

Sicherheit durch Vermischung

Experimentelle Untersuchung der Kühlmittelvermischung in Druckwasserreaktoren

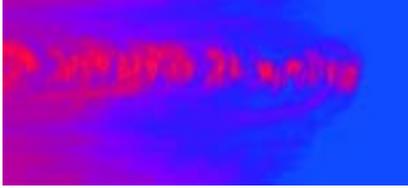
Gerhard Grunwald, Thomas Höhne, Sören Kliem, Horst-Michael Prasser, Ulrich Rohde
Institut für Sicherheitsforschung

„Es geht los!“, ruft der Versuchsleiter und drückt einen Knopf am PC. Die Pumpe beginnt sich zu drehen. Einige Sekunden später ertönt ein Knall. Das Computerprogramm hat mit Hilfe von Druckluft – daher der Knall – ein Ventil geöffnet. Salzhaltiges Wasser wird seitlich in eine Rohrleitung der Versuchsanlage eingespritzt. Dort sorgt ein Mixer für eine gleichmäßige Durchmischung des Pfropfens mit dem vorbeifließenden Wasser der Versuchsanlage. Ein zweiter Knall ertönt und signalisiert das Schließen des Ventils.

Ein Pfropfen, dessen Größe wir vorher genau berechnet haben, hat sich auf die Reise durch die Versuchsanlage begeben. Nach 10 bis 300 Sekunden hat er alle 1000 Messpositionen der Versuchsanlage passiert, und wir können den Versuch beenden.

Ein Pfropfen wird vermischt

Und wozu das Ganze? Kühlkreisläufe sind die Sicherheitsgarantie für alle Reaktoren der chemischen Industrie und der Kraftwerkstechnik. Treten Pannen in diesen Systemen auf, können die Folgen verheerend sein. Um Störfälle dieser Art abschätzen zu können, gehen wir verschiedenen Fragen nach: Was passiert, wenn Teile eines Kühlsystems ausfallen? Mischt sich ein Pfropfen heißes (oder kaltes) Wasser relativ schnell mit dem Wasser des Kühlkreislaufs oder durchwandert er die gesamte Anlage? Welche Auswirkungen hat fehlende Durchmischung auf den Betrieb der Anlage? – Was uns also interessiert, ist der Grad der Vermischung des zu dosierten Wassers mit dem Umgebungswasser. Das Messprinzip, das wir dabei anwenden, sind Unterschiede in der Leitfähig-

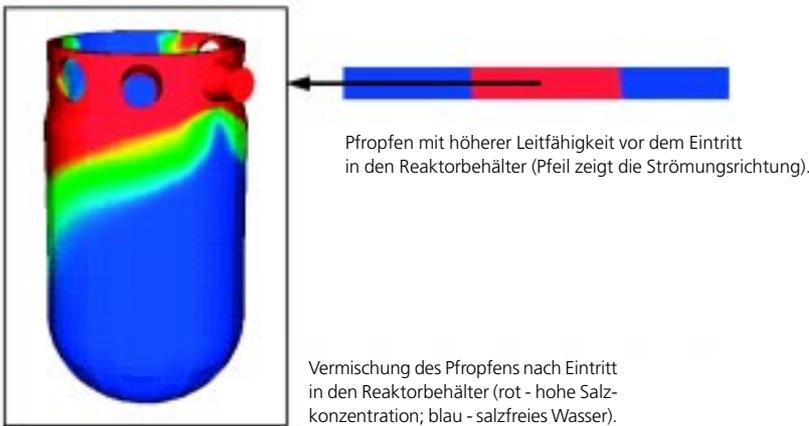


keit zwischen Pfropfen und Umgebungswasser. Die Leitfähigkeit ist im salzhaltigen Pfropfen vorhanden, im deionisierten Wasser der Versuchsanlage aber nahezu Null. Dabei liefert uns die Messung eine riesige Menge aufgezeichneter Daten, die uns Hinweise über den zeitlichen Verlauf der Salzkonzentration an allen Messstellen geben. Sie können nach einer Umrechnung in Prozentwerte als Digitalvideo abgespielt werden.

