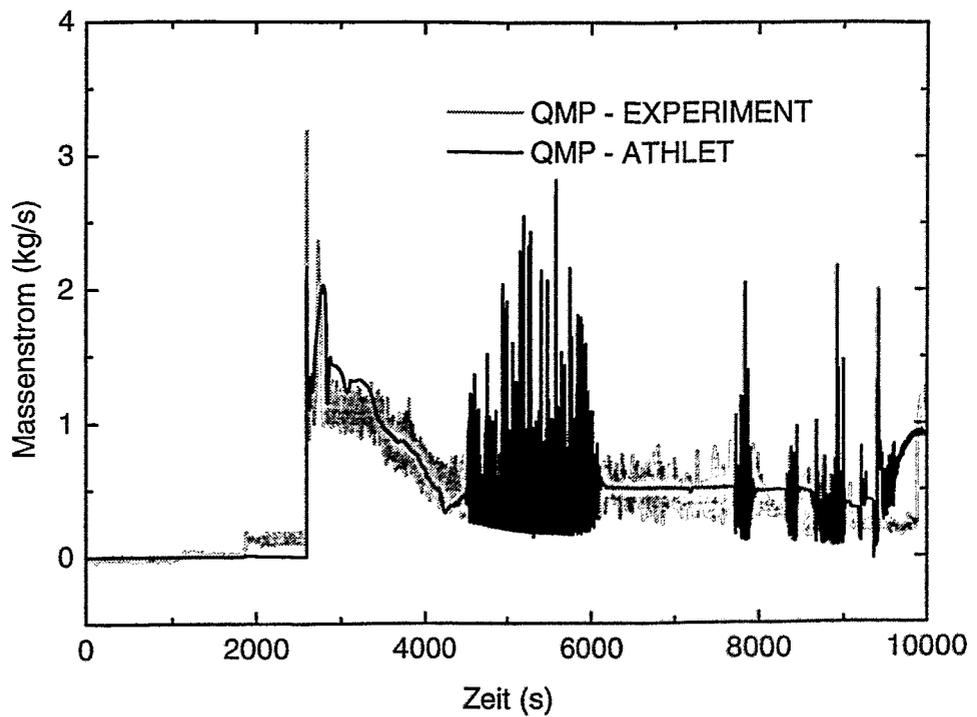


Bild 5.38: Massenstrom in der Druckhalterabblaseleitung (QMP)

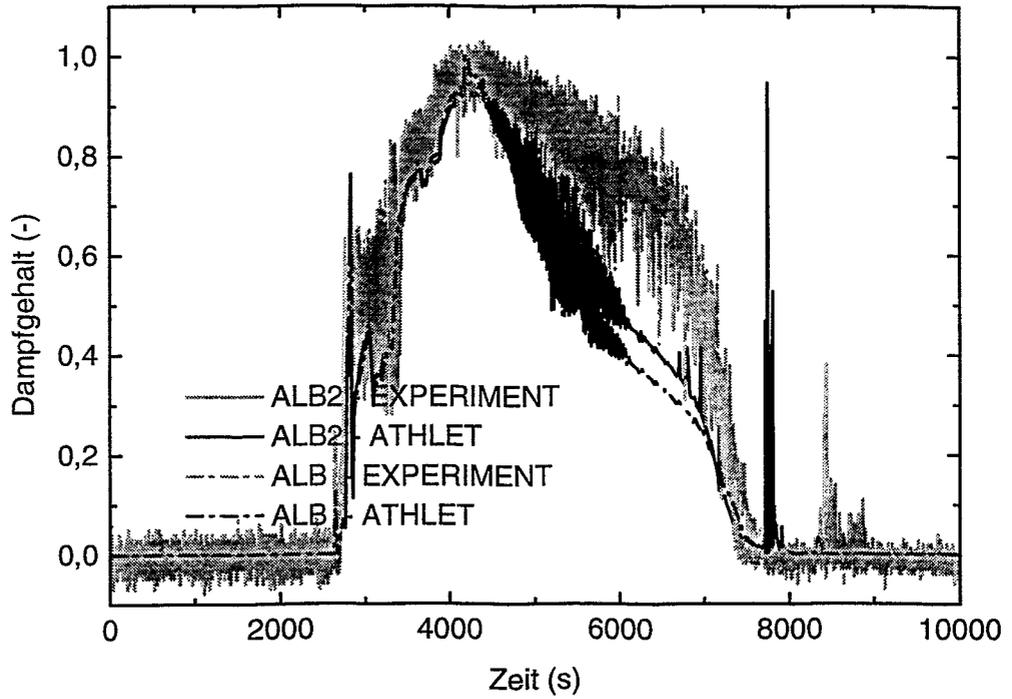


Bild 5.39: Dampfgehalt in der Surge Line (ALB2 - bottom, ALB - top)

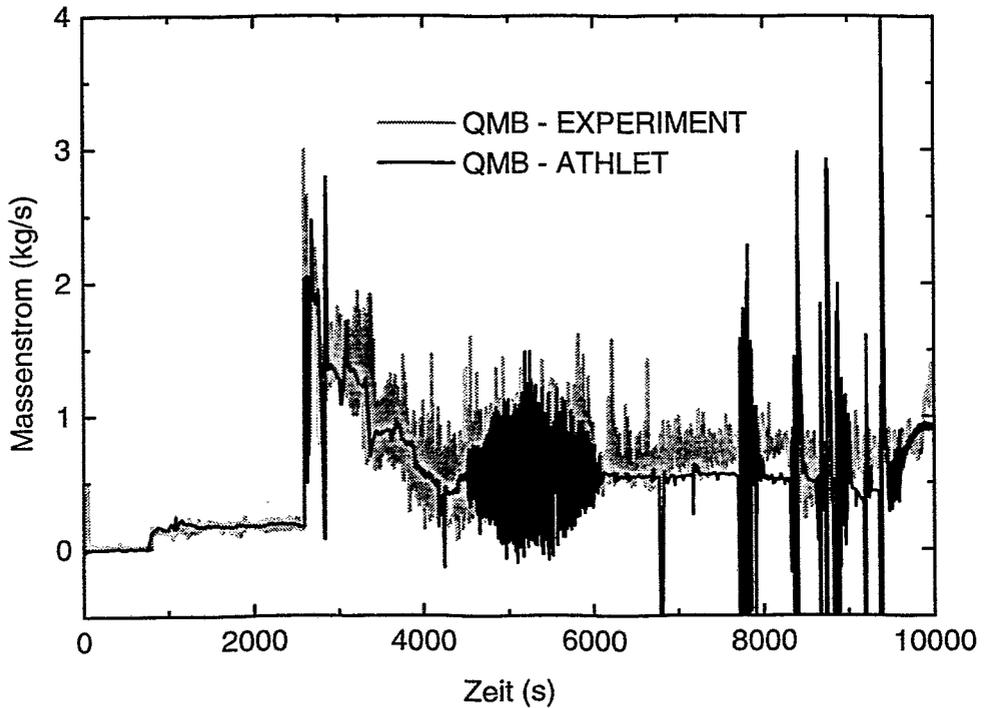


Bild 5.40: Massenstrom in der Surge Line (QMB)

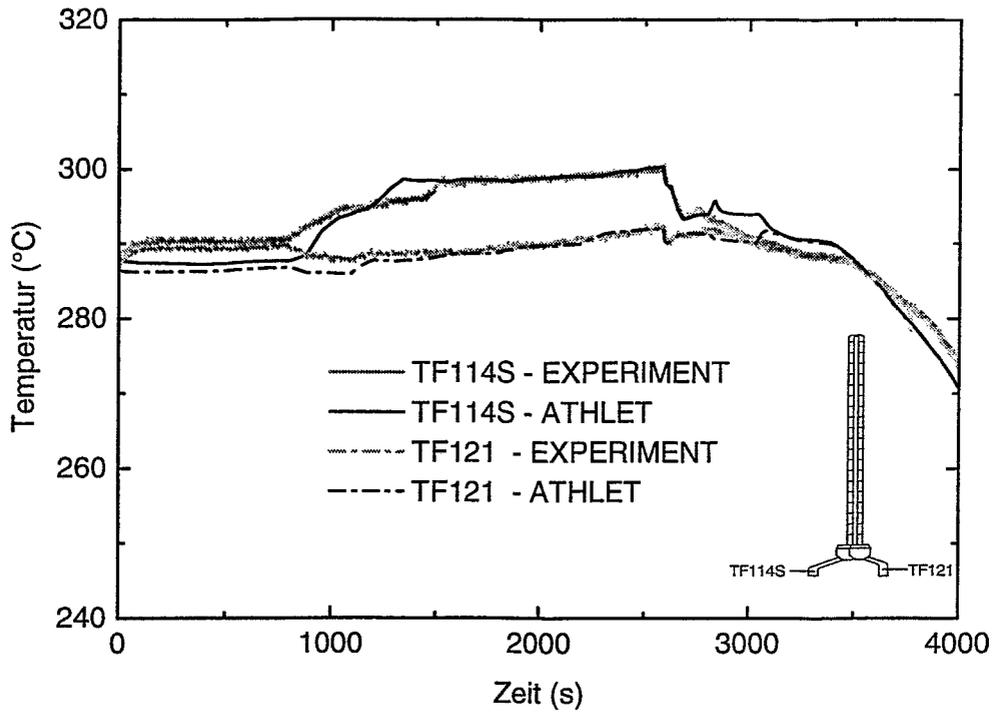


Bild 5.41: Temperaturen am DE-Ein- und -austritt (1. Schleife)

