Validierung des weiterentwickelten Rechenprogramm-systems ATHLET/ATHLET-CD

Vorhaben RS 1155

Abschlussbericht

GRS - A - 3348 a

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH

Abschlussbericht/ Final Report

Reaktorsicherheitsforschung-Vorhabens Nr.:/
Reactor Safety Research-Project No.:
RS1155
(Teil 1: ATHLET)

Vorhabenstitel / Project Title:

Validierung des weiterentwickelten Rechenprogrammsystems ATHLET/ATHLET-CD

Validation of the Advance Computer Code System ATHLET/ATHLET-CD

Autor / Author:
F. Steinhoff
U. Graf
A. Wielenberg

Berichtszeitraum / Publication Date:
Oktober 2006

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende F&E-Vorhaben wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) unter dem Kennzeichen RS 1155 durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Auftragnehmer.

GRS - A - 3348 a

Kurzfassung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens RS 1155 wurden im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie analytische Arbeiten zur Validierung des weiterentwickelten Rechenprogrammsystems ATHLET/ATHLET-CD anhand von internationalen Integral- und Einzeleffektversuchen durchgeführt. Dieser Teil des Abschlussberichts stellt den Stand der Arbeiten zur Validierung von ATHLET und des ATHLET-Moduls FLUBOX 2D/3D dar. Die Arbeiten umfassten im Wesentlichen die Mitarbeit in versuchsbegleitenden Arbeitsgruppen und die Nachrechnung von Sicherheitsexperimenten.

Bei der Validierung von ATHLET anhand eines UPTF-Einzeleffekttests zur Gegenströmung im Ringraum und von PKL III E-Integralversuchen zu Störfällen mit kleinem Leck im kalten oder heißen Strang mit Deborierungs- und Borvermischungsproblematik und zum ¾-Loop Betrieb mit geschlossenem Primärkreislauf wurden das Thermofluiddynamik-Modell mit 6 Grundgleichungen, die Modelle zur Simulation der Dampfkondensation im unterkühlten Wasser in Abhängigkeit von der Strömungsform, die Modelle zur Simulation der Vorgänge bei Notkühlwassereinspeisung in die heißen und kalten Stränge (Kondensation am Einspeisestrahl in Abhängigkeit von der Einspeisegeometrie, Impulseintrag, Strömungsverteilung bei Hutzeneinspeisung), die Modelle zur Simulation der Dampfkondensation in vertikalen Dampferzeugerrohren bei "Reflux Condenser"-Betrieb und die Modelle zur Berücksichtigung des Einflusses nichtkondensierbarer Gase überprüft. Das bisher noch nicht validierte Bortransportmodell konnte aufgrund des seit dem Beginn der PKL III E-Versuche verfügbaren kontinuierlichen Bormessverfahrens COMBO erstmals anhand von Messungen überprüft werden.

Bei der Validierung des neuen ATHLET-Moduls FLUBOX 2D/3D anhand von UPTF-TRAM-C-Einzeleffektversuchen zur Mischung von unterschiedlich borierten bzw. temperierten Wassermassenströmen im Downcomer und im kalten Strang mit Notkühleinspeisung wurden die 3D-Modelle zur Simulation mehrdimensionaler Strömungsvorgänge überprüft.

Durch die Validierungsrechnungen wurden Stärken und Schwächen der genannten Modelle erkannt. Durch den engen Kontakt zu den Entwicklern wurde und wird dafür gesorgt, dass die im Validierungsvorhaben RS 1155 festgestellten Code-Schwächen bei der weiteren Programmverbesserung und -entwicklung berücksichtigt werden.

Abstract

Within the reactor safety project RS 1155, sponsored by the German Federal Ministry of Economy, analyses of international integral-effects and separate effects tests for the validation of the code system ATHLET/ATHLET-CD have been performed. This volume of the final report represents the status of validation of the ATHLET-code and the ATHLET-module FLUBOX 2D/3D. The work mainly comprised the contributions to working groups accompanying the experimental programs and the performance of post-test analyses of safety experiments.

For the validation of ATHLET a UPTF-separate effects test for counter current flow in the downcomer and integral tests out of PKL III E test program for LOCAs with a small cold or hot leg leak with deboration and boron mixing effects were analysed to assess the models for themo-fluiddynamics based on 6 conservation laws, condensation in subcooled water bulk depending on flow regimes, simulation of phenomena during ECC- water injection into the hot or cold legs (condensation on the surface of a cold water jet depending on injection geometry, momentum feed, flow distribution during scoop injection), steam condensation in vertical steam generator tubes during "reflux condenser" operation and the models simulating the influence of non-condensable gases. The boron tracking model could be controlled for the first time, because since the beginning of the PKL III E-project continuous boron measurements (COMBO-measuring system) have been provided.

For the validation of the ATHLET-module FLUBOX 2D/3D separate effects tests out of the UPTF-TRAM C test program for mixing of differently borated or tempered water flows in the downcomer and in the cold leg nozzle with cold water injection were analysed to assess the 3D-models for the simulation of multidimensional flow conditions.,

Resulting from the validation analyses the essential strengths and weaknesses of the mentioned models were identified. The close contact to the code developers assures that the code weaknesses, realized in the validation project RS 1155, are considered in the further code improvement and development.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung I

Abstract II

Inhaltsverzeichnis III

Tabellenverzeichnis VI

Bildverzeichnis VIII

1 Zielsetzung des Vorhabens RS1155 1

2 Anlagen und Versuchsprogramme zur Untersuchung von Störfallabläufen ohne Kernschäden 4

2.1 PKL III 4

2.2 UPTF TRAM 12

2.3 ROSA/LSTF 16

3 Beschreibung des Rechenprogramms ATHLET einschließlich des Moduls FLUBOX 2D/3D und typischer Nodalisierungsmodelle 22

3.1 Programmstruktur und Modelle des Rechenprogramms ATHLET 23

3.1.1 Thermofluiddynamik 23

3.1.1.1 Netzwerkbausteine 23

3.1.1.2 Grundgleichungssystem 24

3.1.1.3 Schließungsgleichungen 24

3.1.1.4 Lösungsverfahren 25

3.1.2 Wärmeübertragung/Wärmeleitung 26

3.1.3 Neutronenkinetik 27

3.1.4 Steuerung und Regelung 27

3.1.5 Komponentenmodelle 28

3.2 Besonderheiten von ATHLET 28

3.2.1 Gemischspiegelsimulation 28

3.2.2 Ausströmmodell ... 28
3.2.3 EIMMB (Extended Integrated Mass and Momentum Balance) ... 29
3.2.4 Startrechnung ... 29
3.2.5 Visualisierung und Interaktivität ... 29
3.3 ATHLET-Modul FLUBOX 2D/3D ... 30
3.4 Ausgewählte Nodalisierungs- und Diskretisierungsmodelle für die Validierungsrechnungen in der GRS ... 30
3.4.1 PKL III-Nodalisierungsmodell für Validierungsrechnungen mit ATHLET .. 30
3.4.2 FLUBOX-3D Diskretisierungsmodell für Validierungsrechnungen zu UPTF-TRAM-Versuchen ... 35
3.4.3 UPTF-Nodalisierungsmodell für die Validierungsrechnung mit ATHLET .. 36

4 Validierung des Rechenprogramms ATHLET und des Moduls FLUBOX-3D im Vorhaben RS1155 ... 39
4.1 Nachrechnung des Integralexperiments PKL III E2.2 mit ATHLET ... 39
4.2 Nachrechnung des Integralexperiments PKL III E3.1 mit ATHLET ... 44
4.2.1 Nachrechnung im Rahmen des OECD/PKL-Benchmark1 ... 45
4.2.2 Nachrechnung im Rahmen des OECD/PKL-Benchmark2 ... 50
4.3 Nachrechnung des Integralexperiments PKL III E2.3 mit ATHLET ... 53
4.4 Nachrechnung des Einzeleffektversuchs UPTF-TRAM C3 mit dem ATHLET-Modul FLUBOX-3D ... 58
4.5 Nachrechnung des Einzeleffektversuchs UPTF-TRAM C1 mit dem ATHLET-Modul FLUBOX-3D ... 61
4.6 Nachrechnung des Einzeleffektversuchs UPTF 7 mit ATHLET ... 64

5 Fortschreibung der ATHLET-Validierungsmatrizen für Störfälle ohne Kernschäden ... 71

6 Zusammenfassung und erzielte Ergebnisse ... 73

7 Literatur ... 80

8 Abkürzungen ... 90

9 Tabellen ... 93

10 Bilder 120

11 Verteiler 177

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1-1 PKL III E-Versuche 93

Tabelle 2.1-2a Durchgeführte und geplante Versuche im Vorhaben PKL III F (Laufzeit: 04/2003 – 03/2007) 94

Tabelle 2.1-2b Durchgeführte und geplante Versuche im Vorhaben PKL III F (Laufzeit: 04/2003 – 03/2007) 95

Tabelle 2.1-2c Durchgeführte und geplante Versuche im Vorhaben PKL III F (Laufzeit: 04/2003 – 03/2007) 96

Tabelle 2.3-1 Versuche im OECD/NEA ROSA Project (laufend 2005 - 2009) 97

Tabelle 4.6-1 Randbedingungen für UPTF Test Nr. 7 (Run 200, Run 201, Run 202, Run 203) 98

Tabelle 4.6-2 NKW-Massenstrom ins untere Plenum (Run 200) 99

Tabelle 4.6-3 NKW-Massenstrom ins untere Plenum (Run 201) 100

Tabelle 4.6-4 NKW-Massenstrom ins untere Plenum (Run 202) 100

Tabelle 4.6-5 NKW-Massenstrom ins untere Plenum (Run 203) 101

Tabelle 5-1 Matrix I: Große Brüche in Druckwasserreaktoren 102

Tabelle 5-2 Matrix II: Kleine und mittlere Brüche in Druckwasserreaktoren 103

Tabelle 5-2 Matrix II: Kleine und mittlere Brüche in Druckwasserreaktoren (Fortsetzung 1) 104

Tabelle 5-3 Matrix IIa: Kleines, mittleres und großes Leck in WWER-Druckwasserreaktoren mit horizontalen Dampferzeugern 105

Tabelle 5-3 Matrix IIa: Kleines, mittleres und großes Leck in WWER-Druckwasserreaktoren mit horizontalen Dampferzeugern (Fortsetzung 1) 106

Tabelle 5-4 Matrix III: Kleine und mittlere Brüche in Druckwasserreaktoren mit Geradrohr-Dampferzeugern 106

Tabelle 5-5 Matrix IV: Transienten in Druckwasserreaktoren 107

Tabelle 5-6 Matrix IVa: Transienten in WWER-Druckwasserreaktoren mit horizontalen Dampferzeugern 108

Tabelle 5-7 Matrix V: Transienten unter Nachkühlbedingungen in Druckwasserreaktoren 108

Tabelle 5-8 Matrix Va: Transienten unter Nachkühlbedingungen in WWER-Druckwasserreaktoren mit horizontalen Dampferzeugern 109

Tabelle 5-9 Matrix VI: Maßnahmen zum anlageninternen Notfallschutz in Druckwasserreaktoren 109

Tabelle 5-9 Matrix VI: Maßnahmen zum anlageninternen Notfallschutz in Druckwasserreaktoren (Fortsetzung) 110

Tabelle 5-10 Matrix VIa: Maßnahmen zum anlageninternen Notfallschutz in WWER-Druckwasserreaktoren mit horizontalen Dampferzeugern 110

Tabelle 5-11 Matrix VII: Kühlmittelverluststörfälle in Siedewasserreaktoren 111

Tabelle 5-12 Matrix VIII: Transienten in Siedewasserreaktoren 111

Tabelle 5-13 Einzeleffektexperimente 112

Tabelle 5-14 Stand der ATHLET-Validierung entsprechend den Validierungs-matrizen für Anlagen westlicher Bauart (Integralexperimente, aufgetretene Anlagentransienten) 117

Tabelle 5-15 Stand der ATHLET-Validierung entsprechend den Validierungs-matrizen für Anlagen russischer Bauart (Integralexperimente, aufgetretene Anlagentransienten) 118

Tabelle 5-16 Stand der ATHLET-Validierung entsprechend der Validierungs-matrix für Einzeleffektversuche 119

Bildverzeichnis

Bild 2.1-1	PKL III-Versuchsanlage	120
Bild 2.1-2	Höhenverhältnisse in der PKL III-Versuchsanlage	121
Bild 2.1-3	Loopanordnung der PKL III-Versuchsanlage	122
Bild 2.1-4	Heizstabbündel der PKL III-Versuchsanlage	123
Bild 2.1-5	Heißer Strang der PKL III-Versuchsanlage mit DE-Ein- und Austritt (ab Juni 1990)	124
Bild 2.1-6	DH-Ventilstation der PKL III-Versuchsanlage	125
Bild 2.1-7	Bormessungen im PKL-Primärkreis beim Versuch PKL III E3.1	126
Bild 2.2-1	UPTF-Primärkreislauf mit Sicherheitsbehälter	127
Bild 2.2-2	UPTF: Loopabwicklung und Versuchsbehälter mit Hauptabmessungen	128
Bild 2.2-3	Querschnitt des UPTF-Versuchsbehälters mit Kernsimulator-Einspeisezonen	129
Bild 2.2-4	UPTF TRAM: Druckhalter und Volumenausgleichsleitung (Surge Line)	130
Bild 2.2-5	Systemschaltplan mit versuchsspezifischen Anfangs und Randbedingungen (UPTF TRAM C3)	131
Bild 2.2-6	UPTF-Einspeisegeometrie am Ringraum	132
Bild 2.2-7	UPTF-Notkühlwasser-Einspeisegeometrie kalter Strang	133
Bild 2.3-1	Schematische Darstellung der Versuchsanlage ROSA IV/LSTF	134
Bild 3.4.1-1	Nodalisierungsmodell des Stabbündelbehälters der Versuchsanlage PKL III (PKL III E2.2)	135
Bild 3.4.1-2	Objektschema und Nodalisierung Rückströmraum (PKL III E2.2)	136
Bild 3.4.1-3	Nodalisierungsmodell des Loops 1 der Versuchsanlage PKL III (PKL III E2.2)	137
Bild 3.4.1-4	Nodalisierungsmodell des Loops 2 der Versuchsanlage PKL III (PKL III E2.2)	138
Bild 3.4.1-5	Nodalisierungsmodell des Loops 3 der Versuchsanlage PKL III (PKL III E2.2)	139
Bild 3.4.1-6	Nodalisierungsmodell des Loops 4 der Versuchsanlage PKL III (PKL III E2.2)	140
Bild 3.4.2-1	Längsschnitt durch das Diskretisierungsmodell des Druckbehälters	

(UPTF-TRAM C3) 141

Bild 3.4.2-2 Querschnitt durch das Diskretisierungsmodell des Druckbehälters (UPTF-TRAM C3) 142

Bild 3.4.3-1 Nodalisierungsschema Eingabedatensatz (ohne vollständige heiße Stränge) 143

Bild 3.4.3-2 Nodalisierungsschema Kern und oberes Plenum 144

Bild 3.4.3-3 Nodalisierungsschema Downcomer mit kaltem Strang 145

Bild 3.4.3-4 Schematische Darstellung der Nodalisierung im Ringraum (Downcomer) mit Anbindung der kalten Stränge 146

Bild 3.4.3-5 Schematische Darstellung der Nodalisierung des unteren Plenums ... 147

Bild 3.4.3-6 Nodalisierungsschema kalter und heißer intakter Strang (kalter Strang versetzt gezeichnet) 148

Bild 3.4.3-7 Nodalisierungsschema kalter und heißer gebrochener Strang (kalter Strang versetzt gezeichnet) 149

Bild 4.1-1 Primär- und Sekundärdrücke (PKL III E2.2) 150

Bild 4.1-2 Kollabierte Füllstände im Stabbündelbehälter (PKL III E2.2) 150

Bild 4.1-4 Kollabierte Füllstände in HS1 vertikal und DE1-Eintritt sowie im mittleren DE1-U-Rohr (PKL III E2.2) 151

Bild 4.1-5 Kollabierte Füllstände in HS3 vertikal und DE3-Eintritt sowie im mittleren DE3-U-Rohr (PKL III E2.2) 152

Bild 4.1-6 Fluidtemperaturen am Beginn der beheizten Kernlänge und oberhalb der BE-Kopfplatte (PKL III E2.2) 152

Bild 4.1-7 Massenstrom im DE-seitigen Bereich des Pumpenbogens 3 (PKL III E2.2) 153

Bild 4.1-9 Borgehalt im kalten Strang 3 vor Ringraum (PKL III E2.2) 154

Bild 4.1-10 Borgehalt im kalten Strang 4 vor Ringraum (PKL III E2.2) 154

Bild 4.2-1 Primär- und Sekundärdrücke 155

Bild 4.2-2 Kollabierte Füllstände im Stabbündelbehälter (PKL III E3.1) 155

Bild 4.2-3 Kollabierter Füllstand im Druckhalter (PKL III E3.1) 156

Bild 4.2-4 Kollabierte Füllstände in HS1 vertikal und DE1-Eintritt sowie im kurzen DE1-U-Rohrbündel (PKL III E3.1) 156

Bild 4.2-5 Kollabierte Füllstände im Pumpenbogen von CL1 (PKL III E3.1) 157

Bild 4.2-6 Fluidtemperaturen im Ein- und Austritt des Kerns (PKL III E3.1) 157

Bild 4.2-7 Fluidtemperaturen in den Volumen 2, 4 im unteren DH-Bereich (PKL III E3.1) 158

Bild 4.2-8	Fluidtemperaturen im Steigraum von DE1 (PKL III E3.1)	158
Bild 4.2-9	Fluidtemperaturen im Steigraum von DE2 (PKL III E3.1)	159
Bild 4.2-10	Borkonzentrationen im Pumpenbogen 1 (PKL III E3.1)	159
Bild 4.2-11	Primärdrücke (Benchmark1/2, PKL III E3.1)	160
Bild 4.2-12	DE2-Sekundärdrücke (Benchmark1/2, PKL III E3.1)	160
Bild 4.2-13	Füllstände im Druckhalter (Benchmark1/2, PKL III E3.1)	161
Bild 4.2-14	Füllstände im kurzen, aufsteigenden DE1-U-Rohr (Benchmark1/2, PKL III E3.1)	161
Bild 4.2-15	Borkonzentrationen im Pumpenbogen 1 (Benchmark1/2, PKL III E3.1)	162
Bild 4.3-1	Primär- und Sekundärdrücke (PKL III E2.3)	162
Bild 4.3-2	Kollabierte Füllstände im Stabbündelbehälter (PKL III E2.3)	163
Bild 4.3-3	Kollabierter Füllstand im Druckhalter (PKL III E2.3)	163
Bild 4.3-4	Kollabierte Füllstände im Pumpenbogen 2 (PKL III E2.3)	164
Bild 4.3-5	Kollabierte Füllstände in HS2 vertikal und DE2-Eintritt sowie im kurzen DE2-U-Rohr (PKL III E2.3)	164
Bild 4.3-6	Fluidtemperaturen am Beginn der beheizten Kernlänge und oberhalb der BE-Kopfplatte (PKL III E2.3)	165
Bild 4.3-7	Massenstrom im DE-seitigen Bereich des Pumpenbogens 1 (PKL III E2.3)	165
Bild 4.3-8	Massenstrom im DE-seitigen Bereich des Pumpenbogens 2 (PKL III E2.3)	166
Bild 4.3-9	Massenstrom im DE-seitigen Bereich des Pumpenbogens 3 (PKL III E2.3)	166
Bild 4.3-10	Massenstrom im DE-seitigen Bereich des Pumpenbogens 4 (PKL III E2.3)	167
Bild 4.3-11	Borkonzentration im DE-seitigen Bereich des Pumpenbogens 2 und im kalten Strang 2 vor Ringraum (PKL III E2.3)	167
Bild 4.3-12	Borkonzentration im DE-seitigen Bereich des Pumpenbogens 4 und im kalten Strang 4 vor Ringraum (PKL III E2.3)	168
Bild 4.4-1	Kaltwassersträhne im abgewickelten Ringraum (UPTF-TRAM C3)	169
Bild 4.4-2	Gemessene und ohne Turbulenzmodell berechnete (durchgezogene Linien) Temperaturverteilung im Ringraum unterhalb des Kaltstrangs CL3 (UPTF-TRAM C3).	170
Bild 4.4-3	Gemessene und mit Turbulenzmodell berechnete (durchgezogene Linien) Temperaturverteilung im Ringraum unterhalb des Kaltstrangs CL3 (UPTF-TRAM C3).	170

Bild 4.4-4 Gemessene und mit Turbulenzmodell berechnete (durchgezogene Linien) Temperaturverteilung im unteren Plenum (UPTF-TRAM C3). 171

Bild 4.5-1 Diskretisierung der Ersatzrohrgeometrie für die Nachrechnung des Versuchs UPTF-TRAM C1 171

Bild 4.5-2 Bilanzraum im Kaltstrang zwischen den Positionen 1 und 2 (UPTF-TRAM C1) 172

Bild 4.5-3 Messstellen in der Messlanze 3 (UPTF-TRAM C1) 172

Bild 4.5-4 Simulation (durchgezogene Linien) der Mischtemperaturen mit FLUBOX ohne Turbulenzmodell (UPTF-TRAM C1) 173

Bild 4.5-5 Simulation (durchgezogene Linien) der Mischtemperaturen mit FLUBOX mit Turbulenzmodell (UPTF-TRAM C1) 173

Bild 4.6-1 Absolutdruck im Ringraum oberhalb der Anschlussstutzen (Run 200) 174

Bild 4.6-2 Absolutdruck im Ringraum oberhalb der Anschlussstutzen (Run 201) 174

Bild 4.6-3 Absolutdruck im Ringraum oberhalb der Anschlussstutzen (Run 202) 175

Bild 4.6-4 Absolutdruck im Ringraum oberhalb der Anschlussstutzen (Run 203) 175

1 Zielsetzung des Vorhabens RS 1155

Das abgeschlossene Vorhaben RS 1155 war Teil des Forschungsprogramms Reaktorsicherheit des Bundesministers für Wirtschaft und Technologie (BMWi) in dessen Rahmen experimentelle und analytische Forschungsvorhaben zu Kühlmittelverlust- und Transientenstörfällen bei Leichtwasserreaktoren durchgeführt werden. Das zu untersuchende Störfallspektrum enthält Störfälle im Auslegungsbereich, im auslegungsüberschreitenden Bereich sowie Unfallabläufe mit schweren Kernschäden.

Das Vorhaben RS 1155 stand im engen Zusammenhang mit den zeitlich leicht versetzten Vorhaben RS 1126 und RS 1162 zur Weiterentwicklung des Rechenprogrammsystems ATHLET/AHLET-CD sowie RS 1141 und RS 1161 zur Weiterentwicklung des ATHLET-Moduls FLUBOX 2D/3D.

Das übergeordnete Ziel des Vorhabens RS 1155 war die Erhöhung des Standes der Validierung und damit der Aussagesicherheit des Rechenprogrammsystems ATHLET/ATHLET-CD.

Die spezielle Zielsetzung der ATHLET-Validierung war, den Validierungsstand von ATHLET im Hinblick auf Störfälle aus dem erweiterten Anwendungsspektrum sowie auf weiterentwickelte und neue Modelle zu erhöhen, d. h.:

- Störfälle bei Nichtleistungsbetrieb mit Stickstoffgas oberhalb des Wasserspiegels (erweitertes Anwendungsspektrum),
- Störfälle mit Deborierungs- und Borvermischungsproblematik im Reaktorkühlsystem (erweitertes Anwendungsspektrum),
- das Thermofluiddynamik-Modell auf der Basis von 6 Grundgleichungen (6-Gleichungsmodel) und weitere damit verbundene Modelle (Zwischenphasenreibung in normalen Strömungskanälen und im Ringraum, Dampfkondensation im unterkühlten Wasser in Abhängigkeit von der Strömungsform, Kondensation am Kaltwasser-Einspeisestrahl in Abhängigkeit von der Einspeisegeometrie, Impulseintrag durch Kaltwasser-Einspeisestrahl, Strömungsverteilung bei Hutzeneinspeisung, Dampfkondensation in vertikalen Dampferzeuger-Rohren bei "Reflux Condenser"-Betrieb u.a.),

- die Modelle zur Berücksichtigung des Einflusses nicht-kondensierbarer Gase auf Strömung und Wärmeübergang,
- das bisher noch nicht validierte Bortransportmodell,
- und die 3D-Modelle im neuen ATHLET-Modul FLUBOX 2D/3D zur Simulation mehrdimensionaler Strömungsvorgänge.

Zur Validierung des Rechenprogramms ATHLET wurden im Vorhaben RS 1155 Integralexperimente aus dem Vorhaben PKL III E und ein Einzeleffektversuch aus dem Vorhaben UPTF nachgerechnet und zur Validierung des ATHLET-Moduls FLUBOX 2D/3D Einzeleffektversuche aus dem Vorhaben UPTF-TRAM.

Die spezielle Zielsetzung der ATHLET-CD Validierung war, den Validierungsstand von ATHLET-CD im Hinblick auf Störfälle aus dem erweiterten Anwendungsspektrum sowie auf weiterentwickelte und neue Modelle zu erhöhen, d. h.:

- Simulation der Unfallabläufe bei DWR, WWER und SWR von der frühen bis zur späten Phase der Kernzerstörung (erweitertes Anwendungsspektrum),
- verbesserte Modelle zur Simulation des Temperaturverhaltens, der Oxidation und Wasserstofferzeugung sowie der Bildung von metallischer und keramischer Brennstabschmelze,
- verbesserte Modelle zur Schmelzeverlagerung bis in den unteren Kernbereich mit Erstarren der Schmelze und Bildung von Strömungsblockaden,
- verbesserte Modelle zur Simulation der Freisetzung, des Transports und der Ablagerung von Spaltprodukten und Aerosolen,
- neue Modelle zur B_4C-Oxidation und B_4C-SS Wechselwirkung (Absorberstab) sowie zur Zr-Oxidation bei Lufteinbruch,
- Simulation der Strömungsvorgänge mit 6-Gleichungsmodell (bisher 5-Gleichungsmodell).

Zur Validierung des Rechenprogramms ATHLET-CD wurden im Rahmen des Vorhabens RS 1155 Bündelversuche aus den Versuchsprogrammen NRU FLHT, PBF SFD, PHEBUS FP, PHEBUS SFD, und QUENCH sowie Einzelstabversuche (Einzeleffektversuche) aus den Halden-Experimenten IFA650 nachgerechnet. Ferner wurde noch die erste doppelt-blinde Vorausrechnung zum als Benchmark

spezifizierten, russischen Experiment PARAMETER-SF1 durchgeführt. Die vom Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiewirtschaft (LEE) der Ruhr-Universität Bochum im Rahmen anderer Versuchsvorhaben durchgeführten Validierungsrechnungen zu den Versuchen QUENCH-03, 07, 08, PHEBUS-FPT2, FPT4 und LOFT-FP-2 sowie zum Reaktorunfall TMI-2 wurden von der GRS fachlich betreut.

Ein weiteres wichtiges Arbeitsziel des Vorhabens RS 1155 war die Mitarbeit in den versuchsbegleitenden Arbeitsgruppen zum "OECD/PKL"- und zum neuen "OECD ROSA Thermal-Hydraulic"-Projekt, zum PKL III E/F-Vorhaben bei Framatome, zum PHEBUS-Versuchsprogramm und zu den QUENCH-Experimenten bei FZK. Weiterhin erfolgte im Rahmen des Arbeitspunkts die Fortschreibung der ATHLET- und ATHLET-CD Validierungsmatrizen und die Mitarbeit in Programme Review Groups der OECD/NEA sowie in Arbeitsgruppen des "EC-SARNET" (Network of Excellence for a Sustainable Integration of European Research on Severe Accident Phenomenology).

Der überwiegende Teil der durchgeführten Arbeiten und erzielten Ergebnisse zur Validierung von ATHLET und des ATHLET-Moduls FLUBOX 2D/3D wurde in den GRS-A-Berichten /GRA 06a, GRA 06b, RIN 04, STE 04, STE 05c, STE 06a, WIE 06/ dokumentiert und zur ATHLET-CD-Validierung in /STE 05a, BAL 06, ERD 05a, ERD 05b, ERD 05c, ERD 05d, ERD 06a, ERD 06b, ERD 06c, ERD 06e, ERD 06f, TRA 05/. Hinzu kommen die Beiträge für internationale Workshops /BUR 03, ERD 04, ERD 06d, STE 03a, STE 05b, STE 06b/.

Der Abschlussbericht zum Vorhaben RS 1155 besteht aus zwei Teilberichten. Der vorliegende Teil 1 des Abschlussberichts enthält im Hinblick auf die Validierung von ATHLET und den ATHLET-Modul FLUBOX 2D/3D eine Zusammenfassung der durchgeführten wesentlichen Arbeiten und erzielten Ergebnisse. In Teil 2 des Abschlussberichts sind die im Hinblick auf die Validierung von ATHLET-CD durchgeführten wesentlichen Arbeiten und erzielten Ergebnisse zusammengefasst.

2 Anlagen und Versuchsprogramme zur Untersuchung von Störfallabläufen ohne Kernschäden

Kapitel 2 umfasst die Beschreibung der Versuchsanlagen PKL III, UPTF bzw. UPTF TRAM und OECD/ROSA mit den dazugehörigen Versuchsprogrammen, aus denen im Rahmen des Vorhabens RS 1155 von der GRS Versuche nachgerechnet wurden oder zu denen im Rahmen der Mitarbeit in versuchsbegleitenden Arbeitsgruppen beigetragen wurde.

2.1 PKL III

Der Versuchsstand PKL (Primärkreisläufe) wurde 1975 in Erlangen zur Untersuchung von Kühlmittelverluststörfällen mit großen Lecks (Auslegungsstörfälle) im Primärkreis von Druckwasserreaktoren als 3-Loop-Anlage (2 Einzelloops, 1 Doppelloop) errichtet. Nach der Beendigung der Versuchsserien PKL I (Wiederauffüll- und Flutversuche, Versuche zur Problematik kleine Lecks, Blowdown-Endphase) und PKL II (Störfallabläufe bei großen Lecks ab Druckspeichereinspeisung) wurde der Versuchsstand von 1986 bis 87 zur Durchführung der PKL III-Versuchsserien grundlegend erweitert.

Die wesentlichen Veränderungen der Versuchsanlage betrafen die Erweiterung der Anlage auf vier nahezu identische Kreisläufe mit aktiven Pumpen im Primärkreis, die Veränderung der Konstruktion des Ringraumes, die Erweiterung des Notkühlsystems, die Erweiterung des Speisewasser- und Frischdampfsystems sowie die Einführung verschiedener primär- und sekundärseitiger Regelungssysteme (z. B. Volumenregelsystem, Druckhalterregelsystem, sekundärseitge Füllstandsregelung).

Während in den Versuchsprogrammen PKL I und II im wesentlichen Kühlmittelverluststörfälle im Auslegungsbereich mit dazugehörigen Parameterstudien untersucht worden waren /HIC 85/, bezogen sich die mit PKL III A, B, C, D, E und F zu untersuchenden Szenarien auf:

- PKL III A: Abfahrvorgänge nach Betriebsstörungen und Störfällen, d. h. thermo-hydraulische Phänomene bei Naturumlauf, Simulation von BHB-Abfahrprozeduren beim Notstromfall, bei kleinen Lecks und beim Heizrohrbruch (Versuchsmatrix: Tabelle 2.1.6-1 in /KIR 94/).

- PKL III B: Erprobung von AM-Maßnahmen, d. h. Maßnahmen der primärseitigen bzw. sekundärseitigen Druckentlastung und Bespeisung beim Ausfall der Speisewasserversorgung und beim totalen Ausfall der elektrischen Wechselstromversorgung (Versuchsmatrix: Tabelle 2.1.6-2 in /KIR 94/).

- PKL III C: Vertiefte Untersuchung von AM-Maßnahmen bei auslegungsüberschreitenden Störfällen, d. h. Maßnahmen beim Ausfall der Speisewasserversorgung mit unsymmetrischen Bedingungen, bei kleinen Lecks und beim Heizrohrbruch (Versuchsmatrix: Tabelle 2.1.6-3 in /KIR 94/).

PKL III D: Erweiterung des Störfallspektrums und der zu untersuchenden Notfallmaßnahmen sowie Einbeziehung neuer Untersuchungsziele, d. h. sekundärseitige Druckentlastung und Bespeisung bei Ausfall der Speise-wasserversorgung und bei kleinem Leck mit Ausfall des 100 K/h-Abfahrens sowie der SEPs, Beitrag zum Mixingverhalten: Anlaufen des Naturumlaufs bei Primärleck nach Auffüllen des Primärkreislaufes mit kaltseitiger Einspeisung, AM-Maßnahrmen bei kleinem Primärleck und gleichzeitigem Versagen der SEPs und des 100 K/h-Abfahrens, AM-Maßnahmen bei Ausfall des Nachkühlsystems im Mitte-Loop-Betrieb, Optimierung von Fahrweisen bei DE-Heizrohrleck im Notstromfall, primärseitige Druckentlastung und Bespeisung bei Station Blackout, Kondensataufstau bei Reflux-Condenser-Bedingungen und Anlagenverhalten bei Anwesenheit von Wasserstoff. Nach der Erweiterung des finanziellen Spielraums durch den Beitritt der Betreiber der Kernkraftwerke Gösgen (Schweiz) und Trillo (Spanien) konnte die PKL III D-Versuchsmatrix um den Versuch PKL III D2.2 ergänzt werden (Versuchsmatrix: Tabelle 2.1-1 in /STE 03b/). Eine vollständige Liste der in den Vorhaben PKL III A, B, C und D durchgeführten Experimente ist in /ADD 02b/ enthalten.

- PKL III E: Das Versuchsvorhaben PKL III E ist durch experimentelle Untersuchungen zur Borthematik (Anlaufen von Naturumlauf und Verlagerung von minderborierten Wasserpfropfen in den RDB bei kleinen Lecks) und zu Störfällen bei abgeschalteter Anlage (Ausfall Nachkühlung im ¾-Loop-Betrieb) gekennzeichnet, wobei erstmals boriertes Wasser verwendet und der Borgehalt mit entsprechenden Messverfahren bestimmt wurde. Die Versuchsmatrix zu PKL III E ist aus Tabelle 2.1-1 ersichtlich. Die Versuchsspezifikation und die Ergebnisse der PKL III E-Versuche wurden nach der Einbeziehung des PKL III E-Projekts in das OECD/CSNI Thermohydraulics Project (PKL- und PANDA-Versuche) sowohl in den Meetings der AG PKL III als auch der "SETH

Programme Review Group" diskutiert. Der Abschlussbericht zum PKL III E-Projekt /MUL 04/ wurde im Rahmen der "OECD-NEA SETH Programme Review Group" diskutiert. Verbesserungsvorschläge der GRS wurden berücksichtigt.

- PKL III F: Das teils als OECD/CSNI-Projekt und teils als Framatome Projekt mit Beteiligung des BMWi und deutschen und schweizer Betreibern laufende Versuchsvorhaben PKL III F ist ebenfalls durch experimentelle Untersuchungen zur Borthematik (Anlaufen von Naturumlauf und Verlagerung von minderborierten Wasserpfropfen in den RDB bei kleinen Lecks) und zu Störfällen bei abgeschalteter Anlage (Ausfall Nachkühlung im ¾-Loop-Betrieb mit geschlossenem und offenem Primärkreis) gekennzeichnet. Die Versuchsmatrix zum PKL III F-Versuchsvorhaben ist aus Tabelle 2.1-2a, Tabelle 2.1-2b und Tabelle 2.1-2c ersichtlich. Die noch nicht durchgeführten Versuche des PKL III F-Projekts werden von der "SETH Programme Review Group" und der AG PKL III erst spezifiziert, wobei die Ergebnisse der bereits durchgeführten Versuche berücksichtigt werden.

Die Versuchsanlage PKL III (Bild 2.1-1) simuliert die gesamte Primär- und die wesentlichen Teile der Sekundärseite eines 1300 MW_{el} Druckwasserreaktors (Referenzanlage: Philippsburg 2) im Volumen- bzw. Leistungsmaßstab 1:145. Die Nachbildung der geodätischen Höhen (Bild 2.1-2) und soweit wie möglich auch der einphasigen Druckverluste erfolgt im Maßstab 1:1. Der Kern und die Dampferzeuger (DE) werden mit den zur Referenzanlage identischen Abmessungen für die Brennstäbe und DE-U-Rohre, Abstandhalter und Wärmekapazitäten als Ausschnitte nachgebildet. Aufgrund des geringen Betriebsdrucks des PKL-Primärkreises von 45 bar ergibt sich hinsichtlich des Verhältnisses von Strukturmasse zu Fluidmasse eine relativ gute Nachbildung. Die Nachbildung von Phänomenen wurde gegenüber der geometrischen Nachbildung bevorzugt. Aufgrund des niedrigen Betriebsdrucks ergeben sich aber für die Übertragbarkeit von Vorgängen, die in der Reaktoranlage bei einem höheren Druck ablaufen, Einschränkungen. Die quantitative Übertragung erfolgt in diesen Fällen über ein validiertes Rechenprogramm oder auch durch den Vergleich mit Versuchsergebnissen aus anderen Versuchsanlagen mit Originaldruck.

Der PKL III-Versuchsstand besteht aus den mit Wärmeschutzmatten isolierten Komponenten der Primär- und Sekundärseite und der Anschlusssysteme (siehe Bild 2.1-1 bis Bild 2.1-6).

Zu den Primärkreiskomponenten gehören der Reaktordruckbehälter (RDB) mit dem elektrisch beheizten Kern (Bild 2.1-4), die vier symmetrisch an den RDB anschließenden Loops mit den Hauptkühlmittelpumpen (HKMP) und den Dampferzeugern (DE) sowie der über die Volumenausgleichsleitung (Surgeline) an den heißen Strang von Loop 2 (Bild 2.1-3) gekoppelte Druckhalter (DH) mit DH-Ventilstation (Bild 2.1-6).

Der RDB mit einem zulässigen Betriebsdruck von 45 bar besitzt einen Downcomer, der im oberen Bereich zur Einbindung der vier kalten Stränge als Ringraum ausgebildet ist, und im mittleren und unteren Bereich zur Nachbildung der Strömungsdruckverluste aus zwei außen liegenden Rohren besteht. Der in drei radiale Leistungszonen aufgeteilte Kern besteht aus 314 elektrisch beheizten und 26 unbeheizten Stäben mit einer Gesamtleistung von 2,5 MW (Bild 2.1-4). Dies entspricht einer skalierten Leistung von 10 %. Der zeitliche Leistungsverlauf kann als Regelgröße vorgegeben werden. Die Wärmeverluste im Primärkreislauf werden bei PKL teilweise durch eine Anhebung der Bündelleistung kompensiert und die Wärmeverluste des Deckelraums mit einer elektrischen Stützheizung.

Bei den heißen Strängen musste im Verlaufe des PKL III B Programms (Juni 1990) von der Volumenskalierung 1:145 abgewichen werden, um die Gegenströmungsbegrenzung (CCFL) reaktortypischer simulieren zu können. Die heißen Stränge wurden erweitert und 50°-Krümmer und neue Dampferzeuger-Eintrittskammern eingebaut. So tritt bei Störfällen mit Reflux-Condenser-Betrieb und Gegenströmung im heißen Strang im Druckwasserreaktor bei einer Nachzerfallsleistung >6 % ein Wasseraufstau auf. In der PKL III-Anlage trat dieses Phänomen vor dem Umbau wegen des ungünstigen l/D-Verhältnisses und der 90°-Krümmer bereits bei kleineren Leistungen auf. Die Durchmesser der Anschlüsse am Stabbündelbehälter mussten aus konstruktiven Gründen beibehalten werden (Bild 2.1-5). Die Hauptkühlmittelpumpen (HKMP) in den vier Loops sind als aktive Komponenten ausgebildet, wobei sowohl der skalierte Massenstrom als auch das zeitliche Auslaufverhalten mittels geregelter Drehstrommotoren simuliert werden kann. Der Strömungswiderstand der stehenden HKMPs wird wegen des wesentlich kleineren Widerstandes einer stehenden PKL-Pumpe mit einer vorgeschalteten Drosselklappe eingestellt. Diese besteht aus einer Lochblende, die nach dem Pumpenstillstand quer zur Strömung gestellt wird. Die Pumpenkühlung wird ebenfalls berücksichtigt.

Der Primärkreisdruck kann über den an den heißen Strang 2 gekoppelten Druckhalter durch Heizen oder Sprühen (betriebliches Sprühen, Hilfssprühen) im vorgegebenen

Regelbereich gehalten werden. Das betriebliche Sprühen erfolgt mit Wasser aus den kalten Strängen und das Hilfssprühen mit Wasser aus dem Volumenregelsystem (KBA). Die DH-Heizung ist an der PKL III-Anlage als Bypassheizung ausgeführt, d. h. die elektrische Heizung befindet sich an einer Bypassleitung zum unteren DH-Bereich. Zusätzlich ist der DH mit einer über der Gesamtlänge wirksamen Stützheizung zur Kompensation der Wärmeverluste ausgestattet. Mit der Druckhalter-Ventilstation des PKL-Druckhalters kann sowohl die Druckbegrenzung als auch die Druckentlastung simuliert werden, wobei der Strömungsquerschnitt zur Simulation der hauptsächlich im niedrigen Druckbereich stattfindenden Druckentlastung nur leistungsskaliert ist. Der Strömungsquerschnitt zur Simulation der am Reaktor im hohen Druckbereich stattfindenden Druckbegrenzung ist leistungs- und druckskaliert, da der maximale Betriebsdruck der Primärseite der PKL-Anlage auf 45 bar beschränkt ist.

Für den Wärmetransport von der Primär- zur Sekundärseite sind die vier Dampferzeuger mit je 28 zur Referenzanlage identischen U-Rohren (plus zwei Blindrohren) ausgerüstet. Das sekundärseitige Wasser- und Dampfvolumen ist im U-Rohrbereich und darüber skaliert nachgebildet. Auf den Einbau von Wasserabscheidern (Grob-, Feinabscheider) konnte aufgrund des niedrigen Leistungs- und Geschwindigkeitsbereichs (keine mechanische Separationswirkung) verzichtet werden. Der Abströmwiderstand der Dampfströmung aus dem Dampfraum wird durch eine Lochplatte und einen skalierten Flowlimiter simuliert. Der Downcomer der DEs wird im oberen und unteren Bereich durch einen Ringraum und im mittleren Bereich durch zwei außen liegende Rohre nachgebildet. Im unteren Steigraumbereich der DEs befindet sich zur Kompensation der Wärmeverluste je eine Bypassheizung ähnlich der im DH.

Von den primärseitigen Anschlusssystemen sind an der PKL III-Anlage das Volumenregelsystem (KBA) und das nukleare Nachwärmeabfuhrsystem (JN) nachgebildet, wobei das JN-System aus den Teilsystemen für die Hochdruckeinspeisung (JND), die Druckspeichereinspeisung (JNG), die Niederdruckeinspeisung (JNA) und die Nachwärmeabfuhr (JN(A)) besteht. Im Jahr 1998 wurde die Zahl der Druckspeicher von vier Druckspeichern, die an den jeweiligen heißen oder kalten Strang gekoppelt werden konnten, auf acht Druckspeicher erhöht.

Von den sekundärseitigen Anschlusssystemen werden das über einen Sammler gekoppelte Frischdampfleitungssystem (LBA) mit der Frischdampfumleitstation (FDU), das Speisewasser- (LAB, LABZ) und das Notspeisewassersystem (LAR) sowie das DE-Abschlämmsystem (LCQ) berücksichtigt.

Das bisherige Speisewassersystem (LAB) bildet die Funktion des Systems nach, nicht aber seine Geometrie. Es besteht im Wesentlichen aus einem Speisewassertank, einer Speisewasserpumpe, Regelventilen und den zugehörigen Rohrleitungen. Für alle Versuche, bei denen die Speisewasserpumpen laufen und die Nutzung des Inventars des Speisewassersystems nicht im Vordergrund steht, ist diese Nachbildung ausreichend. Für Störfälle, bei denen die Speisewasserpumpen stehen und das Inventar des Speisewassersystems genutzt werden soll, ist eine genaue Nachbildung der Geometrie und der Druckverluste der Speisewasserleitungen nötig, um die Versuchsergebnisse auf die Referenzanlage übertragen zu können. Daher wurde parallel zum alten Speisewassersystem LAB ein neues mit LABZ bezeichnetes System installiert, das die Geometrie des Speisewassersystems des Kernkraftwerks Philippsburg 2 (KKP-2) im Volumenmaßstab 1:145 nachbildet sowie die Höhenlagen (Bild 2.1-6) und die Reibungsdruckverluste im Maßstab 1:1. Das LABZ-System war bisher nur bei einigen PKL III –Versuchen angekoppelt.

Die PKL III-Anlage war bei den verschiedenen Versuchsserien mit einer umfangreichen Messinstrumentierung ausgerüstet. Bei der Versuchsserie PKL III E setzte sich diese aus der Versuchsinstrumentierung, der KKW-Instrumentierung, der PKL-spezifischen Betriebsinstrumentierung zur Steuerung und Regelung des Versuchsablaufs sowie den Messstellen für Ventilstellungen zusammen. Pro Versuch wurden die Signale von ca. 2760 Messstellen mit einer Abfragefrequenz von maximal 25 Hz auf elektronische Datenträger gespeichert und in physikalische Größen umgerechnet.

Folgende Größen wurden während der Versuche gemessen:

Temperaturen	NiCr-Ni Mantelthermoelemente;Ø 0,5 ./. 1 mm
Fluid und Wand in Primär- und Sekundärkomponenten sowie Anschlusssystemen	Fehler: ± 1,0 ./. ± 1,5 K
Stäbe im Testbündel	Fehler: ± 5,0 K
Fluid im Testbündel	Fehler: ± 2,5 K
Absolutdrücke	Max. Fehler: ± 0,95 % v. E.
Differenzdrücke	Max. Fehler: ± 1,15 % v. E.
Füllstände	über Δp-Messung
oberes Plenum, Deckelraum, DH, DE-Sekundärseite	Fehler: 2 % v. M.
Kernbereich	Fehler bei stehenden HKMP: 2 ./. 10 % v. M. (abhängig von Zweiphasenströmung) Fehler bei laufenden HKMP: bis zu 20 % v. M. (abhängig vom Durchsatz)
Primärkreis, DE-Primärseite	Fehler bei stehenden HKMP: 2 % v. M. Fehler bei laufenden HKMP: nicht als Füllstand interpretierbar
einphasige Massenströme	
Primärkreis hinter DE	Venturidüse; Fehler im kleinen Messbereich: 4 ./. 11 % v. M.; Fehler im großen Messbereich: 5 ./. 10 % v. M.
Downcomer	Miniturbinen; Fehler: 5 % v. M. Full Flow Turbinen; Fehler: 0,2 % v. E.
Surgeline, sekundärseitige Downcomer-Rohre	Full Flow Turbine; Fehler: 0,5 % v. E.
Strömungsgeschwindigkeit	Turbine (Spool Piece); Fehler: ± 1% v. E.
Strömungsimpuls	Prallplatte (Spool Piece); Fehler: 1% v. E.
Fluiddichte	Fe-Strahler (Spool Piece); Fehler: ± 5 % v. M.

Strömungsrichtung im Pumpenbogen	
zweiphasiger Massenstrom	Aus Spool Piece Messungen; Fehler im Dampfgehaltsbereich X < 0,05 und X > 0,7: 5 % v. M. vorwärts und 10 % v. M. rückwärts Fehler im Dampfgehaltsbereich 0,05 < X < 0,7: max. 50 % v. M.
Borgehalt (kontinuierliche Messung)	COMBO (continuous measurement of boron concentration)-Messverfahren Messprinzip: Absorption von Neutronen aus Neutronenquelle durch Bor-Isotop B10. Messung der Strahlungsschwächung mit Zählrohren; Fehler im Borgehalt bei ca. 500 ppm: ± 100 ppm Fehler im Borgehalt bei ca. 2000 ppm: ± 180 ppm
Borgehalt (Probenentnahme)	Titrationsgenauigkeit ca. ± 50 ppm

Durch den Einsatz von nadelförmigen Leitfähigkeitssonden in den vier Frischdampfleitungen und am primärseitigen Leck können qualitative Aussagen hinsichtlich der Strömungsform bzw. des Dampfvolumenanteils gewonnen werden. Dabei bedeutet der Vollausschlag einphasige Dampfströmung und der Nullausschlag einphasige Wasserströmung.

Der Borgehalt in den kalten Strängen wird kontinuierlich mit dem COMBO-Messverfahren (continuous measurement of boron concentration) gemessen. Dieses zur kontinuierlichen Messung des Borgehalts in den kalten Strängen eingesetzte, neue Messverfahren COMBO wird jetzt auch für Druckwasserreaktoren verwendet. Weitere Messpunkte werden durch diskontinuierliche Probenentnahme aus verschiedenen Primärkreisbereichen gewonnen. Entsprechend den speziellen Fragestellungen ist die Lage der Bormessstellen bei den verschiedenen Versuchen nicht identisch. Als Beispiel sind in Bild 2.1-7 die Bormessstellen beim Versuch PKL III E3.1 angegeben.

Mit einem speziellen Instrumenten-Kühlkreislauf wird den heißen Strängen (spool pieces) und dem unteren Plenum Wärme entzogen.

Im Rahmen des aktuellen Vorhabens wurden von der GRS bisher die Versuche PKL III E2.2 und E3.1 sowie die Vortransiente des Versuchs PKL III E2.3 mit der aktuellen ATHLET-Version nachgerechnet (siehe Kap. 4.1, 4.2, 4.3). In den Workshops zum "OECD/PKL-Thermal-Hydraulic"-Projekt und zum OECD/PKL-Benchmark sowie in den Sitzungen der AG PKL III wurde über die Ergebnisse der Nachrechnungen zu PKL III E2.2, E2.3 und E3.1 berichtet.

2.2 UPTF TRAM

Ein wichtiger Teil des internationalen 2D/3D-Forschungsprogramms zur Sicherheit von Druckwasserreaktoren war die Untersuchung der mehrdimensionalen ein- und zweiphasigen Strömungsvorgänge im Primärsystem bei Kühlmittelverluststörfällen an der im Maßstab 1:1 gebauten UPTF-Anlage (Upper Plenum Test Facility).

Die folgenden Dampf/Wasser-Strömungsphänomene wurden untersucht:

- Wassermitriss- und Separationsvorgänge im oberen Plenum,
- Gleich- und Gegenströmungsvorgänge im Bereich der oberen Stabhalteplatte, einschließlich des Wasserdurchbruchs zum Kern,
- Gleich- und Gegenströmungsvorgänge im Rückströmraum bei Kalteinspeisung und mögliche Bypässe von den kalten Strängen zum Leck,
- Kondensations- und Mischungsvorgänge in den heißen und kalten Strängen, im oberen Plenum und im Rückströmraum bei der Einspeisung von kaltem Notkühlwasser,
- Oszillationen und mögliche Pfropfenbildung in den heißen und kalten Strängen bei der Einspeisung von Notkühlwasser.

Nach Beendigung des internationalen UPTF-Versuchsprogramms wurde die Anlage erweitert, um das nationale Versuchsprogramm UPTF-TRAM durchzuführen.

Die Zielsetzung des TRAM-Programms war die Durchführung von Versuchen im Originalmaßstab zur Bereitstellung von experimentellen Daten für Transienten und Szena-

rien des anlageninternen Notfallschutzes (Accident Management), insbesondere im Hinblick auf

- Prozeduren der primärseitigen Druckentlastung in DWRs zur Vermeidung von Hochdruck-Kernschmelzen,
- Vermischungsvorgänge im kalten Strang und Ringraum, die im Zusammenhang mit Thermoschockbelastungen (PTS = Pressurized Thermal Shock) und der Deborierung stehen,
- Vorgänge der Energieumverteilung im Primärsystem von DWRs zur Abschätzung der Wahrscheinlichkeit des Hochdruckversagens des Primärkreises außerhalb des Reaktordruckbehälters.

Um diese Ziele zu erreichen wurden folgende Versuchsgruppen definiert /LIE 97/:

Gruppe A Den anlageninternen Notfallschutz (Accident Management) unterstützende Versuche und Grundlagenversuche

Gruppe B Versuche zum anlageninternen Notfallschutz

Gruppe C Versuche zur Strähnen und Streifenkühlung des Reaktordruckbehälters bei HD-Einspeisung (PTS-Problematik) und zur Borvermischung unter Naturumlaufbedingungen

Gruppe D Versuche zur Energieumverteilung durch Zirkulationsströmungen im Primärsystem vor Beginn und während eines Kernschmelzvorganges

Mit Hilfe der von 1985 bis 1995 durchgeführten UPTF- und UPTF-TRAM Versuche wurde eine Datenbasis geschaffen, die nicht nur zur experimentellen Untersuchung der genannten physikalischen Phänomene im Originalmaßstab verwendet werden kann, sondern auch zur Validierung von Thermohydraulikprogrammen für wassergekühlte Kernreaktoren. Die durchgeführten UPTF und UPTF-TRAM Versuchsläufe sind in Tabelle 23 in /ADD 02b/ angegeben.

Die Versuchsanlage UPTF-TRAM war eine Nachbildung von Teilen des Primärkreises der DWR-Anlage Grafenrheinfeld (1300 MW_{el}) im Originalmaßstab 1:1. In Bild 2.2-1 und Bild 2.2-2 ist das Primärsystem dargestellt, in Bild 2.2-3 ein Querschnitt des Kernsimulators mit den Einspeisezonen, in Bild 2.2-4 der Druckhalter mit Surgeline und in

Bild 2.2-5 ein Flussdiagramm der Versuchsanlage beim Versuch UPTF-TRAM C3. Der Simulationsbereich der Versuchsanlage umfasste das obere Plenum mit Einbauten, den Ringraum, vier angeschlossene Loops und Teile des Kernbereichs. Der maximale Systemdruck der Versuchsanlage betrug 20 bar, da sie ursprünglich zur Untersuchung der Störfallphasen unterhalb 20 bar konzipiert und dementsprechend ausgelegt worden war. Für die Untersuchung von Störfallphasen, die an der Realanlage im hohen Druckbereich auftreten, war deshalb eine Druckskalierung vorzunehmen. Die Anlage ist in /EMM 88/ beschrieben.

Das Kernverhalten wurde durch gesteuerte Einspeisung von Dampf und Wasser aus einem Dampfgefälle-Speicher in den Kernsimulator mit 193 Brennelement-Attrappen (0,8 m Länge) simuliert (Bild 2.2-3), die zonenweise mit Dampf und Wasser beaufschlagt werden konnten. Die maximale Dampfeinspeisung konnte bis zu 340 kg/s und die Wassereinspeisung bis zu 1500 kg/s erreichen. Die Simulatoren der Hauptkühlmittelpumpen und der Dampferzeuger bildeten Strömungswiderstände der entsprechenden Reaktorkomponenten nach. Aus messtechnischen Gründen wurden die Dampferzeugersimulatoren zusätzlich als Wasserabscheider verwendet. In die Dampferzeugersimulatoren der intakten Kreisläufe konnte Dampf eingespeist werden.

Eine der vier Primärkreisschleifen wurde zur Simulation von Leitungsbrüchen eingesetzt und bestand aus einem heißen und einem kalten Bruchstrang mit je einem Bruchventil zur Simulation von Kühlmittelverluststörfällen. Die beiden Bruchstränge waren über die Bruchventile mit einem Containmentsimulator verbunden, in dem der Druck vorgegeben werden konnte.

Mit den an der Versuchsanlage vorhandenen Notkühlsystemen für die HD-, ND- und Druckspeichereinspeisung konnten die bei den verschiedenen DWR-Typen unterschiedlichen Einspeisekonzepte nachgebildet werden. Von den 4 Druckspeichern der Versuchsanlage (Bild 2.2-5) wurden dabei maximal 2 genutzt. So wurde der Druckspeicher JNG03BB01 mit der Wassermasse entsprechend der Anzahl der zu simulierenden Druckspeicher aufgefüllt und das hierfür notwendige Stickstoffpolster in einem zweiten Druckspeicher (z. B. JNG04BB01) bereitgestellt, wobei die mit Stickstoff gefüllten, oberen Bereiche der beiden Druckspeicher über eine Leitung gekoppelt waren. Während an der Reaktoranlage die Einspeiseleitungen der Druckspeicher voneinander unabhängig sind, speiste an der UPTF-Anlage der Mehrfachdruckspeicher JNG03BB01 in einen Verteiler ein und erst von da aus über getrennte Leitungen in die Loops.

Für einige Versuchsläufe der Versuchsgruppe B wurde die Versuchsanlage mit einem ebenfalls im Maßstab 1:1 skalierten Druckhalter und mit einer mit dem heißen Bruchstrang verbundenen Volumenausgleichsleitung ausgerüstet (Bild 2.2-4). Der Abzweig der Volumenausgleichsleitung (Durchmesser: 200 mm) vom heißen Strang (Durchmesser: 750 mm) erfolgte unter einem Winkel von 30 zur Horizontalen. Mit den beiden Druckhalterventilen konnte der Primärkreisdruck geregelt und eine primärseitige Druckentlastung durchgeführt werden.

Für die Versuchsläufe der Versuchsgruppe C wurde in den Anschlussstutzen des kalten Strangs 3/Ringraum ein Formstück eingebaut und eine Mess- und Regelstrecke für kleine Notkühlwassereinspeiseraten montiert. Das Formstück vergrößerte den sonst in der UPTF-Anlage vorhandenen Ablaufradius im Kaltstrangstutzen. Gleichzeitig wurde auch der Öffnungswinkel des Stutzens verringert. Beides sorgte für ein Anliegen des Wasserstreifens bei höheren Einspeiseraten. Bild 2.2-6 und Bild 2.2-7 zeigen die Einspeisegeometrie des kalten Strangs am Ringraum und des Notkühlwasser(NKW)-Einspeisestutzens am kalten Strang.

Für die Versuchsläufe der Versuchsgruppe D wurde im unteren Plenum eine elektrische Heizung installiert, die als Wärmequelle zur Aufheizung der Luft diente. Außerdem wurde im oberen Bereich des Dampferzeugersimulators von Loop 2 eine aus drei Wasser/Luft-Kühlern bestehende Wärmesenke eingebaut, um die Wärmekapazität der in den Dampferzeugern der Reaktoranlage vorhandenen Stahlmassen nachbilden und variieren zu können.

Die Instrumentierung der Versuchsanlage UPTF TRAM hatte die Aufgabe, dreidimensionale ein- und zweiphasige thermohydraulische Zustände und Vorgänge in den Untersuchungsbereichen zu messen und Randbedingungen und Zustände in Hilfssystemen zu erfassen. Hierzu waren ca. 2000 Messfühler installiert, deren Messdaten mit einer maximalen Abfragefrequenz von 25 Hz von der Datenerfassungsanlage aufgezeichnet werden konnten. Außer Temperatur-, Druck- und einphasigen Durchflussmessaufnehmern waren vor allem im Druckbehälter und in den Loops der Versuchsanlage Instrumente zur Messung von zweiphasigen Massenströmen eingebaut. Die Art der Instrumentierung, der Messort, der Messbereich und die Messunsicherheit der einzelnen Instrumente sind in /SIE 85, SAR 92, SIE 92/ dokumentiert.

Nach der Durchführung der in /ADD 02b/ angegebenen Versuche wurde die UPTF TRAM Versuchsanlage abgebaut.

Im Rahmen des aktuellen Vorhabens RS1155 wurden von der GRS ausgewählte Versuchsläufe der Einzeleffektversuche UPTF TRAM C1 und C3 mit dem ATHLET-Modul FLUBOX 2D/3D (siehe Kap. 4.4, 4.5) nachgerechnet, dazu UPTF 7 mit ATHLET (siehe Kap. 4.6).

2.3 ROSA/LSTF

Das japanische Atomforschungsinstitut JAERI initiierte 1980 das Forschungsvorhaben ROSA IV (Rig of Safety Assessment No. 4), in dessen Rahmen das Versuchsprogramm LSTF (Large Scale Test Facility) Untersuchung von kleinen Lecks und Transienten durchgeführt wurde. Die Versuchsanlage LSTF, die sich auf dem Gelände von JAERI in Tokai-Mura befindet, ist das im Maßstab 1/48 skalierte Modell eines Westinghouse Druckwasserreaktors mit 4 Kreisläufen und 3423 MW_{th}. Eine schematische Darstellung der Versuchsanlage ist in Bild 2.3-1 wiedergegeben.

Die Versuchsanlage besteht aus dem das Primär- und Sekundärkühlsystem, dem Blowdown- und Containmentsystem, dem Notkühlsystem, dem Energieversorgungssystem, den Hilfssystemen wie N_2-Tank, der Instrumentierung zur Steuerung der Prozesse und dem Meßtechniksystem.

Die LSTF-Anlage ist auf den vollen Systemdruck von 160 bar ausgelegt. Die 4 Kühlkreisläufe der Realanlage sind zu 2 Zweifachkreisläufen zusammengefaßt. Die Volumen und Strömungsflächen des Druckbehälters sind im Maßstab 1/48 skaliert und die der beiden Zweifachkreisläufe im Maßstab 1/24. Die horizontalen Stränge der Kreisläufe sind mit Hilfe der Froudezahl-Skalierung ($L/\sqrt{D}$) modelliert, damit die bei der Phasenseparation auftretenden Strömungsformen und Umschlagpunkte reaktortypisch nachgebildet werden. Die Höhen sind im Maßstab 1/1 skaliert, um eine realistische Simulation des Naturumlaufs zu ermöglichen.

Der elektrisch beheizte Kern der LSTF-Versuchsanlage hat eine Leistung von 10 MW (= 14 % der im Maßstab 1/48 skalierten nominalen Kernleistung). Damit ist es möglich, dem Primärkreis die der Realanlage entsprechende skalierte Nachzerfallsleistung zuzuführen. Die 17x17-Brennelemente des Referenzreaktors werden in der Versuchsanlage durch Heizleiterbündel der Größe 7x7 nachgebildet, wobei für die Länge und den Durchmesser der indirekt beheizten elektrischen Brennstabsimulatoren

die Originaldaten beibehalten wurden. Axiales und radiales Leistungsprofil des LSTF-Kerns sind reaktortypisch.

Der skalierte und mit Heizung, Sprühsystem und Entlastungs- und Sicherheitsventilen ausgerüstete Druckhalter kann sowohl am heißen Strang als auch am Deckelraum angeschlossen werden. Die Anschlußmöglichkeiten der Notkühlsysteme (Hoch- und Niederdruckeinspeisung, Druckspeichereinspeisung) und des Nachwärmeabfuhrsystems sind ebenfalls variabel.

Das Blowdown- und Containmentsystem der LSTF-Anlage besteht aus einer instrumentierten Brucheinheit, dem dazugehörigen Rohrleitungssystem und dem Auffangtank für das Leckagewasser. Mit dem Blowdownsystem können an 19 verschiedenen Stellen der Primär- und Sekundärseite Leckagen mit bis zu einer Bruchgröße von 10% und mit unterschiedlichen Bruchorientierungen eingeleitet werden. Die Kombination unterschiedlicher Bruchlagen ist möglich.

Die Dampferzeuger enthalten U-Rohre in Originalabmessungen, und die unterschiedlich hoch angeordneten Rohrbögen decken den gesamten Höhenbereich der Rohrbögen in der Referenzalanlage ab. Grob- und Feinabscheider sind ebenfalls raeaktortypisch simuliert. Die ringförmigen Downcomer in den Dampferzeugern der Referenzanlage bestehen bei den beiden LSTF-Dampferzeuger aus je 4 externen Rohren. Um bei skalierter Wärmetauscherfläche die in den Dampferzeugern übertragene Leistung auf 14 % zu begrenzen, wird mit einer erhöhten die Sekundärtemperatur gearbeitet. Hierfür ist eine Anhebung des Sekundärdrucks von 64 bar (Realanlage) auf 73 bar (LSTF) notwendig.

Die Strömungswiderstände der Anlagenkompnenten orientieren sich an der Referenzanlage. Der Kühlmittelstrom im Primärkreislauf wird durch den Betriebszustand der drehzahlgesteuerten Hauptkühlmittelpumpen sowie durch spezielle Drosselventile in den beiden Pumpenbögen bestimmt.

Die Behälter und Rohrleitungssysteme der LSTF-Anlage sind wärmeisoliert. Zur weitgehenden Kompensation der verbleibenden Wärmeverluste ist eine Schutzheizung an der Oberfläche der wichtigsten Komponenten angebracht.

Die Instrumentierung der LSTF-Anlage ist so konzipiert, daß die thermohydraulischen Phänomene bei kleinen Lecks und Transienten detailliert erfaßt werden können. Die

LSTF-Meßtechnik umfasst ca. 2500 Instrumente. Zum Einsatz kommen Messprinzipien, wie sie sich bereits bei ähnlichen Versuchsanlagen bewährt haben, z. B. DMS-Druckaufnehmer, Thermoelemente, Leitfähigkeitssonden, γ-Densitometer, Turbinen und Venturirohre. Diese konservative Instrumentierung wird in den Kreisläufen durch fortschrittliche Videoaufnehmer. Die Maßnahmen für die stationären und transienten Zustände werden mit einem Prozeßinstrumentierungs- und Steuerungssystem mittels einer Logik gelenkt, die die Tripsteuerung und die individuelle Komponentensteuerung übernimmt und den Schutz der Versuchsanlage gewährleistet.

Die Schwerpunkte des ROSA-IV/LSTF-Versuchsprogramms waren:

- Bestimmung des Systemverhaltens
  Das Anlagenverhalten und die thermohydraulischen Phänomene in einem Westinghouse Druckwasserreaktor werden für repräsentative kleine Lecks und Transienten simuliert und bestimmt.

- Untersuchungen zu Maßnahmen des anlageninternen Notfallschutzes
  Operatormaßnahmen und neuartige Systeme werden im Hinblick auf ihre Einsatzmöglichkeiten bei kleinen Lecks und Transienten untersucht.

- Erzeugung einer Datenbank für die Code-Validierung
  Zur Bewertung und Überprüfung fortschrittlicher Thermohydraulik-Codes wird eine Datenbasis geschaffen. Diese Untersuchungsziele werden im einzelnen mit folgenden Testserien verfolgt:

  - Kleine Leck Tests
    Testparameter: Leckgröße bis 10 %
    Lecklage
    Leckorientierung
    Kapazität der Notkühleinspeisung

  - Transienten
    mit verringerter Unterkühlung (z. B. Speisewasserausfall)
    mit erhöhter Unterkühlung (z. B. Dampfleitungsbruch)
    Ausfall der elektrischen Leistung (z. B. Station Blackout)

  - TMI Simulationstests
    z. B. stuck open PORV

- Fortschrittliche Tests
  z. B. alternative Notkühlprozeduren,
  alternative Operatormaßnahmen

- Kernkühlungstests
  z. B. Kernkühlung durch erzwungene Konvektion

Im Rahmen von zweiseitigen Abkommen mit der USNRC, CEA und der GRS waren im ROSA-IV/LSTF-Versuchsprogramm bis Ende 1989 ca. 40 Experimente durchgeführt worden. Ausführliche Beschreibungen dieses Versuchsprogramms und der LSTF-Anlage sind in /JAE 84, JAE 85, JAE 89/ zu finden.

Im laufenden OECD/NEA ROSA-Vorhaben werden an der aktuellen Anlage ROSA V/LSTF Versuche zu den Themen

- Temperaturschichtung im horizontalen Strang bei Einspeisung von kaltem Notkühlwasser,
- Instabilitätsphänomene wie Wasserschlag,
- Naturumlauf bei hoher Kernleistung,
- Naturumlauf mit überhitztem Dampf,
- Kühlung der Primärseite durch sekundärseitige Druckentlastung,
- Kühlmittelverluststörfall durch Leck am Deckraum des RDB,
- Kühlmittelverluststörfall durch Leck am unteren Plenum des RDB,
- und Dampfkondensation bei einem Störfall mit großem Bruch

durchgeführt. Der zeitliche Ablauf des OECD/ROSA-Vorhabens ist Tabelle 2.3-1 zu entnehmen. Ausgewählte Experimente werden für die Validierung des Rechenprogramms ATHLET verwendet. Die Planungen für das Vorhaben und erste Code-Rechnungen wurden in den Sitzungen der Arbeitsgruppen zum "OECD ROSA Thermal-Hydraulic"-Projekt vorgestellt und diskutiert, so z. B. bei der Konferenz der Programme Review Group des OECD-ROSA-Projekts im Oktober 2006 beim "Japan Atomic Energy Agency (JAEA) Nuclear Safety Research Center". Bei der Konferenz wurden von JAEA Vorausrechnungen zu den geplanten Experimenten mit Variationen der Anfangs- und Randbedingungen gezeigt. Die Ergebnisse und Planungen wurden

ausführlich diskutiert, um die optimale Durchführung der Experimente festzulegen. Vorgestellt wurden die Vorbereitungen zu folgenden Experimenten:

- Testserie 1 zur Temperaturschichtung und der Mischung von Wasser im horizontalen Strang und im Fallraum des Reaktorbehälters während der Einspeisung von Notkühlwasser. Zwei Experimente werden durchgeführt mit den in den Vorausrechnungen angenommenen Anfangs- und Randbedingungen. Eines der Experimente ist ein Integralexperiment, in dem sowohl das Systemverhalten während eines kleinen Leckstörfalls als auch die Phänomene im kalten Strang untersucht werden. Das andere ist ein Einzeleffekt-Experiment, in dem die Temperaturverteilung in jedem kaltseitigen Strang während der Notkühlwasser-Einspeisung gemessen wird. Dies erfolgt unter verschiedenen Strömungsbedingungen einschließlich der Zweiphasenströmung. Zusätzliche Thermoelemente und eine Videoprobe wurden installiert, um detailliert die Temperaturverteilung messen sowie die Zweiphasenströmung beobachten zu können. Zum Integralexperiment, das Anfang 2007 durchgeführt werden soll, wurde statt der ursprünglichen Planung, die einen 5%-Bruch eines kalten Strangs ohne Hochdruck-Notkühleinspeisung vorsah, ein 1%-Bruch mit Hochdruckeinspeisung vorgeschlagen. Die versuchsdurchführende Stelle wird zusätzliche Vorausrechnungen mit beiden Bruchgrößen bis Ende Februar 2007 durchführen. Danach wird die Fahrweise des Experiments festgelegt. Zum Einzeleffekt-Experiment wurde beschlossen, zur Temperaturschichtung und der Mischung von Wasser im horizontalen Strang und im Fallraum des Reaktorbehälters höhere Einspeiseraten in Bruchloop B, längere Einspeisezeiten bei niedrigerem Anfangs-Wasserspiegel im Fallraum des Reaktorbehälters sowie höhere Einspeiseraten anzusetzen, um die PTS-Relevanz besser untersuchen zu können.

