

# Forschung für Wasserstoffsicherheit

W. Breitung, IKET

## Einleitung

Der vorliegende Beitrag beschreibt Forschungsarbeiten zur Wasserstoffsicherheit. Dieses Thema hat sich als langfristig wichtige Querschnittsaufgabe im FZK erwiesen: begonnen wurde vor 15 Jahren auf dem Gebiet der Reaktorsicherheit [1], seit 10 Jahren werden zusätzlich Arbeiten zur sicheren Nutzung des zukünftigen Energieträgers Wasserstoff durchgeführt [2,3], und seit 5 Jahren sind auch Sicherheitsfragen des ITER Fusionsreaktors Gegenstand der Untersuchungen [4]. All diesen Arbeitsgebieten liegt im Störfall eine gemeinsame Ereigniskette zu Grunde.

## Störfallablauf

Bei Störfällen mit Wasserstoff lassen sich folgende Hauptphasen unterscheiden:

- H<sub>2</sub>-Freisetzung,
- Verteilung und Vermischung mit Luft,
- Zündung,
- Verbrennung,
- Auswirkung der mechanischen und thermischen Lasten.

Viele wichtige sicherheitsrelevante Eigenschaften von H<sub>2</sub> unterscheiden sich erheblich von denen der bisher genutzten konventionellen Kohlenwasserstoffe. Erfolgreiches H<sub>2</sub>-Risikomanagement erfordert somit eigene H<sub>2</sub>-spezifische Analysen. Deshalb wurde eine durchgehende deterministische Beschreibung des Wasserstoffverhaltens mit eigenen selbstent-

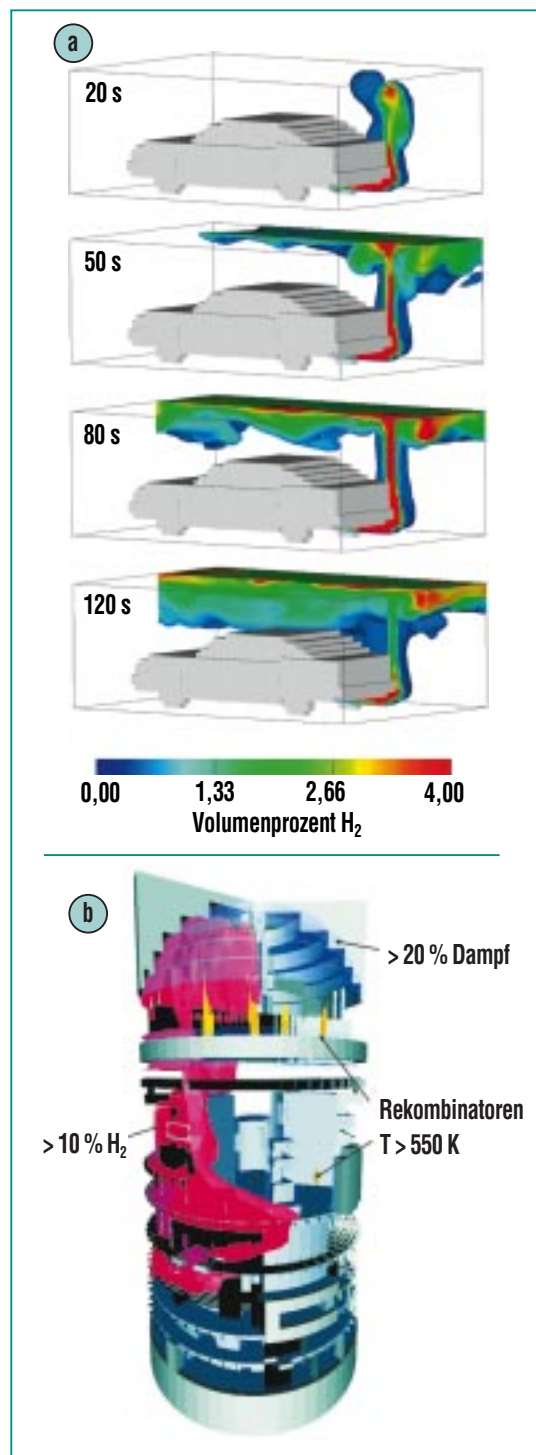
wickelten numerischen Programmen erarbeitet.

