

**Untersuchung zum
Sicherheitskonzept des
MEGAPIE Targets in der
Spallations-Neutronenquelle
SINQ: Druckentwicklung im
Strahlrohr der Anlage in dem
angenommenen Störfall
'Bruch der Strahlfenster
an Targetbehälter und
Sicherheitshülle**

H. Jacobs

Institut für Kern- und Energietechnik
Programm Nukleare Sicherheitsforschung

August 2004

Forschungszentrum Karlsruhe

in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 6673

Untersuchung zum Sicherheitskonzept des MEGAPIE
Targets in der Spallations-Neutronenquelle SINQ:
Druckentwicklung im Strahlrohr der Anlage in dem
angenommenen Störfall 'Bruch der Strahlfenster an
Targetbehälter und Sicherheitshülle'

H. Jacobs

Institut für Kern- und Energietechnik
Programm Nukleare Sicherheitsforschung

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

2004

Impressum der Print-Ausgabe:

**Als Manuskript gedruckt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor**

**Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe**

**Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft
Deutscher Forschungszentren (HGF)**

ISSN 0947-8620

urn:nbn:de:0005-066731

Zusammenfassung

Das MEGAPIE Target wird entwickelt als Flüssigmetall-Target für die Spallations-Neutronenquelle SINQ im Paul Scherrer Institut in Villigen, Schweiz. Im vorliegenden Bericht wird der hypothetische Störfall 'Bruch der Strahlfenster an Target und Sicherheitshülle' untersucht, bei dem die flüssige Blei-Wismuth-Legierung aus dem Target mit dem flüssigen Wasser (D_2O) aus der Sicherheitshülle in Kontakt käme. Die Frage ist, ob sich in dem System ein Druck entwickeln kann, der zur Beschädigung des Strahlrohres führen könnte. Für die Untersuchung der kritischen Anfangsphase wird das transiente thermo- und hydrodynamische Rechenprogramm MATTINA verwendet, das am Forschungszentrum Karlsruhe entwickelt wird zur Analyse von möglichen Dampfexplosionen bei schweren Unfällen in Kernkraftwerken. Die Rechnungen zeigen, daß kurzfristig, etwa in den ersten 10 Sekunden, nicht mit Drücken über 1 MPa (10 bar) zu rechnen ist. Falls das Flüssigmetall wie vorgesehen weit nach unten abfließt, gilt dies auch langfristig. Falls aber der Abfluß des Flüssigmetalls durch den Kollimator hindurch wesentlich behindert wird, könnte längerfristig ein Druckniveau von maximal etwa 2 MPa (20 bar) erreicht werden. Ebenso könnte in diesem Fall schon während der Entleerung des Targetbehälters Wasser dort eindringen und vorübergehend zu Drücken bis etwa 2 MPa (20 bar) führen. Mit Drücken über 2.0 MPa (20 bar) ist in keinem Fall zu rechnen. Sehr wahrscheinlich werden längerfristig nur wesentlich niedrigere Drücke erreicht, weil Kondensationsvorgänge an kalten Strukturen eine wesentliche Rolle spielen. Diese konnten hier nicht quantitativ behandelt werden.

Investigation into the safety case of the MEGAPIE target in the Spallation Neutron Source SINQ: Pressure development in the beam line of the facility in case of the hypothetical accident 'Breach of the beam windows on target container and safety hull'.

Abstract

The MEGAPIE target is being developed as liquid metal target for the Spallation Neutron Source SINQ at the Paul Scherrer Institute at Villigen, Switzerland. The present report analyses the hypothetical accident 'failure of the beam windows of target and safety hull.' During such an accident, the liquid potassium-bismuth alloy from the target would come into contact with the liquid water (D₂O) from the safety hull. The question arises whether this contact can lead to pressures that could lead to damage of the beam line. The critical initial phase of this accident is analysed with the help of the transient thermo-hydraulic code MATTINA which is being developed at Forschungszentrum Karlsruhe for the analysis of steam explosions that might occur during severe accidents in Light Water Reactors. According to the calculations performed the pressure will remain below 1 MPa (10 bar) on short-term, e.g. during the first 10 sec. This remains true on the long run if the liquid metal moves a long distance downward, as foreseen. If, however, the flow of the liquid metal should be hindered severely by the collimator, up to about 2 MPa (20 bar) might be reached. Also, water could penetrate into the target container while it is emptying and cause pressure spikes up to about 2 MPa (20 bar). Pressures beyond 2 MPa (20 bar) will not occur. Most probably the pressures that might be reached on the long term are much lower because condensation on cold structures would play an important role. This phenomenon could here not be treated quantitatively.

INHALTSVERZEICHNIS

1.	Einleitung	1
2.	Der zu untersuchende Störfall	2
3.	Das Rechenwerkzeug	2
4.	Die Modellierung (Basisfall)	3
5.	Beschreibung und Diskussion der Ergebnisse (Basisfall, Anfangsphase)	6
6.	Diskussion des Langzeitverhaltens (Basisfall)	9
7.	Diskussion von konservativ abdeckenden Fällen	11
8.	Schlussfolgerungen	16
	Anhänge	19

1. Einleitung

Im Rahmen einer groß angelegten internationalen Zusammenarbeit wird das MEGAPIE Target entwickelt [1]. Es soll als neuartiges Target in der Spallations-Neutronenquelle SINQ im Paul Scherrer Institut in Villigen (Schweiz) dienen. Es ist gefüllt mit einer flüssigen Legierung von Blei und Wismuth (PbBi), die zur Kühlung umgepumpt wird. Damit das Flüssigmetall im Fall eines Lecks im Targetbehälter nicht das Strahlrohr der Anlage kontaminieren kann, ist der Targetbehälter von einer Sicherheitshülle umgeben, vgl. Abbildung 1. Diese ist doppelwandig und wird zwecks Kühlung im Inneren von schwerem Wasser (D_2O) durchflossen. Falls jedoch der sehr unwahrscheinliche Fall eintreten sollte, daß der Targetbehälter und mindestens die innere Schale der Sicherheitshülle versagen (wie in der Abbildung angedeutet), käme das heiße Flüssigmetall mit dem D_2O in Kontakt. Die Temperatur des PbBi beträgt typisch etwa 540 K, so daß im Prinzip Drücke bis etwa 50 bar entstehen könnten. Das zentrale Rohr der SINQ (der senkrechte Teil des Strahlrohres innerhalb des Moderator tanks) hält dagegen nur Drücken bis etwa 30 bar stand [2]. Seine Integrität muß aber gewährleistet sein. Es muß daher untersucht werden, wie sich der Druck nach einem Bruch der Strahlfenster (durchstrahlten Partien) des Targetbehälters und (beider Schalen) der Sicherheitshülle entwickelt. Damit wird auch der Fall eines D_2O -Lecks in den Spalt zwischen Targetbehälter und Sicherheitshülle abgedeckt.

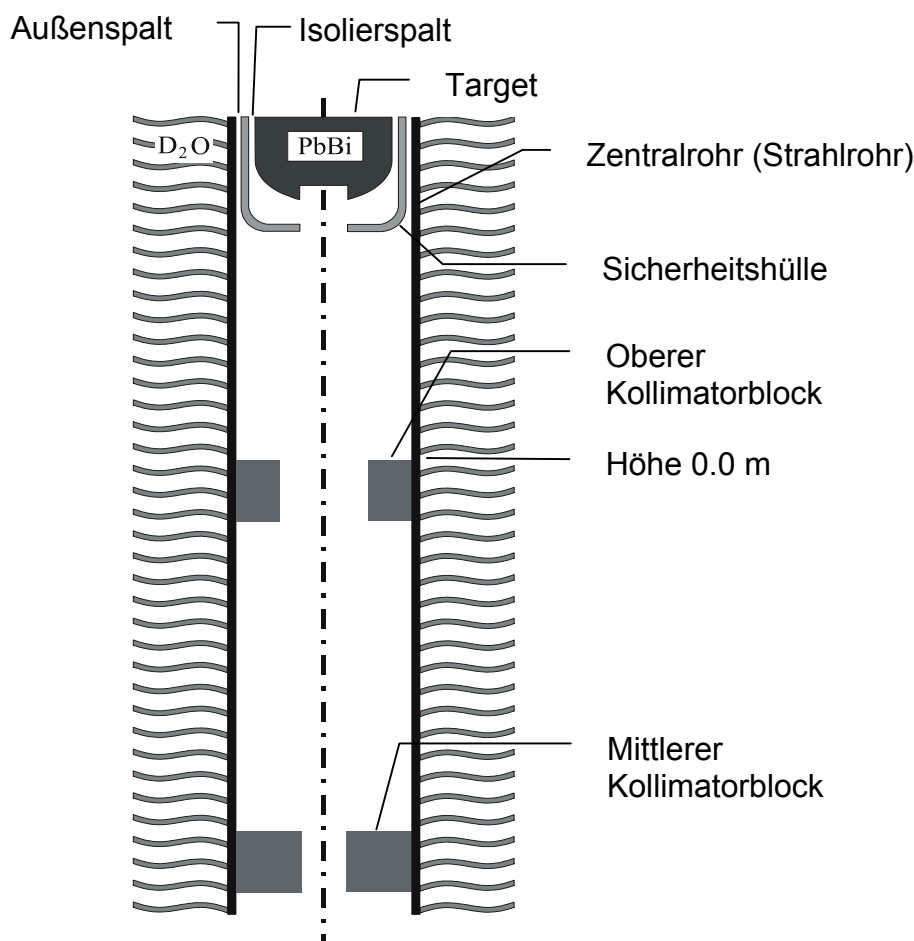


Abbildung 1: Schematische Skizze der Störfallsituation (nicht maßstäblich).

Für die Untersuchung der (kritischen) Kurzzeitphase bis etwa 10 sec wird das transiente thermo- und fluiddynamische Rechenprogramm MATTINA benutzt. Die Druckentwicklung in der Zeit nach der ersten hoch transienten Phase verläuft sehr viel langsamer und ist leichter abzuschätzen. Sie wird daher mit thermodynamischen Abschätzungen und argumentativ behandelt.