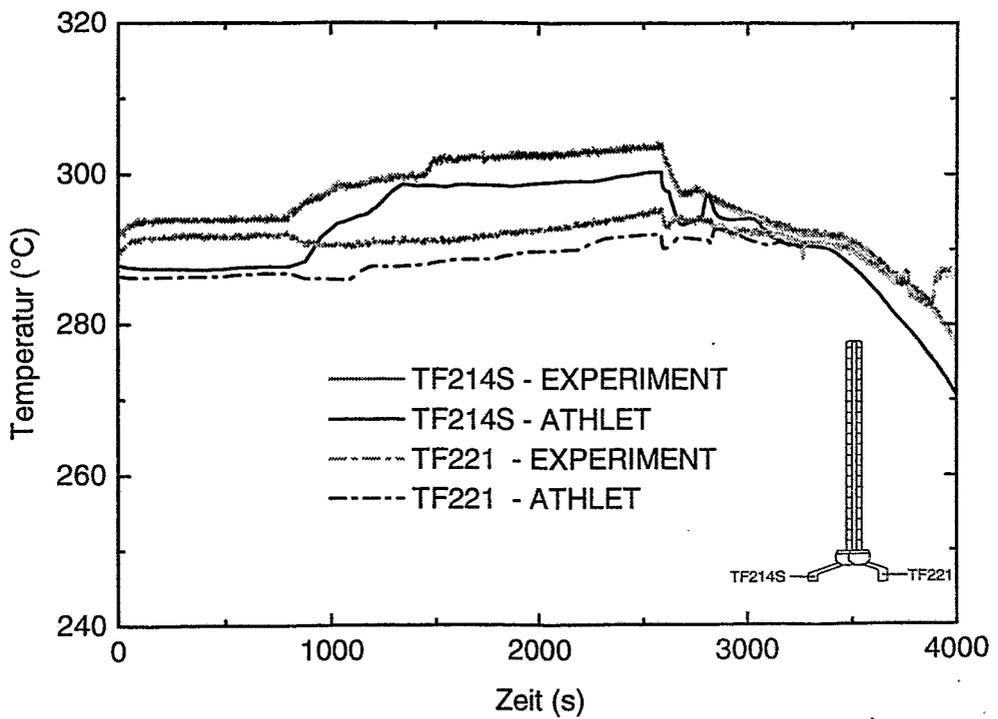


Bild 5.42: Temperaturen am DE-Ein- und -austritt (2. Schleife)

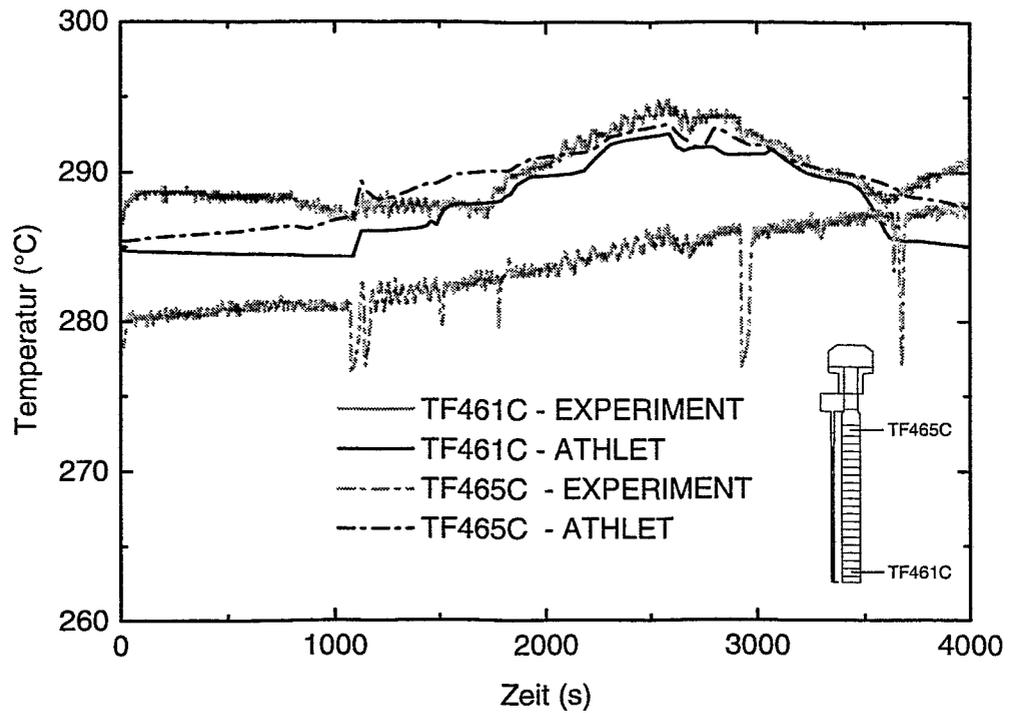


Bild 5.43: Temperaturen auf der DE-Sekundärseite (DE1)

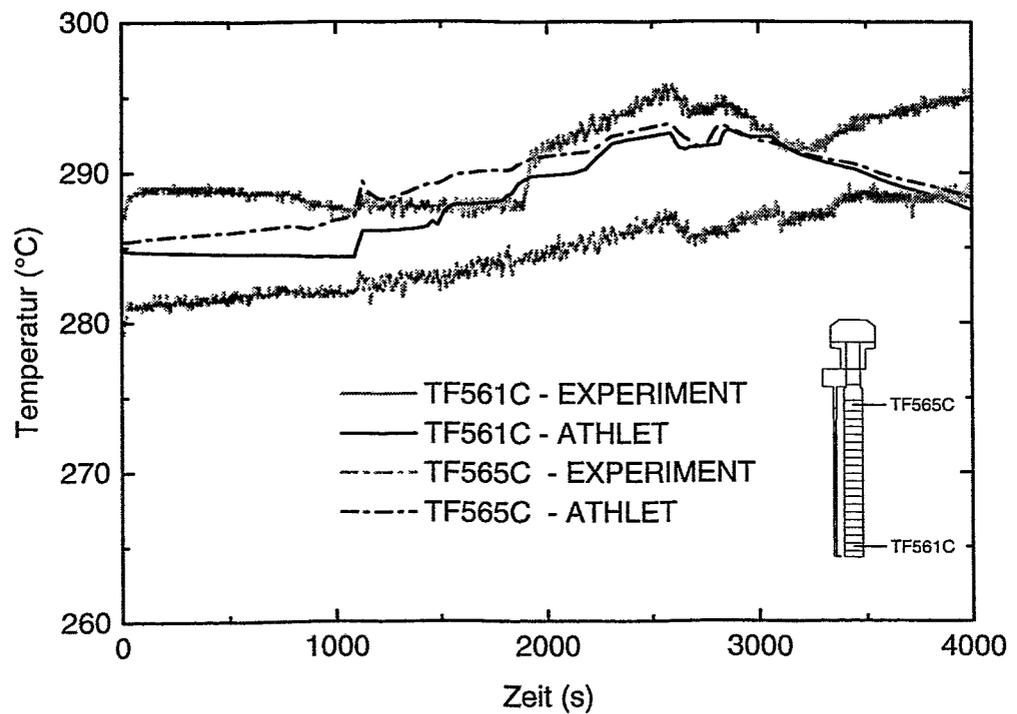


Bild 5.44: Temperaturen auf der DE-Sekundärseite (DE2)