Form von Borsäure. Ist die Borkonzentration zu gering, fehlt Absorber, und es entstehen Überschussneutronen, die einen starken Leistungsanstieg im Reaktor hervorrufen können. Ähnliches geschieht, wenn die Temperatur des Kühlwassers zu stark absinkt. Mit abnehmender Temperatur nimmt die Effektivität der Kettenreaktion zu. – Dies ist übrigens gleichzeitig ein wichtiger Sicherheitsmechanismus, da im umgekehrten Fall einer Überhitzung

fallswärme Wasser, welches am Dampferzeuger wieder kondensiert. Da die Borsäure im Dampf nahezu unlöslich ist, sammelt sich am Dampferzeuger ein Pfropfen so genannten sauberen Kondensats an. Bei einem solchen Störfall schaltet sich der Reaktor ab, und die Kühlmittelpumpen stehen still. Werden sie dann wieder angeschaltet oder wird der Kühlkreislauf gar mit Notkühlwasser aufgefüllt, kann der schwach boriierte Pfropfen in den Reaktorkern gelangen und das dort befindliche hochboriierte Wasser verdrängen. – Ein Leistungsanstieg im Reaktor wäre die Folge.

Teilweise vermischen sich die Pfropfen auf dem Weg ihrer Entstehung bis zum Reaktorkern mit hochboriertem beziehungsweise heißerem Umgebungswasser. Es existiert also ein selbstwirkender Sicherheitsmechanismus. – Doch wie stark bei einem Borverdünnungs- oder Unterkühlungsstörfall die Leistung des Reaktors ansteigt, hängt davon ab, wie effektiv diese Vermischung ist.



Ein Schwerpunkt der Arbeiten im Institut für Sicherheitsforschung liegt derzeit auf der Untersuchung der Kühlmittelvermischung in Druckwasserreaktoren (DWR). In einem DWR wird die im Reaktorkern durch die Brennstäbe erzeugte Wärme genutzt, um das Wasser der Kühlkreislaufschleife zu erwärmen. Der Kühlkreislauf steht unter einem Druck von etwa 150 Bar, sodass das Wasser auch bei Temperaturen um 300 Grad Celsius nicht zu sieden beginnt. Auf seinem Weg durch den Kühlkreislauf gelangt das heiße Wasser zu den Dampferzeugern. Der hier erzeugte Dampf wird zu den Turbinen geleitet, wo ein angeschlossener Generator den elektrischen Strom erzeugt. Der Dampf selber wird wieder kondensiert und gelangt zurück in den Reaktorkern.

Wenig Bor und kaltes Wasser

Bor ist ein Neutronenabsorber, es sorgt dafür, dass die Neutronenkonzentration nicht zu hoch wird. Daher enthält das Kühlwasser einen geringen Anteil Bor in

des Reaktors die Kettenreaktion gebremst wird.

Hypothetische Störfälle in Druckwasserreaktoren sind daher zum Beispiel solche, bei denen eine der Schleifen stärker auskühlt als die anderen. Etwa bei einem Leck am entsprechenden Dampferzeuger; dabei fällt der Druck und damit auch die Temperatur sofort ab.

Ein weiteres Szenarium ist ein so genannter Borverdünnungsstörfall. Durch verschiedene externe oder inhärente Mechanismen kann ein Pfropfen zu schwach boriiertes Wasser entstehen, der sich bei abgeschaltetem Reaktor, also ausgeschalteten Kühlmittelumwälzpumpen, zunächst nicht mit dem boriierten Kühlmittel vermischt.