2. Der zu untersuchende Störfall

Es wird angenommen [3], daß sowohl der Targetbehälter als auch die Sicherheitshülle im Bereich der Strahlfenster vollständig versagen. Für das Loch wird in beiden Fällen ein Durchmesser von 2 cm angenommen. Die Druckverhältnisse am Ein- und Austritt bleiben zunächst ungeändert, so daß das PbBi aus dem Targetbehälter und das D₂O aus der Sicherheitshülle frei ausströmen. Es stellt sich die Frage, wie die Druckentwicklung im Bereich zwischen Targetbehälter und Sicherheitshülle ('Isolierspalt') bzw. im Zentralrohr ist - im letzteren Fall insbesondere in dem zentralen Bereich zwischen Sicherheitshülle und der Oberseite des oberen Kollimatorblocks.

Die Skizze in Abbildung 1 zeigt einen Abschnitt des Zentralrohres in dem mit D₂O gefüllten Moderatortank. In diesem sind oben der beschädigte Targetbehälter und die beschädigte Sicherheitshülle dargestellt ohne deren genaue Formen wiederzugeben. Darunter sind der obere und der mittlere Kollimatorblock angedeutet. Der Innendurchmesser des Zentralrohres beträgt 220 mm, die Höhe des dargestellten Bereiches gut 2 m. Detaillierte Angaben über die Anlage, die teilweise bei der Modellierung verwendet wurden, sind im Anhang A zusammengestellt. Dieser zeigt den letzten Kenntnisstand. Die Modellierung beruht zum Teil auf vorläufigen Informationen.

Im Target stehen insgesamt 80 l PbBi zur Verfügung. Es wird weiterhin angenommen, daß das Volumen von D₂O, das austreten kann, durch Ventile auf 7.5 l begrenzt wird.

Der hier behandelte Fall deckt auch in sehr konservativer Weise die Anfangsphase eines D₂O-Lecks aus der Sicherheitshülle in den Isolierspalt ab, weil auch im vorliegenden Fall D₂O in diesen Bereich eindringt und seine thermische Wechselwirkung mit dem in diesen Bereich ausgetretenen PbBi auf jeden Fall intensiver ist als mit der festen Oberfläche des Targetbehälters (und Kondensation an der Sicherheitshülle nicht beschrieben wird - siehe unten).

3. Das Rechenwerkzeug

Für die Berechnungen wird das transiente thermo- und fluiddynamische Rechenprogramm MATTINA benutzt, das am Forschungszentrum Karlsruhe entwickelt wird zur Beschreibung von Dampfexplosionen bei schweren Unfällen von Kernreaktoren (thermische Wechselwirkung von Kernschmelze mit Kühlwasser). MATTINA ist eine Weiterentwicklung des Rechenprogramms IVA-KA [4]. Das Programm benutzt die Multifluidtechnik um die individuellen (interpenetrierenden) Strömungen von drei Fluiden (drei 'Phasen') und ihre mechanische und thermische Wechselwirkung zu beschreiben. Die drei Fluide sind:

- Gas (Dampf und/oder Luft)
- Wasser (flüssig)

- 'Schmelze' (eine nicht verdampfende Flüssigkeit, die auch in Form von Partikeln erstarren kann).

Wärme und Impuls werden zwischen allen drei Fluiden ausgetauscht, Masse zwischen Gas und Wasser (Verdampfung / Kondensation). Die drei Fluide haben lokal denselben Druck. Es wird kein thermodynamisches Gleichgewicht angenommen. Nur die Austauschprozesse treiben das System in Richtung desselben. Wärmeaustausch mit der Umgebung kann nicht modelliert werden. Zwecks Auswahl der richtigen Austauschterme und -modelle werden der Strömung lokal (in jeder Rechenzelle) Strömungsregime zugeordnet. Dabei wird immer disperse Strömung angenommen. (Ein Fluid ist kontinuierlich; falls weitere Fluide anwesend sind, sind diese in dispergierter Form über das gesamte Volumen verteilt.)

Ein Rechenwerkzeug wie MATTINA beschreibt die zeitliche Entwicklung von Mittelwerten der physikalischen Größen in den jeweils angenommenen Maschen des Rechnernetzes. Darüber hinaus sind auch die Wechselwirkungsmodelle so ausgelegt, daß sie ein 'mittleres' Verhalten der Stoffe in technischen Systemen beschreiben. So wird z. B. bei den Verdampfungsmodellen immer angenommen, daß Siedekeime in ausreichender Zahl vorhanden sind. Daher wird etwa Siedeverzug, der in Laborexperimenten relativ häufig (aber nicht deterministisch) auftritt, nicht modelliert. Er dürfte aber auch bei der vorliegenden Fragestellung keine wesentliche Rolle spielen. Zum einen sind die davon betroffenen Wassermassen meistens sehr klein (im mikroskopischen Maßstab), so daß von der schlagartigen Verdampfung dieser Wassermassen, die oft ein Hammerschlägen ähnelndes Geräusch erzeugen, zwar diese akustische Wirkung, aber kaum wesentliche mechanische Wirkungen ausgehen. Zum zweiten kann man davon ausgehen, daß in der hier zu untersuchenden Situation ein dampffreier Einschluß von Wassertröpfchen in das Flüssigmetall praktisch ausgeschlossen werden kann.

Entsprechend seiner Zweckbestimmung ist MATTINA für wesentlich höhere Drücke und Temperaturen geschrieben worden als sie im vorliegenden Fall auftreten. Insbesondere sind die Zustandsdaten für Wasser und Dampf im Druck so nach unten begrenzt, daß als Anfangsdruck statt des Vakuums im Zentralrohr 1000 Pa (10 mbar) angenommen werden müssen.

4. Die Modellierung (Basisfall)

Für die Simulation wird Zylindersymmetrie angenommen. Undurchlässige technische Strukturen innerhalb des Rechengebietes werden durch Annahme der Permeabilität Null auf Zellgrenzen dargestellt. Die runden Formen von Targetbehälter und Sicherheitshülle müssen also durch Stufenfunktionen angenähert werden (vgl. Abb. 2 weiter unten). Feine Details (wie z. B. die genaue Form der Sicherheitshülle) sind daher nicht darstellbar. Ebenso sind die Wanddicken der realen Rohre zu gering um jeweils eine ganze Masche des Rechnernetzes in die Wände zu legen. Deshalb wurden Maschengrenzen jeweils auf die Innenseiten der senkrechten Rohre gelegt. So ergeben sich zu große Querschnitte der Spalte zwischen den Rohren. Um dies auszugleichen wurden in diesen Bereichen den quer verlaufenden Zellwänden entsprechende Permeabilitäten und den Zellen selber Porositäten mit demselben Wert zugeordnet. So können die Strömungsquerschnitte und -volumina in etwa richtig wiedergegeben werden.

In größtmöglichem Detail simuliert wird der Raum innerhalb des Zentralrohres von der Oberseite des oberen Kollimatorblocks (Höhe $z = 0.0$ m) bis zur Höhe 2.76 m. Dies bedeutet, daß etwa die unteren 2 m von Targetbehälter und Sicherheitshülle im Rechengbiet enthalten sind

Die Abbildung 2 zeigt einen Ausschnitt aus dem verwendete Rechennetz sowie die anfängliche Materialverteilung im zentralen Bereich des Rechengbietes. Geschlossene Wände (Permeabilität Null) sind durch dickere Linien gekennzeichnet. Das Plotprogramm versucht auch, Permeabilitäten zwischen 0.0 und 1.0 durch teilweise verdickte Linien in etwa richtig darzustellen.

Innerhalb der einzelnen Maschen des Rechennetzes sind die Volumenfraktionen der drei Fluide dargestellt: die Schmelze mit Kreuzschraffur, das Wasser mit Schraffur und das Gas durch eine weiße Fläche. Die drei Fluide werden in jeder Masche immer in dieser Reihenfolge von unten nach oben dargestellt.

Die senkrechten Wände (Rohre) beim Radius 1 cm in der zweiten und fünften Masche von unten haben nichts mit der realen Geometrie zu tun. Sie dienen dazu, die Rechnung numerisch zu stabilisieren. Ebenso dienen die teilweisen Versperrungen rechts unten im Isolierspalt (vierte Maschenreihe von unten) dazu, zu hohe Aufpralldrücke in der Ecke zu vermeiden, wenn das PbBi dort mit hoher radialer Geschwindigkeit auftrifft.

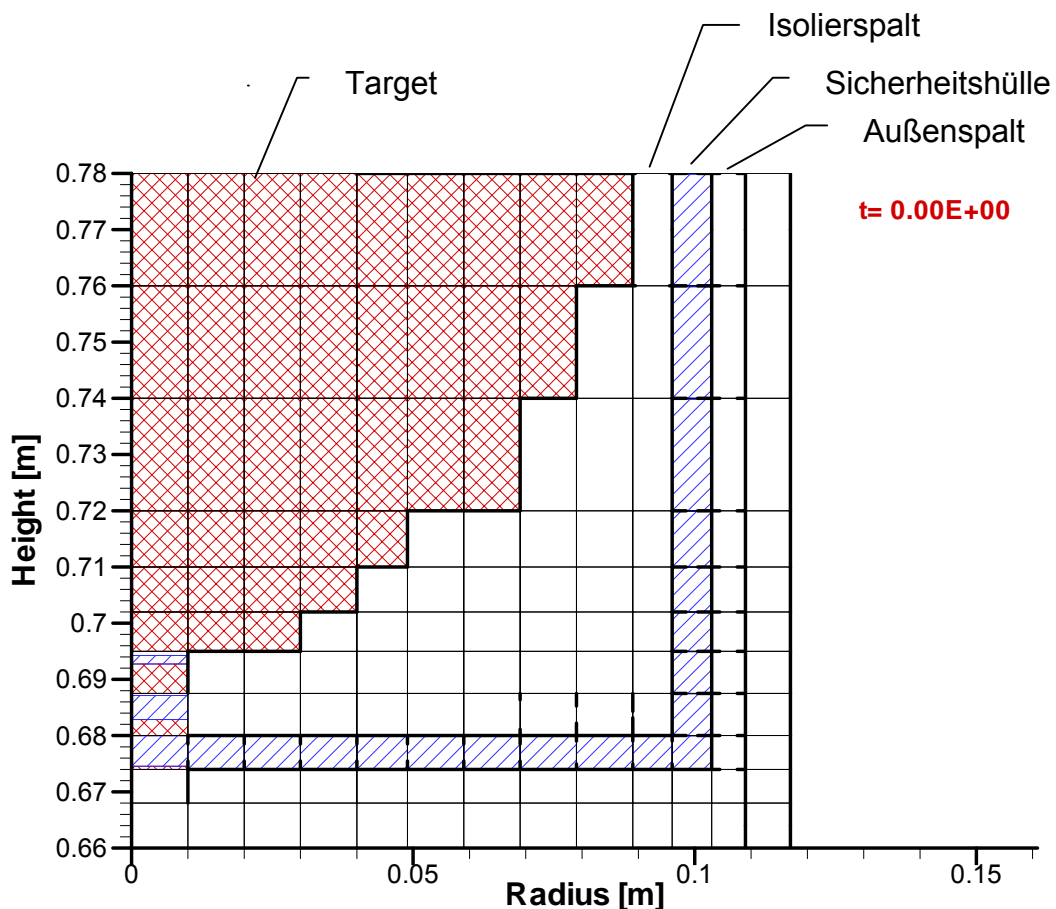


Abbildung 2: Maschennetz und anfängliche Materialverteilung im unteren Teil der defekten Strukturen. (Kreuzschraffur = PbBi, Schraffur = D₂O)