- Testserie 2 zu Untersuchungen von kondensations-induzierten Wasserschlägen (condensation-induced water hammer - CIWH). Eine Serie von Einzeleffektexperimenten mit gut definierten Randbedingungen ist vorgesehen. Der maximale Systemdruck soll etwa 7 MPa betragen. Die Experimente sollen im März bis April 2007 durchgeführt werden. Es wurde vorgeschlagen, zusätzlich zu den Beschleunigungsmessern auch Dehnungsmesser zu installieren, die einfach anzubringen sind. JAEA wollte dies in Betracht ziehen und die Spezifikation der Testserie bis Ende Dezember 2006 verschicken.

- Testserie 3 zum Naturumlauf bei hoher Leistung mit möglicher Begrenzung der Gegenströmung am Eintritt der Dampferzeugerrohre, schneller Verdampfung und

schnellem Temperaturanstieg im Kern. Zwei Experimente werden durchgeführt, wobei die Bruchgröße und der Bruchort geändert werden, die das verbleibende Wasserinventar und dessen Verteilung beeinflussen. Zu dieser Testserie wurden Vorausrechnungen für die Bruchgrößen 0,5% und 1% mit dem von JAEA entwickelten Rechenprogramm TRAC-PF1/SKETCH-INS durchgeführt. Vorversuche wurden bereits mit Bruchgrößen von 0,5% und 1,9% gefahren. Der 0,5%-Bruch hat keine Kernfreilegung zur Folge (Analyse und Vorversuch), bei den LSTF-Analysen zum 1%-Bruch und 1,9%-Bruch sowie dem Vorversuch zum 1,9%-Bruch zeigten sich Kernfreilegungen. Da beim 1%-Bruch das "Core Protection System" aufgrund der Kernaustrittstemperatur nicht vor 1200 bis 1300 s aktiviert wird, können genügend Daten gesammelt werden.

- Testserie 5 zur primärseitigen Kühlung durch sekundärseitige Druckabsenkung. Es soll die Effektivität der sekundärseitigen Druckabsenkung untersucht werden sowie die Auswirkung nicht-kondensierbaren Stickstoffs aus den Druckspeichern im Primärsystem hinsichtlich der Verringerung der Kondensation in den Dampferzeuger-U-Rohren. Verschiedene Bruchlagen und -größen von 0,1 bis 1,9% sollen betrachtet werden. Eine weitere Herausforderung ist die Messung des nichtkondensierbaren Gases mit Zirkonia-Sensoren an der Dampferzeuger-Austrittskammer und dem Druckbehälter-Deckelraum. In Einzeleffekt-Experimenten wurde das Verfahren erprobt und als einsetzbar beurteilt.

Von der GRS wurden bei der Konferenz der Programme Review Group des OECD-ROSA-Projekts Nachrechnungen zu dem bisher durchgeführten Experiment 6.1, "Pressure Vessel Upper Head Break Loss of Coolant Accident", mit ATHLET präsentiert. Die Bruchgröße beträgt 2,1% der Querschnittsfläche des kalten Strangs und ist damit äquivalent zu einer vollständigen Steuerstabantriebs-Durchdringung mit einem äußeren Durchmesser von 102 mm. Die gute Übereinstimmung der ATHLET-Rechnung mit den experimentellen Ergebnissen des Tests 6.1 ist im Wesentlichen durch das Ausströmmodell und das Gemischspiegelmodell von ATHLET zu erklären. Mit dem RELAP-Rechenprogramm dagegen gab es Schwierigkeiten, den Übergang von Zweiphasen- zu Einphasen-Ausströmung an der Bruchöffnung des Reaktorbehälter-Deckels richtig zu berechnen. Dies haben Vorausrechnungen der versuchsdurchführenden Organisation JAEA gezeigt.

3 Beschreibung des Rechenprogramms ATHLET einschließlich des Moduls FLUBOX 2D/3D und typischer Nodalisierungsmodelle

Das Rechenprogramm ATHLET (Analyse der Thermohydraulik von Lecks und Transienten) und das ATHLET-Modul FLUBOX2D/3D werden von der GRS im Auftrag des Bundesministers für Wirtschaft und Technologie (BMWi) im Rahmen der Vorhaben RS1162 und RS1161 weiterentwickelt.

ATHLET wird von zahlreichen Anwendern zur Sicherheitsbewertung von Leichtwasserreaktoren eingesetzt. Es simuliert die Strömungs- und Wärmeübergangsprozesse im Reaktorkühlsystem von Druckwasser- und Siedewasserreaktoren. Dazu gehören auch Reaktoren russischer Bauart (WWER und RBMK).

Der Anwendungsbereich des in /GRS 03, GRS 04, GRS 06/ beschriebenen Rechenprogramms ATHLET umfasst den gesamten Störfallbereich von betrieblichen Störungen über Transienten und Kühlmittelverluststörfälle bis hin zu auslegungsüberschreitenden Störfällen. Das Aufgabenspektrum hat sich gegenüber den früher im Vordergrund stehenden Auslegungsstörfällen in den letzten Jahren erheblich erweitert. Unter den neuen Aufgaben für die bestehenden Anlagen in Deutschland ist der anlageninterne Notfallschutz als zusätzliche Sicherheitsebene von großer Bedeutung. Das Rechenprogramm ATHLET dient hier der Planung und Bewertung von präventiven Maßnahmen. Weitere aktuelle Anwendungsgebiete von ATHLET sind Störfälle bei Teillast oder abgeschaltetem Reaktor (Mitte-Loop Betrieb) und Deborierungsstörfälle, wie sie z. B. durch Eintrag eines fast borfreien Deionatpfropfens aus einem Pumpenbogen in den Reaktorkern entstehen können.

Das ATHLET-Modul FLUBOX 2D/3D zur mehrdimensionalen Darstellung des RDB ist in Entwicklung.

Für den Bereich schwerer Störfälle mit Kernzerstörung wird das Rechenprogramm ATHLET-CD (Core Degradation) entwickelt /TRA 04/. ATHLET-CD stellt eine Erweiterung von ATHLET dar, indem es auf der Thermofluiddynamik von ATHLET aufbaut und weitere Module zur Beschreibung der Prozesse Kernschmelzen, Spaltproduktfreisetzung aus den Brennstäben und Spaltprodukt- und Aerosoltransport im Reaktorkühlsystem ankoppelt.

3.1 Programmstruktur und Modelle des Rechenprogramms ATHLET

Die Hauptgliederung des modularen Programmaufbaus entspricht den wichtigsten Prozessen, die bei der Berechnung von Störfallabläufen in einer Reaktoranlage zu simulieren sind:

- Thermofluiddynamik (Modul TFD)
- Wärmeleitung/Wärmeübertragung (Modul HECU)
- Neutronenkinetik (Modul NEUKIN)
- Steuerung und Regelung (Modul GCSM)

3.1.1 Thermofluiddynamik

Aufgabe der Thermofluiddynamik ist die transiente Berechnung der ein- und zweiphasigen Strömung im Reaktorkühlsystem. Dazu wird das Kühlsystem als ein Netzwerk aus sog. Thermofluid-Objekten dargestellt.

3.1.1.1 Netzwerkbausteine

Bei der Erstellung eines Eingabedatensatzes werden die Objekte vom Anwender in der Regel den Komponenten des Kühlsystems entsprechend definiert, z. B. heißer Strang der Hauptkühlmittelleitung, Volumenausgleichsleitung, Druckhalter, usw.. Diese Objekte sind nicht nur die grundlegenden Elemente beim Aufbau des Datensatzes, sondern sie bestimmen auch weithin die Daten- und Ablaufstruktur des Programms. Inhaltlich zeichnen sie sich durch Verwendung einheitlicher physikalischer Modelle und numerischer Methoden innerhalb eines Objekts aus.

ATHLET unterscheidet drei Grundtypen von Objekten: PIPE, BRANCH und Sonderobjekte. PIPEs werden zur Simulation eindimensionaler Strömungen benutzt und setzen sich in der Regel aus mehreren Zellen (Kontrollvolumen) zusammen, die durch Strömungswege (Leitungen) miteinander verbunden sind. BRANCHes werden zur Simulation von Verzweigungen und Behältern benutzt. Sie enthalten nur ein Kontrollvolumen. Die Kontrollvolumen sind die elementaren Raumbereiche, auf welche die Erhaltungssätze für Masse und Energie angewendet werden (Ortsapproximation durch Finite Volumen). Als Leitungen werden die gegenüber den Kontrollvolumen um eine halbe Zel-

lenlänge versetzten Bilanzräume für den Impuls bezeichnet. Innerhalb eines Kontrollvolumens wird in der Regel nur der räumliche Mittelwert einer Größe berechnet (Lumped Parameter). Durch Verbindung von Kontrollvolumen und Leitungen in einem Objekt entsteht eine eindimensionale Abbildung der Strömung. Durch Querverbindungen mit Hilfe weiterer Leitungen kann jedoch auch eine mehrdimensionale Darstellung z. B. für den Kern oder den Rückströmraum näherungsweise erreicht werden. Das ATHLET-Modul FLUBOX 2D/3D zur mehrdimensionalen Darstellung des RDB ist in Entwicklung.

3.1.1.2 Grundgleichungssystem

Modellgrundlage der Fluiddynamik bilden die Erhaltungssätze für Masse, Impuls und Energie. Um dem zweiphasigen Charakter der Strömung und dem Nichtgleichgewicht bei stark transienten Prozessen Rechnung zu tragen, werden die drei Erhaltungssätze für die beiden Phasen Wasser und Dampf separat aufgestellt (Zwei-Fluid-Modell), sodass ein System aus sechs gekoppelten partiellen Differentialgleichungen entsteht. Dieses sog. 6-Gleichungssystem ist u. a. auch Grundlage vergleichbarer ausländischer Rechenprogramme wie CATHARE (Frankreich) oder RELAP5 und TRAC (USA). In ATHLET ist das 6-Gleichungssystem als Option seit der Programmversion Mod 1.2 A enthalten /GRS 03/. Daneben bleibt das vor allem bei Rechnungen zu kleinen Lecks bewährte 5-Gleichungsmodell als weitere Option erhalten. Gegenüber dem 6-Gleichungsmodell wird dabei nur eine dynamische Gleichung für den Gesamtimpuls der Strömung verwendet. Die separaten Phasengeschwindigkeiten für Dampf und Wasser werden daraus durch Anwendung eines Drift-Flut-Modells ermittelt. Zusätzliche Massenbilanzgleichungen stehen zur Verfolgung der Konzentration von nichtkondensierbaren Gasen und von Borsäure im Kühlsystem zur Verfügung.

3.1.1.3 Schließungsgleichungen

Zur Schließung des Gleichungssystems werden weitere physikalische Beziehungen benötigt, sog. konstitutive Gleichungen. Dazu gehören zunächst die Zustandsgleichungen für Wasser und Wasserdampf, die über den gesamten Anwendungsbereich (Druck 0,01 - 21,5 MPa) approximiert sind. Für reines Wasser gilt ein erhöhter Anwendungsbereich von 30 MPa. Aufgrund der Berücksichtigung von thermodynamischem Nichtgleichgewicht sind Stoffwerte auch im metastabilen Bereich bereitzustellen.

Beziehungen zur Beschreibung der Interaktion der beiden Phasen untereinander und mit der Wand enthalten die eigentliche Modellierung der Phänomene. Diese Beziehungen berücksichtigen das jeweils vorherrschende Strömungsbild und sind an experimentelle Messergebnisse angepasst. Die Verdampfungs- bzw. Kondensationsrate hängt von der gemeinsamen Oberfläche beider Phasen und der Abweichung der Phasentemperaturen von der Sättigungstemperatur ab. Die Relativgeschwindigkeit zwischen den Phasen wird aus dem Gesamtmassenstrom mit Hilfe eines Drift-Flux-Modells berechnet. Optional stehen weitere Korrelationen zur Verfügung, z. B. Blasenaufstiegsgeschwindigkeit nach Wilson. Die GRS hat ein "Full Range Drift-Flux"-Modell auf der Basis der sog. Envelope-Theorie entwickelt. Grundlage dieses Modells sind Volumenstromrelationen, d. h. algebraische Gleichungen, welche die Voreilung der Dampfphase gegenüber dem Volumenschwerpunkt der Gemischströmung in Abhängigkeit von Gesamtgeschwindigkeit, Dampfvolumengehalt und Druck beschreiben. Damit können Gleichstrom und Gegenstrom der Phasen sowohl in vertikalen als auch in horizontalen und geneigten Strömungswegen berechnet werden. Die unterschiedlichen Geometrien wie Rohr oder Stabbündel werden berücksichtigt.

Die Berechnung der Wandreibungskraft, bzw. des Druckverlustes erfolgt für laminare und turbulente Strömung aufgrund von empirischen Korrelationen für den einphasigen Bereich. Zur Ermittlung des Druckverlustes bei Zweiphasenströmung werden Zweiphasenmultiplikatoren herangezogen. Für Formverluste und geometrische Besonderheiten sind vom Anwender zusätzlich Verlustbeiwerte einzugeben.

Zur Schließung der beiden Energiegleichungen wird bei der Berechnung der Wärmeübertragung (s. u.) der Gesamtwärmestrom von der Kanalwand an das Fluida auf die beiden Phasen Wasser und Dampf aufgeteilt.

3.1.1.4 Lösungsverfahren

Zur Lösung des Systems von partiellen Differentialgleichungen wird ein semidiskreter Ansatz gewählt (Linienmethode). Analytisch werden die Gleichungen mit Hilfe eines Finite-Volumen-Verfahrens zur Ortsapproximation umgeformt, d. h. es wird über Kontrollvolumen integriert (s. o.). Die Zeitintegration des so entstandenen gewöhnlichen Differentialgleichungssystems wird durch Anwendung eines numerischen Lösungsverfahrens (Modul FEBE) durchgeführt. FEBE basiert auf einem Euler-Verfahren mit Rückwärts-Differenz. In ATHLET wird das Verfahren in seiner voll-impliziten Form an-

gewendet, so dass vom Stabilitätskriterium aus keine Zeitschrittbeschränkungen verursacht werden. Die Verfahrensordnung ist variabel und wird, wie die Schrittweite, durch Vorgabe von Fehlerschranken für jede Variable gesteuert.

Das linearimplizite Eulerverfahren erfordert die Berechnung einer Jacobi-Matrix. Diese erfolgt in ATHLET auf numerischem Wege. Zur effizienten Berechnung der Jacobi-Matrix kommt in FEBE das Sparse-Matrix-Paket FTRIX zum Einsatz. Dieses nutzt automatisch die aktuelle Netzwerkstruktur und die sich daraus ergebende schwache Besetzung der Matrix.

3.1.2 Wärmeübertragung/Wärmeleitung

Mit dem Modul HECU werden feste Bauteile der Reaktoranlage simuliert, die in erheblichem Umfang Wärme leiten, speichern und mit dem Fluid austauschen können. Dazu gehören zunächst die Brennelemente des Reaktorkerns, die Wärmetauscherrohre im Dampferzeuger des Druckwasserreaktors sowie die Behälter- und Rohrwände der Druck führenden Umschließung.

ATHLET simuliert die o. a. Bauteile als Wärmeleitobjekte. Zur Darstellung des aktuellen Temperaturprofils wird die eindimensionale Wärmeleitungsgleichung in der Struktur senkrecht zum Strömungskanal zeitabhängig gelöst. Wärmeleitobjekte können geometrisch als Vollzylinder, Hohlzylinder oder Platte definiert werden. Das Wärmeleitobjekt kann axial aus einer beliebigen Anzahl von Wärmeleitelementen und radial aus bis zu drei aufeinander folgenden Zonen mit unterschiedlichen Materialeigenschaften aufgebaut sein. Zur weiteren Ortsdiskretisierung kann jede Materialzone in eine beliebige Zahl von Schichten unterteilt werden. In den Schichten können Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität materialspezifisch und in Abhängigkeit von der Temperatur berechnet, bzw. über Tabellen vorgegeben werden. Die einzelnen Schichten können Wärmequellen enthalten. Im Falle des Reaktorbrennstabes werden diese Quellen durch die Neutronenkinetik berechnet bzw. als Tabelle für die Nachzerfallsleistung zeitabhängig vorgegeben.

Zur Berechnung der Wärmeübertragung zwischen Struktur und Fluid werden im Wesentlichen empirische Korrelationen eingesetzt, die aus der Literatur bekannt und an Einzeleffektexperimenten verifiziert sind. ATHLET wendet solche Korrelationen in ihrem jeweiligen Gültigkeitsbereich an, wobei in den Übergangsbereichen interpoliert

wird. Damit wird in ATHLET der gesamte Bereich von der Konvektion bei unterkühlter Wasserströmung, über das unterkühlte bzw. voll entwickelte Blasensieden, Übergangssieden und Filmsieden, bis zur Konvektion an gesättigten bzw. überhitzten Dampf erfasst. Zur Verfolgung der Wiederbenetzung von Brennstäben verfügt ATHLET über ein Quenchfront-Modell.

3.1.3 Neutronenkinetik

Zur Darstellung der Reaktorleistung stellt ATHLET wahlweise ein Punktkinetikmodell oder ein eindimensionales Kinetikmodell zur Verfügung. Zur Ankopplung von dreidimensionalen Kinetikmodellen in Verbindung mit hydraulischen Parallelkanälen im Kern steht eine allgemeine Schnittstelle zur Verfügung. Diese wird erfolgreich von den Programmen QUABOX/CUBBOX, BIPR8 und DYN3D genutzt /LAN 96/.

3.1.4 Steuerung und Regelung

Das Modul GCSM (General Control Simulation Module) erfüllt in ATHLET eine wesentliche Simulationsaufgabe im Rahmen der Gesamtdarstellung einer Reaktor- oder Versuchsanlage. Ursprünglich zur Darstellung von Steuerungen und Regelkreisen entwickelt, wird GCSM zur Nachbildung der gesamten Leittechnik und der Balance-of-Plant (BOP) eingesetzt.

Durch Verwendung einer blockorientierten Simulationssprache kann der Anwender über Eingabedaten komplexe Systeme aus Grundelementen, z. B. Schalter, Integrator, usw. aufbauen.

Bei der vereinfachten Simulation von fluiddynamischen Systemen, z. B. Dampfleitung oder Kondensatsystem, bildet GCSM eine Rechenzeit sparende Alternative zur Darstellung durch Thermofluid-Objekte.

Für Anwender, die bereits über eigene fest programmierte BOP-Modelle (z. B. Turbine) oder Regelungsmodelle (z. B. Druckregelung) mit eigener Eingabe verfügen, bietet GCSM die Möglichkeit, diese meist anlagenspezifischen Modelle über eine allgemeine Schnittstelle einzubinden. Sogar ein Containment-Modell kann auf diese Weise angekoppelt werden.

3.1.5 Komponentenmodelle

Im Allgemeinen werden die Komponenten des Reaktorkühlsystems vom Anwender durch Kombination von TF-Objekten und HC-Objekten dargestellt. Darüber hinaus bietet ATHLET eine Anzahl von speziellen Komponentenmodellen an: Ventile, Pumpen, Druckspeicher, Wasser/Dampf-Separator. Für die Komponenten Druckhalter und Dampferzeuger kann der Anwender in ATHLET auch vereinfachte kompakte Modelle ansprechen.

Zur Simulation spezieller Randbedingungen stellt ATHLET folgende Komponenten zur Verfügung: Einseitiger Bruch, doppelendiger Bruch, Einspeisung (FILL), Ausströmung (LEAK), Druck- und Enthalpierandbedingung.

3.2 Besonderheiten von ATHLET

Im Folgenden wird auf einige Eigenschaften von ATHLET eingegangen, die das Programm von vergleichbaren internationalen Codes unterscheiden.

3.2.1 Gemischspiegelsimulation

Die Separation von Wasser und Dampf in vertikalen Komponenten führt häufig zur Ausbildung von Gemischspiegeln. Um diesen Vorgang auch bei Vorgabe relativ großer Kontrollvolumen hinreichend genau abbilden zu können, steht ein inhomogenes Kontrollvolumen zur Verfügung. In diesem Volumen kann sich ein Gemischspiegel bewegen, wobei sich unterhalb Wasser mit Dampfblasen und oberhalb Dampf mit Wassertropfen befindet. Ein Austausch beider Phasen über den Gemischspiegel ist modelliert. Der Gemischspiegel kann sich dabei zeitabhängig entwickeln und auch über Volumengrenzen verfolgt werden.

3.2.2 Ausströmmodell

Zur Berechnung des kritischen Massenstroms in einem weiten Parameterbereich für die spezielle Geometrie eines Strömungsweges bietet ATHLET die Möglichkeit einer Vorausrechnung mit dem Hilfsprogramm CDR1D an. Dabei wird ein 4-Gleichungssystem mit thermodynamischem Nichtgleichgewicht stationär gelöst, wobei der Strö-

mungsweg in feiner Ortsdiskretisierung (Finite Differenzen) dargestellt ist. Die so erzeugten Tabellen werden dann während des transienten ATHLET-Rechenlaufs zur Begrenzung des örtlichen Massenstromes herangezogen.

3.2.3 EIMMB (Extended Integrated Mass and Momentum Balance)

Zur Rechenzeit sparenden Simulation von Transienten ohne starke lokale Druckgradienten und mäßige Dampfgehaltsänderungen steht in ATHLET auf Objektebene eine Methode als Option zur Verfügung, die von folgenden Vereinfachungen ausgeht:

- Die Zeitableitungen der lokalen Drücke werden durch die Ableitungen eines Bezugsdruckes für das gesamte Objekt ersetzt,
- Die Ableitungen der lokalen Massenströme in einem Objekt werden durch seinen Eintritts- und Austrittsmassenstrom ersetzt.

Mit dieser Technik lassen sich viele Transienten effizient rechnen, wobei sogar lokale Strömungsumkehr zugelassen ist.

3.2.4 Startrechnung

Zur Initialisierung aller dynamischen Variablen einer transienten Reaktorrechnung ist es notwendig, von einem wohl definierten abgestimmten Satz von Anfangsbedingungen im gesamten simulierten System auszugehen. ATHLET bietet die Möglichkeit, die Anfangswerte durch eine automatische Startrechnung aus einer sehr begrenzten Anzahl von Eingabewerten des Anwenders zu erzeugen. Vom Anwender vorgegebene widersprüchliche Angaben werden erkannt und korrigiert, z. B. Formverlustbeiwerte und Wärmetauscherflächen. Dadurch wird eine stationäre Lösung erzeugt, die den gewünschten Anfangszustand wiedergibt.

3.2.5 Visualisierung und Interaktivität

Zu ATHLET gehört ein Software-Paket mit graphischen Darstellungen zur Vorbereitung und Auswertung von Rechenläufen. Die Input-Graphik zeichnet automatisch die vom Anwender im Eingabedatensatz durch Zahlen definierten Objekte und ihre geometrische Verknüpfung. Ein ähnliches Tool steht für die Leittechnik zur Verfügung.

Nach erfolgtem Rechenlauf kann diese Graphik animiert werden, d. h. der transiente Ablauf wird durch Farbänderungen in den Objekten visualisiert. Im Analysesimulator ATLAS ist ATHLET zur umfassenden Anlagensimulation mit Eingriffen in den Ablauf der Simulation implementiert.

3.3 ATHLET-Modul FLUBOX 2D/3D

Für mehrdimensionale fluiddynamische Simulationen wird in der GRS der CTFD (Computational Two-Fluid Dynamics) Code FLUBOX 2D/3D entwickelt /GRA 05/. Die physikalischen Modelle für die Simulation von Ein- und Zweiphasenströmungen bestehen aus den Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls und Energie, erweitert um Transportgleichungen für die Phasengrenzflächendichte und die Turbulenz. Zur numerischen Lösung werden die Erhaltungsgleichungen auf Matrixform gebracht. Die Matrix ist vom hyperbolischen Typ, d. h. die Eigenwerte sind alle reell und die Matrix hat ein vollständiges System von Eigenvektoren. Im Lösungsverlauf werden diese hyperbolischen Eigenschaften ausgenutzt. Die eingesetzten Lösungsverfahren haben sehr geringe numerische Diffusion und sind trotzdem stabil, robust und effizient.

Zur Verbesserung der Simulationsfähigkeiten des Systemcodes ATHLET im mehrdimensionalen Bereich wurde eine implizite Kopplungsmethode mit dem Code FLUBOX entwickelt. Diese Kopplung wird im laufenden Vorhaben RS 1161 realisiert.

3.4 Ausgewählte Nodalisierungs- und Diskretisierungsmodelle für die Validierungsrechnungen in der GRS

Im Folgenden werden typische ATHLET-Nodalisierungsmodelle für die Anlagen PKL III und UPTF sowie ein typisches FLUBOX-3D Diskretisierungsmodell für die Anlage UPTF-TRAM beschrieben, die in der GRS bei den Validierungsrechnungen im Vorhaben RS1155 verwendet wurden.

3.4.1 PKL III-Nodalisierungsmodell für Validierungsrechnungen mit ATHLET

Als Beispiel für ein PKL III-Nodalisierungsmodell wurde das für die Nachrechnung des Versuchs PKL III E2.2 verwendete Nodalisierungsmodell ausgewählt, das einen sehr hohen Detaillierungsgrad aufweist /STE 04/.

Im PKL III E2.2-Eingabedatensatz sind die vier Loops der Versuchsanlage einzeln nachgebildet (4-Loop-Datensatz). Das Sekundärsystem wird als offenes System behandelt, d. h. Frischdampfentnahme und Speisewasserzufuhr der vier Dampferzeuger werden als Randbedingungen vorgegeben bzw. mit GCSM-Modellen berechnet.

Die Gesamtanlage wird mit 166 Thermofluid-Objekten und 231 Wärmeleitobjekten simuliert. Das ergibt insgesamt 962 Kontrollvolumen, 829 Stömungswege und 858 Wärmeleitelemente.

In Bild 3.4.1-1 bis Bild 3.4.1-6 sind Input-Graphik-Darstellungen der modellierten Fluidobjekte und Nodalisierungen enthalten.

Das Objektschema und die Nodalisierung des PKL-Stabbündelbehälters sowie des Rückströmraums mit Ringraumbehälter und Downcomer-Rohren sind in Bild 3.4.1-1 und Bild 3.4.1-2 wiedergegeben.

Der Ringraumbehälter wird durch die übereinander liegenden und azimutal aufgeteilten Branch-Objekte PV-DC-A1 und PV-DC-A2, die 6 Pipe-Objekte PV-DC-BA1 bis PV-DC-BA6, die sechs Branch-Objekte PV-DC-B1 bis PV-DC-B6 und die sechs Pipe-Objekte PV-DC-C1 bis PV-DC-C6 erfasst. Die Pipe-Objekte PV-DC-C1 bis PV-DC-C6 werden durch die Cross Connection-Objekte DC-CC-C15, -C52, -C23, -C36, -C64, -C41 gekoppelt, die Pipe-Objekte PV-DC-BA1 bis PV-DC-BA6 durch die Cross Connection-Objekte DC-CC-BA15, -BA52, -BA23, -BA36, -BA64, -BA41 und die unten liegenden Ringraumobjekte PV-DC-A1 und PV-DC-A2 durch das Single Junction Pipe PV-DC-A12. Die kalten Stränge P1-CL bis P4-CL münden in die Objekte PV-DC-B1 bis PV-DC-B4 ein. Die sechs Ringraumobjekte PV-DC-B1 bis –B6 sind zur näherungsweisen Berücksichtigung der vertikalen Trennbleche sowie der Durchführungen der heißen Stränge in azimutaler Richtung nicht gekoppelt. Weil die heißen Stränge und die vertikalen Trennbleche auch den obersten Bereich der Pipe-Objekte PV-DC-BA1 bis PV-DC-BA6 voneinander trennen, wird die Integration der obersten Leitung in den Cross Connection-Objekten DC-CC-BA15, -BA52, -BA23, -BA36, -BA64, -BA41 im REDEFINE-Block mit TOPDJ = T ausgeschaltet, d. h. der Massenstrom in diesen Leitungen bleibt immer auf dem Wert null. Die beiden Downcomer-Rohre zwischen dem Ringraumbehälter und dem unteren Plenum werden durch die Pipe-Objekte PV-DPIPE1 und PV-DPIPE2 repräsentiert. Der Bereich des unteren Plenums, in den die Downcomer-Rohre einmünden, wird durch das Branch-Objekt PV-CORE-LP simuliert und das Bodenvolmen durch das Pipe-Objekt PV-LP. Der Bereich des Stabbün-

delbehälters zwischen der Oberkante der Downcomer-Rohre (Eintritt zum unteren Plenum) und der Unterkante der heißen Stränge wird durch die Pipe-Objekte PV-CORE-I für die innere und mittlere Brennstabzone und PV-CORE-O für die äußere Brennstabzone dargestellt sowie durch das Cross Connection-Objekt PV-CORE-C für den Queraustausch zwischen den parallelen Zonen. Die beiden Objekte PV-CORE-I und PV-CORE-O sind bis auf die Parallelkanalfaktoren 0,5096 und 0,4904 identisch. Das obere Plenum in Höhe der heißen Stränge wird analog zur Kernmodellierung durch die Branch-Objekte PV-UP-B-I und PV-UP-B-O sowie das sie verbindende Single Junction Pipe PV-UP-B-C dargestellt. Durch die Methode der Parallelkanalaufteilung kann bei der Heißeinspeisung das Notkühlwasser in Übereinstimmung zu den Experimenten besser zum Kern vordringen. Die vier Deckelraum-Bypassleitungen werden mit den Pipe-Objekten PV-BYP1 bis PV-BYP4 nachgebildet. Das obere Plenum oberhalb der heißen Stränge und der Deckelraum werden durch die Pipe-Objekte PV-UH1-I und PV-UH1-O, das Cross Connection-Objekt PV-UH1-C, das Branch-Objekt PV-UH2 und das Pipe-Objekt PV-UH3 dargestellt. Die Pipe-Objekte PV-UH1-I und PV-UH1-O sind im unteren Teil mit dem entsprechenden Anteil des Strömungsquerschnitts an das innere Objekt PV-UP-B-I und das äußere Objekt PV-UP-B-O gekoppelt. Der genaue Anfangsfüllstand im Stabbündelbehälter wird im Eingabedatensatz mit der an das untere Plenum gekoppelten Fill-Komponente PV-DRAIN eingestellt.

Die Strukturen und Einbauten des RDB werden durch 35 Wärmeleitobjekte nachgebildet. Die drei Kernzonen mit insgesamt 314 elektrisch beheizten Stäben werden mit den Wärmeleitobjekten HPV-COR1, HPV-COR2 und HPV-COR3 simuliert. Aufgrund der radialen Aufteilung von Kern und oberem Plenum ist HPV-COR1 an PV-CORE-O gekoppelt, HPV-COR2 und HPV-COR3 an PV-CORE-I. Die Außenwände werden dem äußeren Bereich PV-CORE-O zugeordnet. Die Strukturen der Steuerstabführungsrohre werden berücksichtigt.

Das Objektschema und die Nodalisierung der PKL-Loops mit Anschlusssystemen sind in Bild 3.4.1-3 bis Bild 3.4.1-6 wiedergegeben.

Die vom Branch-Objekt PV-UP-B-O ausgehenden Kühlmittelschleifen werden unter Vernachlässigung der Geometrieunterschiede zwischen den Kühlmittelschleifen durch vier identische Einzelloops nachgebildet. Ober- und Unterkante des Objekts PV-UP-B-O sind dem Durchmesser der angeschlossenen heißen Stränge angepasst, um den Volumendampfgehalt im Objekt PV-UP-B-O als physikalisch sinnvolle Randbedingung bei horizontaler Strömung in den heißen Strängen verwenden zu können.

Die Kühlmittelschleifen werden durch je sieben aneinander gereihte Thermofluid-Objekte modelliert. Die Rohrleitungsführung ist zur Erfassung der Naturumlaufphänomene im Detail nachgebildet. Die heißen Stränge Pn-HL (n = Loopindex) und die kalten Stränge Pn-CL der Hauptkühlmittelleitungen werden mit Hilfe von Pipe-Objekten und die DE-Eintrittskammern Pn-SG-IN sowie die Austrittskammern Pn-SG-OUT mit Branch-Objekten dargestellt. Mit den Pipe-Objekten Pn-SG-S, Pn-SG-M und Pn-SG-L (mit n = 1 bis 4) werden die 28 U-Rohre der vier Dampferzeuger zu je drei U-Rohrgruppen mit unterschiedlicher Länge und Höhe zusammengefasst, um das Anlaufen des Naturumlaufs beim Wiederauffüllen besser erfassen zu können. Die Pipe-Objekte Pn-SG-S bestehen aus 6 kurzen U-Rohren, die Pipe-Objekte Pn-SG-M aus 18 U-Rohren mittlerer Länge und die Pipe-Objekt Pn-SG-L aus 4 langen U-Rohren. Diese Pipe-Objekte enthalten in Abhängigkeit von ihrer Länge 20, 22 und 26 Kontrollvolumen.

Das Ansammeln von ausgegaster Luft bzw. von Stickstoff in den U-Rohrbögen könnte mit den Fill-Komponenten Pn-US-GAS, Pn-UM-GAS und Pn-UL-GAS simuliert werden.

Die Formverlustbeiwerte und die Geometrie der Hauptkühlmittelpumpen einschließlich der geringen Überhöhung am Pumpenaustritt, die das Rückströmen des Kühlmittels aus dem waagerechten Teil des kalten Stranges in die Pumpenbögen verringert, werden berücksichtigt, weiterhin die Drosselklappen zur Simulation des Strömungswiderstandes der stehenden Hauptkühlmittelpumpen.

Die Modellierung für das Leckausströmsystem besteht aus dem Single Junction Pipe P1-BREAK für das kleine Leck im kalten Strang, aus dem Pipe-Objekt P1-BREAKL für die Leitung hinter der Leckdüse und aus dem 'Time Dependent Volume' P1-ABSCH2 für den Auffangbehälter. Die kritische Strömung im Single Junction Pipe P1-BREAK wird mit Hilfe einer vom Critical Discharge-Programm erzeugten CDR-Tabelle berechnet.

Die an die Schleife 2 anbindende Volumenausgleichsleitung und der Druckhalter werden mit den Pipe-Objekten P0-SURGE und P0-PRESS dargestellt und die Druckhalter-Ventilstation mit dem Pipe-Objekt P0-DHV/1. Die Ventilstation blieb beim Versuch PKL III E2.2 geschlossen. In der Volumenausgleichsleitung wird zur Berechnung der beim Abblasen auftretenden Zweiphasenströmung eine feine Nodalisierung unter Einhaltung der Empfehlungen für das "Full Range Drift-Flux"-Modell verwendet. Der genaue Anfangsfüllstand im Druckhalter wird im Eingabedatensatz mit der an den unteren Druckhalterbereich gekoppelten Fill-Komponente PR-DRAIN eingestellt.

Weil beim Versuch PKL III E2.2 die Druckspeicher nicht im Einsatz waren, wurden sie nicht simuliert.

Von den primärseitigen Anschlusssystemen waren beim Versuch PKL III E2.2 die in die kalten Stränge 1 und 2 einspeisenden Hoch- Niederdrucksysteme in Betrieb. Diese Anschlusssysteme werden im Eingabedatensatz mit Hilfe von Fill-Komponenten modelliert. Die erforderlichen Randbedingungen (Massenstrom, Enthalpie) werden über GCSM-Optionen vorgegeben.

Die Strukturen der heißen und kalten Stränge, der DE-Ein- und Austrittskammern, der DE-Rohrböden, der U-Rohre, der Hauptkühlmittelpumpen, der Volumenausgleichsleitung (Surgeline) und des Druckhalters werden im Modell berücksichtigt. Die Leistung für die Pumpenkühlung wird über die Struktur der Hauptkühlmittelpumpen abgeführt und die Leistung der Messinstrumentenkühlung über die HEATADD-Option direkt aus dem Kühlmittel der heißen Stränge und der Downcomer-Rohre.

Das Objektschema und die Nodalisierung der DE-Sekundärseiten der PKL III-Anlage sind in Bild 3.4.1-3 bis Bild 3.4.1-6 wiedergegeben.

Die Nachbildung der DE-Sekundärseiten wird durch sieben Thermofluid-Objekte pro Dampferzeuger realisiert, nämlich durch die Downcomer-Objekte Sn-DCT, Sn-DC1, Sn-DC2 (externe Downcomer-Rohre) und Sn-DC3, das Riser-Objekt Sn-RISER, das Separatorobjekt Sn-SEP und das Dampfraum-Objekt Sn-DOME. Die beiden Downcomer-Rohre wurden zusammengefasst. In den Downcomer-Objekten Sn-DCT, Sn-DC1 und Sn-DC2 wird das Gemischspiegelmodell angesetzt. Weil bei Rechnungsbeginn auf der Sekundärseite kein Umlauf vorhanden war, konnte auf die Verwendung des Separatormodells verzichtet werden.

Die über das Branch-Objekt S0-COLL gekoppelten Hauptdampfleitungen des Frischdampfsystems LBA werden mit den Pipe-Objekten Sn-MSL nachgebildet. Der Frischdampf-Sammler S0-COLL ist über die Single Junction-Pipe S0-LINETV mit dem 'Time Dependent Volume' S0-TV gekoppelt, wobei durch Vorgabe des experimentellen Druckverlaufs das sekundärseitige Abfahren mit 100 K/h simuliert wird.

Das Dampferzeuger-Abschlämmsystem LCQ wird im Eingabedatensatz mit den Fills Sn-LCQ am unteren Ende der Downcomer Sn-DC3 simuliert. Beim Versuch war dieses System nicht in Betrieb, es wird aber bei der Rechnung während der Einschwingtran-

siente zur Einstellung des sekundärseitigen Anfangsfüllstands herangezogen. Die Leitungen des Speisewassersystems LAB von den Ringleitungen in den Downcomern bis zu den Ankopplungsstellen für das neue Speisewassersystem LABZ werden mit den Pipe-Objekten Sn-FW/4, Sn-FW/3 und den Branch-Objekten Sn-FW/2 simuliert, die Einspeisung der Speisewasserpumpen mit den Fill-Objekten Sn-FW/1. Das neue Speisewassersystem LABZ war beim aktuellen Versuch nicht angekoppelt.

Die Strukturen der Dampferzeugersekundärseiten mit den angekoppelten Dampf- und Speisewassersystemen wurden berücksichtigt.

3.4.2 FLUBOX-3D Diskretisierungsmodell für Validierungsrechnungen zu UPTF-TRAM-Versuchen

Eine typische FLUBOX-Nodalisierung des UPTF-TRAM-Ringraums zusammen mit dem unteren Plenum und Teilen des Kerns liegt zwischen 26.000 und 56.000 diskreten Gitterpunkten.

Als Beispiel für ein FLUBOX-Diskretisierungsmodell wurde das für die Nachrechnung des Versuchs UPTF-TRAM C3 verwendete Diskretisierungsmodell ausgewählt.

Der Analyse des TRAM-Experiments C3 mit der 3D-Option in FLUBOX liegt eine vereinfachte Nachbildung der UPTF-TRAM-Anlage zugrunde /RIN 04/. Die Modellierung des Primärsystems beschränkt sich auf den Druckbehälter, der ohne die Komponenten oberes Plenum und Deckelraum abgebildet wurde.

Die Einbauten der Versuchsanlage wurden bei der Abbildung nicht berücksichtigt, z. B. das Strömungshindernis der Ringraumdurchdringung der Heißstränge. Die Spaltweite des Ringraums, die sich im oberen Bereich auf 210 mm verjüngt, wurde einheitlich mit 250 mm modelliert. Die Bypässe an der Ringraumdurchdringung der Heißstränge wurden mittels einer Strömungsrandbedingung als Auslässe aus dem Ringraum modelliert. Ebenfalls mit Hilfe einer Strömungsrandbedingung wurden die Einspeisestutzen für Kondensat und Notkühlwasser als Einlässe in den Ringraum nachgebildet. Der Wasserabzug aus der Versuchsanlage wurde als Auslass am Kernaustritt mittels einer Druckrandbedingung simuliert.

Die Diskretisierung des FLUBOX-Rechenraums in einem kartesischen Gitter umfasst 26740 Punkte. Bild 3.4.2-1 und

Bild **3.4.2-2** zeigen das verwendete Gitter in Längs- und Querschnitten des Druckbehälters. Die Geometrie der Versuchsanordnung wird mit dieser groben Diskretisierung nur näherungsweise erfasst. So ist z. B. über den Umfang des Ringraums kein einheitlicher Strömungsquerschnitt gegeben.

3.4.3 UPTF-Nodalisierungsmodell für die Validierungsrechnung mit ATHLET

Das Nodalisierungsmodell für die UPTF-Testanlage stützt sich hauptsächlich auf einen Eingabedatensatz für die Nachrechnung des UPTF-TRAM C3-Versuchs, der in /BUR 03a/ dokumentiert ist. Weil dieser Basisdatensatz keine Modellierung der heißen Stränge der vier Loops umfasste, wurde dafür auf einen Datensatz für den UPTF-TRAM B1-Versuch /KIR 96/ zurückgegriffen. Zusätzlich wurden zu Vergleichszwecken ein UPTF TRAM A6-Datensatz /LER 06/ sowie die Konstruktionszeichnungen in /EMM 88/ herangezogen.

Im Eingabedatensatz sind der Testbehälter und die vier Stränge (Loops) modelliert. Heiße und kalte Stränge sind dabei getrennt, da die Pumpensimulatoren während der Versuche geschlossen waren. Eine Übersicht über die Nodalisierung der UPTF-Testanlage gibt Bild 3.4.3-1. Hilfssysteme wie die NKW-Einspeisung (System JNG), die Dampfeinspeisung in den Kernsimulator (System JKG) oder die Drainage aus dem unteren Plenum (System KTA06) werden als Randbedingungen über das Modul GCSM dargestellt. Dies gilt auch für die Simulation des großen Lecks im gebrochenen kalten Strang. Hier werden der Wasserseparator (JEA05) und die angeschlossenen Systeme wie Containment-Simulator (System JMP) und Wassersammeltank (System KTA) durch eine über GCSM gesteuerte "p-H"-Boundary simuliert.

Der Testbehälter wurde in vier Zonen unterteilt.

- **Oberes Plenum und Deckelraum:** Der Deckelraum wird mit einem Objekt (PV-UH, BRANCH-Objekt) dargestellt, das obere Plenum ist in zwei Bereiche geteilt. Ein Bereich befindet sich oberhalb der heißen Stränge (PV-UP-T) und ein Bereich auf Höhe der heißen Stränge (PV-UP, BRANCH-Objekt). Damit sind alle vier

heißen Stränge mit demselben Objekt im oberen Plenum verbunden. Eine detaillierteren Überblick gibt Bild 3.4.3-2.

- **Kernsimulator:** Der Kernsimulator wird in zwei Bereiche aufgeteilt. Das untere Viertel steht als Kerneintritt mit den TFOs des unteren Plenums in Verbindung und wurde daher als BRANCH-Objekt modelliert (CORE-IN), der Rest ist als einfaches Pipe-Objekt (V-CORE) dargestellt. Einen detaillierteren Überblick – insbesondere in Hinblick auf die Verteilung der Kontrollvolumina im Kernsimulator – gibt Bild 3.4.3-2.

- **Ringraum (Downcomer)**: Die Modellierung des Downcomers mit acht parallelen Kanälen /BUR 03a, BUR 03b/ entspricht den heutigen Anforderungen an Eingabedatensätze, um die komplexen und turbulenten 2-Phasen-Strömungen, die in diesem Bereich auftreten, simulieren zu können. Dabei besteht jeder Kanal aus drei Objekten. Die Querströmungen in den Objekten oberhalb der kalten Stränge (PV-DC1T bis PV-DC8T) wird durch sogenannte CROSS-CONNECTION-Objekte ermöglicht. Auf der Höhe der Anschlussstutzen der kalten Stränge enthält jeder Kanal ein BRANCH-Objekt (PV-DCM1 bis PV-DCM8), wobei die Querströmung hier durch Single Junction Pipes ermöglicht wird. Da die Hälfte dieser BRANCH-Objekte analog zur Anlage durch einen heißen Strang begrenzt wird, haben nur die davon nicht betroffenen "Single-Junction-Pipe"-Verbindungen SJDM23 (von PV-DCM2 zu PV-DCM3) und SJDM67 (von PV-DCM6 zu PV-DCM7) einen vollen Strömungsquerschnitt, für die anderen Querverbindungen ist dieser vernachlässigbar gering. Der Rest des Kanals unterhalb der Loops bis zum unteren Plenum ist jeweils in einem Objekt (PV-DCB1 bis PV-DCB8) zusammengefasst. Querströmungen werden wiederum durch CROSS-CONNECTION-Objekte ermöglicht. Eine Übersicht über die genaue Ringraumnodalisierung eines Kanals an einem heißen Strang und eines Kanals, der mit einem kalten Strang in Verbindung steht, findet sich in Bild 3.4.3-3. Eine schematische Darstellung der acht Kanäle im Ringraum und der Einbindung der vier kalten Stränge in die Kanäle zeigt Bild 3.4.3-4.

- **Unteres Plenum:** Für die Darstellung des unteren Plenums wurde auf die detaillierte Modellierung in /BUR 03a/ zurückgegriffen. Dort war das untere Plenum vertikal in zwei Ebenen geteilt. Der untere Bereich (Höhe 1,2 m) wurde durch ein Objekt dargestellt (LPB, BRANCH-Objekt), der obere Bereich (Höhe 1,3 m) durch

insgesamt 17 Einzelvolumina (LP01 bis LP17, BRANCH-Objekte), die in zwei Ringen mit je 8 Volumina und einem Zentralkanal angeordnet und durch Single Junction Pipes untereinander verbunden waren. Im Unterschied zu UPTF TRAM C3 ist das untere Plenum im UPTF 7-Versuch nur zum Teil mit Wasser gefüllt, und es gibt gleichzeitig eine horizontale Dampfströmung aus dem Kern zum Ringraum und weiter zum gebrochenen kalten Strang. Diese Dampfströmung benötigt ein bestimmtes Mindestvolumen, so dass – abhängig von Druck und Dampfeinspeiseraten – ab einem Füllstand von etwa 2,1 m im unteren Plenum kein weiteres Wasser aus dem Ringraum ins untere Plenum gelangen kann. In diesem Fall wird der Wasserspiegel durch die Dampfströmung begrenzt und herabströmendes Wasser in den Downcomer mitgerissen, so dass sich dort größere Mengen saturiertes Wasser ansammeln. Um dieses Verhalten angemessen modellieren zu können, musste der obere Bereich des unteren Plenums nochmals aufgeteilt werden, so dass das untere Plenum nunmehr insgesamt drei Ebenen aufweist. Jeder der 17 Kanäle im unteren Plenum wurde in einen unteren Bereich (LP01 bis LP17, BRANCH-Objekte, Höhe jeweils 0,8 m) und einen oberen Bereich (LP01U bis LP17U, BRANCH-Objekte, Höhe jeweils 0,48 m) unterteilt und die notwendigen Single Junction Pipes ergänzt. Das unterste Volumen (LPB, BRANCH-Objekt) des unteren Plenums blieb unverändert. Einen Überblick über die Nodalisierung in den oberen zwei Ebenen des unteren Plenums gibt Bild 3.4.3-5.

Für die Simulation der kalten Stränge wurden die Daten aus /BUR 03/ verwendet. Da auf Grund des Versuchsablaufs in UPTF Test Nr. 7 auch das Volumen der heißen Stränge berücksichtigt werden musste, wurden die dafür notwendigen Angaben dem Datensatz zu UPTF TRAM B1 /KIR 96/ (vgl. auch /LER 06/) entnommen. Anstatt des dort zum Teil verwendeten Separator-Modells für das 5-Gleichungsmodell wurden einfache Pipes ohne Wasserabscheidung gewählt. Dies ist zulässig, weil die Wasserseparatoren in den intakten Strängen und im gebrochenen heißen Strang im Experiment keine oder nur vernachlässigbare Wassermengen aus dem System entfernt hatten. Einen Überblick über die Nodalisierung eines intakten Strangs gestattet Bild 3.4.3-6. Der Wasserseparator im gebrochenen kalten Strang wurde als p-H-Boundary mit dem Modul GCSM näherungsweise abgebildet, dabei schließt das Ersatzvolumen direkt an das Leckventil JEC06AA01 an. Der gebrochene Strang ist in Bild 3.4.3-7 abgebildet.

4 Validierung des Rechenprogramms ATHLET und des Moduls FLUBOX-3D im Vorhaben RS1155

Mit dem Rechenprogramm ATHLET wurden von der GRS im Vorhaben RS1155 Rechnungen zu den Integralexperimenten PKL III E2.2, E3.1 und E2.3 sowie zum Einzeleffektversuch UPTF 7 durchgeführt. Mit dem ATHLET-Modul FLUBOX-3D wurden die Einzeleffektversuche UPTF-TRAM C3/Versuchslauf 13a und C1/Versuchslauf 1a01 nachgerechnet.

4.1 Nachrechnung des Integralexperiments PKL III E2.2 mit ATHLET

Der in /MUL 02/ dokumentierte Versuch PKL III E2.2 behandelt ein Störfallszenario mit einem kleinen Leck (32 cm^2) im kalten Strang 1 und zwei kaltseitig einspeisenden Sicherheitseinspeisepumpen, bei dem sich beim DWR nach ca. einer halben Stunde nach Störfalleintritt bei einem Primärdruck von 40 bar ein minimaler Füllungsgrad des Primärkreises mit Wärmeabfuhr im "Reflux Condenser"-Betrieb einstellen würde. Die hierbei anfallenden erheblichen Kondensatmengen könnten nach dem Wiederauffüllen des Primärkreises durch den anlaufenden Naturumlauf zum Kern transportiert und zur lokalen Rekritikalität mit entsprechenden Kernschäden führen. Die Hauptphase des Versuchs wurde nach einer Vorlaufphase (Konditionierungsphase) im "Reflux Condenser"-Betrieb mit dem Öffnen des Lecks in Loop 1, dem Einsetzen der Hochdruckeinspeisung in die kalten Stränge 1 und 2 und dem Beginn des sekundärseitigen Abfahrens mit 100 K/h eingeleitet. Der Versuch sollte einen Beitrag zur Deborierungsproblematik leisten und zeigen, ob der Naturumlauf nach dem Wiederauffüllen (kaltseitige Hoch- und Niederdruckeinspeisung in die Loops 1 und 2) symmetrisch oder asymmetrisch anläuft und in welcher Größenordnung. Weiterhin sollte abgeschätzt werden, wie viel Kondensat in den Druckbehälter gelangt und in welchem zeitlichen Ablauf.

Als Basis für die in /STE 04/ dokumentierte, aktuelle Nachrechnung des Versuchs PKL III E2.2 diente der für eine erste Nachrechnung entwickelte Eingabedatensatz (siehe /STE 03c/). Das verwendete Nodalisierungsmodell ist mit dem in Kap. 3.4.1 beschriebenen und in Bild 3.4.1-1 bis Bild 3.4.1-6 dargestellten Nodalisierungsmodell identisch. Die Versuchsanlage wird in Kap. 2.1 ausführlich beschrieben.

Folgende, zum Teil mit Hilfe von Parameterrechnungen erarbeitete Modifikationen wurden für die abschließende Störfallrechnung durchgeführt:

- Verbesserung und Korrektur der Modelle zur Berechnung des primärseitigen Kühlmittelverlusts (Leckausströmung + Drainagesystem zur Einstellung des stationären DH-Füllstands).
- Verwendung des Thermofluiddynamik-Modells mit 6 Grundgleichungen zur Berechnung der Strömungsvorgänge in den Loops (im Basisdatensatz Thermofluiddynamik-Modell mit 5 Grundgleichungen).
- Verwendung von unterschiedlichen Leckausströmfaktoren, in der Vortransiente mit dem Wert 1,61 (Kompensation des beim Experiment unkontrollierten Eindringens von kaltem Pumpensperrwasser über ein Dichtungsleck) und in der Haupttransiente mit dem Wert 0,65.
- Verwendung des Eingabewertes CMUC20=10,0^{-15} zur Verminderung der Dampfkondensation in den oberen Anlagenbereichen (Thermofluid-Objekte PV-UH1-I, PV-UH1-O, PV-UH2, PV-UH3, PV-BYP1 bis PV-BYP4, PV-DC-C1 bis PV-DC-C6 und P0-PRESS) mit Hilfe des Eingabewerts CMUC20=10,0^{-15} (Zubinden der modifizierten Routine MGAM0 bei Verwendung des neuen Kondensationsmodells IGVK=2 notwendig).

Zusätzlich wurde ein „spezieller" Eingabedatensatz entwickelt, bei dem in den Thermofluid-Objekten PV-UH1-I, PV-UH1-O, PV-UH3 das Gemischspiegelmodell aktiviert, die Kondensation an der Gemischspiegeloberfläche ausgeschaltet und auf den Eingabewert CMUC20=10,0^{-15} verzichtet wird. Zur Verhinderung der Kondensation des an den heißen Strukturen unterhalb der Gemischspiegels erzeugten Dampfes am kalten Wasser mussten beim Rechenlauf die vom Entwickler modifizierten Routinen DFKME und GCOEV zugebunden werden.

Ziele der Versuchsnachrechnung mit ATHLET Mod 2.0 Cycle A waren die Überprüfung des Thermofluiddynamik-Modells auf der Basis von 6 Grundgleichungen (6-Gleichungsmodell) im Hinblick auf das Wiederanlaufen des Naturumlaufs, die Überprüfung des Kondensationsmodells mit den neuen Einspeisemodellen, die den Einfluss der Geometrie an der Einspeisestelle auf die Dampfkondensation am Einspeisestrahl und dessen Impulseintrag (Eingabeoption: INJECTION) berücksichtigen, weiterhin die Überprüfung des Bortransportmodells. Zusätzlich sollte im Rahmen einer Parameterrechnung mit dem „speziellen" Eingabedatensatz mit aktiviertem Gemischspiegel-

modell überprüft werden, ob während der Wiederauffüllphase das Gemischspiegelmodell in Verbindung mit den vom Entwickler modifizierten Routinen DFKME und GCOEV zur Simulation der reduzierten Dampfkondensation in den oberen Anlagenbereichen bereits geeignet ist.

Der Vergleich der gerechneten und der experimentellen Ergebnisse zeigt, dass mit ATHLET der ganze Störfallablauf mit einer Vorlaufphase (Konditionierungsphase) mit "Reflux Condenser"-Betrieb zur Ansammlung der erforderlichen Kondensatmengen in den Pumpenbögen und der Hauptphase mit Druckabsenkung durch Öffnen des Primärlecks und durch sekundärseitiges Abfahren, Wiederauffüllen der Primärseite durch kaltseitige Einspeisung der HD- und ND-Sicherheitseinspeisepumpen sowie Anlaufen des Naturumlaufs mit den nachfolgenden Einschränkungen simuliert werden konnte.

Bei der Parameterrechnung mit dem „speziellen" Eingabedatensatz und Zubinden der vom Entwickler modifizierten Routinen DFKME und GCOEV wurde im Zeitbereich zwischen ca. 3000 und 6000 s ein im Vergleich zum Experiment zu niedriger Primärdruck- und DH-Füllstandsverlauf berechnet. Ein zufrieden stellendes Ergebnis ist bei dieser Parameterrechnung lediglich beim Füllstandsverlauf im Stabbündelbehälter festzustellen. Die kurzfristig vorgenommenen Entwicklungsarbeiten haben damit noch nicht den gewünschten Erfolg gebracht und wurden in der abschließenden Störfallrechnung nicht berücksichtigt.

In den Bildern 4.1-1 bis 4.1-10 werden ausgewählte Ergebnisse der abschließenden Störfallrechnung und des Experiments verglichen. Die Ergebnisse der Rechnung sind mit "ATHLET" und die des Experiments mit "MSt" bzw. "MST" gekennzeichnet.

Bei der abschließenden Störfallrechnung ergibt sich beim primärseitigen Druckverlauf (Bild 4.1-1) sowie bei den Füllständen im Druckbehälter (Bild 4.1-2) und im Druckhalter (Bild 4.1-3) auch im Zeitbereich zwischen ca. 3000 und 6000 s im Vergleich zum Experiment eine insgesamt zufrieden stellende Übereinstimmung. Allerdings muss die Dampfkondensation in den oberen Anlagenbereichen mit dem Kondensationsfaktor CMUC20=$10{,}0^{-15}$ (Eingabewert) nahezu vollständig reduziert werden. Im Vergleich zur ersten Nachrechnung /STE 03c/ steigt der errechnete Primärdruck jetzt in Übereinstimmung zum Experiment nach dem Wiederauffüllen auf über 20 bar an, während er bei der ersten Rechnung in der Wiederauffüllphase aufgrund eines zu hohen Kühlmittelverlusts und einer Überschätzung der Dampfkondensation im Druckhalter, im oberen Plenum und im Deckelraum nur einen Maximalwert von ca. 10 bar erreichte. Außerdem

wurde bei der ersten Nachrechnung der Deckelraum im Gegensatz zum Experiment und zur aktuellen Nachrechnung vollständig aufgefüllt.

Wie aus dem Vergleich der gerechneten und gemessenen Füllstände in den Loops zu erkennen ist, werden in der Vortransiente bei der Rechnung die DE-seitigen Bereiche der Pumpenbögen und die heißen Stränge mit den DE-U-Rohren unzureichend entleert. Weiterhin wird in der Vortransiente das deutliche asymmetrische Füllstandsverhalten des Experiments, d. h. stärkere Entleerung der Loops 3 und 4 im Vergleich zu den Loops 1 und 2, von der Rechnung nicht wiedergegeben. Das Wiederauffüllen der vier Loops und der DE-U-Rohre wird hingegen zufrieden stellend simuliert (Bild 4.1-4, Bild 4.1-5). Zur Simulation des beim Experiment asymmetrischen Füllstandsverhaltens in den heißen Strängen wäre es wahrscheinlich besser, eine Aufteilung des Branch-Objekts PV-UP-B-O in vier oder sechs gekoppelte azimutale Segmente vorzunehmen. Allerdings müssten dann auch die Objekte PV-UH1-O, PV-CORE-O und PV-REF entsprechend aufgeteilt werden, wodurch sich die Rechenzeit deutlich erhöht.

Die gerechneten und gemessenen Fluidtemperaturen im Ein- und Austrittsbereich der Dampferzeuger und in den Pumpenbögen stimmen im gesamten Zeitbereich in etwa überein. Die mit dem Einsetzen der Niederdruckeinspeisung auftretenden Unterschiede zwischen Rechnung und Experiment beschränken sich aufgrund der großen Abweichungen beim Anlaufen des Naturumlaufs in den bespeisten Loops auf den Ein- und -austrittsbereich von DE2 und die Pumpenbögen der bespeisten Loops. Die sich beim Experiment während der Vortransiente in den Pumpenbögen ausbildenden Temperaturprofile mit kälterem Wasser in den pumpenseitigen Bereichen der Pumpenbögen konnten nicht simuliert werden, weil im Eingabedatensatz eine gleichmäßige Verteilung der Wärmeverluste angenommen und das aufgrund eines Dichtungslecks in geringer Menge eingedrungene Pumpensperrwasser nicht berücksichtigt wird. Außerdem ist in den horizontalen Bereichen der Pumpenbögen die Simulation von vertikalen Temperaturprofilen durch den eindimensionalen Modellansatz beim Thermofluiddynamik- und beim Strukturwärmemodell nicht möglich. Das Vordringen von Notkühlwasser in die Pumpenbögen 1 und 2 konnte mit Einschränkungen simuliert werden.

Bei den Fluidtemperaturen in den kalten Strängen am Eintritt zum Ringraum ist insgesamt eine zufrieden stellende Übereinstimmung zwischen Rechnung und Messung festzustellen. Weil ein Teil des eingespeisten Notkühlwassers der HD-Sicherheitseinspeisung über das Leck ausgetragen wird und damit den Ringraum nicht erreicht, liegt im Zeitbereich von 0 bis 3000 s das Temperaturniveau im kalten Strang 1 beim

Experiment ca. 70 K über dem im kalten Strang 2. Dieses Phänomen wird auch von der Rechnung qualitativ richtig wiedergegeben. Die Temperaturdifferenz beträgt aber ca. 120 K, weil bei stratifizierter Strömung im Bereich des Ringraums und der kalten Stränge das Kondensationsmodell die Dampfkondensation und damit die Aufwärmung des Wassers überschätzt.

Der als Folge der HD-Sicherheitseinspeisung einsetzende Temperaturabfall im Kern konnte gerechnet werden. Im Experiment beginnt der verstärkte Temperaturabfall im unteren Kernbereich bei ca. 2200 s, in der Rechnung ca. 460 s später. Im Kernaustrittsbereich setzt bei Rechnung und Experiment der verstärkte Temperaturabfall übereinstimmend bei ca. 3000 s ein (Bild 4.1-6).

Ein wichtiges Untersuchungsziel des Versuchs PKL III E2.2 war das Anlaufen des Naturumlaufs in den 4 Primärkreisloops und dem damit verbundenen Transport von Kondensat bzw. niedrig boriertem Wasser zum Ringraum nach dem Wiederauffüllen des Primärkreises.

In den beiden nicht bespeisten Loops 3 und 4 läuft beim Experiment der stabile Naturumlauf bei ca. 3300 und 3020 s gestaffelt an, in der Rechnung in beiden Loops bei ca. 3340 s (Bild 4.1-7, Bild 4.1-8). Das in den Pumpenbögen 3 und 4 angesammelte Kondensat bzw. niedrig borierte Wasser erreicht beim Experiment bei ca. 3400 und 3050 s die Bormessstellen in den kalten Strängen am Eintritt zum Ringraum, in der Rechnung bei ca. 3380 s und 3410 s. Damit werden das Anlaufen des Naturumlaufs in den beiden nicht bespeisten Loops sowie der Transport von Kondensat bzw. niedrig boriertem Wasser zum Ringraum von der Rechnung wiedergegeben, allerdings im Vergleich zum Experiment praktisch ohne Staffelung. Im Hinblick auf den Transport von Kondensat in Richtung Kern und eine mögliche Rekritikalität ist dieses Rechenergebnis aber konservativ.

Erhebliche Unterschiede zwischen Rechnung und Experiment treten beim Anlaufen des Naturumlaufs in den Loops 1 und 2 auf. Beim Experiment läuft der Naturumlauf in Loop 1 und 2 bei 3830 und 6450 s an, in der Rechnung bei ca. 5040 und 3310 s.

In den beiden nicht bespeisten Loops lief bei der ersten Nachrechnung /STE 03c/ der stabile Naturumlauf gleichzeitig bei ca. 3560 s an, in Loop 1 bei ca. 3830 s und in Loop 2 bei ca. 6110 s. Damit wurde bei der aktuellen Nachrechnung im Hinblick auf das Anlaufen des Naturumlaufs in den nicht bespeisten Loops eine Verbesserung er-

zielt und im Hinblick auf das Anlaufen des Naturumlaufs in den bespeisten Loops eine Verschlechterung. Wie aber die Ergebnisse aus Rechnung und Experiment zeigen, ist für den Transport von Kondensat bzw. niedrig boriertem Wasser zum Ringraum nur der Naturumlauf in den nicht bespeisten Loops relevant.

Möglicherweise könnte durch eine Aufteilung des Branch-Objekts PV-UP-B-O, an das im Nodalisierungsmodell die vier heißen Stränge gekoppelt sind, in vier oder sechs gekoppelte azimutale Segmente neben dem Füllstandsverhalten in den Loops auch das Anlaufen des Naturumlaufs in den bespeisten Loops besser simuliert werden.

Wie aus dem Vergleich der gerechneten und gemessenen Borgehalte (Bild 4.1-9, Bild 4.1-10) hervorgeht, werden vom Bortransportmodell teilweise unrealistisch hohe, lokale Borgehalte berechnet, die nach dem Anlaufen des Naturumlaufs zu Borgehaltsspitzen von bis zu 6000 ppm im Vergleich zu 2500 ppm beim Experiment führen. Eine kurzfristig vorgenommene Programmänderung (Zubinden der Routine KBORM) brachte noch keine wesentliche Verbesserung.

Abschließend ist festzustellen, dass sich das Thermofluiddynamik-Modell mit 6 Grundgleichungen in Verbindung mit den neuen Kondensations- und Einspeisemodellen sowie mit Einschränkungen das Bortransportmodell bei der Nachrechnung des Versuchs PKL III E2.2 bewährt haben. Im Vergleich zum Experiment wurden insgesamt zufrieden stellende Ergebnisse erzielt. Diese weisen gegenüber der ersten Nachrechnung deutliche Verbesserungen auf. Die Modelle zur Simulation der Dampfkondensation in den oberen Druckbehälterbereichen, das Bortransportmodell sowie das Nodalisierungsmodell müssen noch verbessert werden.

4.2 Nachrechnung des Integralexperiments PKL III E3.1 mit ATHLET

Der in /SCH 03/ dokumentierte Versuch PKL III E3.1 simuliert ein Störfallszenario zum Ausfall des Nachwärmeabfuhrsystems (Loop 1, 3) im 3/4–Loop Betrieb mit geschlossenem Primärkreis, einem betriebsbereiten Dampferzeuger zur Übernahme der langfristigen Nachwärmeabfuhr sowie drei isolierten Dampferzeugern, wovon einer mit Wasser und die beiden anderen mit Luft gefüllt waren. Zur Überprüfung des Einflusses der Akkumulatoreinspeisung auf den Primärkreisdruck wurden nacheinander fünf Akkumulatoreinspeisungen vorgenommen, vier Einspeisungen in die kalten Stränge 1

bis 4 und die fünfte in den heißen Strang 4. Danach wurde das zum Loop 4 gehörende Nachwärmeabfuhrsystem wieder gestartet.

Im Versuch sollten der Wärmetransport vom Kern zu den Sekundärseiten der Dampferzeuger, der primärseitige Druck- und Temperaturanstieg mit Einstellung eines Gleichgewichtszustandes untersucht werden, weiterhin ob die Kriterien für die Wiederinbetriebnahme des Nachwärmeabfuhrsystems (heiße Stränge mit Wasser gefüllt, Temperatur < 180 °C zur Vermeidung von Dampfbildung) erreicht werden. Außerdem sollte der Versuch zeigen, ob es im 'Reflux Condenser'-Betrieb im Pumpenbogen des Loops mit dem aktiven Dampferzeuger tatsächlich zur Ansammlung von niedrig boriertem Wasser aufgrund des Mitrisses oder Überströmens von Kondensat aus dem aufsteigenden in den abfallenden U-Rohrbereich und zur möglichen Verlagerung von niedrig boriertem Wasser zum Ringraum kommt, wie ATHLET-Analysen zum Nichtleistungsbetrieb in DWR-Anlagen prognostiziert hatten. Die Versuchsanlage wird in Kap. 2.1 ausführlich beschrieben.

4.2.1 Nachrechnung im Rahmen des OECD/PKL-Benchmark1

Die in /STE 05c/ dokumentierte Nachrechnung des Versuchs PKL III E3.1 mit der aktuellen Programmversion ATHLET Mod 2.0 Cycle B erfolgte im Rahmen der Teilnahme am OECD/PKL-Benchmark1, das den Störfallbereich bis kurz vor dem Einsetzen der ersten Akkumulatoreinspeisung bei 33095 s umfasst. Ausgewählte Ergebnisse dieser Nachrechnung wurden beim PKL Analytical Workshop vom 11. bis 12. Oktober 2005 in Pisa vorgestellt /STE 05b/.

