

KIT SCIENTIFIC REPORTS 7653

# **Optimierung eines Reaktorsicherheits- behältermodells zur genaueren Strömungssimulation**

Markus Müller  
Tobias Szabó  
Frank Kretzschmar



Markus Müller, Tobias Szabó, Frank Kretschmar

**Optimierung eines Reaktorsicherheitsbehältermodells  
zur genaueren Strömungssimulation**

Karlsruhe Institute of Technology  
**KIT SCIENTIFIC REPORTS 7653**

# Optimierung eines Reaktorsicherheits- behältermodells zur genaueren Strömungssimulation

von

Markus Müller

Tobias Szabó

Frank Kretschmar

**Impressum**



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
KIT Scientific Publishing  
Straße am Forum 2  
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark of Karlsruhe  
Institute of Technology. Reprint using the book cover is not allowed.

[www.ksp.kit.edu](http://www.ksp.kit.edu)



*This document – excluding the cover – is licensed under the  
Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 DE License  
(CC BY-SA 3.0 DE): <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/>*



*The cover page is licensed under the Creative Commons  
Attribution-No Derivatives 3.0 DE License (CC BY-ND 3.0 DE):  
<http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/de/>*

Print on Demand 2013

ISSN 1869-9669

ISBN 978-3-7315-0099-5

## Vorwort

Diesem Bericht liegt die Bachelor-Arbeit „Optimierung eines Sicherheitsbehältermodells zur genauen Strömungssimulation“ von Herrn Markus Müller zugrunde. Diese fertigte er im Rahmen seines Studiums an der Hochschule Kempten im Studienfach Energie- und Umwelttechnik im Zeitraum von Januar bis Juni 2013 am KIT an. Die Arbeit wurde von Seiten des KIT von Herrn Dipl.-Ing Tobias Szabó und Herrn Dipl.-Phys. Frank Kretzschmar betreut. Von Seiten der Hochschule Kempten wurde die Arbeit von Herrn Prof. Dr.-Ing- Bernhard Müller betreut.





## Kurzfassung

Bei einem schweren Störfall mit Kühlmittelverlusten in einem Kernkraftwerk kann es zur Entstehung von Wasserstoff durch die Oxidation metallischer Strukturen im Kern wie Hüllrohren kommen. Strömt dieser Wasserstoff in den Sicherheitsbehälter eines Druckwasserreaktors aus und kommt es dort zu ungünstigen Gasgemischen mit der dort vorhandenen Luft, besteht die Gefahr einer Wasserstoffverbrennung.

Im Rahmen von Probabilistischen Sicherheitsanalysen werden mit dem Integralcode MELCOR eine Vielzahl postulierter Unfallabläufe berechnet. MELCOR verwendet dabei effiziente, vereinfachte Modelle. Zur Berechnung der Thermohydraulik im Sicherheitsbehälter wird das Lumped-Parameter-Modell verwendet und das Rechengebiet nur sehr grob nodalisiert. Die dabei erzielten Rechenergebnisse sind darum wenig exakt.

Ziel dieser Bachelorarbeit war eine Verfeinerung einer existierenden, groben MELCOR-Nodalisation eines am KIT erstellten Modells eines generischen Sicherheitsbehälters. Dazu wurde zunächst eine Literaturrecherche durchgeführt. Daraufhin wurde die MELCOR-Nodalisation in mehreren Schritten verfeinert und an auftretende Strömungsphänomene, wie Aufwärtsströmungen, angepasst. Die mit der verfeinerten Nodalisation berechneten Ergebnisse wurden mit denen einer genauen 3D-CFD-Rechnung mit dem Code GASFLOW verglichen. Die mit verfeinerter Nodalisation berechneten MELCOR-Ergebnisse waren deutlich genauer und realistischer als die ursprünglichen.



## Abstract

In the unlikely case of a severe loss of coolant accident (LOCA) in a pressurized water reactor, hydrogen can be generated in the core by the oxidation of metallic structures such as cladding tubes. Most of the hydrogen flows through the leak into the containment which is filled with steam and air. There, gas mixtures with a high hydrogen and a low steam concentration could form locally and temporarily. In this case, a fast deflagration or even a transition to detonation could damage containment structures.

In the context of probabilistic risk analysis, a wide range of postulated accident scenarios are calculated by integral codes such as MELCOR. This code includes efficient and simplified models to calculate the relevant phenomena. The thermal-hydraulics inside the containment is calculated by a lumped-parameter-model with a very coarse nodalization. Consequently, these computational results are not exact.

The objective of this bachelor thesis was the improvement of an existing MELCOR nodalization of a simplified, generic containment. First, methods for a more detailed nodalization were searched in literature. Afterwards, the MELCOR nodalization was refined step by step using these methods and adjusted as regards to the flow phenomena such as buoyant plumes. The results of the detailed nodalization were compared to exact results from a 3D-CFD-calculation with GASFLOW. The MELCOR results of the detailed nodalization were more realistic than the ones from the original nodalization.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen und Symbole .....</b>	<b>ix</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>xi</b>
<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen .....</b>	<b>5</b>
2.1 <i>Der Druckwasserreaktor mit seinen Sicherheitssystemen .....</i>	5
2.2 <i>Schwere Störfälle .....</i>	6
2.3 <i>Schwere Störfälle mit Wasserstoffproblematik .....</i>	7
2.4 <i>Probabilistische Sicherheitsanalysen .....</i>	8
2.5 <i>MELCOR und GASFLOW .....</i>	9
2.5.1 MELCOR.....	9
2.5.2 GASFLOW .....	13
<b>3 Stand der Technik .....</b>	<b>15</b>
3.1 <i>Nodalisierung für Integralrechnungen mit Lumped-Parameter-Codes .....</i>	15
3.2 <i>Nodalisierung zur genaueren Auflösung von Gaskonzentrationen und Gasschichtungen .....</i>	16
3.3 <i>Nodalisierung zur Auflösung von Aufwärtsströmungen .....</i>	16
3.4 <i>Erfahrungen zu Formverlustbeiwerten .....</i>	16
<b>4 Nodalisierung eines generischen Sicherheitsbehälters.....</b>	<b>19</b>
4.1 <i>Generischer Sicherheitsbehälter .....</i>	19
4.2 <i>Typische, sehr grobe Nodalisierung .....</i>	21
4.3 <i>Grobe, vertikale Nodalisierung .....</i>	25
4.3.1 <i>Rechenergebnisse und Diskussion .....</i>	25
4.3.2 <i>Schlussfolgerung .....</i>	29
4.4 <i>Horizontale Nodalisierung des Komponentenraums .....</i>	29
4.4.1 <i>Rechenergebnisse und Diskussion .....</i>	31
4.4.2 <i>Schlussfolgerung .....</i>	32
4.5 <i>Feine, vertikale Nodalisierung des Kuppelbereichs.....</i>	33
4.5.1 <i>Rechenergebnisse und Diskussion .....</i>	33
4.5.2 <i>Schlussfolgerung .....</i>	36
4.6 <i>Feine, vertikale Nodalisierung des Komponentenraums .....</i>	36
4.6.1 <i>Rechenergebnisse und Diskussion .....</i>	37
4.6.2 <i>Schlussfolgerung .....</i>	38
4.7 <i>Nodalisierung mit Jet-Zonen.....</i>	38
4.7.1 <i>Rechenergebnisse und Diskussion .....</i>	39
4.7.2 <i>Schlussfolgerung .....</i>	42

## Inhaltsverzeichnis

---

4.8	<i>Optimierte Jet-Nodalisierung</i> .....	43
4.8.1	Rechenergebnisse und Diskussion .....	43
4.8.2	Schlussfolgerung .....	46
4.9	<i>Einfluss der Formverlustbeiwerte</i> .....	47
4.9.1	Rechenergebnisse und Diskussion .....	47
4.9.2	Schlussfolgerung .....	49
4.10	<i>Nodalisierung gesamt</i> .....	50
4.10.1	Rechenergebnisse und Diskussion .....	50
4.10.2	Schlussfolgerung .....	53
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>55</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>57</b>

## Formelzeichen und Symbole

## Lateinisch

$A$	$m^2$	Fläche
$D$		Diffusiver Fluss
$E$	J	Innere Energie
$F$		Gesamtfluss
$f$	$kg/(m^3*s)$	Interphasenkraft
$g$	$m/s^2$	Erdanziehungskraft
$h$	J/kg	Spezifische Enthalpie
$\dot{H}$	J	Enthalpiequelle
$K^*$		Druckverlustbeiwert
$L$	m	Länge eines Flow-Path
$m$	kg	Masse
$\dot{m}$		Massenstrom
$P$	$N/m^2$	Druck
$Q_{\rho\varphi}$	$kg/(m*s^2)$	Volumetrischer Quellterm einer Erhaltungsgröße
$t$	s	Zeit
$u$	$m/s$	Geschwindigkeit
$V$	$m^3$	Volumen

Griechisch

$\alpha$		Volumenanteil
$\rho$	$\text{kg/m}^3$	Dichte
$\sigma$		Richtung eines Flow-Path
$\Phi$		Volumetrische Dichte einer Erhaltungsgröße
$\varphi$		Erhaltungsgröße

Indizes

$i$		Kontrollvolumen
$\alpha$		Spezies
$j$		Flow-Path
$\gamma$		Phase
$d$		Ursprungsvolumen



## Abkürzungsverzeichnis

3D	Dreidimensional
Abb.	Abbildung
CFD	Computational Fluid Dynamics
CV	Kontrollvolumen
CVH	Control Volumen Hydrodynamics
DWR	Druckwasserreaktor
FL	Flow-Path
HS	Heat-Structure
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
LOCA	Loss of coolant accident
LP	Lumped Parameter
PSA	Probabilistische Sicherheitsanalysen
SB	Sicherheitsbehälter
SWR	Siedewasserreaktor



---

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 4.1: Generischer Sicherheitsbehälter nach Jordan et al. [5].....	19
Abb. 4.2: Quellterm .....	20
Abb. 4.3: Typische, sehr grobe Nodalisierung (vertikaler Schnitt) .....	21
Abb. 4.4: Typische, sehr grobe Nodalisierung (horizontaler Schnitt).....	22
Abb. 4.5: Grobe, vertikale Nodalisierung(vertikaler Schnitt) .....	25
Abb.4.6: Horizontale Nodalisierung des Komponentenraums (horizontaler Schnitt) .....	30
Abb. 4.7: Horizontale Nodalisierung des Komponentenraums (vertikaler Schnitt).....	30
Abb. 4.8: Feine, vertikale Nodalisierung des Betriebsraums (vertikaler Schnitt) .....	33
Abb. 4.9: Feine, vertikale Nodalisierung des Komponentenraums (vertikaler Schnitt).....	37
Abb. 4.10: Nodalisierung mit Jet-Zonen (vertikaler Schnitt).....	39



## 1 Einleitung

Zur sicheren Nutzung der Kernenergie werden Sicherheitsanalysen von Kernkraftwerken durchgeführt. Neben Auslegungsstörfällen werden hierbei auch auslegungsüberschreitende Störfälle untersucht. Diese Analysen werden mit Hilfe von Simulationen spezieller Codes durchgeführt. Durch Experimente können auftretende Phänomene ermittelt, gezielt herbeigeführt und untersucht werden. Die Ergebnisse dienen unter anderem der Weiterentwicklung und Validierung von Codes für Strömungssimulationen. Die Sicherheitsanalysen werden mit validierten und behördlich akzeptierten Codes durchgeführt. In dieser Arbeit wird die numerische Simulation der Thermohydraulik im Sicherheitsbehälter (SB) bei einem hypothetischen schweren Störfall behandelt.

Ein schwerer Störfall mit Wasserstoffproblematik in einem Druckwasserreaktor könnte nach Szabó et al. [1] unter folgenden Annahmen auftreten. Durch ein Leck im Primärkreislauf soll ein Kühlmittelverlust auftreten. Gleichzeitig wird der sehr pessimistische Fall angenommen, dass alle Notkühlsysteme ausfallen. Die Abfuhr der Nachzerfallswärme nach der Reaktorschnellabschaltung zum Sekundärkreislauf soll allerdings verfügbar bleiben. Durch den fortschreitenden Kühlmittelverlust und die Druckentlastung sinkt bei diesem Szenario der Füllstand im Reaktor. Dadurch liegen die Brennstäbe ab einem bestimmten Zeitpunkt teilweise frei. Die Wasserdampfumgebung im freiliegenden Teil des Kerns kann die Brennelemente nur unzureichend kühlen, weswegen es dort zu einer Aufheizung kommt.

Steigt die Temperatur auf ca. 1000 °C beginnt das Hüllrohrmaterial Zirkonium zu oxidieren (Grandjean et al. [2]). Das Zirkonium reduziert dabei den Wasserdampf zu Wasserstoff. Durch das Leck im Primärkreis strömt dieser mit dem restlichen Wasserdampf in den Sicherheitsbehälter aus.

Falls es zu ungünstigen Gasgemischen mit der dort vorhandenen Luft kommt, d.h. zu hohen Wasserstoff- und zu geringen Wasserdampf-Konzentration in Verbindung mit Sauerstoff, besteht die Gefahr einer Wasserstoff-Deflagration oder -Detonation.

Durch die entstehende Reaktionswärme und den durch die Verbrennung ausgelösten Druckanstieg, kann es zu Beschädigungen von Strukturen innerhalb des Sicherheitsbehälters oder am Sicherheitsbehälter selbst kommen. Um einem solchen Szenario vorzubeugen, ist es

## 1 Einleitung

---

zunächst notwendig, die Wasserstoffausbreitung im Sicherheitsbehälter berechnen zu können.

Wasserstoff als potentielle Gefahr im SB wurde bereits 1979 beim Reaktorunfall in Three-Mile-Island-2 (USA) erkannt. Dort kam es zu einer Verbrennung von Wasserstoff im Sicherheitsbehälter, welche aber zu keinen weiteren Schäden führte (Haste et al. [3]). Im Kernkraftwerk Fukushima Daiichi im März 2011 verursachte die Verbrennung von Wasserstoff schwere Schäden an Gebäuden. Seitdem steht dieses Thema vermehrt im Fokus der Öffentlichkeit.

Es werden orts- und zeitaufgelöste Simulationen zur Wasserstoffausbreitung im Sicherheitsbehälter durchgeführt. Mit Hilfe der dabei gewonnenen Erkenntnisse werden Gegenmaßnahmen in Form von Zündern oder autokatalytischen Rekombinatoren in Anzahl und Positionierung sinnvoll festgelegt. Mit Zündern ist es möglich, gezielt geringe, noch unbedenkliche, Konzentrationen von Wasserstoff abzubrennen. Auf Grund der langsamen Verbrennung entsteht hierbei lediglich eine thermische Belastung für den Sicherheitsbehälter. Bei höheren Konzentrationen kann eine Verbrennung hohe Druckspitzen hervorrufen (Szabó et al. [4]). Außerdem kann der Wasserstoff teilweise autokatalytisch mit vorhandenem Luftsauerstoff zu Wasser oxidiert werden, bevor es zu einer Verbrennung kommt. Diese Rekombinatoren wurden nach dem Vorfall 1979 in Three Mile Island in den KKW in Deutschland installiert.

Bei Störfallsimulationen geben Lumped-Parameter-Codes (LP-Codes) wie z.B. MELCOR und ASTEC groben Aufschluss über die Wasserstoffverteilung. Detailliertere Untersuchungen werden mit COCOSYS (ebenfalls ein LP-Code) und 3D-CFD-Codes wie GASFLOW, der am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) entwickelt wird, oder GOTHIC durchgeführt.

In LP-Codes werden üblicherweise keine lokalen, strömungstechnischen Phänomene berechnet. Auf Grund vereinfachter Gleichungssätze und der groben Diskretisierung wird hier z.B. die Erhaltung des 3D Impulses der Strömung vernachlässigt. Dadurch reduziert sich der Rechenaufwand im Vergleich zu CFD-Rechnungen deutlich. Die Genauigkeit solcher Rechnungen ist allerdings deutlich geringer (Szabó et al. [4]).

Am KIT wurde ein vereinfachtes generisches Modell eines Sicherheitsbehälters erstellt (Jordan et al. [5]). Mit diesem Modell wurde ein Codevergleich zwischen MELCOR und GASFLOW

durchgeführt (Szabó et al. [4]). Es ergaben sich deutliche Unterschiede zwischen den Ergebnissen, die einerseits durch die vereinfachten Gleichungssätze des LP-Codes begründet sind, andererseits aus einer zu groben Nodalisierung in MELCOR herrühren. Ziel dieser Arbeit ist es, mit entsprechenden Anpassungen der Nodalisierung genauere Ergebnisse mit MELCOR zu erzielen.

Im Rahmen der Arbeit wird eine Recherche nach Methoden für eine bessere LP-Nodalisierung von Sicherheitsbehältern durchgeführt. Anschließend wird mit Ergebnissen aus einer GASFLOW-Rechnung die MELCOR-Nodalisierung schrittweise optimiert. Nach Vergleich der neuen Resultate aus MELCOR mit den Ergebnissen aus GASFLOW wird schließlich die Nodalisierung in ihrer Qualität bewertet und weiter optimiert.

Einige Grundlagen zu Druckwasserreaktoren, zu schweren Störfällen, Probabilistischen Sicherheitsanalysen und den verwendeten Codes MELCOR und GASFLOW sind in **Kapitel 2** beschrieben. In **Kapitel 3** wird der Stand der Technik mit Nodalisierungsmethoden aus anderen Arbeiten zusammengefasst. Die Optimierung der MELCOR-Nodalisierung und die damit erzielten Rechenergebnisse werden in **Kapitel 4** vorgestellt. Eine Zusammenfassung und ein Ausblick schließen die Arbeit in **Kapitel 5** ab.





## 2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden einige Grundlagen zur Kerntechnik aufgezeigt. Dabei wird der Druckwasserreaktor mit seinen Sicherheitssystemen in Kapitel 2.1 betrachtet. Zudem wird in Kapitel 2.2 ein Einblick in schwere Störfälle gegeben, wobei speziell schwere Störfälle mit Wasserstoffproblematik in Kapitel 2.3 behandelt werden. Anschließend wird die Arbeit in Kapitel 2.4 in den Zusammenhang probabilistischer Sicherheitsanalysen eingeordnet. Ein Überblick über den Integralcode MELCOR wird in Kapitel 2.5.1 gegeben. Der 3D-CFD Code GASFLOW wird in Kapitel 2.5.2 behandelt.

### 2.1 Der Druckwasserreaktor mit seinen Sicherheitssystemen

Kernkraftwerke mit Leichtwasserreaktoren werden entweder als Siedewasser- (SWR) oder Druckwasserreaktoren (DWR) realisiert. In Deutschland kommen vor allem DWR zum Einsatz. Ein wichtiges Merkmal dieser Reaktoren sind die getrennten Kühlkreisläufe, bestehend aus Primärkreislauf (kernseitig) und dem Sekundärkreislauf (turbineseitig). Der Druck im Primärkreislauf wird auf etwa 155 bar gehalten, wobei das Kühlmittel in flüssiger Phase vorliegt und eine Temperatur von ca. 330 °C erreicht (Hansen [6]).

Um einen Austritt von Radioaktivität in die Umwelt im Falle eines Unfalls zu verhindern, sind Sicherheitssysteme vorhanden. Das Sicherheitskonzept für Kernkraftwerke besteht aus mehreren Barrieren zum sicheren Einschluss der radioaktiven Stoffe und aus sicherheitstechnischen Maßnahmen und Einrichtungen, die diese Barrieren schützen (GRS [7]).

Die radioaktiven Spaltprodukte werden durch das Kristallgitter des Brennstoffes und die Brennstabhüllrohre eingeschlossen. Weitere Barrieren sind der Reaktordruckbehälter mit dem geschlossenen Reaktorkühlkreislauf und der Sicherheitsbehälter, der den Kühlkreislauf umschließt. Diese Bauteile werden durch die äußere Stahlbetonhülle vor allem gegen Einwirkungen von außen geschützt (GRS [7]).

Ein gestaffeltes Sicherheitskonzept sorgt für die Integrität dieser Barrieren im Störfall. Dies wird durch eine Kombination von Maßnahmen zur Verhinderung von Störungen und

Störfällen und Maßnahmen zur Beherrschung solcher Fälle bis hin zur Begrenzung ihrer Auswirkungen erreicht (GRS [7]).

Die wichtigsten Sicherheitssysteme sind die Reaktorschnellabschaltung, Notkühlsysteme für den Kern, ein Notspeisewassersystem für die Dampferzeuger, eine Notstromversorgung und der Sicherheitsbehälter (Gebäudeabschluss). Im Folgenden werden diese Systeme nach Hansen [6] kurz erläutert.

Die Reaktorschnellabschaltung hat den Zweck die Kettenreaktionen im Reaktor schnell unterbrechen zu können und den Reaktor so in einen unterkritischen Zustand zu bringen. Dies wird durch das Einfahren von Absorberstäben erreicht, wobei sich die Energieproduktion auf die Nachzerfallswärme begrenzt.

Die Notkühlsysteme gewährleisten die Wärmeabfuhr der Nachzerfallswärme des abgeschalteten Reaktors. Sie sind für die Kühlmiteleinpeisung bei einem Störfall mit Kühlmittelverlust zuständig.

Notspeisewassersysteme speisen den Sekundärkreislauf und treten nach Ausfall der Energieversorgung in Kraft, um die Kühlfunktion der Dampferzeuger für den Primärkreislaufs zu gewährleisten. Zur Abfuhr der Nachzerfallswärme beim Herunterfahren des Reaktors können sie ebenfalls eingesetzt werden.

Die Notstromversorgung versorgt bei einem Stromausfall die wichtigsten Funktionen mit Strom. Dazu gehören unter anderem die Abschaltung des Reaktors und die Gewährleistung der Nachwärmeabfuhr. Das Notstromsystem gewährleistet alle notwendigen Funktionen, um den Reaktor in einen sicheren Zustand zu bringen.

Zur Zurückhaltung der Radioaktivität und zum Schutz gegen Einwirkungen von außen ist der Sicherheitsbehälter verantwortlich.

### 2.2 Schwere Störfälle

Schwere Störfälle werden gemäß GRS [7] in zwei Kategorien unterteilt. Zum einen gibt es Auslegungstörfälle und zum anderen auslegungsüberschreitende Störfälle.

Der Auslegungsstörfall ist der schlimmste anzunehmende Störfall, der vom Sicherheitssystem beherrscht wird. Der Grenzwert für eine Freisetzung von Radioaktivität an die Umgebung beträgt einmalig 50 mSv. Im Genehmigungsverfahren muss ein solcher Störfall als beherrschbar nachgewiesen werden (GRS [7]).

Auslegungsüberschreitende Störfälle sind hypothetische Störfälle, die nicht kontrolliert werden können. Für solche Ereignisse existieren keine Grenzwerte für die Freisetzung von Radioaktivität. Das aus solchen Störfällen resultierende Risiko für die Umgebung wird Restrisiko genannt. Um die Folgen solcher hypothetischen Ereignisse zu verringern, werden ständig Gegenmaßnahmen entwickelt und verbessert (GRS [7]).

### 2.3 Schwere Störfälle mit Wasserstoffproblematik

Zu einem schweren Störfall mit Wasserstoffproblematik könnte es nach Szabó et al. [1] wie folgt kommen.

Durch ein Leck im Primärkreis soll es zu einem Kühlmittelverlust kommen. Gleichzeitig sollen die Notkühlsysteme ausfallen. Die Abfuhr der Nachzerfallswärme nach der Reaktorschnellabschaltung zum Sekundärkreislauf bleibe verfügbar, solange der Kern noch vollständig bedeckt ist. Der Füllstand sinke allerdings durch den fortschreitenden Kühlmittelverlust und die Druckentlastung im Reaktor. Ab einem bestimmten Zeitpunkt liegen die Brennstäbe folglich teilweise frei. Der an den Brennstäben entlangströmende Wasserdampf kann diese nur unzureichend kühlen, wodurch es zu einer Aufheizung der Brennstäbe komme.

Ab einer Temperatur von ca. 1000 °C beginnt nach Grandjean et al. [2] das Hüllrohrmaterial Zirkonium zu oxidieren. Dabei wird der Wasserdampf nach der Reaktionsgleichung



zu Wasserstoff reduziert. Durch das Leck kann dieser mit dem restlichen Wasserdampf in den Sicherheitsbehälter ausströmen. Dort verteilt sich das Gemisch. Es kann zeitweise lokal zu hohen Wasserstoffkonzentrationen im Sicherheitsbehälter kommen. Wenn gleichzeitig geringe Wasserdampf-Konzentrationen vorliegen, besteht die Gefahr einer schnellen Wasserstoffverbrennung in der Luftatmosphäre nach der Reaktionsgleichung



Durch die aus der Verbrennung resultierende Druckwelle und die frei werdende Reaktionswärme können Sicherheitsbehälterstrukturen beschädigt werden. Aus diesem Grund ist es notwendig Gegenmaßnahmen auszulegen, damit hohe Wasserstoffkonzentrationen im Falle eines schweren Störfalls möglichst nicht auftreten.