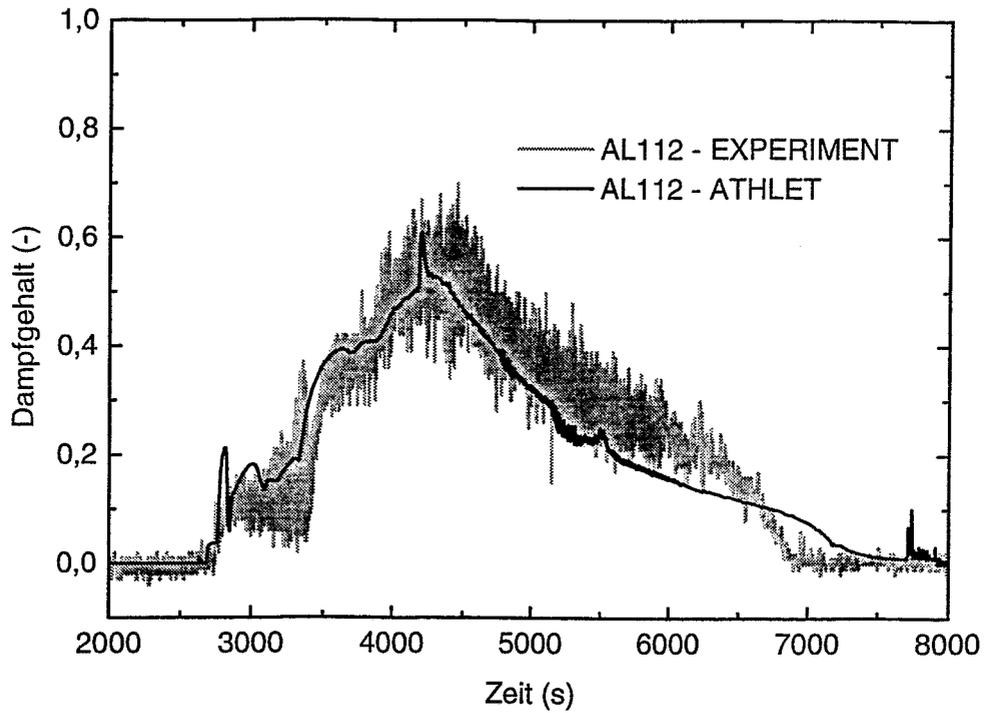


Bild 5.45: Dampfgehalt am Eintritt in den heißen Strang (HL1)

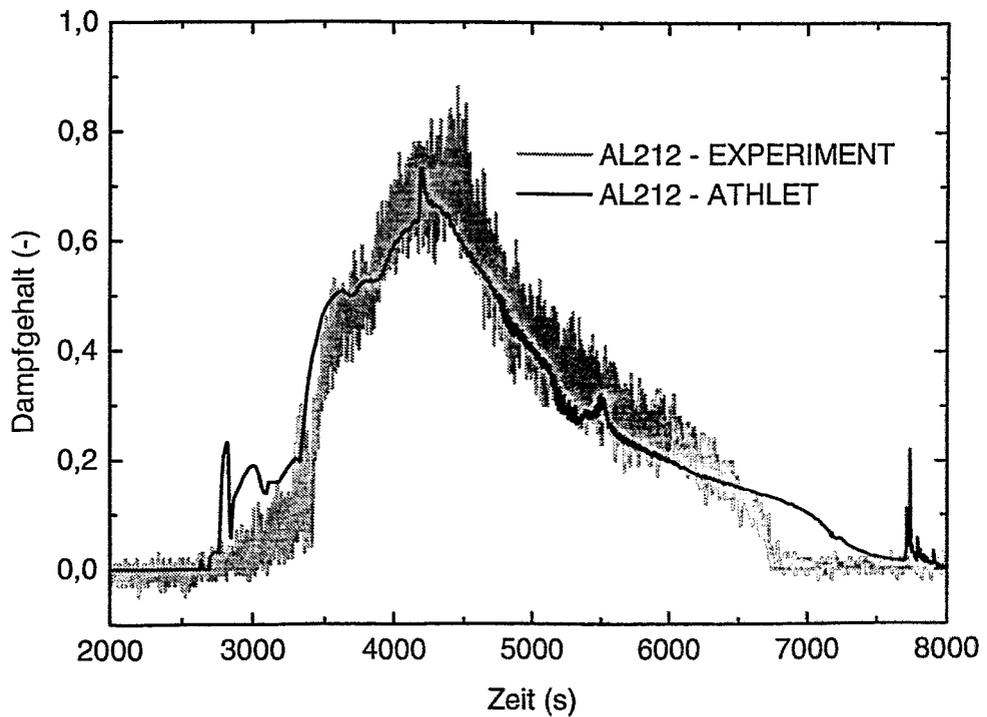


Bild 5.46: Dampfgehalt am Eintritt in den heißen Strang (HL2)

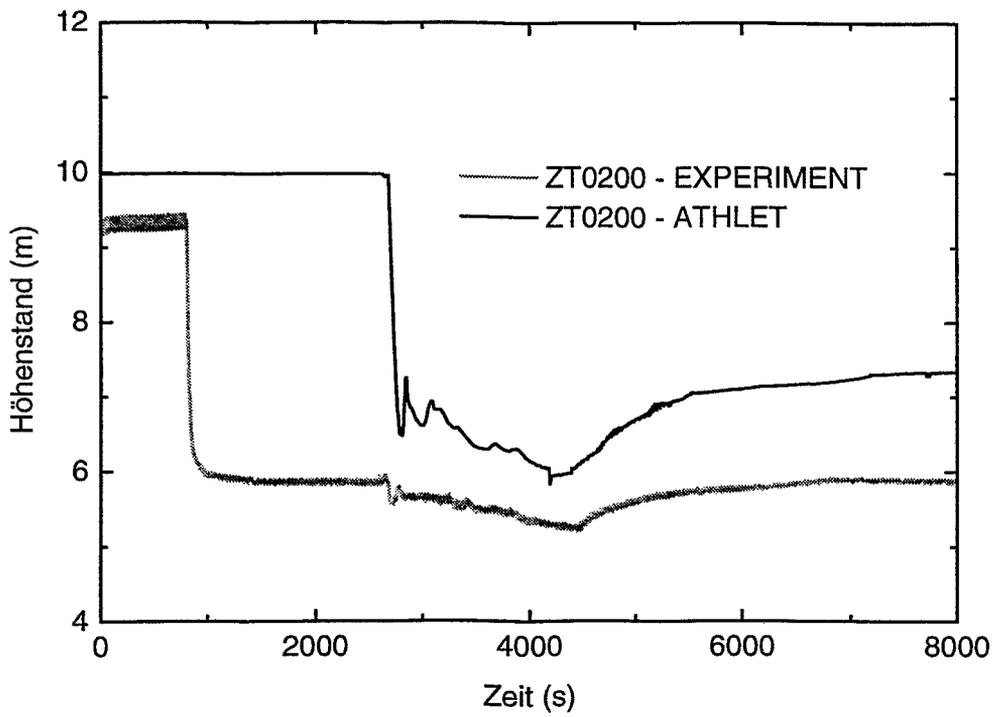


Bild 5.47: Höhenstand im Reaktormodell (ZT0200)

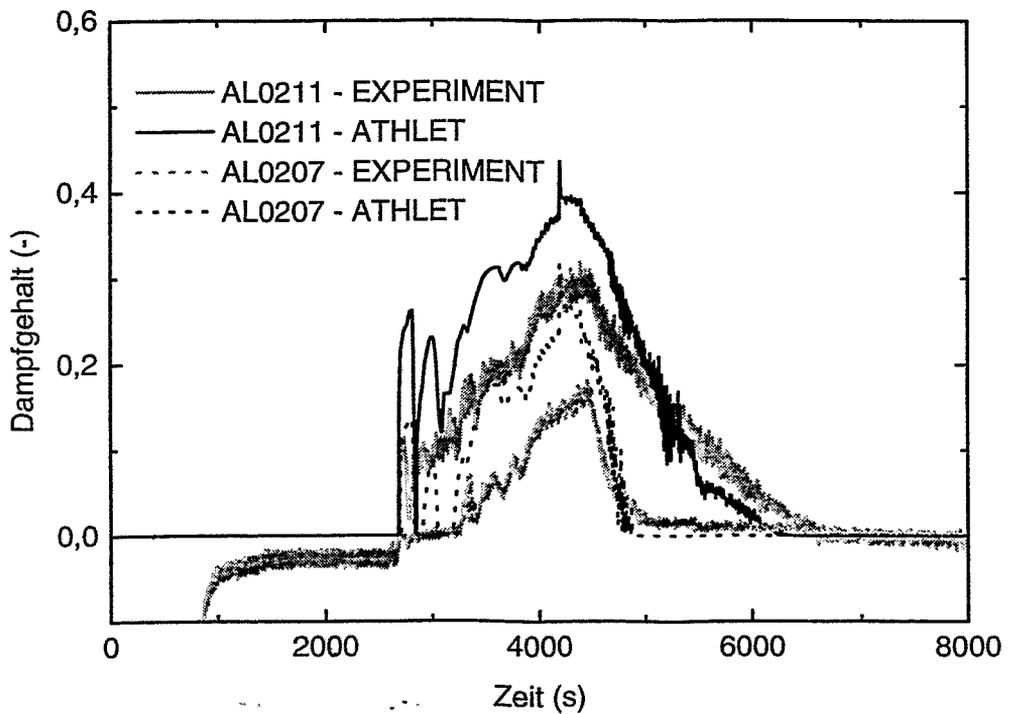


Bild 5.48: Dampfgehalt im Reaktorkern (AL0211 - top, AL0207 - middle)