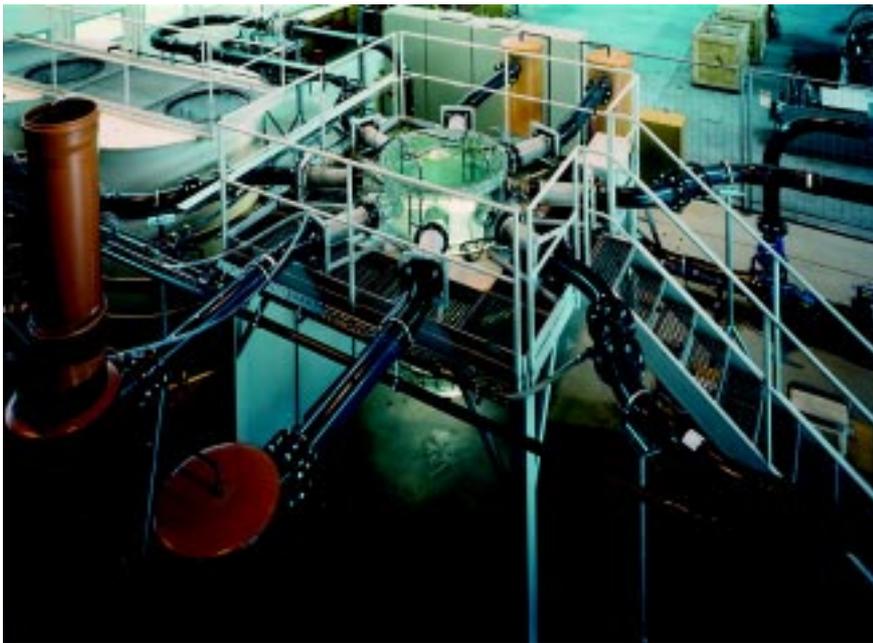
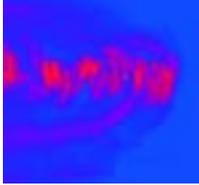
Durch äußere Ursachen bedingte Deborierungen können zum Beispiel Fehler im Wasseraufbereitungssystem sein, bei denen versehentlich unboriertes Wasser zuge speist wird. Im Gegensatz dazu ist ein inhärenter, also durch innere Ursachen bedingter Mechanismus, wenn bei einem Leckstörfall Wasser aus einer Kühlschleife ausdampft. Dabei verdampft im Reaktorkern infolge der radioaktiven Zer-

Ein transparentes Reaktormodell

Für solche Vermischungsuntersuchungen haben wir die Versuchsanlage ROCOM (**R**ossendorf **C**oolant **M**ixing **T**est **F**acility) aufgebaut. ROCOM ist ein 1:5-Modell eines deutschen Reaktors vom Typ Konvoi. Um Geschwindigkeitsfelder der Kühlflüssigkeit mit optischen Methoden (Laser-Doppler-Anemometrie) messen zu können, besteht das Modell des Reaktordruckbehälters aus Plexiglas. Es enthält vier Kühlwasserschleifen, in denen regelbare Pumpen die Simulation sehr verschiedener Strömungsregimes erlauben.

Da unser Modell aus Plexiglas besteht und wir auch aus Sicherheitsgründen nicht bei den extrem hohen Drücken und Temperaturen, wie sie in Druckwasserreaktoren üblicherweise herrschen, experimentieren möchten, haben wir für unsere Vermischungsexperimente die Leitfähigkeit als zu untersuchende Größe gewählt. Damit verfolgen wir die Konzentration eines Pfropfens Salzlösung als Tracersubstanz in deionisiertem Wasser an mehr als 1000 Positionen in der Versuchsanlage.

Die Messung der Salzkonzentration erfolgt über die Änderung der elektrischen Leitfähigkeit des Fluids mit Hilfe von so



Versuchsanlage ROCOM zur Modellierung der Kühlmittelströmung in einem Kernreaktor – die Rohre und orangefarbenen Behälter stellen die Elemente der Kühlschleifen dar, in der Mitte leuchtet das Reaktormodell.