Um Wasserstoffverbrennungen zu verhindern werden die Sicherheitsbehälter von SWR während des Betriebs inertisiert. Für DWR-Sicherheitsbehälter sind die Installation von autokatalytischen Rekombinatoren und Zündern gängig. Zur Bestimmung der Positionen von Rekombinatoren und Zündern im Sicherheitsbehälter sind Kenntnisse über Wasserstoffkonzentrationen bei solchen Störfällen unabdingbar. Durch Zünder soll das Gemisch bereits bei niedrigen Wasserstoffkonzentrationen nahe der unteren Zündgrenze (ca. 4%) gezündet werden. Dabei kommt es nur zu langsamen Deflagrationen ohne hohe Druckspitzen. Jedoch können durch die hohen Temperaturen bei der Verbrennung gewisse Schäden im Sicherheitsbehälter auftreten. In autokatalytischen Rekombinatoren kann die Wasserstoffkonzentration durch Oxidation des Wasserstoffs mit dem vorherrschenden Luftsauerstoff verringert werden (Szabó et al. [4]).

### 2.4 Probabilistische Sicherheitsanalysen

Probabilistische Sicherheitsanalysen (PSA) haben als Zielsetzung die Ausgewogenheit der Sicherheitstechnik der Anlagen zu überprüfen und Ansatzpunkte für Verbesserungen zu finden. Mit PSA kann der Einfluss bestimmter Maßnahmen auf die Sicherheit abgeschätzt und Schwachstellen quantitativ bewertet werden (GRS [7]). Gemäß Bundesamt für Strahlenschutz [8] wird eine PSA üblicherweise in 3 Stufen unterteilt.

- Stufe 1: Diese Stufe dient zur Ermittlung und Quantifizierung von Ereignisabläufen, welche die Kühlung von Brennelementen gefährden könnten. Als Ergebnis stehen Eintrittshäufigkeiten solcher Abläufe. Stufe 1 endet mit dem Eintritt eines Kernschadenzustands.
- Stufe 2: Hier werden mögliche Ereignisabläufe ausgehend von verschiedenen Kernschadenzuständen bis zur Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umgebung analysiert. Als Ergebnis werden die Eintrittswahrscheinlichkeiten der verschiedenen

---

Anlagenzustände nach der Menge an freigesetzten radioaktiven Stoffen sowie der Art des Barriereversagens sortiert.

- Stufe 3 befasst sich mit der Untersuchung des Austritts radioaktiver Stoffe in die Umgebung der Anlage, sowie der Eintrittswahrscheinlichkeit der daraus folgenden Gesundheits-, Umwelt- und Sachschäden.

Laut Bundesamt für Strahlenschutz [8] setzen sich Unfallablaufanalysen aus einer probabilistischen und einer deterministischen Komponente zusammen. Für deterministische Analysen werden meist integrale Simulationsprogramme verwendet. So wurden beispielsweise nach Dimmelmeier et al. [9] Rechnungen mit dem Integral-Code MAAP4 mit Lumped-Parameter-Ansatz zur Untersuchung von Störfällen mit Wasserstoffproblematik durchgeführt. Darauf aufbauend wurden für wenige Schlüsselszenarien detailliertere Untersuchungen mit dem 3D-CFDCode GASFLOW durchgeführt.

Es besteht ein Interesse daran, mit dem Integral-Code MELCOR im Rahmen von PSA die Thermohydraulik im Sicherheitsbehälter besser zu berechnen. Zu diesem Zweck wird im Rahmen dieser Arbeit eine Lumped-Parameter-Nodalisierung von MELCOR für einen hypothetischen Störfall mit Wasserstoffproblematik verbessert. Als Referenz dient ein sehr genaues Ergebnis einer GASFLOW-Rechnung.

## 2.5 MELCOR und GASFLOW

Dieses Kapitel beschreibt die Codes MELCOR und GASFLOW, mit dem Referenzrechnungen durchgeführt wurden.

### 2.5.1 MELCOR

MELCOR (Gauntt et al. [10]) ist der weltweit führende Integralcode zur Störfallsimulation von Kernkraftwerken. Entwickelt wird der Code an den Sandia National Laboratories für die U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC).

Zur Berechnung der Thermohydraulik verwendet MELCOR nach Gauntt et al. [10] den Lumped-Parameter-Ansatz. Diese Methode verwendet zur Rechnung nur konzentrierte (lumped) Parameter, und weist deshalb laut Szabó et al. [1] Schwächen bei der Berechnung lokaler Konzentrationen auf. Der Code besteht aus verschiedenen Programmeinheiten,

welche jeweils eine Hauptfunktion übernehmen. Zur Berechnung der Sicherheitsbehälter-Thermohydraulik sind 1. die Pakete Control Volume Hydrodynamics (CVH) und Flow-Path (FL) sowie 2. das Paket Heat-Structure (HS) relevant. Diese Pakete berechnen Strömungen zwischen Kontrollvolumen und Wärmeübergang an Wandstrukturen.

Gemäß Gauntt et al. [10] werden im CVH Paket Kontrollvolumen (CV) berechnet, welche das hydrodynamische Material enthalten. Der Inhalt von Kontrollvolumina lässt sich in die Phasen Pool, welcher hauptsächlich flüssiges Wasser enthält, und Atmosphäre unterteilen. Letztere enthält Wasserdampf, nicht kondensierbare Gase und Nebeltröpfchen. Die Atmosphäre wird als homogenes Gemisch betrachtet. Die Masse in einem Kontrollvolumen besitzt keine Geschwindigkeit.

Nach Gauntt et al. [10] sind Kontrollvolumina durch sogenannte Flow-Paths (FL) verbunden. Sie transferieren hydrodynamisches Material instantan und enthalten keine Massen. Pool und Atmosphäre können in einem FL unterschiedliche Geschwindigkeiten besitzen. Eine Gegenströmung einer Phase durch einen FL ist jedoch nicht möglich. Da ein Flow-Path immer in ein CV mündet und dort dem Material keine Geschwindigkeit zugeordnet wird, geht der Impuls der Strömung verloren.

Die Wände eines Sicherheitsbehälters werden Gauntt et al. [10] zufolge als Heat-Structures (HS) definiert. Sie grenzen an Kontrollvolumen. Durch sie erfolgt eine eindimensionale Wärmeleitung. Der Wärmeübergang zwischen HS und CV findet durch Strahlung und Konvektion statt, zwischen zwei HS nur durch Strahlung. Die Kondensation von Wasserdampf findet an den Oberflächen von HS statt. Die Anordnung der Kontrollvolumina, Flow-Paths und Heat-Structures in einem Rechengebiet wird als **Nodalisierung** verstanden.

MELCOR berechnet die Erhaltungsgleichungen nur eindimensional an wenigen Rechenpunkten mit konzentrierten Parametern (lumped) (Gauntt et al. [10]). Um die Einschränkungen in MELCOR für die Erhaltungsgleichungen zu zeigen, wird zunächst die allgemeine Erhaltungsgleichung für eine Erhaltungsgröße  $\Phi$  in integraler Form betrachtet.

Die volumetrische Dichte der Erhaltungsgröße  $\Phi$  ist das Produkt der Massendichte  $\rho$  und dem massespezifischen Wert der Erhaltungsgröße  $\varphi$ . Sie kann sich durch den Gesamtfluss  $F_\Phi$  durch die Oberfläche  $S$  des abgeschlossenen, ortsfesten Volumens oder durch eine volumetrische Quelle  $Q_{\rho\varphi}$  ändern.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \varphi dV = \oint_S \mathbf{F}_\Phi \cdot d\mathbf{S} + \int_V Q_{\rho\varphi} dV \quad (2.3)$$

Der Gesamtfluss besitzt eine konvektive und eine diffusive Komponente.  $\varphi\rho\mathbf{v}$ , der konvektive Fluss, steht für die Menge  $\varphi\rho$ , die mit der Geschwindigkeit  $\mathbf{v}$  durch die Strömung transportiert wird.  $\mathbf{D}_{\rho\varphi}$  stellt den diffusiven Fluss dar.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \varphi dV = - \oint_S \rho \varphi \mathbf{v} \cdot d\mathbf{S} - \oint_S \mathbf{D}_\Phi \cdot d\mathbf{S} + \int_V Q_{\rho\varphi} dV \quad (2.4)$$

Nach Gauntt et al. [10] löst MELCOR die Erhaltungsgleichungen für Masse, Energie und Impuls nur eindimensional. Die Vektoren  $\mathbf{v}$ ,  $\mathbf{D}_\Phi$  und  $d\mathbf{S}$  werden deshalb durch Skalare ersetzt.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \varphi dV = - \oint_S \rho \varphi v \cdot dS - \oint_S D_\Phi \cdot dS + \int_V Q_{\rho\varphi} dV \quad (2.5)$$

Um den Einfluss der Erhaltungsgleichungen auf das Rechenergebnis in MELCOR genauer betrachten zu können, werden MELCOR-Gleichungen nach Gauntt et al. [10] für den Erhalt der Masse, Energie und des Impulses in diskretisierter Form betrachtet.

### Massenerhaltung

Da die Masse in MELCOR über Flow-Paths zwischen Kontrollvolumina ausgetauscht wird, wird das Umlaufintegral in eine Summe über alle an ein CV  $i$  angrenzenden Flow-Paths überführt. Die Änderung der Masse einer Spezies  $\alpha$  innerhalb eines Kontrollvolumens lässt sich dadurch in Gleichung (2.6) aus einem Massenquellterm  $\dot{m}_{i,\alpha}$  und der Summe der über die angrenzenden Flow-Paths ein- und ausströmenden Massen der Spezies  $\alpha$  bilden.  $i$  steht dabei für die Nummer des CV,  $j$  für die Nummer des Flow-Paths,  $\alpha_{j,\varphi}$  für den Volumenanteil der Phase  $\gamma$  in Flow-Path  $j$ ,  $\sigma_{ij}$  steht für die Richtung des Flow-Paths  $j$  bzgl. des CV  $i$  (-1 oder +1).  $\rho_{j,\alpha}^d$  für die Dichte der Spezies  $\alpha$  im stromauf liegenden CV  $d$  und  $u_{j,\gamma} A_j$  für den Volumenstrom der Phase  $\gamma$  durch den Flow-Path  $j$ . Dieser wird berechnet durch das Produkt aus Geschwindigkeit und der offenen Querschnittsfläche.

$$\frac{\partial m_{i,\alpha}}{\partial t} = \sum_j \sigma_{ij} \alpha_{j,\gamma} \rho_{j,\alpha}^d u_{j,\gamma} A_j + \dot{m}_{i,\alpha} \quad (2.6)$$

Demnach wird der diffusive Masseneinfluss einer einzelnen Spezies vernachlässigt.

Energieerhaltung

MELCOR berechnet bei der Energieerhaltung die innere Energie für beide Phasen  $\gamma$  gesondert. Dabei werden neben der Wärmeleitung innerhalb eines Fluides, die Arbeit der viskosen Schub- und Scherspannungen und die Arbeit der Druckkräfte vernachlässigt. In diskretisierter Form wird wiederum das Umlaufintegral in eine Summe über alle angrenzenden Flow-Paths überführt. Auf diese Art wird die Enthalpie aller Spezies, die durch angrenzende Flow-Paths in das Kontrollvolumen hinein oder heraustransportiert werden, berechnet. Die innere Energie  $\frac{\partial E_{i,\gamma}}{\partial t}$  einer Phase  $\gamma$  wird nach Gauntt et al. [10] diskretisiert in Gleichung (2.7) dargestellt.

$$\frac{\partial E_{i,\gamma}}{\partial t} = \sum_j \sigma_{ij} \alpha_{j,\gamma} (\sum_\alpha \rho_{j,\alpha}^d h_{j,\alpha}^d) u_{j,\gamma} A_j + \dot{H}_{i,\gamma} \quad (2.7)$$

Hierbei steht  $\rho_{j,\alpha}^d h_{j,\alpha}^d$  für die volumenspezifische Enthalpie der Spezies  $\alpha$  durch Flow-Path  $j$  und  $\dot{H}_{i,\gamma}$  für eine Enthalpiequelle wie z.B. die Wärmeleitung durch HS.

Impulserhaltung

Die Gleichung für die Impulserhaltung wird über FL bilanziert. Sie ist gegenüber der 3D-Navier-Stokes-Gleichung stark vereinfacht und berücksichtigt keine Kräfte senkrecht zur Richtung des FL. Zudem werden die Schub- und Normalspannungen durch Reibungseffekte vernachlässigt. Die zeitliche Änderung des Impulses in einem FL  $j$ , der die Kontrollvolumina  $i$  und  $k$  verbindet, berechnet sich nach Gleichung 2.8 aus der Differenz der Druckkräfte (1. Term der rechten Seite), der Schwerkraft (2. Term), dem Druck, der durch Strömungsmaschinen aufgeprägt (3. Term), dem Druckverlustbeiwert, der sich aus Wandreibung und Formverlust zusammensetzt (4. Term), den Interphasenkräften (5. Term) und dem stark vereinfachten Konvektionsterm (6. Term). Die Gleichung für die Impulserhaltung sieht diskretisiert folgendermaßen aus.

$$\begin{aligned} & a_{j,\gamma} \rho_{j,\gamma} L_j \frac{\partial u_{j,\gamma}}{\partial t} \\ & = a_{j,\gamma} (P_i - P_k) + a_{j,\gamma} (\rho g \Delta z)_{j,\gamma} + a_{j,\gamma} \Delta P_j - \frac{1}{2} K_{j,\gamma}^* a_{j,\gamma} \rho_{j,\gamma} |u_{j,\gamma}| u_{j,\gamma} - \\ & a_{j,\gamma} f_{2,j} L_{2,j} (u_{j,\gamma} - u_{j,-\gamma}) + a_{j,\gamma} \rho_{j,\gamma} u_{j,\gamma} (\Delta u)_{j,\gamma} \end{aligned} \quad (2.8)$$



$L_j$  steht dabei für die Länge des Flow-Path  $j$ ,  $i$  und  $k$  für die CV "von" und "zu" die durch den Flow-Path  $j$  von CV  $i$  nach  $k$  verbunden sind.  $P_i$  und  $P_k$  stehen für die Drücke in den CVs und  $\Delta P_j$  steht für den Druck durch Strömungsmaschinen. Des Weiteren steht  $K^*$  für den Druckverlustbeiwert,  $f_{zj}$  für Interphasenkraft und  $L_{2,j}$  für die effektive Länge, auf der die Interphasenkraft wirkt. Im optionalen Konvektionsterm bezeichnet  $\Delta u_{j,\gamma}$  die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen FL  $j$  und höchstens einem stromaufliegenden FL.  $\gamma$  und-  $\gamma$  stehen dabei jeweils für Pool und Atmosphäre.

Der stark vereinfachte Konvektionsterm,  $a_{j,\gamma} \rho_{j,\gamma} v_{j,\gamma} (\Delta u)_{j,\gamma}$ , geht laut Gauntt et al. [10] nur optional in die Berechnung mit ein. Durch die groben Nodalierungen für Sicherheitsbehälter liegen die Punkte, zwischen denen Geschwindigkeiten berechnet werden, weit voneinander entfernt. Deswegen wird angenommen, dass der Impuls innerhalb eines Kontrollvolumens verloren geht und die atmosphärische Strömung nur druckgetrieben ist.

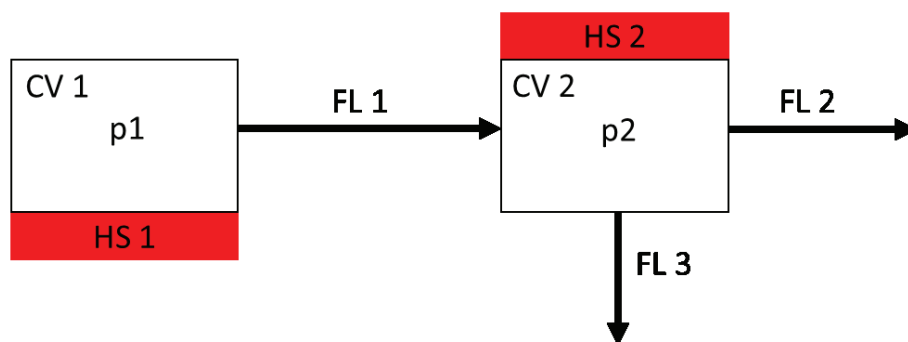


Abbildung 2.1: Beispiel einer Verknüpfung zweier Kontrollvolumina

Abbildung 2.1 zeigt exemplarisch, wie die Richtung des Impulses in MELCOR verloren geht. Angenommen wird ein Druck  $p_1$  in CV 1, der größer als der Druck  $p_2$  in CV 2 ist. Dann existiert eine Strömung durch den FL 1 von CV 1 in horizontaler Richtung zu CV 2. Dort wird die Strömung angehalten. Aufgrund des nun größeren Masseninventars in CV 2 erhöht sich dort der Druck. Wenn in den Nachbar-CV ein niedrigerer Druck herrscht, kommt es zu einer Strömung durch FL 2 und FL 3, also in verschiedene Richtungen. Der ursprüngliche Impuls in horizontaler Richtung wird gemindert.

### 2.5.2 GASFLOW

GASFLOW ist ein am KIT entwickelter 3D-CFD-Code, der die Ausbreitung, Vermischung und Verbrennung von Gasen und im Besonderen Wasserstoff in Sicherheitsbehältern berechnet. Auch die Wirkung von Gegenmaßnahmen wie Rekombinatoren auf die Wasserstoffverteilung lässt sich damit berechnen. Validiert wurde der Code anhand vieler Experimente, die sich mit Wasserdampf- und Wasserstoffausbreitung in komplexen Geometrien befassten. GASFLOW löst die dreidimensionalen Differentialgleichungen für kompressible Fluide mit der Finite-Volumen-Methode. Massenaustausch zwischen Dampf- und Tröpfchenphase und den Wärmeübergang an den Wänden, der mit Kondensation oder Verdampfung einhergeht, werden simuliert (Travis et al. [11]).

Aufgrund dieser im Vergleich zu MELCOR besseren Berechnungsmethode wird in dieser Arbeit ein GASFLOW-Rechenergebnis als Referenz verwendet. Anhand dieser werden die Ergebnisse der verschiedenen Nodalierungen in MELCOR verglichen und bewertet.

### 3 Stand der Technik

In diesem Kapitel werden verschiedene Nodalierungsansätze aus der Literatur vorgestellt. Diese bilden die Grundlage für die Vorgehensweise in dieser Arbeit. Neben der üblichen Nodalierung für Integralrechnungen mit Lumped-Parameter-Codes werden auch die Ansätze zur genaueren Berechnung der Gasverteilung und zur Berücksichtigung von Aufwärtsströmungen erläutert. Abschließend wird eine Übersicht zu Erfahrungen mit Formverlustbeiwerten gegeben.

#### 3.1 Nodalierung für Integralrechnungen mit Lumped-Parameter-Codes

Für Integralrechnungen wird ein Sicherheitsbehälter in MELCOR in der Regel mit 30 – 40 Kontrollvolumen modelliert (Gauntt et al. [12]). Mehrere kleine Räume werden üblicherweise zusammengefasst oder größeren Räumen zugeschlagen.

Horizontale Verfeinerung, d.h. mehr Kontrollvolumen innerhalb einer horizontalen Ebene, begünstigt eine Durchmischung der Fluide. Diese geben aber laut Burkhardt et al. [13] meist keine zusätzlichen Erkenntnisse über die thermohydraulischen Vorgänge, da sich Zustandsgrößen auf einer Höhe meist relativ schnell ausgleichen. Sie geben aber genauere Informationen über die Verteilung von Wasserstoff oder der thermohydraulischen Parameter. Die vertikale Verfeinerung, d.h. mehr Kontrollvolumen übereinander, sollte deshalb Schwerpunkt bei der Verbesserung einer Nodalierung sein.

Man muss sicherstellen, dass relevante Strömungspfade durch die Lumped-Parameter-Nodalierung berücksichtigt werden und realistische Ergebnisse berechnet werden. Aus diesem Grund ist nach Duspiva [14] eine Verifizierung durch eine CFD-Rechnung unabdingbar. Der Benutzer und dessen Erfahrung haben hierbei den größten Einfluss auf das Ergebnis. Bei einfachen Problemen gilt, dass eine genauere Diskretisierung, in vertikaler (Schwarz et al. [15]) sowie horizontaler Richtung, detailliertere Gradienten und damit lokal genauere Ergebnisse liefert (Burkhardt et al. [16]).

#### 3.2 Nodalisierung zur genaueren Auflösung von Gaskonzentrationen und Gasschichtungen

Für die Berechnung von Gasschichtungen ist eine vertikale Verfeinerung notwendig, da ohne diese keine Konzentrationsgradienten erkennbar sind. Bereiche, in denen solche Schichten erfahrungsgemäß vorhanden sind, sollten deshalb nach Burkhardt et al. [13] und Fischer [17] vertikal detaillierter nodalisiert werden. Zur genaueren Bestimmung von Gaskonzentrationen wird eine detailliertere Nodalisierung vorgeschlagen (Fischer [17], Duspiva [14]).

#### 3.3 Nodalisierung zur Auflösung von Aufwärtsströmungen

Aufwärtsströmungen kommen bei Sicherheitsbehältern im Falle eines Störfalls vor allem im Kuppelbereich oberhalb der Dampferzeugertürme über den Berstscheiben vor. Diese sind auftriebsgetrieben und haben die Form eines Freistrahls (Jet). Solche Strömungen können nur durch ausreichend viele Ebenen in vertikaler Richtung simuliert werden. Um mit Lumped Parameter Codes solche Strömungen darstellen zu können, muss mit zentralen Zonen oder einer kegelförmigen Nodalisierung mit Jet-Zonen gearbeitet werden. Die Jet-Zonen bestehen aus zusätzlichen Kontrollvolumina und Flow-Paths. Sie bestimmen laut Broxtermann et al. [18] maßgeblich die Form der Gas- oder Dampfausbreitung. Nur mit ihrer Hilfe können bei einer Lumped-Parameter-Nodalisierung starke nach oben gerichtete Strömungen nachgebildet werden, andernfalls werden sie nichtberücksichtigt (Burkhardt et al. [19], GRS [20], Allelein et al. [21]). Um ein Mitreißen von Atmosphäre umliegender Kontrollvolumina nachzubilden, können gemäß Burkhardt et al. [13] Gebläse in die Simulation integriert werden. Diese Gebläse sind nach oben gerichtet und zwingen Gas aus Nachbarvolumina in die Jet-Zonen zu einer Aufwärtsströmung, die von selbst nicht berechnet werden würde.

#### 3.4 Erfahrungen zu Formverlustbeiwerten

Über genaue Formverlustbeiwerte mit denen in Lumped Parameter Codes Strömungsverluste innerhalb eines Kontrollvolumens simuliert werden können, ist bisher noch wenig bekannt. Die GRS verwendet in [20] für den Code COCOSYS Formverlustbeiwerte die zwischen 0,3 und 2,8 variieren, wobei angegeben wird, dass dies fiktive Werte sind, die aber zur Stabilität der Strömung beitragen. Nach Bradley et al. [22] ist vollkommen unklar, wie ein äquivalenter Druckverlustbeiwert für FL zwischen CV, die mehrere Räume repräsentieren, bestimmt

werden soll. Dafür sei keine Methodik verfügbar. In der dortigen Arbeit wurde ein Druckverlustbeiwert von 2 angenommen. Auch das Forschungszentrum Jülich verwendet Formverlustbeiwerte zwischen 1 und 5 zur Simulation in einem generischen Sicherheitsbehälter (Allelein et al. [23]).

Nach Szabó et al. [4] liefern die realistischen Formverlustbeiwerte für die Durchströmung bestimmter Geometrien zwischen 0 – 0.54 mit MELCOR nur ungenügende Ergebnisse. Am KIT wird deshalb mit einem Formverlustbeiwert von 4 gerechnet. Dieser Wert ist gängig für MELCOR-Nodalierungen von DWR-Sicherheitsbehältern. Er wird in der vorliegenden Arbeit standardmäßig für alle FL verwendet.

Anstatt eine Anpassung an den Formverlustbeiwerten durchzuführen, können auch die Durchmesser der FL verringert werden um die Strömung künstlich zu verlangsamen. Karwat [24] bemängelt diese Vorgehensweise und die Tatsache, dass häufig Formverlustbeiwerte weit ab der Realität verwendet werden, ohne diese wissenschaftlich rechtfertigen zu können.



## 4 Nodalisierung eines generischen Sicherheitsbehälters

Am KIT ist ein Geometriemodell eines vereinfachten generischen Sicherheitsbehälters erstellt worden. Von diesem wurde ein GASFLOW Rechengitter erstellt (Jordan et al. [5]) und eine grobe MELCOR–Nodalisierung, die typisch für Integralrechnungen ist. Die von GASFLOW und MELCOR berechnete Thermohydraulik im generischen SB wurde verglichen (Szabó et al. [4]). Im Rahmen dieser Arbeit wurde diese grobe MELCOR-Nodalisierung in mehreren Schritten verfeinert. In diesem Kapitel werden diese verfeinerten Nodalisierungen vorgestellt und ihr Einfluss auf das Ergebnis gezeigt und beurteilt. Zur Validierung wird die genauere CFD Rechnung mit GASFLOW als Referenz herangezogen. Dieser Code ist durch das erfolgreiche Nachrechnen vieler Experimente validiert worden (Travis et al. [11]) und lieferte beispielsweise beim internationalen Standard Problem 47 (Fischer et al. [25]) realistische Ergebnisse. Die GASFLOW-Rechenergebnisse sind darum als Referenzwerte geeignet.