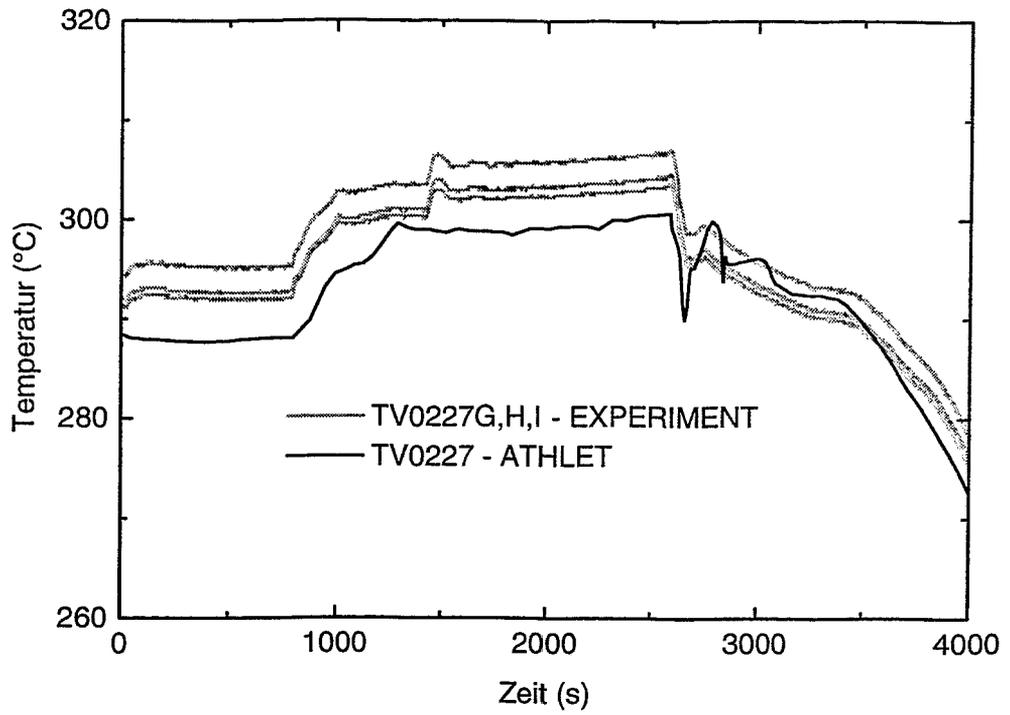


Bild 5.49: Brennstaboberflächentemperaturen ($z=3.46\text{m}$)

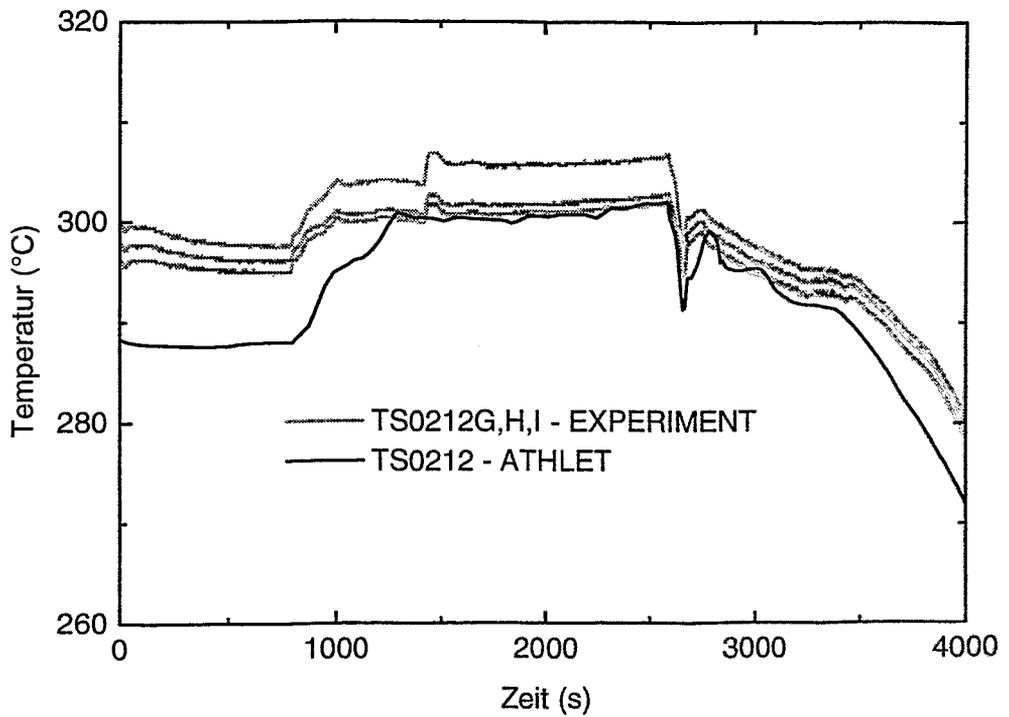


Bild 5.50: Brennstaboberflächentemperaturen ($z=1.83\text{m}$)

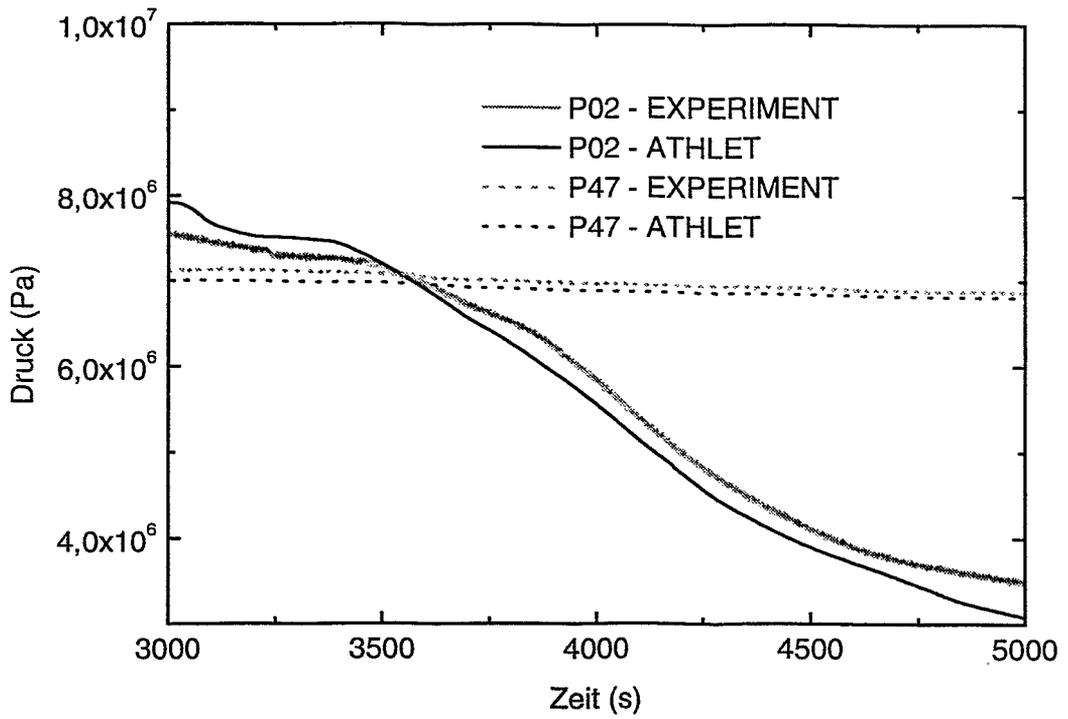


Bild 5.51: Primärdruck (P02) und Sekundärdruck (P47 - DE1)