Der Zufluß von PbBi und D₂O von oben wird durch entsprechende Randbedingungen am oberen Rand des Rechengebietes kontrolliert, insbesondere durch Druckrandbedingungen. Diese sind so gewählt, daß der Druck am Leck 0.5 MPa (5 bar) für das PbBi (Randbedingung: 0.29 MPa) und 0.55 MPa (5.5 bar) für das D₂O (Randbedingung: etwa 0.53 MPa) beträgt. In konservativer Weise werden diese Bedingungen anfänglich konstant gehalten. Dabei ist der Druck des PbBi zum größten Teil sein eigener hydrostatischer Druck, der mit dem Ausfließen sofort beginnt abzunehmen. Auch der Druck des Deckgases, für den hier konservativ der höchstmögliche Wert von 0.9 bar angenommen wurde, würde sich durch die Expansion schnell verringern (Anfangsvolumen des Deckgases nur 2 l). Beim D₂O beträgt der Druck an der Leckstelle vor dem Versagen etwa 0.65 MPa (6.5 bar). Es wird aber (entsprechend der axialen Symmetrie) angenommen, daß das Wasser auf dem gesamten Umfang des Lecks (durch einen 3 mm hohen Spalt) ausfließt. Stromab vom Leck (von dem zu kühlenden Bereich) ist der Druck aber nach der Öffnung des Lecks sicher geringer, so daß die hier berechnete Leckrate des D₂O konservativ ist.

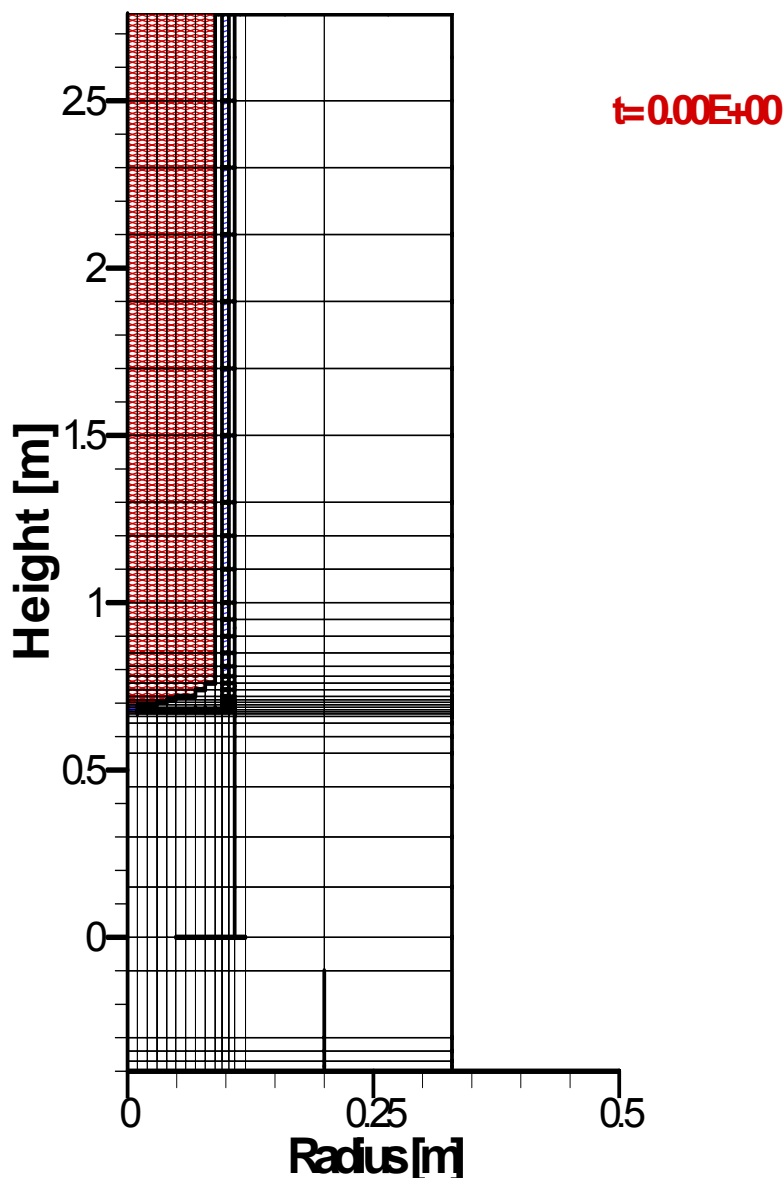


Abbildung 3: Maschennetz und anfängliche Materialverteilung für den Basisfall. (Man beachte die unterschiedlichen Maßstäbe.)

Auch das Abströmen von Wasserdampf im Strahlrohr könnte mit Hilfe von Randbedingungen modelliert werden. Es erhebt sich dann allerdings die Frage, ob die Aufnahmefähigkeit von Teilen des Vakuumsystems dabei nicht (in nicht konservativer Weise) überschätzt würde. Deshalb werden die zusätzlich verfügbaren Volumina durch abgeschlossene (endliche) Volumina innerhalb des Rechengebietes simuliert. Durch die oben beschriebene Begrenzung des Rechengebietes auf die Höhe von 2.76 m ergibt sich, daß die Höhe der Spalte zwischen Targetbehälter und Sicherheitshülle bzw. zwischen dieser und dem zentralen Rohr auf rund 2 m begrenzt ist. Damit werden diese Volumina kleiner als in der Realität, also konservativ simuliert. Andererseits ist die Weite des Isolierspalts mit 6 mm möglicherweise zu groß angesetzt. Weiter unten wird gezeigt, daß dies keine nicht konservativen Folgen hat.

Das freie Volumen im Kollimator und weiter unten im Strahlrohr wird durch ein großes zusätzliches Volumen simuliert. Dazu wird das Rechengebiet axial unterhalb der Oberseite des oberen Kollimatorblocks ausgedehnt bis zur Höhe $z = -0.4$ m und radial bis zu dem Radius 0.33 m (vgl. Abb. 3). Das so erhaltene freie Volumen beträgt etwa 1 m^3 . Das sind etwa 10 % zu viel. Dies sollte aber wenig ausmachen. In der realen Anordnung würden PbBi und D_2O etwa 11 m senkrecht hinab fließen und dann in einem Auffangbehälter gesammelt werden. Um aber das Rechengebiet axial nicht zu sehr auszudehnen, wird hier der Auffangbehälter bereits 0.4 m unterhalb der Oberseite des Kollimators angenommen. Dies führt zu einer Überschätzung der thermischen Wechselwirkung von PbBi und D_2O und damit des Druckaufbaus, da die Ansammlung von PbBi und D_2O in demselben Volumen immer zu einer intensiven Wechselwirkung führt und hier sehr viel früher und wahrscheinlich auch vollständiger erfolgt als dies in der realen Geometrie der Fall wäre. Um die Modellierung noch weiter in konservativer Richtung zu optimieren, wurde unterhalb der Öffnung im Kollimator ein Behälter mit dem Radius 0.2 m angenommen, in dem sich PbBi und D_2O , die aus dem Bereich oberhalb des oberen Kollimatorblocks abfließen, ansammeln.

Um die numerischen Schwierigkeiten in der hoch transienten Anfangsphase der Rechnung etwas abzumildern, wurde angenommen, daß die äußere Schale der Sicherheitshülle zunächst noch intakt ist und erst nach 0.01 sec versagt (im Zeitraum 0.010...0.015 sec steigt die Permeabilität von 0 auf 1). Außerdem wurde eine Anfangsgeschwindigkeit des D_2O hin zum Leck sowie bereits eine teilweise Vermischung der beiden Flüssigkeiten auf der Achse zwischen den Lecks angenommen (vgl. Abb. 2).

Die Temperaturen von PbBi und D_2O werden am Anfang und bei dem was zufließt als $270 \text{ }^\circ\text{C}$ (543 K) bzw. $40 \text{ }^\circ\text{C}$ (313 K) angenommen.