### 4.1 Generischer Sicherheitsbehälter

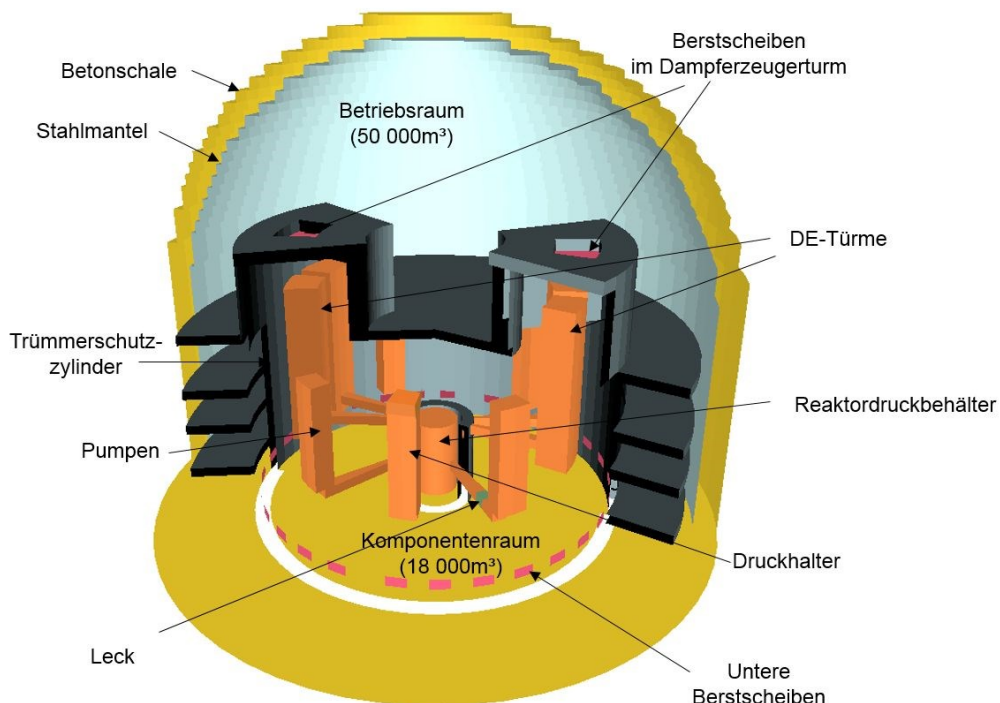


Abb. 4.1: Generischer Sicherheitsbehälter nach Jordan et al. [5]

#### 4 Nodalisierung eines generischen Sicherheitsbehälters

Nach Jordan et al. [5] ist die Basis für diesen generischen Sicherheitsbehälter ein 1 300 MW DWR deutscher Bauart. Er besteht aus zwei Räumen. Innen befindet sich der Komponentenraum mit Bauteilen wie dem Reaktordruckbehälter, den Dampferzeugern, Pumpen und dem Druckhalter. Außen befindet sich der Betriebsraum. Dieser ist durch ca. 1 m dicke Betonwände vom Komponentenraum abgetrennt. Bei realen Anlagen lässt sich dieser Raum während des Betriebs betreten. Beide Räume sind durch Berstscheiben in der Oberseite beider Dampferzeugertürme und im unteren Bereich des Trümmerschutzzylinders verbunden. Diese können sich im Störfall durch eine Druckdifferenz zwischen beiden Räumen öffnen. Dazu kann es im Fall eines Lecks durch das ausströmende Kühlwasser kommen. Position des Lecks ist in Abb. 4.1 zu erkennen.

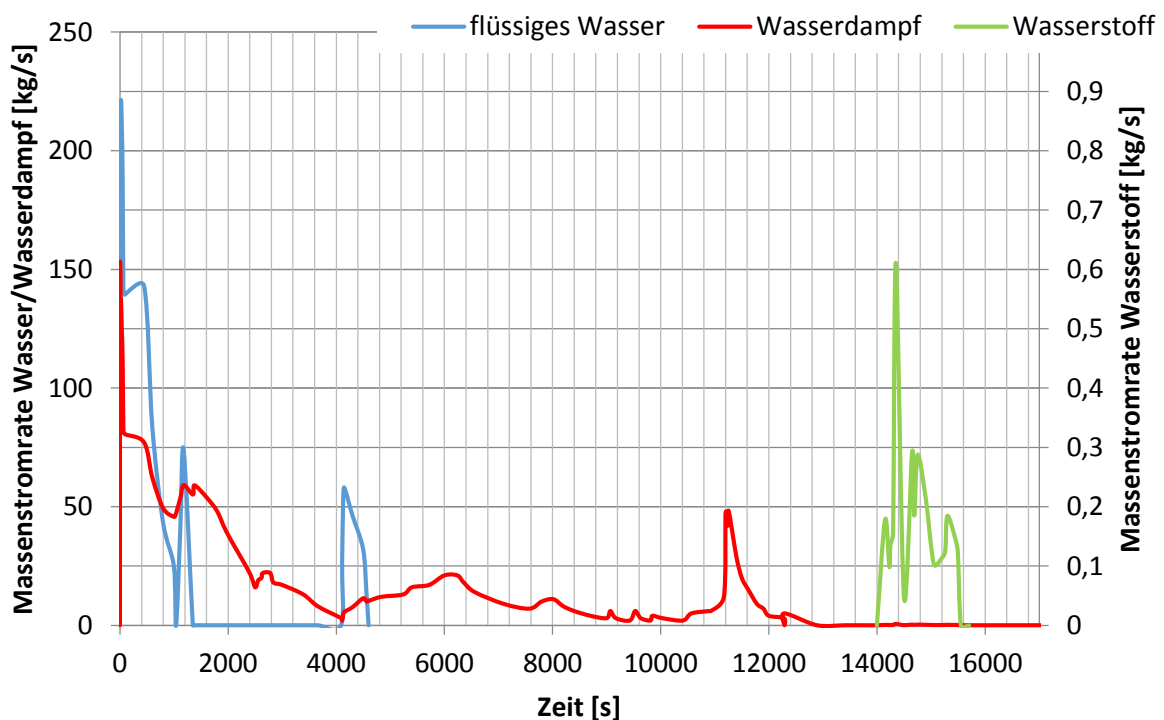


Abb. 4.2: Quellterm

In Abb. 4.2 ist ein typischer Quellterm für einen schweren Störfall, der bei einem kleinen Leck im Primärkreis und dem gleichzeitigen Ausfall vieler Sicherheitssysteme resultiert, dargestellt. Die Massenströme von Wasser, Wasserdampf und Wasserstoff sind für den Zeitraum der kompletten Störfallberechnung von 0 s bis 17 000 s aufgetragen. Zwischen 14 000 s und 15 500 s wird der pessimistische Fall einer trockenen Wasserstoffquelle (nur ca. 10 % Dampf) angenommen. Im Anschluss wird die Thermohydraulik bis 17 000 s weitergerechnet (Szabó et al. [4]).



## 4.2 Typische, sehr grobe Nodalisierung

Von Szabó et al [3] wurde für MELCOR der generische Sicherheitsbehälter mit einer einfachen Nodalisierung modelliert (siehe Abb. 4.3 und Abb. 4.4). Diese ist typisch für Nodalisierungen, die bei MELCOR-Integralrechnungen verwendet werden. Die Flächen mit der Nummerierung von 1 bis 37 stehen jeweils für ein CV. Die HS sind durch eine rote Linie oder eine rote Nummer gekennzeichnet. Die Pfeile stellen jeweils einen FL dar.

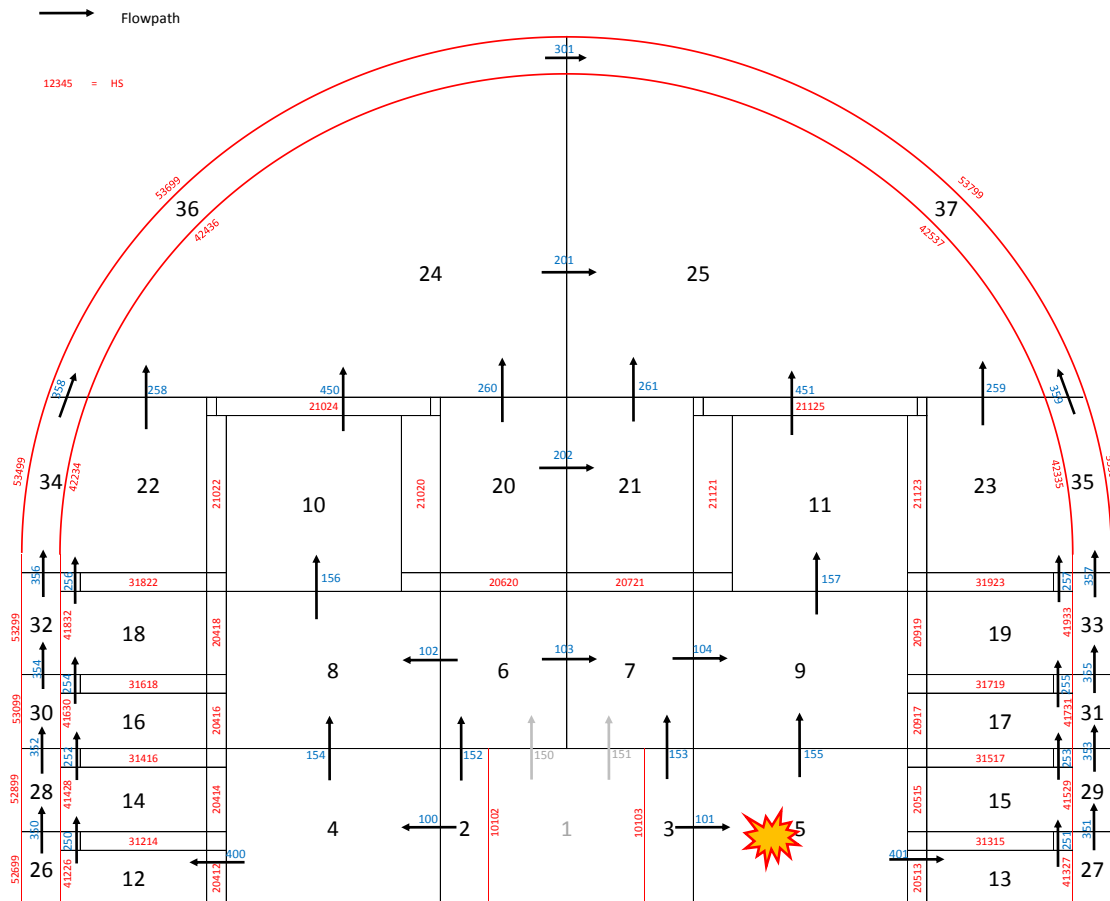


Abb. 4.3: Typische, sehr grobe Nodalisierung (vertikaler Schnitt)

## 4 Nodalisierung eines generischen Sicherheitsbehälters

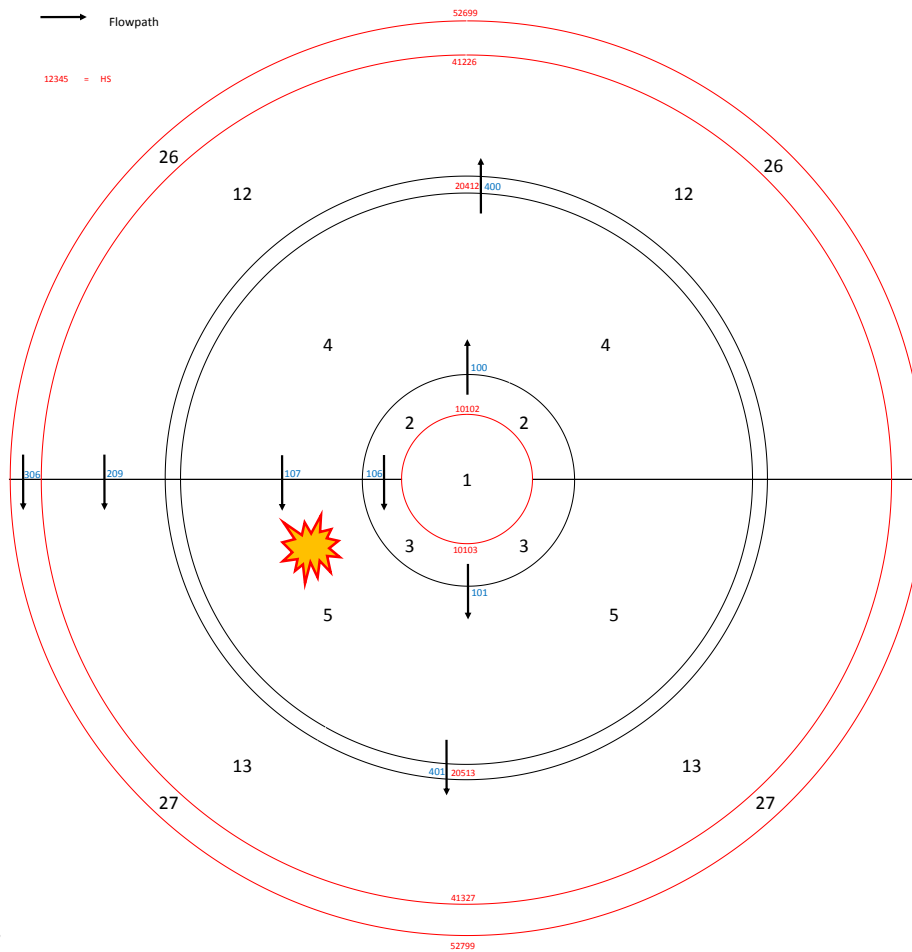


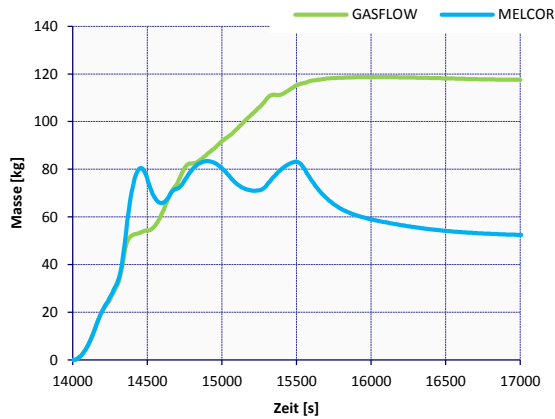
Abb. 4.4: Typische, sehr grobe Nodalisierung (horizontaler Schnitt)

Einbauten im Komponentenraum werden nur insofern berücksichtigt, dass ihr Volumen in den entsprechenden Kontrollvolumen abgezogen wird. Die Quelle befindet sich homogen verteilt in Kontrollvolumen 5 (gekennzeichnet durch ein Symbol). In dieser groben Nodalisierung ist diese nicht genauer zu positionieren.

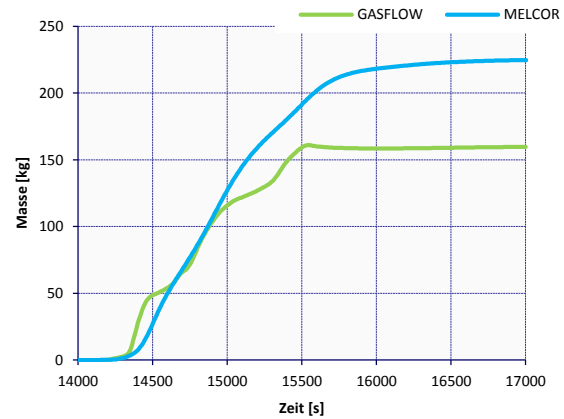
Betrachtet man die Ergebnisse der GASFLOW- und MELCOR-Rechnung, so sind wegen der unterschiedlichen Berechnungsarten (siehe Kapitel 2.5) und der sehr groben Nodalisierung in MELCOR deutliche Unterschiede festzustellen.

Diagramm 1 zeigt die Masse an Wasserstoff im Komponentenraum für MELCOR (blau) und GASFLOW (grün). Diagramm 2 zeigt selbiges für den äußeren Betriebsraum. Wie in diesen beiden Diagrammen zu erkennen ist, unterschätzt MELCOR die Masse an Wasserstoff, welche im Komponentenraum bleibt, deutlich im Vergleich zu GASFLOW. Im Gegenzug gelangt mehr Wasserstoff in den Betriebsraum. Laut Szabó et al. [4] ist dafür eine Überschätzung des

Kamineffekts und eine Unterschätzung der Strömung innerhalb des Komponentenraums verantwortlich.

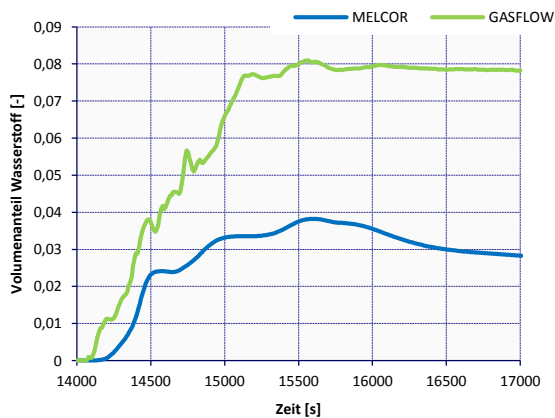


**Diagramm 1: Masse an Wasserstoff im Komponentenraum/ typische, sehr grobe Nodalisierung**

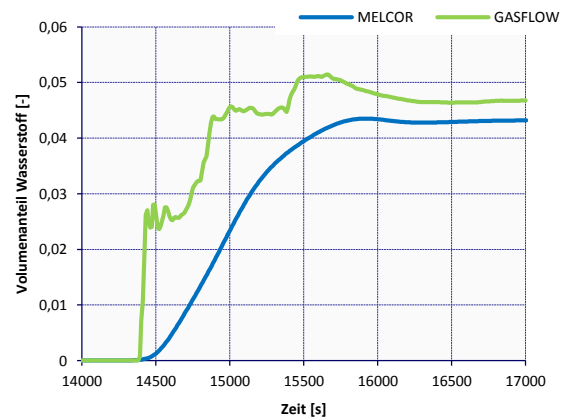


**Diagramm 2: Masse an Wasserstoff im Betriebsraum/ typische, sehr grobe Nodalisierung**

Diagramm 3 zeigt die Wasserstoffkonzentration im Komponentenraum entfernt von der Quelle in CV 6, wobei der Volumenanteil über der Zeit aufgetragen ist. Die Werte in MELCOR (blau) liegen deutlich unter einem lokalen Wert in diesem Raumbereich aus GASFLOW. Demnach wird der Transport von Wasserstoff innerhalb des Komponentenraums von MELCOR deutlich unterschätzt. Allerdings wurde mit MELCOR die Konzentration im Bereich der Kuppel (CV 24) relativ genau berechnet, wie in Diagramm 4 zu sehen ist, welches identisch wie Diagramm 3 aufgebaut ist.



**Diagramm 3: Wasserstoffkonzentration in CV 6 / typische, sehr grobe Nodalisierung**



**Diagramm 4: Wasserstoffkonzentration im Kuppelbereich / typische, sehr grobe Nodalisierung**

Diagramm 5 zeigt den Massenstrom durch die Berstscheiben im linken Turm 1, im rechten Turm 2 (vgl. Abb. 4.3) und durch die unteren Berstscheiben im Trümmerschutzzylinder im zeitlichen Verlauf. Positiven Werte bedeuten Strömung aus dem inneren Komponentenraum

#### 4 Nodalisierung eines generischen Sicherheitsbehälters

in den äußeren Betriebsraum. Die positiven Werte in den Türmen (Ausströmung), und negativen Werte im Trümmerschutzzylinder (Einströmung) lassen in MELCOR auf den Kamineffekt schließen. Dieser ist auch in GASFLOW zu beobachten, allerdings ist dieser dort deutlich schwächer und zeitweise findet dort eine Umkehrung der Strömung statt. Insgesamt ist in MELCOR eine deutlich stärkere Strömung zu beachten. Die Strömung durch den quellfernen Turm 1 und den quellnahen Turm 2 ist in der GASFLOW-Rechnung meist ähnlich stark, wohingegen in der MELCOR-Rechnung durch die quellfernen Berstscheiben in Turm 1 immer deutlich weniger Masse strömt. Hier zeigt sich, dass die Durchströmung des Komponentenraums von der Quelle bis zum quellfernen Dampferzeugerturm 1 in MELCOR unterschätzt wird.

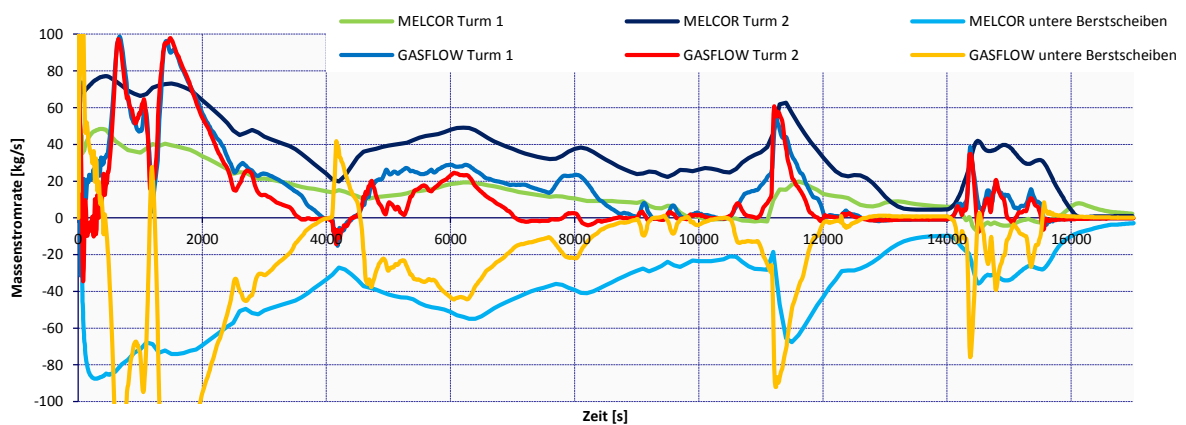


Diagramm 5: Durchströmraten der Berstscheiben / typische, sehr grobe Nodalisierung

In Diagramm 6 ist der Druck über der Zeit abgebildet. Die Ergebnisse der MELCOR-Rechnung (blaue Kurve) sind meist etwas höher als bei GASFLOW (grüne Kurve). Insgesamt stimmen die Drücke relativ gut überein.

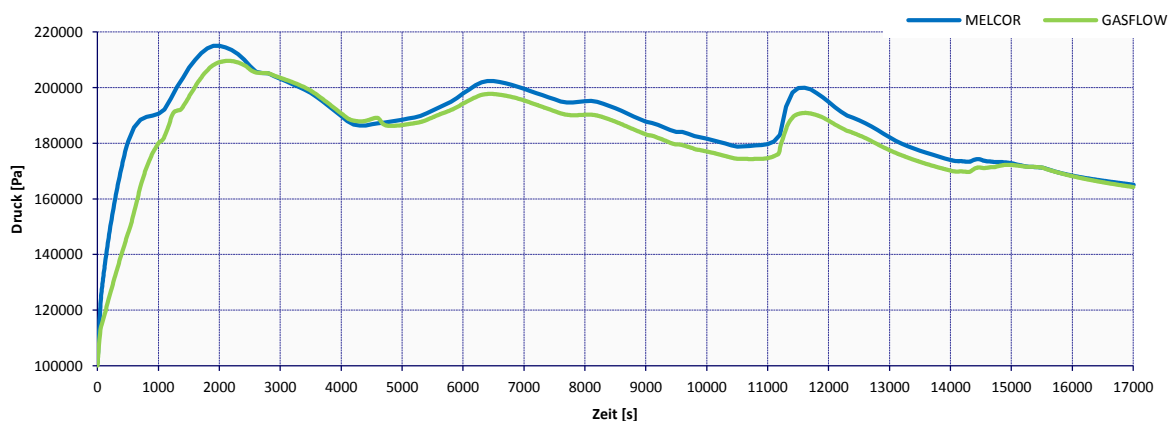


Diagramm 6: Druck / typische sehr grobe Nodalisierung

### 4.3 Grobe, vertikale Nodalisierung

Im ersten Schritt wird die existierende Nodalisierung vertikal verfeinert. Jedes Kontrollvolumen im Komponentenraum und jedes im Betriebsraum im oberen Bereich 1 (siehe Abbildung 4.5) wird vertikal unterteilt. Eine weitere Unterteilung im inneren (Bereich 2) Raum soll zu einer besseren Durchmischung führen. Im äußeren Raum (Bereich 1) ist die bessere Darstellung der Gaskonzentration Ziel dieser Nodalisierung, sodass die Gasschichtung und damit eine eventuelle Stratifikation genauer aufgelöst werden kann.