Neben der allgemeinen Überprüfung des Rechenprogramms anhand eines Störfalls zum ¾-Loop Betrieb und der dabei auftretenden Deborierungsproblematik sollten bei der Rechnung das Thermohydraulikmodell mit 6 Grundgleichungen in Verbindung mit den Modellen zur Simulation des Einflusses nicht-kondensierbarer Gase sowie das Bortransportmodell überprüft werden. Als Basis für die in /STE 05c/ dokumentierte Nachrechnung des Versuchs PKL III E3.1 diente der für die PKL III E2.2-Nachrechnung verwendete Eingabedatensatz, der in Kap. 3.4.1 beschrieben und in Bild 3.4.1-1 bis Bild 3.4.1-6 dargestellt ist. Aufgrund des hohen Aufwands an Rechenzeit mussten allerdings folgende Vereinfachungen durchgeführt werden:

- Einkanal-Modellierung des Kerns und des oberen Plenums,

- Zusammenfassung der beiden primärseitigen Downcomer-Rohre zu einem mittleren Downcomer-Rohr,
- Einkanal-Modellierung des primärseitigen Ringraums.

Zur Berechnung der kollabierten Füllstände in den horizontalen Bereichen der heißen und kalten Stränge wurde ein spezielles GCSM-Modell (GUSER-Option) entwickelt und zugebunden.

Im Rahmen von Parameterrechnungen wurde zuerst der Einfluss des Kondensationsfaktors CMUC20 (Eingabewert, Zubinden der modifizierten Routine MGAM0 notwendig) auf die Kondensation und damit den Füllstandsanstieg im Druckhalter überprüft. Diese Rechnungen zeigen, dass im Druckhalter der Kondensationsfaktor CMUC20 auf einen Wert von $10{,}0^{-15}$ reduziert werden muss, wenn eine gute Übereinstimmung zwischen dem gerechneten und gemessenen Druckhalterfüllstand erreicht werden soll. Weiterhin wurde überprüft, wie sich die vereinfachte Simulation von lokalen sekundärseitigen Zirkulationsströmungen mit Hilfe von volumenlosen Single Junction Pipes (SJPs) parallel zu den normalen Pipe-Objekten für die Steig- und Fallräume auf das sekundärseitige und damit auch auf das primärseitige Temperaturverhalten in den Dampferzeugern auswirkt. Das Ergebnis dieser Rechnungen ist, dass die Verwendung der oben genannten SJPs zur Überschätzung des Temperaturausgleichs zwischen den oberen und unteren Steig- und Fallraumbereichen führt. Über den dadurch verursachten erhöhten Wärmetransport von der Primär- zur Sekundärseite werden zusätzlich die primärseitigen Druck- und Füllstandsverläufe erheblich verschlechtert.

Die abschließende Rechnung wurde deshalb mit CMUC20=$10{,}0^{-15}$ im Druckhalter und ohne Verwendung von SJPs zur Simulation von lokalen sekundärseitigen Zirkulationsströmungen durchgeführt. Die wichtigsten Ergebnisse dieser Rechnung werden im Folgenden zusammengefasst.

In Bild 4.2-1 bis Bild 4.2-10 werden ausgewählte Ergebnisse der abschließenden Störfallrechnung und des Experiments verglichen. Die Ergebnisse der Rechnung sind mit "ATHLET" und die des Experiments mit "MST" gekennzeichnet.

Während der Aufheizphase bis ca. 7000 s stimmt zwar der gerechnete mit dem gemessenen Primärdruck zufrieden stellend überein, doch dann steigt der Druckverlauf in

der Rechnung deutlich schneller an als im Experiments und erreicht bis Rechnungsende einen im Vergleich zum Experiment um ca. 2 bar höheren Wert (Bild 4.2-1). Dieser Druckanstieg ist darauf zurückzuführen, dass bei der Rechnung im Vergleich zum Experiment mehr Dampf aus dem Kern zum aktiven Dampferzeuger 1 strömt, in den Dampferzeuger-U-Rohren kondensiert und damit mehr Kondensat im aufsteigenden Bereich der U-Rohre aufgestaut wird und den Füllstands- und Druckanstieg entsprechend beeinflusst. Sind die Füllstände im aufsteigenden Bereich der kurzen U-Rohre im Dampferzeuger 1 bis zum Scheitelpunkt angestiegen, dann schwappen Kondensatpfropfen in den abfallenden Bereich der kurzen U-Rohre des Dampferzeugers 1 über, wodurch Dampf in den abfallenden Bereich der kurzen U-Rohre strömen kann und die wärmeübertragende Oberfläche im aufsteigenden Bereich der U-Rohre kurzzeitig vergrößert wird. Die Dampfkondensation verstärkt sich dadurch und führt bei gleich bleibender Dampfproduktion im Kern zu einem primärseitigen Druckunterschwinger. Während aber beim Experiment nur ein Druckunterschwinger bei 13450 s beobachtet wird, sind dies bei der Rechnung insgesamt sieben, nämlich bei 9860, 13450, 21090, 24090, 28350 und bei 29890 s. Mögliche Gründe für die Abweichungen hinsichtlich des Druckanstiegs und der Druckunterschwinger sind:

- In der Rechnung sind die primärseitigen Wärmeverluste, speziell auf dem Weg vom Kern zu den Dampferzeugern zu niedrig angesetzt.
- Mit dem Nodalisierungsmodell mit nur einem Strömungskanal in den sekundärseitigen Steig- und Fallräumen wird ein zu niedriger Wärmetransport von der Primär- zur Sekundärseite berechnet. Eine Parallelkanalanordnung mit Querströmung, die lokale Zirkulationsströmungen simulieren kann und damit den Wärmetransport verbessert und erhöht, wäre notwendig.
- In den Dampferzeuger-U-Rohren ist aufgrund der Art, wie der Anfangsfüllstand in den Loops eingestellt wird, zu viel Stickstoff.
- Die Massen der modellierten Primär- und Sekundärkreisstrukturen sind im Eingabedatensatz zu niedrig angesetzt, wie eine erste Überprüfung vermuten lässt.
- Im Eingabedatensatz sind die 6 kurzen U-Rohre in den vier Dampferzeugern zu jeweils einem kurzen U-Rohrbündel mit dem FPARO-Faktor 6 zusammengefasst. Damit kann natürlich das beim Experiment beobachtete oszillierende Verhalten der Füllstände in den 6 kurzen U-Rohren mit abwechselndem Überströmen oder Überschwappen von Kondensatpfropfen /SCH 03/ nicht simuliert werden.

Ein weiterer Grund zumindest für den bei der Rechnung insgesamt zu hohen Primärdruck könnte sein, dass im Primärkreis trotz der genauen Einstellung der Anfangsfüllstände zuviel Stickstoffgas vorhanden ist.

Die kollabierten Füllstände im Stabbündelbehälter (Bild 4.2-2), im Downcomer (Ringraum, DC-Rohre) des Druckbehälters, im Druckhalter (Bild 4.2-3) sowie in den heißen Strängen konnten in etwa in Übereinstimmung zum Experiment gerechnet werden, weiterhin die Füllstände in den U-Rohren der Dampferzeuger und Pumpenbögen 2 bis 4. Ähnlich wie beim Experiment bildet sich bei der Rechnung in den auf- und absteigenden U-Rohren des Dampferzeugers 1 jeweils ein Füllstand aus, der aber in den aufsteigenden U-Rohrbereichen des aktiven Dampferzeugers 1 deutlich überschätzt und in den abfallenden Bereichen nach dem Auffüllen des Pumpenbogens 1 unterschätzt wird (Bild 4.2-4). Im Pumpenbogen 1 steigt bei der Rechnung in Übereinstimmung zum Experiment der dampferzeugerseitige Füllstand bis zu den Dampferzeuger-U-Rohren an und bleibt mit Ausnahme einiger kurzzeitiger Füllstandseinbrüche bis zum Ende des betrachteten Zeitraums in etwa auf diesem Niveau (Bild 4.2-5). Aufgrund der hohen Druckdifferenz zwischen der Ein- und Austrittskammer des Dampferzeugers 1, die sich bei der Rechnung als Folge der hohen Kondensation und des Wasseraufstaus im aufsteigenden Bereich der U-Rohre des Dampferzeugers 1 immer wieder aufbaut, verläuft bei der Rechnung der pumpenseitige Füllstand im Pumpenbogen 1 deutlich unter dem des Experiments. Lediglich in den Phasen des Überströmens von Wasserpfropfen im kurzen U-Rohrbündel und dem daraus resultierenden Druckausgleichs zwischen der Ein- und Austrittskammer des Dampferzeugers 1 steigt der pumpenseitige Füllstand der Rechnung auf den des Experiments an.

Abgesehen vom Anfangszeitbereich der Kernaufheizung weisen von den diskutierten primärseitigen Fluidtemperaturen in den Pumpenbögen, im primärseitigen Downcomer, im Ein- und Austritt des Kerns und im Druckhalter nur die gemessenen und gerechneten Fluidtemperaturen im Ein- und Austrittsbereich des Kerns und im Druckhalter eine insgesamt zufrieden stellende Übereinstimmung auf. Abweichungen ergeben sich bei den Fluidtemperaturen im Kern dadurch, dass beim Experiment aufgrund der Massenverlagerungen im Primärkreis, die durch das Überströmen von Wasserpfropfen in den kurzen U-Rohren des Dampferzeugers 1 ausgelöst werden, nur einmal kälteres Wasser aus dem unteren Plenum in den Kern geschoben wird, das bei ca. 14500 s im Kerneintrittsbereich zu einem markanten Temperaturunterschwinger führt. Dieses Phänomen tritt bei der Rechnung zum ersten Mal auf, wenn bei ca. 3000 s im kurzen

U-Rohrbündel des Dampferzeugers 2 Wasserpfropfen überströmen, dann noch siebenmal, wenn im kurzen U-Rohrbündel des Dampferzeugers 1 bei 9860, 11390, 13450, 21090, 24090, 28350 und 29890 s Wasserpfropfen überströmen (Bild 4.2-6).

Im Druckhalter stimmen die Dampftemperaturen im Zeitbereich bis 15000 s gut mit den Messwerten überein, danach liegen sie entsprechend dem Primärdruckverlauf darüber (Bild 4.2-7).

Zwischen den gerechneten und gemessenen Temperaturverläufen in den sekundärseitigen Steigräumen der mit Luft gefüllten Dampferzeuger 3 und 4 und des aktiven, mit Wasser gefüllten Dampferzeugers 1 (Bild 4.2-8), in dem der Druck als Randbedingung vorgegeben wird, ist im gesamten Zeitbereich eine zufrieden stellende Übereinstimmung festzustellen, im Steigraum des ebenfalls mit Wasser gefüllten Dampferzeugers 2 erst ab ca. 6500 s (Bild 4.2-9). Zu diesem Zeitpunkt hat sich in der Rechnung die im Vergleich zum Dampferzeuger 1 etwas niedrigere Wassersäule im DE2-Steigraum soweit ausgedehnt, dass Wasser aus dem Steigraum kontinuierlich in den Fallraum überströmen kann und aufgrund des einsetzenden sekundärseitigen Naturumlaufs zum Temperaturausgleich zwischen dem kälteren oberen und dem wärmeren unteren Steigraumbereich führt. Im Experiment erfolgt dieser Temperaturausgleich aufgrund von lokalen Zirkulationsströmungen bereits früher. Solche Zirkulationsströmungen lassen sich nur mit einer rechenzeitaufwändigen Parallelkanalmodellierung des Steig- und Fallraums simulieren.

Der Vergleich der gerechneten und gemessenen Borkonzentrationen im Pumpenbogen 1 (Messverfahren COMBO; continuous measurement of boron concentration) sowie in den Downcomer-Rohren und im Kernein- und -austrittsbereich (Probennahmen) zeigt, dass die Borkonzentrationen der Rechnung nur im kurzen Zeitbereich vor dem Einsetzen der Überströmvorgänge in den kurzen U-Rohrbündeln, im Dampferzeuger 2 bei 3000s und im Dampferzeuger 1 ab 9860 s, mit den Messwerten übereinstimmen (Bild 4.2-10). Danach sind die Abweichungen sowohl qualitativ als auch quantitativ beträchtlich. So trat im Experiment durch die Zuströmung von Kondensat aus dem oberen Downcomer-Bereich und dem horizontalen Bereich des kalten Strangs 1, das durch die Kondensation des über die Deckelbypassleitungen zuströmenden Dampfes entstanden war, bei 14500 s am Kerneintritt eine minimale Borkonzentration von ca. 1400 ppm auf. In der Rechnung tritt bei 21090 s ein minimaler Wert von ca. 400 ppm auf, der aber auf die Zuströmung von Kondensat aus dem kurzen U-Rohrbündel im Dampferzeuger 1 bzw. aus dem Pumpenbogen 1 zurückzu-

führen ist. Im Vergleich zum Minimalwert der Messung ist der Wert der Rechnung wenigstens konservativ.

Zur Verbesserung der ATHLET-Ergebnisse ist die Durchführung weiterer Analysen zu empfehlen. Die Rechenzeiten waren auf dem in der GRS vorhandenen LINUX-Rechner allerdings sehr lang. So wurden für den Störfallbereich von 0 bis 33095 s wurden ca. 29 CPU-Tage benötigt.

4.2.2 Nachrechnung im Rahmen des OECD/PKL-Benchmark2

Aufgrund der insgesamt nicht zufrieden stellenden Ergebnisse der beim PKL Analytical Workshop vom 11. bis 12. Oktober 2005 in Pisa vorgestellten Rechnungen zum Versuch PKL III E3.1 hatte das Benchmark-Leitungsgremium empfohlen, die Arbeiten in Form eines OECD/PKL-Benchmark2 mit verbesserten Randbedingungen fortzusetzen. Hierzu wurden von der PKL-Arbeitsgruppe bei AREVA (vorher Framatome) neue Unterlagen erarbeitet und in E-Mails und Berichten an die Teilnehmer am OECD/PKL-Benchmark2 versandt.

Im Rahmen der Teilnahme der GRS am OECD/PKL-Benchmark2 war vorgesehen, ausgehend vom ATHLET-Datensatz für das Benchmark1, die Randwerte

- primär- und sekundärseitige Strukturmassen der PKL-Versuchsanlage,
- primär- und sekundärseitige Wärmeverluste bei niedrigen Temperaturen,
- Strömungsdruckverluste im Primärkreis bei hohen und niedrigen Massenströmen,
- Menge des Stickstoffgases und dessen Verteilung im Primärkreis

schrittweise an die neuen Unterlagen anzupassen und mit Hilfe von Parameterrechnungen deren Einflüsse auf die Analyseergebnisse zu ermitteln.

In einer abschließenden Parameteruntersuchung sollte im Eingabedatensatz noch die Anzahl der kurzen DE-U-Rohre variiert werden, um deren Einfluss auf die Simulation des Wassermitrisses aus den DE-Eintritts- in die Austrittsbereiche zu überprüfen. Weiterhin sollte die Parallelkanalaufteilung der sekundärseitigen Steig- und Fallräume ins Auge gefasst werden (siehe auch Kap. 4.2.1).

Aufgrund des hohen Aufwands für die Anpassung der Eingabedatensätze und die Durchführung von Testläufen konnte im Vorhaben RS1155 nur die erste Parameterrechnung durchgeführt werden, bei der im verwendeten Eingabedatensatz die primär- und sekundärseitigen Strukturmassen an die Angaben in /KRE 06/ angepasst sind. Im Benchmark1-Eingabedatensatz ist die gesamte Strukturmasse der Primär- und Sekundärseite um ca. 19 % geringer als in /KRE 06/. Im korrigierten Benchmark2-Eingabedatensatz stimmt die Strukturmasse mit einer Abweichung von ca. 3 % in etwa mit den Angaben in /KRE 06/ überein, wobei diese eine Unsicherheit von ca. 5 % aufweisen (telefonische Mitteilung der Autoren. Für den Rechenlauf wurde auf dem im Vergleich zum LINUX-Rechner etwas schnelleren, neuen CRAY-Rechner der GRS ein CPU-Zeit von ca. 20 CPU-Tagen verbraucht. Die Ergebnisse dieser ersten Benchmark2-Rechnung (Parameterrechnung) wurden in einem Vortrag für den PKL Analytical Workshop am 8. November 2006 in Budapest zusammengefasst /STE 06b/.

Eine Parameterrechnung, bei der im Eingabedatensatz die äußeren Wärmeverlustfaktoren mit Hilfe von Testrechnungen so lange angepasst wurden, bis die im Wärmeverlust-Bericht /KRE 01/ für eine Fluidtemperatur von 155 °C im Druckhalter und 138 °C im Primär- und Sekundärkreislauf angegebenen Wärmeverluste erreicht waren, konnte im Vorhaben RS1155 zwar noch vorbereitet, aber nicht mehr durchgeführt werden. Es ist zu empfehlen, diese und die anderen oben angesprochenen Parameterrechnungen im Anschlussvorhaben RS1173 fortzusetzen.

In Bild 4.2-11 bis 4.2-15 werden ausgewählte Ergebnisse der abgeschlossenen Benchmark2-Parameterrechnung mit entsprechenden Ergebnissen der in Kap. 4.2.1 diskutierten Benchmark1-Rechnung verglichen(siehe auch STE 06b/). Die Ergebnisse der Benchmark1-Rechnung sind in den Bildern mit "BENCH1 ATHLET", die Ergebnisse der Benchmark2-Rechnung mit "BENCH2-Struc. ATHLET" und die des Experiments mit "MST" gekennzeichnet.

Der Vergleich des gemessenen Druckverlaufs im Druckhalter (P Pressuriser MST 271) mit den entsprechenden Druckverläufen der Benchmark1- und der Benchmark2-Rechnung ("BENCH1 ATHLET" und "BENCH2-Struc. ATHLET") in Bild 4.2-11 zeigt, dass sich allein durch die Anpassung der Strukturmassen der Druckverlauf bereits deutlich verbessert hat. So wurde die Zahl der Druckunterschwinger von 7 auf 2 reduziert und das stabile Druckniveau bei Rechnungsende von 6,3 auf 5,4 bar. Beim Experiment war nur ein langgezogener Druckunterschwinger und ein Enddruck von 4,2 bar zu beobachten. Der errechnete Druckverlauf im Dampfdom des Dampferzeugers 2

wurde ebenfalls verbessert und stimmt gut mit der Messung überein (vgl. "SG2 BENCH2-Struc. ATHLET" mit "P SG2 SEC MST 283" in Bild 4.4-12). Wie bereits in der Benchmark1-Rechnung sind auch in der Benchmark2-Rechnung die Drücke in den mit Luft gefüllten Dampferzeugern 3 und 4 mit den gemessenen Druckverläufen nahezu identisch (vgl. "SG3 BENCH1 ATHLET" und "SG3 BENCH2-Struc. ATHLET" mit "P SG3 SEC MST 285" in Bild 4.4-12).

Wie aus dem Vergleich der gerechneten und gemessenen Druckhalterfüllstände in Bild 4.2-13 hervorgeht, konnte das bereits zufriedenstellende Ergebnis der Benchmark1-Rechnung in der Benchmark2-Rechnung kaum verbessert werden. Der bei ca. 15000 s als Folge des Druckunterschwingers auftretende, geringe Füllstandsabfall wurde auch in der Benchmark2-Rechnung nicht simuliert. Der Verlauf des kollabierten Füllstands im aufsteigenden Bereich des kurzen DE1-U-Rohrs weist dagegen eine deutliche Verbesserung auf (Bild 4.2-14). Vor allem im Zeitbereich ab 10000 s näherte sich im Gegensatz zur Benchmark1-Rechnung der Kurvenverlauf der Benchmark2-Rechnung dem gemessenen Kurvenverlauf an. Die Zahl der kurzzeitigen Füllstandseinbrüche verringerte sich von 6 auf 2. Während dann der gemessene Füllstand kontinuierlich auf einen Wert von ca. 6 m abfiel, blieb bei der Benchmark2-Rechnung gegen Rechnungsende der Füllstand auf einem Niveau von ca. 8,3 m stehen.

Aus dem Vergleich der gerechneten und gemessenen Borkonzentrationen im unteren DE-seitigen Bereich des Pumpenbogens 1 (Bild 4.2-15) ergibt sich, dass auch hier in der Benchmark2-Rechnung gegenüber der Benchmark1-Rechnung ein realistischerer Kurvenverlauf errechnet wurde. Ähnlich wie im Experiment wurde zuerst ein Wasserpfropfen mit niedriger Borkonzentration aus dem aufsteigenden in den abfallenden DE1-U-Rohrbereich und den Pumpenbogen 1 verlagert, in der Benchmark2-Rechnung bei ca. 12370 s im Experiment bei ca. 13680 s, und dann ein Wasserpfropfen mit hoher Borkonzentration, in der Benchmark2-Rechnung bei ca. 14340 s im Experiment bei ca. 14740 s, der zu einer nochmaligen Anhebung der Borkonzentration im Pumpenbogen 1 führte. Aus dem starken Anstieg der Borkonzentration ist zu schließen, dass beim Experiment als Folge des ausgeprägten Druckunterschwingers eine wesentlich größere Masse borierten Wassers verlagert wurde als bei der Benchmark2-Rechnung. Während dann bei der Rechnung die Borkonzentration im Pumpenbogen bis Rechnungsende auf niedrigem Niveau konstant blieb, fiel beim Experiment die Borkonzentration aufgrund des Eintrags von Kondensat oder niedrig boriertem Wasser allmählich auf das Niveau der Benchmark2-Rechnung ab.

Von der Fortsetzung der oben angesprochenen Parameterrechnungen mit verbesserten Eingabedatensätzen hinsichtlich der primär- und sekundärseitigen Wärmeverluste bei niedrigen Temperaturen, der Strömungsdruckverluste im Primärkreis bei hohen und niedrigen Massenströmen, der Menge des Stickstoffgases und dessen Verteilung im Primärkreis sowie der Erhöhung der Anzahl der kurzen DE-U-Rohre zur genaueren Simulation des Wassermitrisses aus den DE-Eintritts- in die Austrittsbereiche werden weitere Verbesserungen der Ergebnisse erwartet.

4.3 Nachrechnung des Integralexperiments PKL III E2.3 mit ATHLET

Der in /MUL 03/ dokumentierte Versuch PKL III E2.3 behandelt ein Störfallszenario (sog. LOBI-Szenario) mit einem kleinen Leck (50 cm^2) im heißen Strang, sekundärseitigem Abfahren mit 100 K/h sowie Wiederauffüllen des Primärkreislaufs durch heißseitige Einspeisung von 2 Hochdruckpumpen und 4 Akkumulatoren. Die Versuchsanlage wird in Kap. 2.1 ausführlich beschrieben.

Der Versuch besteht aus einer Vortransiente (Konditionierungsphase) und einer Haupttransiente. Bei Beginn der Vorlaufphase werden die Sekundärseiten isoliert, das kleine heißseitige Leck (50 cm^2) und das Bypassleck (25 cm^2) geöffnet sowie die heißseitige Hochdruckeinspeisung in die Loops 1 und 3 aktiviert. Während in den beiden bespeisten Loops der Naturumlauf während der primärseitigen Füllstandsabsenkung erhalten bleibt, reißt der Naturumlauf in den beiden nicht bespeisten Loops ab, und es kommt zum "Reflux Condenser"-Betrieb mit Ansammlung von Kondensat in den Pumpenbögen 2 und 4. Bei Beginn der Haupttransiente wird das Bypassleck (25 cm^2) geschlossen, das sekundärseitige Abfahren mit 100 K/h und die Erhöhung der Einspeiseraten der Hochdruckpumpen entsprechend der Pumpencharakteristik eingeleitet sowie die Kernleistung zuerst von 1100 kW auf 600 kW, danach entsprechend der Nachzerfallskurve abgesenkt. Bei einem Primärdruck von $p < 26$ bar speisen die 4 heißseitigen Akkumulatoren ein.

Der Versuch sollte einen Beitrag zur Deborierungsproblematik leisten und zeigen, ob der Naturumlauf in den beiden Loops 1 und 3 mit Hochdruckeinspeisung tatsächlich erhalten bleibt und nach dem Wiederauffüllen (erhöhte heißseitige Hochdruckeinspeisung in die Loops 1 und 3 sowie heißseitige Akkumulatoreinspeisung in die 4 Loops) der Naturumlauf in den Loops 2 und 4 wieder anläuft und wie viel Kondensat dabei in den Druckbehälter gelangt.

Als Basis für die in /STE 06a/ dokumentierte Nachrechnung des Versuchs PKL III E2.3 diente der für die Nachrechnung des Versuchs PKL III E2.2 entwickelte Eingabedatensatz (siehe Kap. 4.1 und /STE 04/). Das verwendete Nodalisierungsmodell ist mit dem in Kap. 3.4.1 beschriebenen und in Bild 3.4.1-1 bis Bild 3.4.1-6 dargestellten Nodalisierungsmodell weitgehend identisch.

Folgende, zum Teil mit Hilfe von Parameterrechnungen erarbeitete Modifikationen wurden für die abschließende Störfallrechnung durchgeführt:

- Verwendung von unterschiedlichen Leckausströmfaktoren, in der Vortransiente mit dem Wert 1,9 (Zusammenfassung des kleinen heißseitigen Lecks (50 cm^2) und des Bypasslecks (25 cm^2) und in der Haupttransiente mit dem Wert 0,96 (Bypassleck geschlossen).

- Verwendung des Eingabewertes CMUC20=10,0^{-1} zur Verminderung der Dampfkondensation in den Thermofluid-Objekten PV-UH1-I, PV-UH1-O, PV-UH2, PV-UH3, PV-BYP1 bis PV-BYP4, PV-DC-C1 bis PV-DC-C6 des oberen Anlagenbereichs sowie des Eingabewerts CMUC20=10,0^{-15} zur Verminderung der Dampfkondensation im Druckhalter-Objekt P0-PRESS. Zur Überschreibung des im Standard-Kondensationsmodell (Eingabe: IGVK=2) angesetzten Kondensationsfaktors CMUC20=1,0 ist es notwendig, die modifizierte Routine MGAM0 zuzubinden.

Zusätzlich wurde ein „spezieller" Eingabedatensatz entwickelt, bei dem in den 6 parallelen Thermofluid-Objekten des primärseitigen Downcomer-Ringraums das Gemischspiegelmodell aktiviert ist, um die Einströmung von Dampf aus dem Ringraum in die kalten Stränge zu verbessern.

Ziel der Versuchsnachrechnung mit ATHLET Mod 2.0 Cycle B war die Überprüfung des Thermofluiddynamik-Modells auf der Basis von 6 Grundgleichungen (6-Gleichungsmodell) im Hinblick auf das Wiederanlaufen des Naturumlaufs, die Überprüfung des Kondensationsmodells mit den neuen Einspeisemodellen, die den Einfluss der Geometrie an der Einspeisestelle auf die Dampfkondensation am Einspeisestrahl und dessen Impulseintrag (Eingabeoption: INJECTION) und die Strömungsverteilung bei Hutzeneinspeisung (Eingabeoption: SCOOP) berücksichtigen, weiterhin die Überprüfung des Bortransportmodells. Zusätzlich sollte im Rahmen einer Parameterrechnung mit dem „speziellen" Eingabedatensatz mit aktiviertem Gemischspiegelmodell im primärseitigen Downcomer-Ringraum überprüft werden, ob während der

Vortransiente die Dampfeinströmung aus dem Ringraum in die kalten Stränge und damit der dortige Temperaturverlauf verbessert wird.

Der Vergleich der gerechneten und der experimentellen Ergebnisse zeigt, dass mit ATHLET der ganze Störfallablauf des Versuchs PKL III E2.3, der aus einer Vorlaufphase (Konditionierungsphase) sowie einer Hauptphase besteht, mit den nachfolgend beschriebenen Einschränkungen simuliert werden kann.

Bei der Parameterrechnung mit dem „speziellen" Eingabedatensatz mit aktiviertem Gemischspiegelmodell im primärseitigen Downcomer-Ringraum nähert sich während der Vortransiente das Temperaturniveau im Austrittsbereich des Kaltstrangs 2 nach einem anfänglichen Abfall wieder dem Temperaturniveau des Experiments an. Allerdings traten dann bei -6787 s aufgrund von Problemen beim Übersetzen eines der 6 parallelen Gemischspiegel über eine Kontrollvolumengrenze so große Zeitschrittverkürzungen auf, dass es zum automatischen Abbruch der Rechnung kam. D. h. die Probleme, die bei Gemischspiegelbewegungen in einem komplizierten Netzwerk mit 6 parallelen, azimutal gekoppelten Strömungskanälen auftreten können, sind noch nicht gelöst. Die abschließende Störfallrechnung wurde deshalb ohne Gemischspiegelmodell im Downcomer durchgeführt.

In den Bildern 4.3-1 bis 4.3-12 werden ausgewählte Ergebnisse der abschließenden Störfallrechnung und des Experiments verglichen. Die Ergebnisse der Rechnung sind mit "ATHLET" und die des Experiments mit "MST" gekennzeichnet.

Bei der abschließenden Störfallrechnung ergibt sich beim primärseitigen Druckverlauf (Bild 4.3-1) sowie bei den Füllständen im Druckbehälter (Bild 4.3-2) und im Druckhalter (Bild 4.3-3) im Zeitbereich der Vortransiente zwischen -10260 bis 0 s und der Haupttransiente zwischen 0 bis 5880 s im Vergleich zum Experiment eine insgesamt zufrieden stellende Übereinstimmung. Allerdings muss die Dampfkondensation in den oberen Anlagenbereichen und im Druckhalter mit dem Kondensationsfaktor CMUC20 (Eingabewert) reduziert werden.

Wie sich aus dem Vergleich der gerechneten und gemessenen Füllstände in den Loops 2 und 4 ergibt, werden in der Vortransiente bei der Rechnung die DE-seitigen Bereiche der Pumpenbögen (Bild 4.3-4) und der heißen Stränge mit den DE-U-Rohren (Bild 4.3-5) im Gegensatz zum Druckhalter (Bild 4.3-3) zu schnell entleert. Das durch das Schließen des Bypasslecks und die Erhöhung der Einpeisraten der beiden

Hochdruckpumpen eingeleitete Wiederauffüllen der Loops und der DE-U-Rohre wird hingegen in Übereinstimmung zum Experiment simuliert. Die nicht dargestellten Füllstandsverläufe in Loop 4 sind den entsprechenden Füllstandsverläufen in Loop 2 (Bild 4.3-4, Bild 4.3-5) sehr ähnlich. In den Loops 1 und 3 bleiben die Füllstandsverläufe in der Rechnung wie im Experiment immer auf dem Anfangsniveau.

Der relativ stabile Temperaturverlauf während der Vortransiente und der Temperaturabfall während der Haupttransiente wird von der Rechnung im Vergleich zum Experiment in den Endbereichen der 4 kalten Stränge, in den beiden Downcomer-Rohren, im Kern (Bild 4.3-6) sowie in den Ein- und Austrittsbereichen der Dampferzeuger 2 und 4 gut wiedergegeben.

Die sich beim Experiment während der Vortransiente in den Pumpenbögen der Loops ohne Naturumlauf (Loops 2 und 4) einstellenden Temperaturprofile mit kälterem Wasser in den pumpenseitigen Bereichen der Pumpenbögen können von ATHLET nicht simuliert werden, weil im Eingabedatensatz eine gleichmäßige Verteilung der Wärmeverluste angenommen wird. Außerdem ist in den horizontalen Bereichen der Pumpenbögen die Simulation von vertikalen Temperaturprofilen aufgrund des eindimensionalen Modellansatzes im Thermofluiddynamik- und im Strukturwärmemodell nicht möglich.

In Übereinstimmung zum Experiment wird mit dem Beginn der Haupttransiente die Umkehr des Temperaturprofils auf der Primärseite der Dampferzeuger 1 und 3 simuliert, d. h. die Temperaturen in den Eintrittskammern der beiden Loops 1 und 3 mit heißseitiger Hochdruckeinspeisung werden niedriger als die Temperaturen in den Austrittskammern. Allerdings fällt beim Experiment in der Eintrittskammer des Dampferzeugers 3 die Fluidtemperatur bis auf 50 °C ab, in der Rechnung nur auf ca. 100 °C, wie dies bei Rechnung und Experiment in der Eintrittskammer des Dampferzeugers 1 der Fall ist. Dieser beim Experiment feststellbare Temperaturunterschied in den Eintrittskammern der Dampferzeuger 1 und 3 wirkt sich während der Haupttransiente auf das unterschiedliche Verhalten des Naturumlaufs in den Loops 1 und 3 aus (Bild 4.3-7, Bild 4.3-9), wobei anzunehmen ist, dass sich Naturumlaufverhalten und Temperaturverhalten wechselseitig beeinflussen.

Ein wichtiges Untersuchungsziel des Versuchs PKL III E2.3 war für den Zeitbereichbereich der Vortransiente das Verhalten des Naturumlaufs in den Loops 1 und 3 (mit Hochdruckeinspeisung) und für den Zeitbereich der Haupttransiente nach dem

Wiederauffüllen des Primärkreises das Anlaufen des Naturumlaufs in den Loops 2 und 4 (ohne Hochdruckeinspeisung) sowie dem damit verbundenen Transport von Kondensat bzw. niedrig boriertem Wasser zum Ringraum.

Wie Bild 4.3-7 bis Bild 4.3-10 zeigen, bleibt während der Vortransiente in den Loops 1 und 3 bei der Rechnung in Übereinstimmung zum Experiment der Naturumlauf erhalten, in den Loops 2 und 4 reißt er ab. Während der Haupttransiente nimmt bei der Rechnung der Naturumlauf in den Loops 1 und 3 allmählich ab, bleibt aber bis Störfallende erhalten (Bild 4.3-7, Bild 4.3-9). Im Experiment nimmt der Naturumlauf mit dem Beginn der Haupttransiente zwar ebenfalls ab, im Gegensatz zur Rechnung kommt es dann in Loop 3 bei ca. 2780 s zum vollständigen Abriss des Naturumlaufs bis Störfallende und in Loop 1 zum kurzzeitigen Abriss bei ca. 3160 s. Das beim Experiment nach dem Wiederauffüllen beobachtete Anlaufen eines stabilen Naturumlaufs in den Loops 2 und 4 wird mit Einschränkungen auch vom Rechenprogramm simuliert. Bei ca. 600 s läuft in Loop 2 der stabile Naturumlauf bei Rechnung und Experiment mit ähnlicher Größenordnung an, wobei Maximalwerte von ca. 4,1 bzw. 3,6 kg/s erreicht werden (Bild 4.3-8). In Loop 4 läuft bei Rechnung und Experiment der stabile Naturumlauf bei ca. 600 bzw. 720 s an, wobei Maximalwerte von ca. 4,0 bzw. 0,7 kg/s erreicht werden (Bild 4.3-10). Damit ist in der Rechnung das Anlaufverhalten des stabilen Naturumlaufs in den Loops 2 und 4 in etwa symmetrisch, beim Experiment dagegen stark asymmetrisch. Möglicherweise könnte durch eine Aufteilung des Branch-Objekts PV-UP-B-O, an das im Nodalisierungsmodell die vier heißen Stränge gekoppelt sind, in vier oder sechs gekoppelte azimutale Segmente das asymmetrische Anlaufen des Naturumlaufs in den bespeisten Loops 2 und 4 simuliert werden.

Weil während der Vortransiente in der Rechnung aufgrund der verzögerten Leerung des Druckhalters (Bild 4.3-3) die Füllstände im DE-seitigen Bereich der Pumpenbögen (Bild 4.3-4) und im Eintrittsbereich der Dampferzeuger (Bild 4.3-5) der Loops 2 und 4 deutlich früher abfallen als im Experiment und damit auch die Kondensatbildung früher einsetzen kann, fallen die Borkonzentrationen der Rechnung in den Pumpenbögen ebenfalls früher ab (Bild 4.3-11, Bild 4.3-12). Die gerechneten Borkonzentrationen in den kalten Strängen 2 und 4 nehmen zwar ähnlich wie die Bormesswerte ab (Bild 4.3-11, Bild 4.3-12), die Bormesswerte sind aber nach der Füllstandsabsenkung im Ringraum und dem damit verbundenen Eindringen von Dampf nicht mehr belastbar. Der Stömungsquerschnitt muss nämlich bei einer zuverlässigen COMBO-Messung mit Wasser gefüllt sein. Die bei der Rechnung bei ca. -7000 s feststellbaren Borkonzen-

trationsspitzen von ca. 1500 und 1800 ppm sind auf das Eindringen von hoch boriertem Wasser aus dem Ringraum zurückzuführen.

Mit dem Beginn des Wiederauffüllens der Loops 2 und 4 setzt bei Rechnung und Experiment eine kurzzeitige Rückströmung aus dem Ringraum in Richtung Dampferzeuger ein, die kurzzeitig zu einer Erhöhung der Borkonzentration in den kalten Strängen und auch noch in den DE-seitigen Bereichen der Pumpenbögen führt (Bilder 4.3-11, -12). Dieser Vorgang ist bei der Rechnung deutlich stärker ausgeprägt als beim Experiment. Mit dem Einsetzen des stabilen Naturumlaufs werden, wie am kurzzeitigen Abfall der Borkonzentrationen bei Rechnung und Messung zu erkennen ist, die in den Dampferzeugern 2 und 4 noch gespeicherten Kondensatmengen in Richtung Ringraum verschoben. Danach strömt bei Experiment und Rechnung nur noch boriertes Wasser mit einer Borkonzentration von ca. 2200 ppm durch die Loops.

Abschließend ist festzustellen, dass sich das Thermofluiddynamik-Modell mit 6 Grundgleichungen in Verbindung mit den neuen Kondensations- und Einspeisemodellen sowie das Bortransportmodell bei der Nachrechnung des Versuchs PKL III E2.3 bewährt haben. Im Vergleich zum Experiment wurden insgesamt zufrieden stellende Ergebnisse erzielt. Die Modelle zur Simulation der Dampfkondensation in den oberen Druckbehälterbereichen müssen noch verbessert werden. Weiterhin sollten im Nodalisierungsmodell Asymmetrieeffekte berücksichtigt werden.

4.4 Nachrechnung des Einzeleffektversuchs UPTF-TRAM C3 mit dem ATHLET-Modul FLUBOX-3D

Bei dem in /SIE 96b/ dokumentierten Versuch UPTF-TRAM C3 handelt es sich um einen Einzeleffektversuch zur Vermischung unterschiedlich temperierter (im Reaktor: temperierter und borierter) Wassermassenströme im Ringraum. Zu diesem Szenario kommt es im Reaktor, wenn bei einem kleinen Leck der Naturumlauf abreißt und schließlich die Wärme im Reflux-Condenser-Betrieb zur Sekundärseite abgeführt wird. Durch die Kondensation von Dampf wird in den DE-U-Rohren Kondensat erzeugt, das zum Teil in die Pumpenbögen abfließt. Wird durch Aktivierung der Hochdrucksysteme der Füllstand angehoben und der Naturumlauf wieder in Gang gesetzt, dann werden Kondensatpfropfen im kalten Strang mit dem Naturumlauf in den Ringraum verschoben. Wird die Anlage nur mit 2 von 4 Notkühlsystemen kaltseitig bespeist, dann findet erst im Ringraum eine Vermischung von kaltem Notkühlwasser mit warmem Kondensat

aus den nicht bespeisten Kaltsträngen statt. Sollte dieser Vermischungsvorgang im Ringraum unzureichend sein, dann könnte im Kern eine lokale Rekritikalität entstehen. Der Versuch UPTF-TRAM C3 hatte deshalb zum Ziel, die Effizienz der Vermischungsvorgänge bei einem anspringenden Naturumlauf zu untersuchen. An Stelle der unterschiedlichen Borkonzentrationen wurden im Versuch UPTF-TRAM C3 stellvertretend unterschiedliche Wassertemperaturen im Ringraum verwendet. Die Versuchsanlage UPTF-TRAM wird in Kap. 2.2 ausführlich beschrieben.

Aus der Testreihe UPTF-TRAM C3 wurde für die Validierung des ATHLET-Moduls FLUBOX-3D der Versuchslauf 13a ausgewählt, für den phänomenologische Auswertungen der KWU und der GRS (z. B. /PAL 96/) vorliegen. Das Anlaufen des Naturumlaufs in der Wiederauffüllphase des simulierten Störfalls wurde im Experiment durch Einspeisung von Heißwasser in die kalten Stränge nachgebildet. Dabei wurde symmetrischer Naturumlauf unterstellt, so dass Kondensat aus allen Primärkreisschleifen gleichzeitig in den Druckbehälter verlagert wurde. Der Versuchskreislauf 2 wurde zusätzlich mit Kaltwasser bespeist, das die Sicherheitseinspeisung aus zwei Hochdruckpumpen simulierte. Notkühlwasser und Kondensat vermischten sich im Kaltstrang 2 ideal, im Ringraum bildete diese Mischung die so genannte Kaltwassersträhne, die in Bild 4.4-1 schematisch dargestellt ist. Nach dem Wiederanlaufen des Naturumlaufs trat im Experiment großräumig ein Phänomen auf, bei dem sich eine Temperaturschichtung im Ringraumwasser bildete. Das eingespeiste Kondensat verdrängte das kältere Kühlmittel aus dem Oberen Ringraum, eine thermische Trennschicht entstand 2 bis 3 m unterhalb der kalten Stränge. Im quasi-stationären Zustand lagen die Wassertemperaturen oberhalb der Trennschicht bei 160 °C, unterhalb der Trennschicht bei 120 °C. Der Kaltwassersträhne mischte sich auf dem Weg zur thermischen Trennschicht das gesamte eingespeiste Kondensat bei, wodurch sich die Strähne verbreiterte und aufheizte. Unterhalb der Trennschicht war der Austausch von Strähne und Umgebung gegenseitig, hier überwog die Beimischung aus der kälteren Umgebung. Infolgedessen verbreiterte sich die Strähne weiter und kühlte ab. An der Unterkante des Kernhemds nahm die Strähne annähernd ein Drittel des Ringraumumfangs ein, und sie verließ den Ringraum aber noch wärmer als das umgebende Fluid.

Im Rahmen der Nachrechnung des Einzeleffektversuchs UPTF-TRAM C3/Versuchslauf 13a wurden zwei Rechnungen durchgeführt, eine in /RIN 04/ dokumentierte erste Rechnung mit einer FLUBOX-3D Version ohne Turbulenzmodell und nach entsprechenden Entwicklungsarbeiten eine in /GRA 06a/ dokumentierte weitere Rechnung

mit einer FLUBOX-3D Version mit Turbulenzmodell (Zweigleichungsturbulenzmodell). Für beide Rechnungen wurde das in Kap. 3.4.2 beschriebene Diskretisierungsmodell verwendet (siehe auch Bild 3.4.2-1 und

Bild **3.4.2-2**). Im Folgenden werden ausgewählte Ergebnisse der Rechnungen mit und ohne Turbulenzmodell beschrieben.

Wichtige Messungen sind bei diesem Versuch die Temperaturverteilungen im Ringraum unterhalb des Kaltstrangs CL2 (kaltseitige Einspeisung von Notkühlwasser und Heißwasser) und unterhalb des benachbarten Kaltstrangs CL3. Eine weitere wichtige Messung ist die Temperaturverteilung auf dem Ringspaltumfang an der Ringraumunterkante zum unteren Plenum (Ringraummessebene 1). Diese Messung vermittelt die Qualität des thermischen Mischens im Versuchsbehälterringraum.

Bild 4.4-2 zeigt die gemessene Temperaturverteilung im Ringraum unterhalb des Kaltstrangs CL3 und im Vergleich dazu die ohne Turbulenzmodell berechnete Temperaturverteilung. Die in der Messung beobachtete Temperaturdifferenz von ca. 40 °C zwischen den unteren und oberen Messebenen konnte in der Rechnung nicht reproduziert werden. In der Rechnung ergab sich bestenfalls eine Temperaturdifferenz von etwa 10 °C. Bild 4.4-3 zeigt dazu im Vergleich die mit dem Turbulenzmodell berechnete Temperaturverteilung. Es ergab sich gegenüber der Rechnung ohne Turbulenzmodell zwar eine Verbesserung der Temperaturdifferenz auf 20 °C, was aber gegenüber der Messung immer noch einen Fehler von 50 % bedeutet. Entsprechend ungenau sind auch die anderen, oben erwähnten Temperaturverteilungen im Ringraum sowie im unteren Plenum (Bild 4.4-4). Auch eine zusätzliche Rechnung mit verbesserter Approximation der Versuchsbehältergeometrie (56000 Gitterpunkte, 5 Gitterpunkte für den freien Strömungsweg im Ringraum) brachte keine signifikante Verbesserung der Simulation der thermischen Vermischung im Versuchsbehälterringraum.

Insgesamt zeigen die Rechenergebnisse, dass die numerische Diffusion des Lösungsverfahrens sehr gering ist und somit keinen Beitrag zur physikalischen Vermischung liefert. Allerdings deuten numerische Teilstudien darauf hin, dass das numerische Lösungsverfahren den Strömungsverlauf entlang vorgegebener Gitterlinien favorisiert. Hier sind Verbesserungen im Lösungsalgorithmus vorzunehmen, um den Einfluss der Diskretisierung auf den Strömungsverlauf zu verringern.

Das Ziel, Mischprozesse wirklichkeitsnah zu simulieren, war mit dem gegenwärtigen Entwicklungsstand der Modellgleichungen nicht erreichbar. Die Modellierung der Turbulenz in FLUBOX-3D ist zu verbessern, um großräumige thermische Vermischungsprozesse problemgerecht simulieren zu können.

4.5 Nachrechnung des Einzeleffektversuchs UPTF-TRAM C1 mit dem ATHLET-Modul FLUBOX-3D

Bei dem in /SIE 96a/ dokumentierten Versuch UPTF-TRAM C1 handelt es sich um einen Einzeleffektversuch, der für die Beurteilung der Sicherheit des Reaktordruckbehälters gegen sprödes Versagen relevant ist. Der Nachweis der Sicherheit des Reaktordruckbehälters gegen Sprödbruch erfordert die Ermittlung der im Bereich eines unterstellten Risses wirkenden Spannungen. Die zeitlichen und örtlichen Spannungsverläufe ergeben sich aus dem Innendruck und der Temperaturverteilung in der Wand nach unterstellten Störfällen und während anomaler Betriebstransienten des Reaktors. Die bruchmechanische Analyse benötigt als Randbedingung den zeitlichen Verlauf und die örtliche Verteilung der Fluidtemperatur im Reaktordruckbehälter. In den UPTF-TRAM C1 Versuchsläufen wurde das thermische Mischen bei KWU-typischer seitlicher Notkühlwassereinspeisung in den kalten Strang mit dem heißeren Umgebungswasser längs des Weges von der Einspeisstelle bis in das untere Plenum in Originalgeometrie untersucht. Der Notkühlwasser-Einspeisebereich variierte von 5 bis 150 kg/s. Die Versuchsanlage UPTF-TRAM wird in Kap. 2.2 ausführlich beschrieben.

Zur Validierung des ATHLET-Moduls FLUBOX-3D ohne und mit Turbulenzmodell (Zweigleichungsturbulenzmodell) wurde aus der Testreihe UPTF-TRAM C1 der Versuchslauf 1a01 mit einer Notkühlwassereinspeisung von 7 kg/s ausgewählt, für den phänomenologische Auswertungen der KWU und der GRS vorliegen (z. B. /SON 97/). In diesem Versuchslauf wurde das thermische Mischen des kälteren Notkühlwassers mit dem umgebenden heißeren Wasser im kalten Strang und im Versuchsbehälterringraum untersucht. Der Mischversuch wurde bei stagnierender Loopströmung (alle Pumpensimulatoren geschlossen) durchgeführt. Im Kaltstrang stellte sich eine stabile Schichtenströmung ein. Die untere, kältere Wasserschicht, die vom eingespeisten Notkühlwasser, vermischt mit dem am Einspeisestrahl beigemischten Heißwasser, gebildet wurde, strömte am Boden des kalten Strangs zum Versuchsbehälterringraum. Das dem Notkühlwasser-Einspeisestrahl beigemischte Heißwasser

wurde durch Heißwasser aus dem Versuchsbehälterringraum ersetzt, welches in der oberen Hälfte des kalten Strangs zur Notkühlwasser-Einspeisestelle strömte.

Bei den in /GRA 06b/ dokumentierten Nachrechnungen wurde die thermische Vermischung im kalten Strang mit einem Diskretisierungsmodell mit vereinfachter Ersatzgeometrie gerechnet (Bild 4.5-1), wobei der Strömungsbereich mit einem 53x9x17 Gitter (8100 Punkte) nachgebildet war. Der runde Kaltstrang mit einem Rohrdurchmesser von 0,75 m wurde durch ein Rechteckrohr mit gleichem Strömungsquerschnitt und einer Seitenlänge von 0,664 m ersetzt. Die gesamte Rohrlänge vom Ringraum bis zum Pumpensimulator (PS) betrug 9,4 m. Die Einspeisestelle befand sich etwa 6 m vom Eintritt in den Ringraum entfernt. Der 30°-Knick des Rohres bei etwa 4,15 m wurde vernachlässigt, ebenso die genauen geometrischen Verhältnisse beim Pumpensimulator. Hier wurde einfach eine geschlossene Wand angenommen. Der Einspeisestutzen für das Notkühlwasser wurde im Disketisierungsmodell nicht mitsimuliert. An der Notkühlwasser-Einspeisestelle wurde das mit einem Winkel von 60° einströmende Notkühlwasser (m_{ECC} = 7 kg/s) direkt vorgegeben. Problematisch war die Vorgabe geeigneter Randbedingungen am offenen Übergang zum Ringraum, weil hier im Diskretisierungsmodell das diskretisierte Strömungsgebiet endet und das Programm mit der konstanten Druckrandbedingung allein nicht in der Lage war, die Temperaturschichtung im Kaltstrang richtig zu berechnen. Erst durch Vorgabe des aus dem Ringraum in der oberen Rohrhälfte zur Notkühlwasser-Einspeisestelle strömenden Heißwassermassenstroms war dies möglich. Die Menge des zugemischten heißen Wassers ließ sich mit Hilfe der aus der Leistungsbilanz in Bild 4.5-2 abgeleiteten Formel

$$\dot{m}_E = \dot{m}_{ECC} \, (T_{RR} - T_{ECC}) \, / \, (T_E - T_{RR})$$

mit $\dot{m}_E \approx$ 8,9 kg/s abschätzen, wobei die in der Gleichung notwendigen Fluidtemperaturen T_E (Temperatur des aus dem Ringraum im oberen Kaltstrangbereich zuströmenden Heißwassermassenstroms), T_{ECC} (Temperatur des Notkühlwassers) und T_{RR} (Temperatur des im unteren Kaltstrangbereich in den Ringraum abströmenden Mischwassermassenstroms) den Messungen in der Messlanze 3 (Bild 4.5-3) entnommen wurden. Die gemessenen Fluidtemperaturen sind in Bild 4.5-4 bzw. Bild 4.5-5 dargestellt.

Im Folgenden werden die mit den FLUBOX-3D Versionen ohne und mit Turbulenzmodell errechneten Temperaturschichtungen im Kaltstrang mit den Messungen an den Messstellen in der Messlanze 3 verglichen.

In der unteren Rohrhälfte, zwischen der Einspeisestelle und dem Ringraum stellte sich im Experiment wie auch in den numerischen Simulationen eine Wasserschicht ein, die in Richtung Ringraum floss.

Für die Temperatur dieser Wasserschicht wurde im Experiment an der Messlanze 3 (Bild 4.5-3, Messstelle JEC02CT036) ein Wert von etwa 120 °C gemessen (Bild 4.5-4 bzw. Bild 4.5-5).

In der Rechnung mit der FLUBOX-Version ohne Turbulenzmodell wurde an dieser Stelle nur eine Temperatur von 92,5 °C erreicht (Bild 4.5-4). Die Differenz rührte daher, dass in der FLUBOX-Version ohne Turbulenzmodell (nur Euler-Modell) die turbulente Vermischung am Einspeisestrahl zwischen dem Heißwasser und dem Notkühlwasser nicht berücksichtigt wird.

In der Rechnung mit der FLUBOX-3D Version mit Turbulenzmodell (Zweigleichungsturbulenzmodell) konnte dagegen eine gute Übereinstimmung mit der gemessenen Mischtemperatur in der unteren Wasserschicht erreicht werden (Bild 4.5-5). Das Zweigleichungsturbulenzmodell besteht, wie in /GRA 06b/ beschrieben, aus zwei Transportgleichungen für die turbulente kinetische Energie und deren Dissipation, die zusätzlich zu den Euler-Gleichungen gelöst werden. Weil der Notkühlwasser-Einspeisestutzen im Diskretisierungsmodell nicht mitsimuliert (Bild 4.5-1) wurde, war die Vorgabe von geeigneten Eintrittswerten für die turbulente kinetische Energie ($1{,}1 \cdot 10^{-3}$ m^2/s^2) und deren Dissipation ($4{,}0 \cdot 10^{-4}$ m^2/s^3) notwendig.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass sich bei der Nachrechnung des Einzeleffektversuchs UPTF-TRAM C1/Versuchslauf 1a01 mit der FLUBOX-Version mit Turbulenzmodell die Vermischung im kalten Strang und die im Experiment beobachtete Strömungsform der Schichtenströmung auch in der numerischen Simulation einstellte, wenn konsistente Randwerte am offenen Rohrende zum Ringraum vorgegeben wurden. Im Gegensatz zur Simulation der Mischvorgänge im senkrechten Ringraum (siehe Kap. 4.4) scheint die FLUBOX-3D Version mit Zweigleichungsturbulenzmodell bereits für die Simulation thermischer Mischvorgänge in horizontalen Rohren brauchbar zu sein.

4.6 Nachrechnung des Einzeleffektversuchs UPTF 7 mit ATHLET

Ziel des in /WEI 90/ beschriebenen Einzeleffektversuchs UPTF 7 war die Untersuchung der Phänomene, die sich nach einem 2F-Bruch im kalten Strang bei einem großen KMV-Störfall während des Endes der Druckentlastungsphase und dem Wiederauffüllen ergeben. Dabei wurde insbesondere das Verhalten im Downcomer und im unteren Plenum während des Wiederauffüllens nach Einspeisung von Notkühlwasser unter quasi-stationären Bedingungen untersucht. Der Versuch ergänzte so mit maßstabgetreuen Daten weitere Experimente zur Gegenströmungsbegrenzung wie die UPTF Tests Nr. 5 und Nr. 6 sowie Experimente, die bei kleinerem Maßstab (Battelle und Creare) durchgeführt wurden /WEI 90/.

Bei einem Störfall mit großem Kühlmittelverlust – wie dem 2F-Bruch eines kalten Strangs – kommt es zu einer sehr schnellen Druckentlastung im Kühlkreislauf, so dass ein großer Teil des Kühlmittelinventars in Dampf übergeht und über das Leck ins Containment ausströmt. Gleichzeitig sinkt der Druck im Reaktor stark ab, so dass bei ca. 30 bar (für deutsche DWR) die Einspeisung von Notkühlwasser (NKW) aus den Druckspeichern – je nach Anlage und Bruchlage – in die kalten bzw. heißen Stränge beginnt.

Gegen Ende der Druckentlastungsphase ("blowdown phase") strömt bei einem Bruch im kalten Strang Dampf entgegen der betrieblichen Richtung durch den Downcomer zum gebrochenen Strang. Diese Dampfströmung reißt aus dem siedenden unteren Plenum Wasser mit, so dass sich eine 2-Phasen-Strömung ausbildet. Gleichzeitig ist die entstehende Dampfströmung so stark, dass sie zunächst verhindern kann, dass NKW aus den kalten Strängen in das untere Plenum gelangt. Durch den Volumenbedarf der Dampfphase und den Mitriss des dennoch im oberen Bereich des Downcomers herabfallenden Kühlwassers wird ein großer Teil des Notkühlwassers direkt durch das Leck im gebrochenen kalten Strang ins Containment ausgetagen. Dieses Phänomen bezeichnet man als NKW-Bypass. Mit sinkendem Druck und sinkenden Dampfmassenströmen gelangt immer mehr Notkühlwasser in den Downcomer, wobei sich eine Gegenströmung einstellt: ein Dampf-Wasser-Gemisch strömt nach oben, während das NKW nach unten fällt. Bei bestimmten Verhältnissen von Dampfmassenstrom und NKW-Einspeisung überwiegt schließlich der Wassermitriss des Dampfes nicht mehr die Wasserströmung nach unten, so dass es zu einem Wasserdurchbruch ins untere Plenum und einem Wiederauffüllen des RDB kommt. Der

Durchbruch ist abhängig von der sogenannten Gegenströmungsbegrenzung (Counter-current Flow Limitation, CCFL).

In den vier Versuchsläufen (Run 200, Run 201, Run 202, Run 203) von Test Nr. 7 wurde die Gegenströmungsbegrenzung im Downcomer bei relativ geringen Dampfmassenströmen untersucht, insbesondere auch um die Daten aus Experimenten mit verkleinertem Maßstab zu validieren und die daraus gewonnenen Skalierungsgesetze (nach Wallis bzw. Kutateladze) zu überprüfen. Die Dampfeinspeisung in den Kern und die NKW-Einspeisungen in die drei intakten kalten Stränge wurden vorgegeben und über die einzelnen Phasen der Versuchsläufe nach einem vorher festgelegten Programm variiert, um so möglichst viele Punkte auf der CCFL-Grenzkurve bestimmen zu können. Dabei wurden die Experimente so durchgeführt, dass sich trotz der stark turbulenten Strömungsvorgänge mindestens näherungsweise quasi-stationäre Bedingungen einstellen konnten. Ein Punkt von besonderem Interesse war der Effekt, den die geometrische Anordnung der kalten Stränge auf die Gegenströmungsbegrenzung hat. Daher wurde insbesondere das Einspeisemuster, d. h. Einspeisung in den kalten Strang neben dem Leck bzw. Einspeisung in die kalten Stränge gegenüber dem Leck variiert.

Für die in /WIE 06/ dokumentierte Nachrechnung der UPTF 7-Versuchsläufe wurde das in Kap. 3.4.3 beschriebene und in Bild 3.4.3-1 bis Bild 3.4.3-7 dargestellte Nodalisierungsmodell für die UPTF-Anlage verwendet. Die Versuchsanlage wird in Kap. 2.2 ausführlich beschrieben.

Aus den Ergebnissen der Nachrechnungen lässt sich zunächst der Schluss ziehen, dass sich die gewählte Nodalisierung für die Nachrechnung der UPTF 7-Versuche bewährt hat. Insbesondere die gegenüber dem in /BUR 03a/ beschriebenen Eingabedatensatz zusätzlich eingeführte Ebene im unteren Plenum erweist sich zur Beschreibung der komplexen Strömungsvorgänge als notwendig. Nur so kann sowohl die Dampfströmung aus dem Kernsimulator zum Ringraum als auch das Abströmen von Wasser aus dem Ringraum in die Wasservorlage im unteren Plenum befriedigend reproduziert werden.

Wesentliches Ziel der Nachrechnung der UPTF 7-Testreihe war insbesondere die Überprüfung der Gegenströmungsbegrenzung im Ringraum. Diese kann in ATHLET mit einem besonderen Modell, dem Ringraum-Modell für die Zwischenphasenreibung nach /GLA 92/, berechnet werden. Daneben verfügt ATHLET über ein Modell für die

Zwischenphasenreibung, das für gewöhnliche Rohrleitungen angewendet werden soll. Daher wurden sämtliche UPTF 7-Nachrechnungen mit beiden Modellvarianten zur Berechnung der Zwischenphasenreibung im Ringraum in Verbindung mit der derzeitigen Standardnodalisierung mit acht parallelen, strömungstechnisch gekoppelten Ringraum-Kanälen (Bild 3.4.3-1) durchgeführt und die gerechneten mit den experimentellen Ergebnissen verglichen. Ein wichtiges Maß für die richtige Berechnung der Gegenströmungsbegrenzung ist dabei der mittlere Wasserdurchbruch ins untere Plenum während der jeweiligen Versuchsphasen. Diese Werte werden auch in der experimentellen Auswertung der UPTF 7-Versuchsläufe /WEI 90/ angegeben.

Die als Randwerte verwendeten Dampfmassenströme in den Kern und die NKW-Massenströme in die kalten Stränge 1, 2 und 3 sind in Tab. 4.6-1 zusammengefasst. In den Tabellen 4.6-2 bis 4.6-5 werden die Werte aus den Nachrechnungen und dem Experiment verglichen, in Bild 4.6-1 bis Bild 4.6-4 die gerechneten und gemessenen Druckverläufe im Ringraum. In den Bildern sind die Ergebnisse der Rechnung mit dem normalen Rohrleitungsmodell mit „Ringraumdruck (nd)", die der Rechnung mit dem speziellen Ringraum-Modell mit „Ringraumdruck (dc)" und die der Ringraumdruckmessung oberhalb der Loop-Anschlussstutzen mit „JAA01CP002" gekennzeichnet.

In den Versuchsläufen "Run 200" und "Run 203" wurde jeweils eine stark heterogene NKW-Einspeisung vorgenommen, wobei die Haupteinspeisung im kalten Strang 1 erfolgte, der unmittelbar neben dem gebrochen Strang in den Ringraum einmündete. In den Versuchsläufen kam es dabei insbesondere in der jeweils ersten Phase zu sehr geringen Wasserdurchbrüchen ins untere Plenum. Diese Werte überschätzt ATHLET jeweils deutlich (Tab. 4.6-2 und Tab. 4.6-5). Besonders stark sind die Abweichungen jedoch in Phase III von Versuchslauf "Run 200", wo eine sehr hohe Dampfeinspeisung auf eine ebenfalls hohe NKW-Einspeisung in den kalten Strang 1 trifft (Tab. 4.6-1). Hier liegen die Nachrechnungen beim Wasserdurchbruch um einen Faktor von ca. 40 für das Ringraum-Modell und ca. 15 für das normale Rohrleitungsmodell deutlich über den experimentellen Ergebnissen (Tab. 4.6-2). Für diese Abweichungen konnten einfache Erklärungen wie die vereinfachte Modellierung des Wasserseparators im gebrochenen kalten Strang oder Kondensationsphänomene in den heißen Strängen ausgeschlossen werden. Einen wesentlichen Beitrag muss daher die Berechnung der Gegenströmungsbegrenzung im Ringraum selbst liefern. Dabei ergeben sich für das normale Rohrleitungsmodell insgesamt betrachtet leichte Vorteile gegenüber dem für diese Situation entwickelten Ringraum-Modell nach /GLA 92/.

In den Versuchsläufen "Run 201" und "Run 202" erfolgte die NKW-Einspeisung jeweils in die beiden kalten Stränge 2 und 3 gegenüber dem Leckstrang, so dass sich die Einspeisesituation weniger heterogen darstellt. Für beide Versuchsläufe ist festzustellen, dass die Nachrechnungen den Wasserdurchbruch ins untere Plenum (Tab. 4.6-3 und Tab. 4.6-4) befriedigend bis gut wiedergeben, dabei die mittleren Massenströme jedoch tendenziell unterschätzt werden. Anders als bei der Einspeisung in den kalten Strang 1 neben dem Leckstrang liefert das Ringraum-Modell für diese Situationen bessere Ergebnisse als das normale Rohrleitungsmodell.

Besonders interessant ist deshalb die Phase IV von Versuchslauf "Run 203", in der kurzzeitig Bedingungen mit etwa gleichen NKW-Einspeisemassenströmen in die drei intakten kalten Stränge angenommen werden. Hier ergeben sich nur geringe Unterschiede zwischen beiden Nachrechnungen, die zudem noch durch unterschiedliche Anfangbedingungen für diese Phase aus dem vorangehenden Verlauf beeinflusst werden. Insgesamt ist die Übereinstimmung mit den experimentellen Werten gut.

In den Versuchsläufen "Run 200", "Run 201" und "Run 202" wurde in manchen Versuchsphasen der für die Ausbildung der Gegenströmungsbegrenzung kritische Maximalfüllstand im unteren Plenum erreicht. In den Nachrechnungen für Run 200 konnten diese Phasen mit sehr guter Übereinstimmung reproduziert werden. Für die beiden anderen Versuchläufe "Run 201" und "Run 202" mit NKW-Einspeisung in die kalten Stränge 2 und 3 gegenüber dem Leck unterschätzen die Nachrechnungen den Wasserdurchbruch ins untere Plenum, so dass der kritische Maximalfüllstand in den Nachrechnungen zum Teil nicht erreicht wird. Für die Phase III von Versuchslauf "Run 202" ist der Maximalfüllstand jedoch auch in den Nachrechnungen erreicht worden und wiederum ergeben sich gute Übereinstimmungen.

Insgesamt ergibt sich damit das nachfolgende Bild für die Modelle zur Berechnung der Zwischenphasenreibung im Ringraum. Das speziell für den Ringraumbereich entwickelte Ringraum-Modell hat bei NKW-Einspeisungen in die kalten Stränge 2 und 3 gegenüber dem Leck deutlich erkennbare Vorteile gegenüber dem Rohrleitungsmodell. Dagegen hat es Schwächen bei einer mittleren bis hohen Einspeisung in den kalten Strang 1 neben dem Leckstrang, wobei der Wasserbruch ins untere Plenum zum Teil stark überschätzt wird. Ein Grund für die beobachteten Abweichungen zwischen Nachrechnung und Experiment liegt möglicherweise in der Definition des Winkels zwischen Einspeisestrang und Leck, die bei der Entwicklung des Modells /GLA 92/ vorgenommen wurde. Es wurde dabei stets der gesamte Ringraum betrachtet und als

Winkel der Einspeisung der mit den Massenströmen gewichtete mittlere Winkel sämtlicher Einspeisungen in den Ringraum zum Leck angenommen. Für die Nachrechnungen wurde jedoch eine 8-Kanal-Darstellung des Ringraums gewählt und für jede Sektion des Ringraums der mittlere Winkel zum Leck angegeben (Variable ANTET0 unter PW DRIFT in /GRS 06/, Vol. 1). Wegen der unterschiedlichen Massenströme in den Versuchsphasen ist die Bildung eines mit dem Massenstrom gewichteten mittleren Winkels nicht möglich, wenn für alle Nachrechnungen in Bezug auf den Ringraum ein einheitlicher Eingabedatensatz verwendet werden soll. An dieser Stelle sind weitere Untersuchungen zur Verbesserung des Ringraum-Modells erforderlich, die sich auf die Anpassung des Modells an eine 8-Kanal-Modellierung im Downcomer, die Teil des derzeitigen Standard-Reaktordatensatzes /BUR 03b/ ist, konzentrieren sollten.

In dieses Bild passt auch, dass das nicht winkelabhängige Rohrleitungsmodell die Strömungsvorgänge bei der Einspeisung in den kalten Strang 1 neben dem Leckstrang besser berechnen kann. Aus den Daten der Nachrechnungen wird deutlich, dass sich die Verhältnisse direkt unterhalb des Lecks und in den beiden Ringraum-Kanälen neben dem gebrochenen Strang besser mit dem Rohrleitungsmodell beschreiben lassen. Jedoch können auch mit diesem in den oben angesprochen kritischen Phasen der Nachrechnungen keine befriedigenden Übereinstimmungen mit den Messdaten erreicht werden. Dies weist darauf hin, dass wichtige fluiddynamische Prozesse für die Beschreibung der Gegenströmungsbegrenzung im Ringraum derzeit mit ATHLET nicht vollständig erfasst werden können. Ein wichtiger Aspekt könnte dabei der Beitrag des Kernbehälters zur Impulserhaltung bei Einspeisung in den kalten Strang 1 neben dem Leckstrang sein. Die aus dem kalten Strang 1 kommende Wasserströmung trifft auf den Kernbehälter im Bereich des Anschlussstutzens und wird dadurch umgelenkt bzw. spritzt auseinander. Die geometrischen Verhältnisse ermöglichen dabei insbesondere eine direkte Umlenkung in Richtung des gebrochenen Strangs. Dieser von ATHLET nicht erfasste Effekt könnte die Überschätzung des Wasserdurchbruchs ins untere Plenum erklären.

Auch der Vergleich mit den Ergebnissen aus /WUW 02/ kann die obigen Folgerungen unterstützen. Dort war für eine 1-Kanal-Darstellung des Ringraums mit einer stark vereinfachten Modellierung eine gute Reproduktion der Gegenströmungsbegrenzung für das 6-Gleichungsmodell gelungen. In einer ebenfalls in /WUW 02/ angesprochenen Parameterstudie mit einer 4-Kanal-Darstellung des Ringraums wurden dagegen

erhebliche Abweichungen zu den experimentellen Daten gefunden. Auch wenn ein direkter Vergleich zwischen den Ergebnissen aus /WUW 02/ und den hier vorgestellten Nachrechnungen wegen der gravierenden Unterschiede im Detaillierungsgrad der Nodalisierung und in der Durchführung der Rechnungen nicht möglich ist, kann man dies als Bestätigung der oben angeführten Folgerungen zur Berechnung der Zwischenphasenreibung werten. Die Tatsache, dass das Ringraum-Modell für eine 1-Kanal-Darstellung optimiert wurde /GLA92/, verhindert in Rechnungen mit einer Mehrkanaldarstellung des Ringraums, dass bei allen Einspeisebedingungen befriedigende Ergebnisse erzielt werden können. Insbesondere bei stark asymmetrischen Einspeisebedingungen, wie zum Beispiel einer starken Einspeisung aus Strang 1 neben dem gebrochenen Strang und sehr kleinen Einspeisungen aus anderen Strängen, treten diese Schwächen zu Tage.