5. Beschreibung und Diskussion der Ergebnisse (Basisfall, Anfangsphase)

a) Materialbewegungen

Wieviel PbBi und D_2O aus den Lecks austreten, hängt im wesentlichen von der Größe der Lecks und den Druckverhältnissen ab. Nach den anfänglichen Transienten sind die Austrittsraten praktisch konstant bei 20.8 kg/sec (2.0 l/sec) für das PbBi und 2.9 kg/sec (2.9 l/sec) für das D_2O . Das D_2O , das mit hoher radialer Geschwindigkeit (15 m/sec) aus der Sicherheitshülle austritt, bildet bis zu einem gewissen Grad eine Sperre für das PbBi. Das bewirkt, daß zunächst nur ein Teilstrom von etwa 8 kg/sec nach unten in das Zentralrohr durchdringt. Der größere Teil des PbBi

(13 kg/sec) verbleibt im Isolierspalt. Beim D_2O sind die Verhältnisse umgekehrt. Der größte Teil fließt nach unten in das Zentralrohr. Nur ein Anteil von etwa 0.1 kg/sec bewegt sich (nach der vollständigen Öffnung der Sicherheitshülle) nach oben. Durch die deutliche Zunahme des Druckes im Isolierspalt etwa ab 0.5 sec (siehe unten) wird die Verteilung der Anteile allmählich mehr in Richtung Zentralrohr verschoben.

b) Druck im Zentralrohr (vgl. Abbildung 4)

Das D_2O , das in das Vakuumsystem eindringt, weist einen Dampfdruck von etwa 7400 Pa (74 mbar) auf. Es verdampft daher von Anfang an und kühlt sich dabei ab. Dadurch steigt der Druck zunächst schnell an. Nach 0.04 sec sind oberhalb des Kollimators etwa 3000 Pa (30 mbar) erreicht. Von da an steigt der Druck sehr viel langsamer und erreicht erst nach 0.9 sec 7000 Pa (70 mbar). In dem großen Volumen, das den Rest des Vakuumsystems repräsentiert, steigt der Druck zunächst noch viel langsamer an. Aber etwa von 0.9 sec an herrscht Druckgleichgewicht. Von da an steigt der Druck auf Grund von Wärmeübertragung vom PbBi an das D_2O langsam weiter an. Dieser Effekt ist anfänglich gering, da auf Grund der thermischen Wechselwirkung in dem Freistrah aus PbBi und D_2O , der sich unter dem Leck in der Sicherheitshülle ausbildet, das D_2O und ein Teil des PbBi seitlich beschleunigt, also versprüht werden. Dabei werden die Tropfen auf Grund ihrer unterschiedlichen Dichte auch noch räumlich getrennt (das D_2O hat eine höhere radiale Geschwindigkeit). Erst im Laufe der Zeit entstehen seitlich an der Wand des Zentralrohres und unten auf dem oberen Kollimatorblock Bereiche, in denen eines der Fluide (meistens das D_2O) kontinuierlich ist (und die Tropfen/Blasen der anderen Fluide umhüllt) und eine effektivere Wärmeübertragung stattfindet. So steigt der Druck etwa ab 1.6 sec etwas schneller an. Trotzdem werden im Gasraum nach 2.0 sec erst gut 10000 Pa (0.1 bar) und nach 10 sec 63000 Pa (0.63 bar) erreicht.

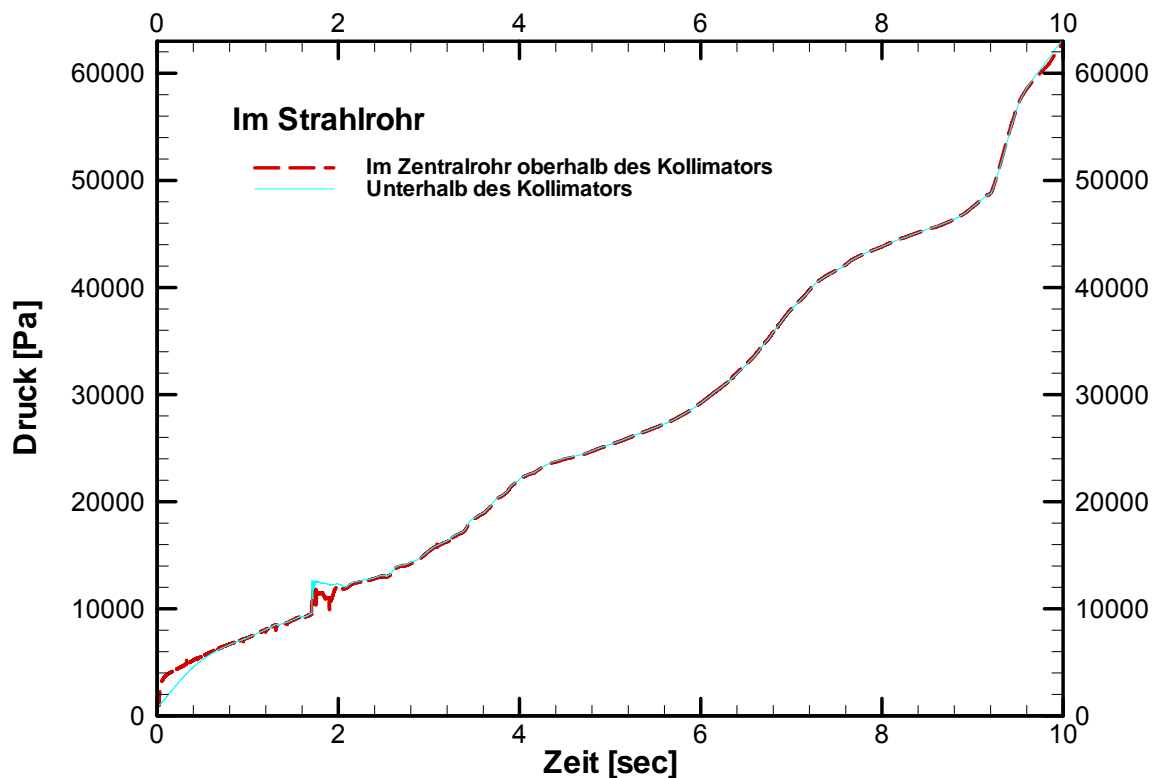


Abbildung 4: Druck-Zeit-Verlauf im Strahlrohr

Nach etwa 1.6 sec findet in dem (konservativ angenommenen) Behälter knapp unterhalb des oberen Kollimatorblocks eine etwas heftigere Verdampfung statt, durch die der Druck praktisch schlagartig um etwa 2000 Pa (20 mbar) ansteigt. (Es ist typisch für die hier vorliegenden Verhältnisse, bei denen große freie Volumina zur Verfügung stehen, daß dabei keine ausgeprägte Druckspitze, sondern nur eine Art Stufe entsteht.) Dieses Ereignis wird dadurch ausgelöst, daß sich zunächst auf der Oberfläche des oberen Kollimatorblocks eine größere Wassermenge ansammelt (das meiste davon ist an der Wand des Zentralrohres herabgeflossen), schwallartig durch die Öffnung im oberen Kollimatorblock abfließt und auf PbBi trifft, das vorher praktisch in freiem Fall diese Öffnung passiert hatte.

Das wesentliche Ergebnis der Rechnung ist, daß keine Drucktransienten auftreten mit Spitzendrücken, die mechanische Schäden anrichten könnten und einer Dauer, die sie mechanisch wirksam werden lassen könnte. (In einzelnen Rechenzellen, die weitgehend mit Flüssigkeiten aufgefüllt sind, treten in der Rechnung hohe Druckspitzen auf. Diese sind aber auf numerische Effekte zurückzuführen und dauern nur wenige Mikrosekunden.) Vielmehr beobachten wir eine nahezu quasistationäre Druckentwicklung, bei der die Drücke in den einzelnen Teilvolumina des Systems stark miteinander gekoppelt sind.

c) Druck im Isolierspalt (vgl. Abbildung 5)

Auf Grund des geringeren freien Volumens steigt der Druck hier schneller an als im Zentralrohr und erreicht knapp 7000 Pa (70 mbar) bereits nach 0.02 sec. Auch danach steigt er auf Grund der intensiveren thermischen Wechselwirkung schnell weiter an, so daß bereits nach 2.0 sec fast 0.15 MPa (1.5 bar) Gasdruck erreicht

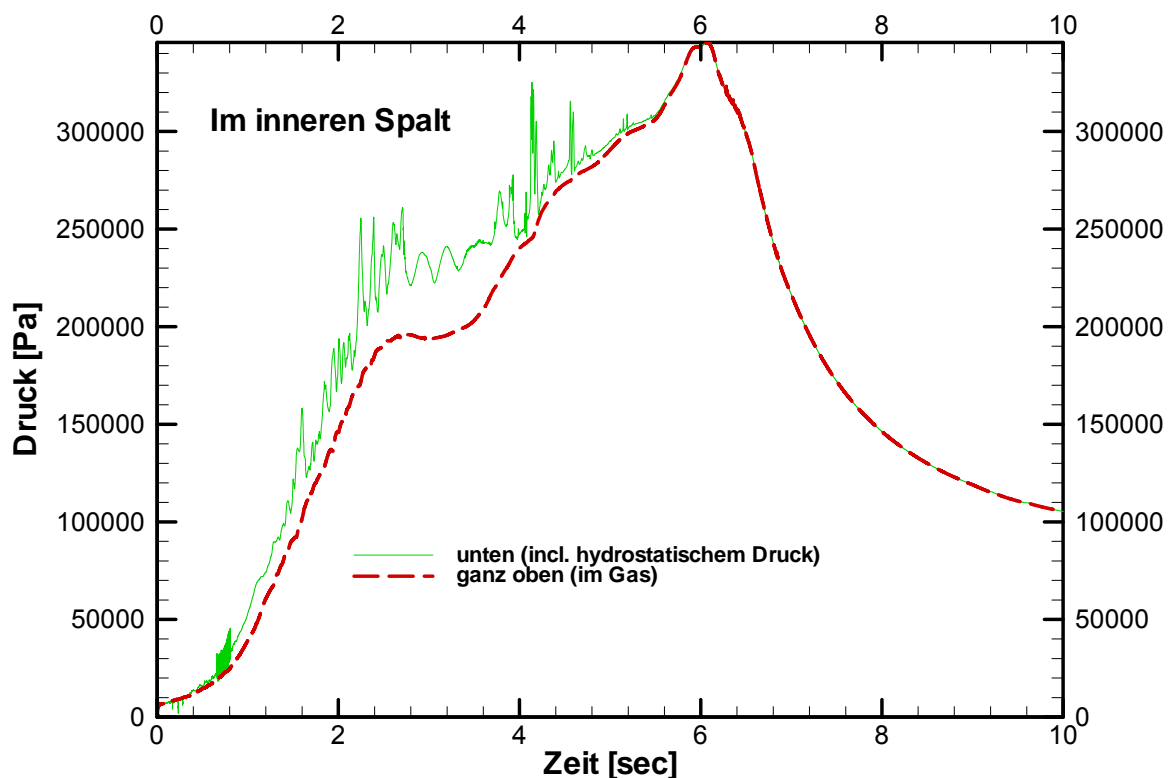


Abbildung 5: Druck-Zeit-Verlauf im Isolierspalt

werden. Zusammen mit dem hydrostatischen Druck der Flüssigkeiten werden fast 0.18 MPa (1.8 bar) erreicht.