Die wissenschaftliche Herausforderung besteht in der Entwicklung spezieller Software zur Simulation von transienten, turbulenten und reaktiven Strömungen in komplexen dreidimensionalen Geometrien. Die folgenden drei Abschnitte geben einen Überblick zu untersuchten Fragestellungen und Ergebnissen in den drei Bereichen „Verteilungssimulation“, „Verbrennungssimulation“, und „Experimente“.

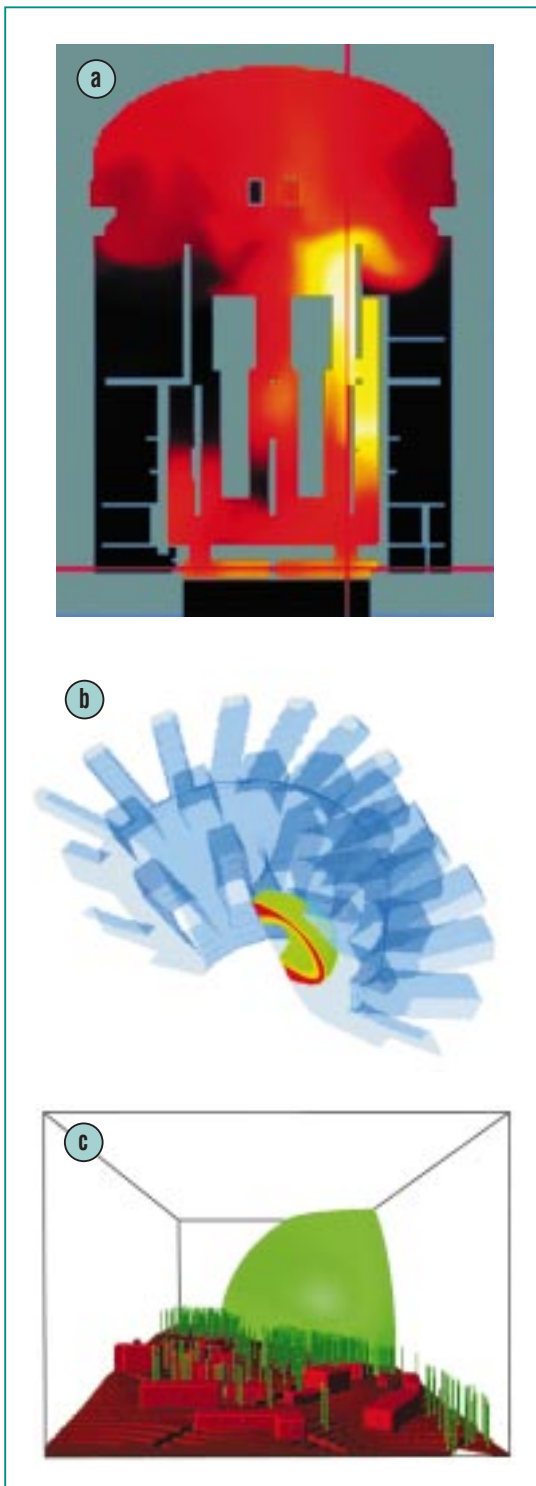
## Verteilungssimulation

Abb. 1 zeigt zwei Beispiele für die Analyse von H<sub>2</sub>-Verteilungsvorgängen mit dem 3D Programm GASFLOW. Oben ist die zeitliche Entwicklung der H<sub>2</sub>-Luft-Wolke dargestellt, die sich bei Leck an einem H<sub>2</sub>-betriebenen Fahrzeug in einer Garage entwickeln könnte. Der brennbare Gemischbereich ist rot dargestellt (>4% H<sub>2</sub>). Die Untersuchungen zeigten, dass bis zu einer bestimmten kritischen Leckrate (ca. 0,1 g/s) keine Gefährdung durch Ansammlung brennbarer Gemische besteht, weil natürliche Mischungsprozesse, wie Konvektion und Diffusion, eine ausreichende H<sub>2</sub>-Verdünnung bewirken [5].