Schließlich bleibt als weiterer wichtiger Systemparameter, für den in einigen Versuchsphasen in den Nachrechnungen trotz qualitativer Übereinstimmungen signifikante quantitative Abweichungen auftraten, noch das Verhalten des Systemdrucks in den Versuchsläufen „Run 200" (Bild 4.6-1); „Run 201" (Bild 4.6-2); „Run 202" (Bild 4.6-3) und „Run" 203 (Bild 4.6-4) zu bewerten. ATHLET unterschätzt das Ausmaß des Druckaufbaus im System, wenn große NKW-Einspeisungen mit großen Dampfeinspeisungen kombiniert werden. Dies gilt insbesondere, wenn der Druckaufbau schnell erfolgen muss oder eine große Einspeisung in den kalten Strang 1 neben dem gebrochenen Strang vorliegt. Es konnte gezeigt werden, dass die Unterschätzung des Systemdrucks nicht durch eine Überschätzung der Kondensation in den heißen Strängen und im oberen Plenum verursacht wird. Auch ein Einfluss durch die Modellierung des Lecks ist nicht gegeben. Umgekehrt überschätzt ATHLET auch den Druckabbau, wenn die Dampfeinspeisung in den Kern stark abgesenkt wird, wobei auch hierfür die Ursachen im Ringraum liegen müssen. Daher sind auch die Abweichungen des Systemdrucks gegenüber dem Experiment wesentlich durch Defizite in den Modellen zur Berechnung der Zwischenphasenreibung im Ringraum begründet. Eine Unterschätzung von Kondensationsphänomenen im Ringraum, wie sie in /WUW 02/ vermutet wurde, kann dieses Verhalten nicht erklären. Vielmehr hätte eine stärkere Verdampfung von NKW im Ringraum durch Wärmeübergang und Druckentlastung stattfinden müssen, um in den aktuellen Nachrechnungen für einen besseren Verlauf des Systemdrucks zu sorgen. Die in den die Nachrechnungen ermittelte Unterkühlung des NKW bei Eintritt in den Ringraum ist jedoch konsistent

niedriger als die Unterkühlung im Experiment, weswegen eine Unterschätzung der Verdampfung im Ringraum durch ATHLET sehr unwahrscheinlich ist.

Abschließend kann man feststellen, dass die Validierungsrechnungen zu UPTF Test Nr. 7 insgesamt erfolgreich waren. In den meisten Versuchsphasen kann ATHLET die Versuchsergebnisse mit guter bis befriedigender Übereinstimmung reproduzieren. Dies gilt insbesondere für Leckstörfälle mit gleichzeitiger Einspeisung in alle drei intakten Stränge. Auch die Versuchsphasen, in denen das untere Plenum einen Maximalfüllstand erreicht hat, werden mit guter Genauigkeit beschrieben. Die in den UPTF-Versuchen simulierten Systemzustände treten bei einem realen Leckstörfall in der Regel nur für so kurze Zeiten auf und die in den aktuellen Nachrechnungen beobachteten Abweichungen sind nicht so groß, als dass ein dominierender Einfluss auf die Aussagekraft von Störfallrechnungen mit ATHLET angenommen werden müsste. Nichts desto trotz ergibt sich aus der Validerung ein Bedarf für die Verbesserung des Ringraum-Modells für die Zwischenphasenreibung in Verbindung mit einer 8-Kanal-Darstellung des Ringraums. Zur Konkretisierung der Anforderungen an eine Überarbeitung des Ringraum-Modells wären zusätzliche Nachrechnungen der in der ATHLET-Validierungsmatrix enthaltenen Versuche UPTF 6 und UPTF Z3 hilfreich. Damit würde – wie auch schon in /WUW 02/ – ein großer Teil der verschiedenen Einspeisebedingungen wie z. B. unterschiedliche NKW- und Dampf-Massenströme sowie unterschiedliche Unterkühlungen erfasst, die bei der Verbesserung des Modells zur Beschreibung der Gegenströmungsbegrenzung im Ringraum berücksichtigt werden müssen. Es lägen dann alle wesentlichen Informationen über Stärken und Schwächen des aktuell verwendeten Modells auf Basis der derzeitigen Standardnodalisierung vor.

5 Fortschreibung der ATHLET-Validierungsmatrizen für Störfälle ohne Kernschäden

Die in /AKS 93, ANN 96, LIE 01/ enthaltenen OECD/CSNI-Validierungsmatrizen (siehe auch Tab. 6-1 bis 6-8 in /GLA 98/) sind Grundlage für die Validierung des Rechenprogramms ATHLET. In den Matrizen sind Experimentalanlagen den zu validierenden physikalischen Phänomenen gegenübergestellt. Für jedes aufgelistete Phänomen wurde eine Klassifizierung vorgenommen, ob die jeweilige Experimentalanlage für die Validierung von Rechenmodellen geeignet ist, bedingt geeignet ist oder nicht geeignet ist. Die Integralexperimente wurden in verschiedene Störfallklassen und Reaktortypen eingeteilt, wie z. B. "große Brüche in DWR", "Transienten in SWR", usw. Aus den Validierungsmatrizen für die verschiedenen Störfallklassen und Einzeleffekte wurden relevante Experimente ausgewählt.

Die für die ATHLET-Validierung aus den OECD/CSNI-Validierungsmatrizen und aus aktuellen Versuchsvorhaben ausgewählten Experimente sind in den Tabelle 5-1 bis Tabelle 5-12 für die Integralexperimente und in Tabelle 5-13 für die Einzeleffektexperimente zusammengestellt. Diese Tabellen enthalten nicht nur die zur Validierung des Rechenprogramms ausgewählten Experimente sondern auch Angaben zu den durchgeführten Validierungsrechnungen. Die Tabellen wurden im Vorhaben RS1155 überarbeitet und dem Entwicklungsstand des Rechenprogramms ATHLET sowie den aktuellen Fragestellungen (Deborierungsproblematik) und Versuchsprogrammen angepasst. So besteht jetzt die Möglichkeit, Validierungsrechnungen zu Versuchen durchzuführen, die im Rahmen der OECD-Vorhaben "OECD PSB VVER Project" und "OECD/NEA ROSA Project" verfügbar und zugänglich sind. Die in /GAL 03, GAL 04/ dokumentierten Ergebnisse des Vorhabens RS1143 zur langfristigen Sicherung von Versuchsdaten weisen darauf hin, dass die elektronisch gespeicherten Versuchsdaten der noch nicht nachgerechneten Versuche LOFT L3-2 und ROSA IV/LSTF SB-CL-21 aufgrund der Alterung von Magnetbändern sowie der Änderung und Weiterentwicklung von Betriebssystemen, Rechnern und Lesegeräten nicht mehr zugänglich und damit verloren sind. Auch in der NEA-Datenbank sind diese Versuchsdaten nicht gespeichert.

In Tabelle 5-14 ist die Anzahl der für jede Integralanlage westlicher Bauart (DWR, SWR) ausgewählten Experimente und die Anzahl der durchgeführten Validierungsrechnungen gesondert für jede Störfallklasse zusammengestellt. Tabelle 5-15 enthält die entsprechenden Angaben für die Anlagen russischer Bauart (WWER, RBMK). In den WTZ-Vorhaben RS1144 (MOEL-Staaten) und RS1145 (Russland) wurden Validie-

rungsrechnungen zu den PSB-WWER Versuchen in den Tabellen 5-3 und 5-6 durchgeführt. Die Teilnahme am "OECD-Analytical Exercise" (Test OECD/Nr. 5 in Tabelle 5-6) erfolgte im Rahmen des WTZ-Vorhabens RS1145. PSB-RBMK Integralversuche sind noch nicht verfügbar.

Die Tabelle 5-16 gibt den Stand der ATHLET-Validierung entsprechend der Validierungsmatrix für Einzeleffektversuche wieder. In die Tabelle sind auch die Rechnungen zur FLUBOX-Validierung eingetragen.

Damit geben Tabelle 5-14, Tabelle 5-15 und Tabelle 5-16 einen zusammenfassenden Überblick über den Stand der ATHLET-Validierung zum Ende des Vorhabens RS1155. Aus den Tabellen geht hervor, dass der Validierungsstand von ATHLET derzeit für Integralanlagen westlicher Bauart (DWR, SWR) bei etwa 74 %, für Integralanlagen russischer Bauart (WWER) bei etwa 89 % und für Einzeleffektversuche bei 65 % liegt.

6 Zusammenfassung und erzielte Ergebnisse

Im Rahmen des BMWi-Vorhabens RS1155 wurden Beiträge zur Validierung des Rechenprogramms **ATHLET** und des ATHLET-Moduls FLUBOX-3D (Teil 1 des Abschlussberichts) sowie des Rechenprogramms **ATHLET-CD** (Teil 2 des Abschlussberichts) geleistet. Das Vorhaben stand in engem Zusammenhang mit den zeitlich leicht versetzten Vorhaben RS1126 und RS1162 zur Weiterentwicklung des Rechenprogrammsystems ATHLET/AHLET-CD sowie RS1141 und RS1161 zur Weiterentwicklung des ATHLET-Moduls FLUBOX 2D/3D.

Zu den Arbeiten, die im Hinblick auf die ATHLET-Validierung durchzuführen waren, gehörten die Mitarbeit in versuchsbegleitenden Arbeitsgruppen (Kap. 2), die Fortschreibung der ATHLET-Validierungsmatrizen anhand der aktuellen Versuchsvorhaben PKL III E/F, "OECD PSB VVER Project" und "OECD/NEA ROSA Project" (Kap. 5) und die Durchführung der Validierungsrechnungen (Kap. 4.1 bis 4.5).

Dem Entwicklungsfortschritt entsprechend wurden bei den Validierungsrechnungen zu den DWR-Integralversuchen PKL III E2.2, E3.1 und E2.3 sowie zu den DWR-Einzeleffektversuchen UPTF 7, UPTF-TRAM C1 und UPTF-TRAM C3 die ATHLET-Versionen Mod 2.0 Cycle A und B, Mod 2.1 Cycle A sowie das ATHLET-Modul FLUBOX-3D eingesetzt, wobei schwerpunktmäßig

- das Thermofluiddynamik-Modell auf der Basis von 6 Grundgleichungen (6-Gleichungsmodell) und weitere damit verbundene Modelle (Zwischenphasenreibung in normalen Strömungskanälen und im Ringraum, Dampfkondensation im unterkühlten Wasser in Abhängigkeit von der Strömungsform, Kondensation am Kaltwasser-Einspeisestrahl in Abhängigkeit von der Einspeisegeometrie, Impulseintrag durch Kaltwasser-Einspeisestrahl, Strömungsverteilung bei Hutzeneinspeisung, Dampfkondensation in vertikalen Dampferzeuger-Rohren bei "Reflux Condenser"-Betrieb u.a.),
- die Modelle zur Berücksichtigung des Einflusses nicht-kondensierbarer Gase auf Strömung und Wärmeübergang,
- das bisher noch nicht validierte Bortransportmodell,
- und die 3D-Modelle im neuen ATHLET-Modul FLUBOX 2D/3D zur Simulation mehrdimensionaler Strömungsvorgänge

überprüft werden sollten.

Das Integrationsverfahren erwies sich bei den Rechnungen mit ATHLET zwar als robust und effizient, allerdings waren die Rechenzeiten bei der Nachrechnung der PKL III-Versuche sehr hoch und schränkten die Anzahl der Parameterrechnungen stark ein, die zur Untersuchung von unsicheren Einflussgrößen und der Verbesserung der Simulationsergebnisse notwendig gewesen wären. Der vom Integrationsverfahren verursachte Massenfehler blieb meist unter 3%.

Die Ergebnisse der mit ATHLET durchgeführten Validierungsrechnungen zu den DWR-Integralversuchen PKL III E2.2, E3.1 und E2.3 sowie zum DWR-Einzeleffektversuch UPTF 7 werden im Folgenden zusammengefasst.

Ergebnisse der Validierungsrechnungen mit ATHLET zu Störfällen mit kleinem Primärleck (PKL III E2.2, E2.3):

Die oben angesprochenen Thermofluiddynamik-Modelle in ATHLET arbeiten insgesamt zufrieden stellend. Einige Modelle müssen aber verbessert werden, z. B. das Kondensationsmodell zur Simulation der Dampfkondensation oberhalb des Wasserspiegels im Druckhalter und in den oberen Bereichen des Druckbehälters während der Wiederauffüllphase (Vermeidung einer vom Benutzer abhängigen, speziellen Eingabe) und das Bortransportmodell (Vermeidung unrealistischer Borpeaks bei Kernmodellierung mit nur 2 Kanälen).

Der Naturumlauf in den Loops mit heißseitiger Hochdruckeinspeisung wird in der Rechnung während der Vortransiente bzw. der Konditionierungsphase in Übereinstimmung mit dem Experiment aufrechterhalten (PKL III E2.3). In den Loops ohne heißseitige Hochdruckeinspeisung reißt der Naturumlauf ab, und ein stabiler "Reflux Condenser"-Betrieb stellt sich ein (PKL III E2.2, E2.3). In der Haupttransiente setzt bei den Rechnungen analog zum Experiment während der Wiederauffüllphase in den Loops mit vorangegangenem "Reflux Condenser"-Betrieb ein stabiler Naturumlauf ein (PKL III E2.2, E2.3), aber zuerst in den Loops ohne Notkühleinspeisung (PKL III E2.2). Das asymmetrische Verhalten der Massenströme in den Loops konnte nicht angemessen simuliert werden. Ein wichtiger Grund hierfür könnte sein, dass die Verwendung einer Nodalisierung mit 4 identischen Loops aber nur 2 vertikalen Strömungskanälen im Stabbündelbehälter, einem inneren und einem äußeren Strömungskanal, wodurch alle heißen Stränge an das gleiche äußere Kontrollvolumen gekoppelt sind, zur Simulation

von Asymmetrieeffekten in den Loops nicht ausreichend ist. Ein Nodalisierungsmodell mit 6 vertikalen Strömungskanälen im Stabbündelbehälter könnte hier möglicherweise zu Verbesserungen führen.

Insgesamt zeigen die Nachrechnungsergebnisse, dass mit ATHLET die integralen Abläufe der PKL-Tests E2.2 und E2.3 zufrieden stellend simuliert wurden.

Ergebnisse der Validierungsrechnungen mit ATHLET zum Störfall mit Ausfall der Hauptwärmesenke im ¾-Loop Betrieb (PKL III E3.1):

Der Versuch PKL III E3.1 wurde im Rahmen des OECD/PKL-Benchmark1 und nach der Bereitstellung von neuen und überarbeiteten Unterlagen seitens der PKL-Arbeitsgruppe bei AREVA (primär- und sekundärseitige Strukturmassen der PKL-Versuchsanlage, primär- und sekundärseitige Wärmeverluste bei niedrigen Temperaturen, Strömungsdruckverluste im Primärkreis bei hohen und niedrigen Massenströmen, Menge des Stickstoffgases und dessen Verteilung im Primärkreis) auch im Rahmen des OECD/PKL-Benchmark2 nachgerechnet.

In der Benchmark1-Rechnung wurden hinsichtlich der kollabierten Füllstände im Druckbehälter, in den heißen Strängen und im Druckhalter zufriedenstellende Ergebnisse erzielt, weiterhin hinsichtlich der Kerntemperaturen und des Primärkreisdrucks während der Aufheizphase.

Im ansteigenden Bereich des kurzen DE1-U-Rohres bildeten sich häufig Wasserpfropfen, die nachfolgend in den abfallenden U-Rohrbereich überströmten und dadurch kurzzeitige Druckunterschwinger (Rechnung 7, Experiment nur 1 Druckunterschwinger) verursachten. Der Primärkreisdruck wurde gegen Rechnungsende bei 33095 s um ca. 2 bar überschätzt.

Mögliche Gründe für die Abweichungen in der Benchmark1-Rechnung sind: In der Rechnung werden die primärseitigen Wärmeverluste, speziell auf dem Weg vom Kern zu den Dampferzeugern zu niedrig angesetzt. Das Nodalisierungsmodell mit nur einem Strömungskanal im Stabbündelbehälter und im Downcomer des RDB sowie in den sekundärseitigen Steig- und Fallräumen ist für die Nachrechnung eines Experiments mit lokalen Zirkulationsströmungen nicht ausreichend. Im Primärkreis befindet sich zu viel Stickstoff. Die Massen der modellierten Primär- und Sekundärkreisstrukturen sind zu niedrig.

Die Ergebnisse der Benchmark2-Rechnung (Parameterrechnung mit korrigiertem Eingabedatensatz hinsichtlich der primär- und sekundärseitigen Strukturmassen der PKL-Versuchsanlage) zeigen, dass allein durch die Anpassung der Strukturmassen, die im Benchmark1-Eingabedatensatz um ca. 19 % geringer sind als in /KRE 06/, der Druckverlauf deutlich verbessert werden konnte. So traten bei der Benchmark1-Rechnung 7 Druckunterschwinger auf, der Druck bei Rechnungsende lag bei 6,3 bar. In der Benchmark2-Rechnung traten nur noch 2 Druckunterschwinger auf, der Druck bei Rechnungsende lag bei 5,4 bar. Beim Experiment wurde nur ein langgezogener Druckunterschwinger beobachtet, und der Enddruck lag bei 4,2 bar.

Während der Füllstandsverlauf im Druckhalter in der Benchmark2-Rechnung kaum verändert wurde, weist der Verlauf des kollabierten Füllstands im aufsteigenden Bereich des kurzen DE1-U-Rohrs eine deutliche Verbesserung auf. Im Zeitbereich ab 10000 s näherte sich im Gegensatz zur Benchmark1-Rechnung der Kurvenverlauf der Benchmark2-Rechnung dem gemessenen an. Allerdings blieb gegen Rechnungsende der Füllstand auf einem Wert von ca. 8,3 m stehen, im Experiment fiel er allmählich auf einen Wert von ca. 6 m ab. Die Zahl der kurzzeitigen Füllstandseinbrüche verringerte sich von 6 auf 2.

Die Borkonzentration im DE-seitigen Bereich des Pumpenbogens 1 wurde in der Benchmark2-Rechnung realistischer simuliert als in der Benchmark1-Rechnung. Ähnlich wie im Experiment wurde zuerst ein Wasserpfropfen mit niedriger Borkonzentration aus dem aufsteigenden in den abfallenden DE1-U-Rohrbereich und den entsprechenden Pumpenbogen verlagert und dann ein Wasserpfropfen mit hoher Borkonzentration, der zu einer nochmaligen Anhebung der Borkonzentration im Pumpenbogen 1 führte. Während bei der Rechnung dann die Borkonzentration bis Rechnungsende auf niedrigem Niveau konstant blieb, fiel sie beim Experiment aufgrund des Eintrags von Kondensat oder niedrig boriertem Wasser allmählich auf das Niveau der Benchmark2-Rechnung ab.

Von einer möglichen Fortsetzung der Rechnung zum Benchmark-Versuch PKL III E3.1 im Rahmen des Anschlussvorhabens RS1173 mit verbesserten Eingabedatensätzen hinsichtlich der primär- und sekundärseitige Wärmeverluste bei niedrigen Temperaturen, der Strömungsdruckverluste im Primärkreis bei hohen und niedrigen Massenströmen, der Menge des Stickstoffgases und dessen Verteilung im Primärkreis sowie der Erhöhung der Anzahl der kurzen DE-U-Rohre zur genaueren Simulation des

Wassermitrisses aus den DE-Eintritts- in die Austrittskammern werden weitere Verbesserungen der Ergebnisse erwartet.

Ergebnisse der Validierungsrechnungen mit ATHLET zur Gegenströmung im Ringraum bei einem großen Leck im kalten Strang und NKW-Einspeisung in die intakten kalten Stränge (UPTF 7):

Ziel der UPTF 7-Nachrechnung war die Überprüfung des Modells für Gegenströmungsbegrenzung im Ringraum (Ringraum-Modell). ATHLET verfügt außerdem über ein Modell, das die Gegenströmungsbegrenzung in normalen Rohrleitungen (Rohrleitungsmodell) simuliert. Daher wurden die Versuchsläufe mit beiden Modellvarianten und der derzeitigen Standardnodalisierung mit acht parallelen, strömungstechnisch gekoppelten Ringraum-Kanälen nachgerechnet (Bild 3.4.3-1).

Insgesamt wurde bei der Nachrechnung der UPTF 7-Versuchsläufe mit stark heterogener NKW-Einspeisung, wobei die Haupteinspeisung in den kalten Strang 1 neben der Leckleitung erfolgte, der Wasserdurchbruch in das untere Plenum im Vergleich zum Experiment von den Rechnungen mit dem Ringraum-Modell erheblich (Faktor 40) überschätzt, vom Rohrleitungsmodell etwas weniger (Faktor 15).

Bei der Nachrechnung der Versuchsläufe mit NKW-Einspeisung in die kalten Stränge 2 und 3 gegenüber der Leckleitung wurde der Wasserdurchbruch in das untere Plenum im Vergleich zum Experiment von den Rechnungen mit dem Ringraum-Modell und auch mit dem Rohrleitungsmodell befriedigend bis gut wiedergeben. Anders als bei der Einspeisung in den kalten Strang 1 neben dem Leckstrang lieferte das Ringraum-Modell für diese Situationen bessere Ergebnisse als das Rohrleitungsmodell.

Ein Grund für die beobachteten Abweichungen zwischen Nachrechnung und Experiment liegt möglicherweise in der Definition des Winkels zwischen Einspeisestrang und Leck, wobei bei der Entwicklung des Modells /GLA 92/ stets der gesamte Ringraum betrachtet und als Winkel der Einspeisung der mit den Massenströmen gewichtete mittlere Winkel sämtlicher Einspeisungen in den Ringraum zum Leck angenommen wurde. Für die Nachrechnungen mit einer „8-Kanal"-Darstellung (derzeitiger Standard-Reaktordatensatz) des Ringraums muss jedoch für jeden Ringraumkanal der mittlere Winkel zum Leck angegeben werden, wenn für alle Nachrechnungen in Bezug auf den Ringraum ein einheitlicher Eingabedatensatz verwendet werden soll. Ein weiterer Effekt, der von ATHLET derzeit nicht erfasst wird,

ist der Beitrag des Kernbehälters zur Impulserhaltung bei Einspeisung in den kalten Strang 1 neben dem Leckstrang. Die aus dem kalten Strang 1 kommende Wasserströmung trifft auf den Kernbehälter im Bereich des Anschlussstutzens und wird dadurch umgelenkt bzw. spritzt auseinander. Die geometrischen Verhältnisse ermöglichen dabei insbesondere eine direkte Umlenkung in Richtung des gebrochenen Strangs. Auch dieser von ATHLET derzeit nicht berücksichtigte Effekt könnte zur Überschätzung des Wasserdurchbruchs ins untere Plenum beigetragen haben. Zur Konkretisierung der Anforderungen an eine Überarbeitung des Ringraum-Modells wären zusätzliche Nachrechnungen der in der ATHLET-Validierungsmatrix enthaltenen Versuche UPTF Test Nr. 6 und UPTF Test Z3 hilfreich. Weil die in den UPTF 7-Versuchsläufen simulierten Systemzustände bei einem realen Leckstörfall in der Regel nur für kurze Zeiten auftreten und die in den aktuellen Nachrechnungen beobachteten Abweichungen nicht so groß sind, dass ein dominierender Einfluss auf die Aussagekraft von Störfallrechnungen mit ATHLET angenommen werden müsste, ist die angesprochene Überarbeitung des Ringraum-Modells zwar notwendig, aber nicht vordringlich.

Die Ergebnisse der mit dem ATHLET-Modul **FLUBOX-3D** durchgeführten Validierungsrechnungen zu den DWR-Einzeleffektversuchen UPTF-TRAM C1 und C3 werden im Folgenden zusammengefasst:

Bei der Nachrechnung des Experiments UPTF TRAM C3 war die numerische Diffusion sehr gering und hatte kaum Einfluss auf die Ergebnisse. Bei der ersten Nachrechnung konnte die Vermischung von kaltem und warmem Wasser nicht zufrieden stellend simuliert werden, weil kein geeignetes Turbulenzmodell verfügbar war. Die Ergebnisse der aktuellen Rechnung mit der neuen FLUBOX-3D Version (Turbulenzmodell) zeigen, dass in einigen Downcomer-Bereichen, z. B. außerhalb der Einspeisesträhne unterhalb des kalten Strangs, bereits eine Annäherung der gerechneten an die gemessenen Temperaturen erreicht wurde. Entgegen den Erwartungen ist durch eine Verfeinerung des Diskretisierungsmodells und der Nutzung der Erkenntnisse aus der UPTF TRAM C1-Rechnung keine weitere Verringerung der Abweichungen eingetreten, d. h. weitere Entwicklungsarbeiten sind notwendig.

Bei den ersten Rechnungen zum Experiment UPTF TRAM C1 mit der neuen FLUBOX-3D Version (Turbulenzmodell) konnte das Vermischungsphänomen, das im kalten Strang bei niedrigen Notkühleinspeiseraten (ca. 7 kg/s) auftritt, in Übereinstimmung zum Experiment simuliert werden, allerdings nur, wenn konsistente Randwerte am

offenen Rohrende zum Ringraum vorgegeben wurden. Dieses Vermischungsphänomen im Stutzen des kalten Strangs ist dadurch gekennzeichnet, dass im oberen Stutzenbereich warmes Wasser aus dem Downcomer einströmt, sich mit kaltem Notkühlwasser mischt und das kältere Gemisch im unteren Stutzenbereich wieder abströmt.

Abschließend ist festzustellen, dass im Anschlussvorhaben RS1173 eine weitere Validierung des Rechenprogramms ATHLET anhand von PKL III-Versuchen zum Nichtleistungsbetrieb und zur Deborierungsproblematik (PKL III E/F) sowie des ATHLET-Moduls FLUBOX-3D anhand von Versuchen aus UPTF und UPTF-TRAM notwendig ist. Hierbei sollte auch die Ankopplung des Moduls FLUBOX-3D an ATHLET überprüft werden. Der Validierungsstand von ATHLET ist trotz notwendiger Verbesserungen bereits so hoch, dass das Programm zur Simulation von Deborierungsstörfällen an Reaktoranlagen (z. B. bei kleinen Primärlecks, bei Ausfall der Nachwärmeabfuhr im Nichtleistungsbetrieb) herangezogen werden kann. Aufgrund der bei den Validierungsrechnungen erkannten Einschränkungen ist das ATHLET-Modul FLUBOX-3D hierfür noch nicht geeignet, d. h. die Entwicklungsarbeiten sind zu intensivieren.

7 Literatur

/ADD 02/ C. Addabo et al.
CERTA-TN
Consolidation of the Integral System Test Experimental Databases for Reactor Thermal-Hydraulic Safety Analysis
European Thematic Network
Final Report, EUR 20543 EN, December 2002,

/AKS 93/ N. Aksan, F. D'Auria, H. Glaeser, R. Pochard, C. Richards, and A. Sjoeberg
Separate Effects Test Matrix for Thermal-Hydraulic Code Validation (Volume I: Phenomena Characterisation and Selection of Facilities and Tests); NEA/CSNI/R(93)14/Part.1/Rev.; OCDE/GD(94)82, September 1993

/ANN 96/ A. Annunziato, H. Glaeser, J. Glaeser, J. Lillington, P. Marsili, C. Renaults, and A. Sjoeberg
Integral Test Facility Validation Matrix for the Assessment of Thermal-Hydraulic Codes for LWR LOCA and Transients; NEA/CSNI/R(96) 17; OCDE/GD(97)12, July 1996

/BAL 06/ Ch. Bals, H. Austregesilo, K. Trambauer
Nachrechnung des Bündel-Quench-Versuchs QUENCH-10 mit dem Rechenprogramm ATHLET-CD
TN-MIS-06-01, Februar 2006

/BUR 03a/ M. J. Burwell
Nachrechnung des Einzeleffektversuchs UPTF TRAM C3 (Run 13a, Run 14a) mit ATHLET
GRS-A-3123; Juni 2003

/BUR 03b/ M. J. Burwell, W. Pointner
Boron Dilution in a German PWR During a Small Leak (35 cm^2) in the Hot Leg with ECC-Injection
First Workshop on Analytical Activities Related to SETH-OECD Project
2^{nd} and 3^{rd} September 2003, Barcelona, Spain

/EMM 88/ R. Emmerling et al.
Upper Plenum Test Facility (UPTF), Program and Sy-stem Description,
Siemens/KWU Bericht U9 414/88/023; November 1988

/ERD 04/ W. Erdmann, Ch. Bals
Post test Calculations of QUENCH-07 and QUENCH-08 with ATHLET-CD
10th International QUENCH Workshop
Forschungszentrum Karlsruhe, 26-28 October 2004

/ERD 05a/ W. Erdmann
Nachrechnung des Experiments NRU FLHT-5 mit dem Rechenprogramm
ATHLET-CD mod 2.0A
Technische Notiz, ERD-TN 01/05-RS 1155, März 2005

/ERD 05b/ W. Erdmann
Vergleich verschiedener Modellierungen des Einzelstabs aus NRU FLHT-5
bei der Nachrechnung mit ATHLET-CD
Technische Notiz, ERD-TN 02/05-RS 1155, Mai 2005

/ERD 05c/ W. Erdmann
Nachrechnung des Experiments NRU FLHT-2 mit dem Rechenprogramm
ATHLET-CD mod 2.0A
Technische Notiz, ERD-TN 03/05-RS 1155, Juni 2005

/ERD 05d/ W. Erdmann
Nachrechnung des Experiments PHEBUS FPT2 mit dem Rechenprogramm
ATHLET-CD
Technische Notiz, ERD - TN 04/05 – RS 1155, November 2005

/ERD 06a/ W. Erdmann
Nachrechnung des Experiments PHEBUS FPT3 mit dem Rechenprogramm
ATHLET-CD
Technische Notiz, ERD-TN 02/06-RS1155, Juni 2006

/ERD 06b/ W. Erdmann et al
PARAMETER-SF1
Short information on the results of calculations with ATHLET-CD
Draft Version, Technical Note, ERD-TN-01/06-RS1155, April 2006

/ERD 06c/ W. Erdmann
PARAMETER-SF1
Short information on the results of calculations with ATHLET-CD
Technical Note, ERD-TN-01/06-RS1155, revised version, May 2006

/ERD 06d/ W. Erdmann
Calculation of the SARNET Benchmark experiment QUENCH-11
with ATHLET-CD
Abstract & Presentation at the 12th International Quench Workshop
Forschungszentrum Karlsruhe, October 24 – 26, 2006

/ERD 06e/ W. Erdmann
SARNET Benchmark experiment QUENCH-11
Short information on the results of calculations with ATHLET-CD
Technical Note, October 2006

/ERD 06f/ W. Erdmann
Calculation of the SARNET Benchmark experiment QUENCH-11
with ATHLET-CD
Technical Note, ERD-TN-03/06-RS1155, October 2006

/GAL 03/ L. Gallner
Langfristige Sicherung von Versuchsdaten
GRS-A-3133, Juni 2003

/GAL 04/ L. Gallner
Langfristige Sicherung von Versuchsdaten
Abschlussbericht
GRS-A-3225, September 2004

/GLA 92/ H. Glaeser
Downcomer und tie plate countercurrent flow in the Upper Plenum Test
Facility (UPTF)
Nuclear Engineering and Design 133 (1992) 259-283

/GLA 98/ H. Gläser, F. Steinhoff, K. Trambauer
Verifikation des Rechenprogramms ATHLET und ATHLET-CD
Abschlußbericht (Teil 1: ATHLET; Teil 2: ATHLET-CD)
GRS-A-2624, Oktober 1998

/GRA 05/ U.Graf, P.Papadimitriou, P.Romstedt, M.Scheuerer
Weiterentwicklung von CFD-Codes zur Simulation mehrdimensionaler Strömungen im Reaktorkühlsystem.
Abschlußbericht RS 1141
GRS-A-3247, Januar 2005

/GRA 06a/ U.Graf
Analyse des UPTF TRAM Experiments C3 mit dem CFD Code FLUBOX-3D (Wiederholungsrechnung)
GRS-A-3314, März 2006

/GRA 06b/ U.Graf
Nachrechnung des UPTF TRAM C1 Versuchs mit dem CFD Code FLUBOX-3D zum thermischen Mischen im Kaltstrang eines Reaktordruckbehälters
GRS-A-3315, Juni 2006

/GRS 03/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
ATHLET Mod. 2.0 Cycle A
Vol. 1: User's Manual; Vol. 2: Programmer's Manual
Vol. 3: Validation; Vol. 4: Models and Methods
GRS-P-1;October 2003

/GRS 04/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
ATHLET Mod. 2.0 Cycle B
Program Updates since ATHLET Mod. 2.0 Cycle A
November 2004

/GRS 06/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
ATHLET Mod. 2.1 Cycle A
Vol. 1: User's Manual; Vol. 2: Programmer's Manual
Vol. 3: Validation; Vol. 4: Models and Methods
GRS-P-1(Rev. 4;August 2006

/HIC 85/ E. Hicken et al.
FLUT-Programmentwicklung und UPTF-Versuchsbetreuung; GRS-A-1090, Mai 1985

/JAE 84/ JAERI
ROSA IV Program for PWR Small Break LOCA and Transient Experiments; JAERI Report, March 1984

/JAE 85/ JAERI
ROSA IV Large Scale Test Facility (LSTF) System Description, The ROSA IV Group; JAERI-M 84 - 237; January 1985

/JAE 89/ JAERI
Supplemental Description of ROSA IV/LSTF with No. 1 simulated Fuel-Rod Assembly, The ROSA IV Group; JAERI-M 89 - 113;
September 1989

/KIR 94/ R. Kirmse et al.
ATHLET-Verifikation anhand von internationalen Integral- und Einzeleffektexperimenten; GRS-A-2194, GRS, Garching, 1994

/KIR 96/ R. Kirmse, V. Pechterev, F. Steinhoff, A. Suslov
Nachrechnung des Experiments UPTF-TRAM B1, Versuchsläufe B1a-2a, B1b-3c und B1b-2a mit ATHLET
GRS-A-2377, Juli 1996

/KRE 01/ H. Kremin, R. Güneysu (Framatome ANP GmbH)
Determination of Thermal Losses in the PKL Test Facility
FANP NT31/01/eXX, Erlangen, August 2001

/KRE 06/ H. Kremin, R. Güneysu (Framatome ANP GmbH)
Determination of Masses in the PKL Test Facility
FANP NT31/01/e34 B, Erlangen, March 2006

/LAN 96/ S. Langenbuch
Interface requirements to couple thermal-hydraulic codes to 3D neutronic codes; Proc. OECD/CSNI Workshop on Transient Thermal-Hydraulic and Neutronic Codes Requirements, Annapolis, USA, Nov. 5-8, 1996, p. 381, NUREG/CP-0159, NEA/CSNI/R(97)4

/LER 06/ G. Lerchl
ATHLET-Eingabedatensatz zu UPTF TRAM A6
private Kommunikation, 2006

/LIE 97/ J. Liebert, H.-P. Gaul, P. Weiß
Siemensforschungprogramm Reaktorsicherheit, UPTF-Experiment, Durchführung von Versuchen zu Fragestellungen des anlageninternen Notfallschutzes (TRAM); KWU NT31/97/58; September 1997

/LIE 01/ K. Liesch et al.
Validation Matrix for the Assessment of Thermal-Hydraulic Codes for VVER LOCA and Transients; NEA/CSNI/R(2001)4

/MUL 02/ T. Mull (Framatome ANP GmbH)
Versuch PKL III E2.2: Inhärente Borverdünnung bei kleinem Leck im Primärkreis (32 cm^2/145 kaltseitig, Bespeisung mit 2 SEPs kaltseitig und 2 ND-Pumpen kaltseitig, Abfahren mit 100 K/h)
FANP TGT1/02/de/43, Erlangen, Dezember 2002

/MUL 03/ T. Mull (Framatome ANP GmbH)
Test PKL III E2.3: Inherent Boron Dilution during SB-LOCA (50 cm^2/145 in Hot Leg, ECC Injection by 2 SIPs into Hot Legs and 4 ACCs into Hot Legs, Cooldown at 100 K/h) without Breakdown of Natural Circulation in the Loops Fed by SIPs
FANP TGT1/03/en/47, Erlangen, December 2003

/MUL 04/ T. Mull, B. Schoen, K. Umminger
Final Report of the PKL Experimental Program within the OECD/SETH Project
Final Report: FANP NGTT1/04/en/04

/PAL 96/ V. V. Palazov
Analyse der Vermischung unterschiedlich borierter Wasserströme
UPTF-Versuch TRAM C3
GRS-A-2315, Januar 1996

/RIN 04/ F. J. Ringer
Analyse des UPTF-TRAM Experiments C3 mit dem CFD Code FLUBOX-3D
GRS-A-3200, April 2004

/SCH 03/ B. Schoen (Framatome ANP GmbH)
Test PKL III E3.1: Loss of Residual Heat Removal in ¾ Loop Operation with the Reactor Coolant System Closed
FANP TGT1/03/en/10, Erlangen, December 2003

/EMM 88/ R. Emmerling, R. Hertlein, G. Jakob, R. Strobel, F. Winkler
UPTF: Program and System Description
Siemens-Bericht U9 414/88a/023, Erlangen 1988

/SAR 92/ J. Sarkar, J. Liebert, R. Läufer
UPTF Test Instrumentation. Measurement System Identification, Engineering Units and Computer Parameters;.
Techn. Bericht der Siemens AG, UB KWU, Abt. S554, Berichts-Nr. S554/92/013, Erlangen, 26.11.1992

/SIE 85/ Siemens AG/KWU
UPTF Test Instrumentation, Measurement System Identification, Engineering Units and Computed Parameters; Siemens Report, R515/85/23, 1985

/SIE 92/ Siemens AG/KWU
UPTF-TRAM: Versuchsinstrumentierung für Druckhalter und Surgeline.
Siemens/KWU-Mitteilung an GRS, Erlangen, 14.08.1992

/SIE 96a/ Siemens AG/KWU
Quick Look Report UPTF-TRAM, Versuch C1/C2,
NT31/96/17, Siemens AG, Erlangen, März 1996

/SIE 96b/ Siemens AG/KWU
QLR UPTF-TRAM, Versuch C3,
NT31/96/41, Siemens, Erlangen, Juli 1996

/SON 97/ H.G. Sonnenburg
Phänomenologische Versuchsauswertung des Versuchs UPTF-TRAM C1
Thermisches Mischen im Kaltstrang und Ringraum
GRS-A-2434, Januar 1997

/STE 03a/ F. Steinhoff
Post-Test Calculation for Test PKL III E2.2 with the System Code ATHLET
(Preliminary Results)
First Workshop on Analytical Activities Related to SETH-OECD Project
2nd and 3rd September 2003, Barcelona, Spain

/STE 03b/ F. Steinhoff
Validierung des Rechenprogrammsystems ATHLET und ATHLET-CD
Abschlussbericht (Teil 1: ATHLET)
GRS-A-3155, Oktober 2003

/STE 03c/ F. Steinhoff
Nachrechnung des Versuchs PKL III E2.2 mit ATHLET und Auswertung der
Versuchsberichte zu PKL III E1.1 und E2.1
GRS-A-3168, Dezember 2003

/STE 04/ F. Steinhoff
Nachrechnung des Versuchs PKL III E2.2 mit ATHLET
(Wiederholungsrechnung)
GRS-A-3222, August 2004

/STE 05a/ F. Steinhoff, H. Austregesilo, C. Bals, W. Erdmann, K. Trambauer
Validierung des weiterentwickelten Rechenprogramms ATHLET-CD
(Zwischenbericht), GRS-A-3277, Mai 2005

/STE 05b/ F. Steinhoff
Post Test Calculation of the Experiment PKL III E3.1 with ATHLET
(OECD/PKL-Benchmark)
PKL Analytical Workshop
Pisa, October 11 - 12, 2005

/STE 05c/ F. Steinhoff
Nachrechnung des Versuchs PKL III E3.1 mit ATHLET
GRS-A-3298, Dezember 2005

/STE 06a/ F. Steinhoff
Nachrechnung des Versuchs PKL III E2.3 mit ATHLET
GRS-A-3327, Juni 2006

/STE 06b/ F. Steinhoff
Post Test Calculation of the Experiments E2.2, E2.3 and E3.1 with ATHLET
2nd PKL Analytical Workshop
Budapest (Hungary), November 8, 2006

/TRA 04/ K. Trambauer et al.
Weiterentwicklung des Rechenprogrammsystems ATHLET / ATHLET-CD
GRS-A-3215, Juli 2004

/TRA 05/ K. Trambauer
Nachrechnung der Halden-Experimente IFA650 Test 2 und 3 mit
ATHLET-CD zur Validierung des Brennstabmodells
TN-TRB-05-4, November 2005

/WEI 90/ P. Weiss et al.
UPTF: Test No. 7 Downcomer Countercurrent Flow Test
Siemens-Bericht E314/90/003, Erlangen 1990

/WIE 06/ A. Wielenberg
Nachrechnung des Einzeleffektversuchs UPTF Nr. 7
(Gegenströmung im Ringraum) mit ATHLET
GRS-A-3348, Oktober 2006

/WUW 02/ J. Weisbrod, H. Unger, H.-J. Wagner
ATHLET-Validierung anhand von Nachrechnungen der Experimente UPTF
Test 6, Test 7 und Test Z3
LEE-11, Ruhr-Universität Bochum, September 2002

8 Abkürzungen

AM	Accident Management
ATHLET	Analyse der Thermohydraulik für Lecks und Transienten
BOP	Balance of Plant
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
CCFL	Counter Current Flow Limitation
CCTF	Cylindrical Core Test Facility
CD	Core Damage
CL	Cold Leg
COMBO	Continuous Measurement of Boron Concentration
CSNI	Committee on the Safety of Nuclear Installations
DC	Downcomer
DE	Dampferzeuger
DH	Druckhalter
DS	Druckspeicher
DSP	Druckspeicher
DWR	Druckwasserreaktor
F	Fläche
GCSM	General Control Simulation Module
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit
HC	Heat Conductor
HD	Hochdruck

HKMP	Hauptkühlmittelpumpe
HL	Hot Leg
HORUS	Horizantal U-Tube Steam Generator
HS	Heißer Strang
ISP	Internationales Standardproblem
KS	Kalter Strang
LOBI	Loop Off-normal Behaviour Investigation
LOFT	Loss of Fluid Test
LSTF	Large Scale Test Facility
LP	Lower Plenum
MOEL	mittelosteuropäische Länder
NKW	Notkühlwasser
OECD	Organisation for Economic Cooperation and Development
PKL	Primärkreisläufe
PACTEL	Parallel Channel Test Loop
PTS	Pressurized Thermal Shock
PV	Pressure Vessel
PWR	Pressurized Water Reactor
RBMK	Siedewasserreaktor russischer Bauart
ROSA	Rig of Safety Assessment
RDB	Reaktordruckbehälter
SEP	Sicherheitseinspeisepumpe
SG	Steam Generator
SJP	Single Junction Pipe

SWR	Siedewasserreaktor
TF	Thermofluid
TRAM	Transient Accident Management
UH	Upper Head
UP	Upper Plenum
UPTF	Upper Plenum Test Facility
VVER	Druckwasserreaktor russischer Bauart
WWER	Druckwasserreaktor russischer Bauart
l/D	Länge/Durchmesser

9 Tabellen

Tabelle 2.1-1 PKL III E-Versuche

Anlaufen von Naturumlauf und Verlagerung von minderborierten Wasserpfropfen in den RDB bei kleinen Lecks	
E1.1	40 cm^2 Leck heißseitig im DH-Loop, symmetrische Bespeisung in alle 4 Loops kaltseitig, Abfahren mit 100 K/h
E2.1	40 cm^2 Leck heißseitig im DH-Loop, symmetrische Bespeisung in alle 4 Loops heißseitig, Abfahren mit 100 K/h
E2.2	32 cm^2 Leck kaltseitig, Bespeisung mit 2 SEPs kaltseitig (max. Kondensatmenge), Abfahren mit 100 K/h
E2.3	50 cm^2 Leck heißseitig, Bespeisung mit 2 SEPs heißseitig (Naturumlauf in bespeisten Loops, Reflux Condenser-Betrieb in unbespeisten Loops), Abfahren mit 100 K/h, Bespeisung mit 4 heißseitigen DSPs
Ausfall Nachkühlung im ¾-Loop-Betrieb	
E3.1	Geschlossener Primärkreis, 1 DE sekundärseitig betriebsbereit, 1 DE mit isoliert und mit Wasser gefüllt, 2 DEs isoliert und mit Luft gefüllt, Übernahme der Wärmeabfuhr durch DE unter Reflux Condenser Bedingungen führt zur Bildung von minderborierten Bereichen im Primärkreis, danach vier Akku-Einspeisungen in die kalten Stränge 1 bis 4 und die fünfte in den heißen Strang 4, danach Neustart des Nachwärmeabfuhrsystems in Loop 4

Tabelle 2.1-2a Durchgeführte und geplante Versuche im Vorhaben PKL III F (Laufzeit: 04/2003 – 03/2007)

04./12.2003	Anlagenrevision
F1: Borverdünnung bei kleinen Lecks im Primärkreis	
F1.1: 06.07.2004	Kleines Leck im kalten Strang, Einspeisung kaltseitig (wie E2.2; Versuchskonfiguration jedoch nicht entsprechend deutscher DWRs)
F1.2: 08./09.12.2004	Systematische Untersuchung zur Ansammlung von schwach boriertem Wasser (Menge, Borkonzentration) in Abhängigkeit vom Wasserinventar in den DE-U-Rohren
F1.3: 11.03.2004	Kleines Leck im heißen Strang, Einspeisung mit 2 SEPs und 4 DSPs heißseitig (wie E2.3; jedoch ohne Erhalt des Naturumlaufs in den bespeisten Loops)
F1.4: 29.10.2004	Kleines Leck im kalten Strang, Einspeisung mit 2 SEPs kaltseitig und 4 DSPs heißseitig und kaltseitig (keine ND-Einspeisung)

Tabelle 2.1-2b Durchgeführte und geplante Versuche im Vorhaben PKL III F (Laufzeit: 04/2003 – 03/2007)

F2: Ausfall der Nachkühlung im ¾-Loop-Betrieb bei geschlossenem Primärkreis	
F2.1: 13.07.2005 26.07.2005 26.01.2006	Ein DE sekundärseitig betriebsbereit, Variation des primärseitigen Wasserinventars Run 1: Mittleres Wasserinventar (3/4-Loop, heißer DH) Run 2: Geringes Wasserinventar (Unterkante HKL, kalter DH) Run 3: Variation des RDB-Deckelbypasses
F2.2: 02.02.2006 16.02.2006	Variation der sekundärseitig gefüllten und betriebsbereiten Des Run 1: Ein DE gefüllt und betriebsbereit (2 bar) Run 2: Zwei DE gefüllt und betriebsbereit (2 bar)
F2.3: Versuch war geplant, wird aber im aktuellen Vorhaben nicht mehr durchgeführt	Optimierung der Fahrweise, dass auch bei ungünstigen Bedingungen (aus obigen Versuchen ermittelt) Nachkühlung wieder in ..Betrieb genommen werden kann (<160 °C) und unzulässige Entborierung verhindert wird - Inbetriebnahme zusätzlicher DEs - Frühe aktive Bespeisung mit boriertem Wasser - Frühe Druckspeichereinspeisung

Tabelle 2.1-2c Durchgeführte und geplante Versuche im Vorhaben PKL III F (Laufzeit: 04/2003 – 03/2007)

F3: Ausfall der Nachkühlung im ¾-Loop-Betrieb bei offenem Primärkreis	
F3.1: 30.05.2006 07.07.2006	Wirksamkeit von Gegenmaßnahmen, um Dampfproduktion im Kern so lange wie möglich zu verhindern (Begehbarkeit des Containments) bzw. Kernaufheizung zu verzögern Run 1: RDB-Deckelschrauben gelöst, Deckel aufliegend Run 2: Offenes DH-Ventil
F4: Systematische Untersuchungen zu Fragestellungen, die sich aus früheren Versuchen ergeben haben	
F4.1: 11/12.10.2006	Ansammlung von schwach boriertem Wasser (Menge, Borkonzentration in Abhängigkeit vom prmärseitigen Wasserinventar ähnlich F1.2, aber bei höherem Druck (Run 1: bei 30 bar; Run 2: bei 40 bar)
F4.2: Januar/Februar 2007	Leck im heißen Strang (nach unten gerichtet) mit heißseitiger Einspeisung (LOBI-Szenarium), Variation von Nachzerfallsleistung und Leckgröße sowie Konstanthalten von Primärdruck (40 bar) und Einspeiseraten (2 SEPs in Loop 10 und 30)
bis 31.03.2007	Abschluss der Versuchsauswertung und Dokumentation

Tabelle 2.3-1 Versuche im OECD/NEA ROSA Project (laufend 2005 - 2009)

No.: Time Schedule	Tests
(1): 2005 - 2007	Temperature stratification during ECCS Coolant injection
(2): 2006 - 2007	Unstable Phenomena such as water hammer
(3): 2006	High power natural circulation
(4): 2006	Natural circulation with superheated steam
(5): 2006 - 2007	Primary cooling through SG depressurization
(6-1): 2005	PV upper-head break LOCA
(6-2): 2005	PV bottom break LOCA
(6-3): 2008 - 2009	Steam condensation during LBLOCA

Tabelle 4.6-1 Randbedingungen für UPTF Test Nr. 7 (Run 200, Run 201, Run 202, Run 203)

Parameter	Dampfeinspeisung [kg/s]	NKW in kalten Strang 1 [kg/s]	NKW in kalten Strang 2 [kg/s]	NKW in kalten Strang 3 [kg/s]
Run 200, Phase I (75s – 97s)	104	495	14	12
Run 200, Phase II (125s – 155s)	53	737	31	12
Run 200, Phase III (175s – 205s)	102	735	17	14
Run 200, Phase IV (235s – 265s)	102	493	15	488
Run 200, Phase V (300s – 345s)	148	687	25	483
Run 201, Phase I (85s – 105s)	102	-	487	489
Run 201, Phase II (140s – 160s)	101	271	727	732
Run 201, Phase III (192s – 225s)	102	491	486	490
Run 202, Phase I (65s – 100s)	102	-	726	730
Run 202, Phase II (125s – 155s)	127	-	487	490
Run 202, Phase III (instabil)	Nicht definierbar	Nicht definierbar	Nicht definierbar	Nicht definierbar
Run 203, Phase I (68s – 98s)	70	734	35	16
Run 203, Phase II (131s – 171s)	30	738	25	16
Run 203, Phase III (220s – 250s)	71	737	32	733
Run 203, Phase IV (290s – 330s)	51	493	484	487

Tabelle 4.6-2 NKW-Massenstrom ins untere Plenum (Run 200)

NKW-Massenstrom Run 200	Messung /WEI 90/	Nachrechnung (Rohrleitungsmodell, nd)	Nachrechnung (Ringraum-Modell, dc)
Phase I (75 s – 97 s)	5 kg/s	30 kg/s	35 kg/s
Phase II (125 s – 155 s)	351 kg/s	408 kg/s	451 kg/s
Phase III (175 s – 205 s) (160 s – 180 s)	6 kg/s	40 kg/s (99 kg/s)	28 kg/s (258 kg/s)
Phase IV (235 s – 265 s)	n.a.	19 kg/s	- 4 kg/s
Phase V (300 s – 345 s)	n.a.	-8 kg/s	-4 kg/s

Tabelle 4.6-3 NKW-Massenstrom ins untere Plenum (Run 201)

NKW-Massenstrom Run 201	Messung /WEI 90/	Nachrechnung (Rohrleitungsmodell, nd)	Nachrechnung (Ringraum-Modell, dc)
Phase I (85 s – 105 s)	861 kg/s	739 kg/s	813 kg/s
Phase II (140 s – 160 s)	n.a.	834 kg/s	1020 kg/s
Phase III (192 s – 225 s)	942 kg/s	910 kg/s	923 kg/s

Tabelle 4.6-4 NKW-Massenstrom ins untere Plenum (Run 202)

NKW-Massenstrom Run 202	Messung /WEI 90/	Nachrechnung (Rohrleitungsmodell, nd)	Nachrechnung (Ringraum-Modell, dc)
Phase I (65 s – 100 s)	n.a.	881 kg/s	1030 kg/s
Phase II (125 s – 155 s)	714 kg/s	654 kg/s	720 kg/s
Phase III (instabil)	n.a.	n.a.	n.a.

Tabelle 4.6-5 NKW-Massenstrom ins untere Plenum (Run 203)

NKW-Massenstrom Run 203	Messung /WEI 90/	Nachrechnung (Rohrleitungsmodell, nd)	Nachrechnung (Ringraum-Modell, dc)
Phase I (68 s – 98 s)	95 kg/s	338 kg/s	370 kg/s
Phase II (131 s – 171 s)	519 kg/s	522 kg/s	523 kg/s
Phase III (220 s – 250 s)	823 kg/s	752 kg/s	1000 kg/s
Phase IV (290 s – 330 s)	1031 kg/s	1020 kg/s	1130 kg/s

Tabelle 5-1 Matrix I: Große Brüche in Druckwasserreaktoren

			Rechnung durchgeführt	Wiederholung erforderlich	Rechnung geplant
UPTF	- 2	2F-Bruch kalter Strang, kaltseitige Einspeisung, Genehmigungsrate			
	- 27 B	2F-Bruch kalter Strang, kaltseitige Einspeisung, BE-Einspeiseraten	RUB 01	nein	
	- 18	2F-Bruch kalter Strang, kombinierte Einspeisung, Genehmigungsrate	TÜV-BY 91	ja	
	- 28	2F-Bruch kalter Strang, kombinierte Einspeisung, BE-Einsp.			
	- 19	50 % Leck kalter Strang, kombinierte Einspeisung, Genehmigungsrate			
	- 24	Vent Valve Test, 2F-Bruch kalter Strang, Ringraum und kaltseitige Einspeisung			
CCTF	C2-19/79	2F-Bruch kalter Strang, kombinierte Einspeisung, Genehmigungsrate	FZR 01	empfehlenswert	
	C2-20/80	2F-Bruch kalter Strang, kombinierte Einspeisung, BE-Einspeisung (ähnlich zu PKL)	TÜV-BY 91		
	C2-04/62	2F-Bruch kalter Strang, kaltseitige Einspeisung, base case, Genehmigungsrate	FZR 01	empfehlenswert	
	C2-12/71	2F-Bruch kalter Strang, kaltseitige Einspeisung, BE-Einspeisung	Battelle 00	empfehlenswert	
LOFT	L2-5	2F-Bruch kalter Strang, Verlust jeglicher Energieversorgung	Battelle 00	empfehlenswert	
	LB-1	2F-Bruch, kalter Strang	GRS 02	nein	
LOBI	A1-06	2F-Bruch kalter Strang, kombinierte Einspeisung	Battelle 89	nein	
	A1-66	2F-Bruch kalter Strang, kaltseitige Einspeisung	Battelle 89	nein	
PKL-II	B2	2F-Bruch kalter Strang, kombinierte Einspeisung	TÜV Nord 00	nein	
	B5	2F-Bruch kalter Strang, kaltseitige Einspeisung	TÜV Nord 00	nein	

Tabelle 5-2 Matrix II: Kleine und mittlere Brüche in Druckwasserreaktoren

			Rechnung durchgeführt	Wiederholung erforderlich	Rechnung geplant
UPTF-TRAM	A7	5 % Leck kalter Strang, heißseitige Einspeisung	GRS 98	ja	
	A6	5 % Leck kalter Strang, kaltseitige Einspeisung, ähnlich LSTF-SB-CL-18	GRS 94	nein	
LOFT	LP-SB-1	2 % Leck heißer Strang, abgeschaltete HKP	GRS 84	empfehlenswert	
	LP-SB-2	2 % Leck heißer Strang, laufende HKP	GRS 84	empfehlenswert	
	LP-SB-3	1 % leck kalter Strang	GRS 91	nein	
	L3-2	15 % Leck kalter Strang			
LSTF	SB-CL-18	5 % Leck kalter Strang, ISP-26	GRS 90	nein	
	SB-CL-21	5 % Leck kalter Strang, ähnlich BETHSY 6.2 TC und LOBI BL-34			
OECD/ ROSA	SB-PV-09	Kleines Leck im Deckelraum des RDB mit Totalausfall der HD-Einspeisung (OECD/CSNI ROSA Programm)			2006
PKL-III	A4.1	1 % Leck kalter Strang, Übergang HD/ND-Einsp., DH Höhenst.	GRS Vorausr. 89		
	AC-1	Stationärer Naturumlauf, einphasig, zweiphasig, Reflux Condenser (ähnlich LOBI A1-92)			
	B3.2B	Naturumlauf bei unterschiedl. Primärkreisinventar und Strömungswiderständen analog eines W-DWR (ähnlich LSTF ST-NC-08)			
	B3.5.1	Abfahren mit 100 K/h, ausgehend vom Reflux-Condenser Betrieb, Wärmeabfuhr über 4 DE bei 2 % Leistung			
	B4.3	Einfluß von Stickstoff auf den Reflux-Condenser-Betrieb, p = 1,0 MPa	TÜV Nord 98	ja	
	B4.1	Einfluss von Stickstoff auf einphasigen Naturumlauf	GRS 95	nein	
	C6.1	24 cm² Leck kaltseitig, Abfahren mit 100 K/h, 2DE isoliert, Stickstoff aus 2 DSP, Übergang HD/ND-Betrieb	TÜV Nord 98	empfehlenswert	
	C3.2	Reflux Condenserverhalten bei 0,8 MPa, stufenweise Erhöhng der Dampferzeugerleistung (1 % - 20 %)			
	D2.1	Anlaufen Naturumlauf, kleines Leck kaltseitig, Notkühleinspeisung (2 HD kaltseitig, 4 Akku heißseitig, 2 ND heiß-, kaltseitig)	GRS 02	ja	
	D2.2	Anlaufen Naturumlauf, kleines Leck heißseitig, ND-Einspeisung in 4 Loops	GRS 03	ja	
	E2.2	Anlaufen Naturumlauf, kleines Leck kaltseitig, Notkühleinspeisung (2 HD, 2 ND kaltseitig)	GRS 04	nein	
	E2.3	Aufrechterhalten oder Abreißen des Naturumlaufs in bespeisten Loops, kleines Leck heißseitig, Notkühleinspeisung (2 HD heißseitig, 4 AKKU heißseitig)	GRS 06	nein	

... /

Tabelle 5-2 Matrix II: Kleine und mittlere Brüche in Druckwasserreaktoren (Fortsetzung 1)

			Rechnung durchgeführt	Wiederholung erforderlich	Rechnung geplant
	F1.2	Systematische Untersuchung zur Ansammlung von schwach boriertem Wasser am DE-Austritt (Menge, Borkonzentration) beim Übergang zwischen Φ-Naturumlauf und Reflux Condenser-Bedingungen (Abhängigkeit vom Wasserinventar in den DE-U-Rohren)			
BETHSY	4.1a	Zweiphasiger Naturumlauf mit unterschiedlichem Primärkeisinventar	GRS 91	nein	
	5.1a	Variation des sekundärseitigen Masseninventars	GRS 93	nein	
	3.4a	Naturumlauf mit isol. DE (1 u. 2 DE isol.), ähnlich PKL III B3.1	Battelle 94	nein	
	4.3b	Mehrfacher DE-Heizrohrbruch	GRS 93	empfehlenswert	
	4.1aTC	2-phasiger Naturumlauf, 5 % Leistung, abgesenkter DE-Füllstand, Reflux-Condenser-Betrieb, ähnlich LSTF-ST-NC06 und 07	Battelle 94 Wdh 98	nein	
	6.2TC	5 % Kalts. Leck, keine HD-Einspeisung, ähnlich LSTF-SB-CL-21 und LOBI-BL-34	Battelle 98	nein	
	7.2c	Reflux-Condenser-Betrieb mit nicht-kond. Gas (N2) in 1aktiven Kreislauf	Battelle 98	empfehlenswert	
LOBI	A2-81	1 % Leck kalter Strang, kaltseitige HD-Einspeisung, ISP 18	GRS 89	nein	
	BR1M	25 % Leck kalter Strang	Battelle 89	nein	
LOB-II	A2-77A	ST, Variation Inventar Primärseite	GRS 89	nein	
	A1-82	1 % Leck kalter Strang, heißseitige HD-Einspeisung, sekundärseitiges Abfahren	GRS 01	nein	
	A1-91	1 % Leck kalter Strang, heißseitige Einspeisung	Battelle 89	nein	
	BL-01	5 % Leck kalter Strang	GRS 89	nein	
	A1-83	10 % Leck kalter Strang			
	BL-34	6 % Leck kalter Strang, ähnlich LSTF-SB-CL-21 und BETHSY 6.2 TC			

Tabelle 5-3 Matrix IIa: Kleines, mittleres und großes Leck in WWER-Druckwasserreaktoren mit horizontalen Dampferzeugern

			Rechnung durchgeführt	Wiederholung erforderlich	Rechnung geplant
PMK		ATWS, DH-SIV offen, Ausfall Speisewasser, 1 HPIS	GRS/KFKI 99		
		7,4%-Leck im kalten Strang, mit N_2-Einspeisung aus Druckspeicher, sekundärseitige Druckentlastung und Bespeisung	GRS/KFKI 95		
		7,4%-Leck im kalten Strang, ohne N_2-Einspeisung aus Druckspeicher, sekundärseitige Druckentlastung und Bespeisung	GRS/KFKI 95		
		7,4%-Leck im kalten Strang, sekundärseitige Druckentlastung und Bespeisung, IAEA SPE-4	GRS/Kurt.I 95	empfehlenswert	
		0,5%-Leck im kalten Strang (3,2 mm Durchmesser), sekundärseitige Druckentlastung und Bespeisung	NRI/GRS 00		
		Bruch der Druckhalter-Surge Line	NRA/GRS 01		
ISB		Kleines Leck im kalten Strang; Russian Standard Problem Nr. 1 (SSP-1)	FZR 96	nein	
		Mittleres Leck im kalten Strang ohne Hochdruckeinspeisung; Russian Standard Problem Nr. 2 (SSP-2)	GRS 98	nein	
		Mittleres Leck im kalten Strang mit Hochdruckeinspeisung; Russian Standard Problem Nr. 3 (SSP-3)	GRS 99, INRNE/GRS 00	nein	
		11,2%-Bruch einer Verbindungsleitung zum oberen Plenum, 1 HD-Einspeisuhng	NRI/GRS 00	nein	
		11,2%-Bruch einer Verbindungsleitung zum oberen Plenum, 2 HD-Einspeisung	NRI/GRS 00	nein	
		0,5%-Bruch im kalten Strang mit HD-Einspeisung	NRI/GRS 00	nein	
PACTEL	ITE 06	Naturumlauf, ISP 33	THZ 93 GRS 94	nein	
	SBL-03	0,04 % Leck; 3,3 % Leistung			
	SBL-04	1 % Leck; 3,3 % Leistung			
	SBL-07	0,04 % Leck im kalten Strang; 3,3 % Leistung, Druckhalter vom Primärsystem isoliert (Erweiterung des ISP-33), kontinuierlich verringertes primärseitiges Kühlmittelinventar			
	SBL-22	0,04 % Leck im kalten Strang, Verwendung eines Dampferzeugers mit größerem Durchmesser, kürzeren Heizrohren, größerer Anzahl von Rohren	HTWSZ 97	nein	
	LSR-10	Loop seal refilling test	HTWSZ 96	nein	
	SIR-11	Stufenweise Inventarverringerung			
	SIR-20	Naturumlauf bei 4,0 MPa (PS)/ 1,2 MPa (SS) Anfangs-Druck, geänderter Dampferzeuger, stufenweise Verringerung des Wasserinventars	HTWSZ 98	empfehlenswert	
	SIR-21	Naturumlauf bei 1,6 MPa (PS)/ 0,3 MPa (SS) Anfangs-Druck, geänderter Dampferzeuger, stufenweise Verringerung des Wasserinventars	HTWSZ 98	empfehlenswert	

Tabelle 5-3 Matrix IIa: Kleines, mittleres und großes Leck in WWER-Druckwasserreaktoren mit horizontalen Dampferzeugern (Fortsetzung 1)

			Rechnung durchgeführt	Wiederholung erforderlich	Rechnung geplant
PSB WWER	XT-3-02	3 %-Leck im kalten Strang	Kurt.I 05	nein	
	XT-2x25-02	2 x 25 %- Leck (zweiseitig) im kalten Strang; Störfall mit großem Leck	Kurt.I 05	nein	
	OECD/Nr. 1	11 %-Leck am oberen Plenum	NRI 05	nein	
	OECD/Nr. 4	Primär/Sekundär-Dampferzeugerleck am heißen DE4-Sammlerkopf; Leckgröße DN 100 in Reak-tor; OECD-Analytical Execise	GRS 05	ja	

Tabelle 5-4 Matrix III: Kleine und mittlere Brüche in Druckwasserreaktoren mit Geradrohr-Dampferzeugern

			Rechnung durchgeführt	Wiederholung erforderlich	Rechnung geplant
GERDA	160702	20 cm² Leck im Pumpenbogen	ABB/GRS 91	ja	

Tabelle 5-5 Matrix IV: Transienten in Druckwasserreaktoren

			Rechnung durchgeführt	Wiederholung erforderlich	Rechnung geplant
LOFT	L9-3	Ausfall Speisewasserversorgung, ATWS			
PKL-III	A1.2	Asymmetr. Abfahren mit 1 HKP und 3 isol. DE			
	A2.1	Abfahren mit 4 DE im Notstromfall, ähnlich LOBI A1-87			
	A2.2	Abfahren mit 3 DE im Notstromfall, 1 DE isoliert			
	A3.2	Wiederzuschalten der HKP bei Deckelblase			
	A5.1	10 % Frischdampfleitungsleck			
	A5.2	Ausfall der Speisewasserversorgung bei einem DE			
	B3.1	Abfahren der Anlage mit 1 von 4 DE	GRS 94	nein	
LOBI-II	A1-87	Abfahren			
	A2-90	Notstromfall ATWS	GRS 02	nein	
	BT-01	10 % Leck im Frischdampfleitung	GRS 90	nein	
	BT-12	Dampfleitungsbruch	Battelle 89	nein	
KBR (Brokdorf)		Inbetriebnahmeversuch (Simulation DE-Heizrohrleck,21.11.86)	GRS 95	nein	
		Lastabwurf auf Eigenbedarf (11.3.1991)	GRS 95	nein	
		TUSA (14.8.1993)	GRS 95	nein	
		Fehlschließen Speisewasser-Vollastregelventil, RESA (25.4.1995)	GRS 95/PE 98	nein	
GKN-2 (Konvoi)		Lastabwurf auf Eigenbedarf (2.4.92)	GRS 97	nein	
		RESA (18.10.91)	GRS 97	nein	
		3-Loop-Betrieb (20.5.93)	GRS 97	nein	
KKU (Unter-weser)		Lastabwurf auf Eigenbedarf (17.2.99)	GRS 00	nein	
		TUSA, RESA (6.6.98 und 14.10.98)	GRS 00	nein	
		Geplantes Abfahren (26.-27.6.99)	GRS 00	nein	
KKP-2		PUMA 1von 4 vom 19.11.1998	GRS 02	nein	
		Störung des Leistungsreglers vom 21.05.1999	GRS 02	nein	
		TUSA vom 28.02.2001	GRS 02	nein	
		RESA vom 08.10.2000	GRS 02	nein	
		Abfahren zur Jahresrevision vom 23.07.2000	GRS 02	nein	

Tabelle 5-6 Matrix IVa: Transienten in WWER-Druckwasserreaktoren mit horizontalen Dampferzeugern

			Rechnung durchgeführt	Wiederholung erforderlich	Rechnung geplant
PACTEL	LOF-01	Ausfall Speisewasserversorgung (1 Schleife, 75 KW Kernleistung)	HTWSZ 94	nein	
	LOF-04	Ausfall Speisewasserversorgung (3 Schleifen, 166 KW Kernleistung)	HTWSZ 94	nein	
Greifswald, Block 4, WWER-440/230		Schnellablastung um 100 MW	GRS 91	nein	
Greifswald, Block 4, WWER-440/230		Inbetriebnahmetest: Ausfall von 2 Hauptumwälzpumpen	GRS 91	nein	
Dukovany WWER-440/213		Ausfall von 1, 2, 3 und 6 Hauptumwälzpumpen	NRI/GRS 97	nein	
Dukovany WWER-440/213		RESA und TUSA verursacht durch EP1-Signal	NRI/GRS 00	nein	
Bohunice WWER-440/213		Transiente ausgelöst vom Signal „Druck im Primärsystem < 8,3 MPa“	NRA/GRS 01	nein	
Kozloduj WWER-1000/W320		Auslaufen von zwei benachbarten von vier Hauptkühlmittelpumpen	INRNE/GRS 00	nein	

Tabelle 5-7 Matrix V: Transienten unter Nachkühlbedingungen in Druckwasserreaktoren

			Rechnung durchgeführt	Wiederholung erforderlich	Rechnung geplant
PKL III	B 4.5	Ausfall Nachkühlsystem im Mitte-Loop Betrieb, geschlossener Primärkreis, ein DE sekundärseitig betriebsbereit	GRS 01	nein	
	E 3.1	Ausfall Nachkühlsystem im 3/4-Loop Betrieb, geschlossener Primärkreis, ein DE sekundärseitig betriebsbereit; Übernahme der Wärmeabfuhr durch DE unter Reflux Condenser Bedingungen führt zur Bildung von minderborierten Bereichen im Primärkreis; OECD/PKL-Benchmark	GRS 05	ja	
	F 2.1	Ausfall Nachkühlsystem im Nachkühlbetrieb- Betrieb, geschlossener Primärkreis, 1 DE betriebsbereit, Variation primärseitiges Wasserinventars (Run 1: Mittleres Wasserinventar (3/4-Loop, heißer DH), Run 2: Geringes Wasserinventar (Unterkante HKL, kalter DH); Run 3: Variation RDB-Deckelbypass)			2007
BETHSY	6.9 a	Ausfall Nachkühlsystem, Druckhalter-Mannloch offen			
	6.9 c	Ausfall Nachkühlsystem, Mannlöcher des Druckhalters und der DE-Austrittskammer offen, ISP 38	GRS/Kurt.I 97	empfehlenswert	
	6.9 d	Ausfall Nachkühlsystem, Primärkühlsystem halb offen			