Das Reaktormodell bildet das Kernstück von ROCOM – es ist detailgetreu aus Plexiglas (1:5-Modell) gefertigt und ermöglicht auch Messungen der Strömungsgeschwindigkeit des Wassers mit optischen Methoden (Laserstrahlen).

genannten Gittersensoren. Die Sensoren sind wie ein sich kreuzendes Drahtgeflecht aufgebaut, in dem jeder Kreuzungspunkt eine Messstelle darstellt. Durch geschickte elektronische Ansteuerung der Messstellen erreichen wir eine Messfrequenz von bis zu 200 Hertz. Da die Salzkonzentration sehr niedrig ist – nach Durchmischung des Tracerpfropfens in der gesamten Anlage liegt sie immer noch unter der von normalem Leitungswasser! – können wir mit Hilfe des Tracers zwar Konzentrations-, aber keine Dichteunterschiede simulieren. Höhere Salzkonzentrationen verbieten

sich wegen der extremen Empfindlichkeit der Sensoren.

Doch wir haben mit Hilfe strömungsmechanischer Berechnungen nachgewiesen, dass Dichteunterschiede für die oben beschriebene Art der Vermischung nicht relevant sind. Denn der Impulseintrag in die Strömung ist sehr hoch, da der Pfropfen durch die Kraft der anfahrenen Pumpe gewissermaßen in den Kühlkreislauf geschleudert wird. Erst bei einem deutlich geringerem Impulseintrag, also bei sehr kleinen Strömungsgeschwindigkeiten, gewinnen die durch Dichteunterschiede bedingten Auftriebskräfte in der Strömung an Bedeutung.

Realitätsnahe Sicherheitsanalysen

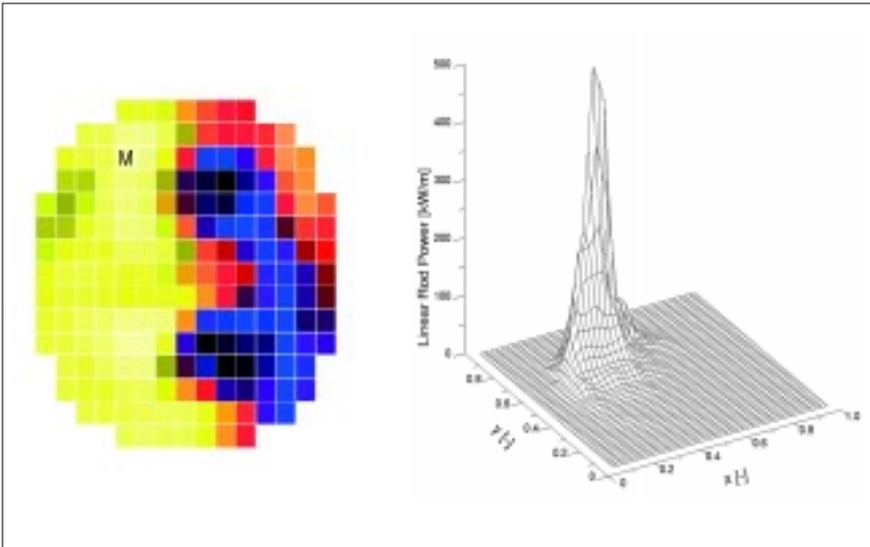
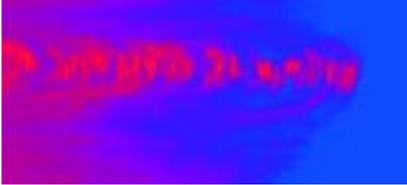
Die Ergebnisse der Experimente und Berechnungen zur Kühlmittelvermischung liefern wichtige Eingangsdaten für die anschließenden reaktordynamischen Störfallanalysen. Hierfür haben wir im FZR das Neutronenkinetikprogramm DYN3D entwickelt. Ein Programm, mit dem wir Berechnungen zum Ablauf hypothetischer Störfälle durchführen können – unter anderem auch für die genannten Borverdünnungs- und Unterkühlungsstörfälle. DYN3D modelliert in dem Fall nicht die Vermischung selbst, sondern die aus den Störfällen resultierenden Prozesse im Reaktorkern, also die räumlich-zeitliche Entwicklung der Leistungsverteilung und