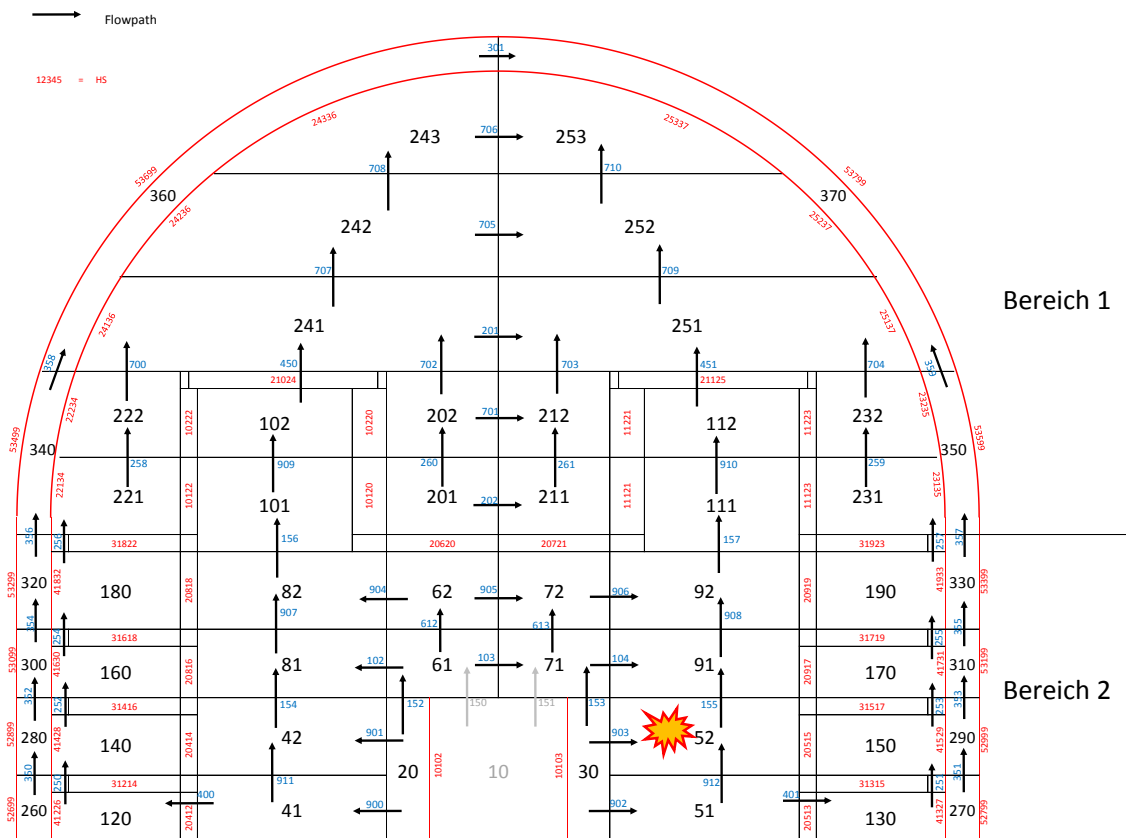


Abb. 4.5: Grobe, vertikale Nodalisierung (vertikaler Schnitt)

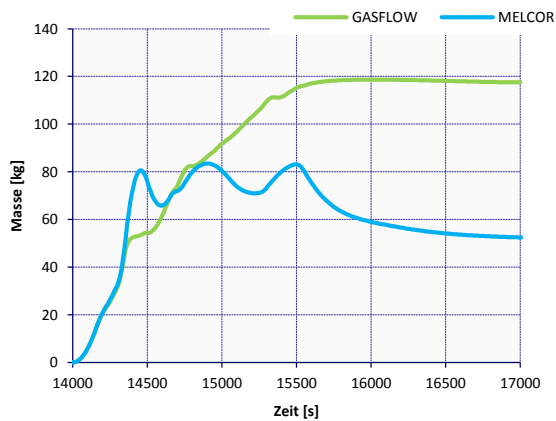
Die Schnitte durch die Kontrollvolumina wurden so gewählt, dass sie mit den Zellen in GASFLOW übereinstimmen. Dadurch lassen sich lokale Sensoren in GASFLOW, an denen Strömungsparameter ausgewertet werden, den entsprechenden MELCOR-CV zuordnen. Insgesamt wurden 17 neue CV, 29 neue FL und 10 HS hinzugefügt.

#### 4.3.1 Rechenergebnisse und Diskussion

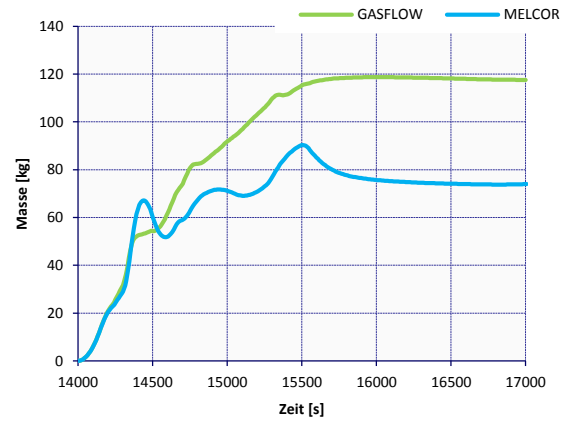
Im Gegensatz zur ursprünglichen Nodalisierung (siehe Diagramm 7) bleiben mit der neuen Nodalisierung (Diagramm 8) nach 15 200 s größere Mengen Wasserstoff im

#### 4 Nodalisierung eines generischen Sicherheitsbehälters

Komponentenraum. Durch die Verkleinerung der Kontrollvolumen findet ein verstärkter Transport des Wasserstoffs innerhalb des Innenraums statt.



**Diagramm 7: Masse an Wasserstoff im Komponentenraum/ typische sehr grobe Nodalisierung**



**Diagramm 8: Masse an Wasserstoff im Komponentenraum/ grobe vertikale Nodalisierung**

Diagramm 9 zeigt die Wasserstoffkonzentrationen, die in GASFLOW von lokalen Sensoren in den Kuppelvolumina 241, 242 und 243 ausgegeben werden. Diagramm 10 zeigt die Wasserstoffkonzentrationen für die gleichen Kontrollvolumina in MELCOR. Es ist deutlich erkennbar, dass in MELCOR weniger Wasserstoff in den oberen Teil der Kuppel (CV 242 und 243) transportiert wird. Um die Aufwärtsströmungen oberhalb der Dampferzeugertürme berechnen zu können, muss in der Nodalisierung mindestens ein Strömungspfad für die Abwärtsströmungen und einer für die Aufwärtsströmung vorgesehen werden. Eine Gegenströmung innerhalb eines FL ist nämlich nicht möglich. Aus diesem Grund wird die eine Strömung in die oberen Kuppelbereiche künstlich versperrt. Stattdessen strömt das wasserstoffreiche Gemisch, anstatt seine vertikale Richtung beizubehalten, vorwiegend in die unter CV 241 liegenden CV 202 und 222. Zusätzliche Strömungspfade werden deshalb in Form von Jet-Zonen in Kapitel 4.7 realisiert.

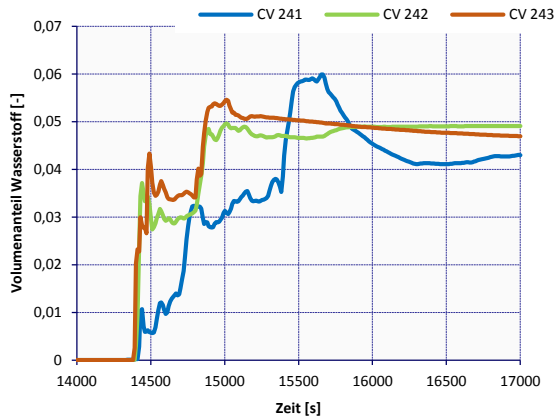


Diagramm 9: Wasserstoffkonzentration im Kuppelbereich / GASFLOW

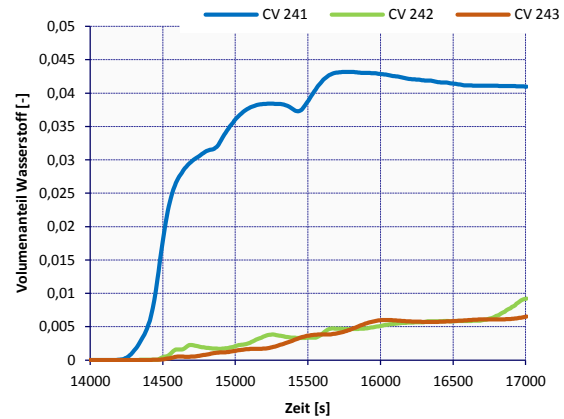


Diagramm 10: Wasserstoffkonzentration im Kuppelbereich/ grobe, vertikale Nodalisierung

Aufgrund der feineren Nodalisierung wird die Durchmischung gesteigert. Darum bleibt mehr Wasserstoff im Komponentenraum. Infolge dessen wird in CV 62 (Diagramm 12) ein höherer Wasserstoffanteil berechnet als in der früheren Rechnung in CV 6 (Diagramm 11). CV 62 repräsentiert den oberen Bereich des früheren CV 6. Dennoch bleibt der Anteil Wasserstoff mit höchstens 4,8 % deutlich niedriger als in GASFLOW (bis zu 8,3 %).

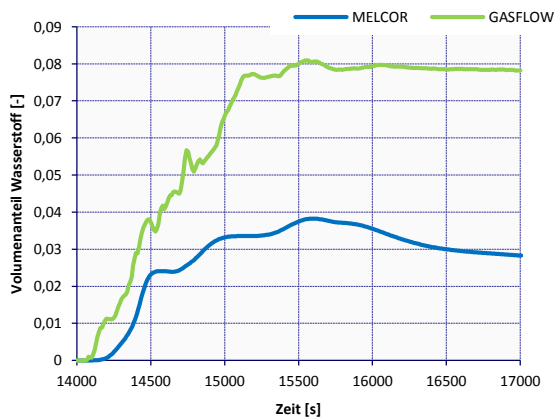


Diagramm 11: Wasserstoffkonzentration in CV 6 / typische, sehr grobe Nodalisierung

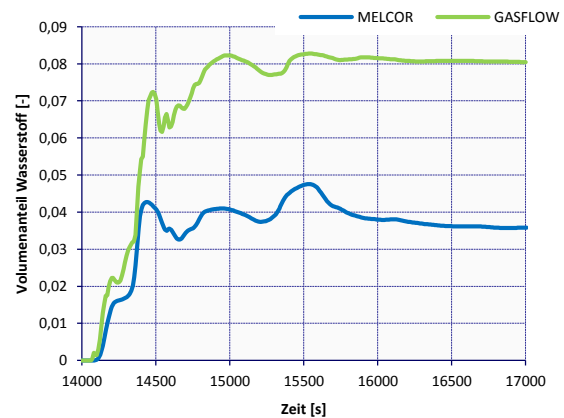


Diagramm 12: Wasserstoffkonzentration in CV 62 / grobe, vertikale Nodalisierung

Bei der Durchströmung der Berstscheiben ist erkennbar, dass im quellfernen und quellnahen Turm durch die verfeinerte Nodalisierung ein ähnlicher Durchfluss vorzufinden ist (siehe Diagramm 14). Dies war zuvor nicht der Fall, wie in Diagramm 13 zu sehen ist. Insofern besteht eine größere Übereinstimmung mit den Massenströmen in GASFLOW. Jedoch verstärkt sich der Kamineffekt insgesamt. Ursache hierfür ist, dass ein Großteil des Kuppelvolumens (CV 242, 243, 253, 253) nicht mehr am Kamineffekt teilnimmt. Stattdessen kommt es aufgrund des LP-Modells zu einem Verlust der Richtungsinformation und zu einer verstärkten,

#### 4 Nodalisierung eines generischen Sicherheitsbehälters

druckgetriebenen Strömung von CV 241 und CV 251 in tiefer liegende CV. Die Massenströme in MELCOR sind darum deutlich größer als in GASFLOW.

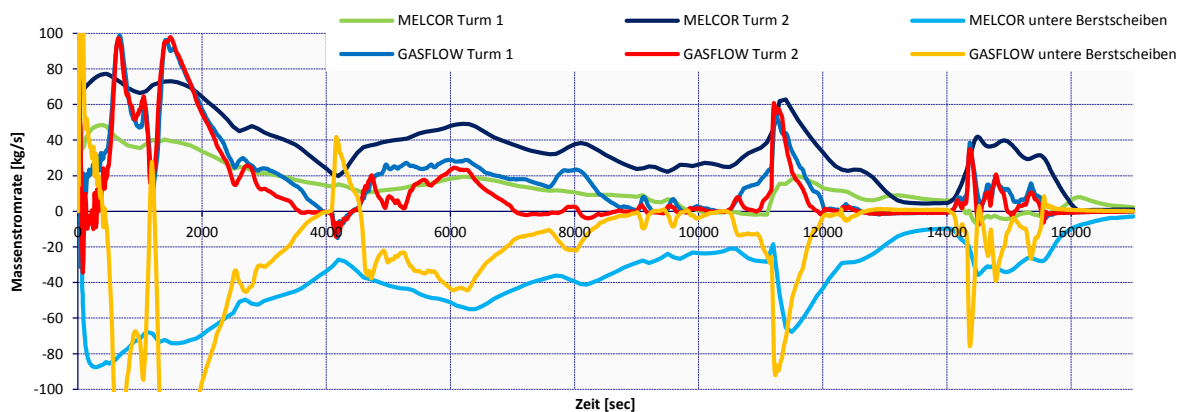


Diagramm 13: Durchströmern der Berstscheiben / typische, sehr grobe Nodalisierung

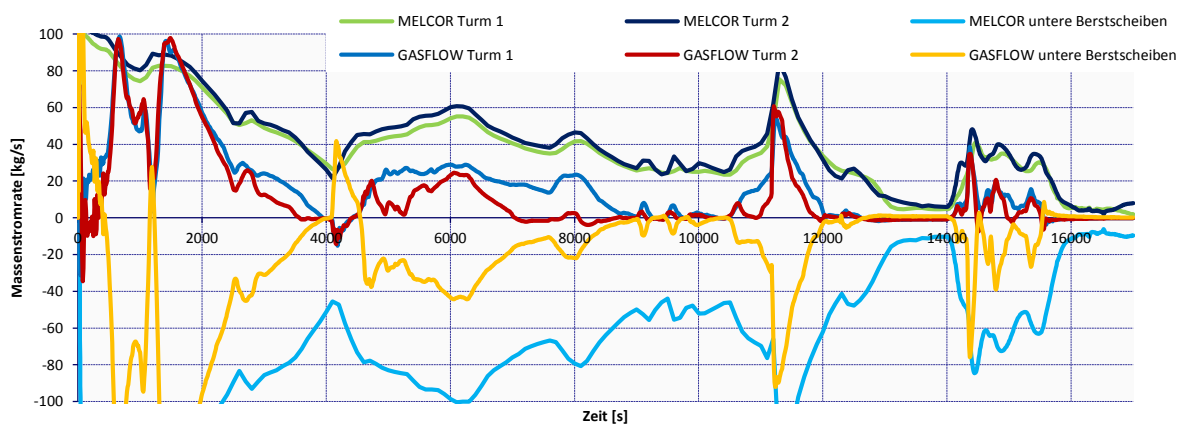


Diagramm 14: Durchströmern der Berstscheiben / grobe, vertikale Nodalisierung

Diagramm 15 zeigt den Druckverlauf in MELCOR im Vergleich zu GASFLOW für die ursprüngliche Nodalisierung. Diagramm 16 zeigt diese Drücke für die verfeinerte Nodalisierung. Durch den verstärkten Kamineffekt werden die äußeren Ringräume des Betriebsraums stärker durchströmt. Dort sind große Betonflächen vorhanden, an denen durch die stärkere Strömung mehr Wasserdampf kondensiert. Infolge dessen wird der Druck bis ca. 4 000 s im Sicherheitsbehälter etwas niedriger als zuvor berechnet. Nach wie vor besteht eine gute Übereinstimmung zum Druck in GASFLOW.



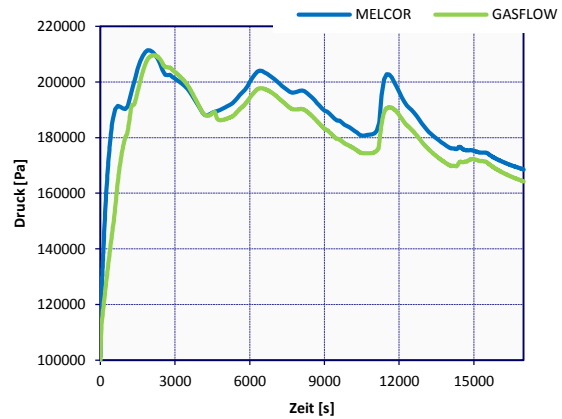
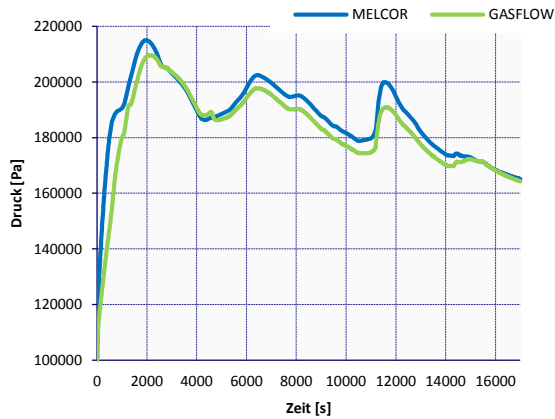


Diagramm 15: Druck / typische, sehr grobe Nodalisierung

Diagramm 16: Druck / grobe, vertikale Nodalisierung

### 4.3.2 Schlussfolgerung

Die grobe, vertikale Nodalisierung begünstigt eine verstärkte Strömung innerhalb des Komponentenraums, wodurch sich der Wasserstoff aus der Quelle dort besser verteilen kann. Dies führt auch zu einer stärkeren Durchströmung des quellfernen Turms.

Durch die verfeinerte Nodalisierung des Betriebsraums lässt sich eine Gasschichtung in der Kuppel prinzipiell auflösen (vgl. 3.2). Die in GASFLOW beobachtete Strömung in Form eines Freistrahls und dessen Einmischung lässt sich jedoch nicht erfassen. Aus diesem Grund ist in der Kuppel keine realistische Schichtung berechenbar. Zudem wird der bereits überschätzte Kamineffekt noch einmal verstärkt.

### 4.4 Horizontale Nodalisierung des Komponentenraums

Im weiteren Verlauf wird der Komponentenraum horizontal feiner nodalisiert (Abb. 4.6) um lokal die Wasserstoffkonzentrationen besser auflösen zu können. Dabei wird der Komponentenraum in sechs statt zwei Kontrollvolumina pro horizontaler Ebene unterteilt. Insgesamt kommen 16 CV, 52 FL und 18 HS hinzu. Die Quelle ist nun in CV 54 homogen verteilt, welches deutlich kleiner als das ursprüngliche CV 5 ist. Abb. 4.7 zeigt diese Nodalisierung in vertikalen Schnitt.

# 4 Nodalisierung eines generischen Sicherheitsbehälters

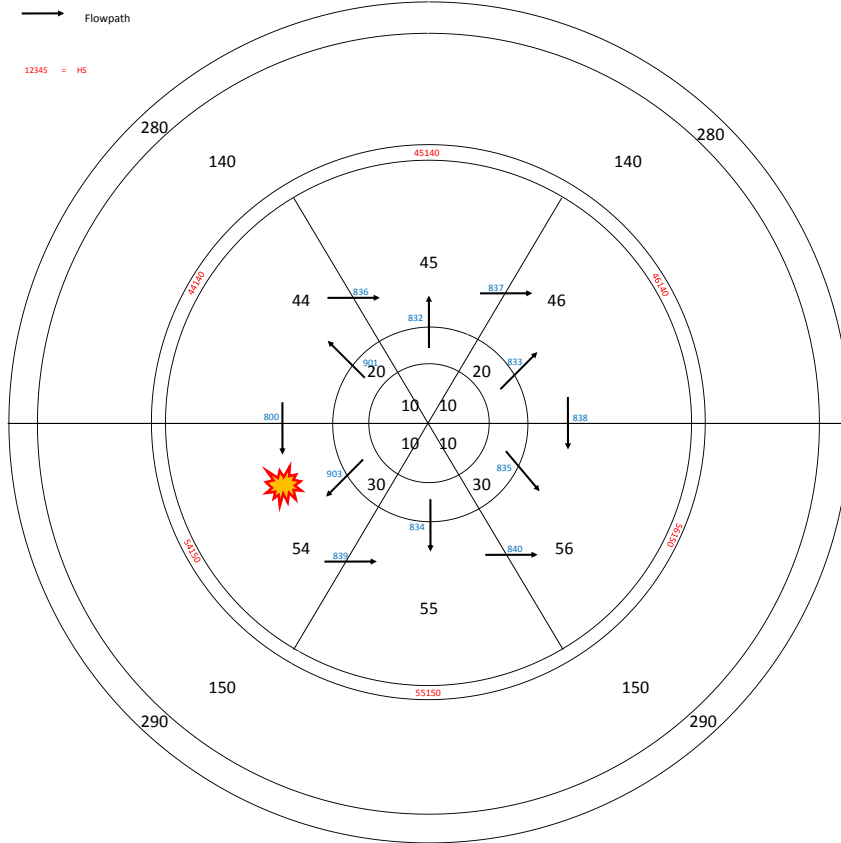


Abb. 4.6: Horizontale Nodalisierung des Komponentenraums (horizontaler Schnitt)

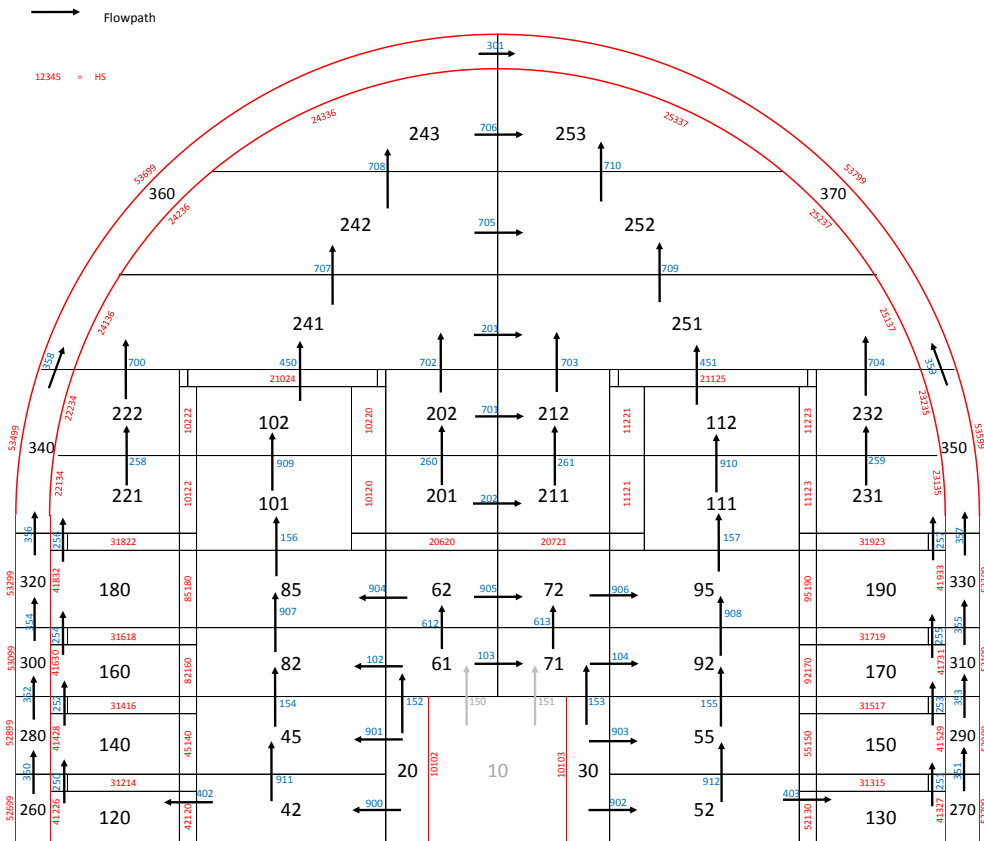
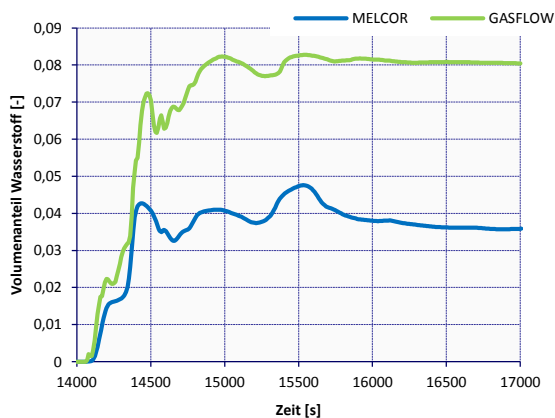


Abb. 4.7: Horizontale Nodalisierung des Komponentenraums (vertikaler Schnitt)

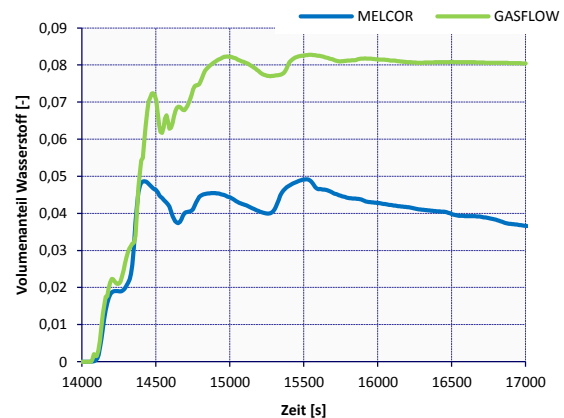
Die mittleren Kontrollvolumina 42, 45, 82, 85, 52, 55, 92 und 95 werden in ihrer Größe so gewählt, dass sie im Winkel mit den Kontrollvolumina 101 und 111 innerhalb der Türme übereinstimmen. Dies vereinfacht das Definieren der HS deutlich. Die unteren Berstscheiben werden durch diese Nodalisierung mit insgesamt 6 statt zuvor 2 FL simuliert.