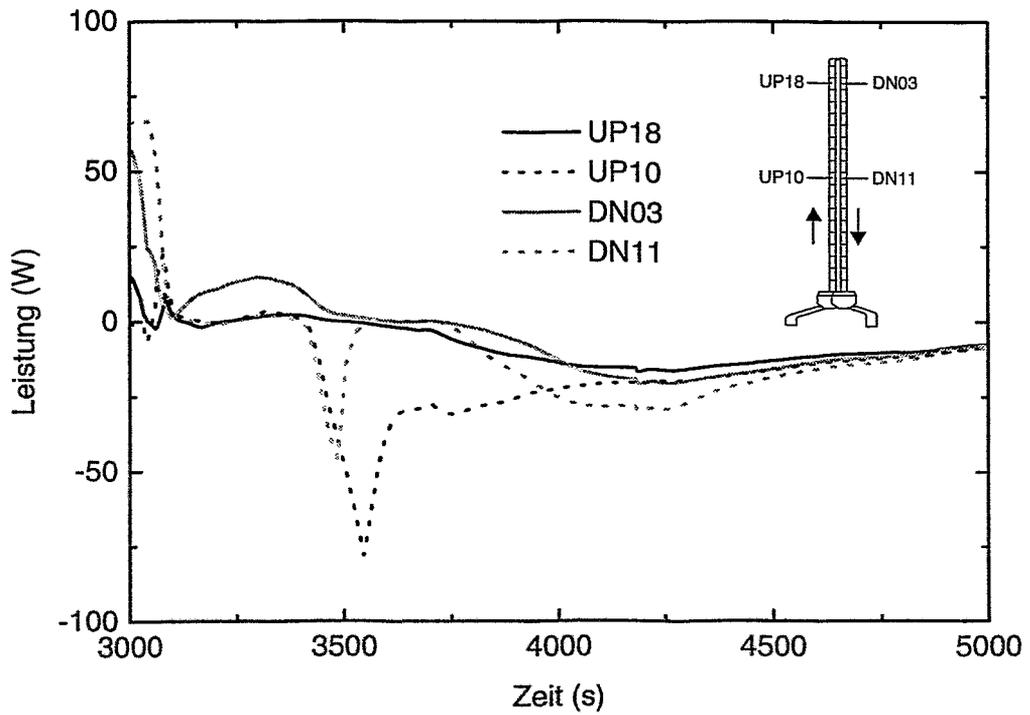


Bild 5.52: Dampferzeugerleistung in einzelnen Nodes

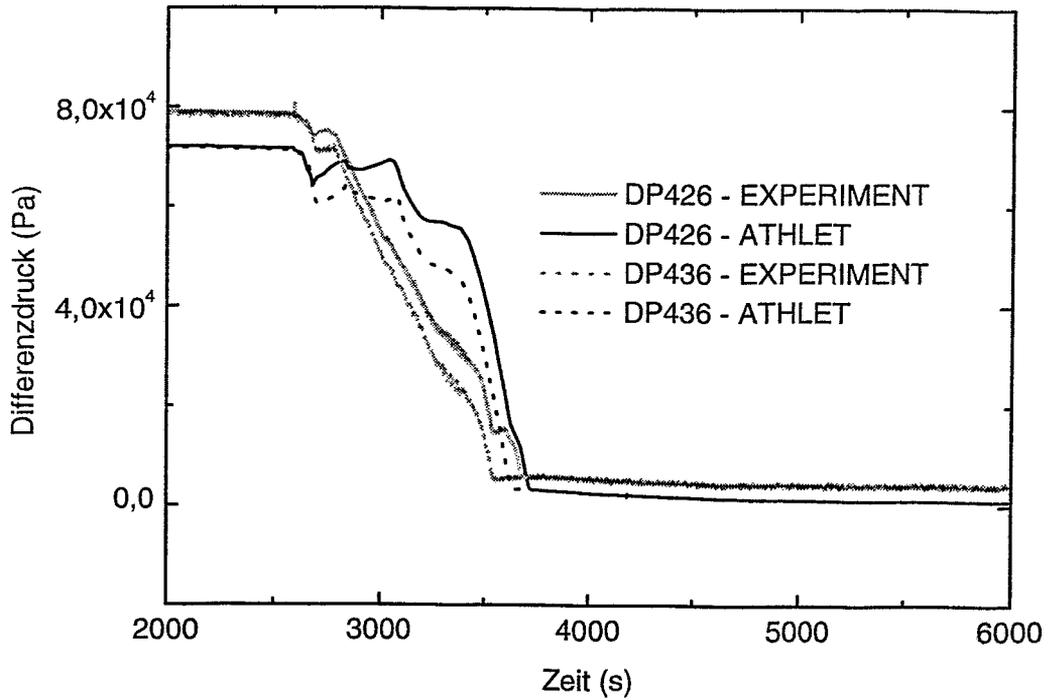


Bild 5.53: Differenzdruck über den Dampferzeuger U-Rohren (DE1)

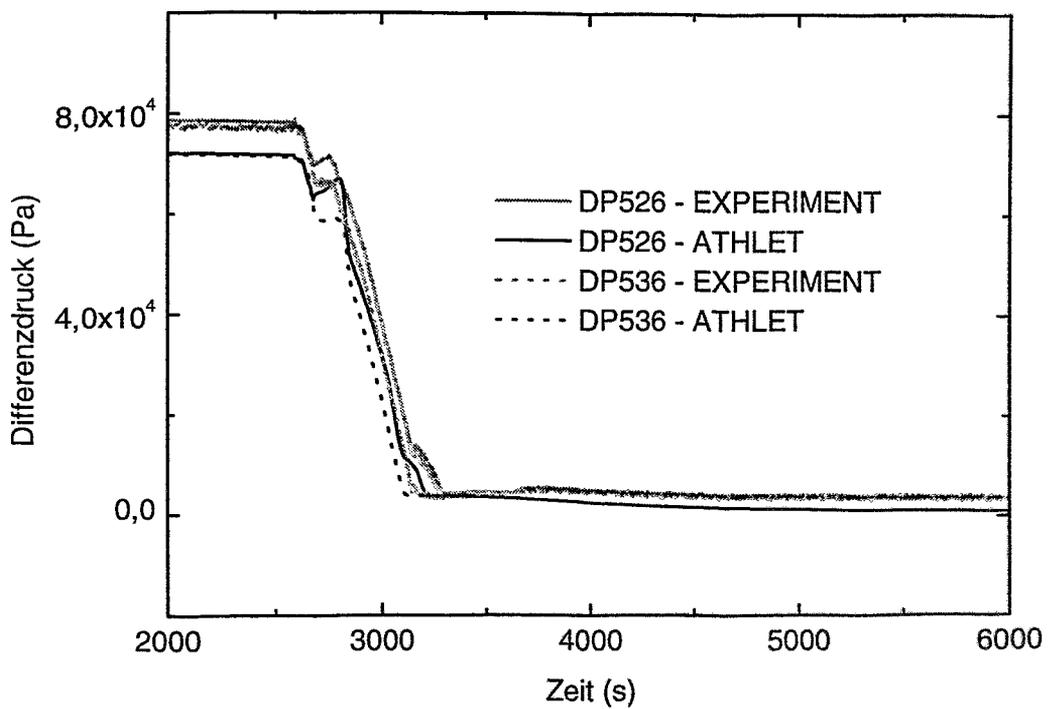


Bild 5.54: Differenzdruck über den Dampferzeuger U-Rohren (DE2)

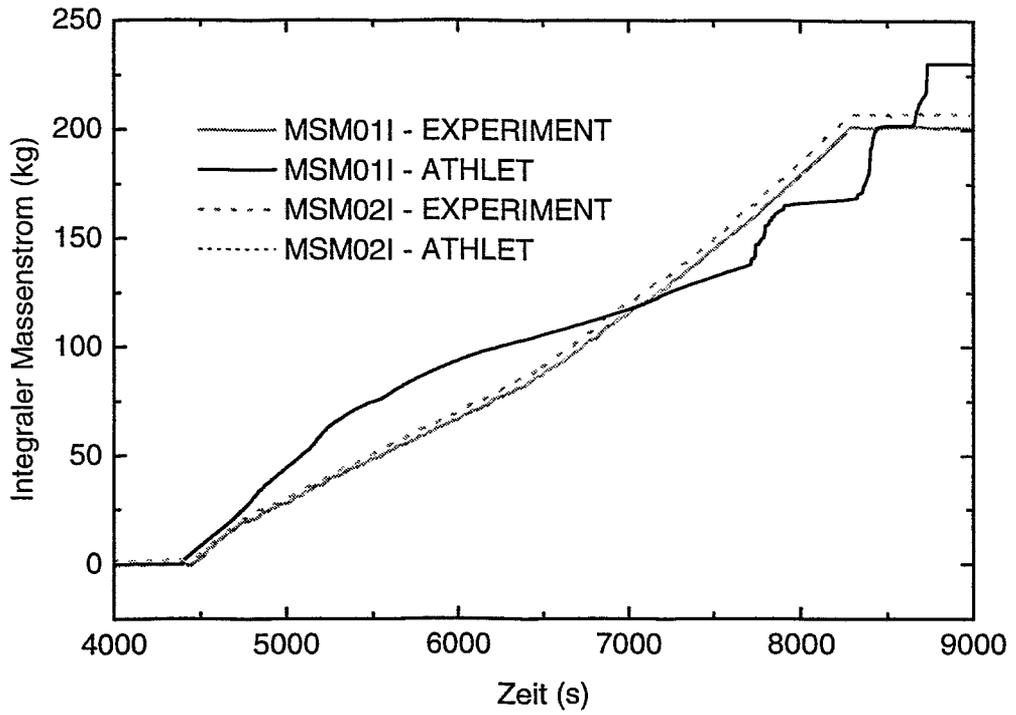


Bild 5.55: Integraler Massenstrom der Druckspeichereinspeisung (MSMI)