die daraus resultierenden Brennstoff- und Kühlmitteltemperaturen. Dabei berechnet es die sicherheitstechnisch relevanten Parameter wie die maximale Temperatur des Brennstoffs und der ihn einschließenden Hüllrohre oder den Dampfgehalt im Reaktorkern und ermittelt daraus den Abstand zu den zulässigen Grenzwerten.

Die Vorbedingungen für das Verhalten des Reaktorkerns leiten wir aus den beschriebenen Experimenten ab. Die Temperatur- oder Borkonzentrationsverteilung am Eintritt in den Kern erhalten wir direkt aus den Ergebnissen der Vermischungsexperimente und aus numerischen Simulationen.

Dafür haben wir ein Modell entwickelt, das in der Lage ist, auf der Basis einiger weniger Experimente eine große Anzahl von möglichen Anfangsparametern zu variieren. Der Trick dabei ist, nach der oben beschriebenen Experimentiermethode kleine (kurze) Pfropfen zu verschiedenen Zeitpunkten in die Versuchsanlage einzuspeisen und deren Vermischung zu messen. Große Pfropfen oder Pfropfen komplizierter Form können wir dann numerisch aus diesen kleinen Referenzpfropfen zusammensetzen. So erspart man sich Zeit für zusätzliche Experimente.

Bei einer Rechnung für einen bestimmten Störfall gibt man Anfangsposition, Pfropfengröße und -form vor. Daraus resultiert eine Verteilung der Störung am Eintritt des Kühlwassers in die Brennelemente des Reaktors (der betrachtete Reaktor hat 193 solcher Elemente). Aus dieser Verteilung berechnet das Programm DYN3D die Leistungsfreisetzung für jedes der 193 Brennelemente. Im Ergebnis erhalten wir die dreidimensionale Form der Leistungsverteilung im Reaktorkern. Form und Höhe dieser Verteilung werden entscheidend durch die Bedingungen der Eingangsparameter, also den Salzgehalt (stellvertretend für Temperatur und Borkonzentration) sowie Größe und Form des Pfropfens, beeinflusst. Deren genaue Kenntnis entscheidet somit über die Realitätsnähe und die Aussagekraft der Rechenergebnisse.

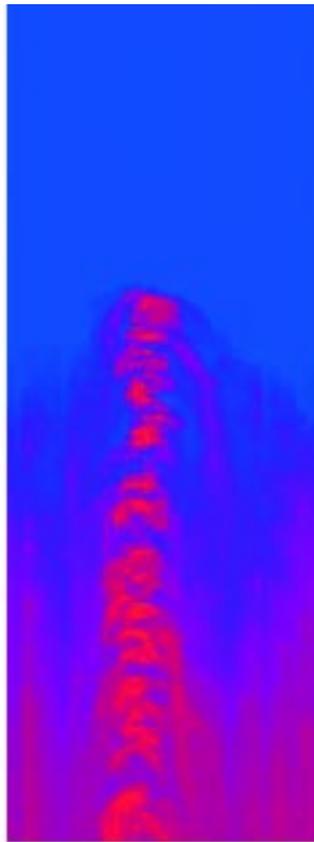


Links: Detailliert (für jedes Brennelement ein Wert) werden die Eingangsdaten für die Störfallanalyse bereitgestellt. (Dunkel bedeutet hohe, hell geringe Borkonzentration.) An der mit M gekennzeichneten Position befindet sich das Maximum der Verdünnung und somit auch das Maximum der Leistungsverteilung.
 Rechts: 3D-Verteilung der Leistungsdichte im Reaktorkern, berechnet mit DYN3D unter Verwendung der links gezeigten Eingangsdaten.