#### 4.4.1 Rechenergebnisse und Diskussion

Diagramm 18 zeigt eine bessere Übereinstimmung der von MELCOR berechneten Wasserstoffkonzentration im CV 62 im Vergleich zu GASFLOW. Diagramm 17 zeigt das entsprechende Ergebnis, das mit der groben, vertikalen Nodalisierung aus dem letzten Kapitel berechnet wurde. Durch die feinere Nodalisierung stehen lokal exaktere Informationen beispielsweise über die Wasserstoffkonzentration zur Verfügung.



**Diagramm 17: Wasserstoffkonzentration in CV 62 / grobe, vertikale Nodalisierung**



**Diagramm 18: Wasserstoffkonzentration in CV 62 / horizontale Nodalisierung des Komponentenraums**

Die Wasserstoffmasse hat sich in Ihrer Verteilung in den zwei großen Räumen im Vergleich zu den Diagrammen 7 und 8 aus Kapitel 4.2 nicht signifikant verändert. Das deutet darauf hin, dass die vorherige grobe, vertikale Nodalisierung die Durchmischung im Komponentenraum bereits deutlich verstärkt hat. Die horizontale Richtung bringt demgegenüber keine verbesserte Modellierung der Strömungsphänomene.

Durch die größere Anzahl an Kontrollvolumen, die jeweils einen Formverlustbeiwert von 4 haben, steigt der Druckverlust der Strömung innerhalb des Komponentenraums. Dies führt zu einer geringeren Strömung durch die Berstscheiben und dadurch zu einem leicht abgeschwächten Kamineffekt. Diagramm 20 zeigt diesen Einfluss im Vergleich zu Diagramm 19.

## 4 Nodalisierung eines generischen Sicherheitsbehälters

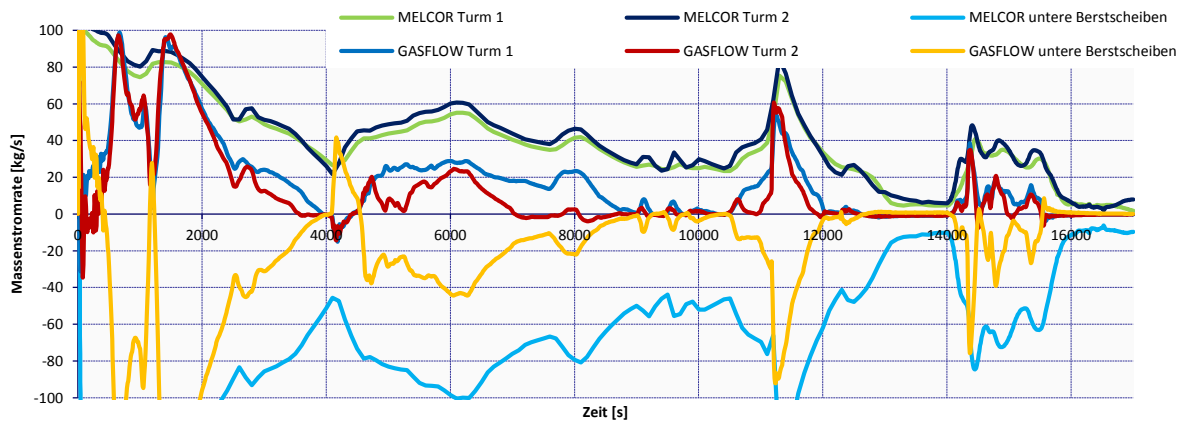


Diagramm 19: Durchströmraten der Berstscheiben / grobe, vertikale Nodalisierung

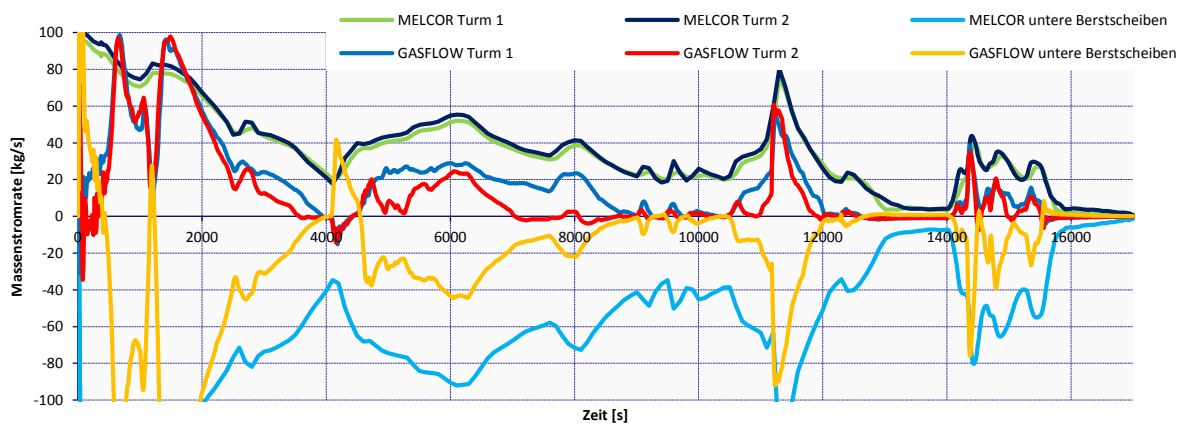


Diagramm 20: Durchströmraten der Berstscheiben / horizontale Nodalisierung des Komponentenraums

Die schwächere Ausströmung aus dem inneren Raum in den Betriebsraum führt zudem zu geringeren Wasserstoffkonzentrationen im Kuppelbereich.

Beim Druck sind nur sehr kleine Veränderungen im Vergleich zur vorherigen Nodalisierung feststellbar. Folglich gab es keine nennenswerten Änderungen der Kondensationsraten.

### 4.4.2 Schlussfolgerung

Es besteht nun die Möglichkeit Konzentrationen im Komponentenraum genauer aufzulösen. Darüber hinaus brachte dieser Nodalisierungsschritt nur wenige Verbesserungen. Der Kamineffekt hat sich leicht abgeschwächt.

## 4.5 Feine, vertikale Nodalisierung des Kuppelbereichs

Um die Gasschichtung in der Kuppel besser abzubilden und später mit einer Jet-Nodalisierung optimieren zu können, werden die Kontrollvolumina in der Kuppel nochmals vertikal unterteilt. Die Anzahl an Kontrollvolumina in vertikaler Richtung oberhalb der Türme wird von drei auf fünf erhöht. Somit gibt es 4 zusätzliche CV, 6 FL und 4 HS.

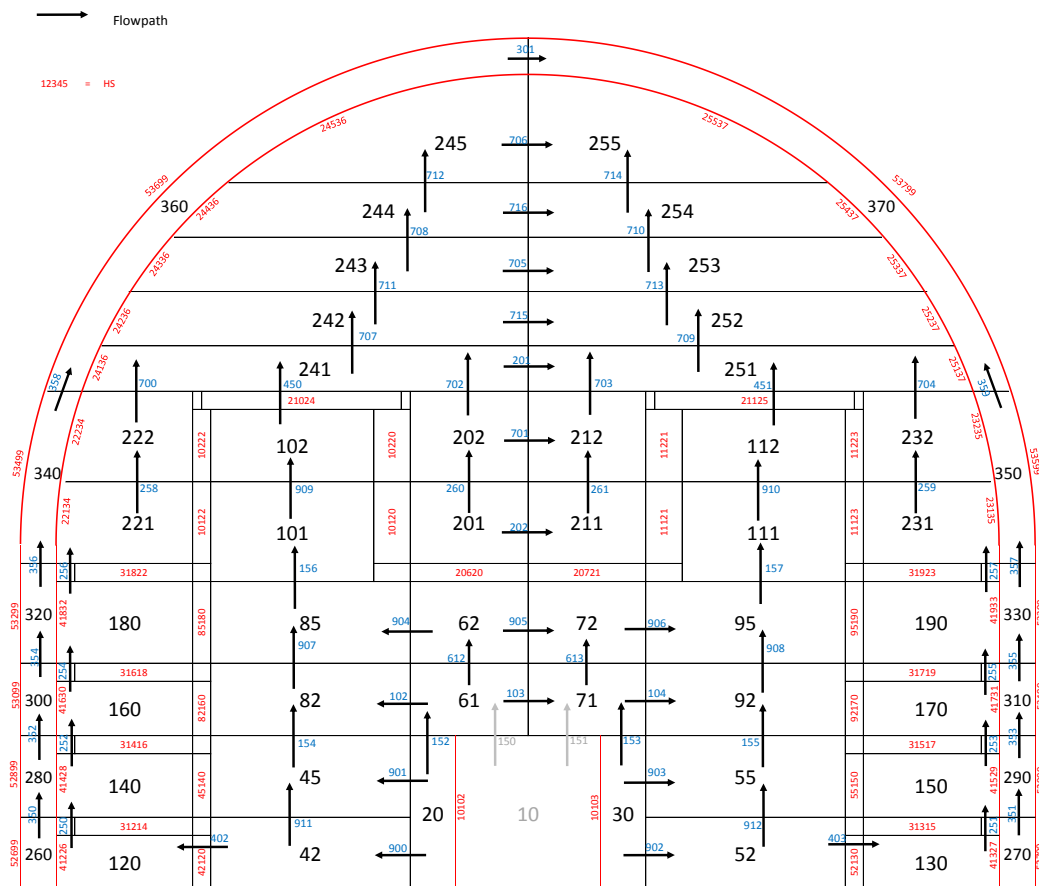


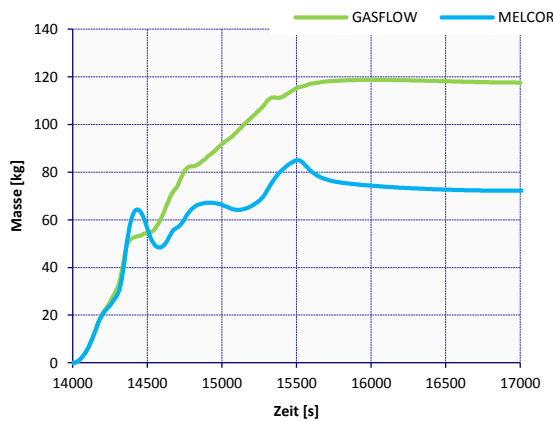
Abb. 4.8: Feine, vertikale Nodalisierung des Betriebsraums (vertikaler Schnitt)

### 4.5.1 Rechenergebnisse und Diskussion

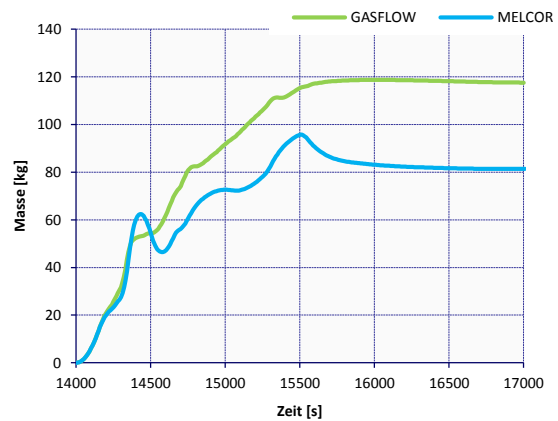
Diagramm 21 zeigt die Masse an Wasserstoff im Komponentenraum aus der bisherigen Nodalisierung. Diagramm 22 hingegen zeigt die Masse an Wasserstoff im Komponentenraum für die neue Nodalisierung mit vertikaler Verfeinerung im Betriebsraum. Es bleibt durch die Nodalisierung mehr Wasserstoff innen. Es ist nach wie vor ein starker Kamineffekt ohne Miteinbeziehung der oberen Kuppelvolumina vorhanden. Die am Kamineffekt beteiligten Kuppelvolumina 241 und 251 haben durch die Verfeinerung einen geringeren Rauminhalt. Die darüber liegenden CV nehmen weiterhin kaum am Kamineffekt teil, da die auftretende

#### 4 Nodalisierung eines generischen Sicherheitsbehälters

Gegenströmung ohne Jet-Zonen nicht berechenbar ist. Dadurch findet eine weniger starke Durchmischung des Wasserstoffes mit der Luft aus der Kuppel statt. Stattdessen fließt aufgrund des Kamineffekts mehr Wasserstoffmasse zurück in den Komponentenraum. Die erhöhte Masse an Wasserstoff im inneren Raum ist also nicht darauf zurückzuführen, dass weniger Wasserstoff ausströmt.



**Diagramm 21: Masse an Wasserstoff im Komponentenraum / horizontale Nodalisierung des Komponentenraums**



**Diagramm 22: Masse an Wasserstoff im Komponentenraum / feine, vertikale Nodalisierung des Kuppelbereichs**

Auf Grund der verfeinerten Nodalisierung lässt sich die Gasschichtung in der Kuppel in 5 Schichten aufzeigen. Diagramm 23 verdeutlicht die Volumenanteile an Wasserstoff für die Kuppelvolumina 241 bis 245 in GASFLOW. Diagramm 24 bildet die Wasserstoffkonzentrationen für die gleichen CV in MELCOR ab. Es zeigt sich, dass nur im unteren Kuppelvolumen 241 eine ähnliche Wasserstoffkonzentration wie in GASFLOW vorherrscht. Nach oben hin sinkt die Konzentration stark ab. Es ist mit dieser Nodalisierung nicht möglich eine Aufwärtsströmung oberhalb der Dampferzeugertürme zu realisieren, da gleichzeitig die Möglichkeit einer Abwärtsströmung gegeben sein muss. Es wird wiederum deutlich, dass es ohne spezielle Nodalisierung für einen Freistrahls mit MELCOR nicht möglich ist, Wasserstoff in den oberen Kuppelbereich zu befördern.

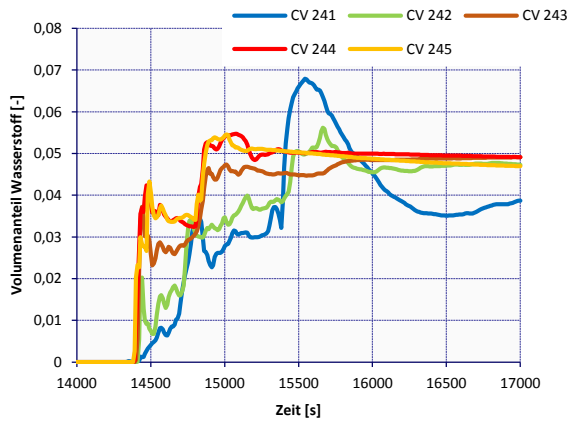


Diagramm 23: Wasserstoffkonzentrationen im Kuppelbereich / GASFLOW

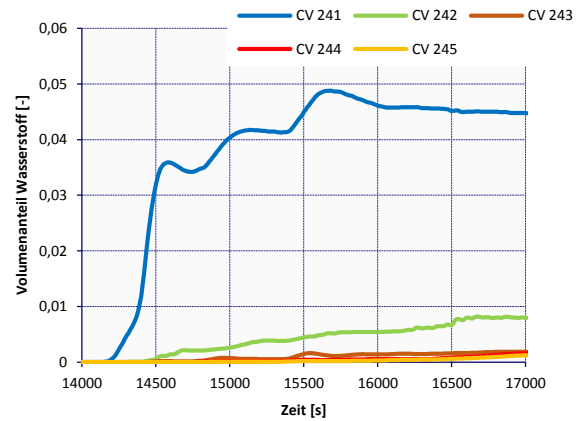


Diagramm 24: Wasserstoffkonzentrationen im Kuppelbereich / feine, vertikale Nodalisierung des Kuppelbereichs

Wie in Diagramm 22 gezeigt, bleibt mehr Wasserstoff im Komponentenraum. Darum liegt in CV 62 eine höhere Wasserstoffkonzentration vor (vgl. Diagramm 26 und 25), wobei diese weiterhin deutlich niedriger als ein lokaler Wert aus GASFLOW in diesem Raumbereich ist.

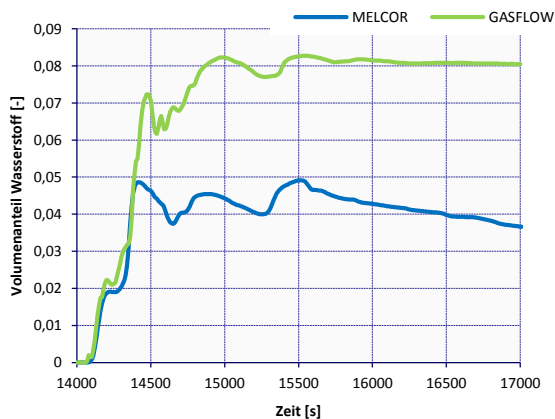


Diagramm 25: Wasserstoffkonzentration in CV 62 / horizontale Nodalisierung des Komponentenraums

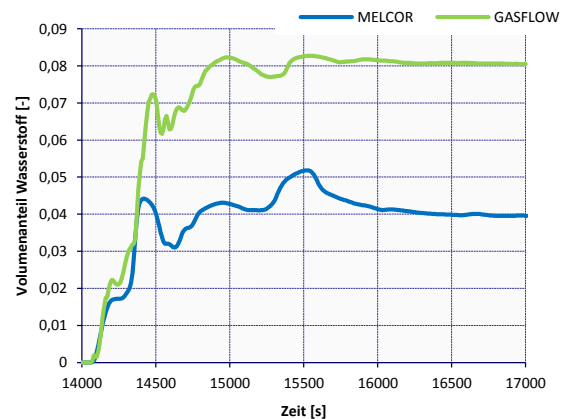


Diagramm 26: Wasserstoffkonzentration in CV 62 / feine, vertikale Nodalisierung des Kuppelbereichs

Ähnlich wie bei der ersten Verfeinerung im Kuppelbereich auf 3 CV in Kapitel 4.3.1 steigt die Durchflussrate an den Berstscheiben durch die verkleinerten Kontrollvolumina 241 und 251 über den Türmen und damit der Kamineffekt.

Durch den verstärkten Kamineffekt kondensiert mehr Wasserdampf in den Ringräumen, was zu geringerem Druck im Sicherheitsbehälter führt. Diagramm 28 zeigt diese Tendenz im Vergleich zu Diagramm 27.

## 4 Nodalisierung eines generischen Sicherheitsbehälters

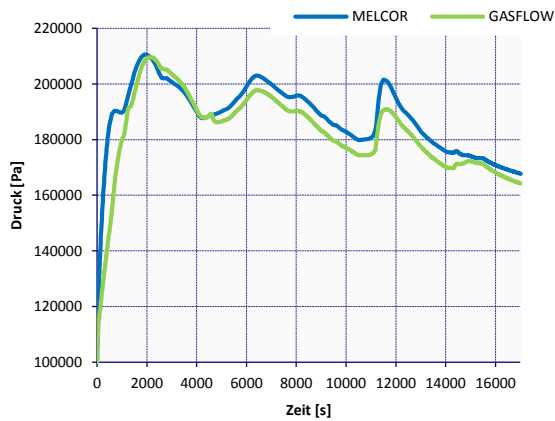


Diagramm 27: Druck / horizontale Nodalisierung des Komponentenraums

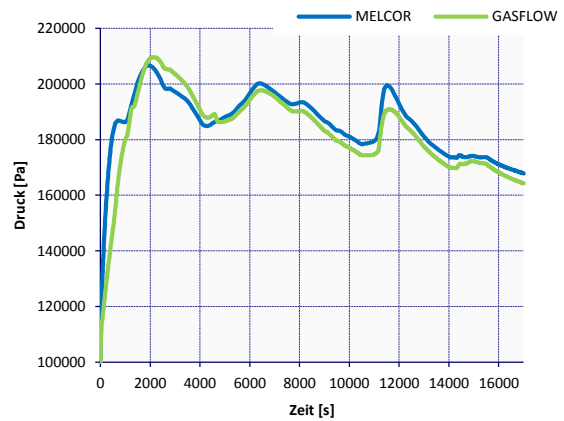


Diagramm 28: Druck / feine vertikale Nodalisierung des Kuppelbereichs

### 4.5.2 Schlussfolgerung

Diese Nodalisierung zeigt deutlich den verstärkenden Einfluss der vertikalen Verfeinerung in der Kuppel auf den Kamineffekt. Da diese Nodalisierung aber notwendig ist um eine gute Gasschichtung darstellen zu können, wird in Kapitel 4.7 durch eine spezielle Nodalisierung versucht den Freistrahle korrekt abzubilden.

### 4.6 Feine, vertikale Nodalisierung des Komponentenraums

Zunächst wird der Komponentenraum weiter vertikal verfeinert um die Durchmischung weiter zu verbessern und Gaskonzentrationen gezielter erfassen zu können. Die horizontale Nodalisierung unter den Türmen mit jeweils sechs Zellen pro Ebene bleibt erhalten (vgl. Abb. 4.6). Insgesamt wurden 32 neue CV, 82 FL und 32 neue HS angelegt.



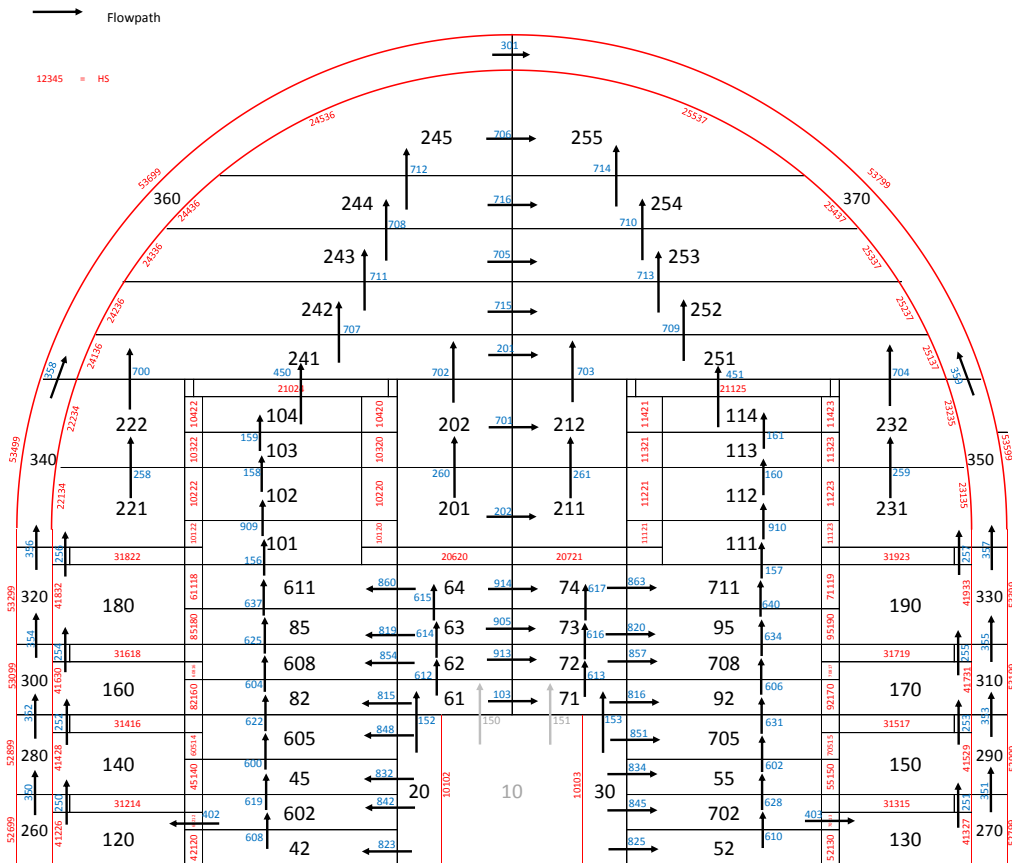


Abb. 4.9: Feine, vertikale Nodalisierung des Komponentenraums (vertikaler Schnitt)

#### 4.6.1 Rechenergebnisse und Diskussion

Die Wasserstoffmasse im Komponentenraum ist bei dieser Nodalisierung mit ca. 78,5 kg gegen Ende der Simulation nur wenig geringer als zuvor mit ca. 81,3 kg. Dadurch bleibt auch die Wasserstoffkonzentration im Kontrollvolumen 64 (ehemals 62 in Diagramm 26) nahezu identisch.

Wie in Kapitel 4.4.1 steigt auch bei dieser Verfeinerung durch die größere Anzahl an Kontrollvolumina und FL, die jeweils einen Formverlustbeiwert von 4 haben, der Druckverlust der Strömung innerhalb des Komponentenraums. Das schwächt wiederum den Kamineffekt und dadurch die Durchströmung durch die Berstscheiben. Die Änderungen sind allerdings nur geringfügig. Folglich strömt etwas weniger Wasserstoff in den oberen Kuppelbereich wie Diagramm 30 im Verhältnis zu Diagramm 29 zeigt.