Tabelle 5-8 Matrix Va: Transienten unter Nachkühlbedingungen in WWER-Druckwasserreaktoren mit horizontalen Dampferzeugern

		Rechnung durchgeführt	Wiederholung erforderlich	Rechnung geplant
PMK	Offener Primärkreis, Wasserspiegelabsenkung	GRS/KFKI 95		
	Offener Primärkreis, Schließen des Absperrventils im kalten Strang	GRS/KFKI 95		

Tabelle 5-9 Matrix VI: Maßnahmen zum anlageninternen Notfallschutz in Druckwasserreaktoren

Primärseitige Druckentlastung und Bespeisung bei Nichtverfügbarkeit der Hauptwärmesenke

			Rechnung durchgeführt	Wiederholung erforderlich	Rechnung geplant
UPTF-TRAM	B1	Abblasen bei konstantem Druck	GRS 96/Wh.98	nein	
	B2	Abblasen mit zus. Abblasequerschn.			
	B3	Abblasen mit zus. Abblasequerschn., Wirksamkeit der DS, alternative Notkühlbespeisung (Volumen-regel- und Zusatzboriersystem)			
PKL III	B1.6	Totaler Wechselstromausfall, 4 heißs. Druckspeichereinspeisungen			
	C1.2	Kleines Leck mit Ausfall SEP, primärs. Druckentl.	GRS 96	nein	
	C5.2	Notstromfall mit primärs. Druckentlastung u. Bespeisung mit 4DS heißs. sowie anschließende sekundärs. Druckentlastung u. Bespeisung	GRS 98	empfehlenswert	
LOBI-II	BT-02	Ausfall der Speisewasserversorgung	Battelle 93	nein	
BETHSY	5.2a	Zweiphasen-Naturumlauf bei leeren DE-Sekundär-seiten und primärs. Druckentlastung und Bespeisung			
	5.2c	Vollständiger Ausfall des Speisewassers	FZR 98	nein	

Tabelle 5-9 Matrix VI: Maßnahmen zum anlageninternen Notfallschutz in Druckwasserreaktoren (Fortsetzung)

Sekundärseitige Druckentlastung und Bespeisung bei Nichtverfügbarkeit der Hauptwärmesenke

PKL III	B1.2	Totaler Ausfall der Speisewasserversorgung, Beitrag Wasserinventar der Speisewasserleitung zur Wärmeabfuhr, mobile Pumpe	GRS 96 Wh. 98	empfehlenswert
	C2.2	Primärseitige Druckentlastung bei einem DE-Heizrohrbruch nach Versagen der DH-Hilfssprühung und fehlerhaftem Offenbleiben des FD-Abblaseregelventils		
	C4.2	Ausfall der Speisewasserversorgung mit sekundärseitiger Druckentlastung und Bespeisung von 4 DE aus der Speisewasserleitung und dem Speisewasserbehälter		
	D1.2	Kleines Leck mit Ausfall SEP, sekundärs. Druckentl.	GRS 99	nein
LOB- II	BT-17	totaler Ausfall der Speisewasserversorgung, ähnlich PKL III B1.2	Battelle 93	nein
BETHSY	9.1b	0,5 % Leck im kalten Strang, keine Hochdruckeinspeisung, ISP 27	GRS 92	ja, Wiederauf-füllen und Fluten
	5.2d	Totalausfall der Elektrizitätsversorgung und Ausfall des Notspeisewassers	GRS 94, Wh. 98	nein
	9.3	DE-Heizrohrbruch mit Ausfall d. HD-Einsp. u. der Speisewasserversorgung	FZR 98	nein

Tabelle 5-10 Matrix VIa: Maßnahmen zum anlageninternen Notfallschutz in WWER-Druckwasserreaktoren mit horizontalen Dampferzeugern

Sekundärseitige Druckentlastung und Bespeisung

			Rechnung durchgeführt	Wiederholung erforderlich	Rechnung geplant
PACTEL	SBL-31	0,22%-Leck im kalten Strang (d=2,5 mm), 3 Kreisläufe, zusätzliche AM-Maßnahmen (sekundärseitige Druckentlastung u. Bespeisung), Hochdruck- und Druckspeichereinspeisung	HTWSZ 99	empfehlenswert	
	SBL-33	0,44%-Leck im kalten Strang (d=3,5 mm), 3 Kreisläufe, zusätzliche AM-Maßnahmen (sekundärseitige Druckentlastung u. Bespeisung), Hochdruck- und Druckspeichereinspeisung, (Borvermischung)	HTWSZ 99	empfehlenswert	

Tabelle 5-11 Matrix VII: Kühlmittelverluststörfälle in Siedewasserreaktoren

			Rechnung durchgeführt	Wiederholung erforderlich	Rechnung geplant
ROSA III	Run 912	5 % Leck in Treibwasserschleife, ISP 12	TÜV-BY 93	ja	
	Run 984	3 % Leck in Treibwasserschleife	GRS 92	ja	
	Run 916	50 % Leck in Treibwasserschleife (Update-Matrix)	GRS 92	ja	
	Run 983	2F-Bruch in Treibwasserschleife	GRS 89	ja	
	Run 952	Bruch Dampfleitung	GRS 89	ja	
FIST	6SB2C	3 % Leck in Umwälzleitung (ähnlich zu ROSA-III 984)	GRS 95	nein	
	6MSB1	Bruch Dampfleitung	GRS 95	nein	

Tabelle 5-12 Matrix VIII: Transienten in Siedewasserreaktoren

			Rechnung durchgeführt	Wiederholung erforderlich	Rechnung geplant
ROSA-III	971	Notstromfall mit Ausfall des Hochdruckkernsprühens, Durchdringungsabschluss	TÜV-BY 93	ja	
FIST	6PMC1	Isolation valve closure without scram (ATWS)			
KRB (Gundremmingen)		TUSA (2.10.87)	GRS 94	nein	
		Fehlerhaftes Öffnen Turbinenumleitstation (18.10.90)	GRS 94	nein	
		Temperaturtransiente am RDB-Boden (8.5.93)	GRS 94	nein	
KKK (Krümmel)		Ausfall Hauptwärmesenke (17.1.91)	GRS 93	nein	
		RESA ohne Durchdringungsabschluss (29.10.91)	GRS 96	nein	
		Frischdampfdurchdringungsabschluss (18.7.90)	GRS 96	nein	
KKP-1		Ausfall Hauptwärmesenke (22.3.96)	GRS 99	nein	
		RESA (6.3.96 und 3.12.96)	GRS 99	nein	
		Geplantes Abfahren (11.1. 96)	GRS 99	nein	

Tabelle 5-13 Einzeleffektexperimente

Einzeleffektexperimente	*Rechnung durchgeführt*	*Rechnung geplant*	*Bemerkung*
BATTELLE • SWR 2R Dampfleitungsbruch (ISP-6) • SL1 Speisewasserleitungsbruch	GRS 89 GRS 83		
KWU-Karlstein: Blowdown-Wärmeübergang, RS 37 C			
CREARE • 1/5, Gegenströmung im Downcomer • 1/15, Gegenströmung im Downcomer • 1/30, Gegenströmung im Downcomer	RUB 98 RUB 98 RUB 98		
ECTHOR • Freiblasen des Pumpenbogens	RUB 93		
FLECHT SEASET	GRS 97		
GE VESSEL • 5702-16 Druckentlastung (Leck oben) • 5803-2 Druckentlastung (Leck unten)	GRS 88 GRS 88		
HDR • V 45 Dampfleitungsbruch • V 21.1 Speisewasserleitungsbruch • V 21.3 Speisewasserleitungsbruch	GRS 89 GRS 92		
HDR COCO • E 33.1131, 0.4 MPa, Dampfüberschuss, RT = 0,8 • E 33.1142, 0.4 MPa, Dampfmangel, RT = 1,2 • E 33.1168, 0.4 MPa, Dampfmangel, RT = 3,0 • E 33.1241, 2.5 MPa, Dampfüberschuss, RT = 0,8 • E 33.1246, 2.5 MPa, Dampfmangel, RT = 1,6 • E 33.2331, 7.0 MPa, Dampfüberschuss, RT = 0,8 E 33.2338, 7.0 MPa, Dampfmangel, RT = 3,0	GRS 93 GRS 93 GRS 93		

.../

Einzeleffektexperimente (1. Fortsetzung Tab. 5-13)	*Rechnung durchgeführt*	*Rechnung geplant*	*Bemerkung*
IVO-Loop Seal, Freiblasen Pumpenbogen			
• Testserie schräger Einlauf, D = 80 mm; WWER 440	GRS 88		
• Testserie gerader Einlauf, D = 80 mm; WWER 1000	GRS 88		
• Testserie, D = 850 mm; WWER 1000	GRS 88, 94		
IVO-CCFL			
• Gegenströmung in BE-Kopfplatte, Stabbündel (Luft-Wasser)	RUB 00		
HORUS II: Kondensationsverhalten liegender WWER-Dampferzeuger			
Einspeisung von Dampf in DE-Rohr; geschlossener Austrittssammler			
• PCHS 5, 9, 10, 11	THZ 94		
• PCHS 23, 25, 30, 36	THZ 00		unsichere Randbedingungen bei PCHS 23, 25, 30 und 36
Einspeisung von Dampf; geöffneter Austrittssammler			
• POHS 1, 3, 5	THZ 94		
HORUS II: Kondensationsverhalten liegender WWER-Dampferzeuger (Einfluss nicht-kondensierbarer Gase)			
Einspeisung von Dampf in DE-Rohr mit N_2 ; geschlossener Austrittssammler			
• PCHG 7	THZ 96		
Einspeisung von Dampf in DE-Rohr mit N_2 ; geöffneter Austrittssammler			
• POHG 9	THZ 96		
Einspeisung von Dampf und N_2 in DE-Rohr; geschlossener Austrittssammler			
• PCHN 5, 6, 8, 10	THZ 00		unsichere Randbedingungen bei PCHN 5, 6, 8, 10 vermutet

.../

Einzeleffektexperimente (2. Fortsetzung Tab. 5-13)	*Rechnung durchgeführt*	*Rechnung geplant*	*Bemerkung*
MARVIKEN • Test 22, kritische Strömung bei Druckentlastung	GRS 87		
NEPTUNUS • Y05 Druckhalter-Transiente, D = 800 mm	GRS 89, 90		
OMEGA • Heizstabbündel-Test Nr. 9	GRS 94		
Patricia-GV2 • DE-Gemischspiegel (3 stationäre, 3 transiente Tests)	RUB 96		
PERICLES • 3 Boil-off Tests (stationär) im rechteckigen Heizstabbündel, p = 0,3 - 0,55 MPa	GRS 90		
SCTF • S3-09/713, 2F-Bruch kalter Strang, kaltseitige Einspeisung, Genehmigungs-Einspeiseraten (EM) • S3-10/714, 2F-Bruch kalter Strang, kaltseitige Einspeisung, BE-Einspeiseraten • S3-11/715, 2F-Bruch kalter Strang, kombinierte Einspeisung, BE-Einspeiseraten • S3-13/717, 2F-Bruch kalter Strang, kombinierte Einspeisung, Genehmigungs-Einspeiseraten • S3-14/718, 2F-Bruch kalter Strang, kaltseitige Einspeisung, flaches Leistungsprofil • S3-16/720, 2F-Bruch kalter Strang, kaltseitige Einspeisung, steiles Leistungsprofil			
SUPER MOBY DICK • Phasenseparation vor seitlichem Abzweig • Kritische Strömung, d = 5,2 mm, kritische Strömung, d = 15,5 mm	GRS 85		

Einzeleffektexperimente (3. Fortsetzung Tab. 5-13)	*Rechnung durchgeführt*	*Rechnung geplant*	*Bemerkung*
Thermodynamic Nonequilibrium, RS 77 • Verdampfung	GRS 96		
THETIS • Acht Boil-off Tests (stationär) im runden Heizstabbündel, p = 0,5 - 4,0 MPa	GRS 90		
KfK • T-Stück Experimente			
TOSHIBA-Vessel • Druckentlastungstest mit Aufschäumen im Druckbehälter	TUM 92		
TPTF • Sechs Boil-off Tests im Heizstabbündel bei verschiedenen Drücken (3,0; 7,0; 11,9 MPa) • Testserie Schichtenströmung im horizontalen Rohr	GRS 91 GRS 94, 96		
Technische Universität Hannover • Gegenströmung im Brennelementkopf			
UPTF-TRAM • A1, Kernbeaufschlagung bei Heißeinspeisung • A2, Schichtenströmung im heißen Strang • A4, Reflux-Condenser-Betrieb mit Notkühleinspeisung • A5, Freiblasen des Pumpenbogens • C2, Einspeisung Sicherheits-Einspeisepumpe in dampfgefüllten kalten Strang, Einfluss von Stickstoff • C3, Mischung unterschiedlich temperierter Wassermassenströme • C1, Thermisches Mischen im Kaltstrang und Ringraum bei kaltseitiger Notkühleinspeisung	Pitscheider 93 RUB 96 GRS 01 GRS 03 GRS 02		N2 Transport vom kal-ten Strang zum DC in Gegenströmung zum Dampf derzeit nicht möglich auch Rechnung mit FLUBOX-2D/3D auch Rechnung mit FLUBOX-2D/3D

.../

Einzeleffektexperimente (4. Fortsetzung Tab. 5-13)	*Rechnung durchgeführt*	*Rechnung geplant*	*Bemerkung*
UPTF			
• 7, Gegenströmung im Ringraum	RUB 02, GRS 06		auch Rechnung mit FLUBOX-2D/3D
• 11, Gegenströmung im heißen Strang (Reflux-Kondensation)	GRS 90		
• 26, run 230, Gegenströmung im heißen Strang bei NKW- Einspeisung (gesättigtes NKW)	GRS 90		
• 15A, Gegenströmung an BE-Kopfplatte, großes Leck, ECC-Einspeisung in intakten heißen Strang, niedriger Druckbereich			Wiedh. empf.
• 20, UPI (upper plenum injecton)-Gegenströmung an BE-Kopfplatte	Pitscheider 90		
• 30, Gegenströmung an BE-Kopfplatte, kleines Leck, Hochdruckeinspeisung in intakten heißen Strang	GRS 92		
• 22, Vent Valve			
• 23, Vent Valve			
• 29, UP Deentrainment			UPTF 8: Wiederh. zu "Strömungsform im heißen Strang" notwendig
• Z3, Gegenströmung im Ringraum	GRS 92, RUB 02		
• 8, Strömungsform, Kondensation im kalten/heißen Strang	GRS 01		
• 9, Strömungsform, Kond. bei kombinierter Einspeisung			
• Z1, Wassermitriss vom DC zum kalten Bruchstrang während Flutphase (Kondensation bei Einspeisung in kalten Strang)			
• 5A, Gegenströmung im Ringraum			
• 5B, Gegenströmung im Ringraum			
• 6, Gegenströmung im Ringraum	RUB 02		
• 10B, Wassermitriß Kernbereich bis Dampferzeuger	RUB 98		
• 10C, Gegenströmung im Kernbereich mit Stabhalteplatte	RUB 98		
• 25A, Entrainment im DC			
• 25B, Entrainment im DC			

Tabelle 5-14 **Stand der ATHLET-Validierung entsprechend den Validierungsmatrizen für Anlagen westlicher Bauart (Integralexperimente, aufgetretene Anlagentransienten)**

		Pressurized water reactors					Boiling water reactors	
Facility or plant	Scale	Large breaks	Small breaks, intermediate breaks	Transients	Shut-down transients	AM	LOCAs	Transients
UPTF/ TRAM	1:1	6/2	2/2			3/1		
CCTF	1:25	4/4						
LOFT	1:50	2/2	4/3	1/0				
LSTF	1:50		3/1					
BETHSY	1:100		7/7		3/1	5/4		
PKL	1:145	2/2	13/8	7/1	3/2	7/4		
ROSA-III	1:424						5/5	1/1
FIST	1:642						2/2	1/0
LOBI	1:712	2/2	8/6	4/3		2/2		
GERDA	1:1686		1/1					
GKN-2	PWR			3/3				
KBR	PWR			4/4				
KKU	PWR			3/3				
KKP-2	PWR			5/5				
KRB	BWR							3/3
KKK	BWR							3/3
KKP-1	BWR							3/3
		16/12	38/28	27/19	6/3	17/11	7/7	11/10

Total status PWRs: 104/73

Total status BWRs: 18/17

Tabelle 5-15 **Stand der ATHLET-Validierung entsprechend den Validierungsmatrizen für Anlagen russischer Bauart (Integralexperimente, aufgetretene Anlagentransienten)**

		WWER Reactors					RBMKs
Facility or plant	Scale	Large breaks	Small breaks, intermediate breaks	Transients	Shut-down transients	AM	LOCAs, Transients
PACTEL	1:305		9/5	2/2		2/2	
PMK-2	1:2070		6/6		2/2		
ISB-WWER	1:3000		6/6				
PSB-WWER	1:300	1/1	2/2	1/1			
PSB-RBMK	1:140						planned
Greifswald, Block 4, WWER-440/230	NPP			2/2			
Dukovany, WWER-440/213	NPP			2/2			
Bohunice, WWER-440/213	NPP			1/1			
Kozloduj WWER-1000	NPP			1/1			
		1/1	23/19	9/9	2/2	2/2	

Total status WWERs: 37/33

n/m = (number of experiments)/(number of documented ATHLET-calculations)

Tabelle 5-16 Stand der ATHLET-Validierung entsprechend der Validierungsmatrix für Einzeleffektversuche

Test Facility	No. of Tests	Test Facility	No. of Tests	Test Facility	No. of Tests
BATTELLE	2/2	IVO-CCFL	1/1	RS 77	1/1
KWU-Karlstein	1/0	HORUS II	6/6	THETIS	1/1
CREARE	3/3	MARVIKEN	1/1	KfK	1/0
ECTOR	1/1	NEPTUNUS	1/1	TOSHIBA Vessel	1/1
FLECHT SEASET	1/1	OMEGA	1/1	TPTF	2/2
GE VESSEL	2/2	Patricia-GV2	1/1	TU-Hannover	1/0
HDR	3/2	PERICLES	1/1	UPTF-TRAM	7/5
HDR COCO	7/3	SCTF	6/0	UPTF	20/10
IVO-Loop Seal	3/3	SUPER MOBY DICK	2/1		

Total status of separate effects tests: 77/50

n/m = (number of experiments)/(number of documented ATHLET-calculations)

10 Bilder

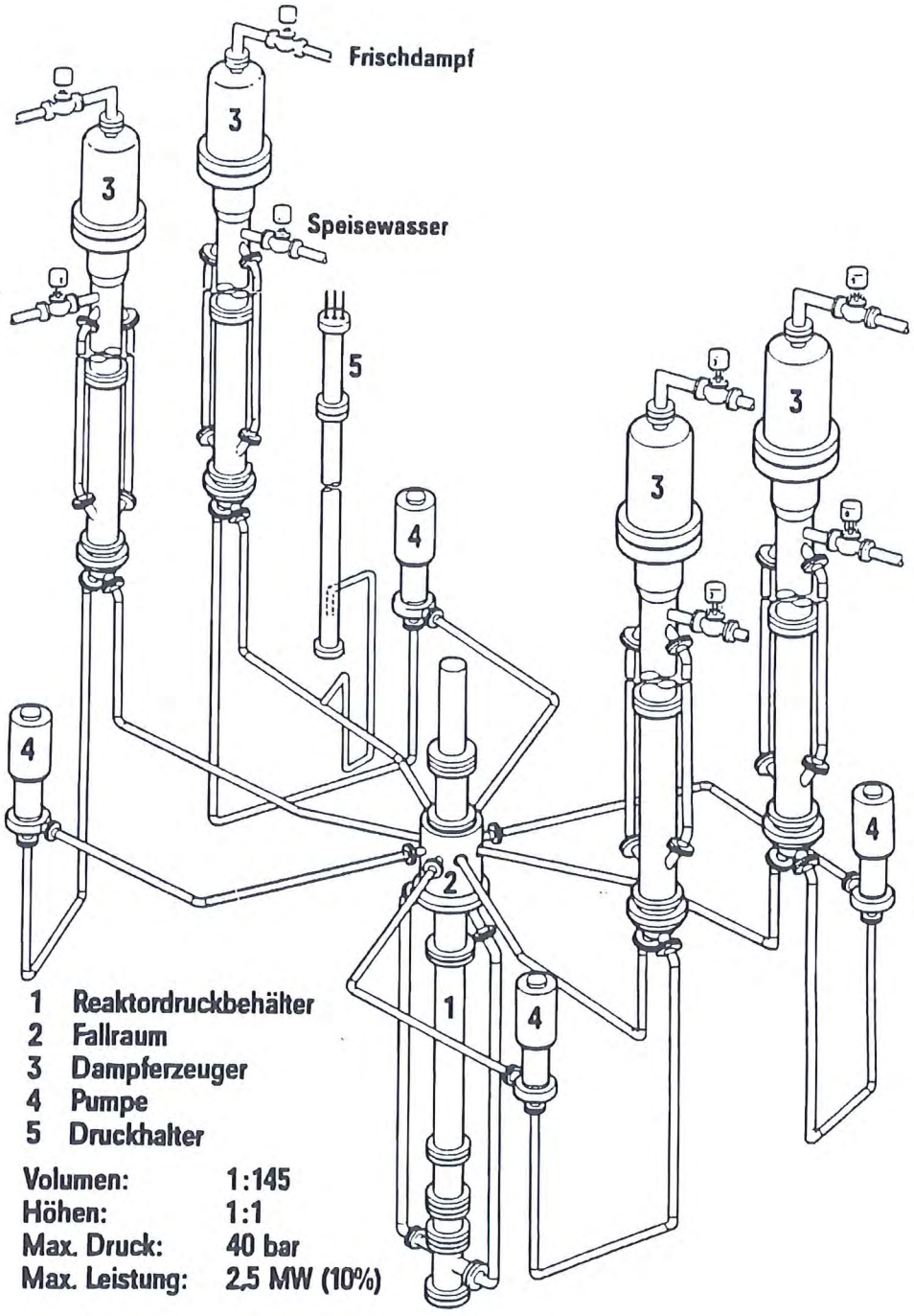


Bild 2.1-1 PKL III-Versuchsanlage

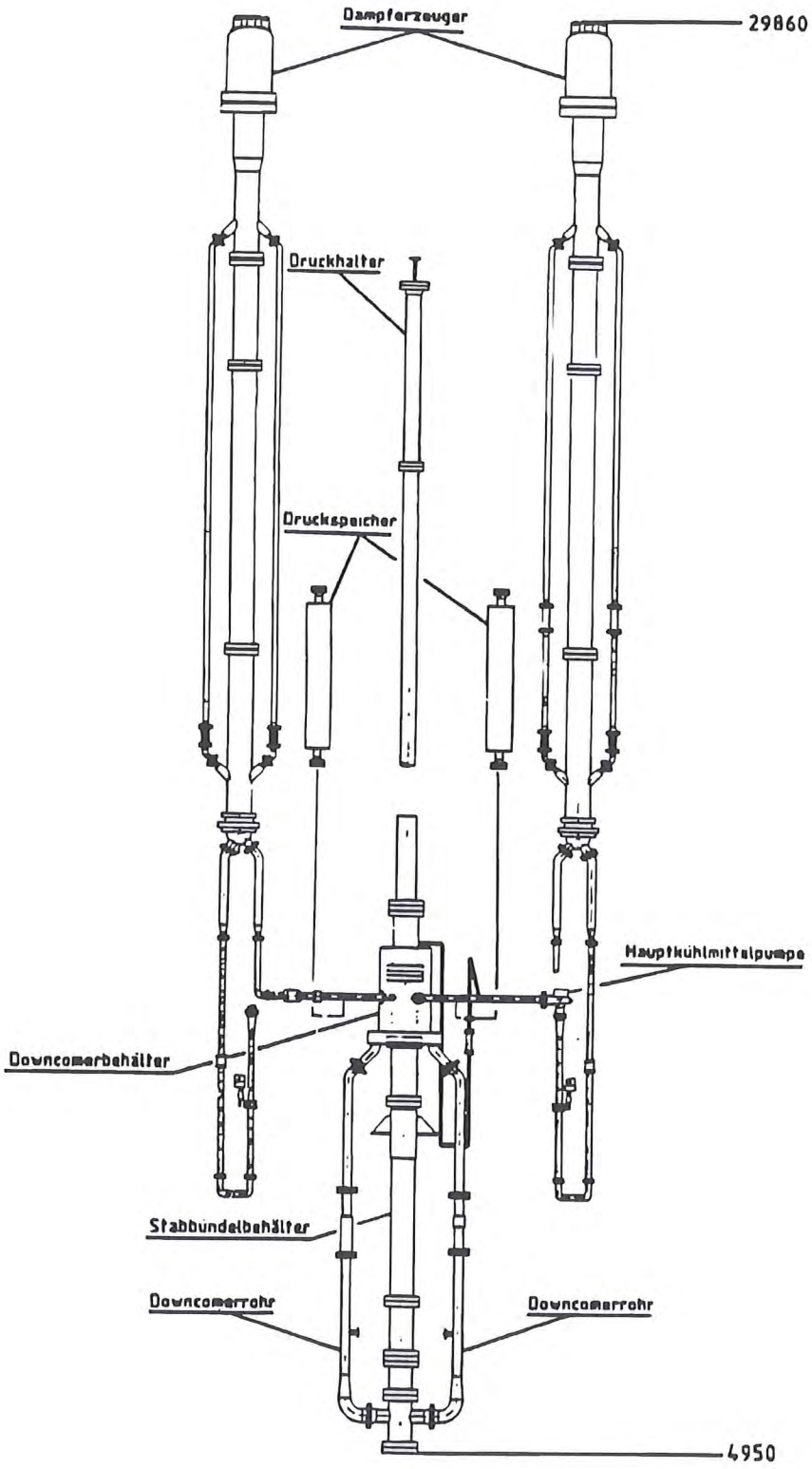


Bild 2.1-2 **Höhenverhältnisse in der PKL III-Versuchsanlage**

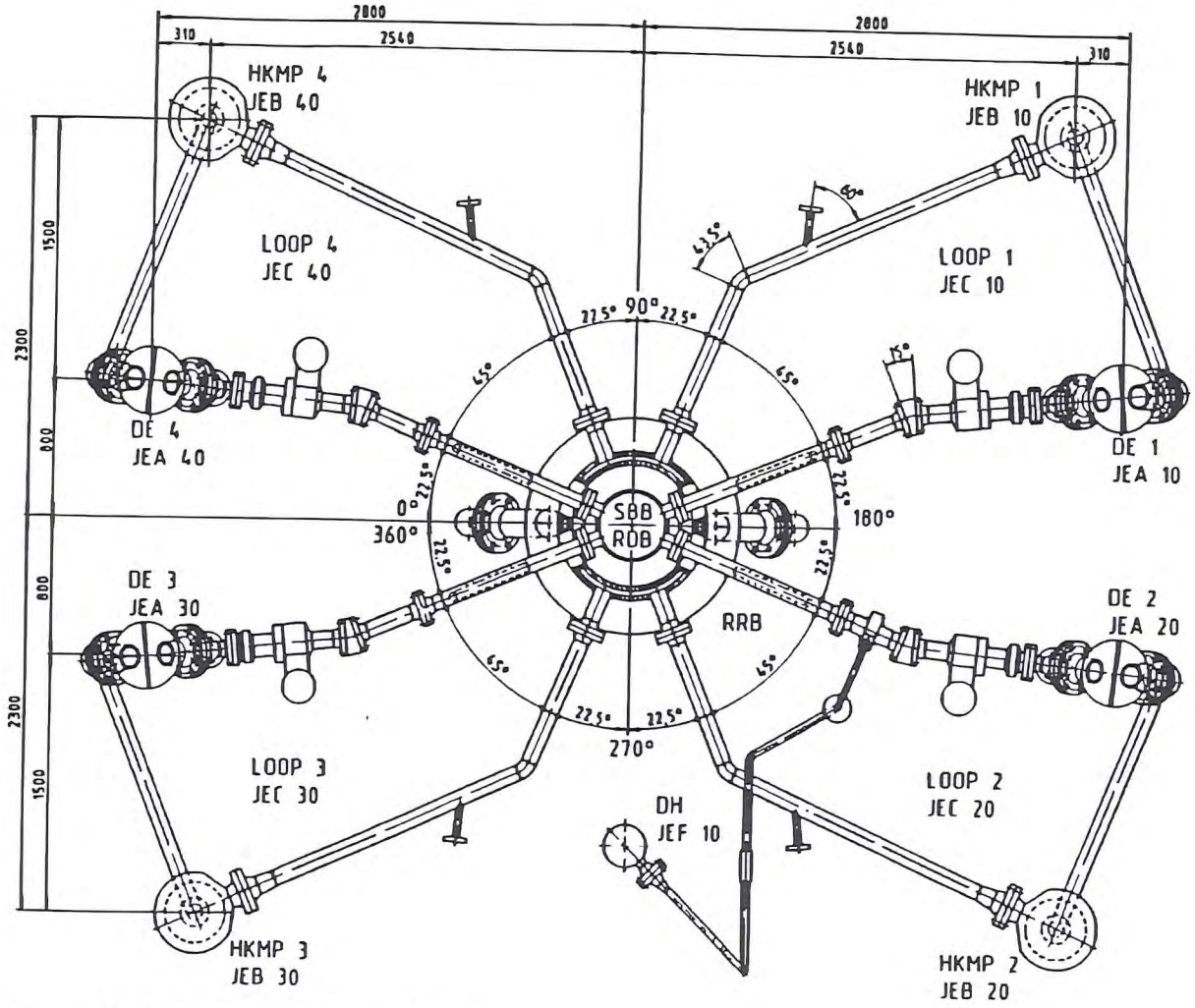
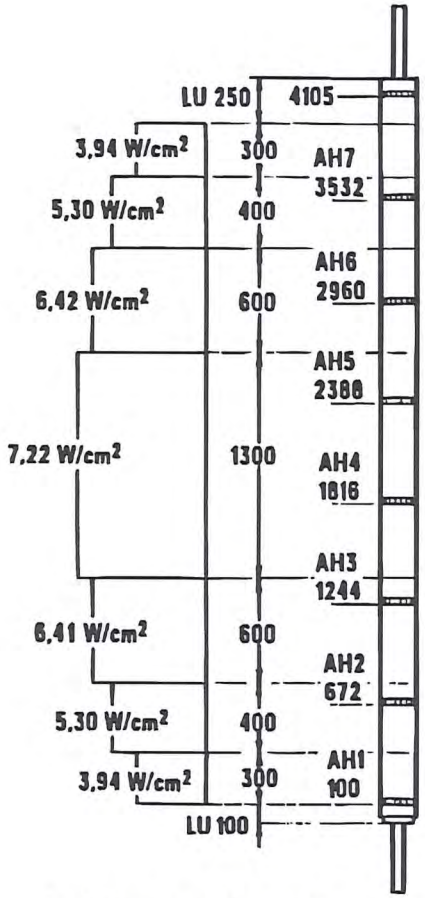
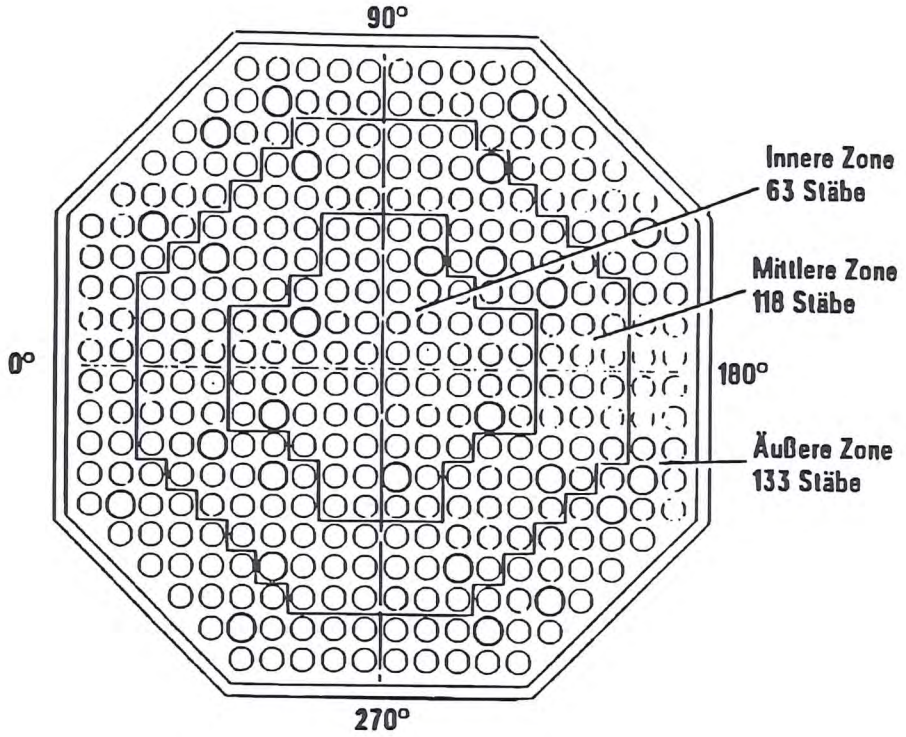


Bild 2.1-3 **Loopanordnung der PKL III-Versuchsanlage**



Leistungsverteilung, Lage der Abstandshalter



Anordnung der Heizstäbe und der Steuerstabführunsrohre

Bild 2.1-4 **Heizstabbündel der PKL III-Versuchsanlage**

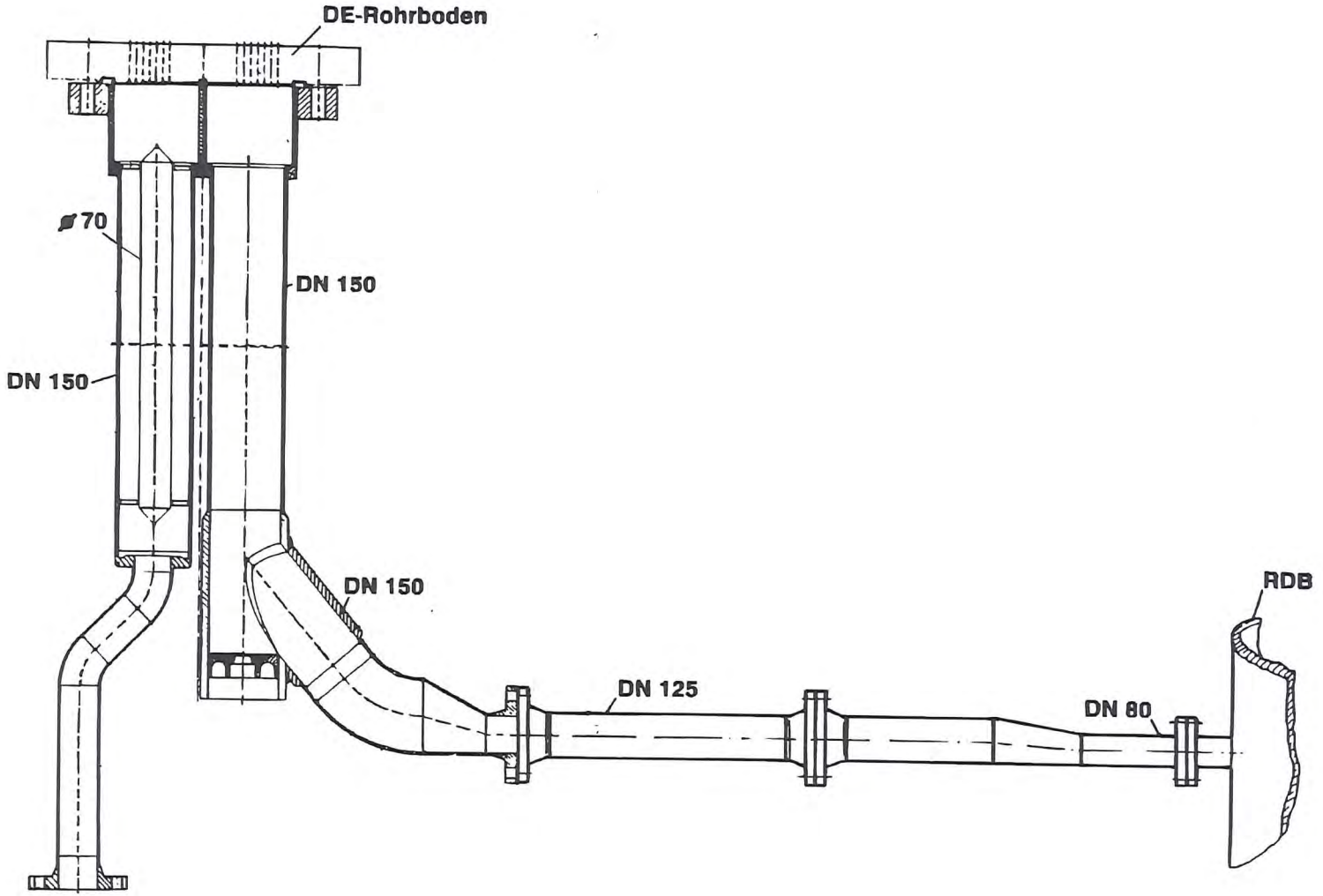


Bild 2.1-5 Heißer Strang der PKL III-Versuchsanlage mit DE-Ein- und Austritt (ab Juni 1990)

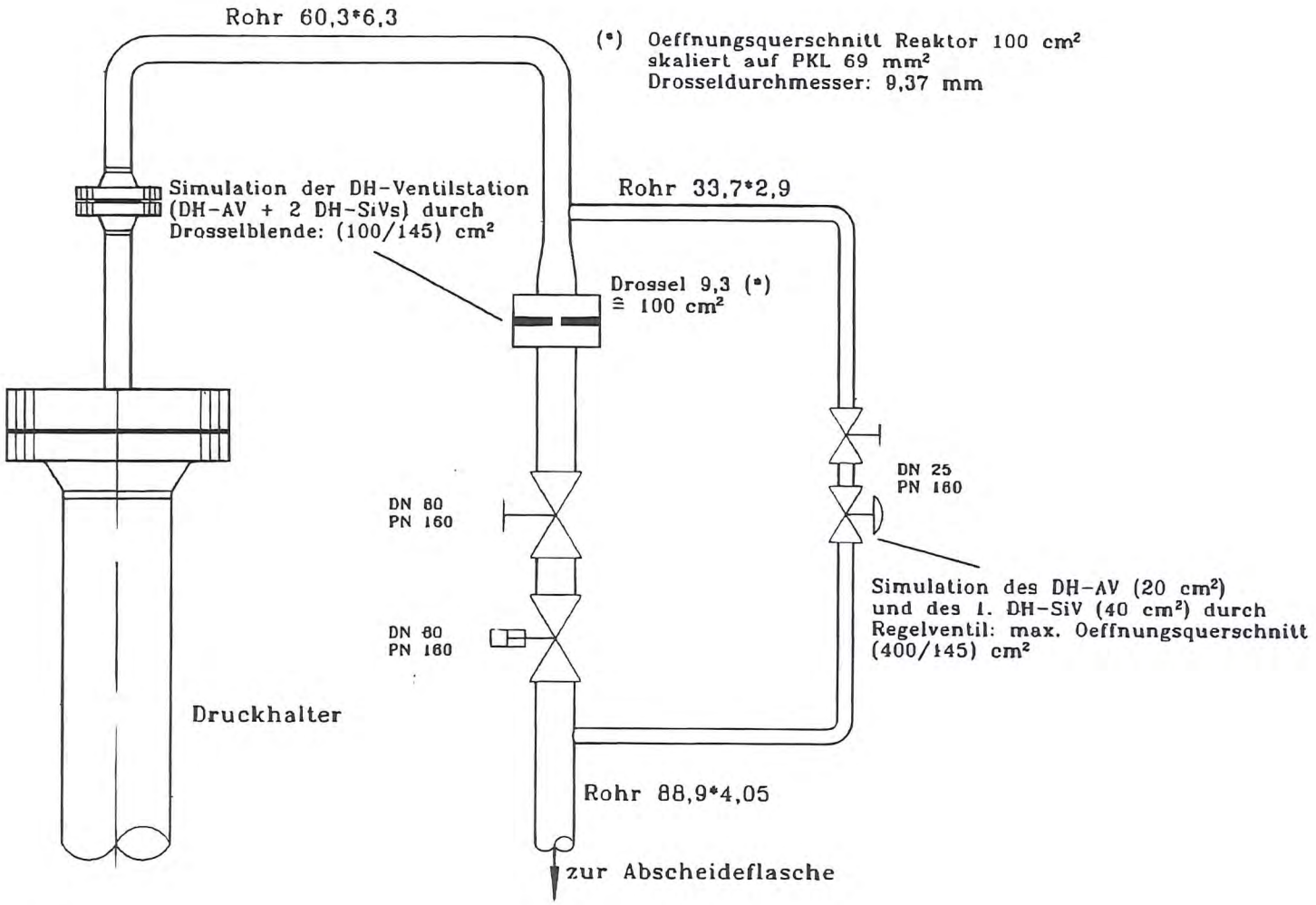


Bild 2.1-6 DH-Ventilstation der PKL III-Versuchsanlage

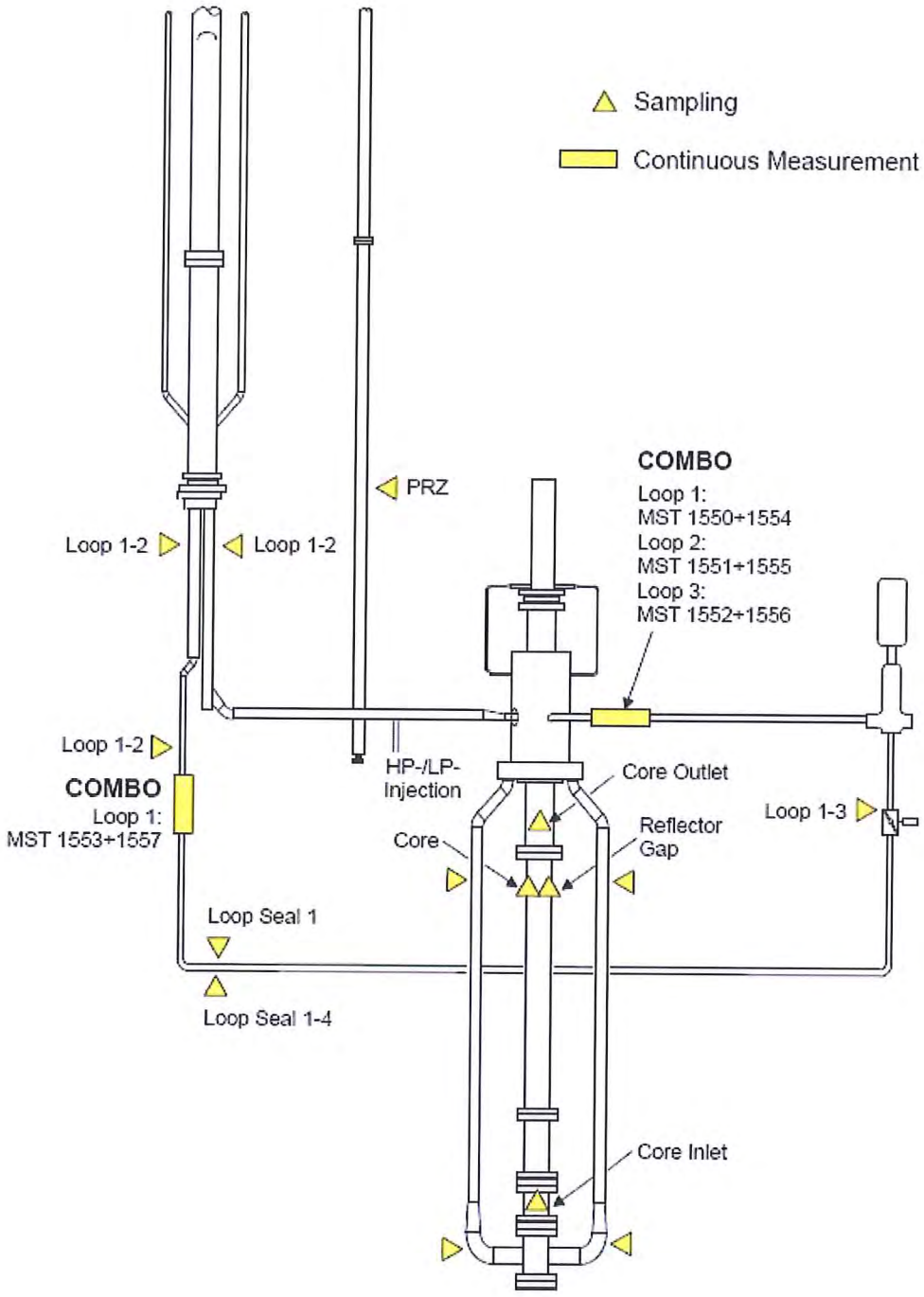


Bild 2.1-7 **Bormessungen im PKL-Primärkreis beim Versuch PKL III E3.1**

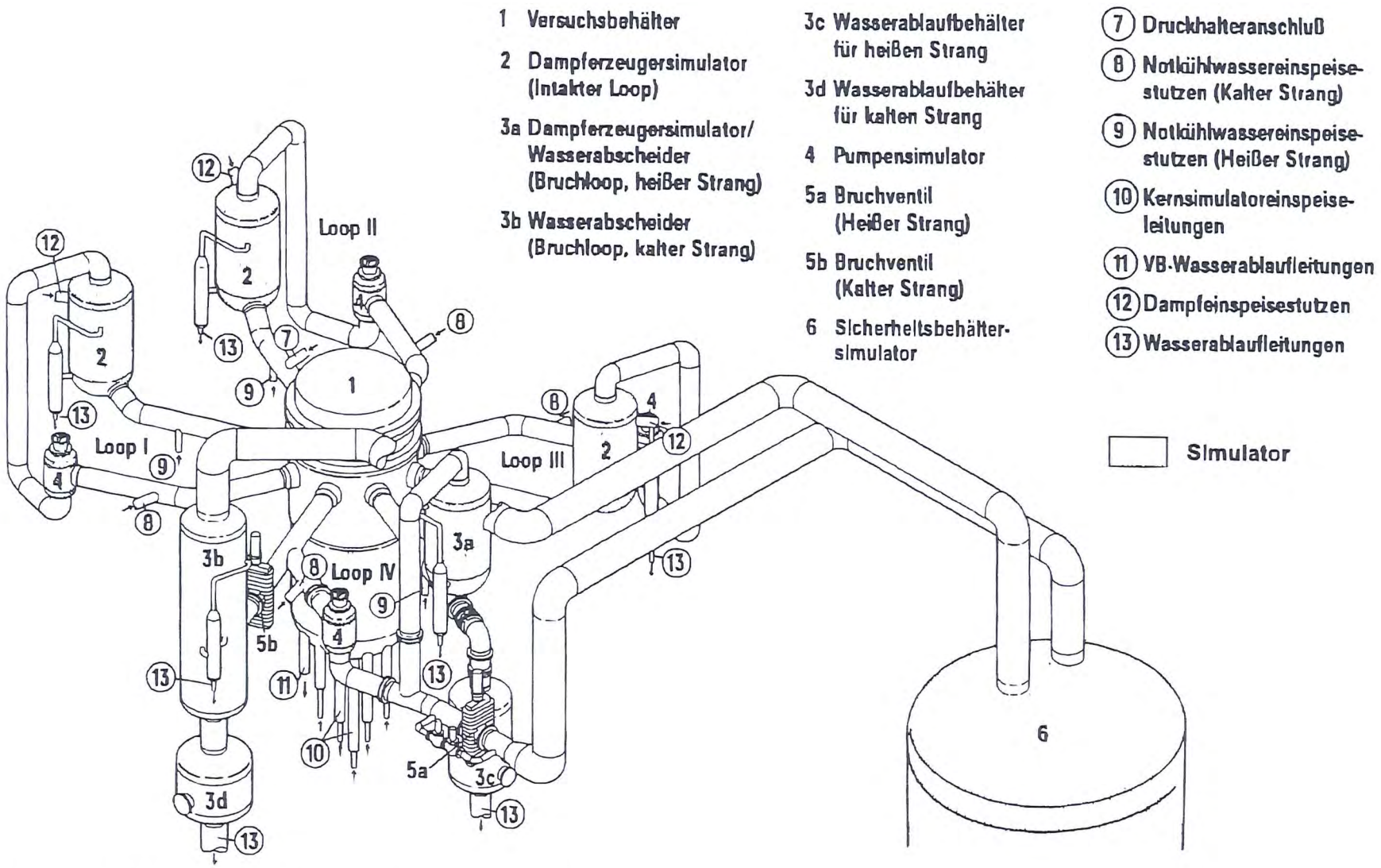


Bild 2.2-1 UPTF-Primärkreislauf mit Sicherheitsbehälter

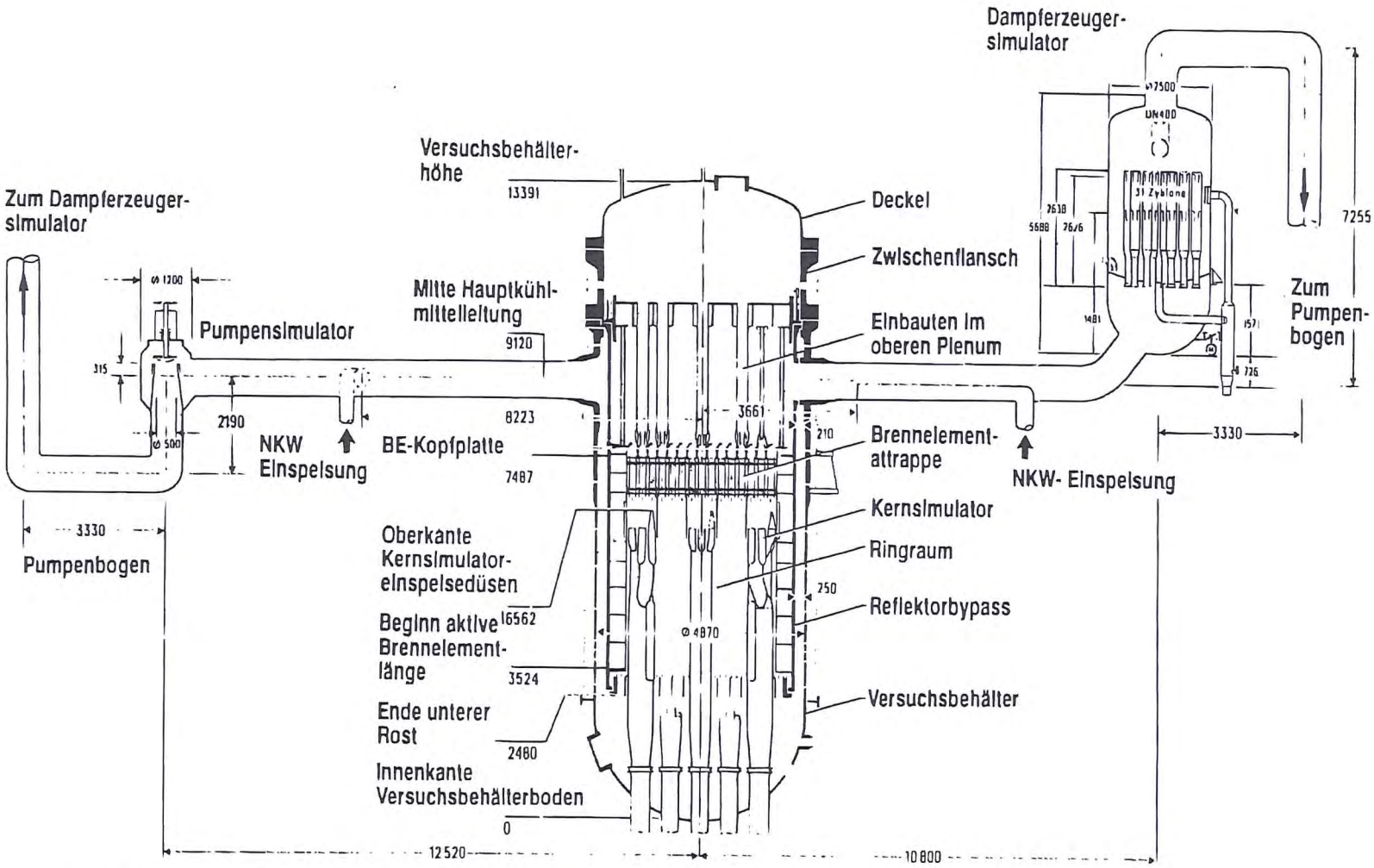
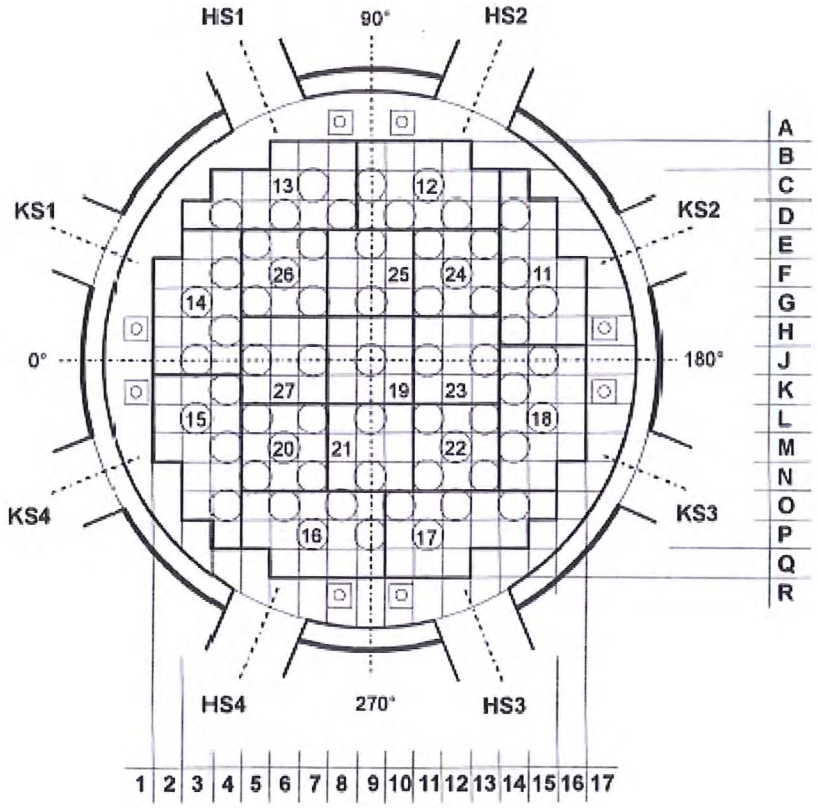


Bild 2.2-2 **UPTF: Loopabwicklung und Versuchsbehälter mit Hauptabmessungen**



HS = heißer Strang
KS = kalter Strang

Bild 2.2-3 **Querschnitt des UPTF-Versuchsbehälters mit Kernsimulator-Einspeisezonen**

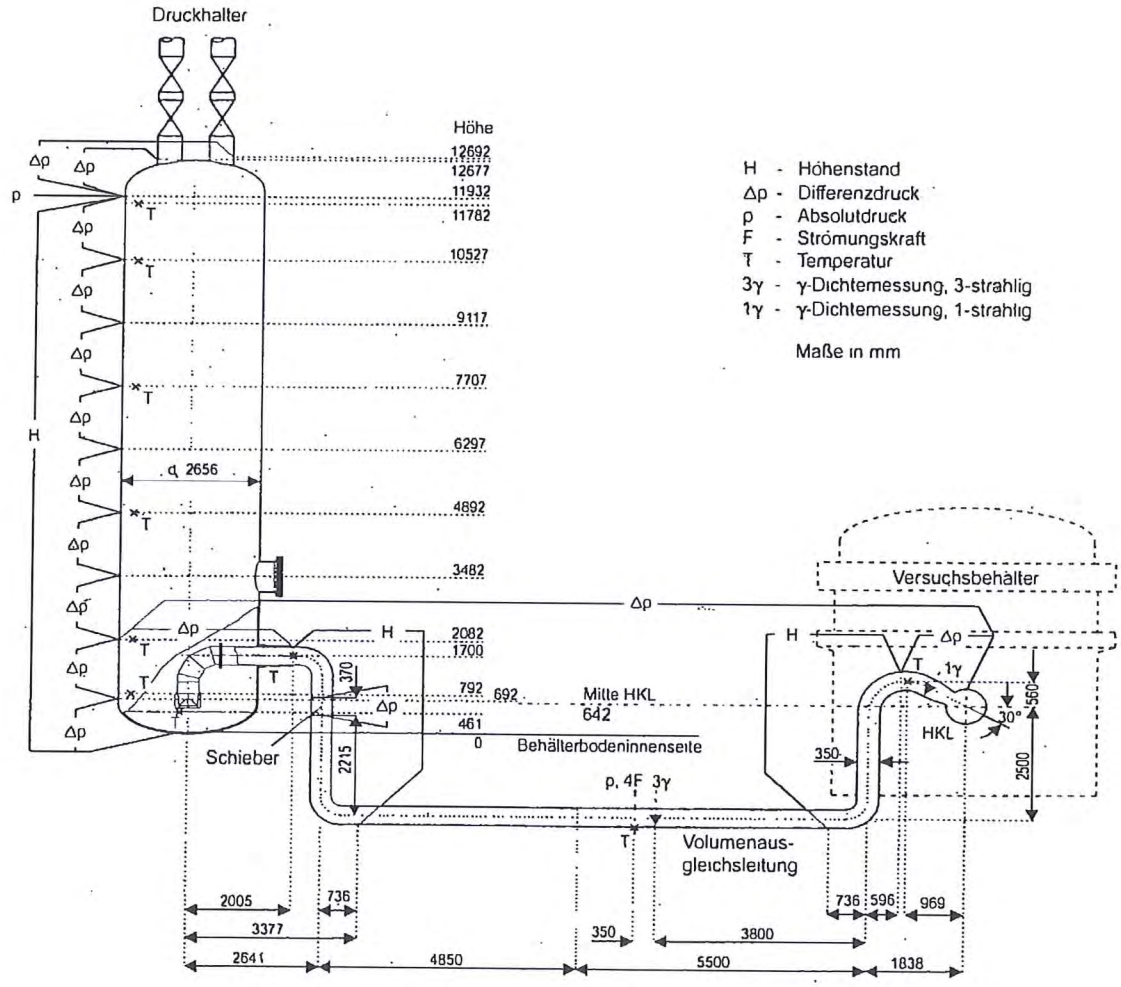
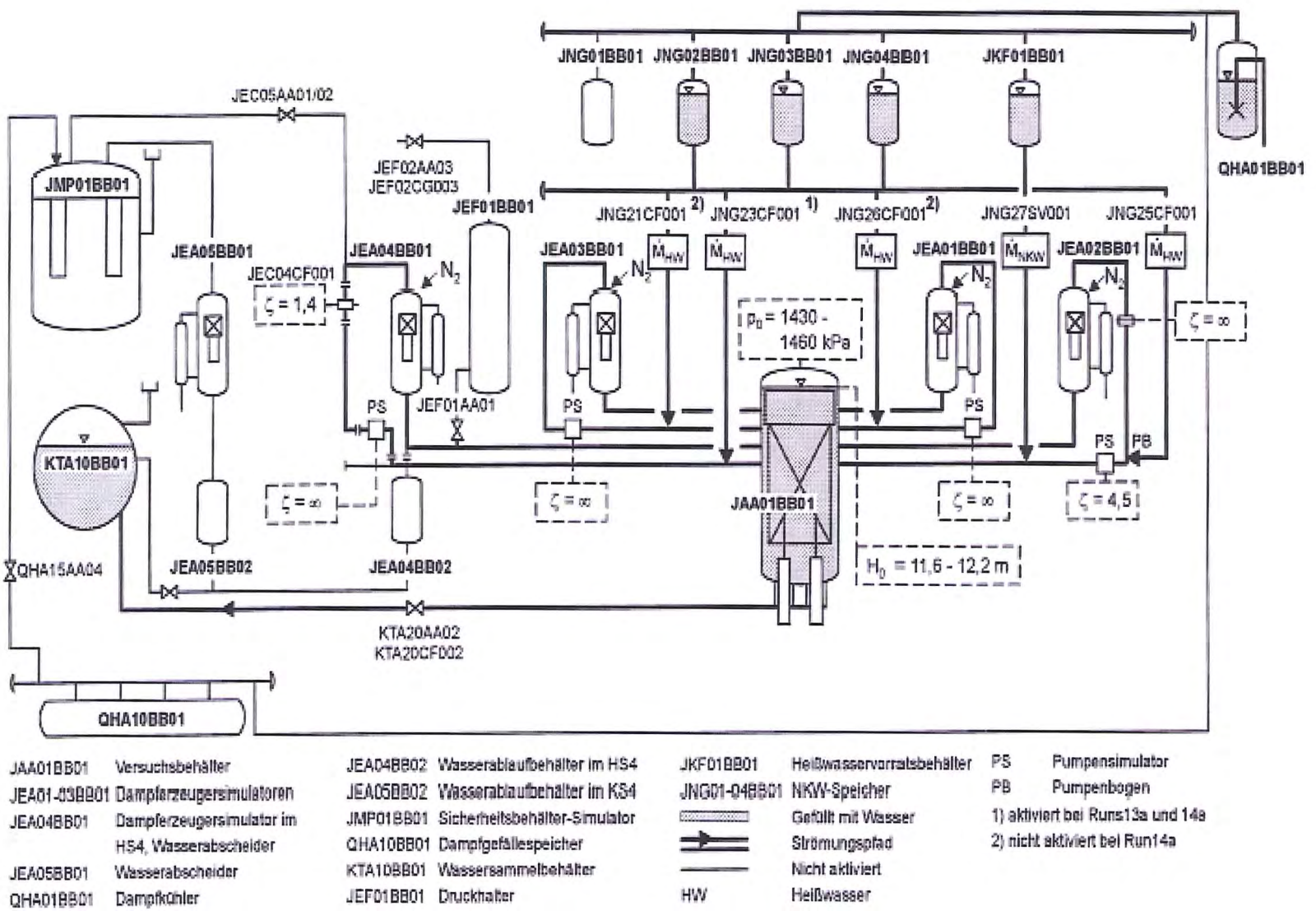


Bild 2.2-4 **UPTF TRAM: Druckhalter und Volumenausgleichsleitung (Surge Line)**



JAA01BB01	Versuchsbehälter	JEA04BB02	Wasserablaufbehälter im HS4	JKF01BB01	Heißwasservorratsbehälter	PS	Pumpensimulator
JEA01-03BB01	Dampferzeugersimulatoren	JEA05BB02	Wasserablaufbehälter im KS4	JNG01-04BB01	NKW-Speicher	PB	Pumpenbogen
JEA04BB01	Dampferzeugersimulator im HS4, Wasserabscheider	JMP01BB01	Sicherheitsbehälter-Simulator		Gefüllt mit Wasser	1) aktiviert bei Runs13a und 14a	
		QHA10BB01	Dampfgefällespeicher		Strömungspfad	2) nicht aktiviert bei Run14a	
JEA05BB01	Wasserabscheider	KTA10BB01	Wassersammelbehälter		Nicht aktiviert		
QHA01BB01	Dampfkühler	JEF01BB01	Druckhalter	HW	Heißwasser		

Bild 2.2-5 **Systemschaltplan mit versuchsspezifischen Anfangs und Randbedingungen (UPTF TRAM C3)**