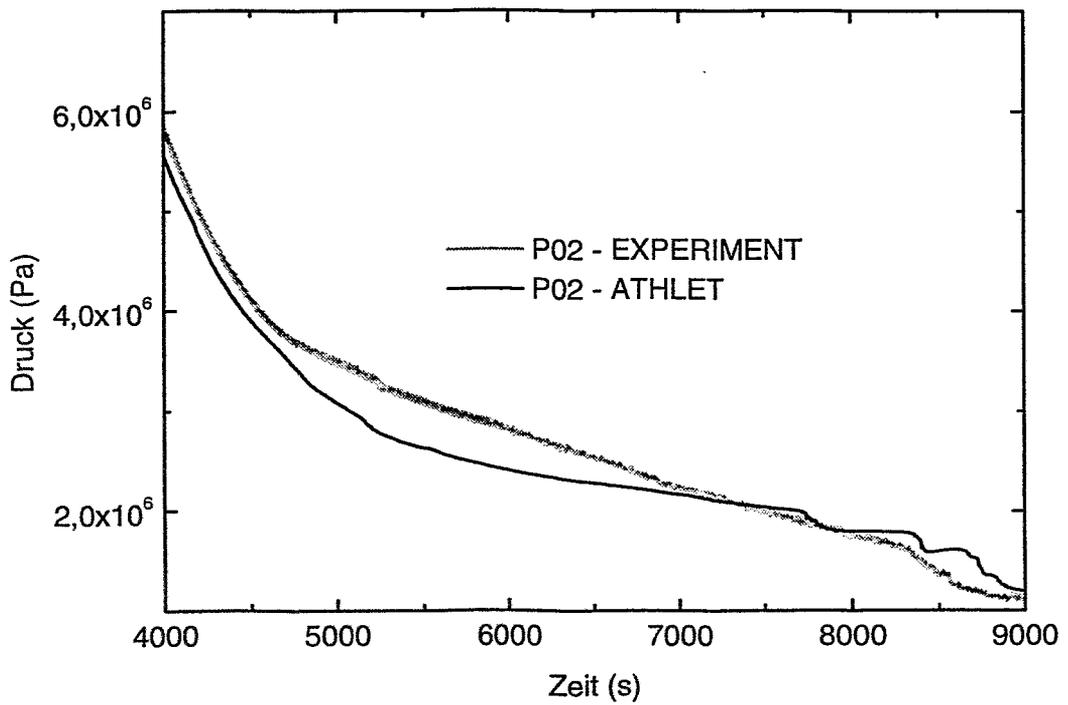


Bild 5.56: Primärdruck (P02) im Verlauf der Druckspeichereinspeisung

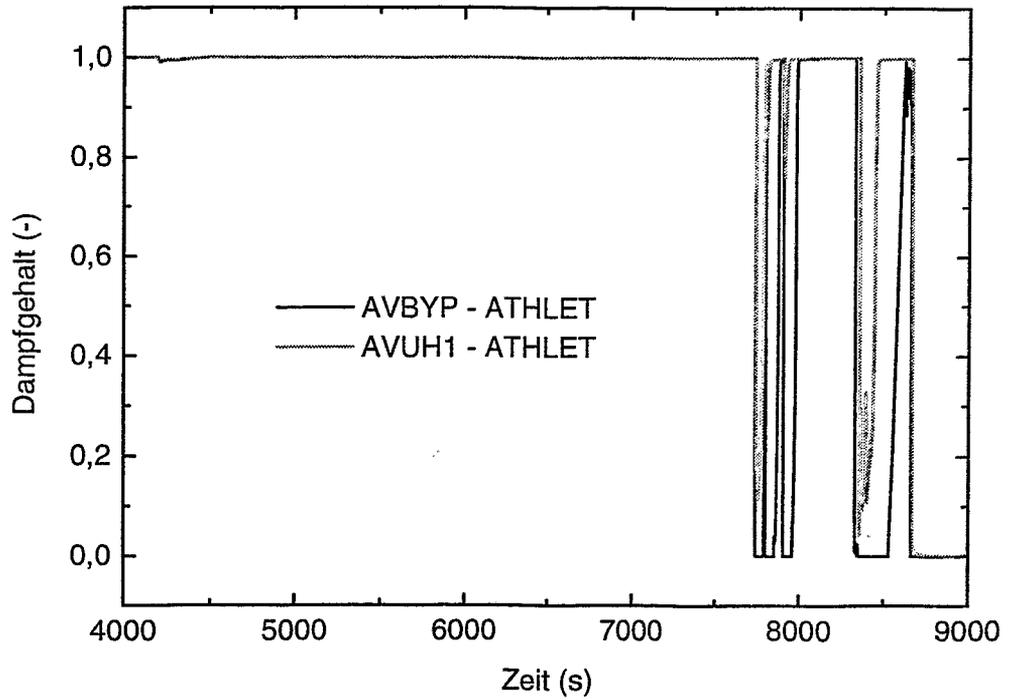


Bild 5.57: Dampfgehalt im Bypass (AVBYP) und im Upper Head (AVUH1)

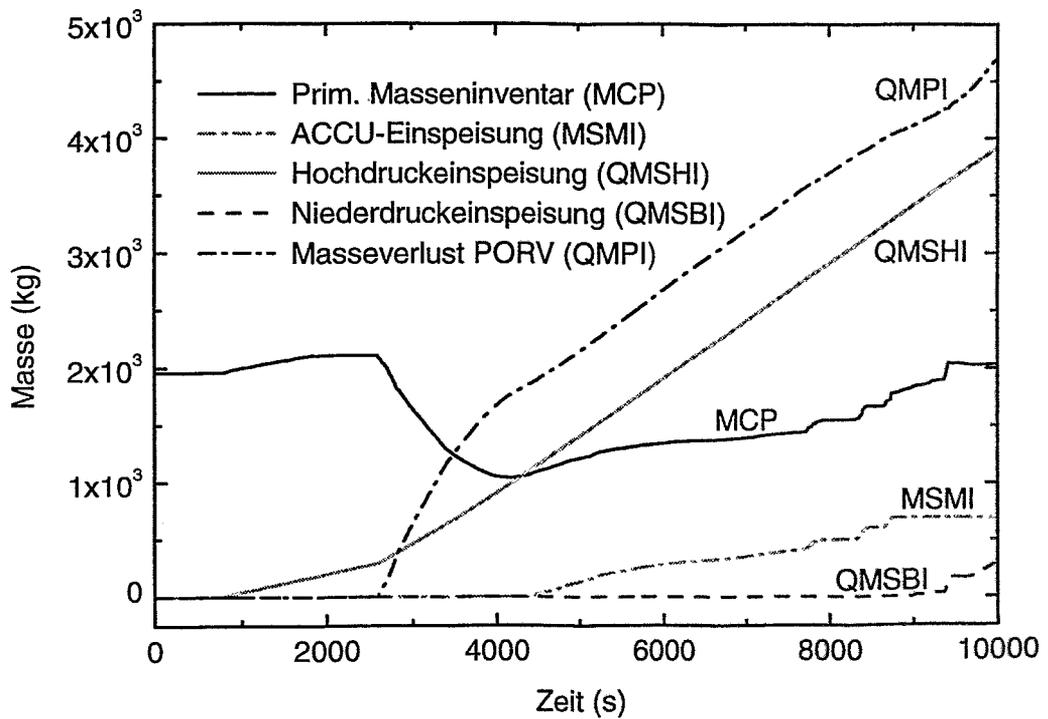


Bild 5.58: Massenbilanz für den Primärkreis (Masseverluste über den Druckhalter (QMPI) und die aus der Notkühlung eingespeisten Massen)

