

DISS. ETH NO. 19922

INSTRUMENTATION AND MIXING
EXPERIMENTS ON SAFETY RELEVANT
GAS FLOWS IN CONTAINMENTS OF
NUCLEAR REACTORS

A dissertation submitted to

ETH ZÜRICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

Martin Ritterath

Dipl.-Ing., TU Dresden

born on September 13, 1981 in Dresden

citizen of

Federal Republic of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Horst-Michael Prasser (ETH Zürich), Examiner

Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Hans-Josef Allelein (RWTH Aachen),

co-examiner

Dr. Benjamin Cariteau (CEA), co-examiner

2012

Abstract

In order to predict the thermal-hydraulic behavior of nuclear reactor containments, three-dimensional computational fluid dynamics (CFD) codes are increasingly used. Confidence in these predictions can be gained by comparing simulation results against experimental reference data. Deficiencies of CFD concerning the transport and mixing of species in the environment of a stratification, as well as the lack of appropriate reference data, have been identified.

By means of this thesis, a contribution to a high quality experimental database covering flow phenomena related to the safety of reactor containments was achieved in two ways:

First, novel instrumentation was developed for, and applied to, the existing medium-scale containment test facility PANDA. The existing PANDA instrumentation was extended by an ultrasound time-of-flight based measurement of the gas concentration and by robust pulsed-wire anemometers for low velocities. This instrumentation was successfully applied during the OECD/NEA SETH-2 test series investigating the break-up of a confined stratified light gas layer due to an upward vertical jet.

Second, a small-scale test facility “MiniPanda” was built by scaling down two out of the four PANDA vessels. Due to its dimensions and the high spatial resolution of the advanced instrumentation applied, this facility met some of the special needs for CFD-code validation better than the large facility. The instrumentation included an innovative thermo-resistive

mesh sensor, able to measure the temperature distribution in planes of choice with a spatial resolution that was of the same order of magnitude as the cell size used for CFD-code meshes. Two test series were carried out.

The first series investigated the phenomena resulting from a basic buoyancy-driven ingress of heavy gas (air) into a light gas (helium) environment. The data was also used to benchmark the commercial CFD codes CFX, FLUENT, and StarCCM+. The codes reproduced the flow phenomena well in a qualitative way. The quality and the suitability of the obtained experimental data for CFD validation purposes were thereby confirmed. Further research, code development, and validation are motivated by the remaining discrepancies.

During the second test series, a medium-scale PANDA experiment was repeated on the one fourth length scale of MiniPanda. A stratified helium layer, confined at the top of a drywell vessel, was exposed to a vertical air jet from below, eroding the layer and thus causing the break-up. A comparison of the experimental data sets from the large and the, geometrically similar, small facility showed that in general the same flow behavior could be observed. The main difference was the significant contribution of molecular diffusion to the break-up on the small scale, whereas diffusion played only a lesser, though visible, role in the medium-scale PANDA tests. Data obtained was again used to benchmark the commercial CFD codes CFX, FLUENT, and StarCCM+.

Zusammenfassung

Um das thermohydraulische Verhalten innerhalb eines Sicherheitsbehälters vorherzusagen werden zunehmend detaillierte dreidimensionale strömungsmechanische Simulationscodes (CFD) eingesetzt. Vertrauen in diese Vorhersagen wird durch Vergleiche mit experimentellen Referenzdatensätzen gewonnen. Defizite der CFD-Codes bei Behandlung von Transport und Vermischung von Gasen sowie der Mangel an geeigneten Referenzdatensätzen wurden festgestellt.

In der vorliegenden Arbeit wird in zweierlei Weise ein Beitrag zu einer Datenbank geleistet, die hochwertige experimentelle Datensätze über sicherheitsrelevante Strömungsphänomene beinhaltet:

Zum einen wurde innovative Instrumentierung entwickelt und in der bestehenden Grossversuchsanlage PANDA eingesetzt. Dabei wurde die PANDA-Instrumentierung um eine Ultraschallpulslaufzeitmessung zur Bestimmung der Gaszusammensetzung sowie um robuste Laufzeitanemometer für niedrige Geschwindigkeiten erweitert. Diese Messtechnik wurde während der OECD/NEA SETH-2 Versuchsreihe erfolgreich eingesetzt, die der Untersuchung des Schichtungsabtrags eines leichten Gases durch einen von unten kommenden Strahl gewidmet war.

Zum anderen wurde eine kleinskalige Versuchsanlage „MiniPanda“ gebaut, die den speziellen Bedürfnissen der CFD-Codevalidierung aufgrund ihrer kleineren Abmessungen

und ihrer hochauflösenden Messtechnik besser als die Grossversuchsanlage gerecht wurde. Teil der Instrumentierung war ein neu entwickelter Temperatur-Gittersensor der die Temperaturverteilung in frei wählbaren Ebenen mit einer ähnlichen Ortsauflösung messen konnte, wie sie für die Rechengitter der CFD-Codes verwendet wird. Zwei Versuchsreihen wurden durchgeführt:

Die erste Versuchsreihe untersuchte die Phänomene eines auftriebsgetriebenen Schwergaseinbruchs (Luft) in eine Leichtgasumgebung (Helium). Der Datensatz wurde verwendet, um die kommerziellen CFD-Codes CFX, FLUENT und StarCCM+ hinsichtlich ihrer Abbildungsfähigkeit zu messen. Die Simulationen gaben generell die Strömungsphänomene richtig wieder. Die Simulationsergebnisse bestätigen die Qualität und Eignung der gewonnenen experimentellen Daten für eine Codevalidierung aber auch die Notwendigkeit, weiter die Tauglichkeit von CFD für die Vorhersage von Strömungen in Sicherheitsbehältern zu untersuchen. In der zweiten Versuchsreihe wurde ein PANDA-Experiment auf dem vierfach kleineren Längenmassstab von MiniPanda wiederholt. Eine am oberen Ende eines Drywell-Behälters eingeschlossene Heliumschichtung wurde einem von unten kommenden Luft-Strahl abgetragen. Der Vergleich der beiden gewonnenen experimentellen Datensätze zeigte, dass der Beitrag der molekularen Diffusion zum Schichtungsabtrag in der kleinen Anlage beträchtlich war, während in der grossen Anlage die Diffusion nur eine geringe Rolle spielte. Die gewonnenen Daten wurden ebenfalls dazu verwendet, kommerzielle CFD Codes zu testen.