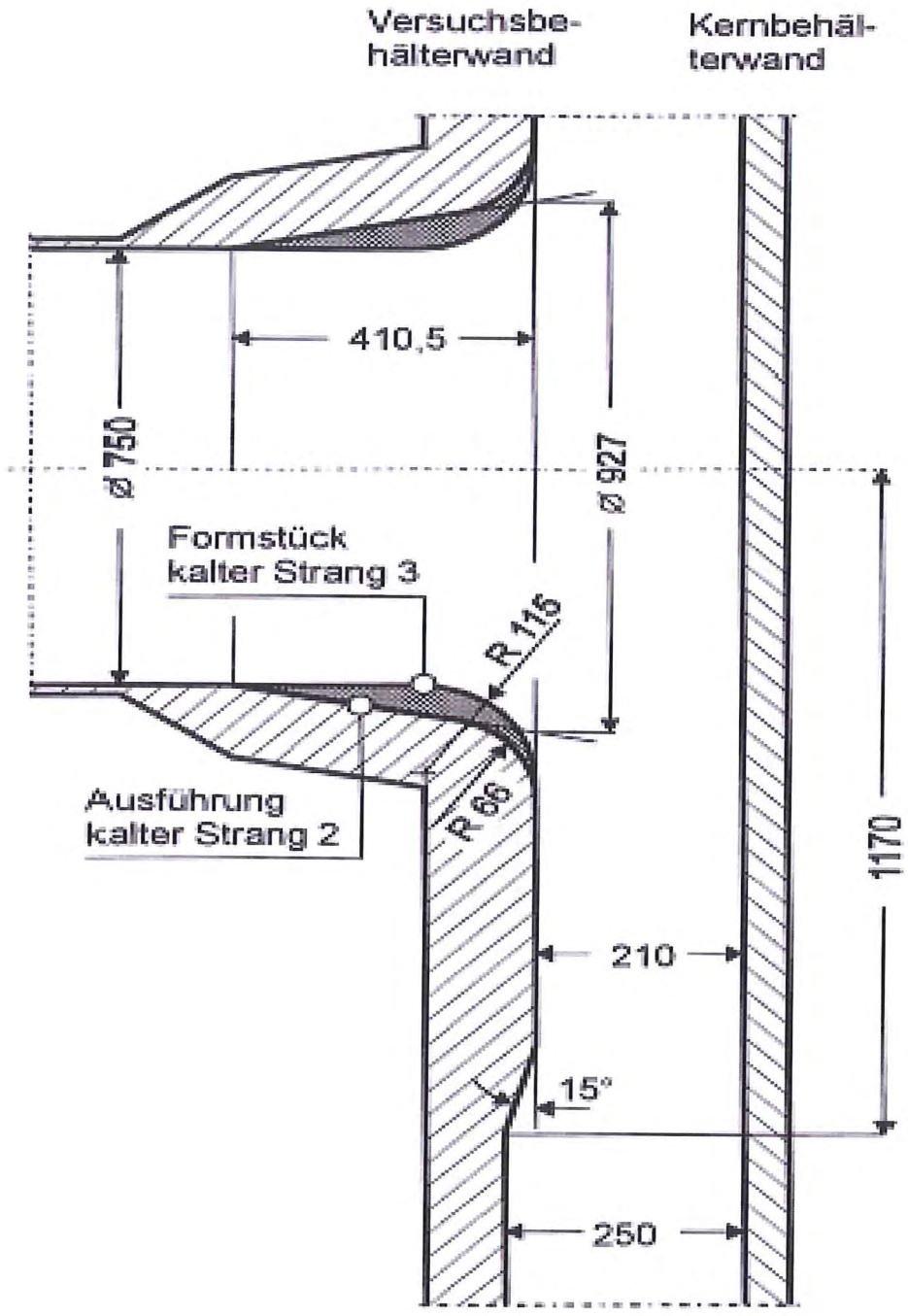


Bild 2.2-6 **UPTF-Einspeisegeometrie am Ringraum**

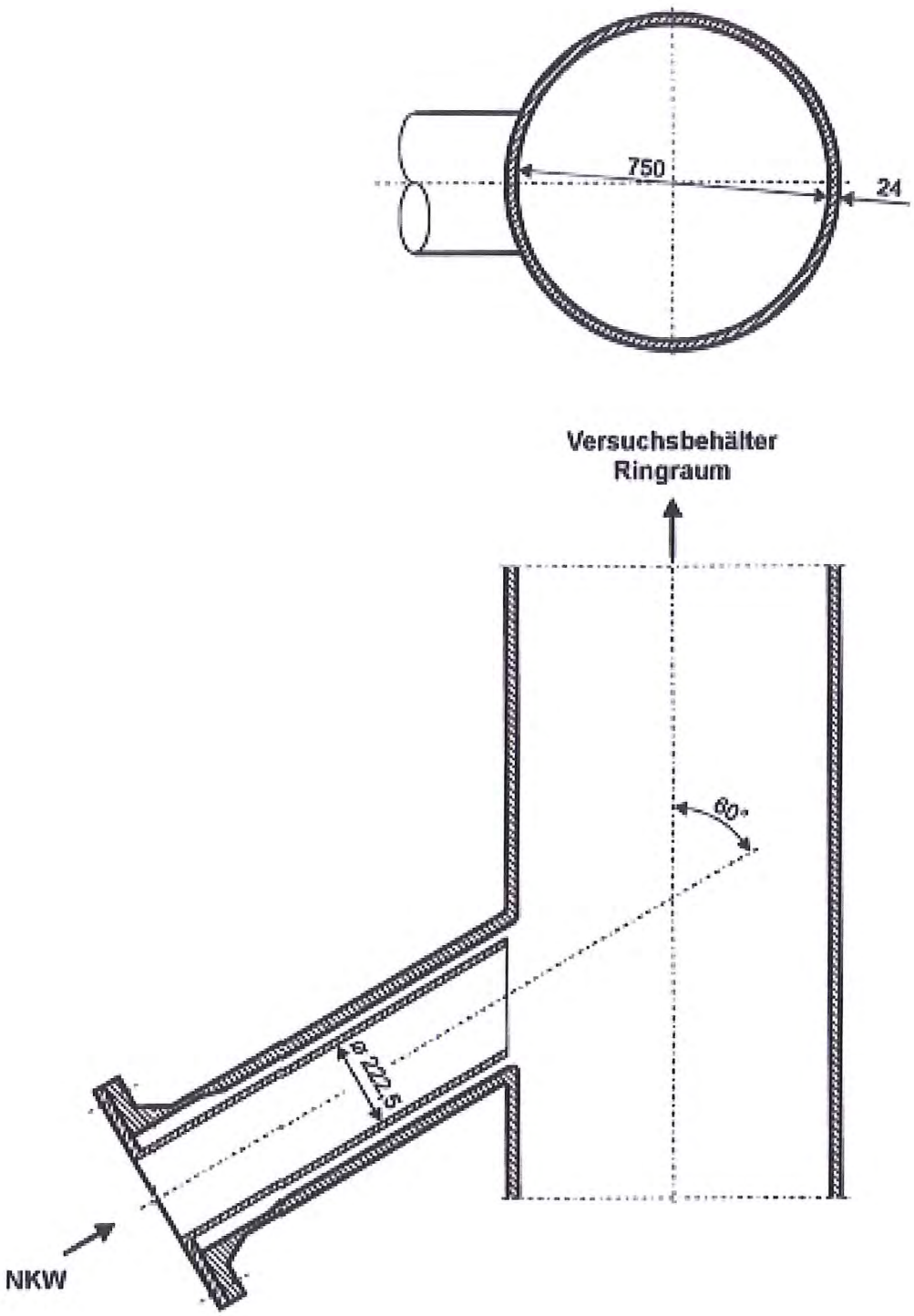


Bild 2.2-7 **UPTF-Notkühlwasser-Einspeisegeometrie kalter Strang**

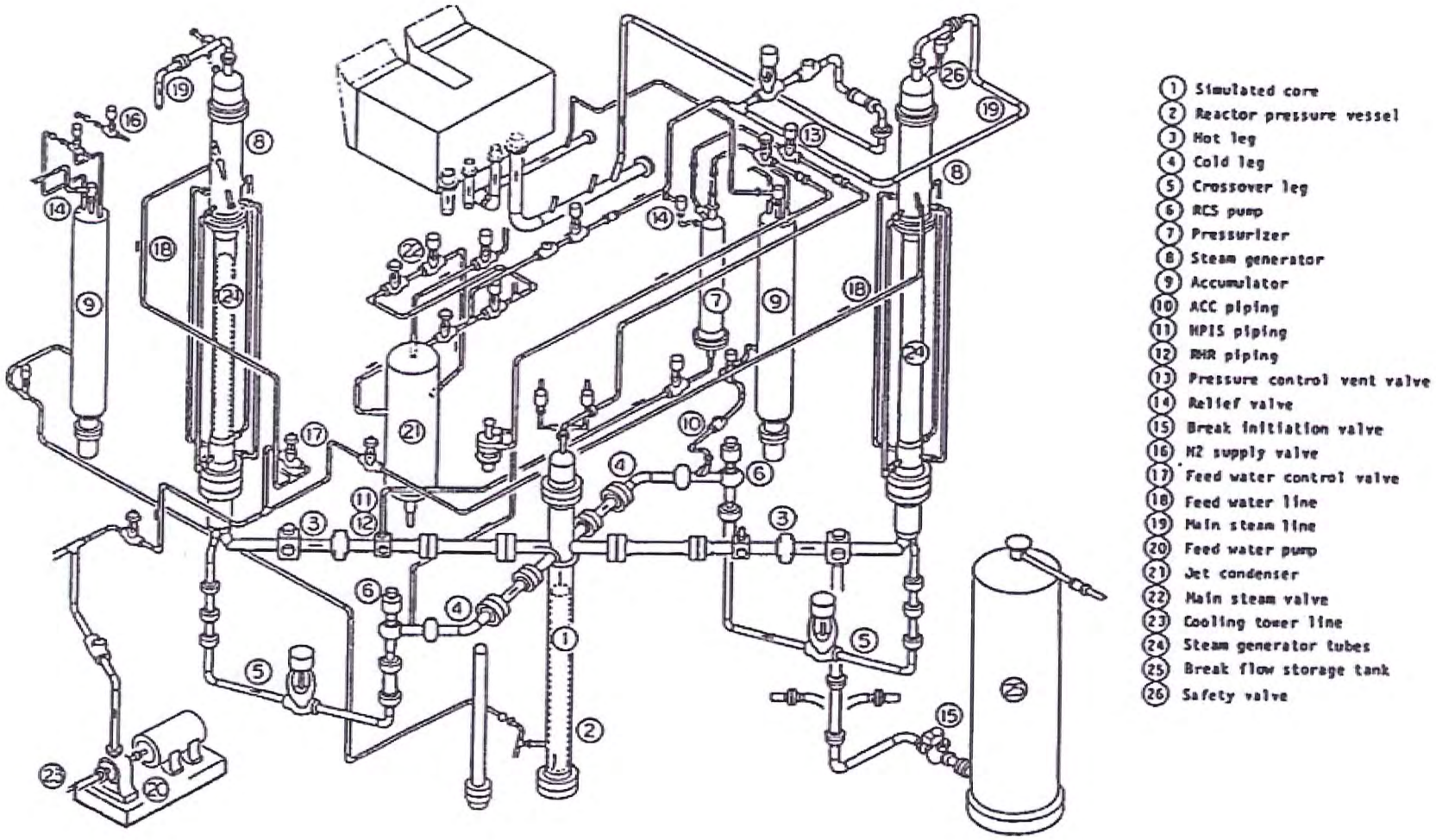
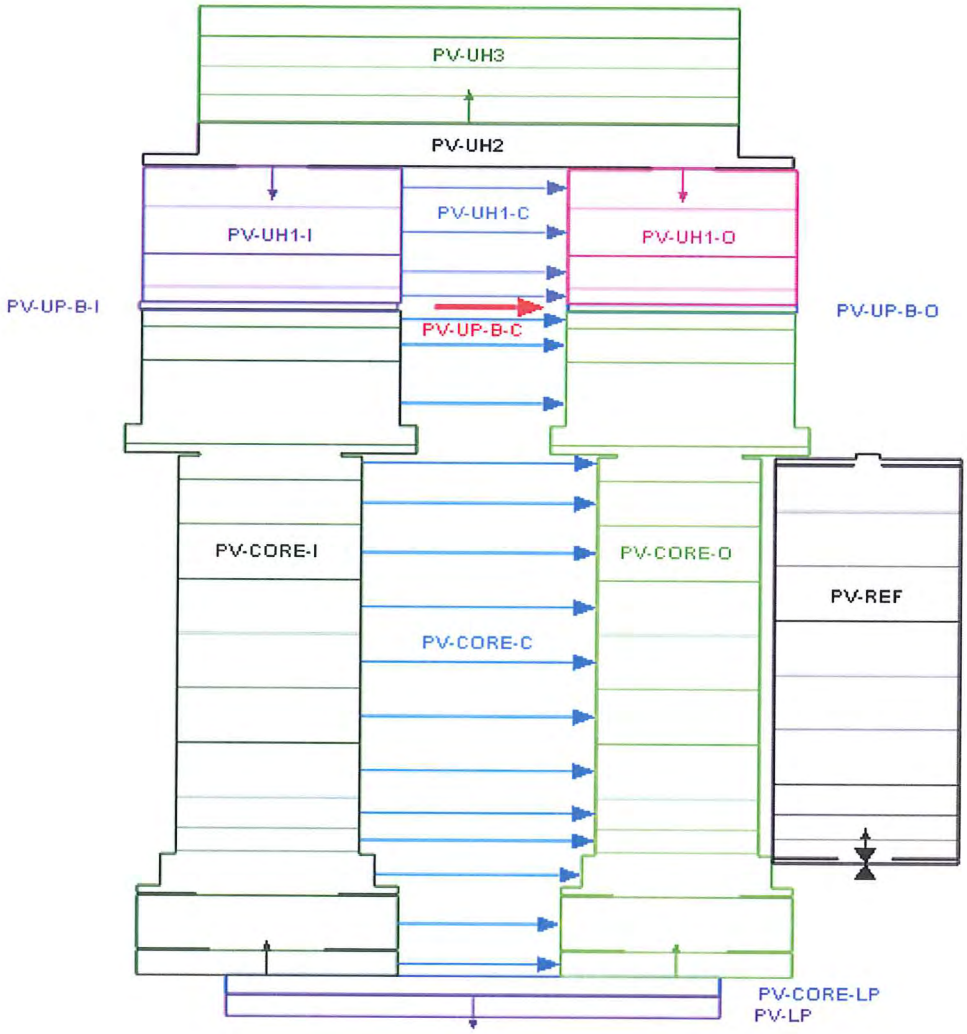
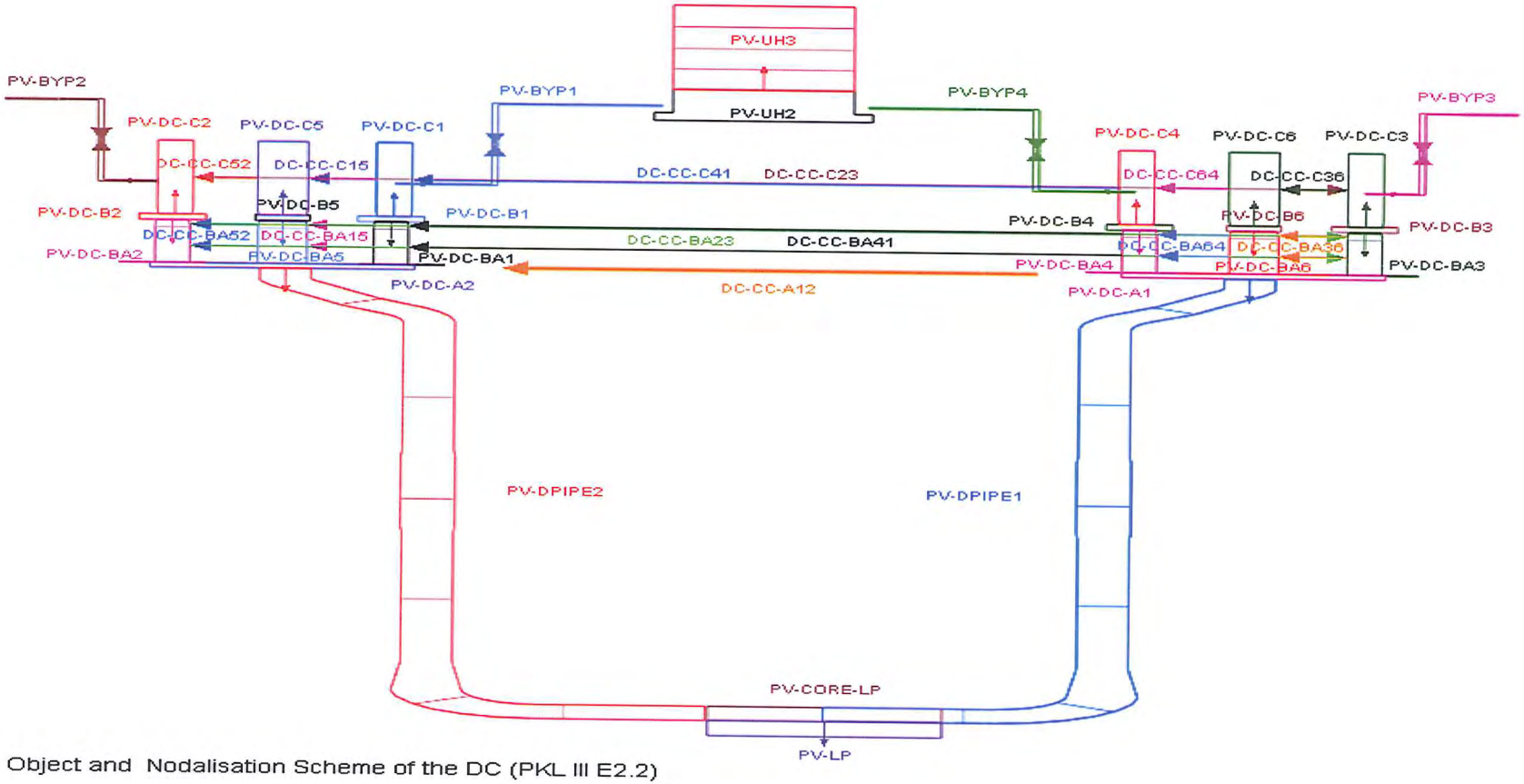


Bild 2.3-1 **Schematische Darstellung der Versuchsanlage ROSA IV/LSTF**



Object and Nodalisation Scheme of the Rod Bundle Vessel (PKL III E2.2)

Bild 3.4.1-1 Nodalisierungsmodell des Stabbündelbehälters der Versuchsanlage PKL III (PKL III E2.2)



Object and Nodalisation Scheme of the DC (PKL III E2.2)

Bild 3.4.1-2 Objektschema und Nodalisierung Rückströmraum (PKL III E2.2)

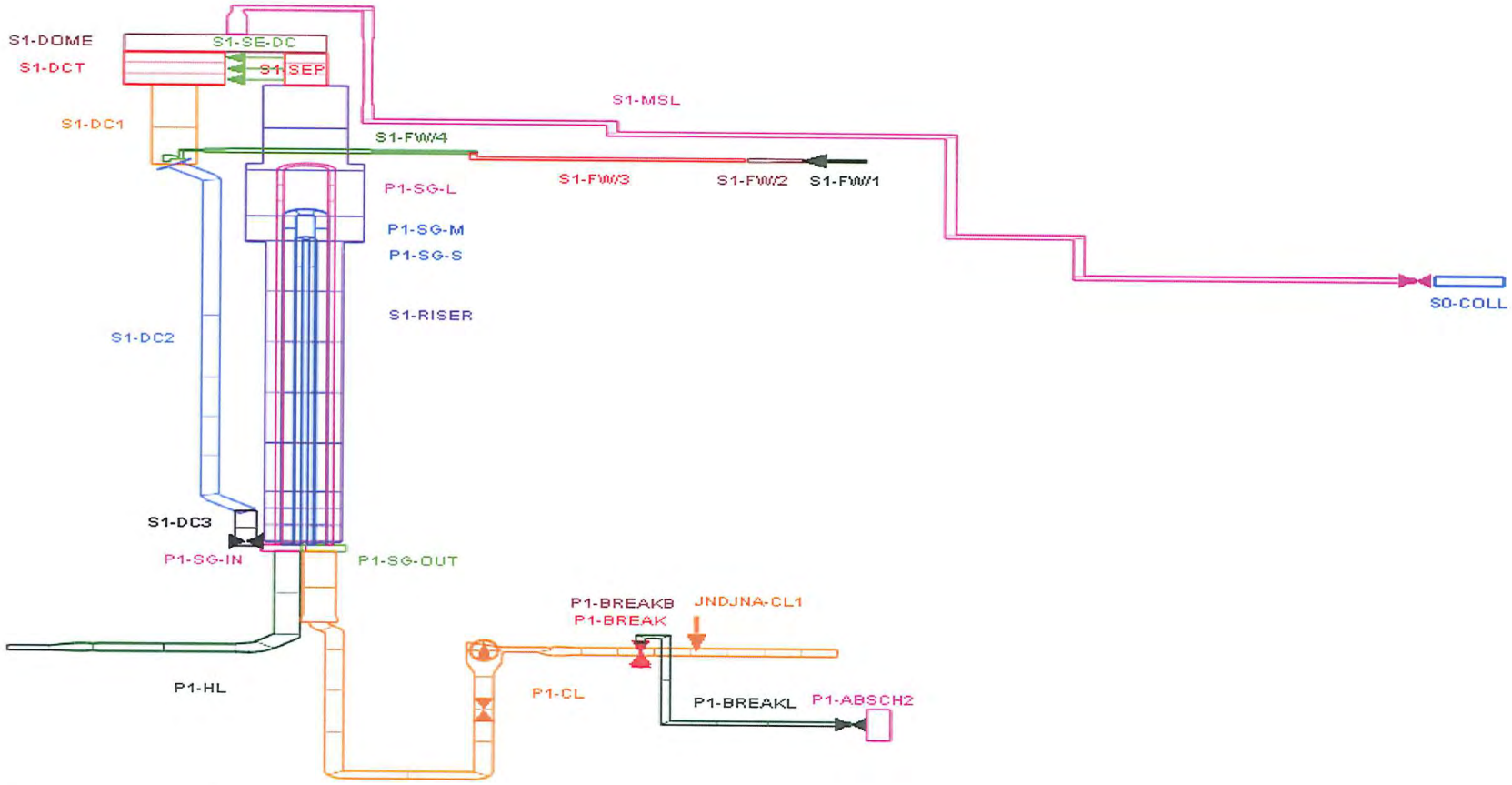
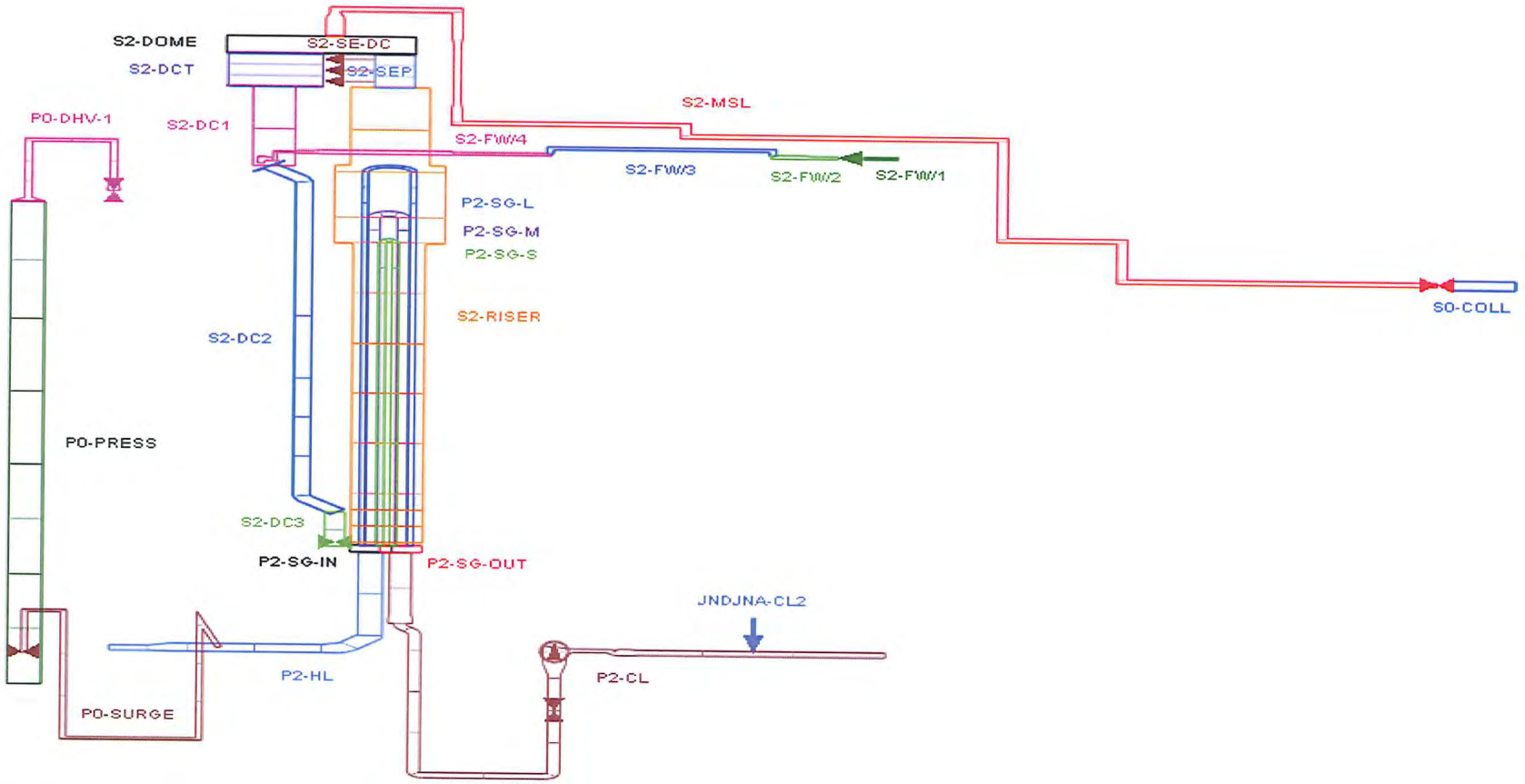


Bild 3.4.1-3 Nodalisierungsmodell des Loops 1 der Versuchsanlage PKL III (PKL III E2.2)



Object and Nodalisation Scheme of Loop 2 (PKL III E2.2)

Bild 3.4.1-4 Nodalisierungsmodell des Loops 2 der Versuchsanlage PKL III (PKL III E2.2)

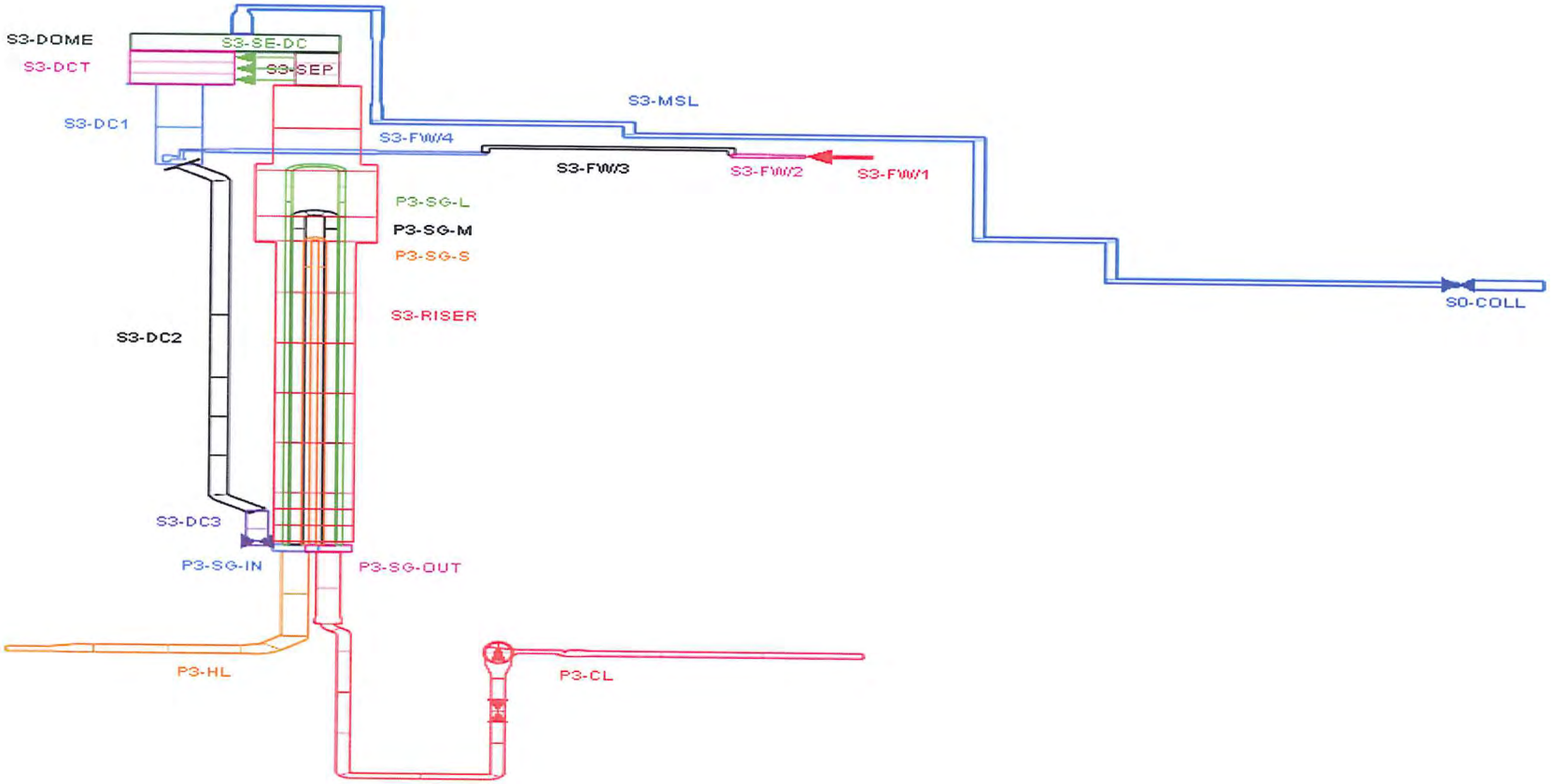


Bild 3.4.1-5 Nodalisierungsmodell des Loops 3 der Versuchsanlage PKL III (PKL III E2.2)

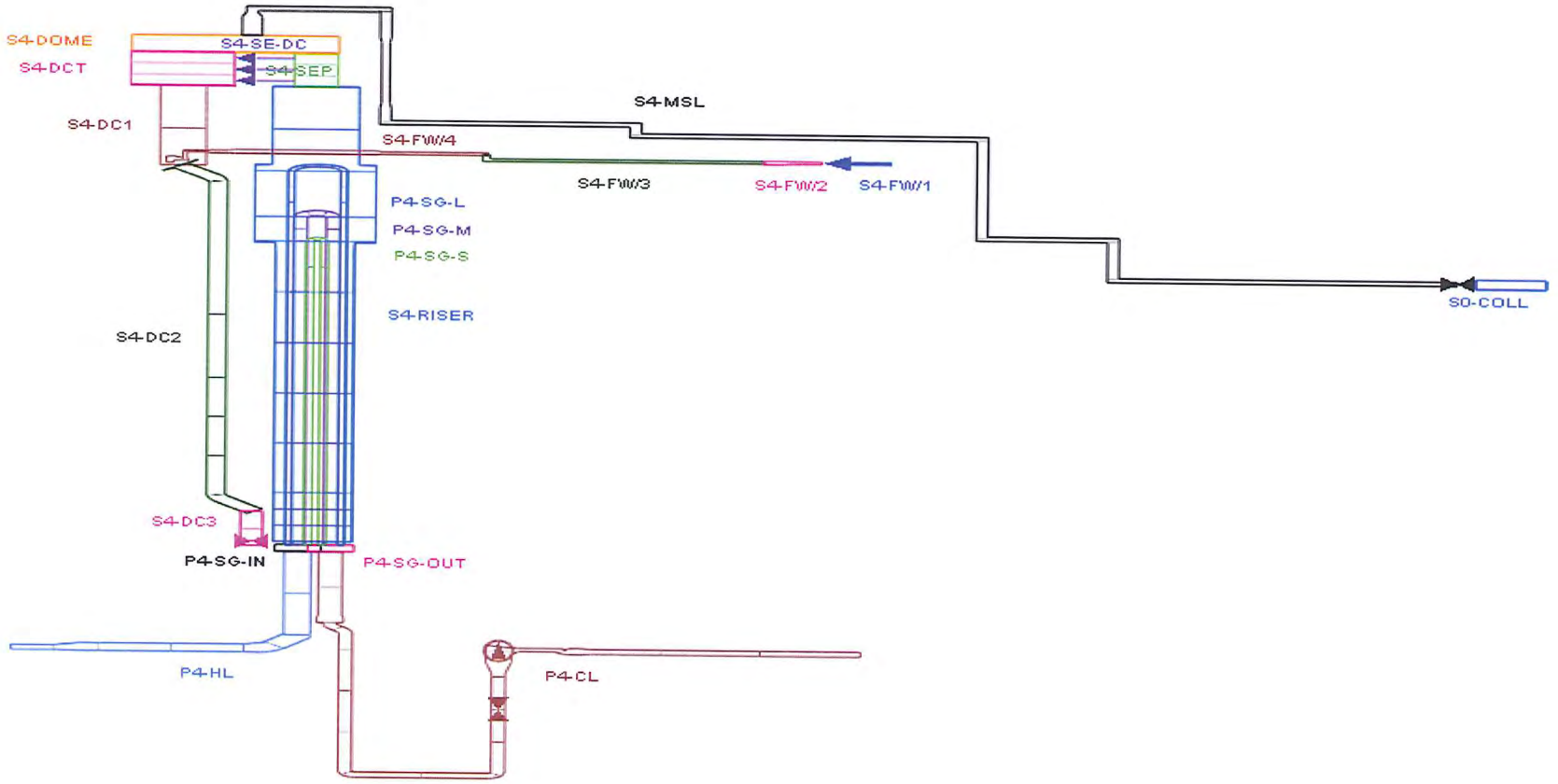


Bild 3.4.1-6 Nodalisierungsmodell des Loops 4 der Versuchsanlage PKL III (PKL III E2.2)

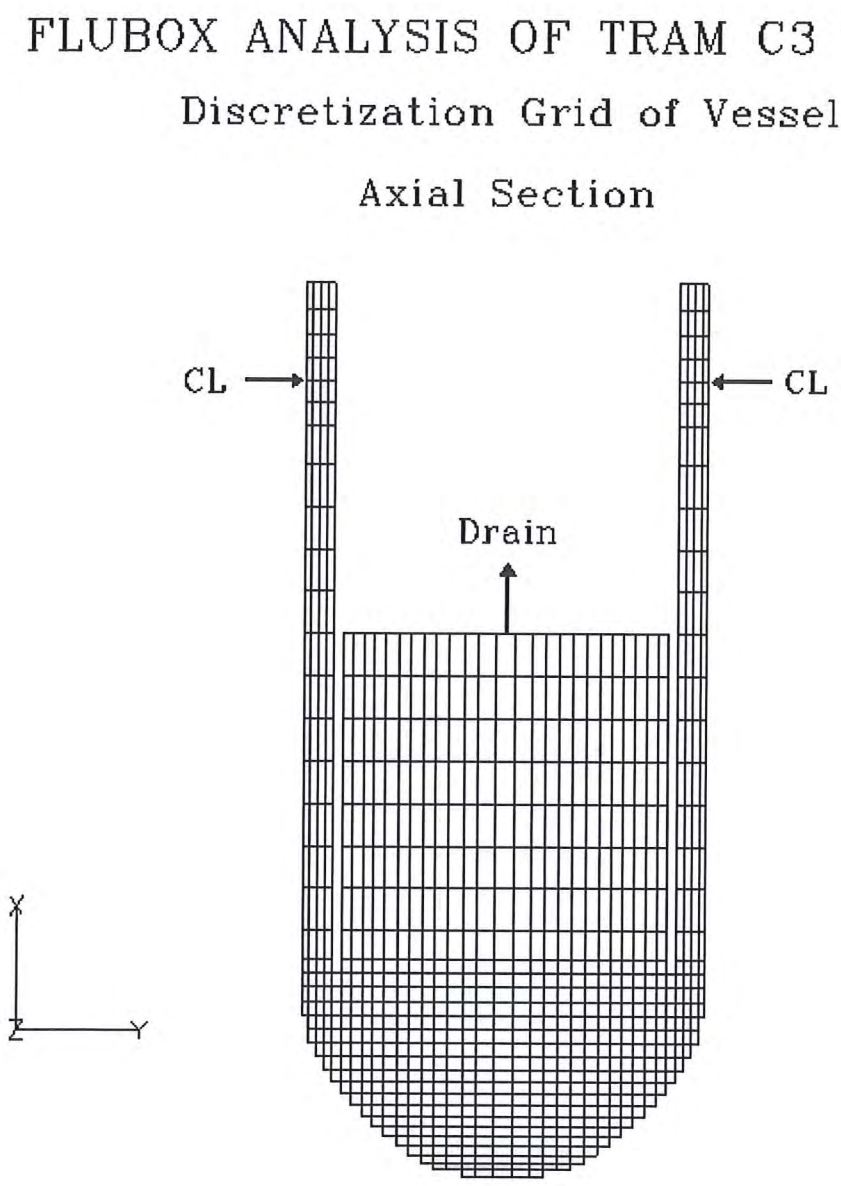


Bild 3.4.2-1 **Längsschnitt durch das Diskretisierungsmodell des Druckbehälters (UPTF-TRAM C3)**

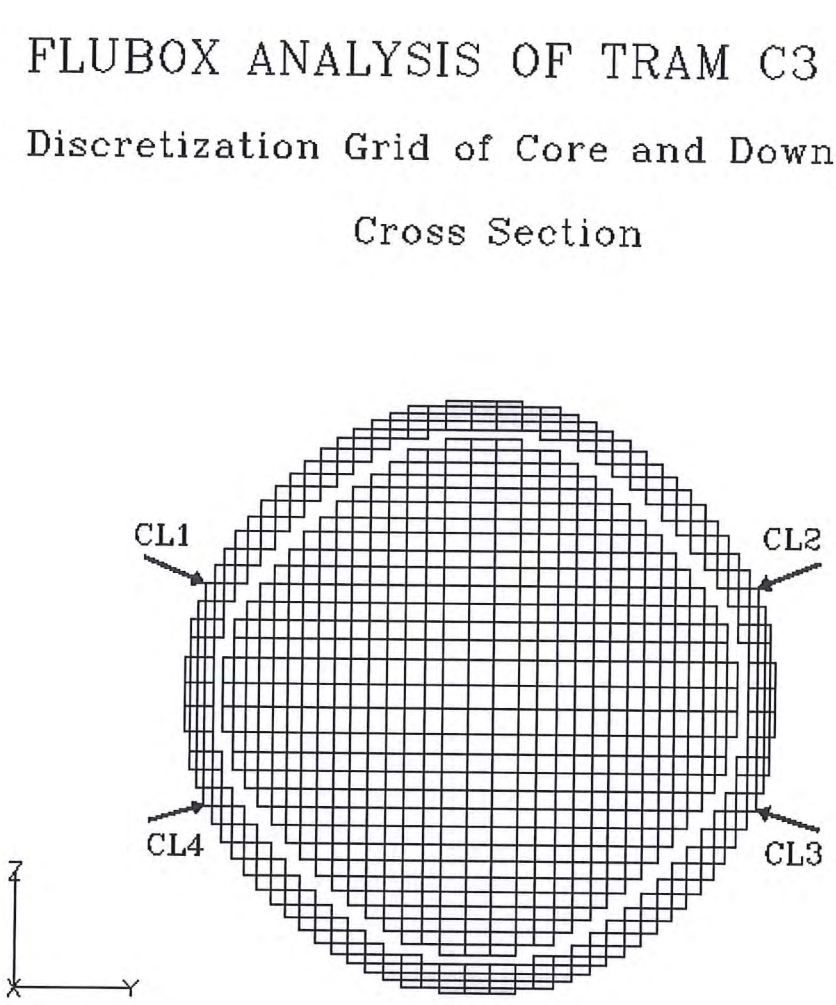


Bild 3.4.2-2 **Querschnitt durch das Diskretisierungsmodell des Druckbehälters (UPTF-TRAM C3)**

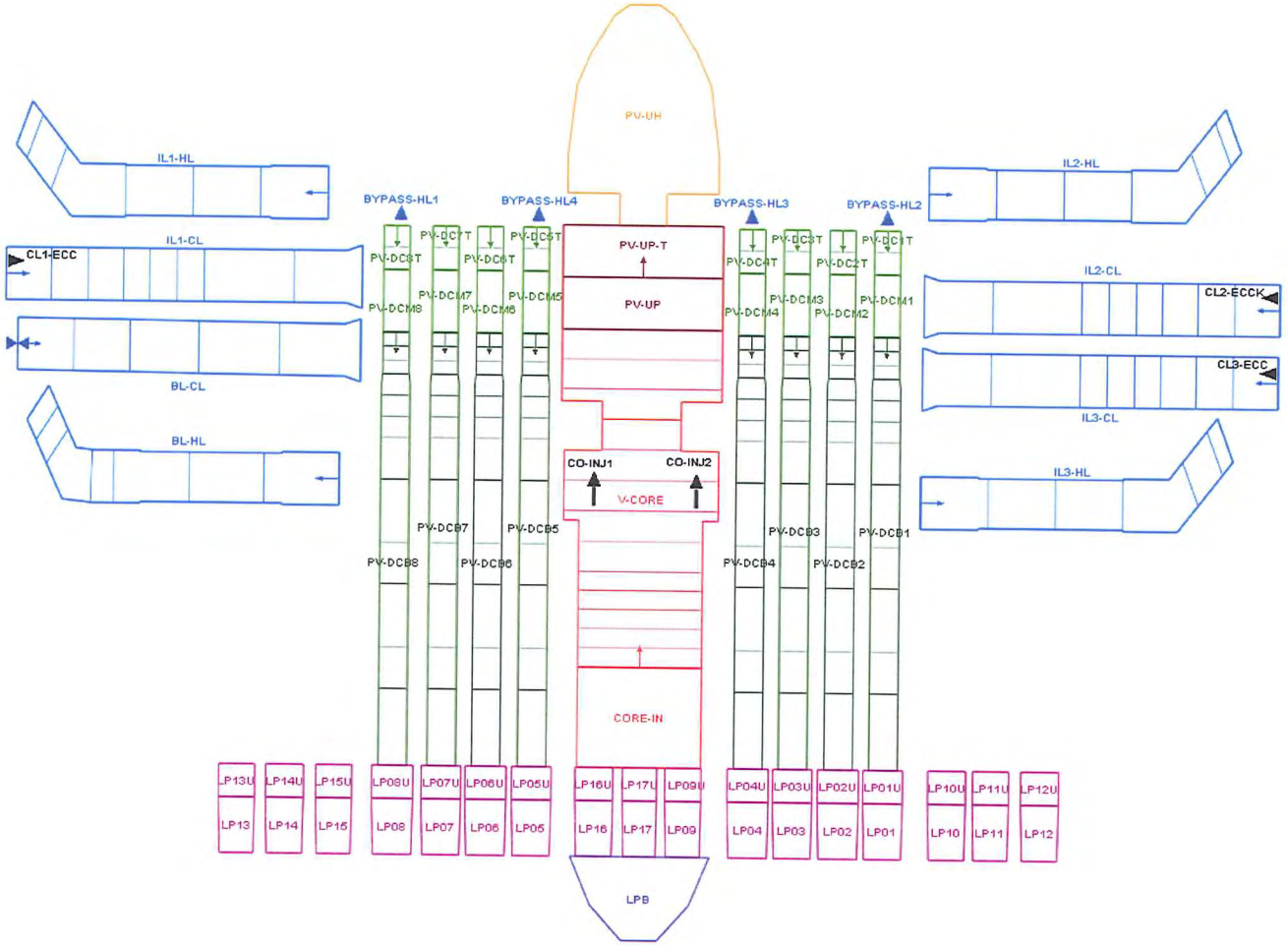


Bild 3.4.3-1 Nodalisierungsschema Eingabedatensatz (ohne vollständige heiße Stränge)

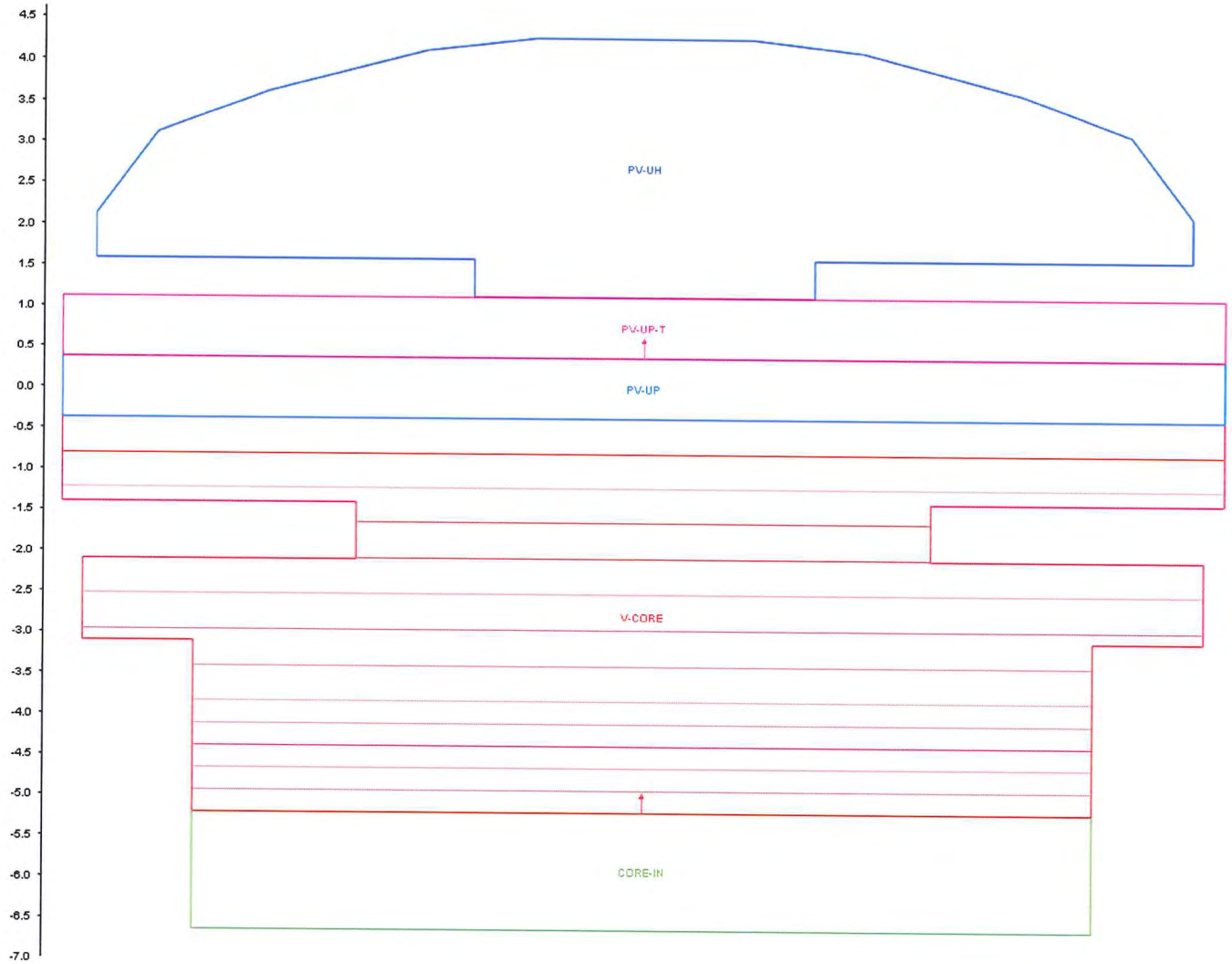


Bild 3.4.3-2 Nodalisierungsschema Kern und oberes Plenum

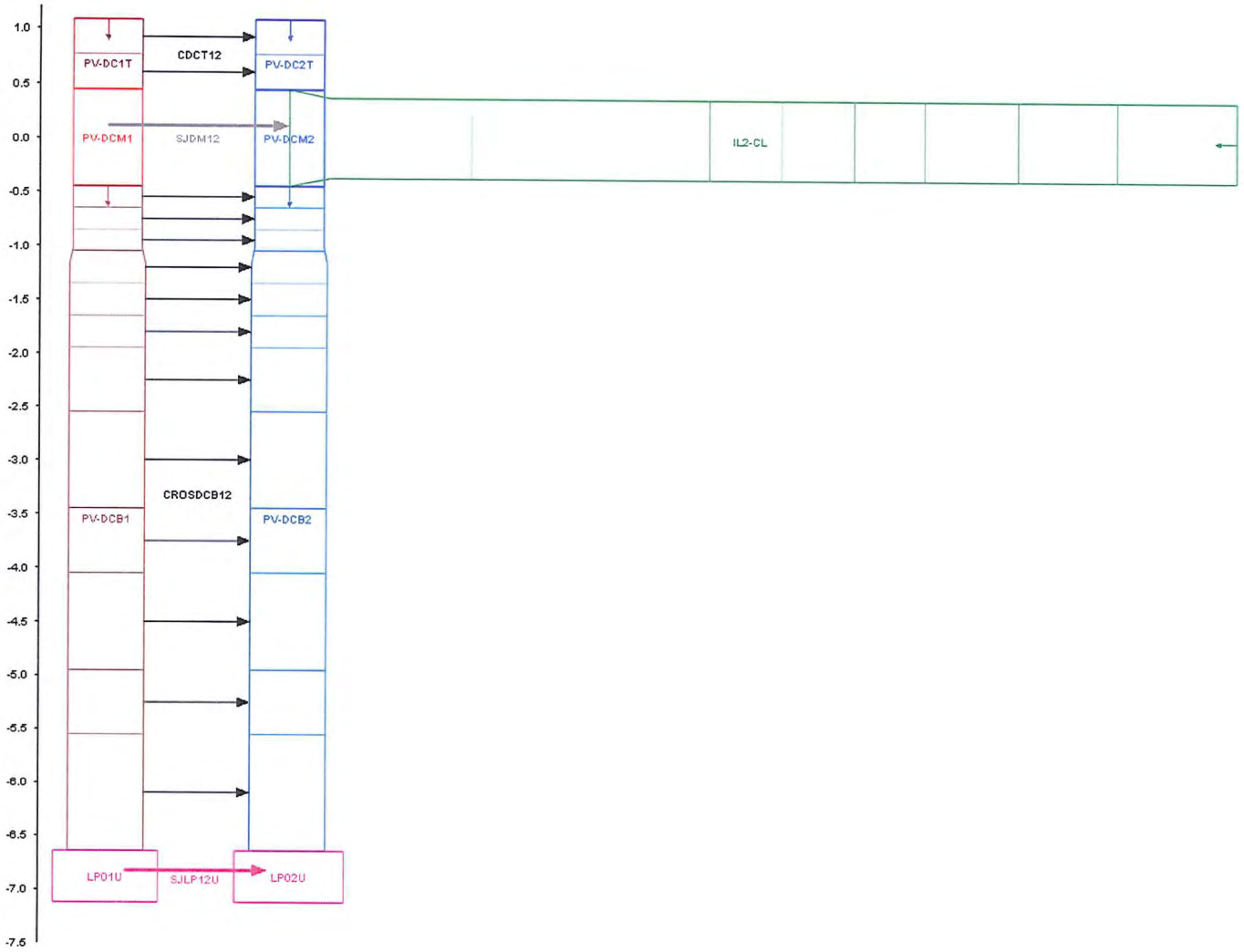


Bild 3.4.3-3 Nodalisierungsschema Downcomer mit kaltem Strang

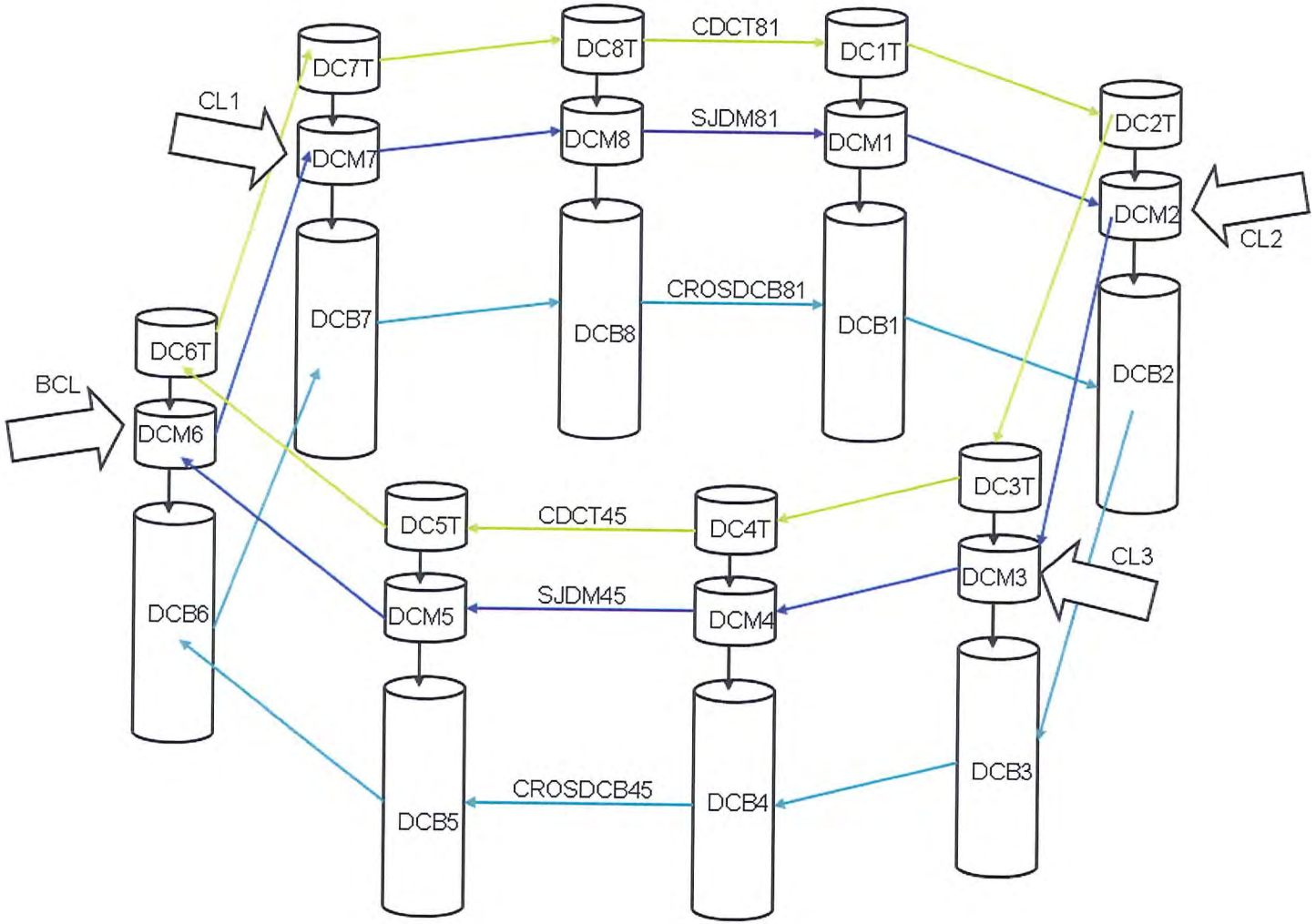


Bild 3.4.3-4 **Schematische Darstellung der Nodalisierung im Ringraum (Downcomer) mit Anbindung der kalten Stränge**

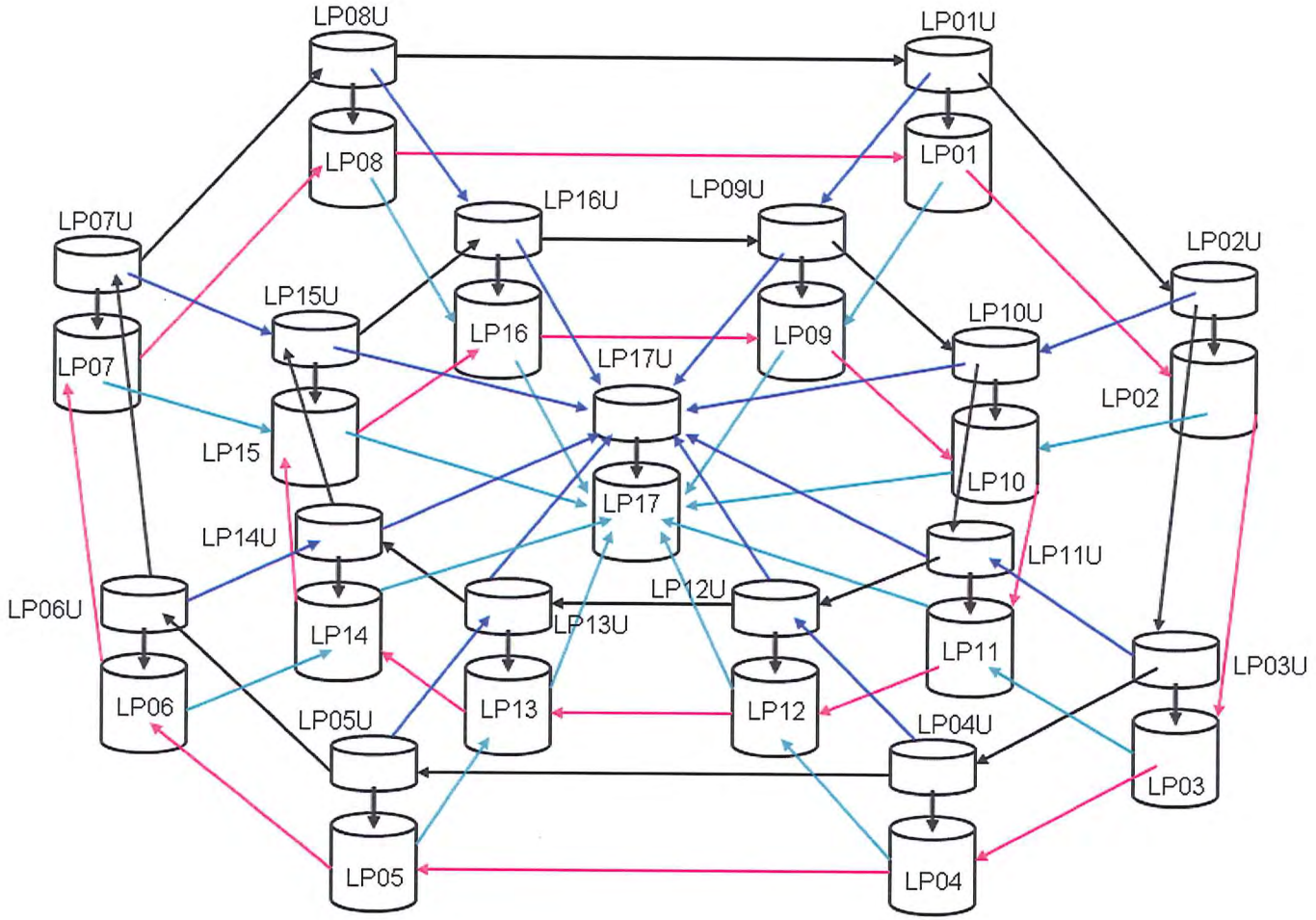


Bild 3.4.3-5 Schematische Darstellung der Nodalisierung des unteren Plenums

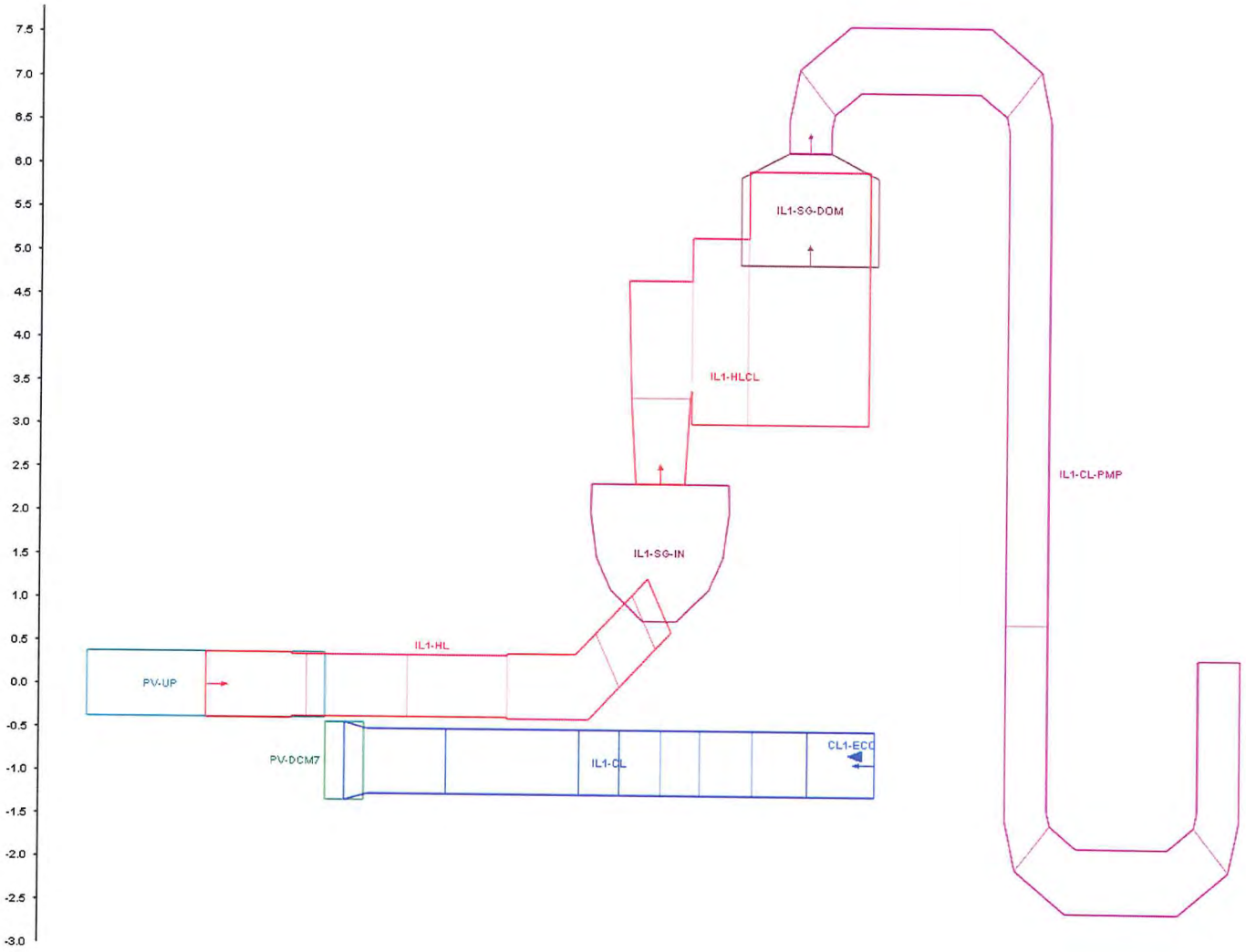


Bild 3.4.3-6 **Nodalisierungsschema kalter und heißer intakter Strang (kalter Strang versetzt gezeichnet)**

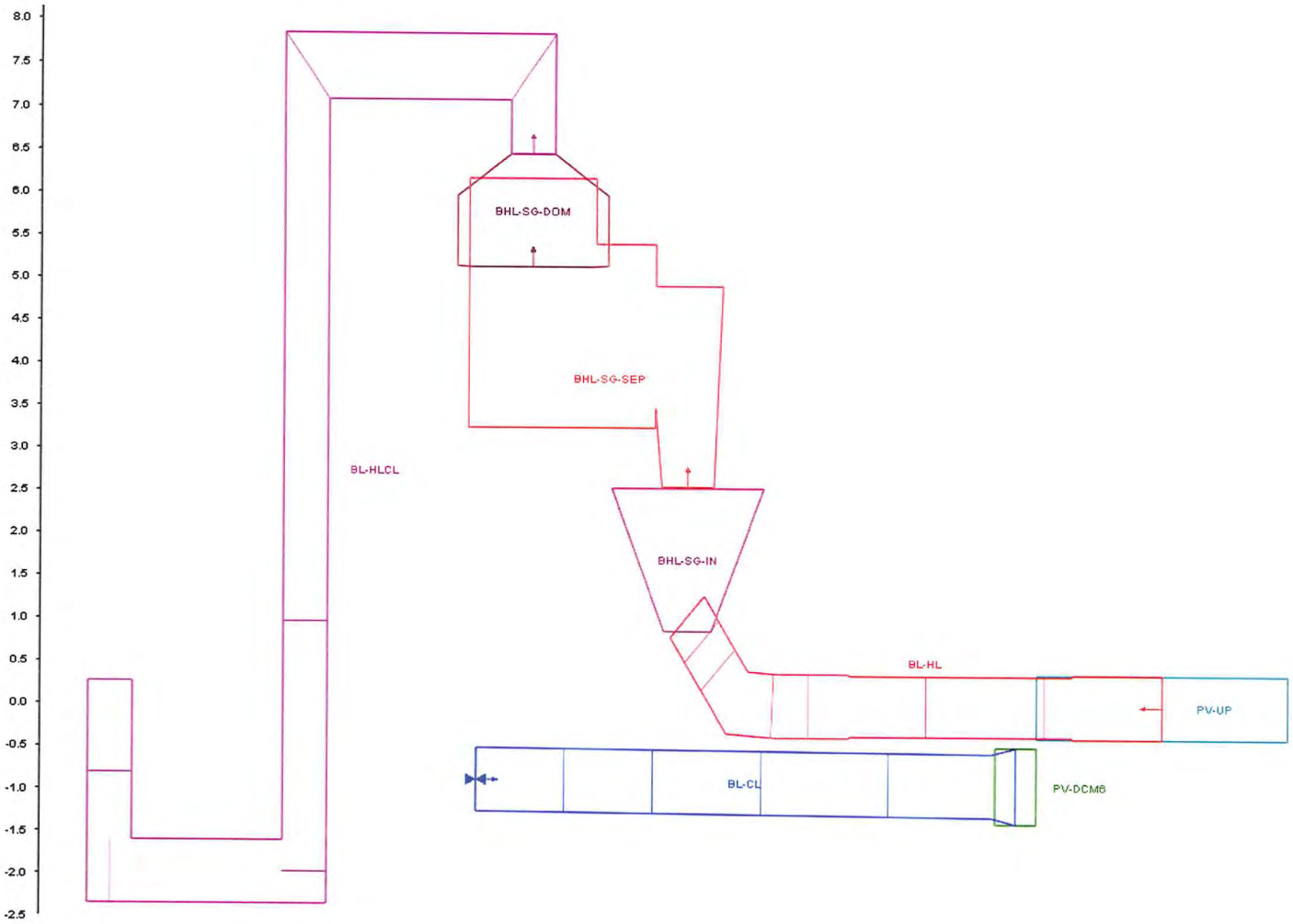


Bild 3.4.3-7 Nodalisierungsschema kalter und heißer gebrochener Strang (kalter Strang versetzt gezeichnet)

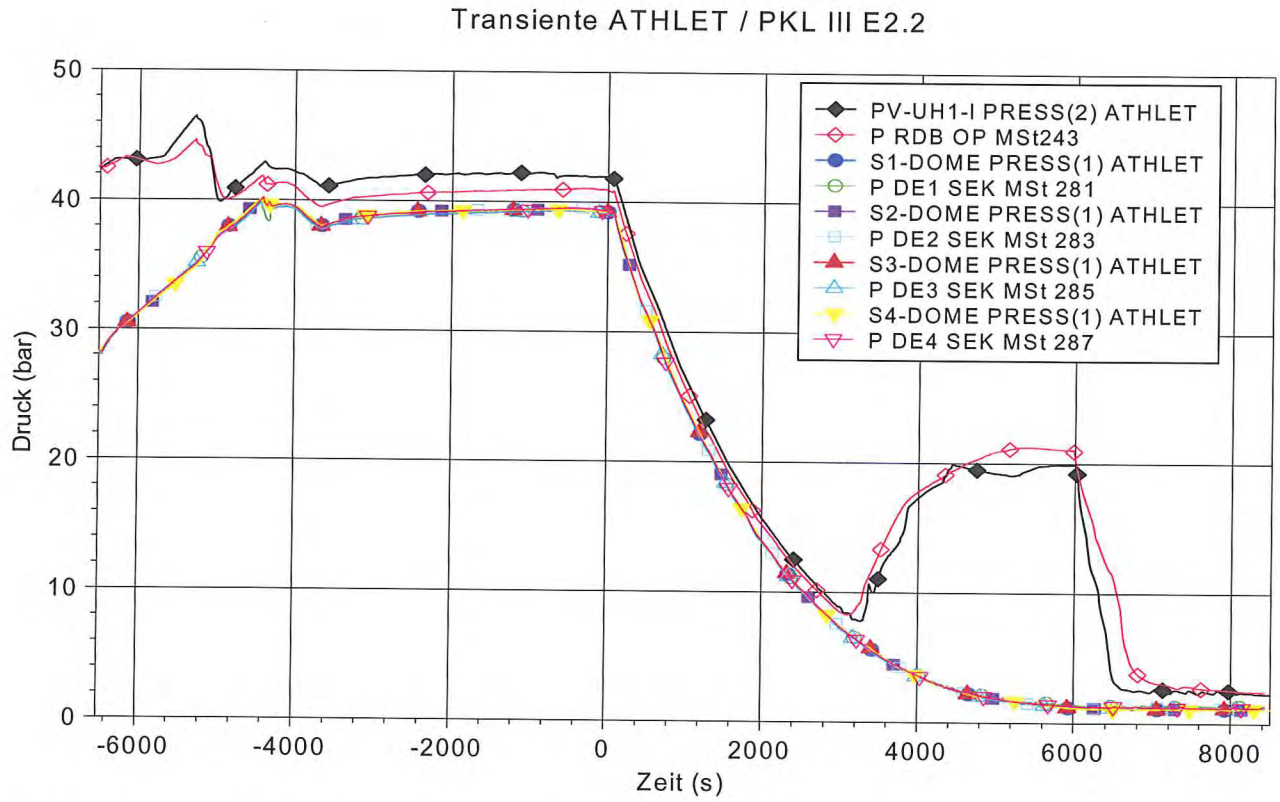


Bild 4.1-1 **Primär- und Sekundärdrücke (PKL III E2.2)**

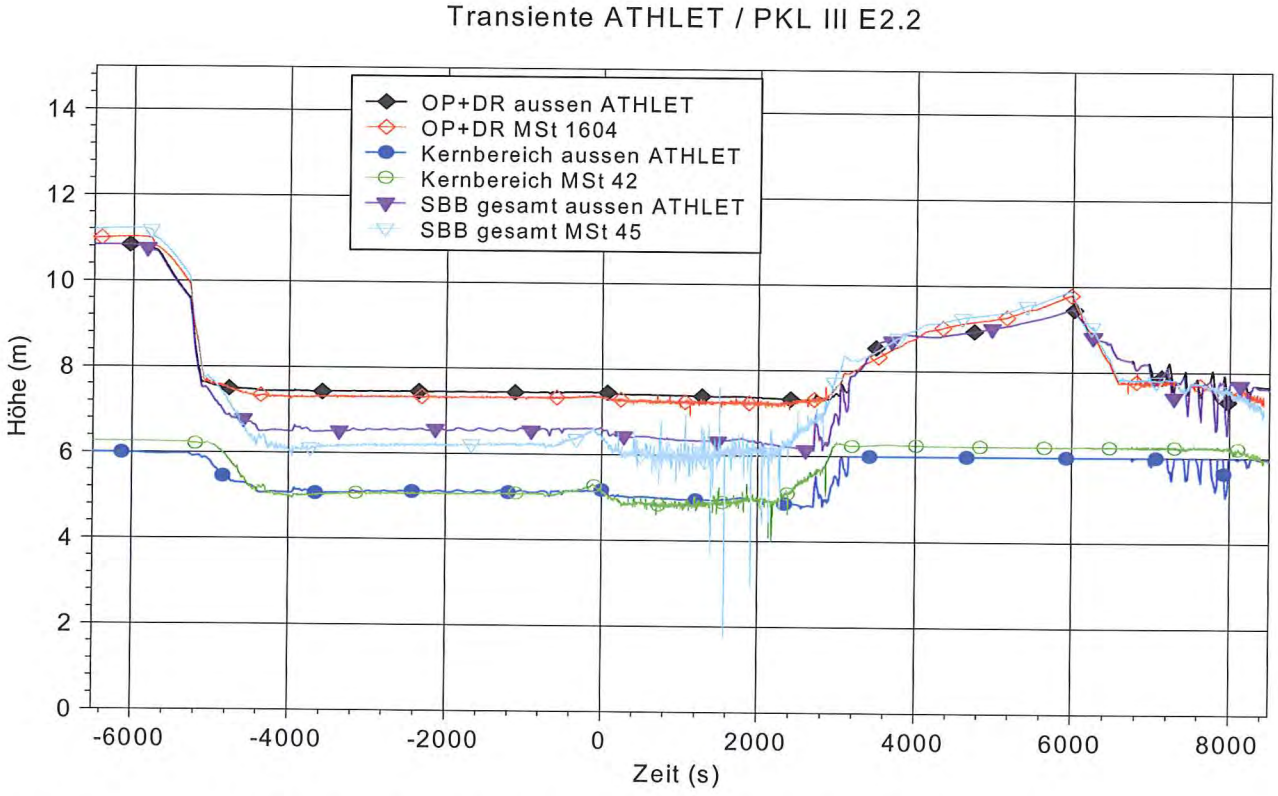


Bild 4.1-2 **Kollabierte Füllstände im Stabbündelbehälter (PKL III E2.2)**

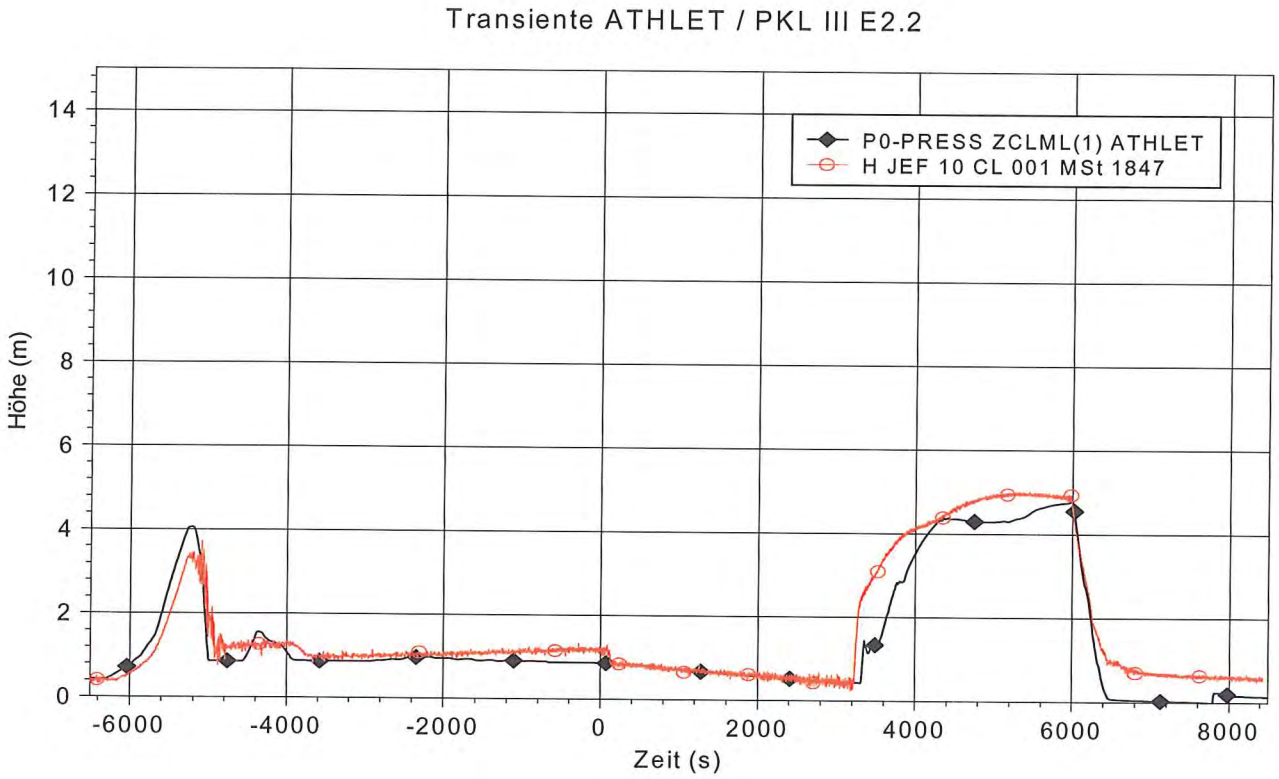


Bild 4.1-3 **Kollabierter Füllstand im Druckhalter (PKL III E2.2)**

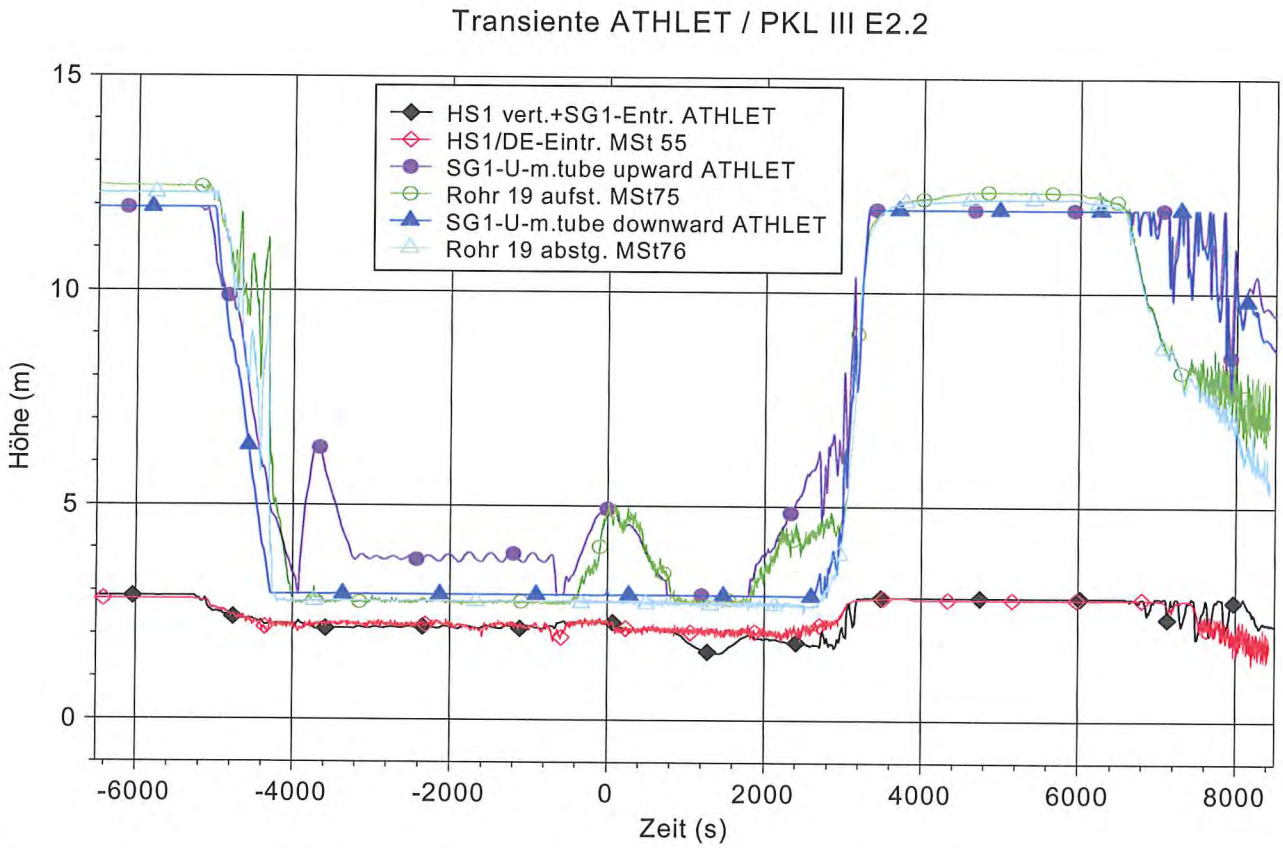


Bild 4.1-4 **Kollabierte Füllstände in HS1 vertikal und DE1-Eintritt sowie im mittleren DE1-U-Rohr (PKL III E2.2)**