## 4 Nodalisierung eines generischen Sicherheitsbehälters

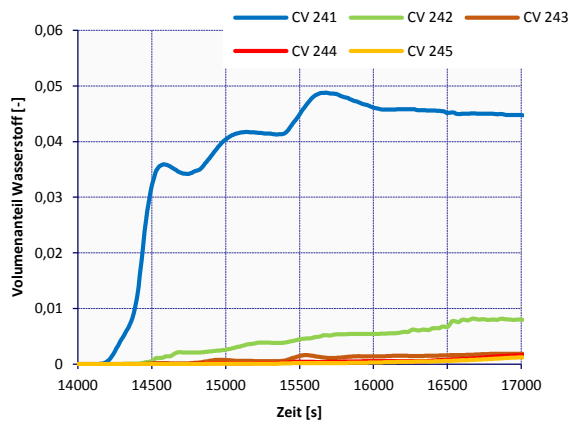


Diagramm 29: Wasserstoffkonzentration Kuppel / feine, vertikale Nodalisierung des Kuppelbereichs

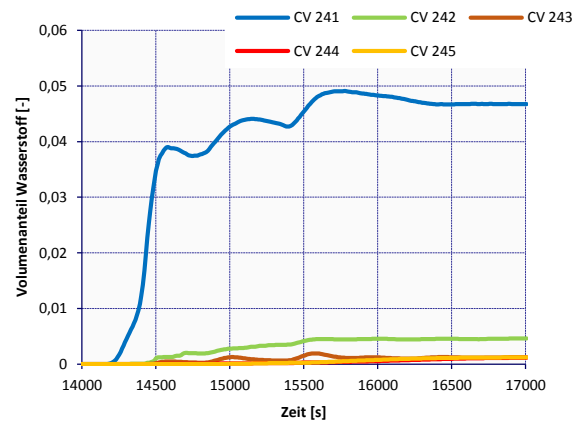


Diagramm 30: Wasserstoffkonzentration Kuppel / feine, vertikale Nodalisierung des Komponentenraums

Der Druck verringert sich bei dieser Nodalisierung ebenfalls nur wenig aufgrund geringerer Kondensation in den Ringräumen.

### 4.6.2 Schlussfolgerung

Die Verdoppelung der Kontrollvolumina im Komponentenraum verursacht nur geringfügige Veränderungen der globalen Strömung. In einem weiteren Schritt ist es Ziel, die Wasserstoffverteilung in der Kuppel besser darzustellen und den Kamineffekts realistischer zu berechnen.

### 4.7 Nodalisierung mit Jet-Zonen

Die Literaturrecherche in Kapitel 3 hat ergeben, dass es möglich ist mit speziellen Jet-Zonen Freistrah-Strömungen mit Lumped-Parameter-Codes nachzubilden. Diese Jet-Zonen bestehen aus übereinander gestapelten, kleinen Kontrollvolumina. Die Jet-Zonen werden in dem Gebiet vorgesehen, in dem Freistrahlen erwartet werden. In diesem Fall wurden sie über die Berstscheiben der Dampferzeugertürme gesetzt. Die Jet-Zonen haben nur kleine Kontaktflächen zu den umliegenden Kuppelvolumina. Dadurch findet nur ein geringer Massenaustausch statt, sodass der Großteil des Massenstroms weiter nach oben befördert wird. Die Abweichung der Wasserstoffanteile in der Kuppel, die mit früheren Nodalisierungen berechnet wurden gegenüber dem GASFLOW Ergebnis, machen diese Nodalisierung notwendig. Daraufhin wurde die in Abb. 4.10 im vertikalen Schnitt gezeigte Nodalisierung mit Jet-Zonen entwickelt. Gegenüber der vorherigen Nodalisierung wurden 8 CV und 14 FL ergänzt.

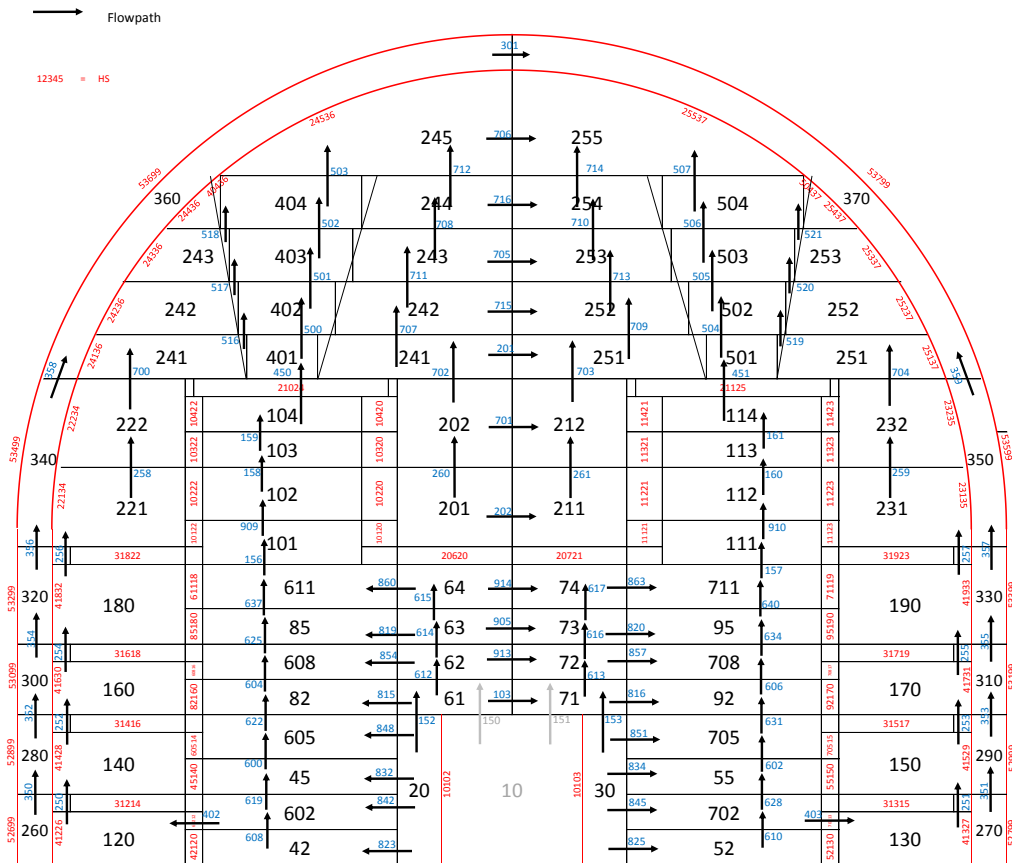


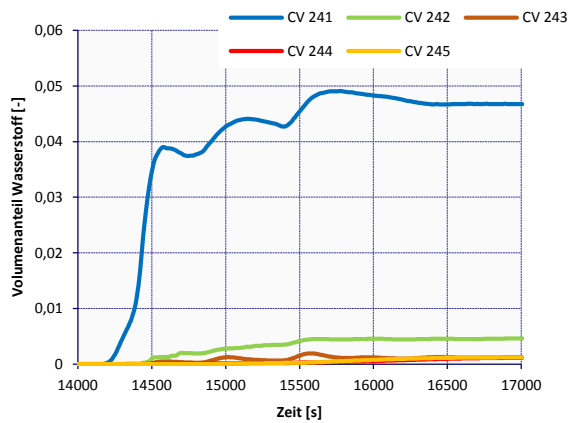
Abb. 4.10: Nodalisierung mit Jet-Zonen (vertikaler Schnitt)

Die Jet-Zonen haben keine direkten großflächigen Verbindungen zu den jeweiligen CV derselben Höhe im Kuppelbereich. Stattdessen findet die Interaktion der Aufwärtsströmung mit dem übrigen Gas im Kuppelbereich erst jeweils eine Ebene höher durch eine kleine Kontaktfläche statt. Beispielsweise ist die Jet-Zone 401 nicht mit dem CV 241 derselben Höhe verbunden. Jedoch gibt es eine Ebene höher, durch den FL 516 mit kleinem Querschnitt, eine Verbindung der Jet-Zone 402 mit dem Kuppelvolumen 241.

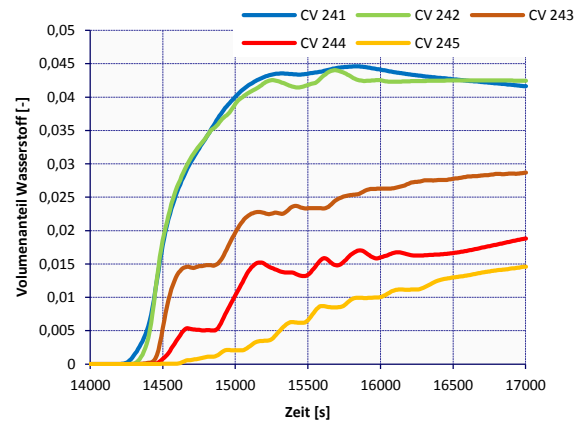
#### 4.7.1 Rechenergebnisse und Diskussion

Durch die Jet-Nodalisierung wird deutlich mehr Wasserstoff in die oberen Kuppelvolumina transportiert. Dadurch steigen dort die Wasserstoffkonzentrationen erheblich an. Wie Diagramm 34 zeigt, sinkt der Volumenanteil an Wasserstoff stufenweise nach oben hin. Im Vergleich zu Diagramm 31 ohne Jet-Zonen liegen die Werte mit Jet-Zonen (Diagramm 32) deutlich näher an den genaueren Ergebnissen aus GASFLOW aus Diagramm 23.

#### 4 Nodalisierung eines generischen Sicherheitsbehälters

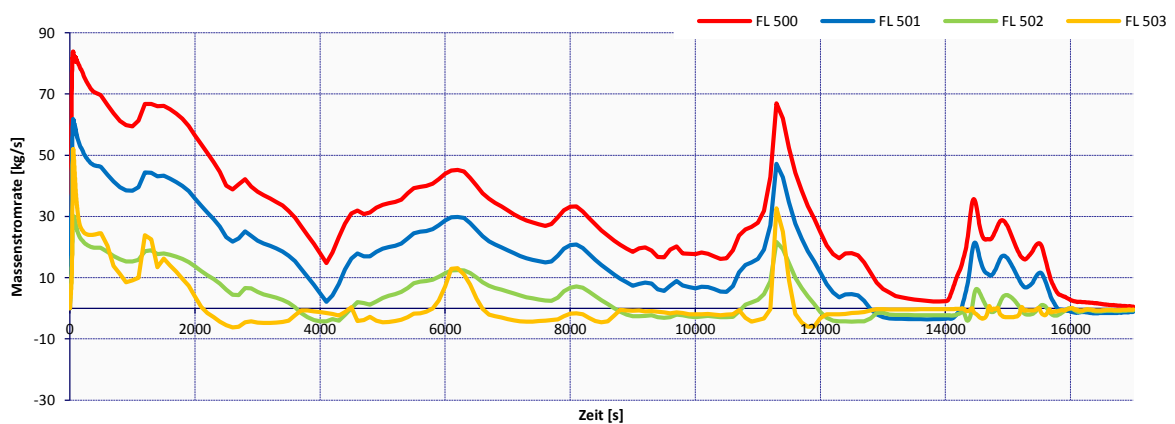


**Diagramm 31: Wasserstoffkonzentration im Kuppelbereich / feine, vertikale Nodalisierung des Komponentenraums**



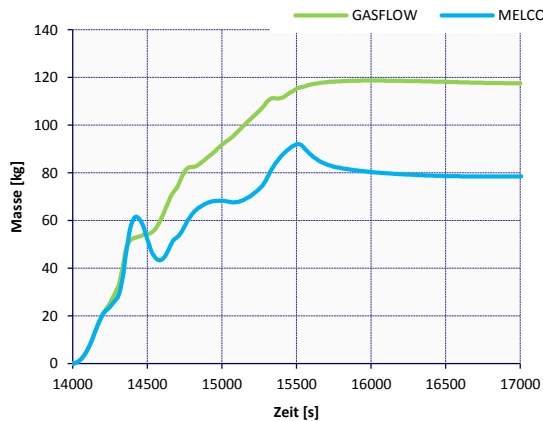
**Diagramm 32: Wasserstoffkonzentration im Kuppelbereich / Nodalisierung mit Jet-Zonen**

Diagramm 33 zeigt die Durchflussraten der FL, die die Jet-Zonen verbinden. Es ist zu erkennen, dass der Durchfluss von unten nach oben stufenweise absinkt. Das bedeutet, dass in jeder Ebene ein Teil des Massenstroms an die umliegenden Kuppelkontrollvolumina abgegeben wird. Zuvor war der Massenstrom nach oben hin nahezu null wie an den Wasserstoffkonzentrationen aus Diagramm 31 zu erkennen ist. Bei realen Freistrahlen kommt es jedoch zu einer Mitnahme des umgebenden Gases durch die Viskosität. Dies führt zu einer Aufweitung des Strahls und zu nach oben hin zunehmenden Gesamtmassenströmen. Aufgrund der Vernachlässigung der Viskosität in der Impulserhaltungsgleichung lässt sich die Mitnahme jedoch nicht berücksichtigen. Stattdessen kommt es aufgrund des Impulsverlustes zu einer umgekehrten, druckgetriebenen Strömung von den Jet-Zonen in benachbarte Kuppelkontrollvolumina.

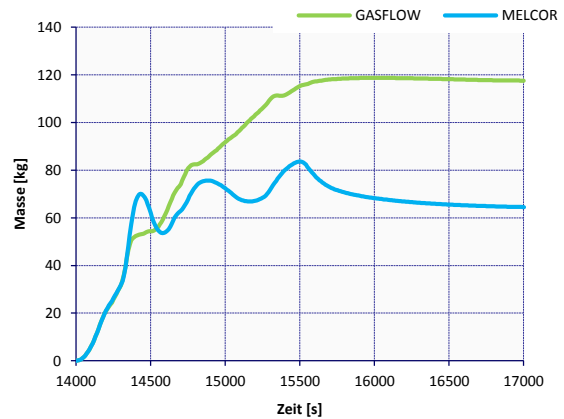


**Diagramm 33: Durchströmraten durch die FL der Jet-Zonen / Nodalisierung mit Jet-Zonen**

Die Tatsache, dass bei dem vorliegenden Kamineffekt bei dieser Nodalisierung die oberen Kuppelvolumina berücksichtigt werden, führt zu einer effektiveren Verteilung des Wasserstoffs im Kuppelbereich. Infolge dessen strömt jedoch ein wasserstoffärmeres Gemisch in den Komponentenraum zurück. In Diagramm 35 für die Nodalisierung mit Jet-Zonen ist die Wasserstoffmasse im Komponentenraum deshalb geringer als in Diagramm 34.

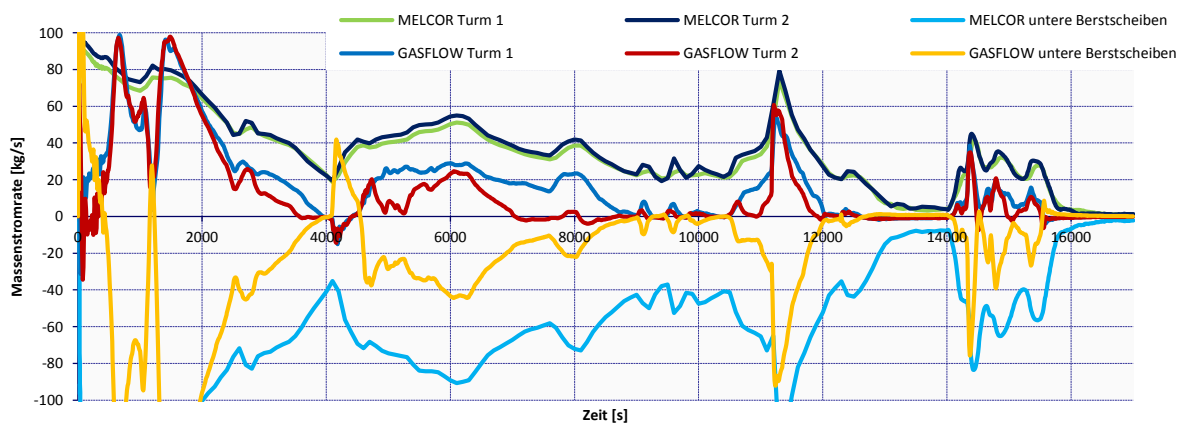


**Diagramm 34: Masse an Wasserstoff im Komponentenraum / feine vertikale Nodalisierung des Komponentenraums**



**Diagramm 35: Masse an Wasserstoff im Komponentenraum / Nodalisierung mit Jet-Zonen**

Der Durchfluss durch die Berstscheiben (vgl. Diagramm 37 mit 36) ist kleiner geworden. Durch die Jet-Nodalisierung wird in MELCOR der gesamte Kuppelbereich in die großräumige Strömung des Kamineffekts einbezogen. Dadurch wird ein größeres Gasvolumen bewegt, sodass mehr Strömungsverluste auftreten. Infolge dessen treten geringere Strömungsgeschwindigkeiten auf, sodass sich der Kamineffekt abschwächt. Dies äußert sich beispielsweise in verringerten Massenströmen durch die Berstscheiben.



**Diagramm 36: Durchströmraten der Berstscheiben / feine, vertikale Nodalisierung des Komponentenraums**

## 4 Nodalisierung eines generischen Sicherheitsbehälters

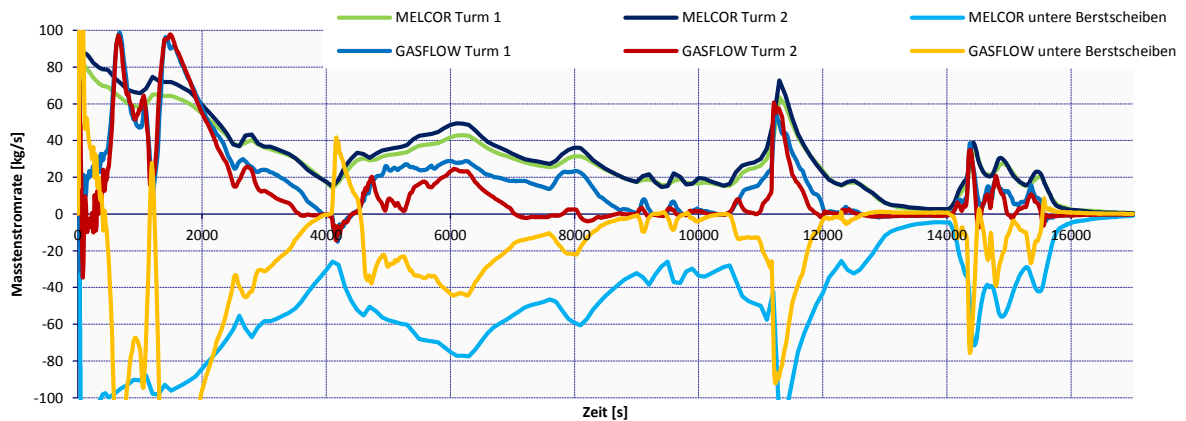


Diagramm 37: Durchströmraten der Berstscheiben / Nodalisierung mit Jet-Zonen

Durch die Einbeziehung der Kuppelvolumina in den Kamineffekt herrscht eine zusätzlich Kondensation an der Kuppeloberfläche vor. Allerdings überwiegt die durch den abgeschwächten Kamineffekt verringerte Kondensation in den Ringräumen, sodass der Druck der neuen Nodalisierung in Diagramm 39 im Vergleich mit der vorherigen Nodalisierung aus Diagramm 38 leicht gestiegen ist.

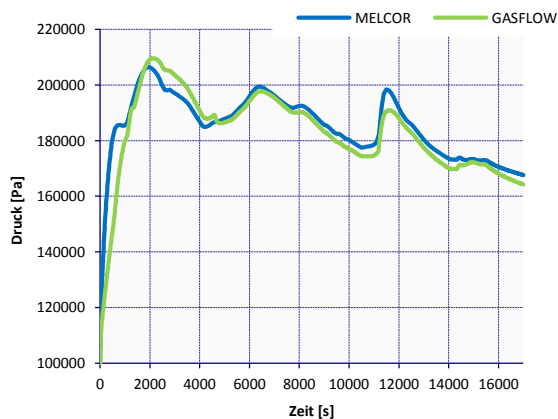


Diagramm 38: Druck / feine, vertikale Nodalisierung des Komponentenraums

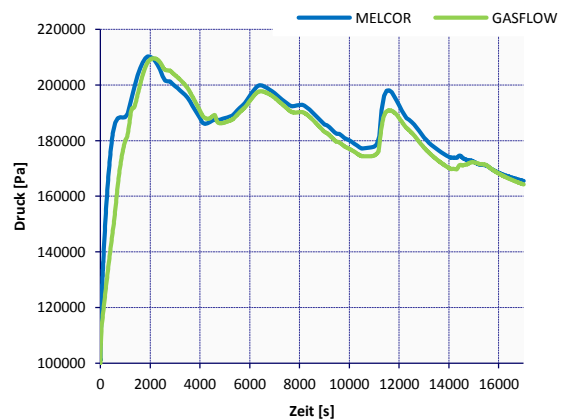


Diagramm 39: Druck / Nodalisierung mit Jet-Zonen

### 4.7.2 Schlussfolgerung

Durch die Jet-Nodalisierung kann der Massenstrom in die oberen Kuppelvolumina gesteigert werden. Trotz der verringerten Ausströmung des wasserstoffreichen Gemisches aus dem Komponentenraum berechnet MELCOR dort eine geringere Wasserstoffmasse. Dies ist auf die Einströmung des wasserstoffärmeren Gemisches, das im Kuppelbereich verdünnt wird, zurückzuführen. In Kapitel 4.9 wird versucht den nach wie vor zu starken Kamineffekt mit einer

Anpassung des einheitlichen Formverlustbeiwertes entgegen zu wirken. Da die Wasserstoffkonzentrationen in den oberen Kuppelvolumina immer noch zu niedrig sind, wird im nächsten Schritt in Kapitel 4.8 eine Anpassung an den Jet-Zonen vorgenommen, welche eine nochmals verstärkte Aufwärtsströmung bewirken soll.

## 4.8 Optimierte Jet-Nodalisierung

Die FLs, die eine Verbindung zwischen den Jet-Zonen und den umliegenden Kuppelvolumina herstellen, werden geschlossen (vgl. Abb. 4.11). Dadurch werden die Freistrahlen oberhalb der Berstscheiben der Dampferzeugertürme gezwungen bis in die höchsten CV 245 bzw. 255 zu fließen, bevor sie sich in der Kuppel einmischen können.

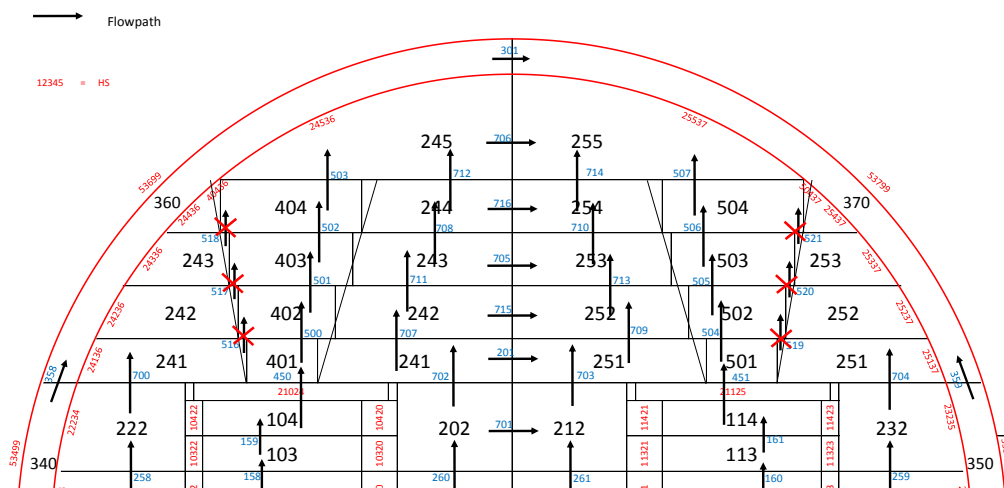


Abbildung 4.11: Nodalisierung mit Jet-Zonen (vertikaler Schnitt)

### 4.8.1 Rechenergebnisse und Diskussion

Mit dieser verbesserten Nodalisierung ist es erstmals gelungen, die Wasserstoffkonzentrationen im Kuppelbereich realistischer zu berechnen. Diagramm 41 zeigt die Konzentrationen in MELCOR für die neue Nodalisierung, Diagramm 40 die Ergebnisse aus GASFLOW. Auch in den oberen Kuppelvolumina erreicht MELCOR nun deutlich höhere Werte. Der Wasserstoff verteilt sich nach ca. 16 000 s homogen im gesamten Kuppelbereich. Auch in GASFLOW ist der Wasserstoff in diesem Zeitraum weitgehend homogen verteilt. Mit ca. 4,4 % liegen die Werte in MELCOR knapp unter den Werten von GASFLOW im Bereich von 4,8 %.