Es wird diskutiert, im Isolierspalt einen Gasdruck von 1000...3000 Pa (10...30 mbar) einzustellen. Hier wurden nur 1000 Pa (10 mbar) angenommen. Sollte der Druck im Anfangszustand tatsächlich höher sein, würde er entweder beim Versagen der Sicherheitshülle in das Zentralrohr hinein entlastet oder die Druckdifferenz zu 1000 Pa (10 mbar) wäre zu den hier berechneten Drücken hinzuzuaddieren.

Natürlich gibt es auch hier Unsicherheiten bei der Berechnung des Druckes. Davon ist aber der Maximaldruck in der Anfangsphase, in der unterhalb der Sicherheitshülle noch ein großes Volumen zur Verfügung steht und das PbBi aus dem Targetbehälter frei ausströmt, so gut wie gar nicht betroffen. Der Druck im Isolierspalt wird begrenzt durch den Druck des fließenden PbBi in dem Leck in der Sicherheitshülle und dieser ist, da in dieser Phase (laut Rechnung) keine höheren Dampfdrücke auftreten, auf einen Wert deutlich unterhalb des Druckes im Targetbehälter beschränkt. Deshalb ist auch die Annahme über die Größe des Volumens im Isolierspalt letztendlich nicht wesentlich. Sie beeinflusst höchstens etwas den zeitlichen Verlauf des Druckanstieges.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die Drücke innerhalb der defekten Strukturen in dem Bereich bleiben, der während des Betriebes in Targetbehälter und Sicherheitshülle vorgesehen ist. Im Zentralrohr wird innerhalb von 10 sec deutlich weniger als 0.1 MPa (ein Bar) erreicht. Das heißt, die Drücke sind unerheblich - selbst wenn man für mögliche Unsicherheiten der Rechnung einen Faktor zwei in Betracht zieht.

6. Diskussion des Lanzeitverhaltens (Basisfall)

Die Modellierung des Basisfalles war zunächst vorgesehen um die eigentlich kritischen ersten zwei Sekunden zu untersuchen. Um jedoch auch eine möglichst realistische Vorstellung von der weiteren Entwicklung zu gewinnen, wurde die Rechnung bis 10 sec ausgedehnt. Dabei muß man natürlich die Grenzen des Rechenmodells (z. B. kein Wärmeaustausch mit der Umgebung) und der hier verwendeten Modellierung berücksichtigen. Insbesondere ist es pessimistisch, den Druck im PbBi im Targetbehälter konstant zu halten. Deshalb wurde die Druckrandbedingung für das PbBi in relativ grober Weise bei 2, 3, 4, 5, 6, 7 und 9 Sekunden an die bereits ausgeströmte Menge angepaßt. Die Zufuhr von D₂O wurde nach 2.7 sec beendet als 7.5 ℓ ausgeströmt waren. Dazu wurde die Zellwand am unteren Ende des senkrechten Teils (des Modells) der Sicherheitshülle innerhalb von 10 msec 'zugefahren'. Für den Zeitraum jenseits von 10 sec wurden thermodynamische Abschätzungen vorgenommen und qualitative Überlegungen angestellt, die teilweise durch weitergeführte Rechnungen unterstützt wurden.

Für den weiteren Ablauf der Wechselwirkung sind zunächst die Vorgänge im Isolierspalt von Interesse (vgl. Abb. 5): Der Gasdruck steigt dort relativ steil an, bis nach 2.7 sec der Zufluß des Wassers endet. Er steigt sogar danach noch einmal kräftig an, auf etwa 0.35 MPa (3.5 bar). Aber schon der Druck von gut 0.2 MPa (2 bar) bewirkt, daß das PbBi, das den freien Raum unten im Isolierspalt im wesentlichen ausgefüllt hat, nach unten (in das Zentralrohr) ausgetrieben wird. Dies erkennt

man daran, daß der Druck unten im Isolierspalt sich immer mehr dem im Gasraum annähert. Nach etwa 5.5 sec ist praktisch alles PbBi verschwunden und es erfolgt ein Ausblasen auch des D₂O, das sich im Isolierspalt angesammelt hatte. Danach, etwa ab 6 sec, fällt auch der Gasdruck im Isolierspalt bis er dem dynamischen Druck in dem PbBi- Strahl entspricht. Ab dieser Zeit verbleiben nur ganz geringe Mengen von D₂O im Isolierspalt.

In diesem Zeitraum sammeln sich praktisch alle Flüssigkeiten an dem tiefsten Punkt der Anlage - in der Realität wäre das der Sammelbehälter für das PbBi, im hier verwendeten numerischen Modell die Kammer unterhalb der Öffnung im oberen Kollimatorblock. Auf Grund der unterschiedlichen Dichte separieren sich PbBi und D₂O teilweise von einander, aber das weiterhin von oben nachströmende PbBi bewirkt ständig auch wieder eine Durchmischung der beiden Flüssigkeiten. Daher steigt die Wassertemperatur allmählich an und mit ihr der Druck im Strahlrohr.

Das Ausfließen des PbBi wird insgesamt etwa 50 sec dauern und wenn man von dem bei 10 sec in der Modellrechnung erreichten Zustand einfach linear auf 50 sec extrapoliert, erreicht man etwa 0.5 MPa (5 bar). Tatsächlich können langfristig Drücke über etwa 0.65 MPa (6.5 bar) nicht auftreten, weil ein vollständiger Temperaturengleich zwischen PbBi und D₂O zu einer Temperatur von nur etwa 435 K führt. Dabei spielt die im Vergleich zum Wasser sehr geringe spezifische Wärme des Flüssigmetalls eine ganz entscheidende Rolle. In der Abschätzung wurde ein Gesamtvolumen von 1.3 m³ angenommen. Dies reicht nicht aus, alles D₂O verdampfen zu lassen. Das tatsächlich erreichte Druckniveau wird noch wesentlich niedriger sein, da

- a) ein vollkommener Temperaturengleich schwer vorstellbar ist,
- b) das PbBi Wärme an die Umgebung (Strahlrohr, Kollimator und Auffangbehälter) verliert und
- c) ein wesentlicher Teil des Dampfes an den kalten Wänden des Strahlrohres und des Kollimators (Temperatur bei beiden etwa 50 °C) kondensieren wird.

Von daher ist zu erwarten, daß der Druck im Strahlrohr (einschließlich dem Zenralrohr) auch unter Berücksichtigung aller Unsicherheiten ein Niveau von wenigen Bar (< 0.5 MPa) nicht überschreiten wird.

Für das Langzeitverhalten des Störfalles 'Einbruch von D₂O in den Isolierspalt' bleibt anzumerken, daß dort wegen des wesentlich geringeren freien Volumens langfristig ein höherer Druckanstieg nicht auszuschließen ist. Zunächst wird D₂O am Targetbehälter verdampfen und an der Sicherheitshülle kondensieren. Dabei wird diese aber samt dem eventuell noch enthaltenen D₂O aufgeheizt. Wenn der Druck im Isolierspalt 0.5...0.6 MPa (5...6 bar) erreicht, ist der Kühlkreislauf der Sicherheitshülle sicher schon an beiden Zuführungen abgesperrt, so daß dieser nicht als Entlastungsweg zur Verfügung steht. Angesichts der hohen Temperatur des Targets ist aber ein Druckanstieg selbst über 2 MP (20 bar) hinaus nicht auszuschließen. Es erscheint daher erforderlich, den Druck im Isolierspalt durch ein Entlastungsventil zu begrenzen.

7. Diskussion von konservativ abdeckenden Fällen

Um Unsicherheiten bei der Definition des Störfalles konservativ abzudecken, wurden neben dem bisher diskutierten Basisfall auch zusätzlich erschwerte Fälle untersucht: ein 'schwerer' Fall, bei dem erschwerend angenommen wurde, daß die Öffnung in dem oberen Kollimatorblock und der Ringspalt (1 mm) an seiner Außenseite durch Bruchstücke von Targetbehälter oder Sicherheitshülle vollkommen verschlossen sind, sowie ein 'halbschwerer' Fall, bei dem ein kompletter Verschuß des mittleren Kollimatorblocks angenommen wurde. Dabei muß bedacht werden, daß ein Verschuß der Öffnung in dem oberen Kollimatorblock durch konstruktive Maßnahmen mit Sicherheit verhindert werden kann [3]. Dieser Fall kann also ausgeschlossen werden. Bei dem mittleren Kollimatorblock ist eine solche Maßnahme nicht möglich, aber ein vollständiger Verschuß ist trotzdem extrem unwahrscheinlich, weil neben der (etwas kleineren) Öffnung für den Strahl auch ein Ringspalt von 11.5 mm Weite zwischen Kollimatorblock und Zentralrohr als Strömungsweg zur Verfügung steht [3].

Das freie Volumen unterhalb der Sicherheitshülle beträgt im 'schweren' Fall knapp 26 l, im 'halbschweren' Fall 72 l [3]. Dies bedeutet, daß in beiden Fällen nicht alles PbBi aus dem Targetbehälter ausfließen kann. Rein geometrisch betrachtet bleibt es im 'schweren' Fall noch fast 1.5 m hoch im Targetbehälter stehen, im 'halbschweren' Fall immer noch gut 0.2 m. Man muß aber auch bedenken, daß die Gasvolumina im Targetbehälter (anfänglich das Deckgas) und im Isolierspalt (Isolationsgas) über den Leckbereich miteinander kommunizieren. Es wird sich also im Leckbereich ein Druckausgleich zwischen diesen beiden Volumina einstellen. Dabei kommt im Targetbehälter der hydrostatische Druck des PbBi zu dem Druck des Deckgases (und möglicherweise einem Dampfdruck) hinzu, im Isolierspalt addieren sich zu dem Gasdruck die hydrostatischen Drücke von PbBi und eventuell D₂O. Dadurch werden die freien Oberflächen des PbBi sich in diesen beiden Volumina auf unterschiedlichen Niveaus befinden. Der Außenspalt zwischen Sicherheitshülle und Zentralrohr wird im wesentlichen mit D₂O aufgefüllt werden. Wegen der intensiven Kühlung durch das Zentralrohr wird es dort keinen Dampf geben.