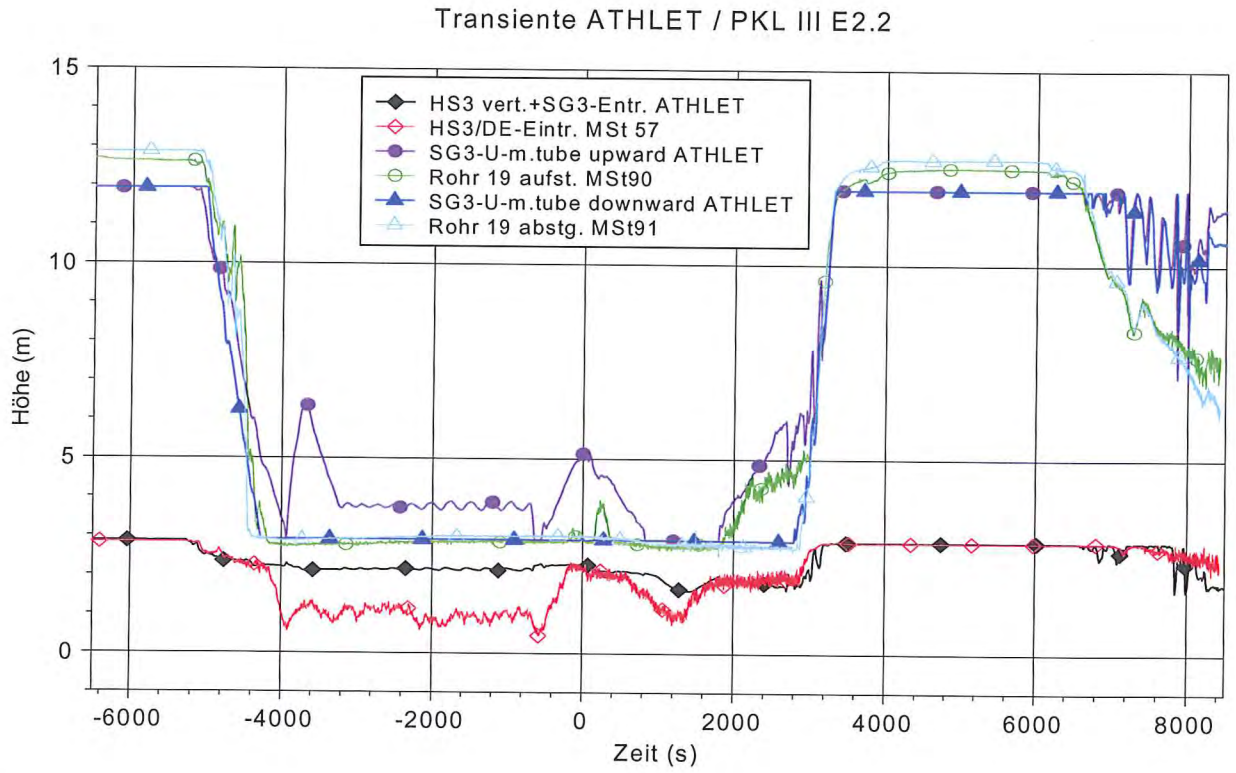


Bild 4.1-5 **Kollabierte Füllstände in HS3 vertikal und DE3-Eintritt sowie im mittleren DE3-U-Rohr (PKL III E2.2)**

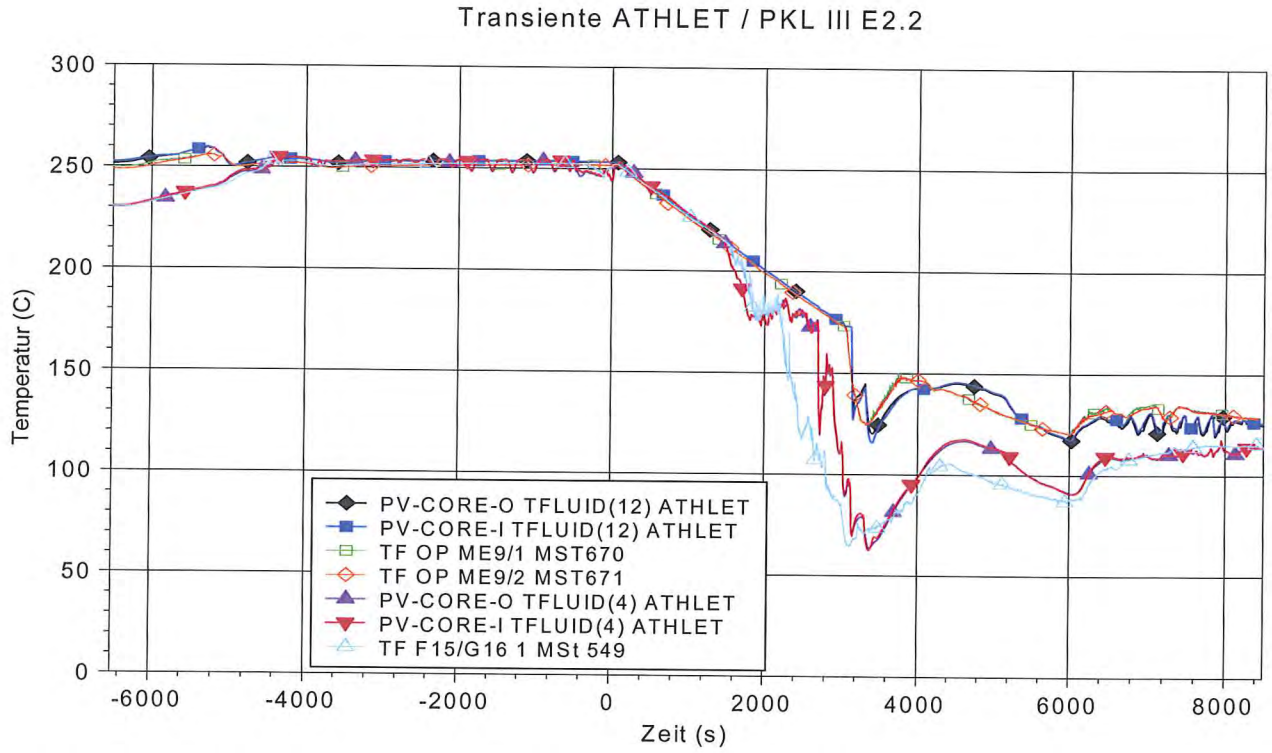


Bild 4.1-6 **Fluidtemperaturen am Beginn der beheizten Kernlänge und oberhalb der BE-Kopfplatte (PKL III E2.2)**

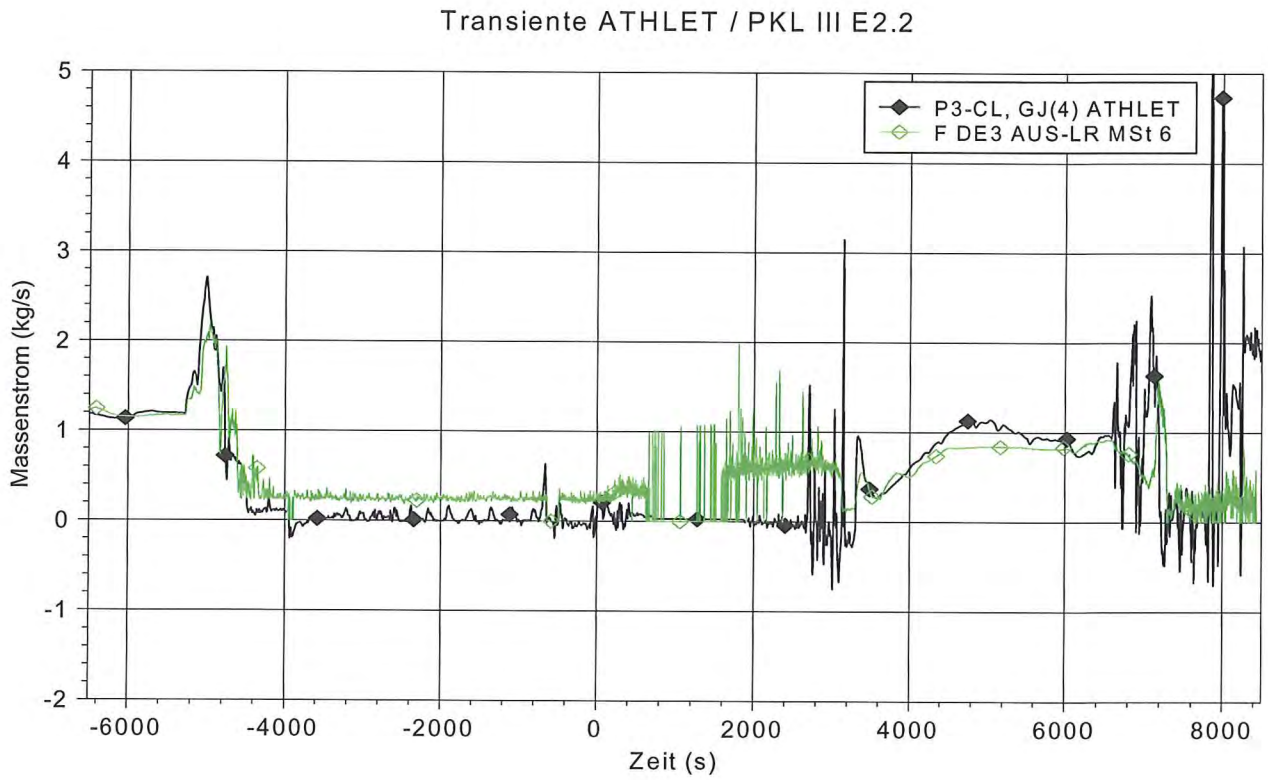


Bild 4.1-7 **Massenstrom im DE-seitigen Bereich des Pumpenbogens 3 (PKL III E2.2)**

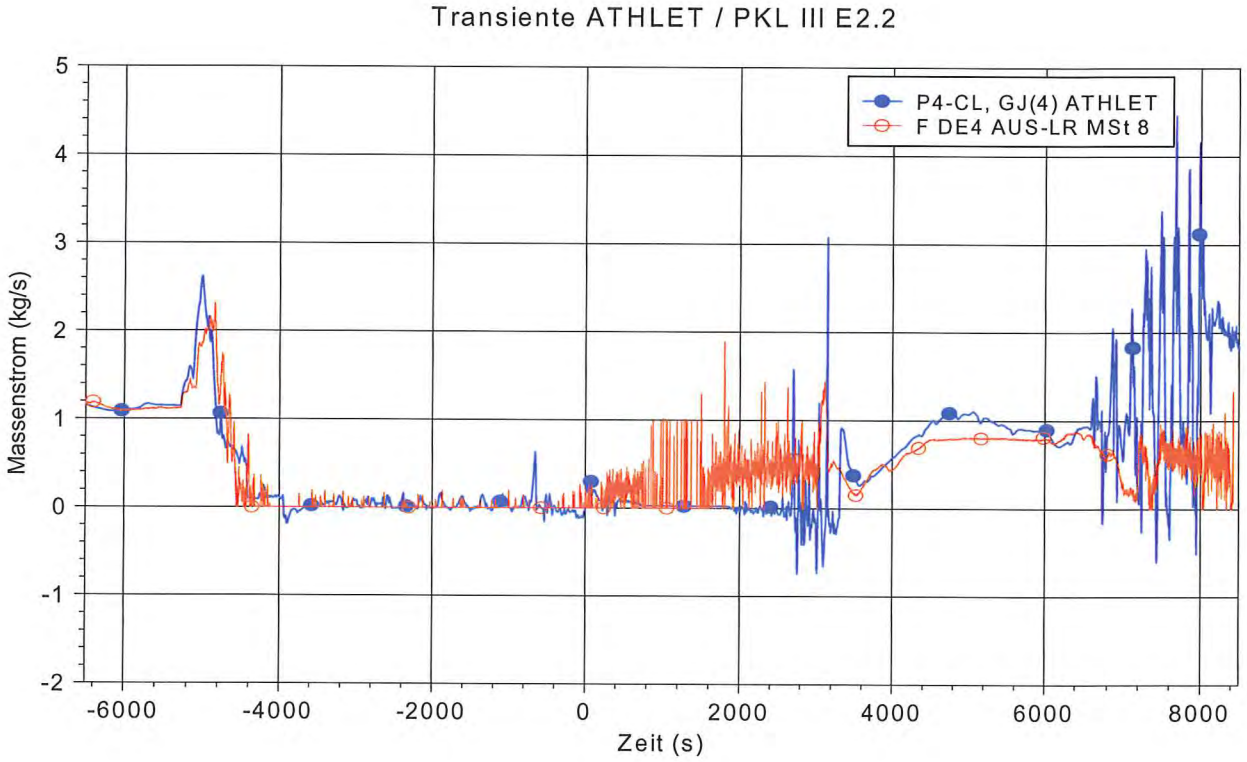


Bild 4.1-8 **Massenstrom im DE-seitigen Bereich des Pumpenbogens 4 (PKL III E2.2)**

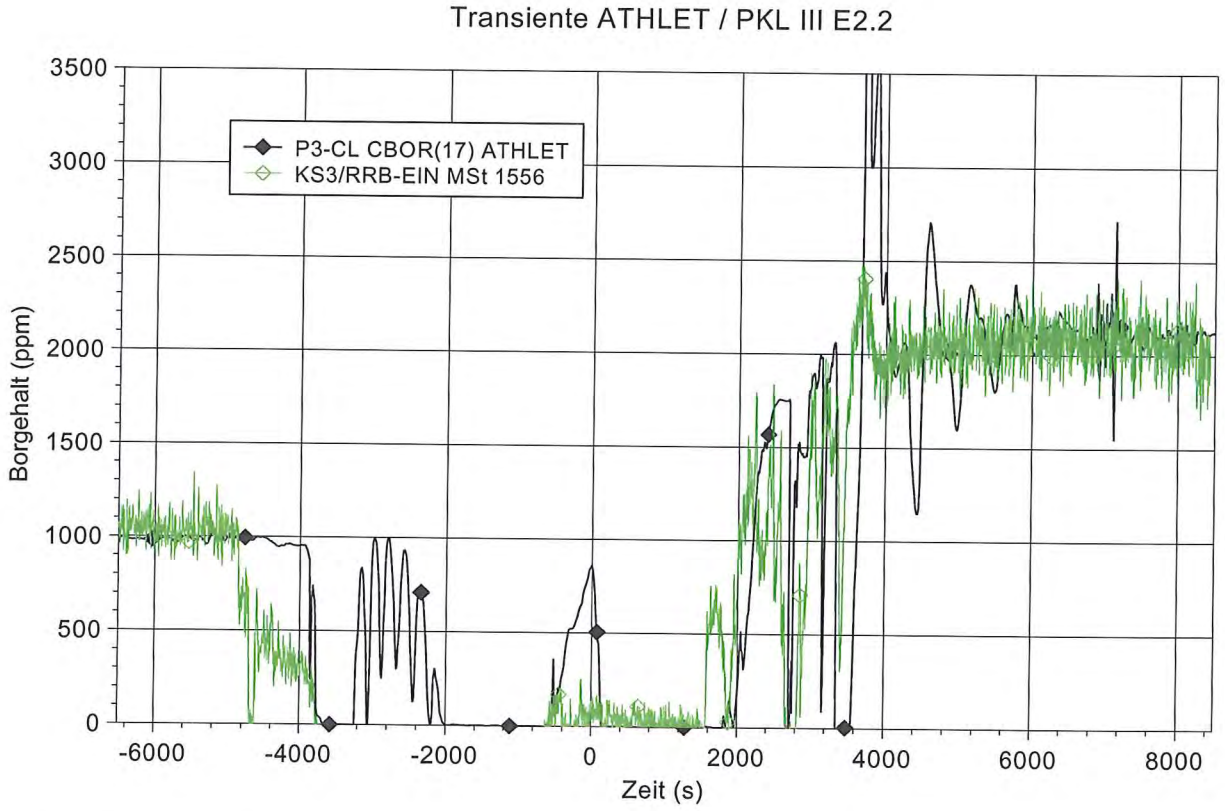


Bild 4.1-9 **Borgehalt im kalten Strang 3 vor Ringraum (PKL III E2.2)**

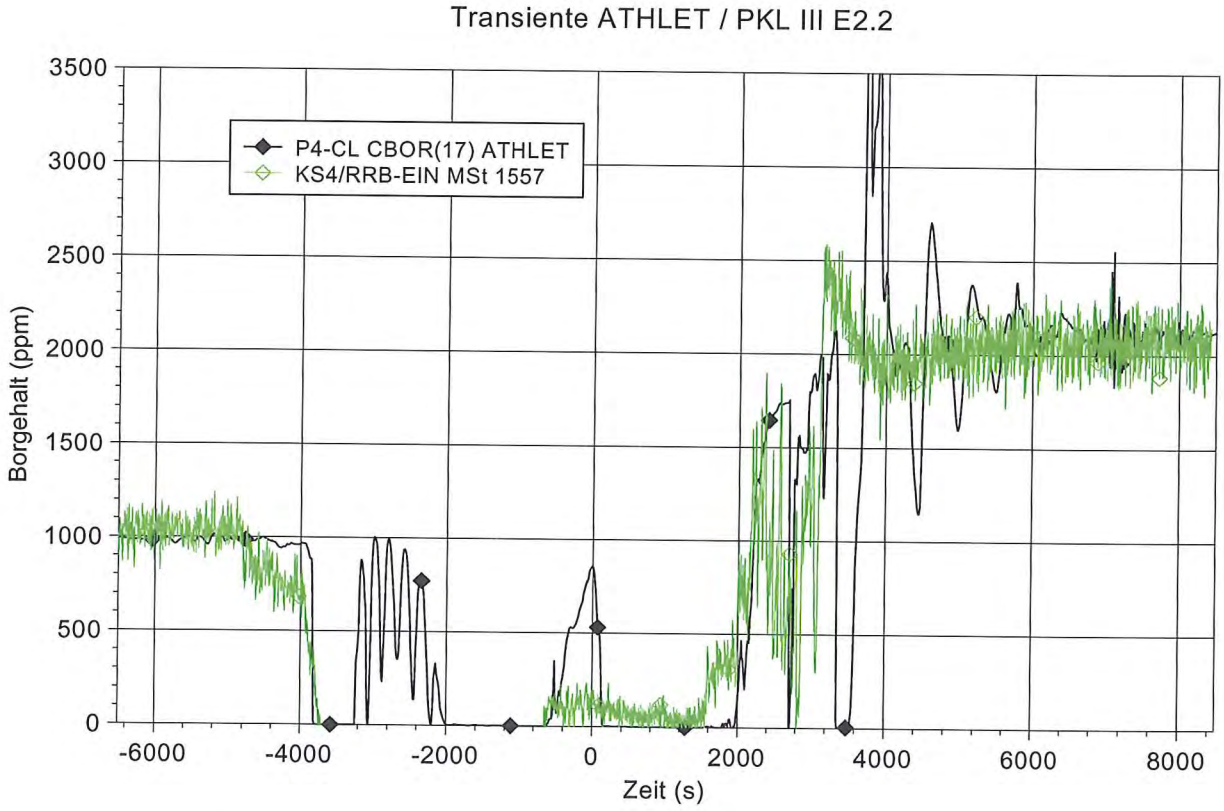


Bild 4.1-10 **Borgehalt im kalten Strang 4 vor Ringraum (PKL III E2.2)**

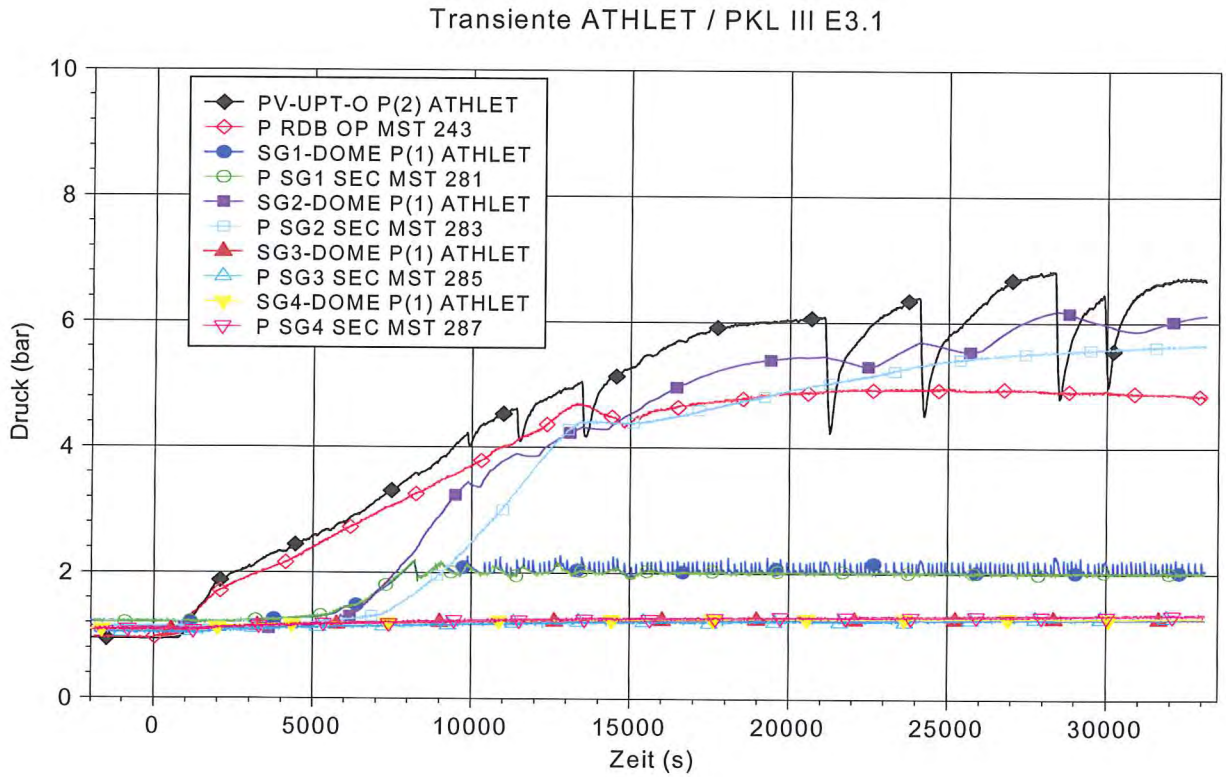


Bild 4.2-1 **Primär- und Sekundärdrücke**

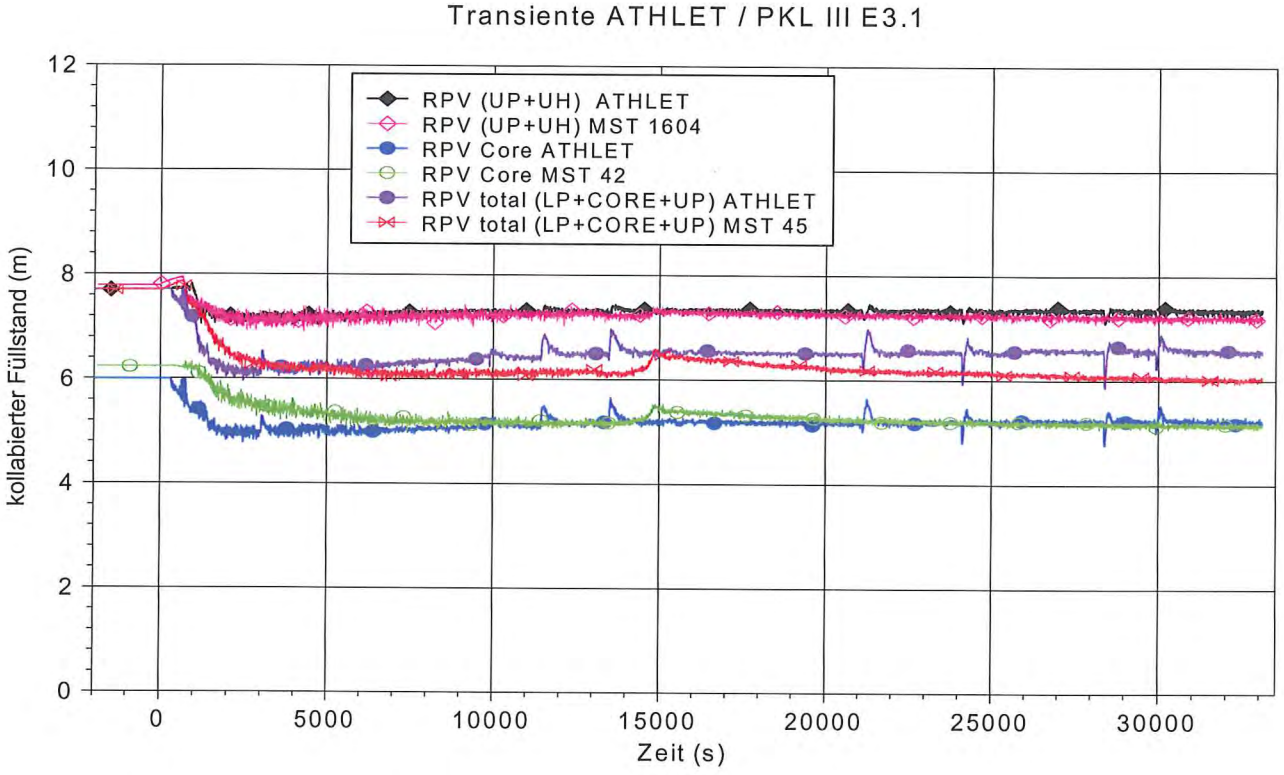


Bild 4.2-2 **Kollabierte Füllstände im Stabbündelbehälter (PKL III E3.1)**

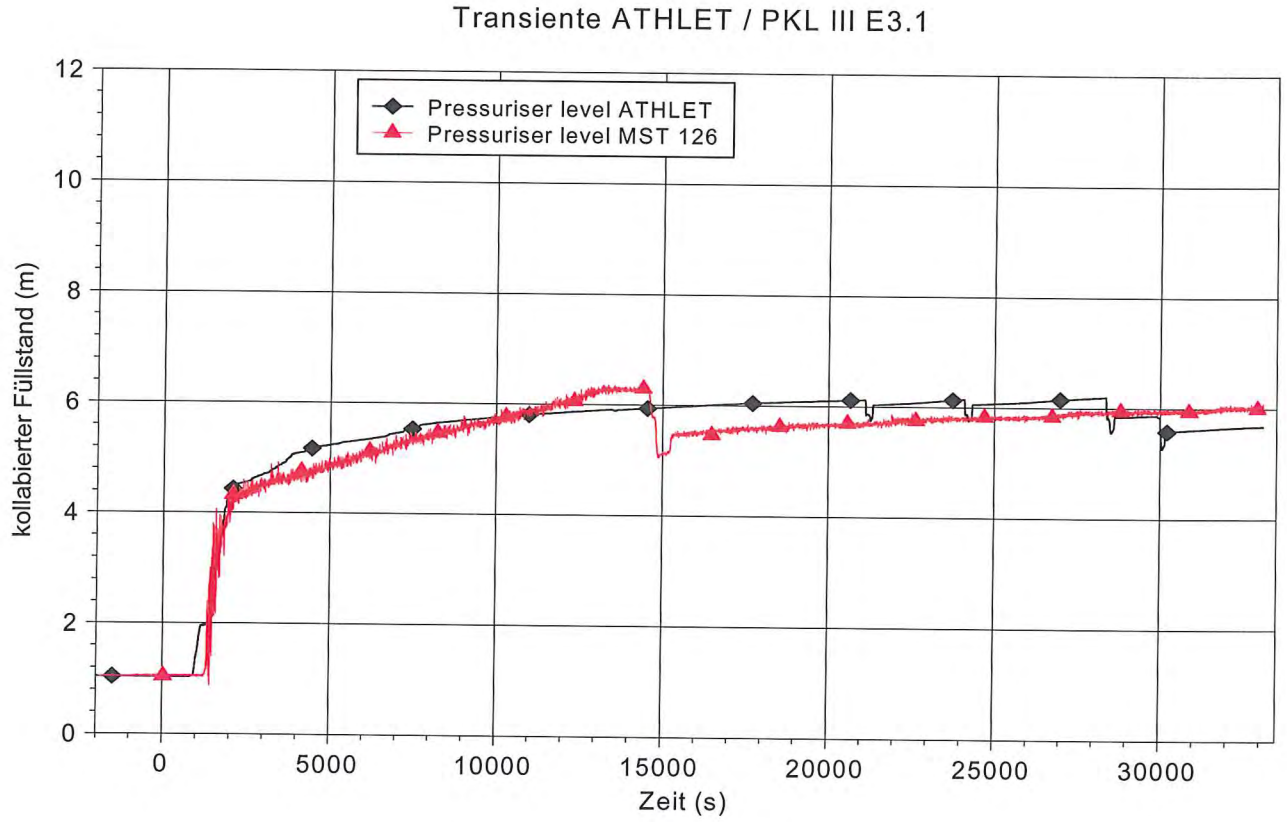


Bild 4.2-3 **Kollabierter Füllstand im Druckhalter (PKL III E3.1)**

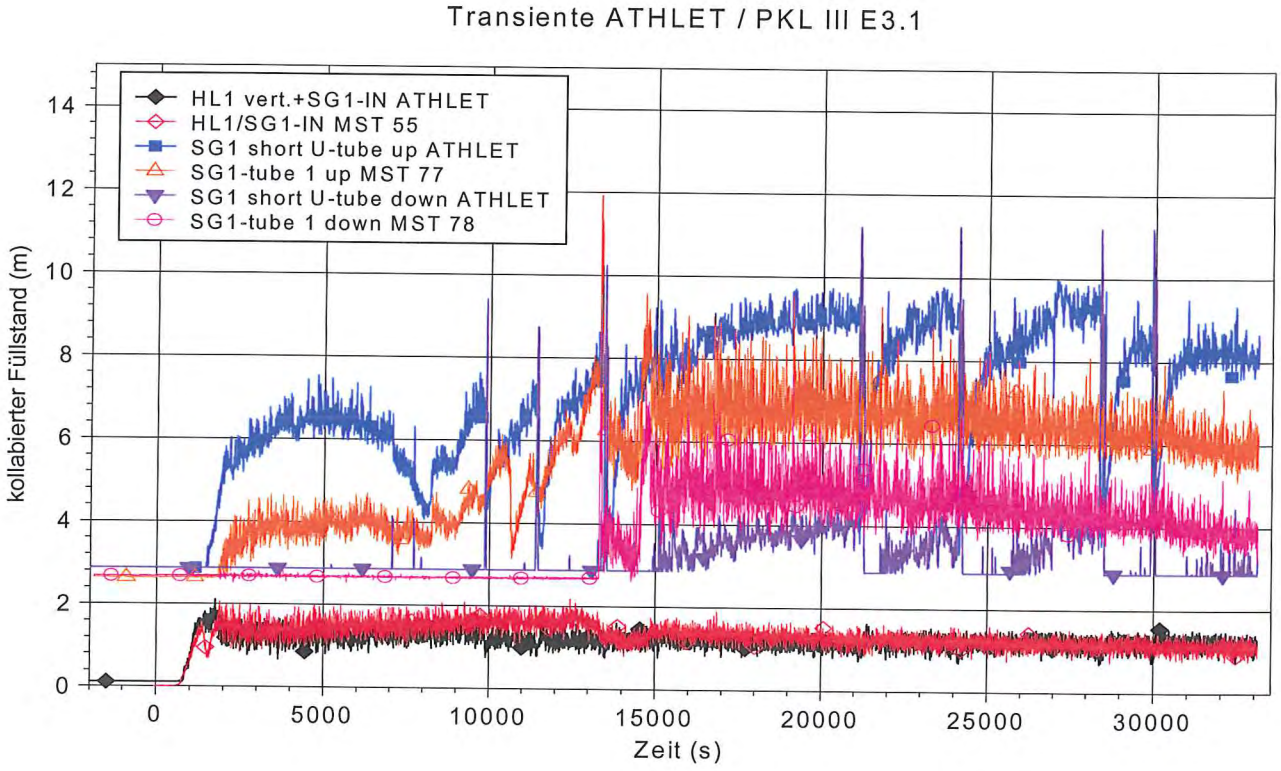


Bild 4.2-4 **Kollabierte Füllstände in HS1 vertikal und DE1-Eintritt sowie im kurzen DE1-U-Rohrbündel (PKL III E3.1)**

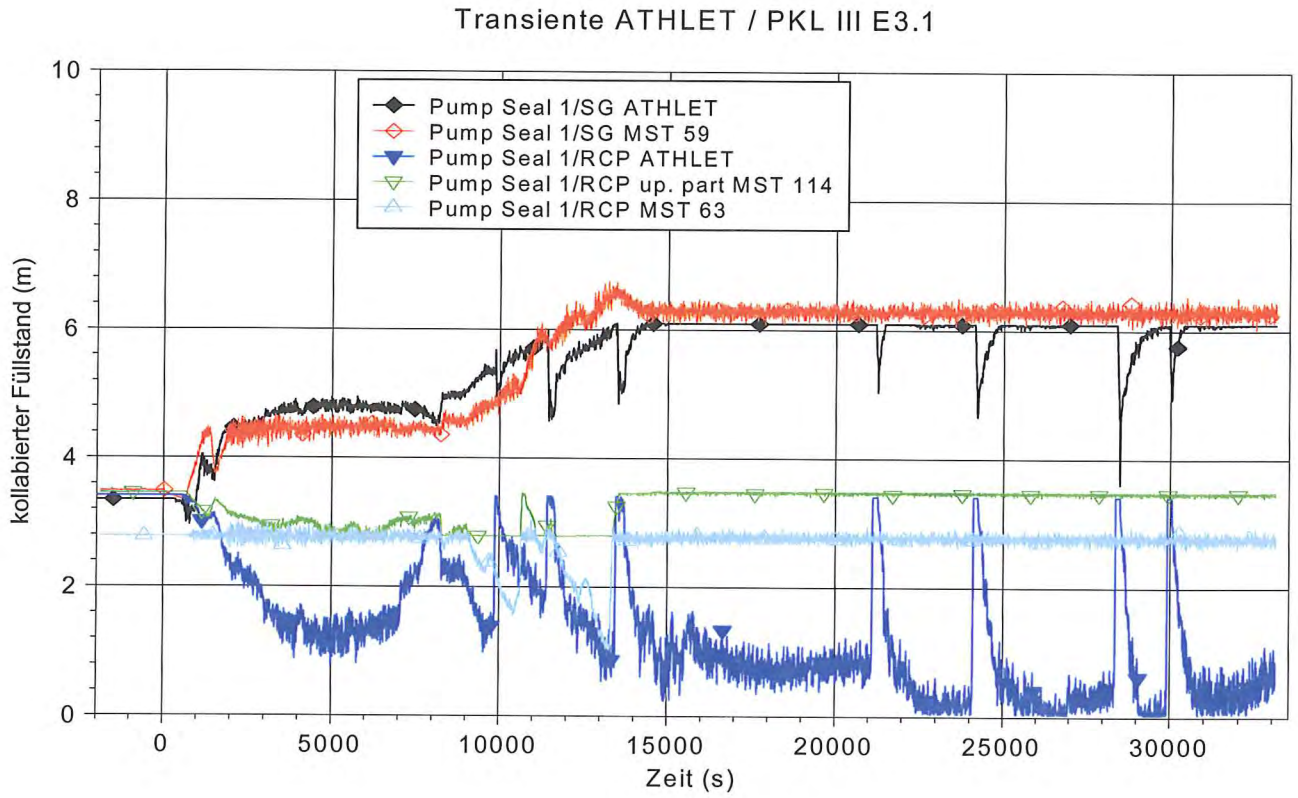


Bild 4.2-5 **Kollabierte Füllstände im Pumpenbogen von CL1 (PKL III E3.1)**

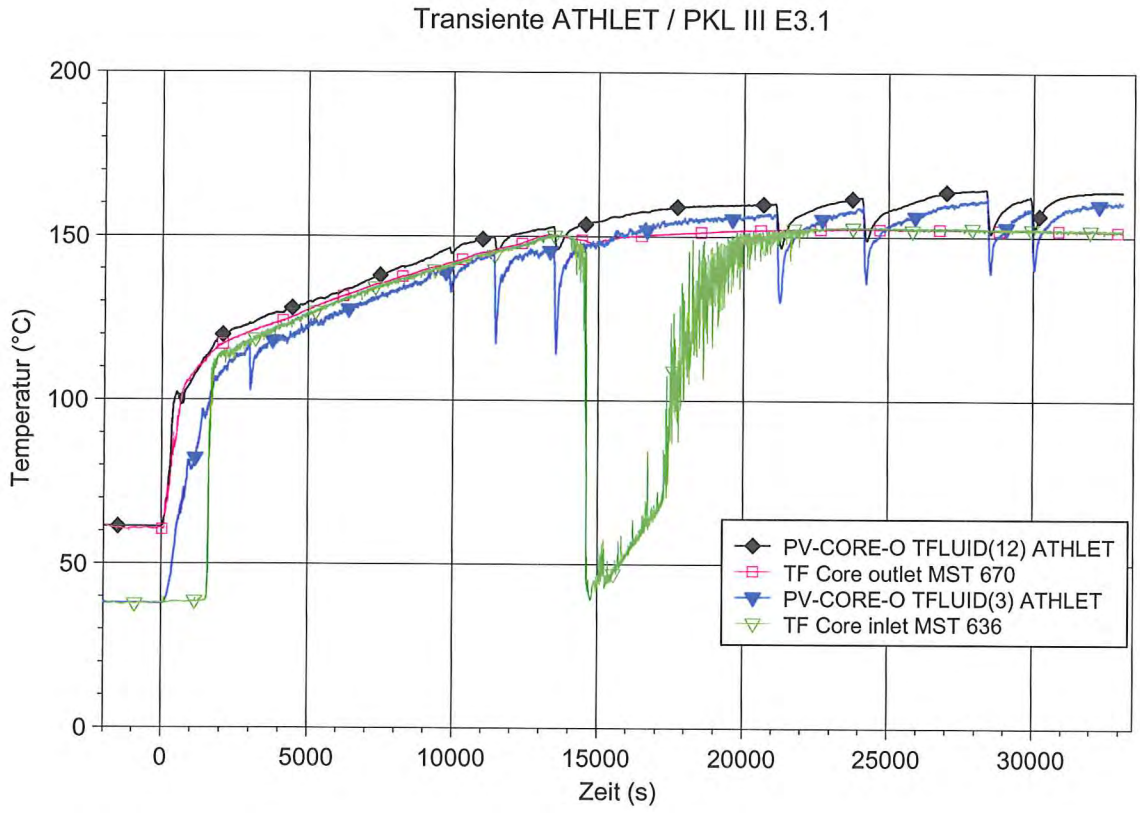


Bild 4.2-6 **Fluidtemperaturen im Ein- und Austritt des Kerns (PKL III E3.1)**

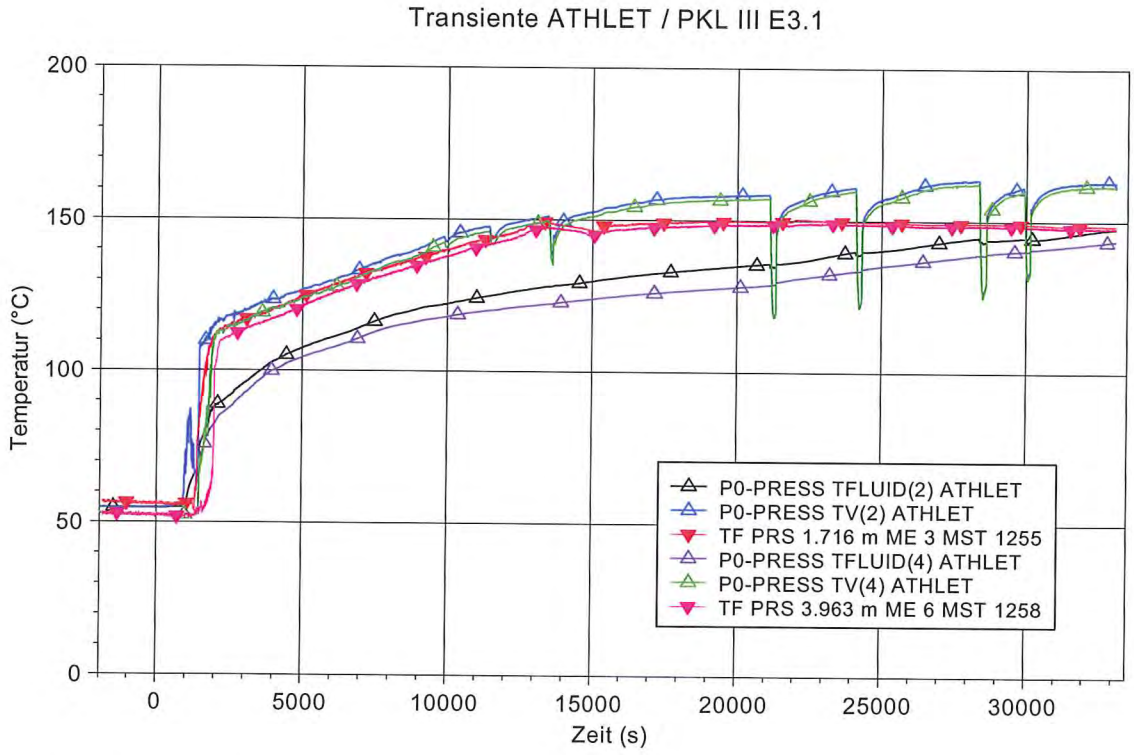


Bild 4.2-7 **Fluidtemperaturen in den Volumen 2, 4 im unteren DH-Bereich (PKL III E3.1)**

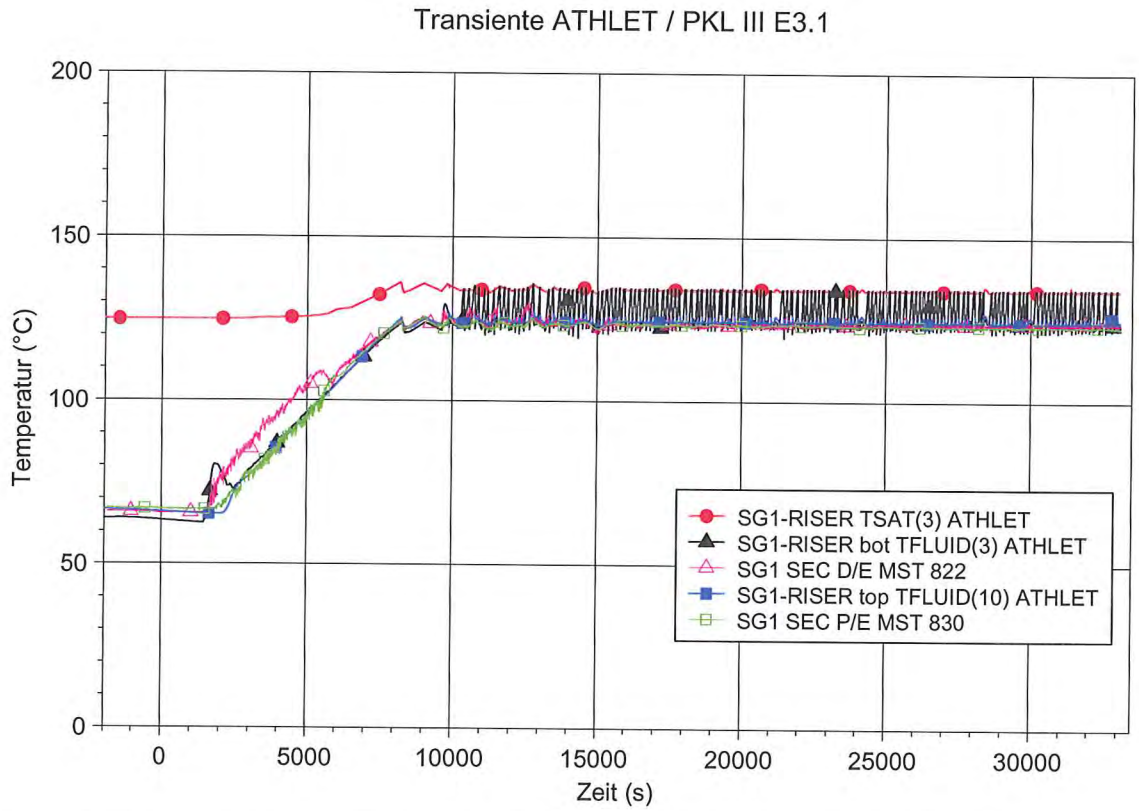


Bild 4.2-8 **Fluidtemperaturen im Steigraum von DE1 (PKL III E3.1)**

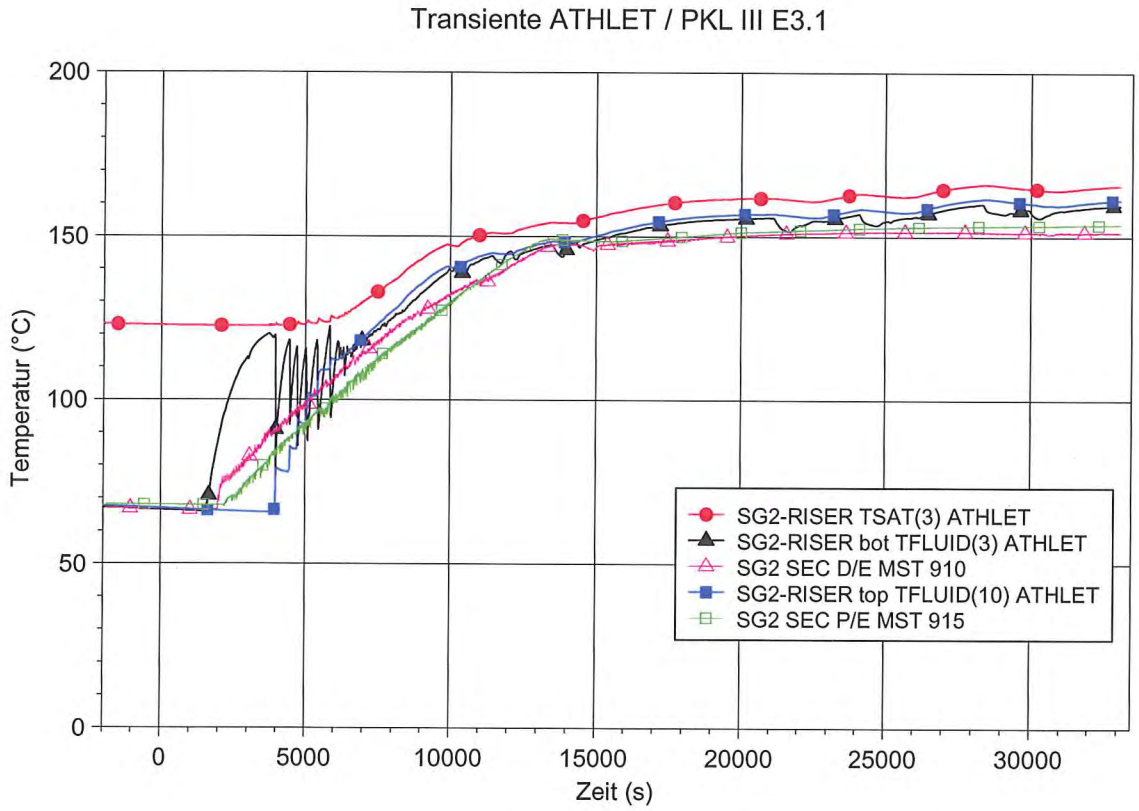


Bild 4.2-9 Fluidtemperaturen im Steigraum von DE2 (PKL III E3.1)

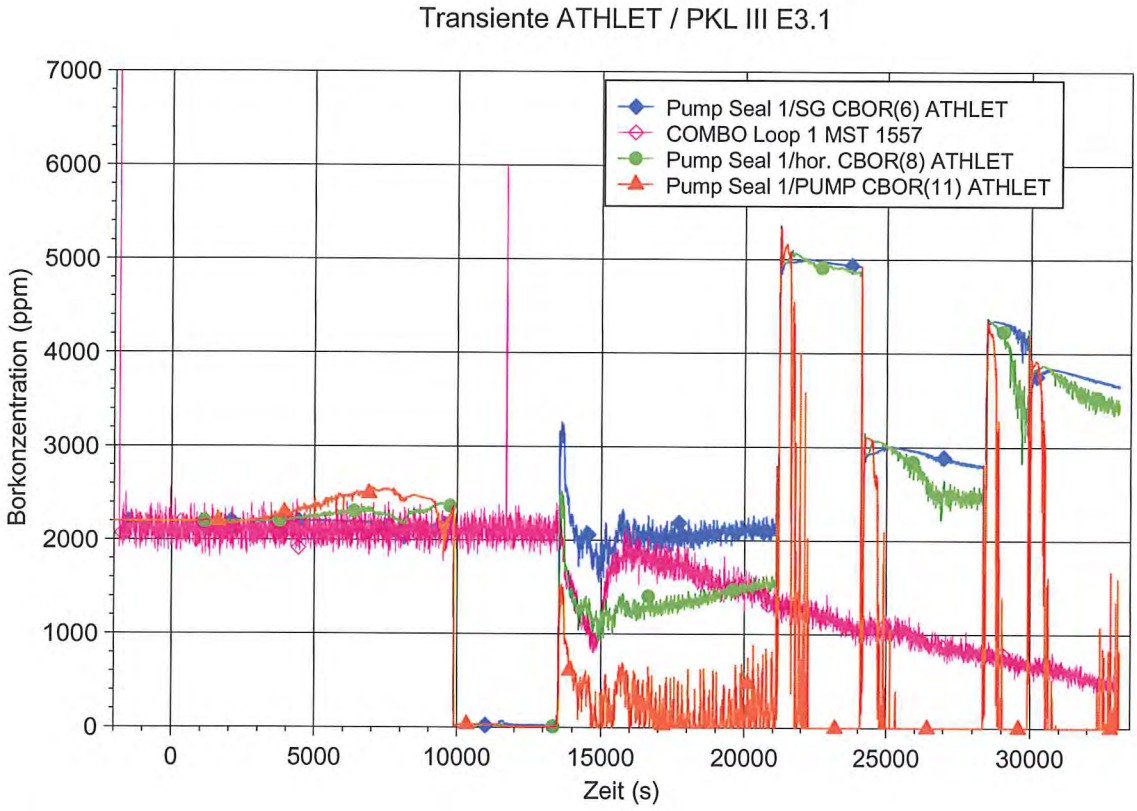


Bild 4.2-10 Borkonzentrationen im Pumpenbogen 1 (PKL III E3.1)

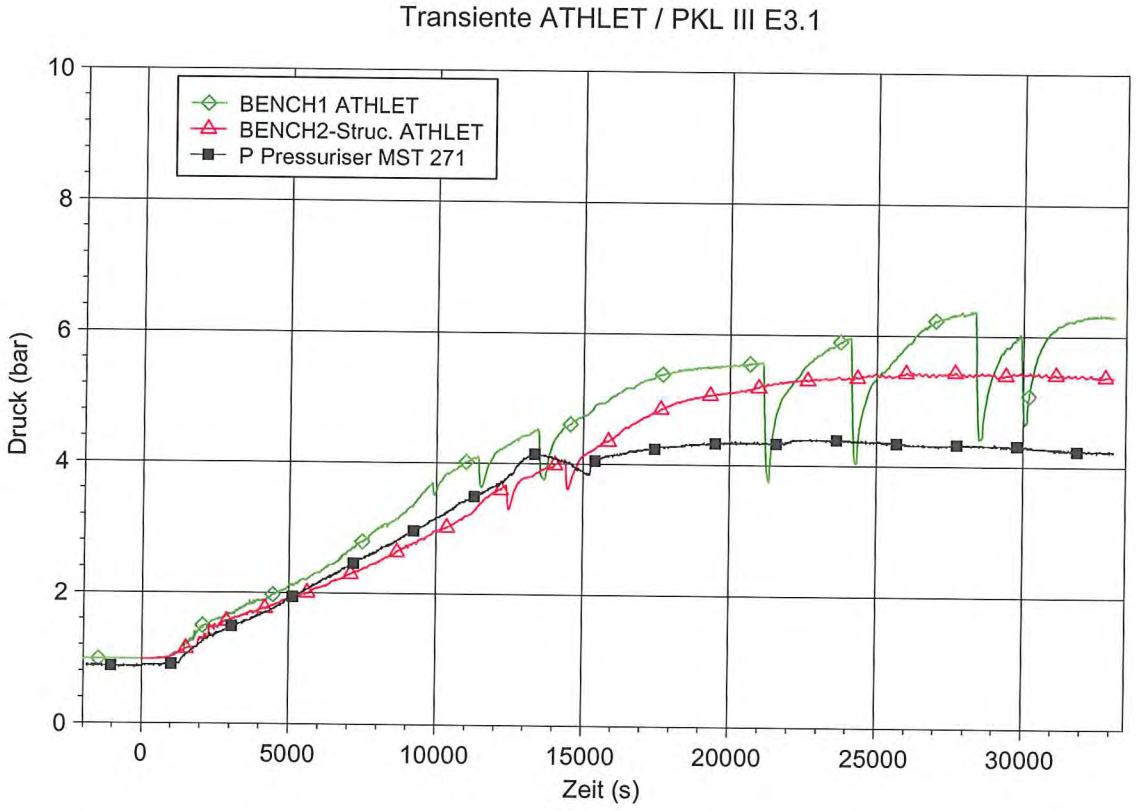


Bild 4.2-11 **Primärdrücke (Benchmark1/2, PKL III E3.1)**

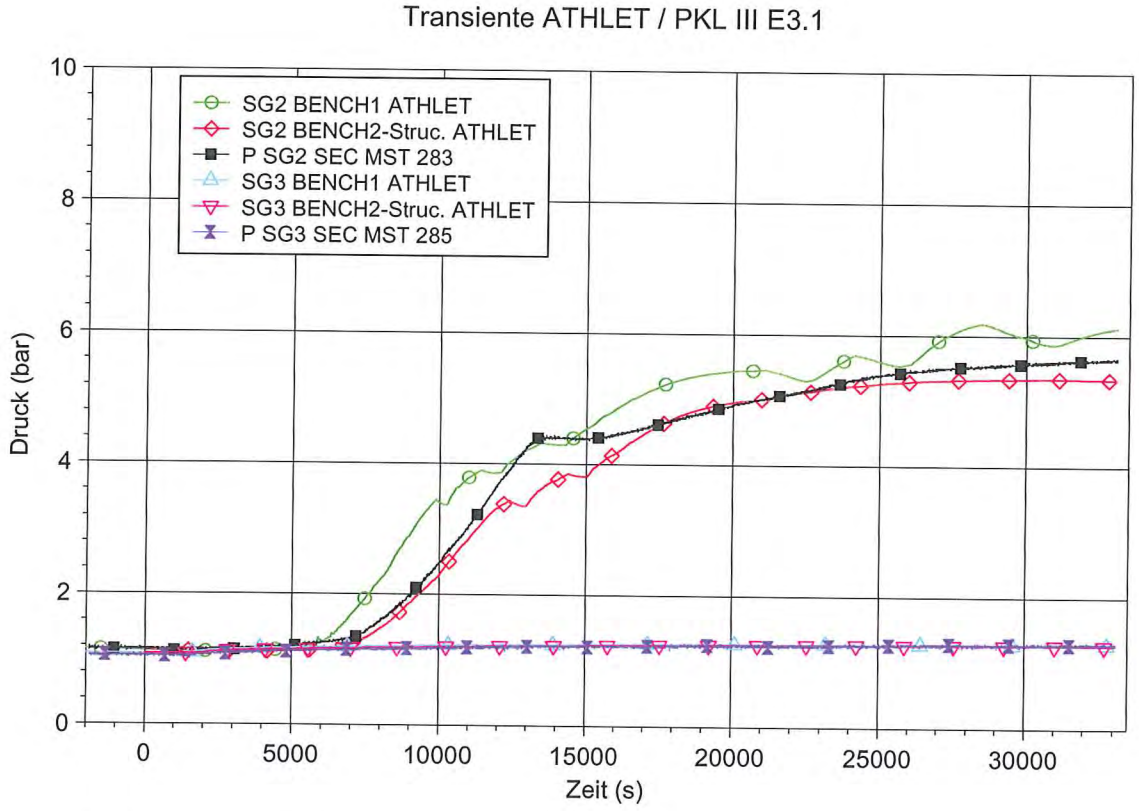


Bild 4.2-12 **DE2-Sekundärdrücke (Benchmark1/2, PKL III E3.1)**

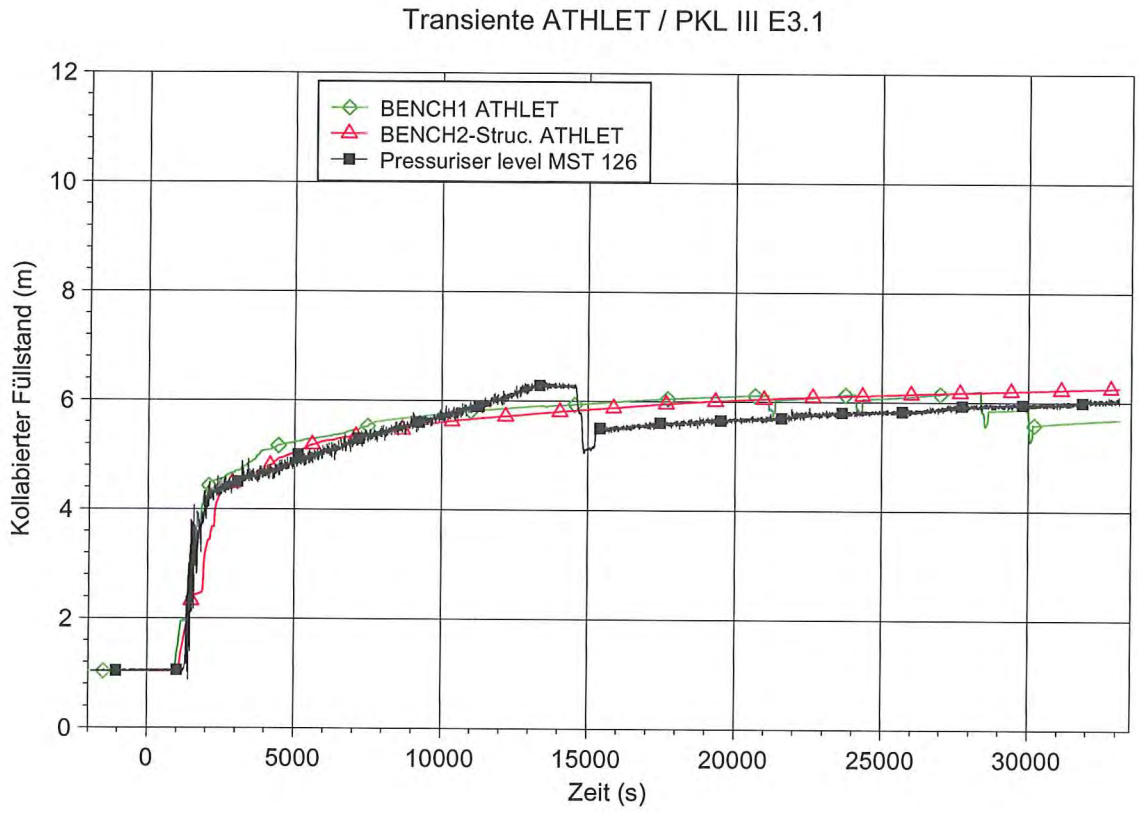


Bild 4.2-13 **Füllstände im Druckhalter (Benchmark1/2, PKL III E3.1)**

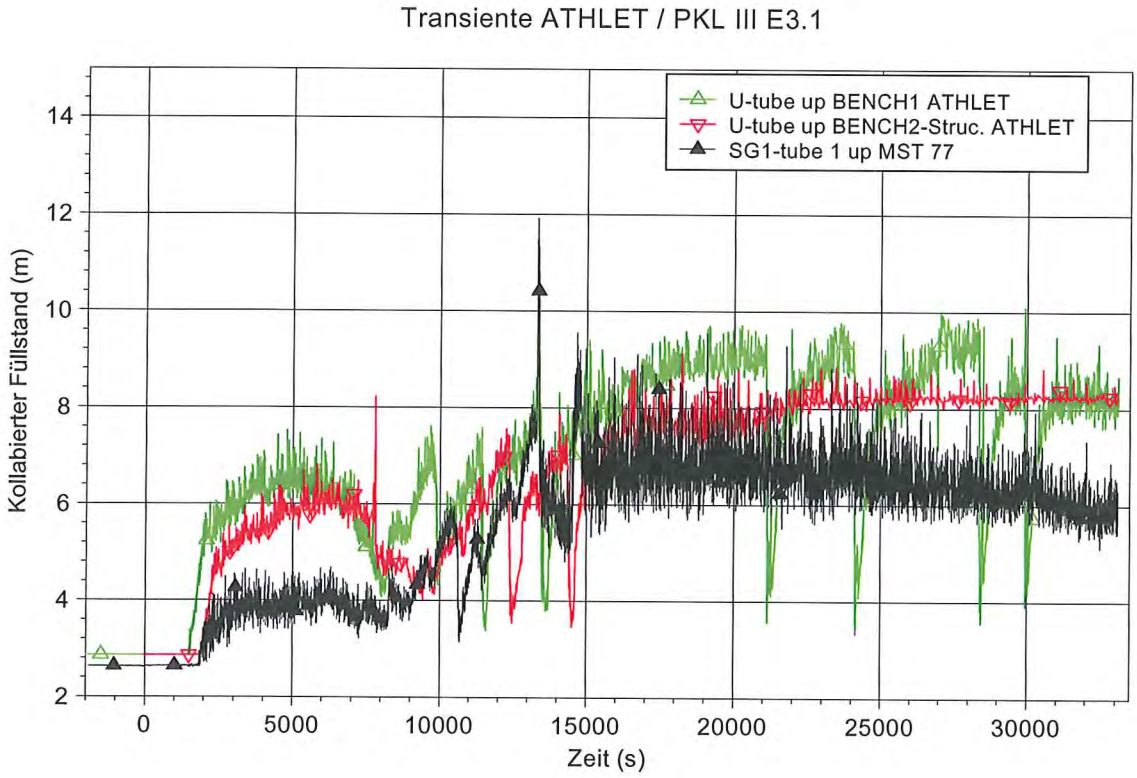


Bild 4.2-14 **Füllstände im kurzen, aufsteigenden DE1-U-Rohr (Benchmark1/2, PKL III E3.1)**

