



Doctoral Thesis

Two-Phase Flow Investigations in Large Diameter Channels and Tube Bundles

Author(s):

Betschart, Torsten Thomas

Publication Date:

2015

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010656799> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH No. 22954

Two-Phase Flow Investigations in Large Diameter Channels and Tube Bundles

A dissertation submitted to
ETH-Zürich

For the degree of
Doctor of Sciences

presented by:

Torsten Thomas Betschart
Master of Science in Mechanical Engineering (ETHZ)
born 24. Mai 1985
citizen of Switzerland

Accepted on the recommendation of:

Prof. Dr. Horst-Michael Prasser, examiner
Prof. Dr. Thomas Rösgen, co-examiner
Dr. Martin Rhode, co-examiner

Abstract

Severe accidents in nuclear power plants are characterized by a damage of the reactor core, and subsequent potential for release of radioactive substances into the environment. There is a wide variety of different potential sequences leading to severe accidents and the understanding of the underlying physical phenomena is indispensable. In certain cases, the radioactivity in the aerosol or gas form may be transported through a liquid pool, in which a large fraction of the radioactivity may be retained by transfer of aerosol particles and gas phase species into the liquid. Such instances are, e.g., wet scrubbers in filtered containment venting systems, or the secondary side of the steam generators during tube rupture incidents if the secondary side is flooded.

The retention potential of such liquid pools has been studied in several experimental programs for both aerosol and gas phase species. It was seen that many factors influence the retention potential of the water pools, e.g., the gas injection velocity, water pool height, water temperature and the injection geometry. Recent experimental results in steam generator tube bundles have shown that the submerged structures in the water pool may significantly increase the retention of aerosols. The underlying hydrodynamics of the two-phase flow was normally not studied in detail in the experiments even though it has a significant effect of the retention of aerosol and gases in the liquid pools.

The TRISTAN facility was designed and constructed to investigate the hydrodynamics of two-phase gas-liquid flow in large diameter channels and tube bundles with the main aim of determining the effect of the tube bundle on the two-phase flow characteristic. The facility was operated at ambient conditions. A gas-liquid flow originating from a breached tube could be investigated either in a 500x500mm square duct or a tube bundle containing 221 steam generator mockup tubes. A set of two wire-mesh sensors with 120x120 channels and a wire-pitch of 3.4mm were used. This was the first time a wire-mesh sensor was applied to such a large geometry and an adapted mechanical design for the sensor was developed. Using a wire-mesh sensor, the void fractions in a full cross-sectional flow can be measured with a sampling rate of 1024Hz.

A wide range of injection flow rates and four different axial distances between the tube break and the wire-mesh sensor ranging from 100mm and 2500mm were used to characterize the evolution of the two-phase flow. Void fraction, bubble size distributions, gas phase velocity as well as interfacial area concentration were determined. In addition, the penetration depth of the initial large stationary gas bubble into the channel was studied for the closest break-sensor distances. For the interfacial area concentration, a new method is introduced based on the gradients of the void fractions.

The investigations show distinct differences between flow characteristics in the free volume and the tube bundle. In case of the tube bundle, the flow stays more confined due to the loss of lateral momentum caused by the tubes surrounding the break. This can be seen by the void fraction distributions for all the distances. Distinct shapes are especially found for the lowest axial distance between the sensor and the break, where preferential flow directions due to the structure of the bundle appear.

The differences also occur in the bubble size distributions, where a more distinct bimodal distribution can be found in the tube-bundle tests. For smaller bubble sizes, the distribution follows a log-normal distribution. Interestingly, large bubbles exist even after a long distance after the gas injection which is not in agreement with the phenomenological approach used for the modelling of the flow in scrubbing codes. The influence of the gas-flow rate on the bubble-size distribution is very strong, leading to generally larger bubble sizes with increasing gas flow.

The interfacial area concentration was determined by different methods, using full bubble reconstruction and via a newly introduced method using the void fraction gradients. The concept of the latter was proven and the two methods show good agreement. For both methods, the tube surfaces were assumed to be wetted. The interfacial area concentration is higher in the tube bundle case which is caused by the bubbles being intersected by tubes.

The data gathered during this work shows, that the understanding of two-phase flows in large diameter channels needs still further improvement. On the hydrodynamic side, the TRISTAN data can be used to benchmark CFD codes or other hydrodynamic codes simulating two-phase flow in large diameter channels. In this regard, the data can also be used for the development of the modelling of such two-phase flows. In regard of the retention of radioactive materials, the TRISTAN results can be used as input for the present scrubbing codes or as a phenomenological base to compare the different experiments concerning with retention.

Kurzfassung

Schwere Störfälle in Kernkraftwerken werden durch einen Schaden am Reaktorkern und einer darauffolgenden potentiellen Freisetzung radioaktiver Materialien charakterisiert. Dabei gibt es eine Vielfalt potentieller Störfallsequenzen, die zu einem schweren Störfall führen und das Verständnis der zugrundeliegenden physikalischen Phänomene ist unerlässlich. In bestimmten Fällen strömen dabei radioaktive Aerosole oder Gase durch Wasservolumen, wobei ein bedeutender Teil der Radioaktivität durch den Transport von Aerosolpartikeln oder Gasen im Wasser zurückgehalten werden kann. Dies geschieht bspw. In gefilterten Druckentlastungssystemen oder der Sekundärseite von Dampferzeugern bei gleichzeitig auftretenden Dampferzeugerheizrohrbrüchen, falls die Sekundärseite während des Prozesses geflutet ist.