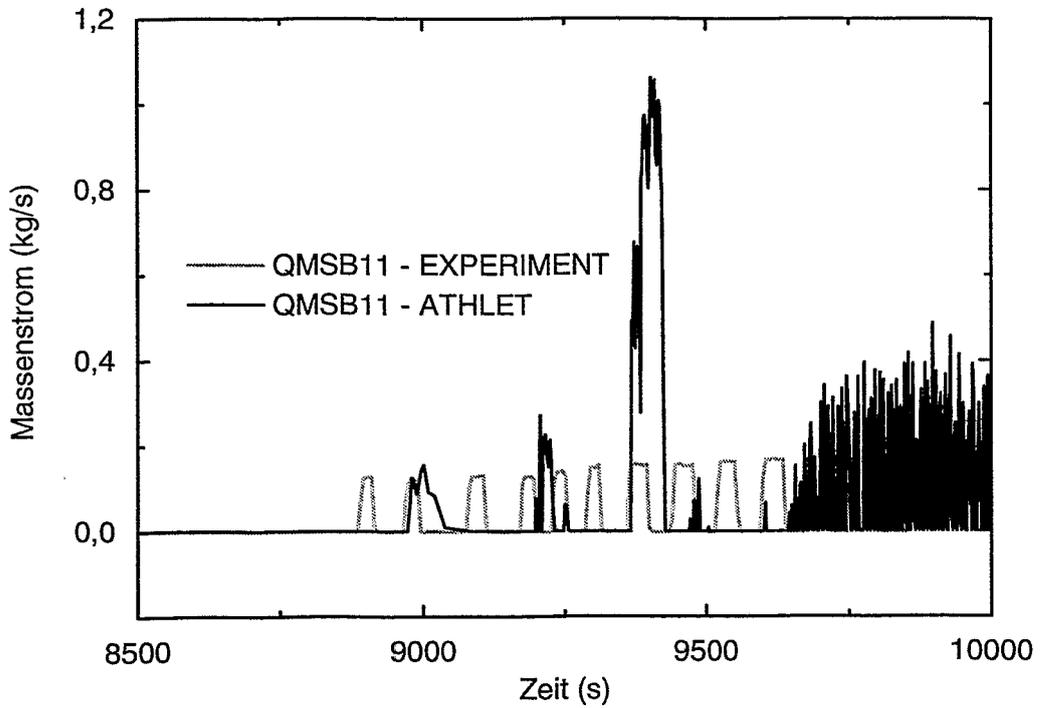


Bild 5.59: Massenstrom der Niederdrucknoteinspeisung in der 1. Schleife

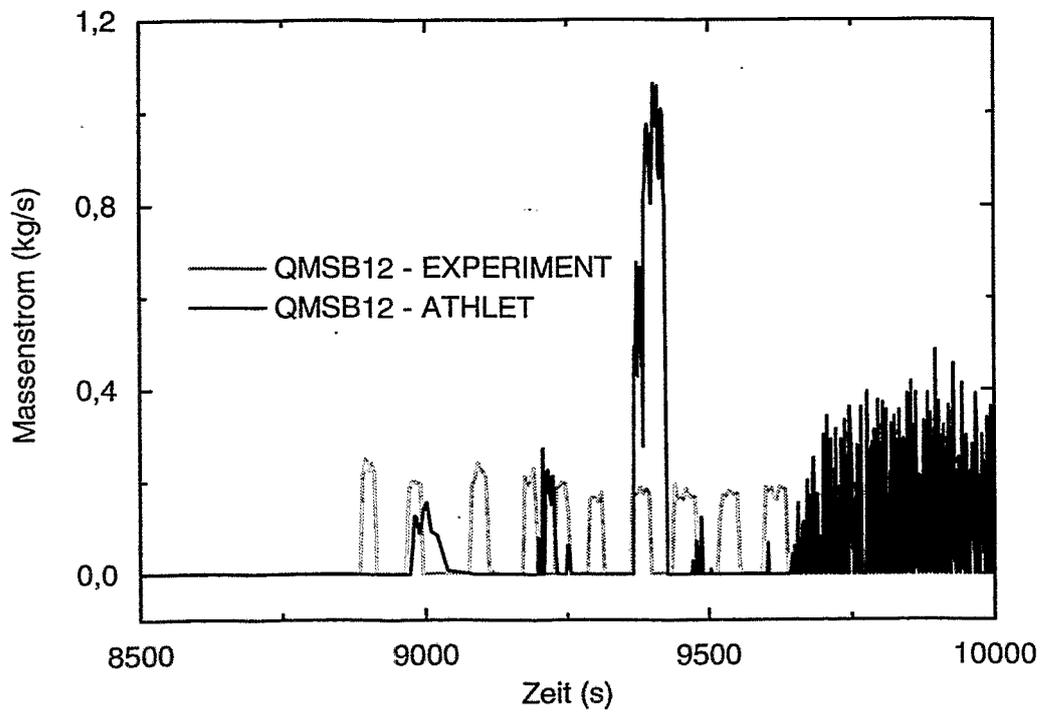


Bild 5.60: Massenstrom der Niederdrucknoteinspeisung in der 2. Schleife

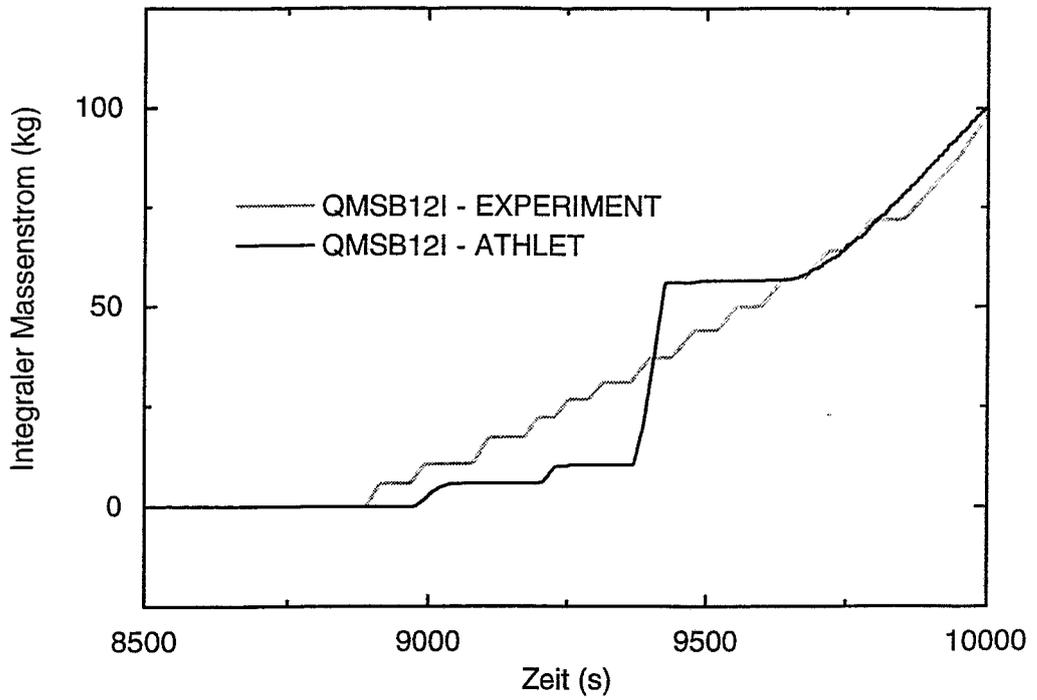


Bild 5.61: Integraler Massenstrom der Niederdruckeinspeisung (2. Schleife)