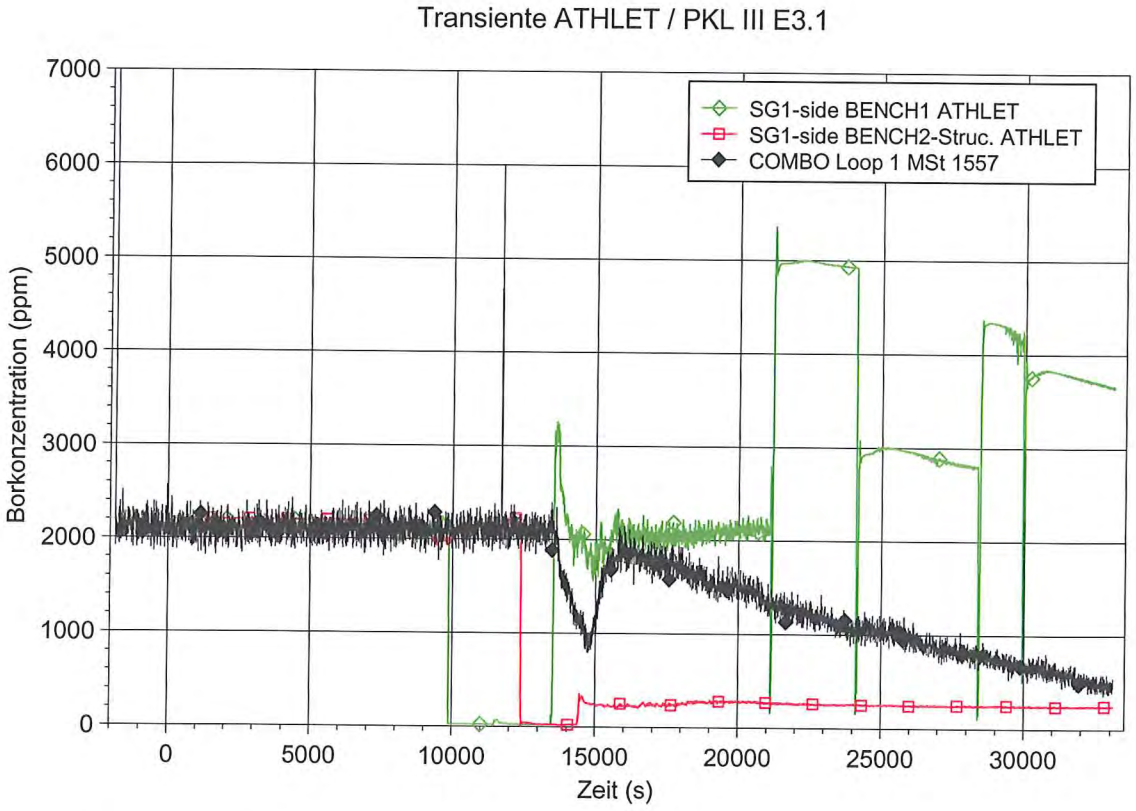


Bild 4.2-15 **Borkonzentrationen im Pumpenbogen 1 (Benchmark1/2, PKL III E3.1)**

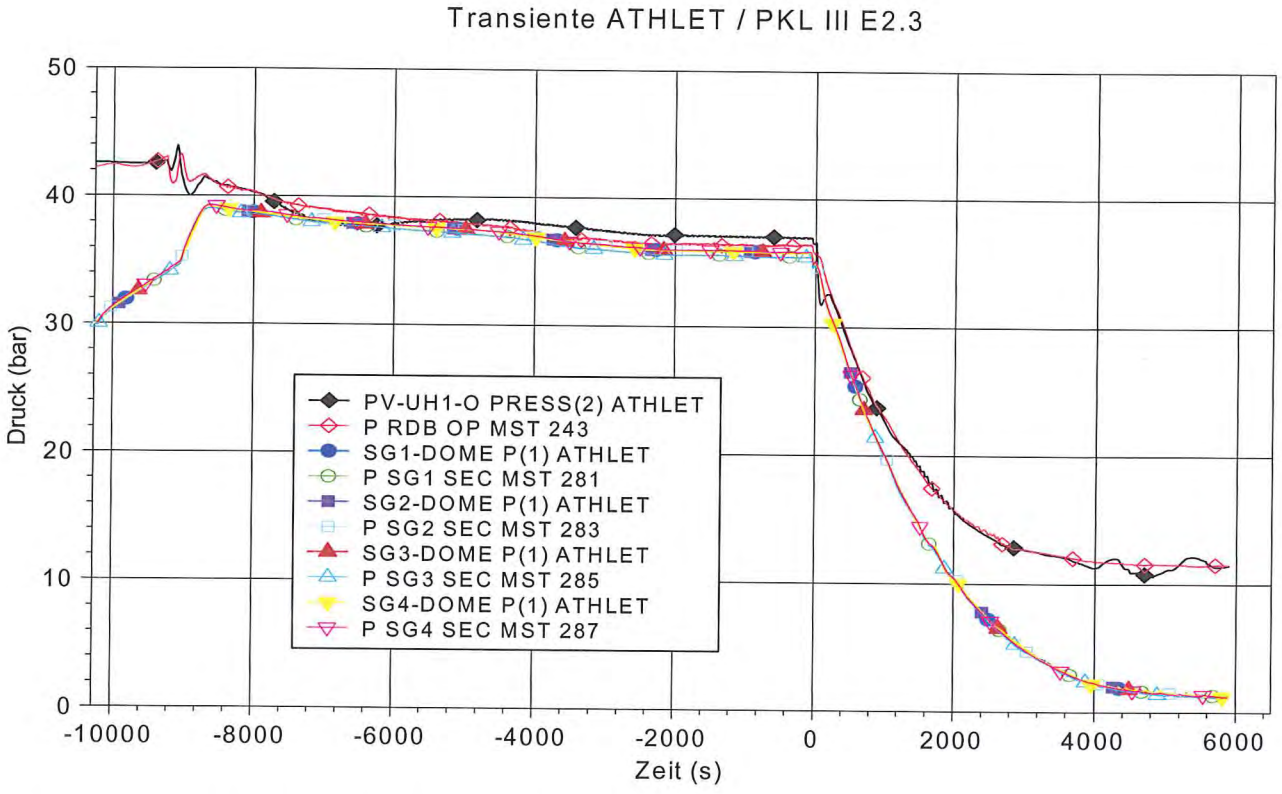


Bild 4.3-1 **Primär- und Sekundärdrücke (PKL III E2.3)**

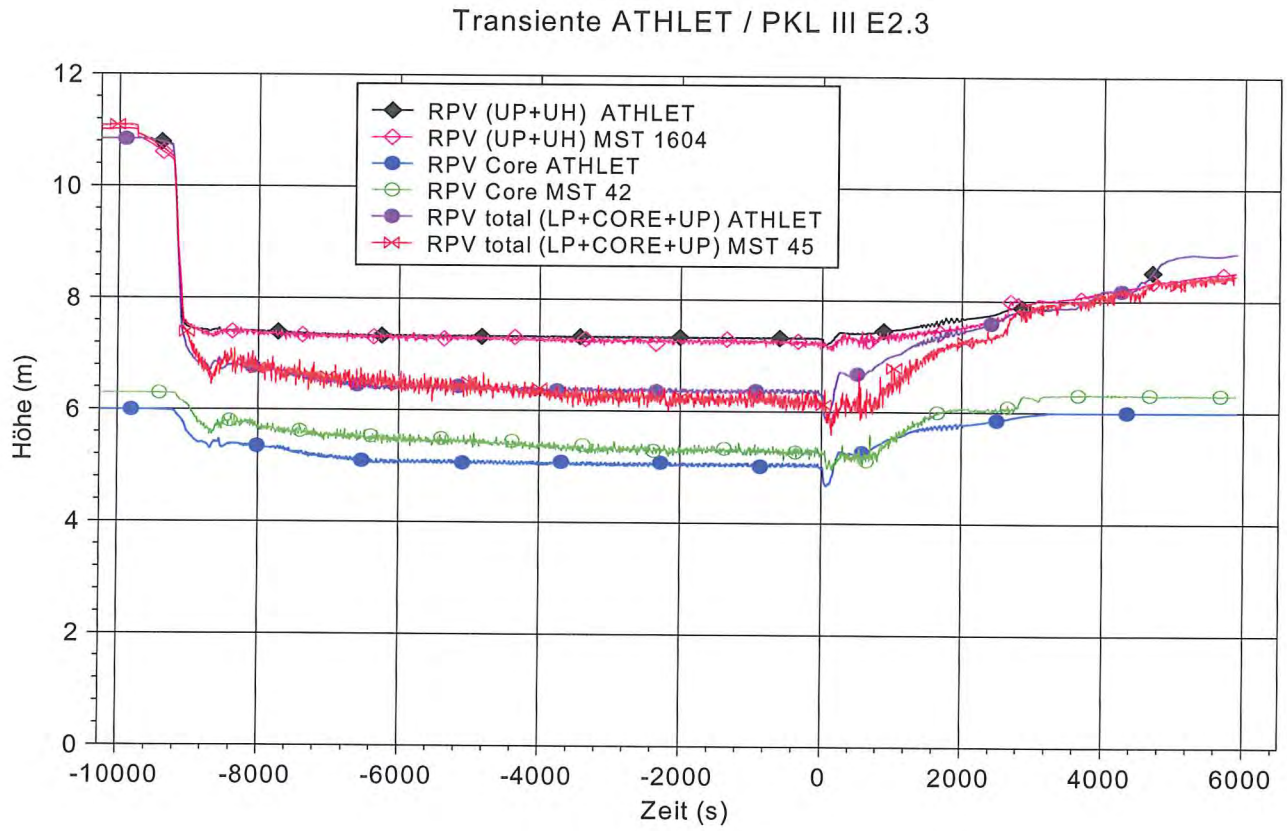


Bild 4.3-2 **Kollabierte Füllstände im Stabbündelbehälter (PKL III E2.3)**

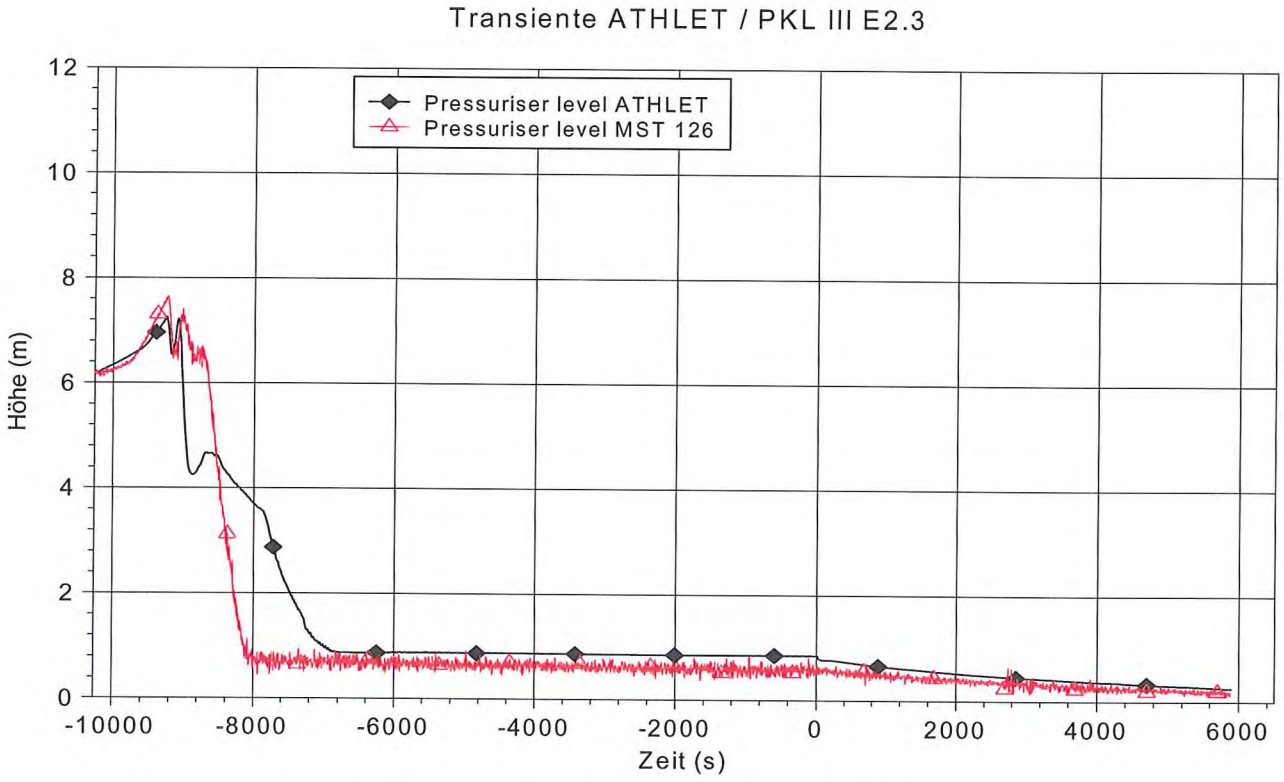


Bild 4.3-3 **Kollabierter Füllstand im Druckhalter (PKL III E2.3)**

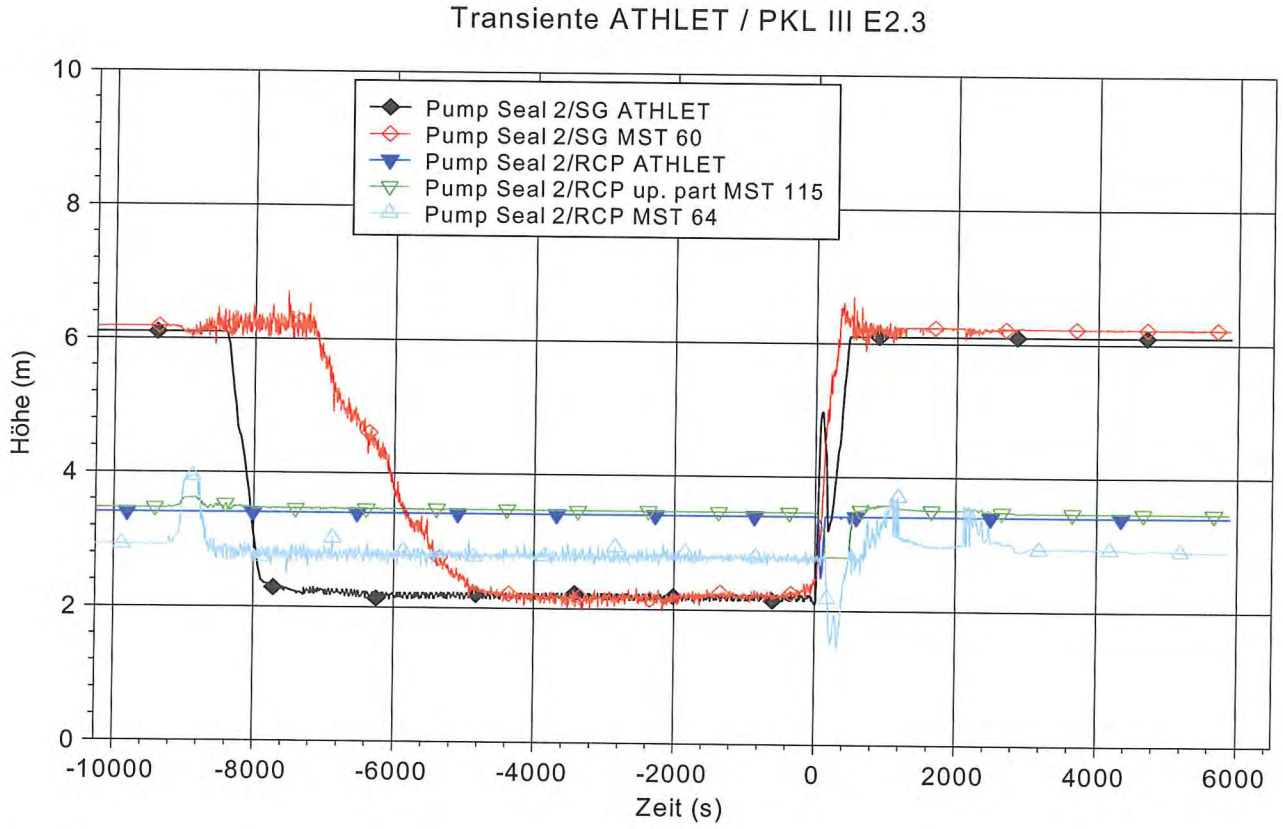


Bild 4.3-4 **Kollabierte Füllstände im Pumpenbogen 2 (PKL III E2.3)**

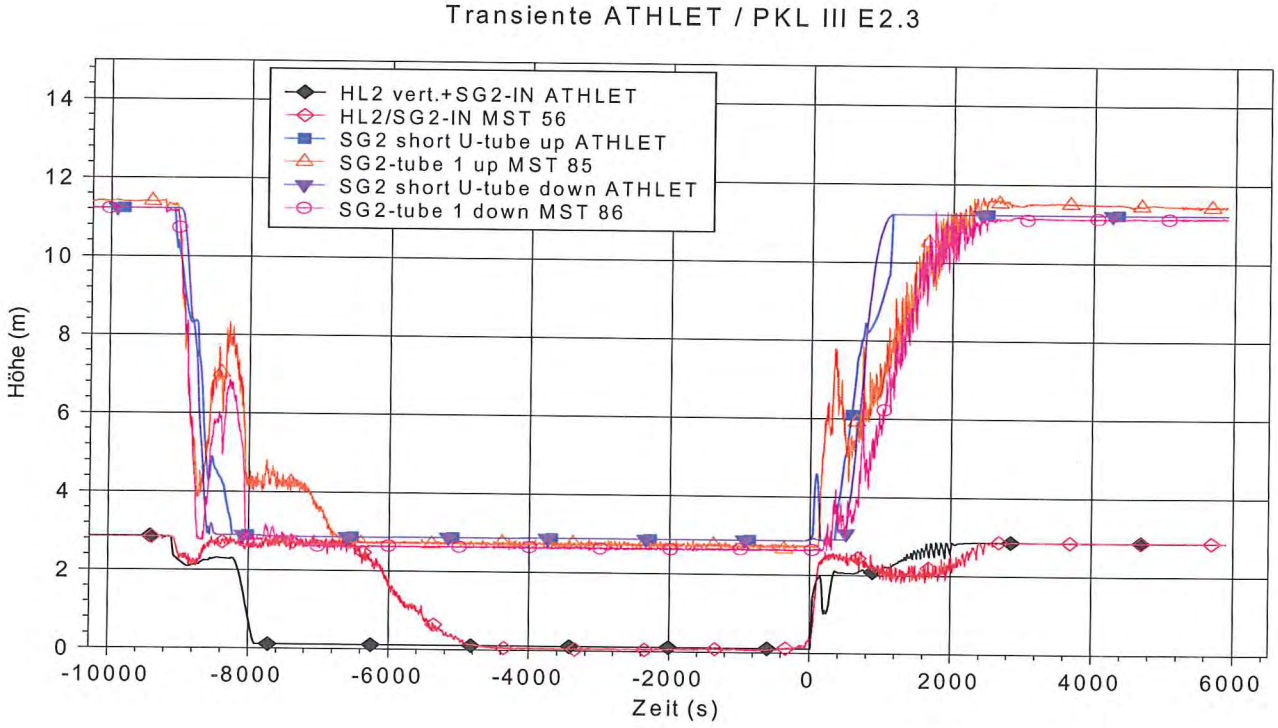


Bild 4.3-5 **Kollabierte Füllstände in HS2 vertikal und DE2-Eintritt sowie im kurzen DE2-U-Rohr (PKL III E2.3)**

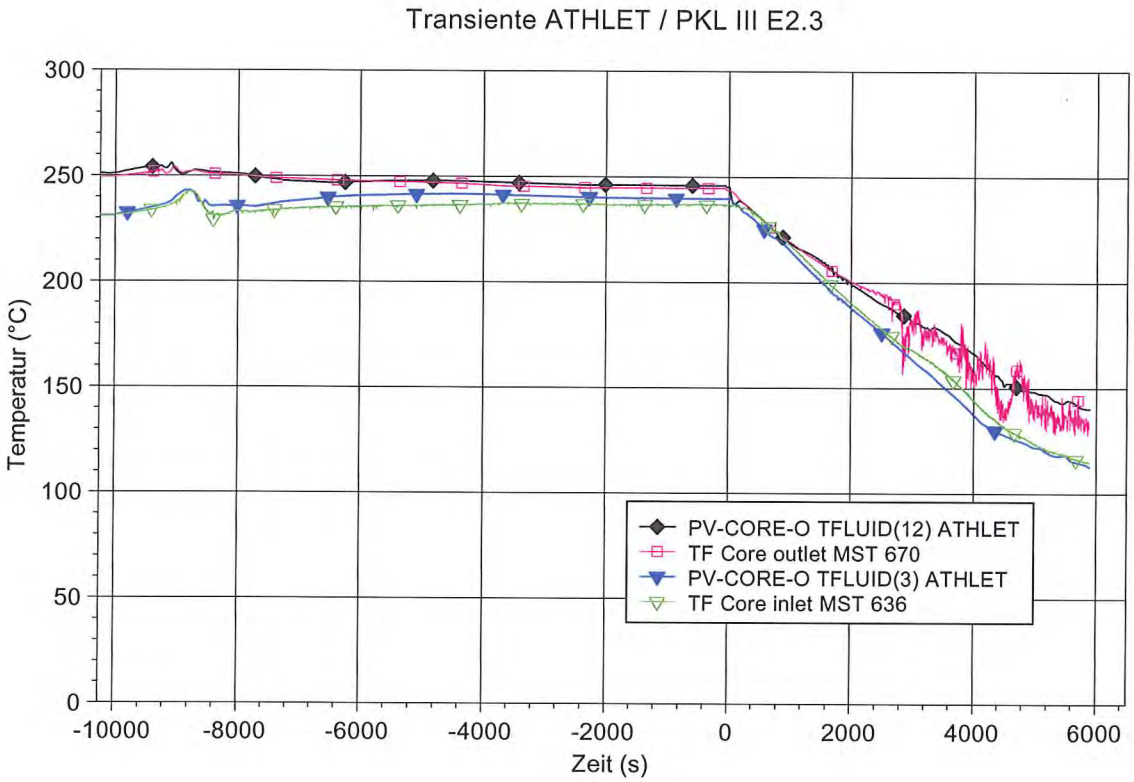


Bild 4.3-6 **Fluidtemperaturen am Beginn der beheizten Kernlänge und oberhalb der BE-Kopfplatte (PKL III E2.3)**

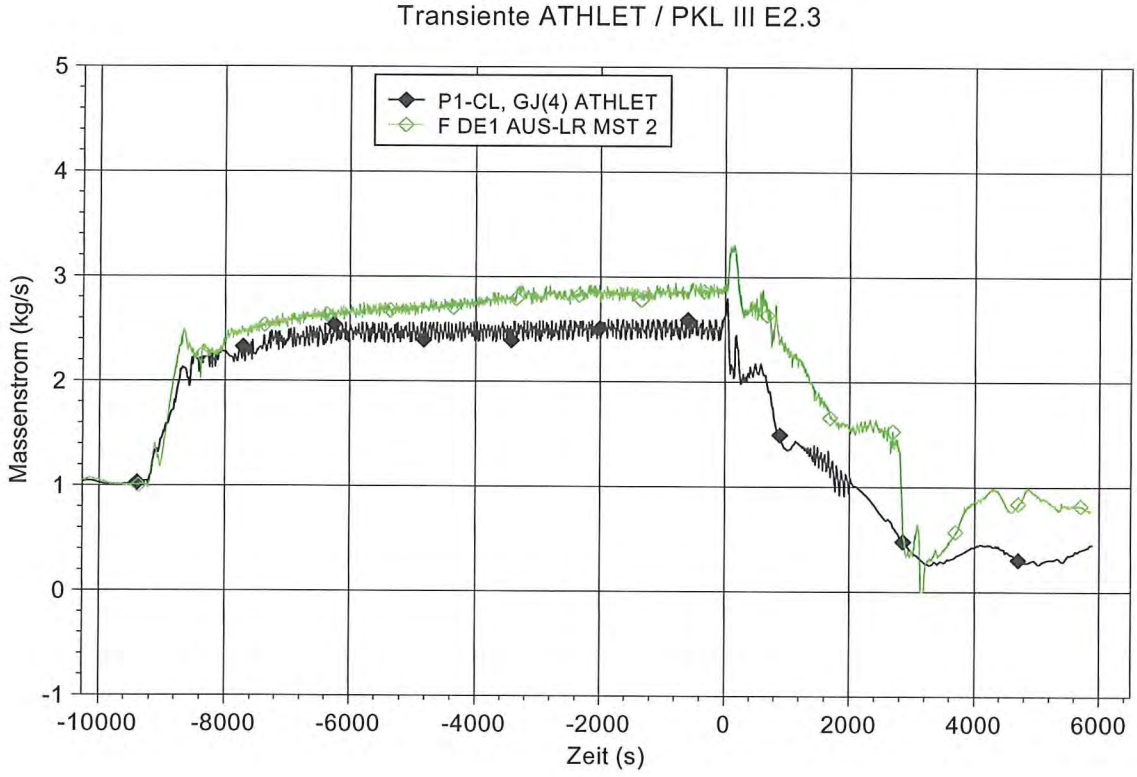


Bild 4.3-7 **Massenstrom im DE-seitigen Bereich des Pumpenbogens 1 (PKL III E2.3)**

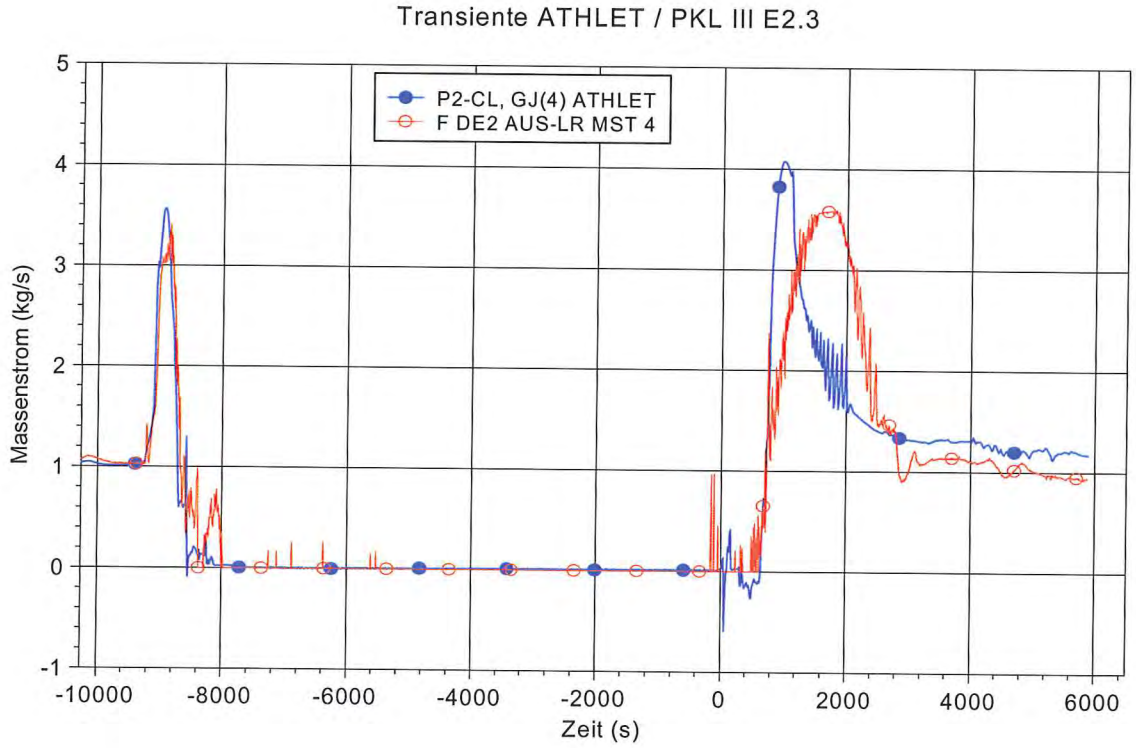


Bild 4.3-8 **Massenstrom im DE-seitigen Bereich des Pumpenbogens 2 (PKL III E2.3)**

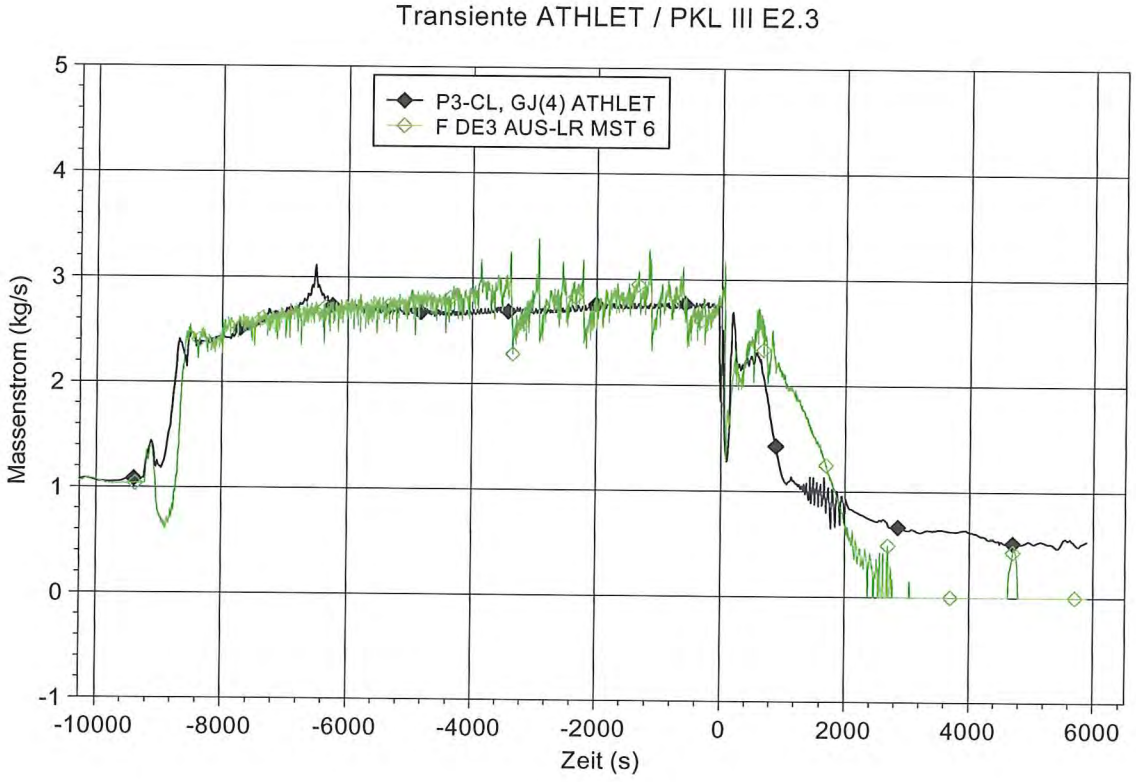


Bild 4.3-9 **Massenstrom im DE-seitigen Bereich des Pumpenbogens 3 (PKL III E2.3)**

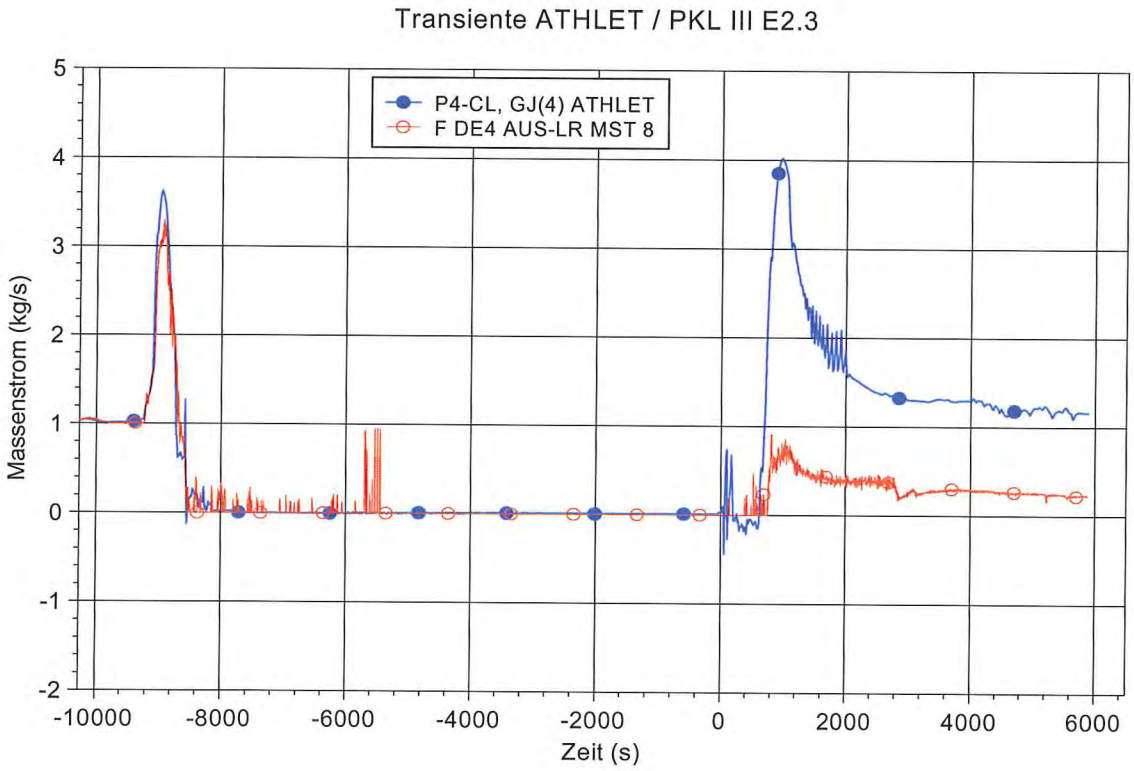


Bild 4.3-10 **Massenstrom im DE-seitigen Bereich des Pumpenbogens 4 (PKL III E2.3)**

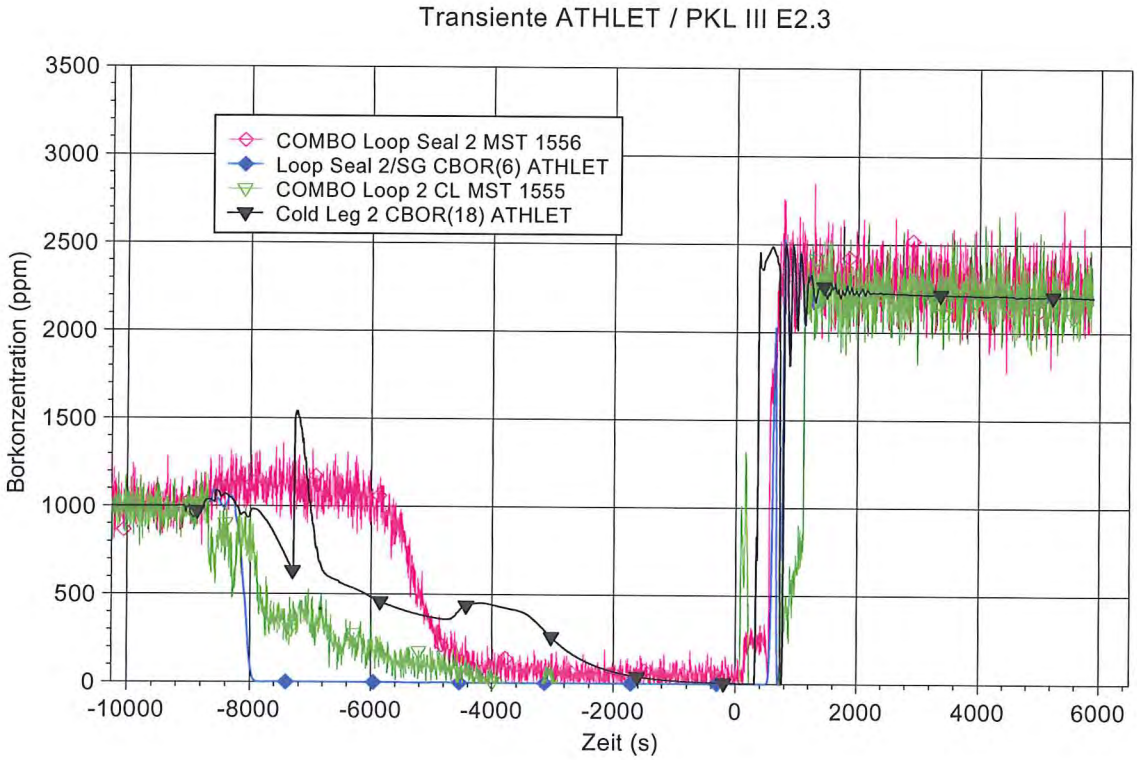


Bild 4.3-11 **Borkonzentration im DE-seitigen Bereich des Pumpenbogens 2 und im kalten Strang 2 vor Ringraum (PKL III E2.3)**

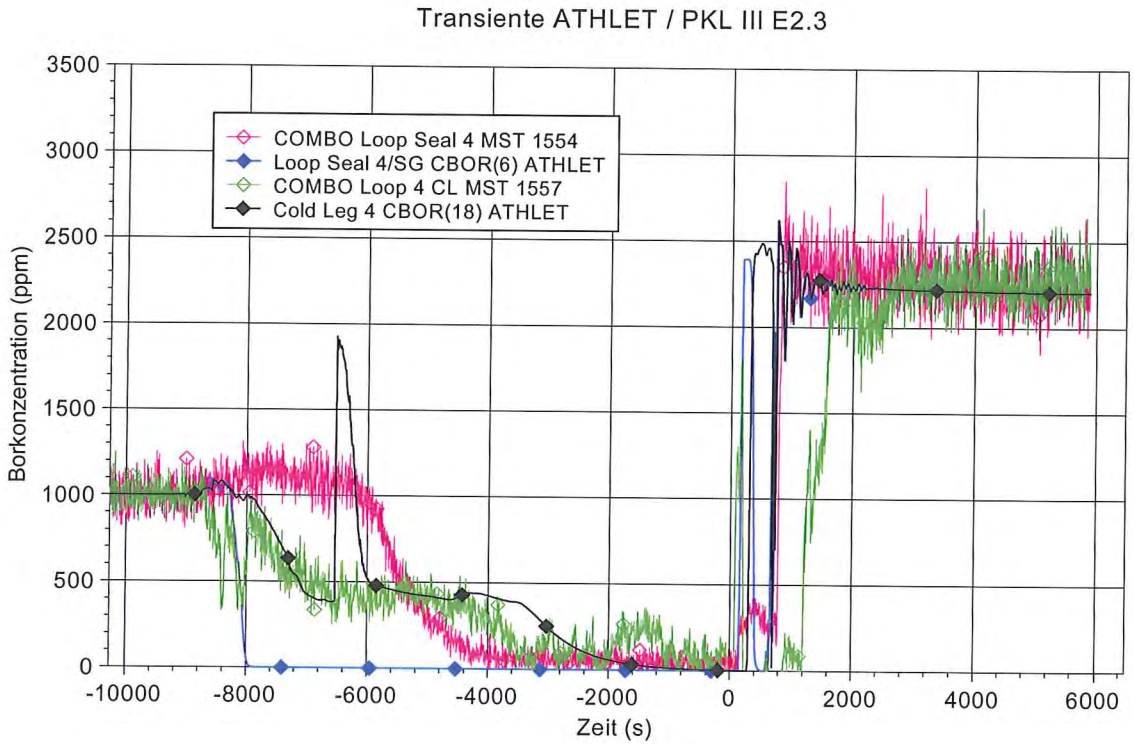


Bild 4.3-12 **Borkonzentration im DE-seitigen Bereich des Pumpenbogens 4 und im kalten Strang 4 vor Ringraum (PKL III E2.3)**

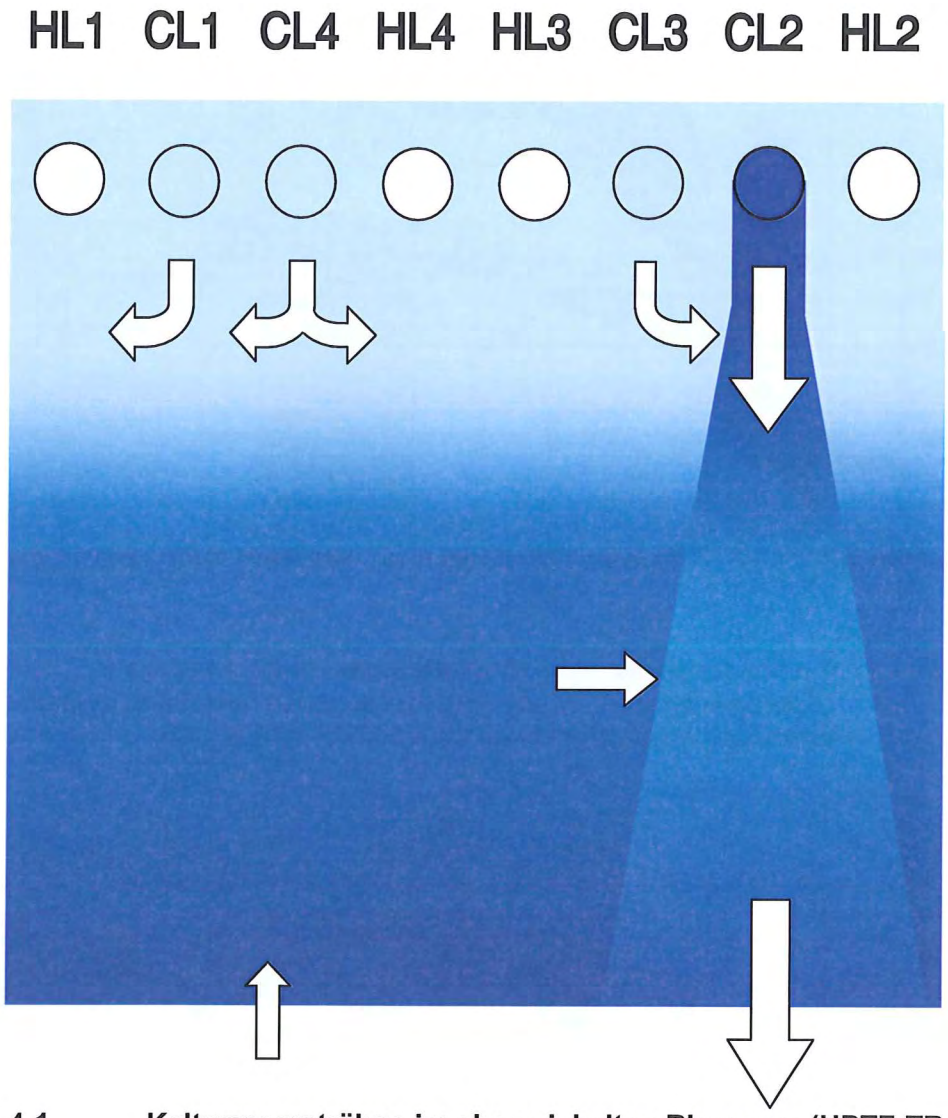


Bild 4.4-1 **Kaltwassersträhne im abgewickelten Ringraum (UPTF-TRAM C3)**

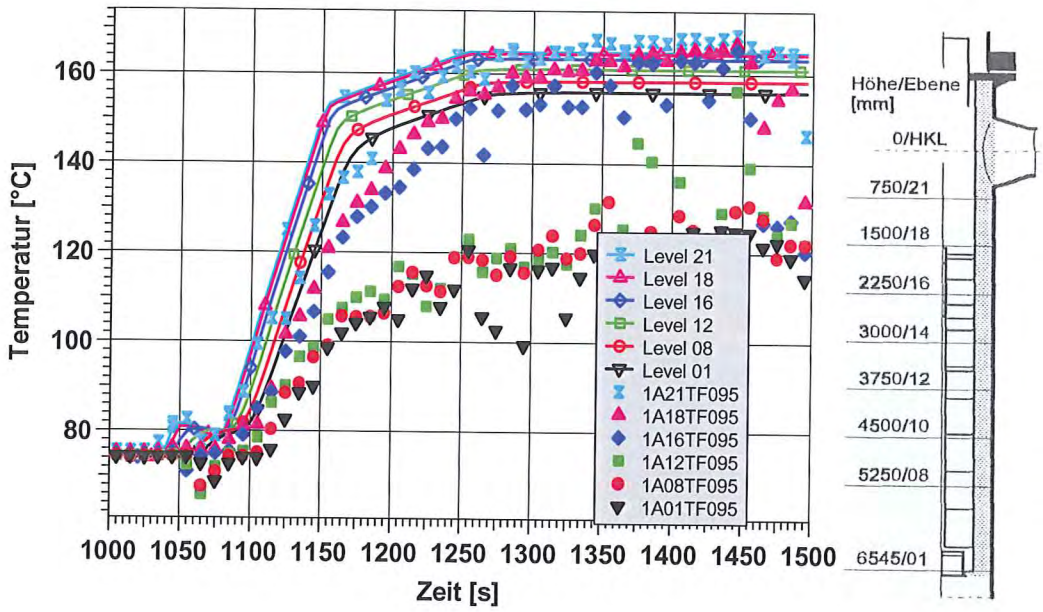


Bild 4.4-2 **Gemessene und ohne Turbulenzmodell berechnete (durchgezogene Linien) Temperaturverteilung im Ringraum unterhalb des Kaltstrangs CL3 (UPTF-TRAM C3).**

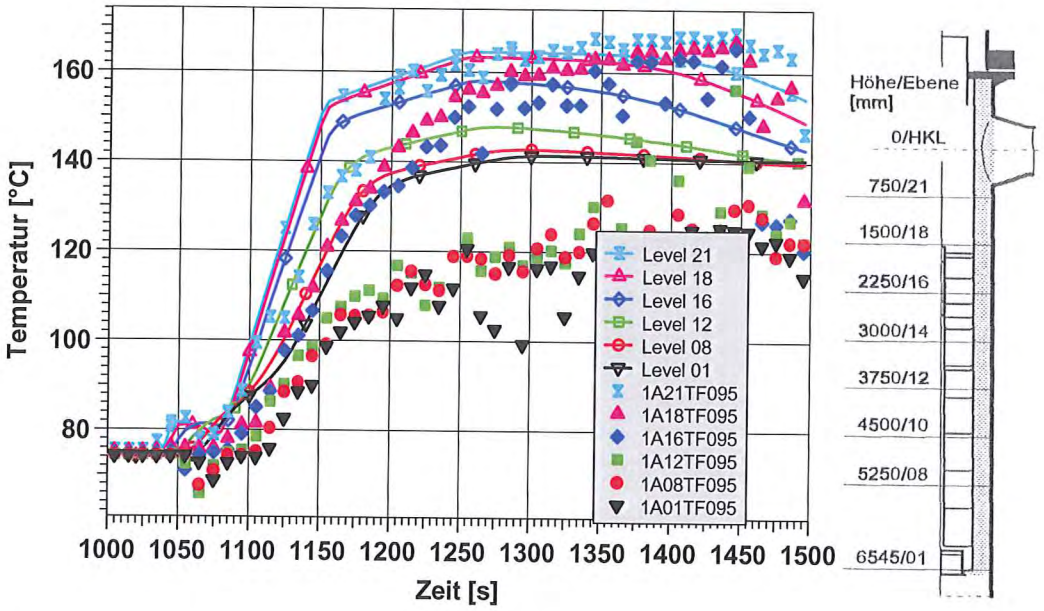


Bild 4.4-3 **Gemessene und mit Turbulenzmodell berechnete (durchgezogene Linien) Temperaturverteilung im Ringraum unterhalb des Kaltstrangs CL3 (UPTF-TRAM C3).**

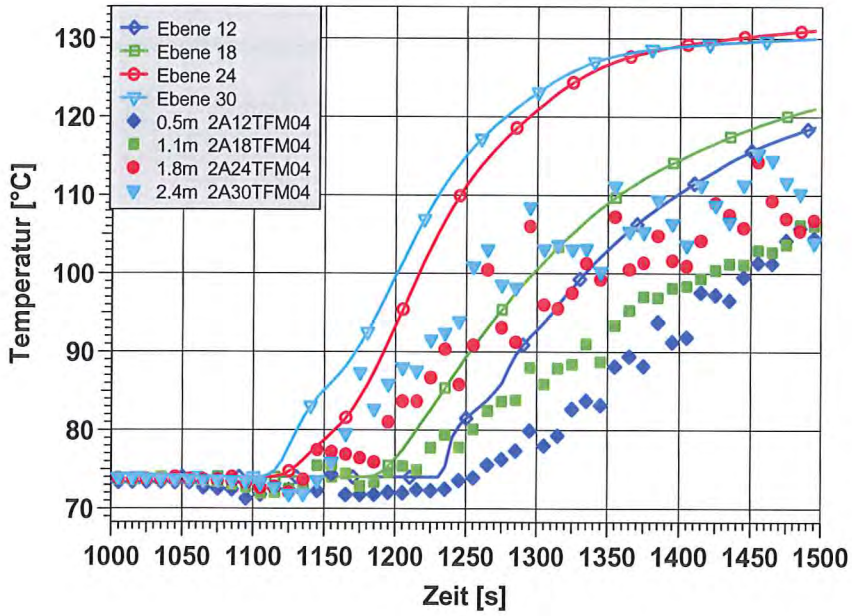


Bild 4.4-4 Gemessene und mit Turbulenzmodell berechnete (durchgezogene Linien) Temperaturverteilung im unteren Plenum (UPTF-TRAM C3)

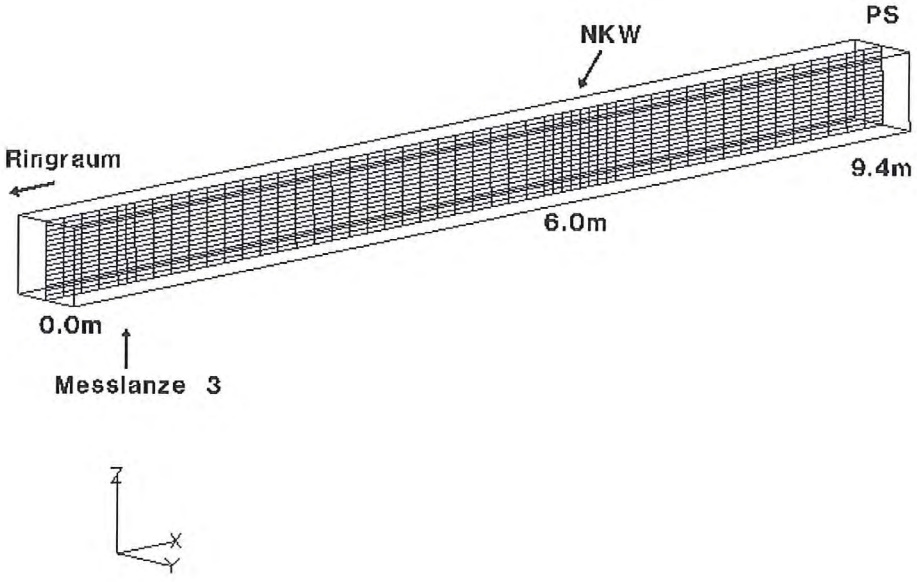


Bild 4.5-1 Diskretisierung der Ersatzrohrgeometrie für die Nachrechnung des Versuchs UPTF-TRAM C1

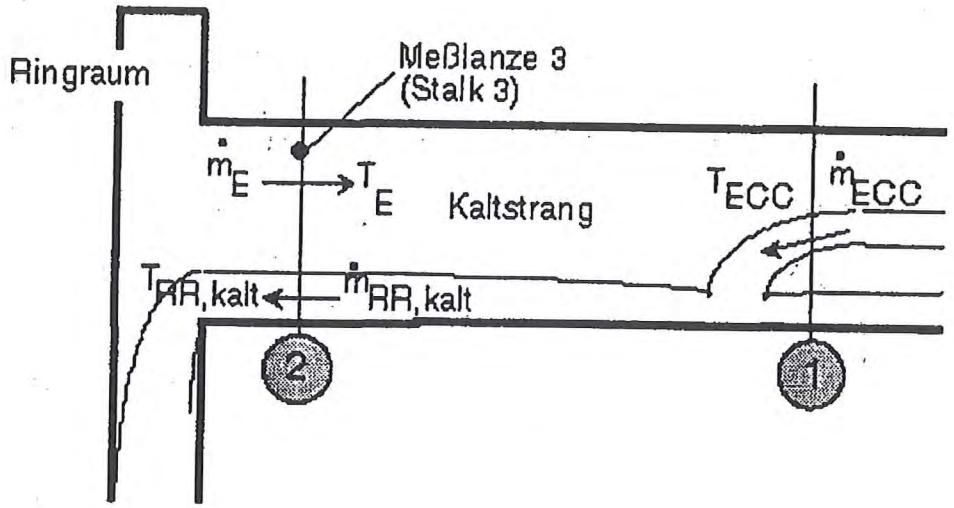


Bild 4.5-2 **Bilanzraum im Kaltstrang zwischen den Positionen 1 und 2 (UPTF-TRAM C1)**

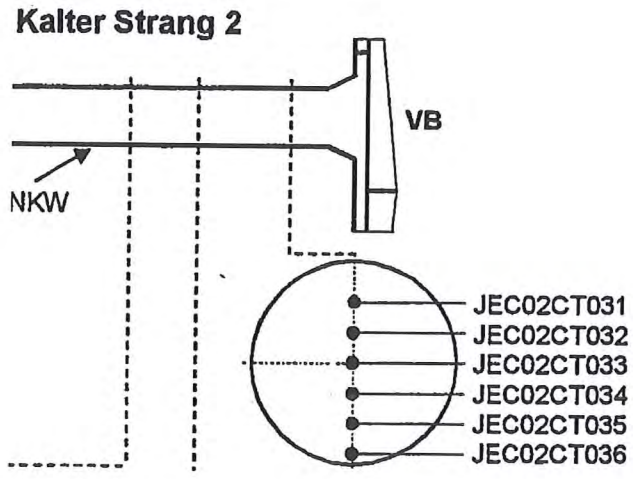


Bild 4.5-3 **Messstellen in der Messlanze 3 (UPTF-TRAM C1)**

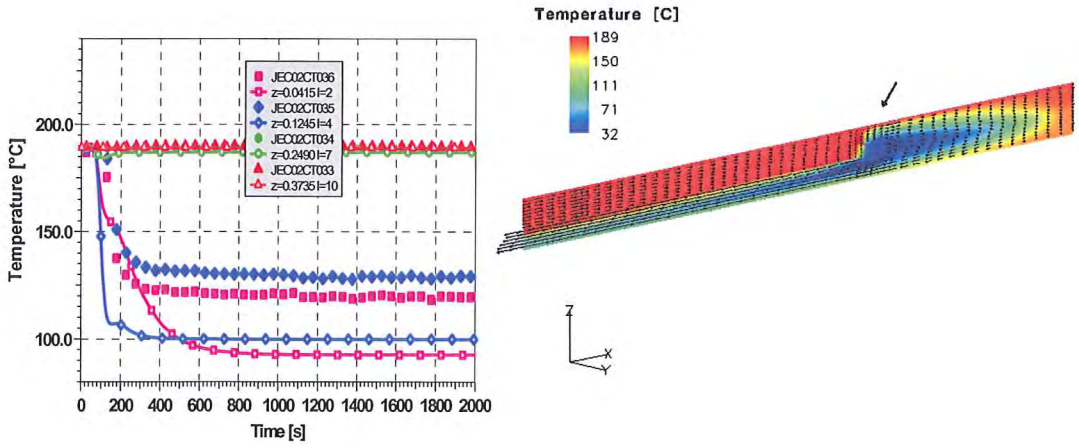


Bild 4.5-4 Simulation (durchgezogene Linien) der Mischtemperaturen mit FLUBOX ohne Turbulenzmodell (UPTF-TRAM C1)

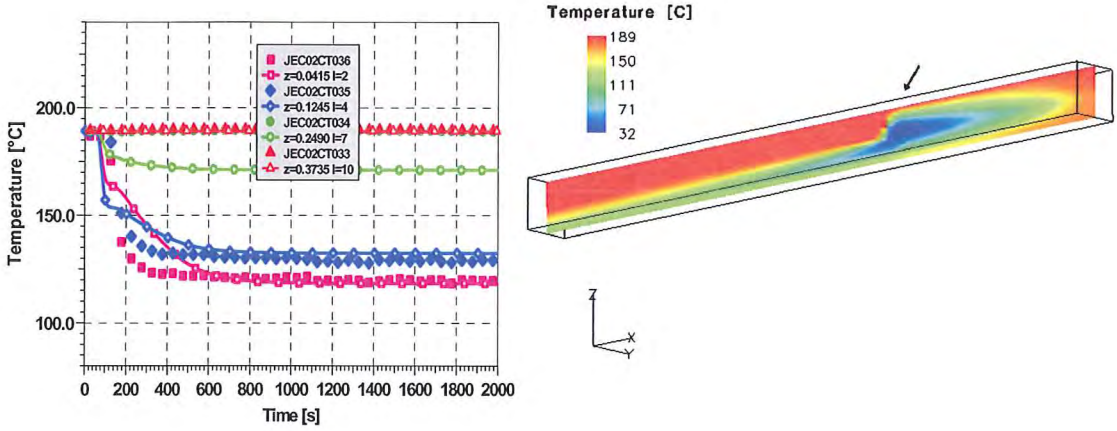


Bild 4.5-5 Simulation (durchgezogene Linien) der Mischtemperaturen mit FLUBOX mit Turbulenzmodell (UPTF-TRAM C1)

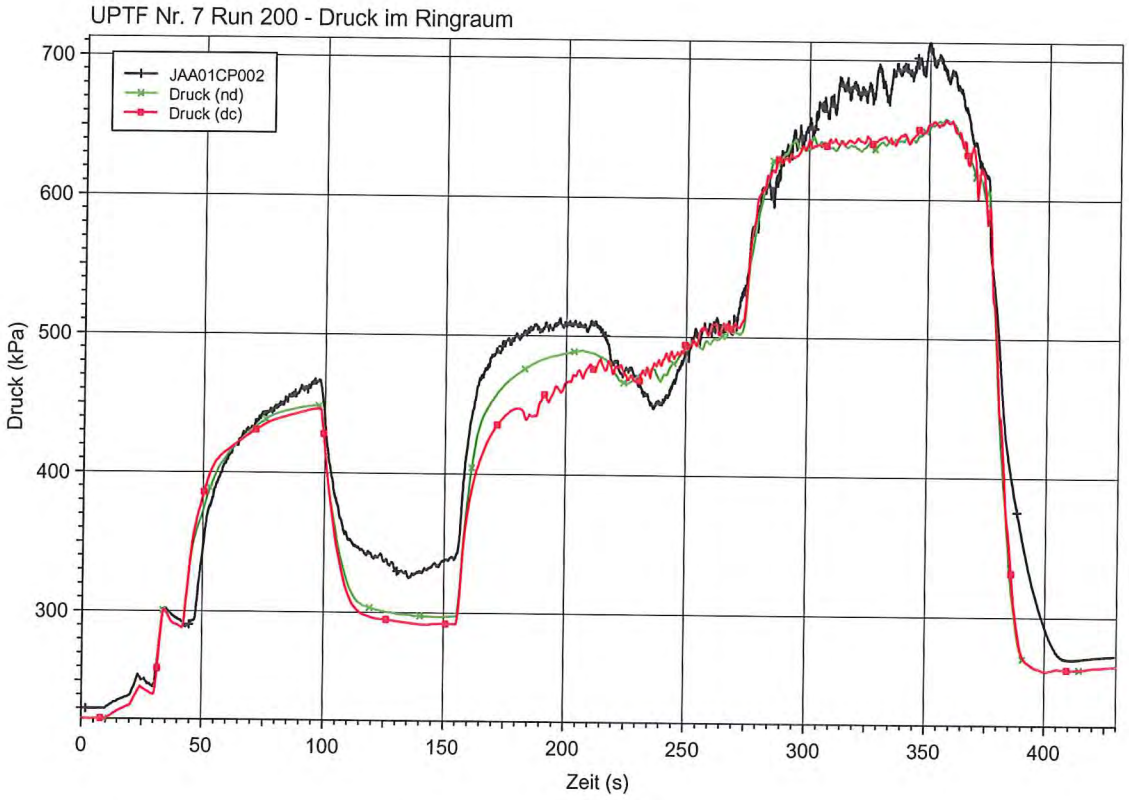


Bild 4.6-1 **Absolutdruck im Ringraum oberhalb der Anschlussstutzen (Run 200)**

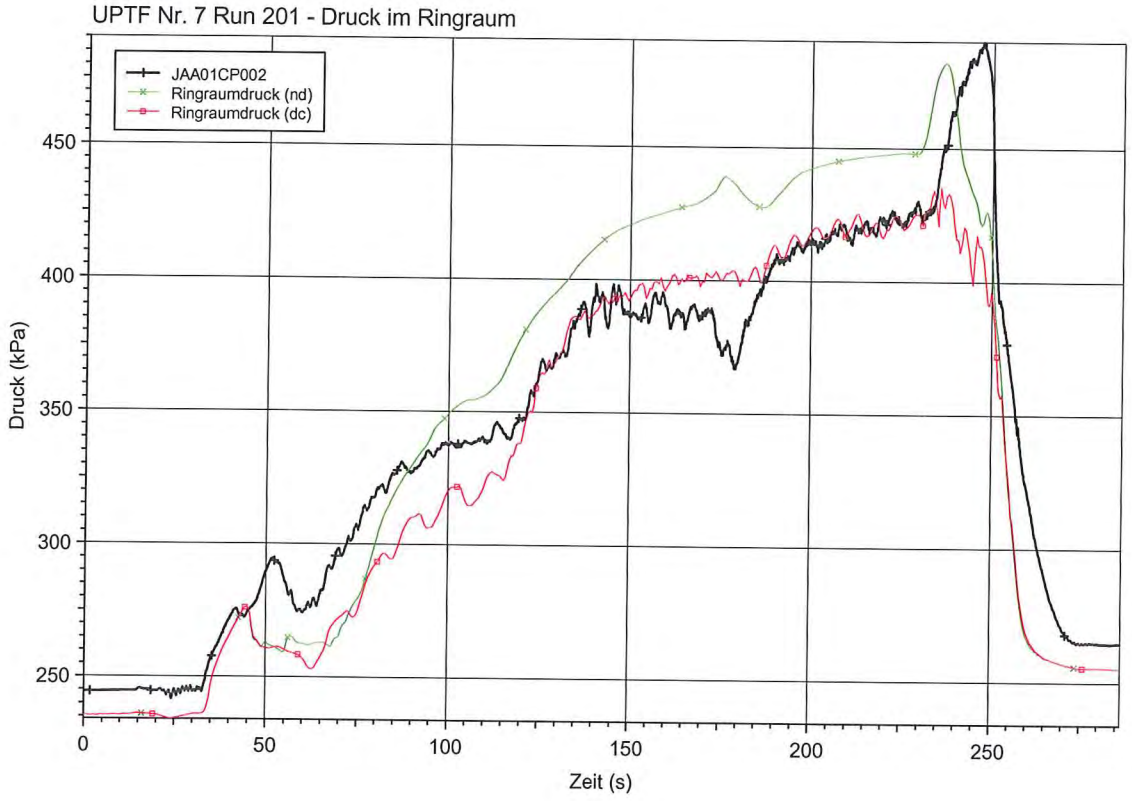


Bild 4.6-2 **Absolutdruck im Ringraum oberhalb der Anschlussstutzen (Run 201)**

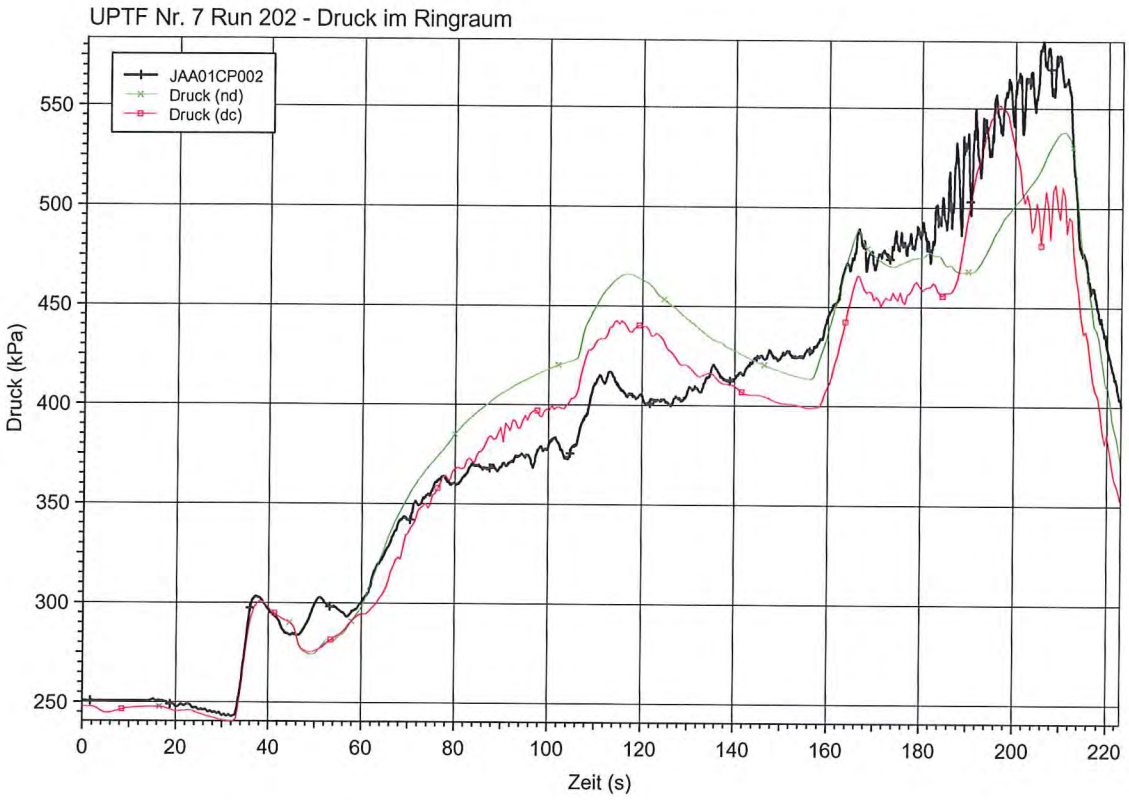


Bild 4.6-3 **Absolutdruck im Ringraum oberhalb der Anschlussstutzen (Run 202)**

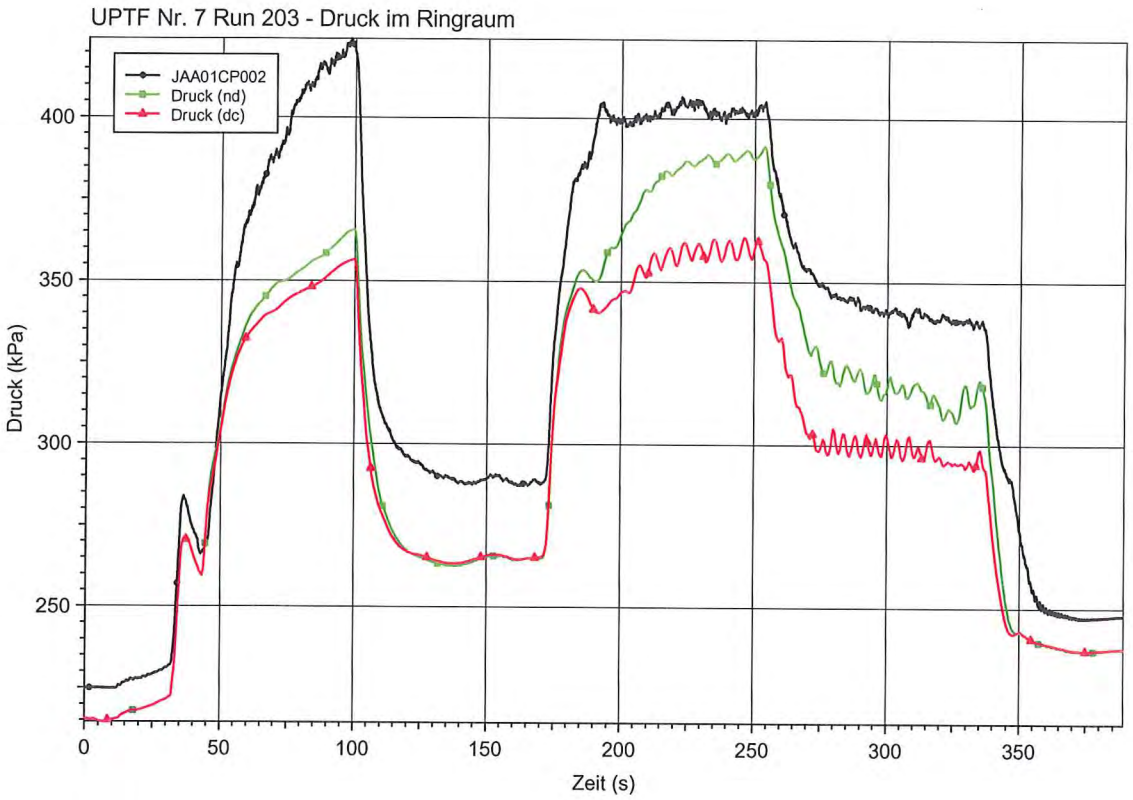


Bild 4.6-4 **Absolutdruck im Ringraum oberhalb der Anschlussstutzen (Run 203)**

11 Verteiler

BMWi

Referat III B 4		1 x

GRS-PT/B

Internationale Verteilung		45 x
Projektbegleiter	(seh)	3 x

GRS

Geschäftsführung	(hah, stj)	je 1 x
Bereichsleiter	(erv, lim, prg, tes, rot, zir)	je 1 x
Abteilungsleiter	(all, bea, gls, lab, poi)	je 1 x
Abteilung 3010	(spc, som, klh)	je 1 x
Abteilung 3030	(paa)	1 x
Projektleiter	(stf)	1 x
Projektbetreuung	(kgl)	1 x
Informationsverarbeitung	(nit)	1 x
Bibliothek	(Garching, Köln)	je 1 x
Autoren	(stf, gra, wib)	je 2 x

Gesamtauflage **77 Exemplare**