Die Modellierung der beiden konservativ verschärften Fälle unterscheidet sich in einigen Punkten von der des Basisfalles (die Durchführung von Rechnungen mit leicht variierten Bedingungen gibt auch Hinweise darauf, wie 'stabil' ein Rechenergebnis ist, - hier offenbar sehr gut):

1. Der Targetbehälter wird in seiner ganzen Höhe einschließlich des Deckgasvolumens modelliert (3.93 m).
2. Auch die radiale Unterteilung des PbBi in ihm durch die Strömungsschürze wird beschrieben. Da das (eigentlich zuströmende) PbBi außen nicht im Kontakt mit dem Deckgas steht, wurde hilfsweise eine Öffnung oben in der Strömungsschürze angenommen, damit auch dieses PbBi nach unten abfließen kann. Die innere PbBi-Säule hat eine Höhe von 3.8 m, das Deckgas ein Volumen von 2 l.
3. Damit das Gesamtvolumen des PbBi 80 l beträgt, geht der Ringspalt mit dem zuströmenden PbBi nur bis zur Höhe 2.94 m. Die angenommene Geometrie samt anfänglicher Materialverteilung sind in Abbildung 6 dargestellt.

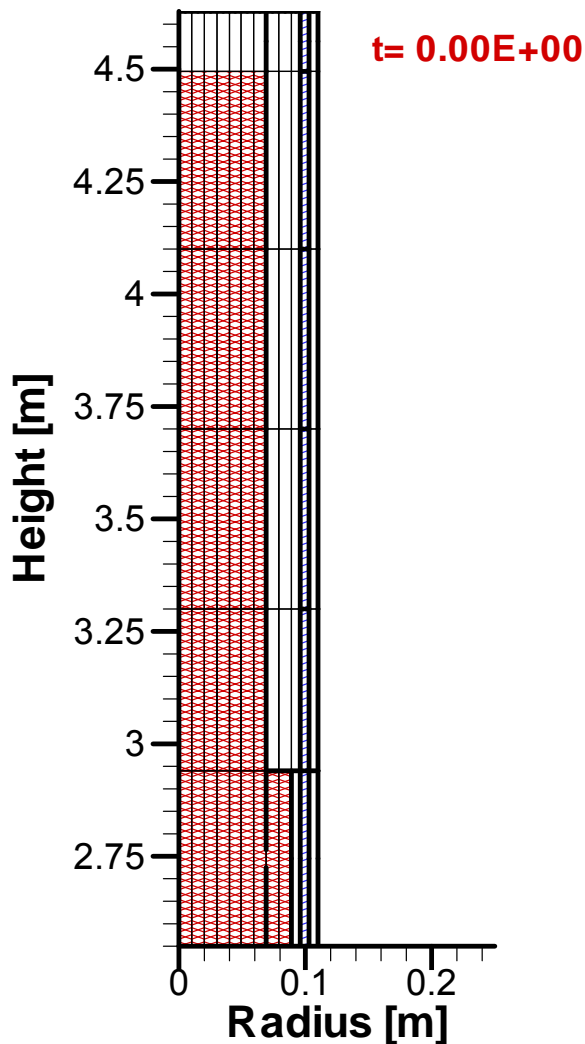


Abbildung 6: Oberer Teil von Rechenetz und Materialverteilung für die konservativ verschärften Fälle. Man beachte die in den beiden Achsenrichtungen unterschiedlichen Maßstäbe. (Kreuzschraffur = PbBi, Schraffur = D₂O)

4. Die Spalte auf beiden Seiten der Sicherheitshülle sind etwas länger, sie gehen bis zur Höhe 2.94 m.
5. Es wird auch berücksichtigt, daß die Temperaturen des PbBi in Zustrom und Abfluß unterschiedlich sind. Innen (Abfluß) wird sie mit 613 K, außen (Zustrom) mit 508 K angenommen. Dies hat zur Folge, daß die Temperatur des ausströmenden PbBi fast durchweg höher ist als im Basisfall (543 K).
6. Die Dichte des PbBi wird um 7 % erhöht, so daß sie bei 543 K 10700 kg/m³ beträgt.
7. Die geänderte Modellierung des Targets hat auch Rückwirkungen auf die anfänglichen Auflußraten von PbBi und D₂O: Bei PbBi sinkt sie auf 17.65 kg/sec oder 1.65 l/sec, dafür steigt sie beim D₂O auf fast 3.2 kg/sec oder 3.2 l/sec. Gleichzeitig ändern sich auch die Teilströme, die in den Isolierspalt gehen. Außerdem ändern sich die Zeiten, innerhalb derer die maximal verfügbaren Mengen ausströmen: Das D₂O ist bereits nach knapp 2.4 sec vollständig ausgeströmt. Das Auffüllen des verbliebenen Volumens mit PbBi dauert im 'schweren' Fall mindestens 11 sec, im 'halbschweren' Fall mehr als 40 sec.

In Folge der stark eingeschränkten freien Volumina steigen die Drücke im Zentralrohr bei den erschwerten Fällen wesentlich schneller als im Basisfall. Nach 10 sec werden so im 'schweren' Fall fast 0.35 MPa (3.5 bar) und im 'halbschweren' Fall knapp 0.3 MPa (3 bar) erreicht.

Die Abbildung 7 zeigt die Drücke im 'schweren' Fall, dem, wie beschrieben, Annahmen zu Grunde liegen, die ausgeschlossen werden können. Die Ergebnisse werden hier trotzdem präsentiert, weil sie frühzeitig und in konservativer Weise zeigen, zu welchen Komplikationen das stark begrenzte freie Volumen und das Auffüllen des Zentralrohres mit PbBi führen können. Nach 8.3 sec findet im Zentralrohr ein Verdampfungsereignis statt, das den Druck plötzlich von etwa 0.12 MPa (1.2 bar) auf gut 0.3 MPa (3 bar) anhebt. In viel schwächerer Form findet so etwas bei dem 'halbschweren' Fall zwischen 5.7 und 6.0 sec statt und auch beim Basisfall haben wir derartige Ereignisse bei 1.6 sec und (noch schwächer ausgeprägt) bei 9.2 sec beobachtet (vgl. Abb. 4). Diese Ereignisse sind typisch für die thermische Wechselwirkung zweier Flüssigkeiten, bei denen eine lokale Verdampfung sich durch Schaffung neuer Kontaktflächen (direkt von Flüssigkeit zu Flüssigkeit) selbst verstärken kann. Dies ist der Mechanismus, der zu Dampfexplosionen führen kann. Eine Dampfexplosion tritt hier jedoch nicht auf, weil zum einen der Temperaturunterschied der beiden Flüssigkeiten nicht groß genug ist und zum anderen genügend freies Volumen für eine frühzeitige Expansion (schon bei niedrigem Druck) des Dampfes zur Verfügung steht, die auch die schnelle Wärmeübertragung wieder unterbindet.

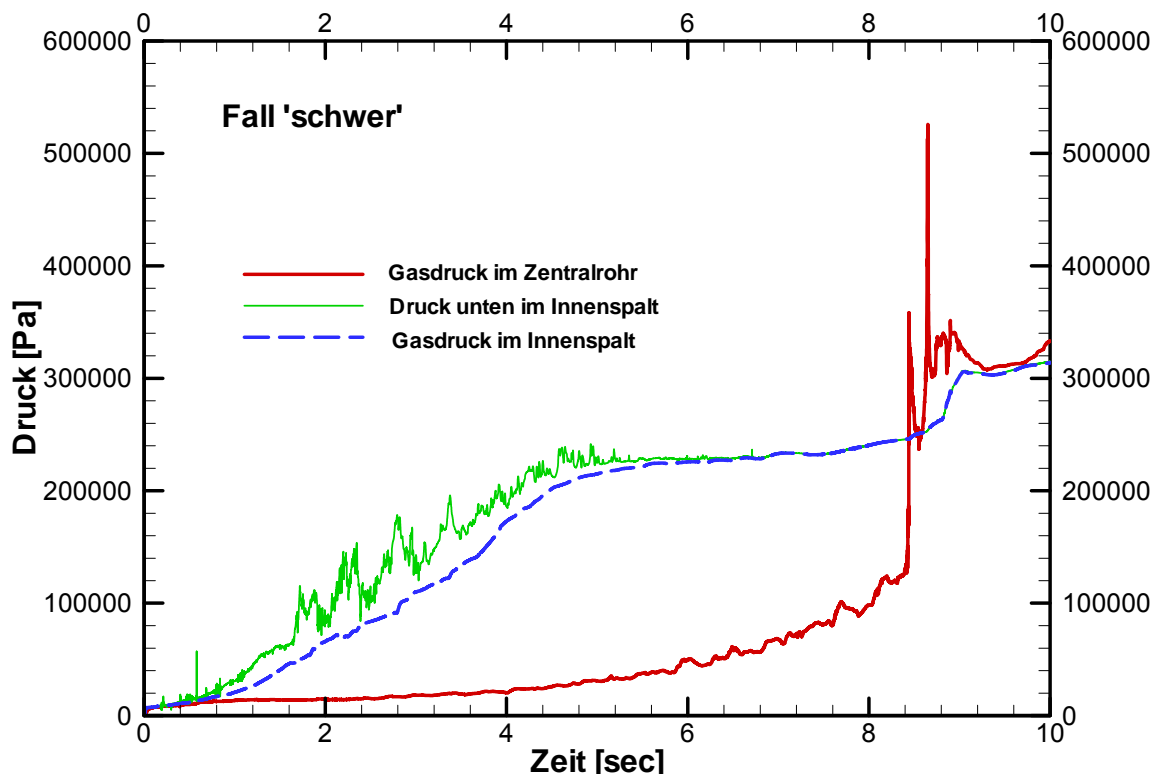


Abbildung 7: Druckentwicklung im stark konservativ verschärften 'schweren' Fall

Natürlich ist die Vorhersagegenauigkeit für derartige Ereignisse nicht sehr hoch und man muß bei dem Druckanstieg etwa mit einem Faktor zwei an Unsicherheit (in

beiden Richtungen) rechnen. Weil aber in dem 'schweren' Fall das freie Volumen schon übertrieben klein angenommen wurde, ist ein plötzlicher Anstieg um 0.2...0.3 MPa (2...3 bar) das stärkste, was unter den für MEGAPIE typischen Bedingungen erwartet werden muß. Auch in keiner der zahlreichen Parametervariationen, die im Rahmen dieser Untersuchung durchgeführt wurden, hier aber nicht beschrieben werden, trat ein größerer Druckanstieg dieser Art auf.