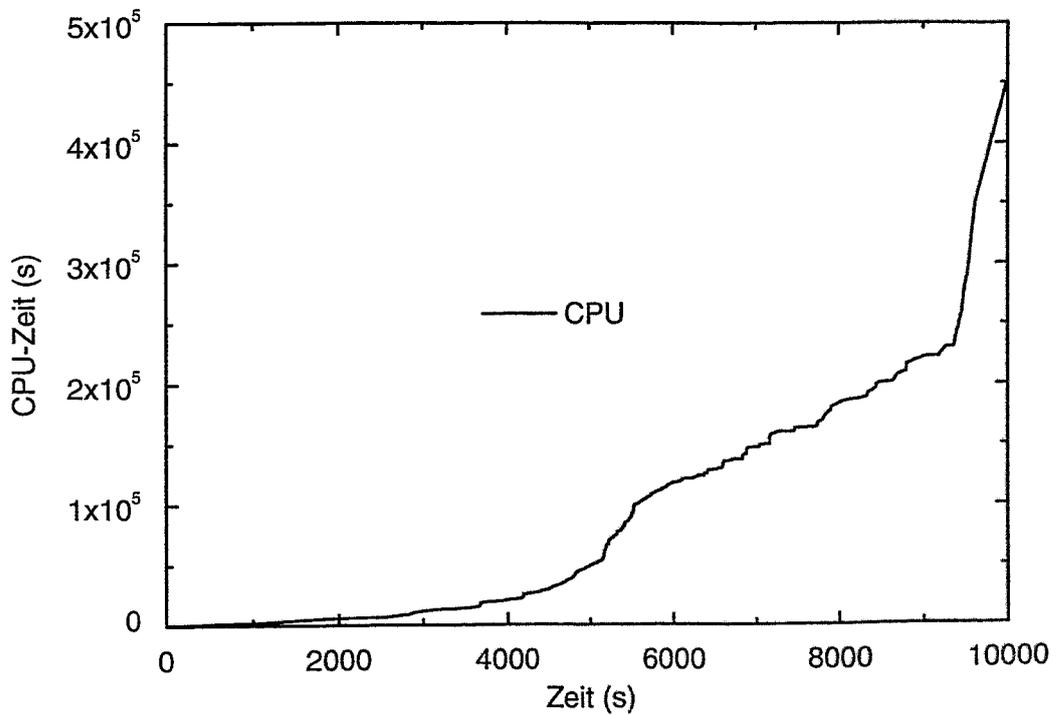


Bild 5.62: CPU-Zeit

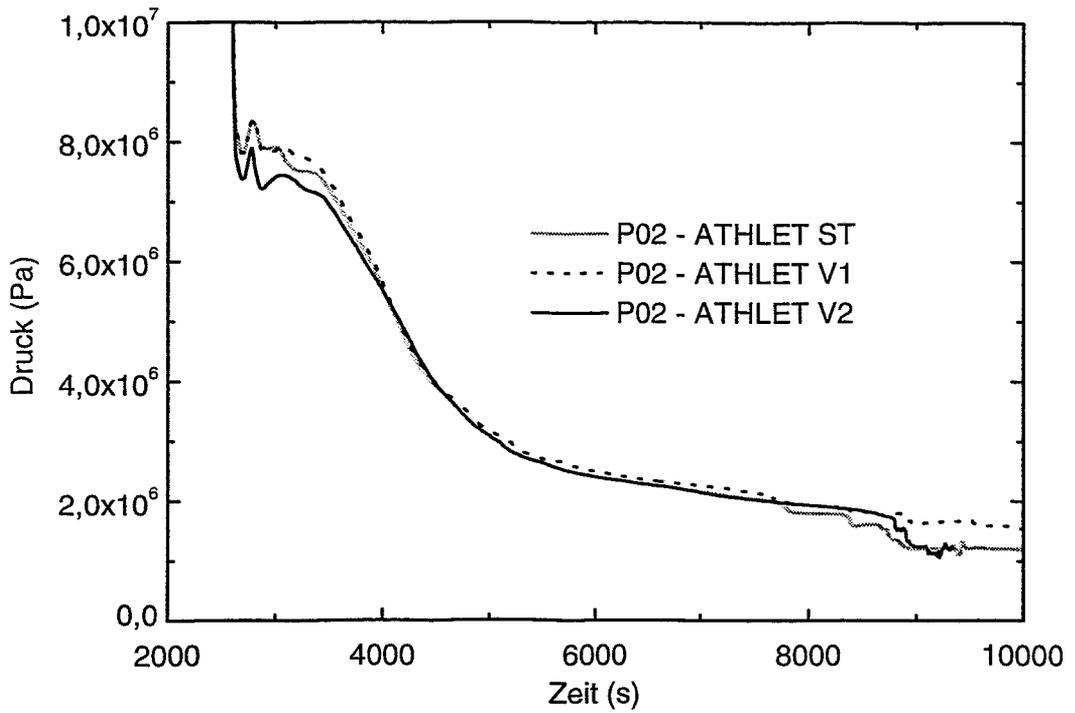


Bild 5.63: Druckverlauf für die Rechnungen mit variiertem Trace Heating (ST - Standardvariante, V1/V2 - Trace Heating erhöht/verringert)

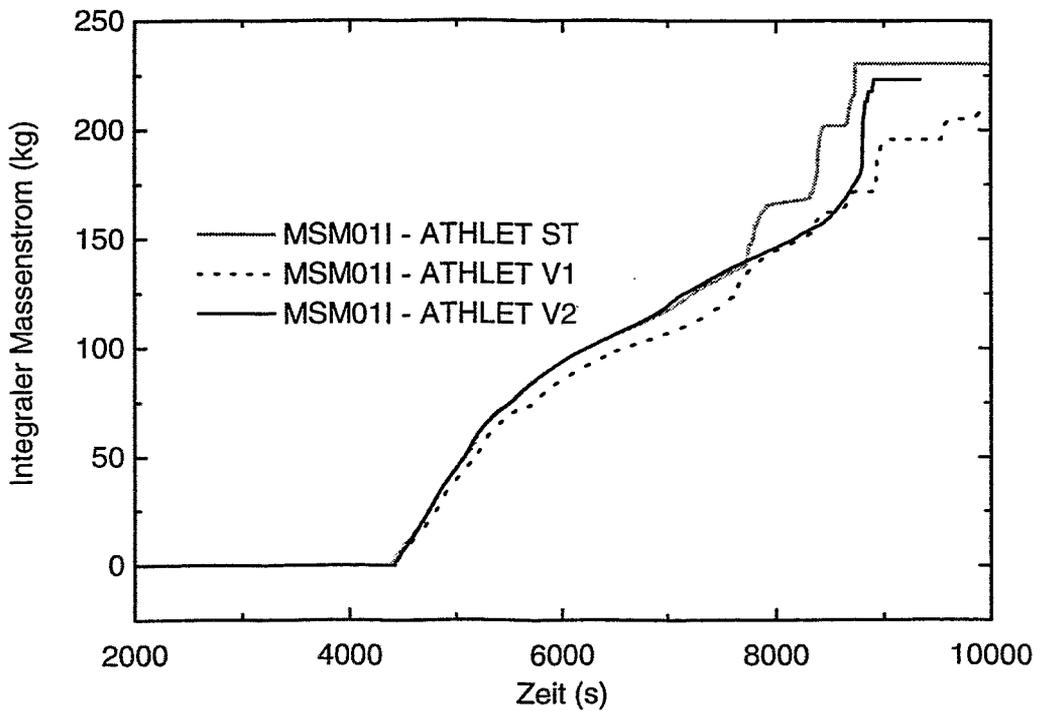


Bild 5.64: Druckspeichereinspeisung für die Rechnungen mit variiertem Trace Heating

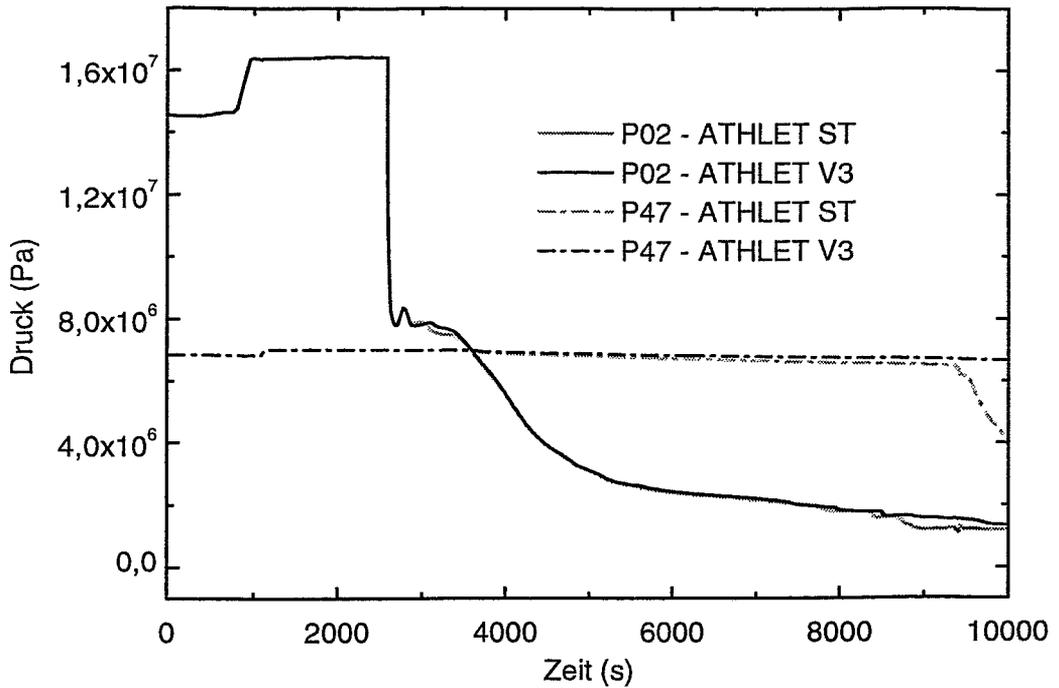


Bild 5.65: Primär- (P02) und Sekundärdruck (P47) für die Standardvariante und die Variante mit angepaßtem Trace Heating

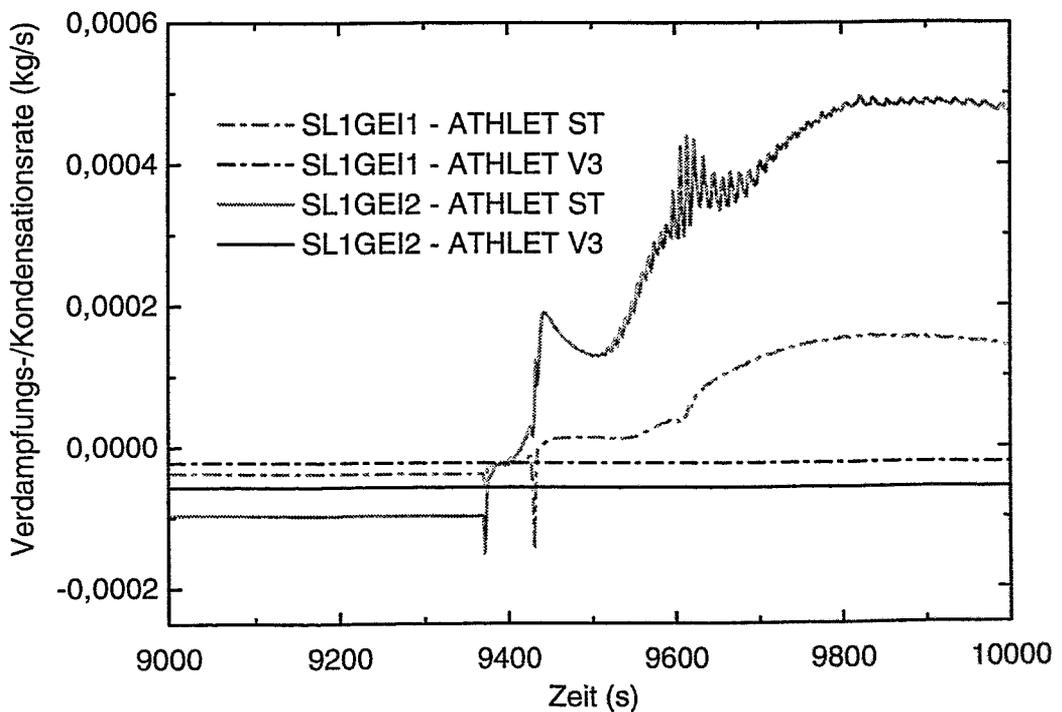


Bild 5.66: Verdampfungs- bzw. Kondensationsrate in der Steam Line für die Standardvariante und die Variante mit angepaßtem Trace Heating