Das Rückhaltungspotential solcher Wasservorlagen wurde in verschiedenen Versuchsprogrammen sowohl für Aerosole als auch für Gase untersucht. Die Rückhaltung wird von vielen verschiedenen Faktoren bestimmt, unter anderen der Gaseinströmgeschwindigkeit, der Höher der Wasservorlage, der Wassertemperatur und der Einspeisegeometrie. Experimente in Dampferzeugerbündeln habe gezeigt, dass sich im Wasser befindliche Strukturen (wie bspw. Dampferzeugerrohren) die Rückhaltung von Aerosolen entscheidend vergrössern. Normalerweise wurde das hydrodynamische Verhalten der Strömung bei den Versuchsprogrammen nicht detailliert untersucht, obwohl ein entscheidender Einfluss auf die Rückhaltung von Aerosolen oder Gasen zu erwarten ist.

Die Teststrecke TRISTAN wurde entworfen und gebaut, um die Hydrodynamik der Zweiphasenströmung in Kanälen mit grossen Durchmessern und Rohrbündeln zu untersuchen. Hauptziel war dabei herauszufinden, wie das Rohrbündel die Hydrodynamik beeinflusst. Die Teststrecke wurde bei Umgebungsbedingungen betrieben. In TRISTAN können Gas-flüssigkeitsströmungen entweder in einem 500x500mm Kanal oder einem Rohrbündel bestehend aus 221 Dampferzeugerrohren untersucht werden. Das Gas wird dabei durch einen Rohrbruch in die Teststrecke eingespeist. Zwei Wire-Mesh Sensoren mit je 120x120 Kanälen und einem lateralen Drahtabstand von 3.4mm wurden verwendet. Die Sensoren in TRISTAN sind zurzeit die Grössten ihrer Art und das mechanische Design musste dahingehend angepasst und entwickelt werden. Der Wire-Mesh Sensor erlaubt die Messung von Gasvolumengehalten in einem kompletten Strömungsquerschnitt mit einer Frequenz von 1024Hz.

Die Evolution der Strömung wurde anhand verschiedener Gasmassenströme und vier verschiedenen axialen Abständen zwischen Rohrbruch und Wire-Mesh Sensor analysiert. Die Abstände wurden zwischen 100mm und 2500mm gewählt. Gasvolumengehalte, Blasengrößenverteilungen, Gasgeschwindigkeiten und die Grenzflächendichte wurden gemessen. Zusätzlich wurde noch die laterale Penetrationstiefe der anfänglich stationären Gasblase für den Kleinsten Sensor – Rohrbruch Abstand untersucht. Für die Messung der Grenzflächendichte wurde dabei ein neues Verfahren entwickelt, welche auf der Verwendung der Gradienten der Gasvolumengehalte basiert.

Die Untersuchungen zeigen klare Unterschiede zwischen den Strömungscharakteristika im freien Volumen und dem Rohrbündel. Das Rohrbündel führt zu einer lateralen Einengung der Strömung rund um den Einspeisepunkt, welches durch einen verstärkten lateralen Impulsverlust erklärt werden kann. Dies kann anhand der Volumengasgehaltverteilungen über alle Messabstände beobachtet werden.

Die Unterschiede werden auch anhand der Blasengrößenverteilungen sichtbar, wo die bimodale Verteilung im Falle der Rohrbündelströmung ausgeprägter auftritt. Eine Log-Normale Verteilung kann für kleine Blasengrößen beobachtet werden. Interessanterweise können grosse Blasen auch nach einer grossen Distanz zum Rohrbruch beobachtet werden, was dem phänomenologischen Ansatz, der bspw. In Scrubbing Codes verwendet wird, widerspricht. Der Einfluss des Gasmassenstroms auf die Blasengrößenverteilung ist ausgeprägt, was bei einem steigenden Massenstrom zu grösseren Blasen führt.

Die Blasenoberflächendichte wurde durch verschiedenen Methoden ermittelt, einerseits durch eine volle Blasenrekonstruktion und andererseits durch eine neu eingeführte Methode, welche die Gradienten des Gasvolumengehalts nutzt. Die beiden Methoden zeigen gute Übereinstimmungen. Für beide Methoden wurde eine benetzte Rohroberfläche angenommen. Die Blasenoberflächendichte ist im Rohrbündel grösser, was durch die Rohrdurchdringung vor allem grosse Blasen erklärt werden kann.

Die während dieser Arbeit gesammelten Daten zeigen, dass das Verständnis von Zweiphasenströmungen in Kanälen mit grossen Durchmessern noch weiterer Verbesserungen bedarf. Auf der hydrodynamischen Seite können die TRISTAN Messresultate für ein Benchmark für CFD codes oder anderer hydrodynamischer Simulationscodes verwendet werden. In diesem Sinne ist auch eine Verwendung für die Entwicklung geeigneter Modelle denkbar. Hinsichtlich der Rückhaltung radioaktiver Stoffe können die TRISTAN Daten als Input für aktuelle Scrubbing Codes oder als phänomenologische Vergleichsbasis für verschiedene, sich mit Rückhaltung befassender Experimente, verwendet werden.