#### 4 Nodalisierung eines generischen Sicherheitsbehälters

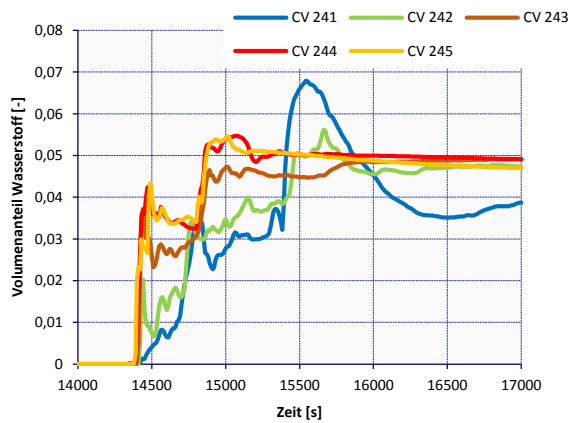


Diagramm 40: Wasserstoffkonzentrationen im Kuppelbereich / GASFLOW

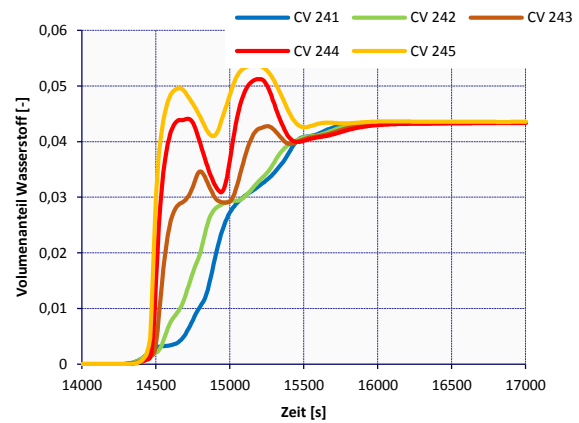


Diagramm 41: Wasserstoffkonzentrationen im Kuppelbereich / Optimierte Jet-Nodalisierung

Diagramm 43 zeigt, dass der Kamineffekt im Vergleich zur Jet-Nodalisierung ohne geschlossene FLs in Diagramm 42 weiterabgeschwächt wurde. Die bei jeder Nodalisierung beobachtete Tendenz, dass durch den quellnahen Turm eine stärkere Strömung vorliegt als durch den quellfernen Turm, ist bei dieser Nodalisierung wieder besonders ausgeprägt. Grund hierfür ist, dass beide Freistrahlen in die oberen Kuppelvolumen 245 und 255 geleitet werden. Dort drücken sie gewissermaßen gegen einander, da der Massenstrom ausgehend von CV 255 nur nach unten oder ins CV 245 weiterfließen kann.

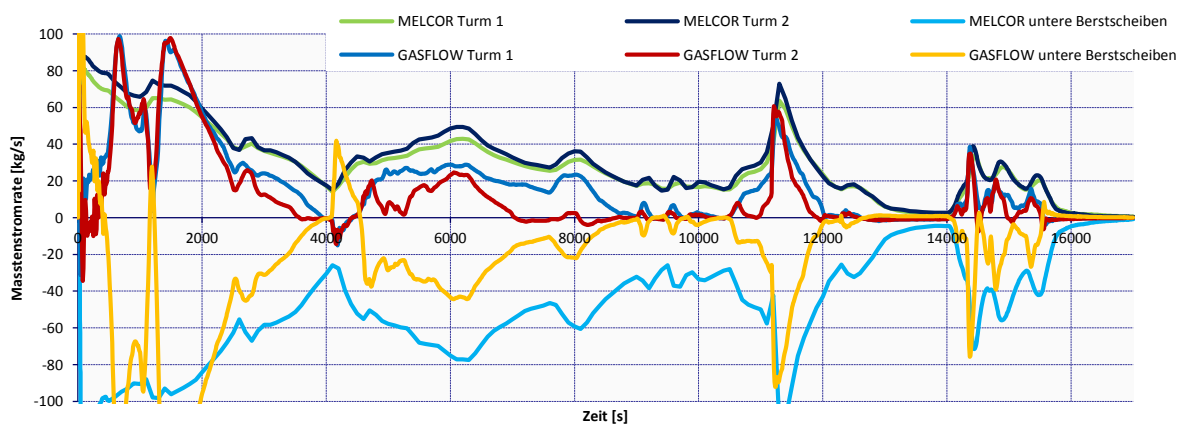


Diagramm 42: Durchströmraten der Berstscheiben / Nodalisierung mit Jet-Zonen



#### 4 Nodalisierung eines generischen Sicherheitsbehälters

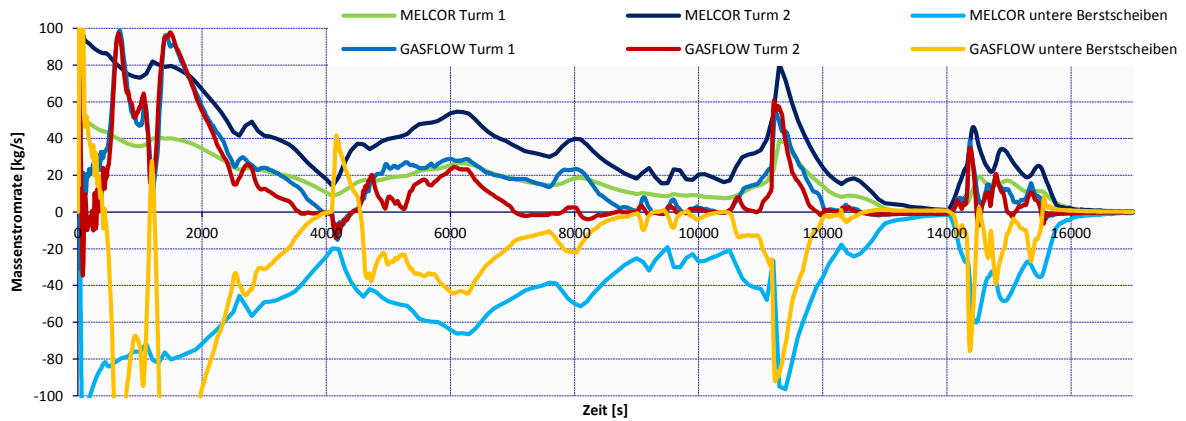


Diagramm 43: Durchströmraten der Berstscheiben / Optimierte Jet-Nodalisierung

Wie in Kapitel 4.7.1 strömt auch hier weniger Wasserstoff durch die unteren Berstscheiben zurück in den Komponentenraum, sodass sich dort weniger Wasserstoffmasse befindet. Zudem ist die Ausströmung durch den quellfernen Turm reduziert. Die veränderten Durchströmraten durch die Berstscheiben führen zu kleinen Abweichungen der Wasserstoffmassen, wie durch den Vergleich der Diagramme 45 und 44 zu erkennen ist.

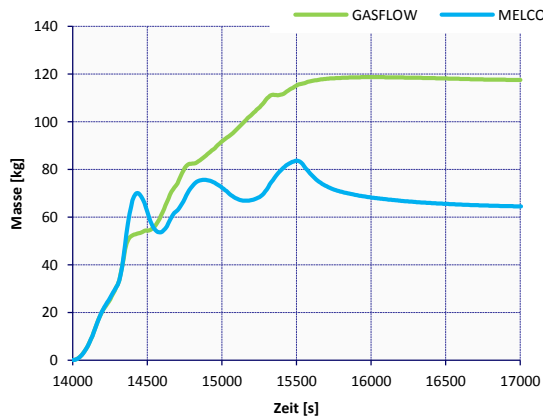


Diagramm 44: Masse an Wasserstoff im Komponentenraum / Nodalisierung mit Jet-Zonen

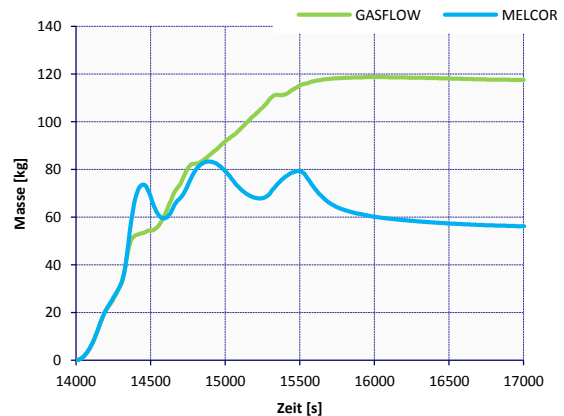


Diagramm 45: Masse an Wasserstoff im Komponentenraum / Optimierte Jet-Nodalisierung

Der höhere Druck in Diagramm 47 im Verhältnis zu Diagramm 46 kommt durch die weniger starke Kondensation in den Ringräumen zu Stande. Dies ist durch die geringere Geschwindigkeit in den Ringräumen aufgrund des abgeschwächten Kamineffekts erklärbar.

## 4 Nodalisierung eines generischen Sicherheitsbehälters

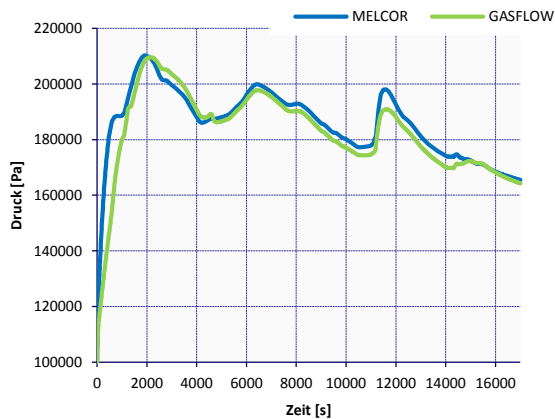


Diagramm 46: Druck / Nodalisierung mit Jet-Zonen

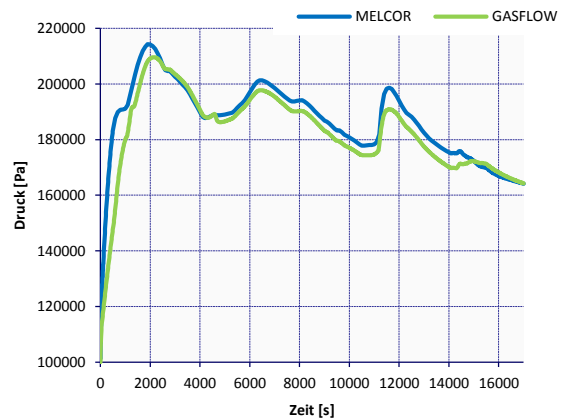


Diagramm 47: Druck / Optimierte Jet-Nodalisierung

### 4.8.2 Schlussfolgerung

Die gezeigte Optimierung der Jet-Nodalisierung bewirkt deutliche Veränderungen in den Ergebnissen von MELCOR. Mit ihr ist es möglich einen Freistrah in einem Integralcode mit Lumped-Parameter-Ansatz nachzubilden und dadurch Masse bis in den oberen Kuppelbereich zu befördern. Allerdings wird dadurch der Durchfluss durch die Berstscheiben des quellfernen Turms stark vermindert, was nicht im Einklang mit den Ergebnissen aus GASFLOW steht.

Eine weitere Verfeinerung der Nodalisierung im Kuppelbereich könnte das direkte gegeneinander Wirken der Freistrahlen verhindern. Diese müsste mindestens einen zusätzlichen Strömungspfad, bestehend aus CV und FL, aus den oberen Kuppelvolumina 245 und 255 in untere Bereiche bereitstellen.

Der Kamineffekt ist insgesamt abgeschwächt, was dem Ergebnis aus GASFLOW näher kommt. Im nächsten Schritt werden die Formverlustbeiwerte angepasst, um die Ausprägung des Kamineffekts auf das Niveau von GASFLOW zu senken und mehr Wasserstoff im Komponentenraum zu halten.

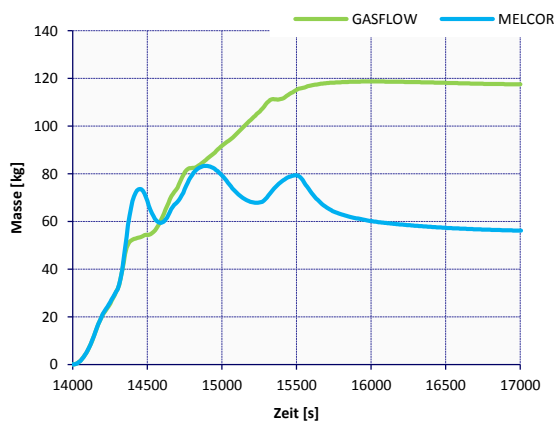
Anstatt die FL 516 bis 521 (Abb. 4.11) zu blockieren, könnte man auch mit Gebläsen oder künstlichen Massequellen und Senken arbeiten, um die Mitnahme des umgebenden Gases durch den Freistrah zu simulieren. Zu diesem Zweck müssten geeignete Korrelationen in der Literatur recherchiert werden (GRS [20]) und mit Hilfe von MELCOR-Control-Funktionen implementiert werden. Diese Vorgehensweise müsste anhand von Freistrah-Experimenten validiert werden

## 4.9 Einfluss der Formverlustbeiwerte

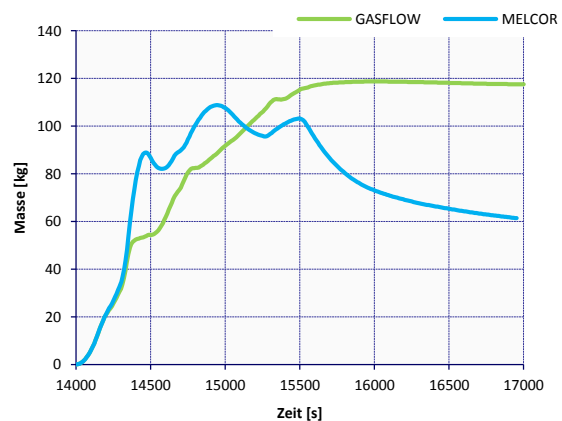
Durch die frei wählbaren Formverlustbeiwerte ist es dem Benutzer möglich künstlich Druckverluste zu erhöhen oder zu senken. In diesem Fall werden die Druckverluste erhöht, um die globale Strömung im Sicherheitsbehälter zu schwächen, auf diese Weise mehr Wasserstoff im Komponentenraum zu halten und dadurch realistischere Ergebnisse zu erhalten. Zu diesem Zweck werden die Formverlustbeiwerte von 4 auf 15 gesetzt.

### 4.9.1 Rechenergebnisse und Diskussion

Die erhöhten Formverlustbeiwerte steigern die Druckverluste im Komponentenraum und verringern dadurch die Ausströmung durch die Berstscheiben. In Folge dessen wird Wasserstoff zurückgehalten, was in Diagramm 49 zu sehen ist. Die Werte für die Wasserstoffmasse im inneren Raum sind im Vergleich zur Rechnung mit den geringen Formverlustbeiwert 4 (Diagramm 48) deutlich näher an den Ergebnissen aus GASFLOW. Die deutliche Abnahme der dort vorhandenen Wasserstoffmasse nach Ende der Wasserstoffeinspeisung bei 15 500 s in MELCOR kommt durch den anhaltenden Kamineffekt zu Stande.



**Diagramm 48: Masse an Wasserstoff im Komponentenraum / Optimierte Jet-Nodalisierung**



**Diagramm 49: Masse an Wasserstoff im Komponentenraum / Nodalisierung mit erhöhten Formverlustbeiwerten**

Die Wasserstoffkonzentration für das CV 64 (siehe Diagramm 51) wird durch die Parameteranpassung ebenfalls genauer getroffen und hat bis zu einem Zeitpunkt von ca. 15 300 s eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus der GASFLOW-Rechnung. Bei den vorangegangenen Nodalisierungen wird die Wasserstoffkonzentration im Komponentenraum für ein ausgewähltes CV immer deutlich unterschätzt (vgl. Diagramm 50).

#### 4 Nodalisierung eines generischen Sicherheitsbehälters

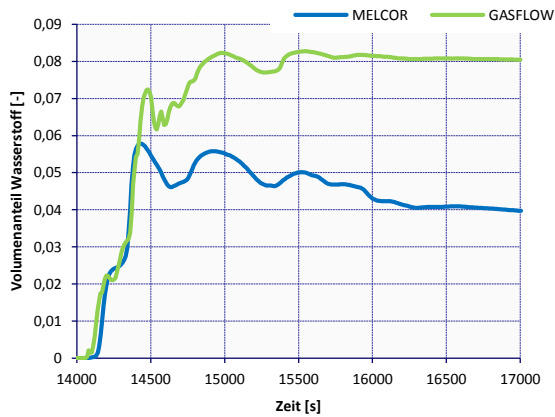


Diagramm 50: Wasserstoffkonzentration in CV 64 / Optimierte Jet-Nodalisierung

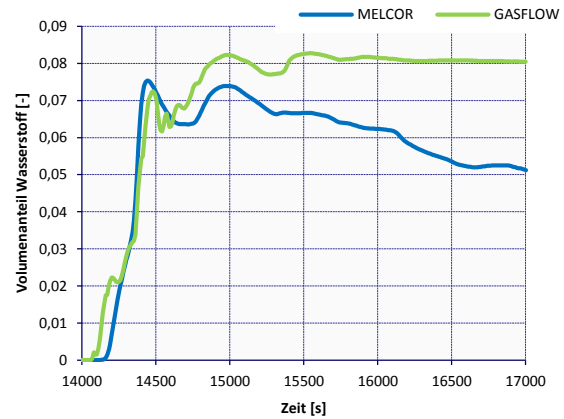


Diagramm 51: Wasserstoffkonzentration in CV 64 / Nodalisierung mit erhöhten Formverlustbeiwerten

Aufgrund der erhöhten Druckverluste fällt die Durchströmung an den Berstscheiben (vgl. Diagramm 52) geringer aus. Sie stimmt deutlich besser mit der Durchströmung in GASFLOW überein als beim ursprünglichen Integralmodell aus Kapitel 4.2. Die Tatsache, dass in MELCOR durch den quellfernen Turm 1 fälschlicherweise erheblich weniger Masse strömt als im quellnahen Turm 2, hat aber weiterhin Bestand.

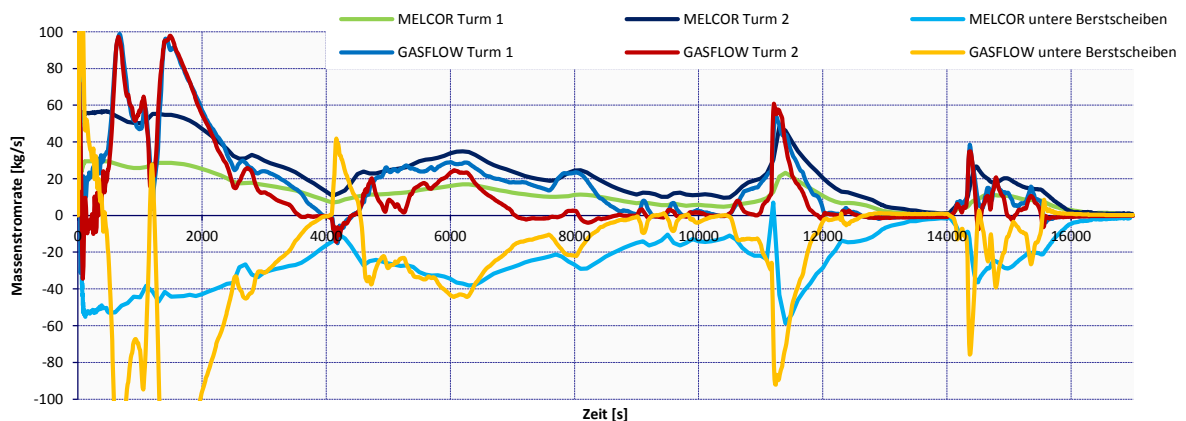
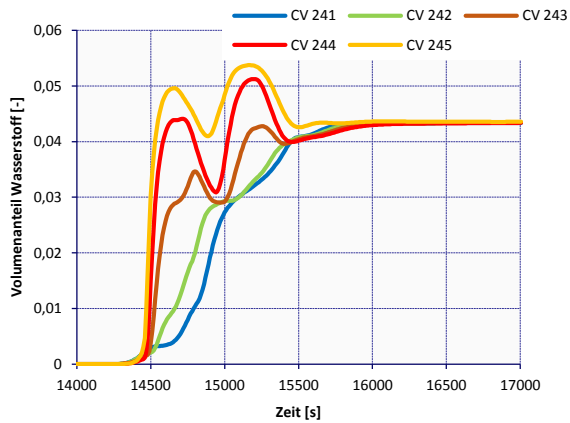


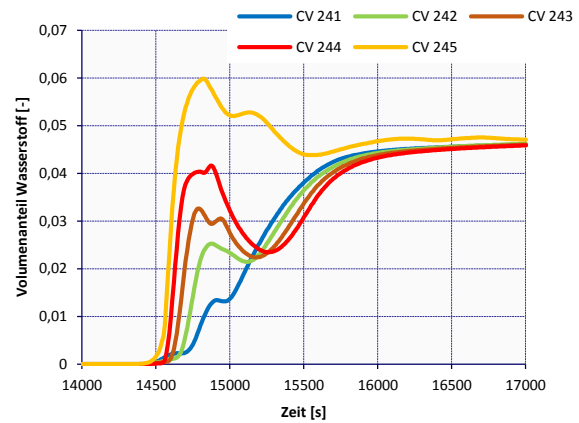
Diagramm 52: Durchströmraten der Berstscheiben / Nodalisierung mit erhöhten Formverlustbeiwerten

Die homogene Verteilung des Wasserstoffs im Kuppelbereich bleibt bestehen. Allerdings stellt diese sich durch die langsamere Strömung, aufgrund der erhöhten Formverlustbeiwerte, erst zu einem späteren Zeitpunkt ein (siehe Diagramm 54 im Vergleich zu Diagramm 53).

## 4 Nodalisierung eines generischen Sicherheitsbehälters

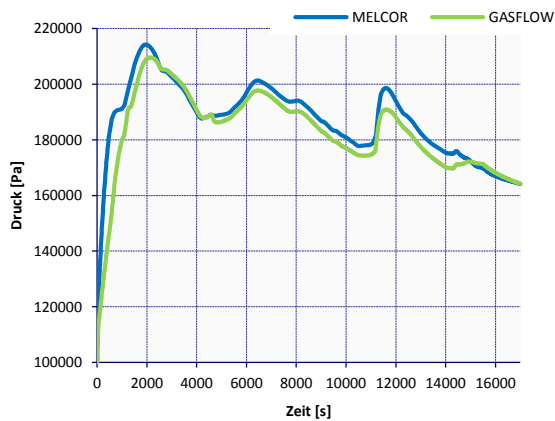


**Diagramm 53: Wasserstoffkonzentration im Kuppelbereich / Optimierte Jet-Nodalisierung**

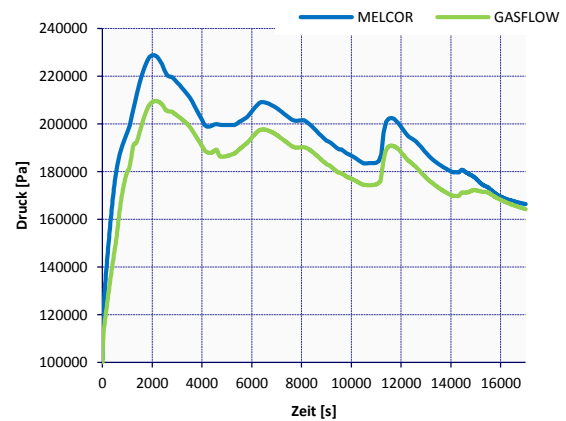


**Diagramm 54: Wasserstoffkonzentration im Kuppelbereich / Nodalisierung mit erhöhten Formverlustbeiwerten**

Ein Nachteil dieser Parameteranpassung ist beim Druck in Diagramm 56 zu sehen. Der Durchfluss durch die Berstscheiben und damit die globale Strömung in Form des Kamineffekts ist realistischer geworden. Jedoch schwächt sich die Kondensation in den Ringräumen ab, woraufhin sich der Druck im Vergleich zur selben Nodalisierung mit niedrigeren Formverlustbeiwerten (vgl. Diagramm 55) signifikant erhöht. Der max. Druck bei ca. 2 000 s vergrößert sich um bis zu 15 000 Pa.



**Diagramm 55: Druck / Optimierte Jet-Nodalisierung**



**Diagramm 56: Druck / Nodalisierung mit erhöhten Formverlustbeiwerten**

### 4.9.2 Schlussfolgerung

Durch die Erhöhung des Formverlustbeiwertes von 4 auf 15 ist es möglich deutlich mehr Wasserstoff im Komponentenraum zu halten, und damit ein realistischeres Ergebnis zu erzielen. Vor allem bei den Wasserstoffkonzentrationen im inneren Raum werden nun

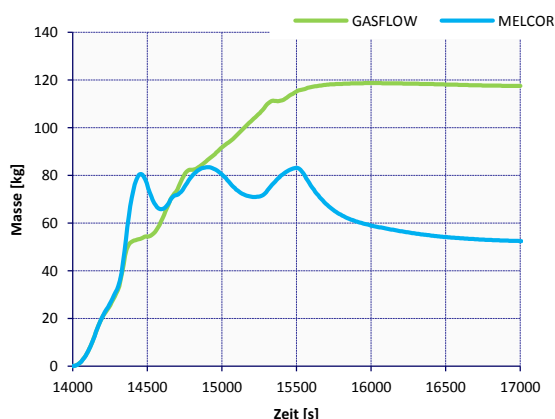
exaktere Ergebnisse erreicht. Der gestiegene Druckverlust sorgt für eine starke Durchflussminderung an den Berstscheiben. Dies führt zu einem schwächeren Kamineffekt, der in seiner Stärke nun erheblich besser mit den Werten aus GASFLOW übereinstimmt. Allerdings vermindert der schwächere Kamineffekt die Kondensation, weswegen sich der Druck im Sicherheitsbehälter signifikant erhöht.