Für den Druck im Isolierspalt sind die Unterschiede gegenüber dem Basisfall nicht so gravierend. Hier haben sich im wesentlichen die Randbedingungen geändert. Auf Grund des geänderten Massenverhältnisses zwischen PbBi und D₂O steigt der Druck etwas langsamer an und erreicht erst nach etwa 5 sec ein Niveau von 0.2 MPa (2 bar). Dadurch und weil auch der Druck im Zentralrohr höher ist, wird nur ein kleiner Teil des PbBi wieder aus dem Isolierspalt hinausgedrückt und das in ihn eingedrungene D₂O verbleibt fast vollständig dort. Trotzdem steigt der Druck nur sehr langsam weiter an. Dies liegt daran, daß nach dem Ende der Zufuhr von D₂O eine Entmischung der beiden Flüssigkeiten stattfindet und so der Kontakt mit dem PbBi minimiert wird. Die Abbildung 7 zeigt jedoch, daß sich im 'schweren' Fall das höhere Druckniveau, das im Zentralrohr nach dem plötzlichen Anstieg bei 8.3 sec erreicht wird, auf den Isolierspalt überträgt. Im 'halbschweren' Fall, in dem sich der Druck im Isolierspalt zunächst ganz ähnlich entwickelt, werden dagegen ohne diese Störung aus dem Zentralrohr nach 10 sec nur 0.25 MPa (2.5 bar) erreicht.

Auf längere Sicht kann der Druck im Isolierspalt nicht wesentlich über dem im Zentralrohr liegen. Dies liegt daran, daß die beiden Volumina im Prinzip miteinander in Verbindung stehen und ein Druckausgleich nur durch den PbBi-Strahl behindert wird.

Man muß allerdings auch bedenken, daß die Druckentwicklung im Isolierspalt stark davon abhängt, wie groß die Lecks in der Sicherheitshülle im Vergleich zu dem im Targetbehälter sind. In den Rechnungen, über die hier berichtet wird, wurde relativ willkürlich angenommen, daß alle drei gleich groß sind. Daraus ergibt sich, daß zunächst sowohl PbBi als auch D₂O in den Isolierspalt eindringen. Falls aber das Leck in der Sicherheitshülle deutlich größer wäre als das im Targetbehälter, würde von beiden höchstens sehr wenig in dieses Volumen gelangen und sein Druck wäre dem des Zentralrohres im wesentlichen gleich. Falls das Loch in der äußeren Schale der Sicherheitshülle größer wäre als das in der inneren Schale, würde praktisch auch kein Wasser nach oben in den Isolierspalt gelangen und der Gasdruck dort bliebe sehr gering. So ist der Gasdruck im Isolierspalt relativ unsicher. Er ist aber klar nach oben begrenzt dadurch, daß ein hoher Druck dazu führt, daß PbBi und D₂O aus ihm hinausgedrückt werden. (Dieser Prozeß setzt um so früher ein, je früher der Zustrom des D₂O endet.) Daher scheinen die 0.35 MPa (3.5 bar), die im Basisfall nach 6 sec erreicht werden, in etwa die obere Grenze darzustellen.

Nur falls das Loch in der äußeren Schale der Sicherheitshülle kleiner wäre als die Löcher in der inneren Schale und im Targetbehälter, würden sich größere Mengen beider Flüssigkeiten zunächst im Isolierspalt ansammeln. Der Gasdruck würde sich etwa ähnlich wie im Basisfall entwickeln, da aber ein deutlich größerer hydrostatischer Druck dazukäme, würde die weitere Zufuhr von PbBi und D₂O bald unterbunden oder die Öffnung in der äußeren Schale der Sicherheitshülle vergrößert und der Druck dann wieder abgebaut.

Ein besonderes Problem kann auftreten, falls die fortschreitende Entleerung des Targetbehälters bei gleichzeitigem starkem Anstieg des Druckes im Zentralrohr (der nur bei einer Blockade des Kollimators möglich ist) dazu führt, daß sich am Leck des Targetbehälters ein Druckgleichgewicht einstellt und der Strom des PbBi zum Stillstand kommt. Falls sich in dieser Situation noch D₂O im Isolierspalt befindet (oder noch etwas D₂O verzögert aus der defekten Sicherheitshülle austritt), können lokale Druckschwankungen dazu führen, daß D₂O in den Targetbehälter hineingedrückt wird und dann dort auf Grund seiner geringeren Dichte aufsteigt. Dabei wird es aufgeheizt und verdampft und führt so zu einem Druckanstieg im Deckgas des Targetbehälters. Bei den hier durchgeführten Rechnungen trat ein solches Ereignis im 'schweren' Fall nach etwa 12 sec auf und führte zu Druckspitzen (im Deckgas) von etwa 12 bar und einem über Sekunden anhaltenden Druck mit einem Maximum von knapp 11 bar. Dieser hohe Druck führte zu einem erneuten und beschleunigten Ausfließen des PbBi was zunächst einen Druckabfall zur Folge hatte. Natürlich ist auch hier die Vorhersagesicherheit nicht sehr hoch einzuschätzen, so daß transient mit bis zu 20 bar zu rechnen ist. (Dies gilt für beide konservativ erschwerten Fälle.)

Langfristig könnte der Druck in den erschwerten Fällen langsam weiter ansteigen, weil PbBi und D₂O in Kontakt miteinander bleiben und zunächst nur geringe Möglichkeiten zur Kondensation bestehen. Wenn sich die Oberfläche des PbBi im Zentralrohr der defekten Sicherheitshülle nähert, herrscht im System bereits ein so hoher Druck, daß der Spalt außen zwischen Sicherheitshülle und Zentralrohr ganz mit flüssigem D₂O aufgefüllt wird. Das Volumen dieses Spaltes reicht aber nicht aus um die (nach der Aufheizung) fast 8.5 l D₂O aufzunehmen und in dem Isolierspalt wird sich zunächst nur wenig D₂O befinden. Ein Teil des D₂O wird also eine Schicht zwischen PbBi und Sicherheitshülle bilden. Dabei steht es, wenn auch nicht sehr stark, im thermischen Kontakt mit dem PbBi, so daß es weiter aufgeheizt wird und sein Sättigungsdruck weiter zunimmt. Gebremst wird dieser Druckanstieg durch Wärmeverluste des D₂O an das Zentralrohr. Da diese aber nicht sehr effektiv sind, wird ein langsamer Anstieg des Sättigungsdruckes resultieren.

Gleichzeitig fließt immer noch PbBi von oben nach (eine Schichtung, bei der sich oben PbBi und unten D₂O befindet, ist hydrodynamisch instabil). Dazu muß D₂O nach oben verdrängt werden (im Gegenstrom zum PbBi), hinein in die freien Volumina im Targetbehälter und im inneren Spalt. Da das D₂O auf diesem Weg noch heißeres PbBi durchdringen muß, wird es zusätzlich aufgeheizt und der Druck in den Gasvolumina liegt vermutlich höher als der Sättigungsdruck des D₂O im Zentralrohr. Aber alle Drücke steigen langsam weiter.

Eine absolute obere Grenze für diesen Druckanstieg erhält man aus der Annahme eines Temperatenausgleichs zwischen dem gesamten PbBi und dem gesamten D₂O. Bei der geringen Größe des freien Volumens im 'halbschweren' Fall (72 l) kann natürlich nur ein kleiner Teil (etwa ein Zehntel) des D₂O verdampfen und so ergibt sich eine Ausgleichstemperatur von etwa 487 K und daraus folgt eine Obergrenze für den Druck von etwa 2 MPa (20 bar).

Aber auch dieses ist noch eine sehr pessimistische Abschätzung, weil

- a) PbBi und D₂O sich letztlich weitgehend von einander separieren und so der Wärmeübergang zwischen ihnen minimiert wird,
- b) beide viel Wärme an das Zentralrohr und den Kollimator verlieren und

- c) im Target ein Wärmetauscher für die Kondensation des (dort vorhandenen) Dampfes zur Verfügung steht. Dieser weist eine Oberfläche von ca. 2.3 m^2 und eine Oberflächentemperatur von etwa 450 K auf [3].

Von daher kann man erwarten, daß sich der Druck längerfristig im Bereich etwas über 1 MPa (10 bar) stabilisieren wird. Falls es jedoch wesentlich sein sollte, den Druck im Targetbehälter mit Sicherheit und auch in Transienten auf einen Wert unterhalb von 2 MPa (20 bar) zu begrenzen, sollte ein Sicherheitsventil am Deckgas des Targets vorgesehen werden.

Es erscheint auch möglich, den Gasdruck langfristig durch ein Sicherheitsventil am Isolierspalt zu begrenzen. Aber dessen Volumen ist sehr klein und je nachdem, wie sich der Gasdruck im Targetbehälter zu dem im Isolierspalt verhält, wird PbBi aus dem Targetbehälter in den Isolierspalt oder umgekehrt transportiert. Wenn also der Druck im Targetbehälter über den Ansprechdruck eines Ventils am Isolierspalt steigt, wird die Höhe der PbBi- (und D_2O -) Säule im Isolierspalt zunehmen, so daß der Druck im Gesamtsystem trotzdem zunimmt oder sogar D_2O oder PbBi in das Ventil eindringen und es weitgehend unwirksam machen.

Die Verhältnisse wären wesentlich übersichtlicher und es gäbe größere Wärmeverluste, wenn ein Endzustand erreicht würde, in dem sowohl das gesamte PbBi als auch das D_2O entweder durch den ganzen Kollimator hindurch nach unten abgeflossen sind (wie hier im Basisfall) oder sich wenigstens beide deutlich unterhalb der Sicherheitshülle befinden. Dann stünde die Funktionsfähigkeit eines Sicherheitsventils am Isolierspalt außer Frage. Außerdem stünden selbst in dem letzteren Fall mit dem Wärmetauscher im Target (2.3 m^2 bei 450 K) und der Wand des Zentralrohres über eine Höhe von mindestens 2 m (1.4 m^2 bei 275 K) ausreichend große Kondensationsflächen zur Verfügung. Sie würden einen langfristigen Anstieg des Druckes wesentlich über 1 MPa (10 bar) verhindern. Unabhängig davon könnten allerdings immer noch unter den erschwerten Bedingungen (d.h. wenn das PbBi den Kollimator nicht vollständig durchdringt) während der Entleerung des Targetbehälters dort über einige Sekunden hinweg auch Drücke bis etwa 2 MPa (20 bar) auftreten (s. o.).