Zucker und Sahne

Mit der hochauflösenden Messtechnik lassen sich auch turbulente Fluktuationen in der Strömung visualisieren. Die Vermischung in einer turbulenten Strömung ist nicht nur sicherheitstechnisch für Kernreaktoren relevant, sondern gleichzeitig ein grundlegendes strömungsmechanisches Phänomen, das durch die Herausbildung von Wirbeln, Totwasserbereichen oder Schichtungen beeinflusst wird. Man kann diese turbulenten Vermischungsstrukturen selbst beobachten, wenn man Sahne in Kaffee oder Tee gießt.

Die Experimente an ROCOM stellen uns insbesondere Tests für die Überprüfung unserer strömungsmechanischen Berechnungen zur Verfügung. Eine spezielle Herausforderung für diese Berechnungsverfahren ist die Simulation von Vermischungsvorgängen, wenn bei langsamen Strömungsgeschwindigkeiten Wasser mit einer anderen Dichte eindosiert wird. Die Herausforderung ist dadurch gegeben, dass bei diesen auftriebsdominierten Vermischungsvorgängen die treibenden Kräfte für die Vermischung sehr viel geringer sind als beim Zuschalten einer Pumpe. Dadurch können komplizierte turbulente Strukturen relativ stabil bestehen bleiben, die bei großen An-



Digitalvideo (in Pfeilrichtung läuft die Zeit) eines Versuchs zur Einspeisung von Zuckerwasser (zur Simulation einer Dichteerhöhung) an einer Messposition im unteren Teil des Reaktorbehälters. Die hochauflösende Messtechnik zeigt die durch diese Dichteunterschiede hervorgerufenen turbulenten Wirbelstrukturen (rot).

triebskräften für die Strömung sofort wieder zerstört würden. Diese turbulenten Strukturen sind aber dadurch gekennzeichnet, dass sie sich bei kleinster Änderung der Kräfte in nahezu chaotischer Weise verändern können, somit also sehr schwierig zu berechnen sind. Dichteunterschiede erreicht man normalerweise durch Verwendung kälteren oder heißeren Wassers. Da unsere Versuchsanlage aber aus Plexiglas besteht, fällt das natürlich aus. Da sich hohe Salzkonzentrationen aus oben genannten Gründen verbieten, erreichen wir eine Dichteerhöhung, indem wir in dem einzuspeisenden Wasser eine große Menge Zucker auflösen. Das Wasser wird etwas dickflüssiger, behält aber sonst alle notwendigen Eigenschaften. Das Zuckerwasser muss natürlich ordentlich umgerührt werden, bevor wir es eindosieren. Die Strömungsbilder, die wir dabei erhalten, weichen völlig vom Strömungsbild bei „normalen“ Versuchen ab. Turbulente Wirbelstrukturen werden sichtbar. – Wieder sind eine Menge nahezu einzigartiger Messdaten erzeugt worden. Die Computerprogramme zur Nachrechnung dieser Experimente können gestartet werden.

Neben der direkten Verwendung für Sicherheitsanalysen nutzen wir die Daten also auch zur Überprüfung theoretischer Computermodelle, die wir für die dreidimensionale Modellierung von Strömungsprozessen entwickelt haben. Das ist der Grund, warum sich nicht nur die Betreiber von Kernkraftwerken für unsere Ergebnisse interessieren, sondern auch Forschergruppen in Schweden, Finnland, Großbritannien und der Schweiz, denen wir im Rahmen eines europäischen Forschungsprojektes zur Reaktorsicherheit unsere Ergebnisse zur Verfügung stellen.

Dank den Sponsoren

Die Untersuchungen zur Kühlmittelvermischung werden im Rahmen der Reaktorsicherheitsforschung vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, zum Teil auch von den Betreibern der Kernkraftwerke und von der EU finanziert.