### 4.10 Nodalisierung gesamt

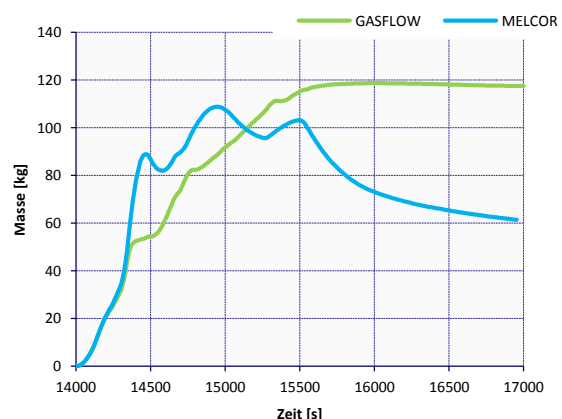
In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der ursprünglichen, typischen groben Nodalisierung mit der finalen Nodalisierung mit erhöhten Formverlustbeiwerten verglichen. Nach einer Diskussion der Ergebnisse folgen schließlich die Schlussfolgerungen aus dieser Arbeit.

#### 4.10.1 Rechenergebnisse und Diskussion

Durch die verschiedenen Stufen der Nodalisierungen und die Erhöhung der Druckverlustbeiwerte wurde erreicht, dass deutlich mehr Masse an Wasserstoff im Komponentenraum bleibt, wie in Diagramm 58 im Vergleich zu Diagramm 57 zu sehen ist. Die Entwicklung des Masseninventars stimmt damit deutlich besser mit dem von GASFLOW berechneten überein. Vor Allem die Erhöhung des Formverlustbeiwertes (siehe Kapitel 4.9) hat diese Entwicklung begünstigt.



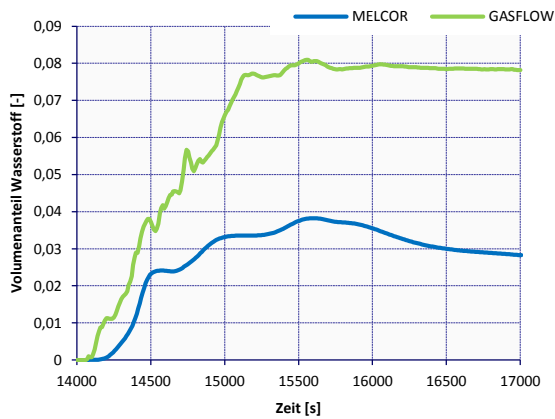
**Diagramm 57: Masse an Wasserstoff im Komponentenraum / typische, grobe Nodalisierung**



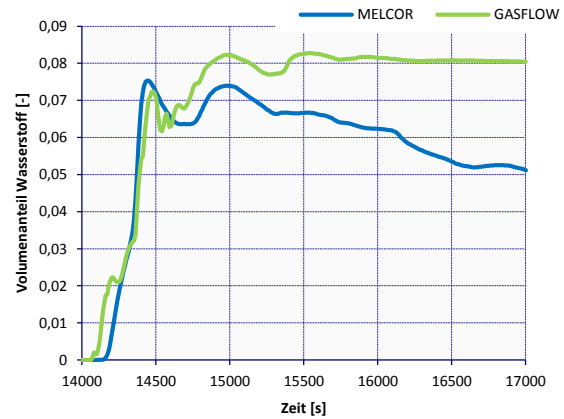
**Diagramm 58: Masse an Wasserstoff im Komponentenraum / Nodalisierung mit erhöhten Formverlustbeiwerten**

Die Wasserstoffkonzentrationen im Komponentenraum sowie im Kuppelbereich während der Ausströmphase bis 15 500 s entsprechen nun annähernd den Werten aus der GASFLOW-Rechnung (vgl. Diagramm 60 zu 59). Dies wurde durch die bessere Durchmischung innerhalb

des Komponentenraums (Kapitel 4.3 und 4.4), der optimierten Jet-Nodalisierung (Kapitel 4.8) und durch die erhöhten Formverlustbeiwerte (Kapitel 4.9) erreicht.

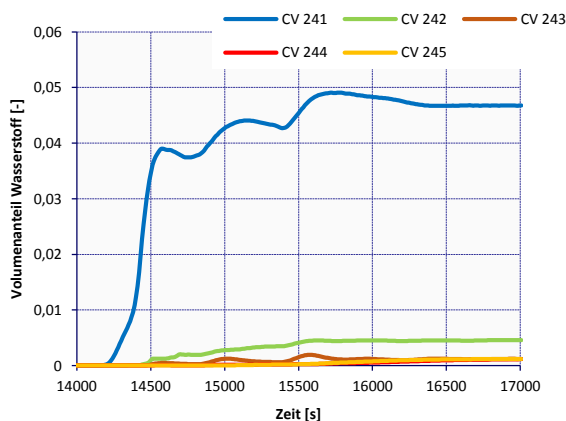


**Diagramm 59: Wasserstoffkonzentration in CV 6 / typische grobe Nodalisierung**

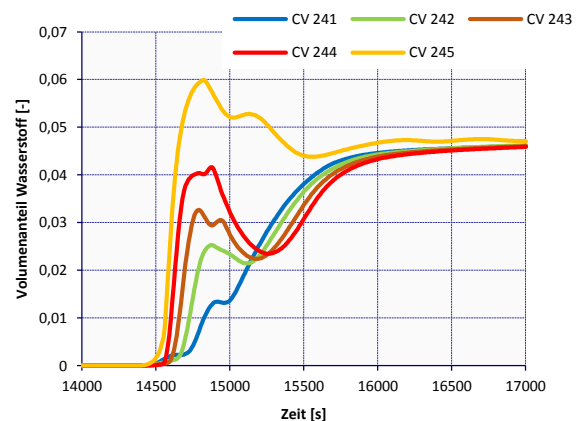


**Diagramm 60: Wasserstoffkonzentration in CV 64 / Nodalisierung mit erhöhten Formverlustbeiwerten**

Realistische Wasserstoffkonzentrationen im oberen Kuppelbereich mit MELCOR können nur durch eine Jet-Nodalisierung erreicht werden. Ohne diese ist der Massenstrom bis in die obersten CV zu gering. Durch eine optimierte Jet-Nodalisierung, bei der die Strömung bis in die obersten CV fließt, bevor sie sich verteilen kann, wird eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse im Vergleich zu einer realistischen Rechnung mit GASFLOW erreicht. Diagramm 62 zeigt die Wasserstoffkonzentrationen im Kuppelbereich bei optimierter Jet-Nodalisierung, Diagramm 61 die Wasserstoffkonzentrationen ohne Jet-Nodalisierung.



**Diagramm 61: Wasserstoffkonzentrationen im Kuppelbereich / feine, vertikale Nodalisierung des Komponentenraums**



**Diagramm 62: Wasserstoffkonzentrationen im Kuppelbereich / Nodalisierung mit erhöhten Formverlustbeiwerten**

Die globale Strömung im Sicherheitsbehälter, der Kamineffekt, ist in ihrer Ausprägung nun näher an den Rechenergebnissen aus GASFLOW (vgl. Diagramm 54 und Diagramm 63). Die

#### 4 Nodalisierung eines generischen Sicherheitsbehälters

Tatsache, dass in MELCOR zu wenig Masse durch den quellfernen Turm 1 strömt, konnte in dieser Arbeit nicht behoben werden. Zwar konnte die Durchströmung dieses Turms zunächst an den Durchfluss des quellnahen Turms angepasst werden (siehe Kapitel 4.3). Die notwendige Jet-Nodalisierung macht diesen Effekt allerdings zunichte.

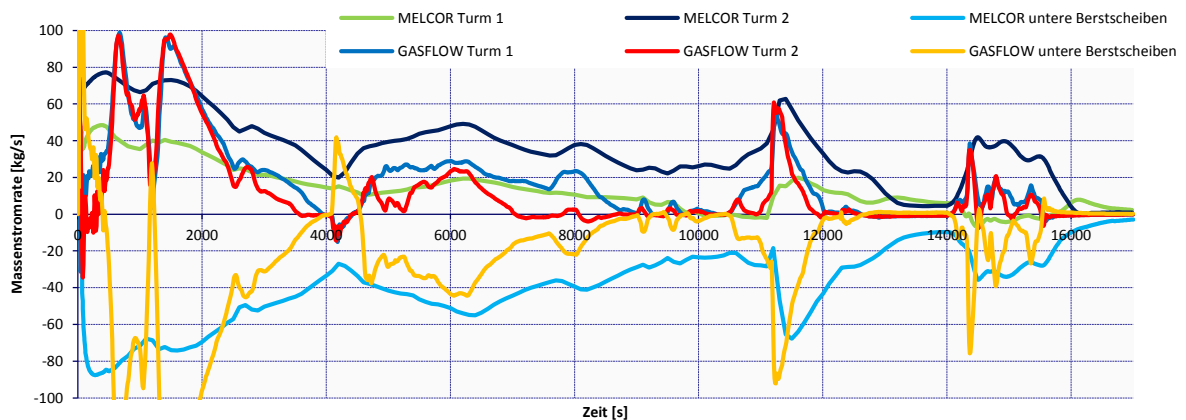


Diagramm 63: Durchströmraten der Berstscheiben / typische, grobe Nodalisierung

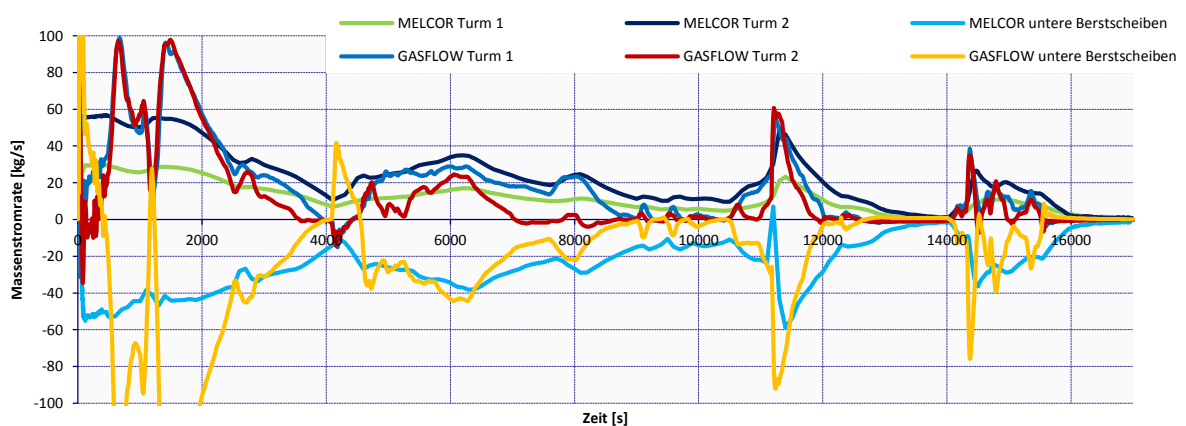


Diagramm 64: Durchströmraten der Berstscheiben / Nodalisierung mit erhöhten Formverlustbeiwerten

Der Druck im Sicherheitsbehälter bleibt über die verschiedenen Nodalisierungsschritte ähnlich und zeigt ähnlich wie der Druck der typischen, groben Nodalisierung in Diagramm 65 eine gute Übereinstimmung mit der GASFLOW-Rechnung. Durch die letzte Nodalisierung mit erhöhten Formverlustbeiwerten, die deutliche Verbesserungen bei den Wasserstoffkonzentrationen und der Ausprägung der globalen Strömung mit sich bringt, erhöht sich jedoch der Druck durch geringere Kondensationsraten in den Ringräumen und liegt damit deutlich über den Werten aus GASFLOW (siehe Diagramm 66).



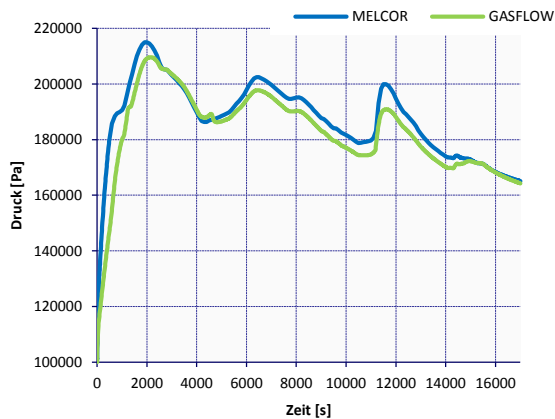


Diagramm 65: Druck / typische, grobe Nodalisierung

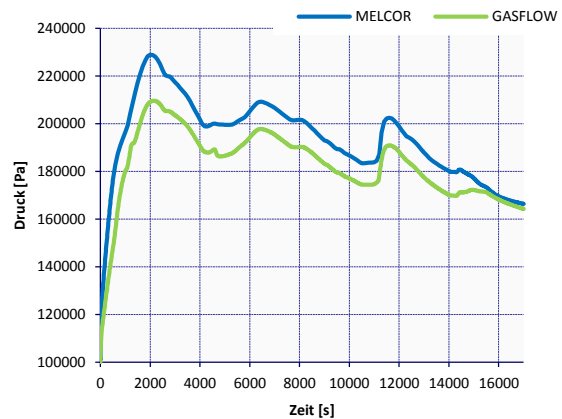


Diagramm 66: Druck / Nodalisierung mit erhöhten Formverlustbeiwerten

#### 4.10.2 Schlussfolgerung

Veränderungen an einer Nodalisierung können teils positive und teils negative Einflüsse auf das Rechenergebnis bewirken. So ist es möglich, mit einer Jet-Nodalisierung den Massenstrom durch die Dampferzeugertürme bis in die oberste Region der Kuppel zu befördern. Dabei wird jedoch die globale Strömung verfälscht, da durch die Berstscheiben des quellfernen Dampferzeugerturms deutlich weniger Masse strömt (siehe Kapitel 4.8).

Die Anpassung der Formverlustbeiwerte bringt ebenfalls positive und negative Veränderungen. Durch die Erhöhung dieses freien Parameters für alle FL wird in MELCOR die Stärke der globalen Strömung auf ein realistischeres Maß reduziert. Da der Großteil der Kondensation im Sicherheitsbehälter allerdings in den Ringräumen stattfindet und dort nun geringere Geschwindigkeiten herrschen, sinkt die Kondensationsrate und der Druck steigt auf ein zu hohes Niveau an (vgl. Kapitel 4.9).

Durch die feinere Nodalisierung des Komponentenraums konnte dort die Durchmischung erhöht werden. Außerdem lassen sich damit die Wasserstoffkonzentrationen und andere Parameter dort genauer auflösen (Kapitel 4.3, 4.4, 4.6).

Für eine Nodalisierung mit einem Lumped-Parameter-Ansatz müssen dem Benutzer folglich Ort und Ausmaß der auftretenden Strömungsphänomene wie z.B. Freistrahlen bekannt sein, um diese simulieren zu können. Da der Einfluss von freien Parametern, wie z.B. Formverlustbeiwerten sehr groß ist, müssen im Rahmen von probabilistischen Sicherheitsanalysen zur Kontrolle zusätzlich detailliertere Untersuchungen mit einem

#### 4 Nodalisierung eines generischen Sicherheitsbehälters

---

validierten Code wie beispielsweise GASFLOW durchgeführt werden. Die in ihrer Rechenzeit deutlich schnelleren Integralcodes werden dennoch für die deterministische Analyse vieler Unfallabläufe gebraucht.

## 5 Zusammenfassung

Im Rahmen von probabilistischen Sicherheitsanalysen werden Simulationen mit Integral-Codes wie MELCOR und 3D-CFD-Codes wie GASFLOW durchgeführt. Der Lumped-Parameter-Ansatz in MELCOR liefert in kurzer Zeit grobe Ergebnisse. Aufgrund einer feineren Diskretisierung und der besseren Berechnungsmethode liefert GASFLOW sehr genaue Ergebnisse unter hohem Rechenaufwand. Da innerhalb kurzer Zeit für solche Sicherheitsanalysen möglichst gute Ergebnisse benötigt werden, wurde für einen hypothetischen, schweren Störfall mit Wasserstoffentstehung eine Nodalisierung des Sicherheitsbehälters für MELCOR optimiert.

Ausgangspunkt dieser Arbeit war ein Code-Vergleich zwischen MELCOR und GASFLOW für ein generisches Modell eines Sicherheitsbehälters. Die dabei verwendete, typische, grobe Nodalisierung in MELCOR zeigte große Abweichungen in ihren Ergebnissen im Vergleich zu den genaueren Ergebnissen aus GASFLOW. In der Literatur wurden Methoden zur verbesserten LP-Nodalisierung recherchiert. Die existierende grobe Nodalisierung wurde in dieser Arbeit mit diesen Methoden schrittweise verbessert und die verschiedenen Einflüsse auf das Rechenergebnis aufgezeigt. Dabei wurden vor allem die Wasserstoffkonzentrationen im Kuppelbereich, die vorherrschende Strömung im Sicherheitsbehälter und die Wasserstoffmassen im Komponentenraum betrachtet.

Dabei zeigte sich, dass die Erhöhung der Anzahl an Kontrollvolumina im Komponentenraum für eine bessere Durchmischung sorgt. Durch eine vertikale Verfeinerung im Kuppelbereich sind Gasschichtungen aufzeigbar. Die in GASFLOW berechnete starke Aufwärtsströmung oberhalb der Dampferzeugertürme konnte in MELCOR, aufgrund des Lumped-Parameter-Ansatzes, mit einer speziellen Jet-Nodalisierung erfasst werden. Zudem besitzt der frei wählbare Formverlustbeiwert einen großen Einfluss auf das Ergebnis. Durch eine deutliche Erhöhung dieses Parameters konnte die Stärke der globalen Strömung auf die von GASFLOW gesenkt werden. Dabei zeigte sich jedoch, wie bei einigen anderen Nodalisierungsschritten auch, ein negativer Einfluss auf andere Parameter, wie den Druck.

Insgesamt konnte die Nodalisierung also deutlich verbessert werden. Im Rahmen nachfolgender Arbeiten könnte die Nodalisierung im Kuppelbereich weiter verfeinert werden, um ein gegeneinander Wirken beider Freistrahlen zu verhindern. Der Mitnahmeeffekt der

Freistrahlen könnte durch die Verwendung einer geeigneten Korrelation berücksichtigt werden.

## Literaturverzeichnis

- [1] T. Szabo, F. Kretzschmar, T. Schulenberg. *Modellierung der Wasserstoffverteilung für das Programm MELCOR*. Vortrag bei Jahrestagung Kerntechnik, Berlin. 2011
- [2] C. Grandjean, G. Hache. *A State-of-the-art review of past programmes devoted to fuel behaviour under loss-of-coolant conditions*. Part 3. Technical Report. Institut de radio-protection et de sûreté nucléaire, Saint Paul-lez-Durance, Frankreich, 2008
- [3] T. Haste; J. Birchley, E. Cazzoli, J. Vitazkova. *MELCOR/MACCS simulation of the TMI-2 severe accident and initial recovery phases, off-site fission product release and consequences*. Nuclear Engineering and Design 236 1099–1112. Villigen, Schweiz, 2006
- [4] T. Szabó, S. Benz, F. Kretzschmar, P. Royl, T. Jordan. *Prediction of hydrogen distribution under severe Accident conditions with CFD and Lumped Parameter Codes*. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, 2012
- [5] T. Jordan, S. Benz, P. Royl. *KIT Proposal of a 3D Model for a Generic Containment&Specifications for Code-to\_Code Comparison – run1*. Interner Bericht SARnet2, WP 7-3 Containment, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe. Mai 2010
- [6] U. Hansen. *Grundlagen der Kerntechnik, eine Einführung für Ingenieure*. Lehrstuhl Energieanlagen. Universität Rostock. Technisches Wahlpflichtfach Manuskript. 2008
- [7] Gesellschaft für Reaktorsicherheit. *Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke Phase B*. Eine Untersuchung im Auftrag des Bundesministeriums für Forschung und Technologie. Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln, 1990
- [8] Bundesamt für Strahlenschutz. *Methodenhandbuch zur probabilistischen Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke*. Schriften. Salzgitter, 2005
- [9] H. Dimmelmeier, J. Eyink, M.-A. Movahed. *Computational validation of the EPRM™ combustile gas control system*. Nuclear Engineering and Design, 249, S. 118-124. 2012

- [10] R. O. Gauntt, J. E. Cash, R. K. Cole, C. M. Erikson, L. L. Humphries, S. B. Rodriguez, M. F. Young. *MELCOR Computer Code Manuals Vol. 2: Reference Manuals Version 1.8.6*. Sandia National Laboratories. Albuquerque, USA. S 2005
- [11] J. R. Travis, P. Royl, J. Xiao, G. A. Neckar, R. Redlinger, J. W. Spore, K. L. Lam, T. L. Wilson, C. Müller, B. D. Nichols. *GASFLOW: A Computational Fluid Dynamics Codes for Gases Aerosols, and Combustion. Volume 1. Theory and Computational Model*. Wissenschaftliche Berichte, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe. 2011.
- [12] R. O. Gauntt, R. K. Cole, C. M. Erickson, R. G. Gido, R. D. Gasser, S. B. Rodriguez, M. F. Young, Scott Ashbaugh, Mark Leonard, Adam Hill. *MELCOR Computer Code Manuals Vol. 3: Demonstration Problems Version 1.8.5*. Sandia National Laboratories. Albuquerque, USA. 2001
- [13] J. Burkhardt, M. Dapper, M. Klocker, H.-J. Wagner, Marco K. Koch. *Simulation atmosphärischer Schichtungen in den Versuchen TH12 und TH13 (ISP-47) mit dem Programmsystem COCOSYS*. 1. Technischer Fachbericht zum Forschungsvorhaben BMWi 150 1321: Weiterführende externe Validierung und Analyse des Programmsystems COCOSYS. 2008
- [14] J. Duspiva. *Post Test Calculation of OECD THAI HM-2 Experiment with MELCOR 1.8.6 Code*. The 13th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-13). Kanazawa City, Ishikawa Prefecture, Japan, September 27-October 2, 2009
- [15] S. Schwarz, K. Fischer, A. Bentaib, J. Burkhardt, J.-J. Lee, J. Duspiva, D. Visser, Kyttälä, P. Royl, J. Kim, P. Kostka, R. Liang. *Benchmark on Hydrogen Distribution in a Containment Based on the OECD-NEA THAI HM-2 Experiment*. The 13th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-13) Kanazawa City, Ishikawa Prefecture, Japan, September 27-October 2, 2009
- [16] J. Burkhardt, M. K. Koch. *Blind and post test calculation of the hydrogen stratification experiment HM-2 with the containment code system COCOSYS*. ICONE17-75657. Proceedings of the 17th International Conference on Nuclear Engineering, Brüssel, Belgien, 2009

- 
- [17] K. Fischer. *Comparison of Experimental Data and Blind Calculations of Test HM-2*. Report No. 150 1326 – HM-2 CMR, Becker Technologies GmbH, Eschborn. May 2008
- [18] P. Broxtermann und H.-J. Allelein. *Simulation of AP1000's passive containment cooling with the German Containment Code System COCOSYS*. Nuclear Engineering and Design, In Press, Corrected Proof, Available online 13 December 2012.
- [19] J. Burkhardt, M. K. Koch. *Analysis of the Nodalisation Influence on Simulating Atmospheric Stratifications in the Experiment ThAI TH13 with the Containment Code System COCOSYS*. The 7th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, Operation and Safety. Seoul, Korea, October 5-9, 2008
- [20] GRS. *Methodenentwicklung und exemplarische Anwendung zur Bestimmung der Aussagesicherheit von Rechenprogrammergebnissen*. Abschlussbericht GRS-A-3443, Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH. Köln, 2008
- [21] H.-J. Allelein, S. Arndt, W. Klein-Heßling, S. Schwarz, C. Spengler, G. Weber. *COCOSYS: Status of the development and validation of the German containment code system*. Nuclear Engineering and Design, 238, S. 872–889, 2008
- [22] S. J. K. Bradley und M. I. Robertson. *MELCOR Calculations for ISP-29*. Anhang II J zum Bericht NEA/CSNI/R(93)4. International Standard Problem 29, Distribution of Hydrogen within the HDR Containment under Severe Accident Conditions. Final Comparison Report, OECD Nuclear Energy Agency (NEA), Issy-les-Moulineaux, Frankreich, 1993
- [23] H.-J. Allelein, S. Kelm, P. Broxtermann, und S. Krajewski. *Proposal for a Generic Containment & Specifications for a Code-to-Code Comparison – run0*. Interner Bericht SARnet2, WP 7-3 Containment. Forschungszentrum Jülich GmbH, 2010
- [24] ISP29: H. Karwat. *International Standard Problem 29, Distribution of Hydrogen within the HDR Containment under Severe Accident Conditions*. Final Comparison Report, NEA/CSNI/R(93)4. OECD Nuclear Energy Agency (NEA). Issy-les-Moulineaux, Frankreich, 1993
- [25] K. Fischer, E. Studer, J. Malet, E. Porcheron and J. Vendel. *Conclusion of the International Standard Problem ISP-47 on Containment Thermalhydraulics*. 2005



ISSN 1869-9669  
ISBN 978-3-7315-0099-5