8. Schlußfolgerungen

In der vorliegenden Arbeit wurde untersucht, welche Drücke innerhalb des Strahlrohres der Spallations-Neutronenquelle SINQ entstehen können, wenn bei dem geplanten MEGAPIE Target sowohl der Targetbehälter als auch die mit Schwerwasser gekühlte Sicherheitshülle versagen und dadurch das Schwerwasser in Kontakt mit dem heißen PbBi aus dem Target kommt. Zur Untersuchung der kurzzeitigen Phänomene wurde das transiente Drei-Phasen-Rechenprogramm MATTINA eingesetzt.

Im Ergebnis zeigt sich, daß in der Anfangsphase bis etwa 10 sec nicht mit dem Auftreten von Drücken höher als etwa 1 MPa (10 bar) gerechnet werden muß. Jedoch beginnt in den Rechnungen typischerweise nach einigen Sekunden ein in etwa gleichförmiger Druckanstieg, der nach längerer Zeit zu Drücken bis maximal 0.65 MPa (6.5 bar) führen könnte. Dieser Maximalwert folgt aus der Abschätzung eines vollständigen Temperatúrausgleichs zwischen PbBi und D_2O . Er würde durch Wärmeverluste, insbesondere durch Kondensation des Dampfes an kalten Strukturen weiter verringert werden.

Der langfristige Druckaufbau hängt ganz wesentlich davon ab, wie vollständig das Flüssigmetall und das Schwerwasser durch den Kollimator hindurch nach unten abfließen können. Am unteren Ende des senkrechten Teilstücks des Strahlrohres steht ein Auffangbehälter für das Flüssigmetall bereit und das Strahlrohr stellt jenseits des Kollimators große Volumina für den Wasserdampf sowie große Kondensationsflächen bereit. Falls das Flüssigmetall im wesentlichen diesen Bereich erreicht (Basisfall), ist insgesamt mit sehr niedrigen Drücken - maximal wenige Bar - zu rechnen und mit der Zeit werden Flüssigmetall und Schwerwasser sich durch Destillation voneinander trennen.

Mit einer geringen, aber schwer zu quantifizierenden Wahrscheinlichkeit ist damit zu rechnen, daß der Kollimator den Abfluß des Flüssigmetalls wesentlich behindert. Dabei kann durch konstruktive Maßnahmen verhindert werden, daß bereits der obere Kollimatorblock verstopft wird. Eine solche Blockade wird daher nicht weiter in Betracht gezogen (obwohl sie untersucht wurde). Schwieriger ist die Lage bezüglich einer Verstopfung des mittleren Kollimatorblocks. Falls diese maximal wirksam würde, würde das Volumen im Zentralrohr nicht ausreichen, um den Targetbehälter vollständig zu entleeren - es verbliebe also letztendlich PbBi im Targetbehälter. Schon vorher würde der Druck wegen des geringeren freien Volumens schneller ansteigen als im Basisfall. Als maximal möglicher Druck im Fall eines vollständigen Temperatenausgleichs ergäben sich rund 2 MPa (20 bar). Weiter verringert würde dieser durch Kondensation am Target-Wärmetauscher, die etwa oberhalb von 10 bar wirksam würde. Während der Entleerung des Targetbehälters müßte auch damit gerechnet werden, daß (eventuell mehrmals) Schwerwasser in ihn eindringt und einen kurzzeitigen Druckanstieg bewirkt. Auch dies könnte zu Drücken im Bereich bis etwa 2 MPa (20 bar) führen. Falls dies nicht unproblematisch ist, sollte vorsorglich ein Sicherheitsventil am Deckgas-Behälter des Targets vorgesehen werden.

Falls jedoch mindestens zusammen etwa 20 l beider Flüssigkeiten in den mittleren Kollimatorblock hinein- oder gar durch ihn hindurchfließen würden, bliebe darüber so viel Platz, daß sowohl der gesamte Targetbehälter als auch der gesamte Spalt zwischen Sicherheitshülle und Zentralrohr frei von Flüssigkeiten blieben. Damit stünde nicht nur der Target-Wärmetauscher, sondern auch ein fast 2 m hohes Stück der Wand des Zentralrohres für Kondensation zur Verfügung. Da das Zentralrohr durch den Moderator auf etwa 50°C gehalten wird, würde hier die Kondensation bereits unterhalb von 1 bar einsetzen, so daß mit keinen bedrohlichen Drücken zu rechnen wäre. Auch wäre in diesem Fall im Endzustand die Wirksamkeit eines eventuell vorhandenen Sicherheitsventils am Isolierspalt ebenso unfraglich wie die eines solchen Ventils am Targetbehälter.

Unabhängig von den langfristigen Vorgängen muß bei einer Beschränkung des freien Volumens durch den Kollimator wegen des damit verbundenen stärkeren Druckaufbaus im Zentralrohr damit gerechnet werden, daß auch in der Phase der Entleerung des Targetbehälters (eventuell mehrmals) etwas Schwerwasser in ihn hineingerät und einen schnellen und kräftigen Druckanstieg bis auf etwa 2 MPa (20 bar) verursacht. Falls dies nicht zulässig wäre, müßte es durch ein Sicherheitsventil am Deckgas verhindert werden.

Referenzen

1. G. S. Bauer, M. Salvatores and G. Heusener, MEGAPIE, a 1 MW Pilot Experiment for a Liquid Metal Spallation Target, J. Nucl. Mater. **296** (2001) 17-33
2. A. Strinning, PSI, Mitteilung im Rahmen des MEGAPIE Projekts
3. Ch. Perret, PSI, Mitteilung im Rahmen des MEGAPIE Projekts
4. L. Meyer, G. Schumacher, H. Jacobs and K. Thurnay, Investigation of the Premixing Phase of a Steam Explosion with Hot Spheres, Nucl Tech **123** (1998) 142-155

Anhänge

Anhang A: Datenblatt

Durchmesser der Lecks	2 cm
Targetbehälter	
- Außenradius	92 mm
- Innenradius	89 mm
- Durchsatz PbBi (Hauptstrom / Bypass)	35 / 2.5 kg/s
- Temperatur des PbBi im Zustrom	230...240°C
- Temperatur des PbBi am Strahleintritt (Leckbereich)	270°C
- Maximale Temperatur des PbBi	470°C
- Mittlere Temperatur des PbBi im Rückstrom	340°C
- Druck auf Höhe des Strahleintritts	5 bar
- Höhe der PbBi-Säule	3.6 m
- Förderhöhe der Pumpe (nominell / maximal)	0.2 bar
- Volumen PbBi	80 dm ³
- Gasvolumen über PbBi	2 dm ³
- Druck des Gases über dem Flüssigkeitsspiegel	< 1 bar
- Querschnitt des Austritts von PbBi (des Lecks)	3.14 cm ²
Isolierspalt (zwischen Targebehälter und Sicherheitshülle)	
- Spalt radial	6 mm
- Abstand des tiefsten Punktes zur Sicherheitshülle	ca. 15 mm
- Füllung des Spaltes (Isoliergas), noch in Diskussion	ca. 10...30 mbar
- Totales Volumen	25...50 dm ³
Sicherheitshülle	
- Doppelwandiges Rohr aus AlMg ₃	
- Außenradius	106 mm
- Außenradius des Kühlspaltes im zylindrischen Teil	103 mm
- Weite des Kühlspaltes im zylindrischen Teil	4 mm
- Innenradius des Innenrohres	96 mm
- Querschnitt des Wasserzuflusses	4.04 cm ²
- Höhe des Kühlspaltes am Strahldurchtritt (Leckbereich)	h = 3 mm (ca.)
- Querschnitt des Wasseraustritts (Lecks)	h x 6.28 cm
- Durchflußrate des Kühlwassers	2.4 kg/s
- Eintrittstemperatur des Wassers	40°C
- Maximale Wandtemperatur innen	53.5 °C
- Druck im Spalt am Strahldurchtritt	5.5...6 bar
- Höhe der Wassersäule	ca. 5 m
- Druck im Gaspuffer (Ausgleichsgefäß)	Rücklauf 5.8 bar
- Förderhöhe der Pumpe (nominell / Maximal)	max. 8 bar
Äußerer Spalt (zwischen Sicherheitshülle und zentralem Rohr)	
- Spalt radial	4 mm
- Füllung des Spaltes	Vakuum
- Höhe	etwa 1957 mm
- Volumen	etwa 5800 cm ³

Zentrales Rohr des Moderatortanks

- Durchmesser, innen	220 mm
- Durchmesser des Kragens am oberen Kollimatorblock	218 mm
- Spalt zum Zentralrohr (radial)	1 mm
- Freie Höhe bis zum oberen Kollimatorblock	674 mm
- Freies Volumen unterhalb der Oberkante Kollimatorblock	0.91 m ³

Volumina der Spalte beiderseits der Sicherheitshülle im Modell

(bei 2 m Höhe in der Rechnung zum Basisfall)

Spalt zwischen Target und Sicherheitshülle (Isolierspalt)	7010 cm ³
Spalt zwischen Sicherheitshülle und Zentralrohr	5430 cm ³

Anhang B: Thermophysikalische Daten des PbBi

Daten für den flüssigen und erstarrenden Zustand (festes PbBi ist nicht modelliert worden - kam nicht vor):

Schmelztemperatur T_m	397.0 K
Schmelzwärme	22038.0 J
Dichte ρ	[10300. - 0.124 (T - T_m)] kg/m ³ (Basisfall) [10722. - 0.127 (T - T_m)] kg/m ³ (Variation)
Spezifische Wärme c_p	146.0 J/(kg K)
Emissivität ϵ	0.6
Dynamische Zähigkeit η	0.1 kg/(m sec)
Oberflächenspannung σ	1.0 kg/sec ²
Wärmeleitfähigkeit λ	[9.7 + 0.01 T] W/(m K)