Abb.1b zeigt ein Beispiel aus Reaktorsicherheitsuntersuchungen, die zusammen mit Framatome ANP für den European Pressurized Reactor (EPR) durchgeführt wurden. Bei dem postulierten Kernschmelzunfall tritt Wasserstoff in das Containment ein (>10% H<sub>2</sub> innerhalb der roten Zone) und wird langfristig durch die installierten katalytischen Rekombinatoren ab-



**Abb.1: Simulation von Wasserstoff-Verteilungsprozessen mit dem 3D-Programm GASFLOW: a) H<sub>2</sub>-Fahrzeug in einer Garage; b) H<sub>2</sub>-Wolke in einem Reaktorsicherheitsbehälter.**



**Abb. 2: Simulation von Wasserstoff-Verbrennungsprozessen mit den 3D-Programmen COM3D und DET3D: a) EPR-Containment, b) ITER-Fusionsreaktor, c) Versuchsgelände.**

gebaut [1]. Framatome nutzt das GASFLOW Programm derzeit für die beiden in Finnland und Frankreich im Bau befindlichen EPR-Anlagen.

### Verbrennungssimulationen

Für die Berechnung der verschiedenen Verbrennungsprozesse wurden im IKET dreidimensionale Programme entwickelt:

- FLAME3D für langsame Deflagration
- COM3D für schnelle turbulente Deflagration
- DET3D für Detonationen.

Abb. 2 zeigt drei Beispiele für die Anwendung der Verbrennungscodes COM3D und DET3D. Oben ist ein 2D-Schnitt durch die 3D-Geometrie des EPR während des Ausbrands einer  $H_2$ -Luft-Dampf-Wolke (Abb. 1) im Containment dargestellt. Es konnte gezeigt werden, dass die in diesem Fall – und in weiteren konservativen Parameterstudien – auftretenden Drucklasten unter dem Auslegungsdruck des Containments liegen [1]. Damit kann Containmentversagen durch  $H_2$ -Verbrennung im Falle eines Kernschmelzunfalls mechanistisch ausgeschlossen werden.

Mit DET3D wurde eine lokale  $H_2$ -Detonation im ITER-Torus simuliert [6]. Abb. 2b zeigt die hemisphärische Detonationswelle kurz nach der Zündung. Obwohl die dynamischen Drucklasten die globale Struktur des Torus nicht gefährden würden, könnten lokale Bauteile, wie z. B. Strahlfenster, Schaden erleiden. Derartige Unfallszenarien sollten durch Gegen-

maßnahmen sicher ausgeschlossen werden. Entsprechende Überlegungen werden derzeit vom ITER-Entwicklungsteam verfolgt.

Abb. 2c zeigt die Ausbreitung einer großskaligen Detonationsfront über ein besiedeltes und bewaldetes Gebiet, wie sie bei einem Unfall mit großen Mengen flüssigen Wasserstoffs (ca. 1 Tonne) auftreten könnte. Diese DET3D Simulation ergab, dass bei dem vorgesehenen Sicherheitsabstand zwischen Versuchsstand und Gebäuden keine Schäden an den belasteten Gebäuden auftreten würden.

### Experimente

Voraussetzung für die Entwicklung und Validierung von vorhergesagfähigen Rechenmodellen ist eine gute experimentelle Datenbasis. Die Programmentwicklung wurde deshalb von Anfang an durch umfangreiche Versuchsprogramme begleitet, die sowohl eigene Messungen als auch gemeinsame Experimente mit russischen und französischen Partnern umfassten. In einer Reihe von EU-Vorhaben entstand in den letzten zehn Jahren eine breite Datenbasis für alle relevanten  $H_2$ -Verbrennungsformen.

Im FZK selbst wurde mit Unterstützung der deutschen Industrie ein Wasserstoffversuchszentrum namens HYKA aufgebaut (Abb. 3a), das sowohl große Schutzbehälter für hochenergetische Versuche enthält (A1, A3), als auch eine große Testkammer, in der Wasserstoff unter kontrollierten Strömungsbedingungen freigesetzt und gezündet werden kann. Abb. 3b zeigt eine lokale Explosion in dieser Testkammer. Abb. 3c demonstriert den

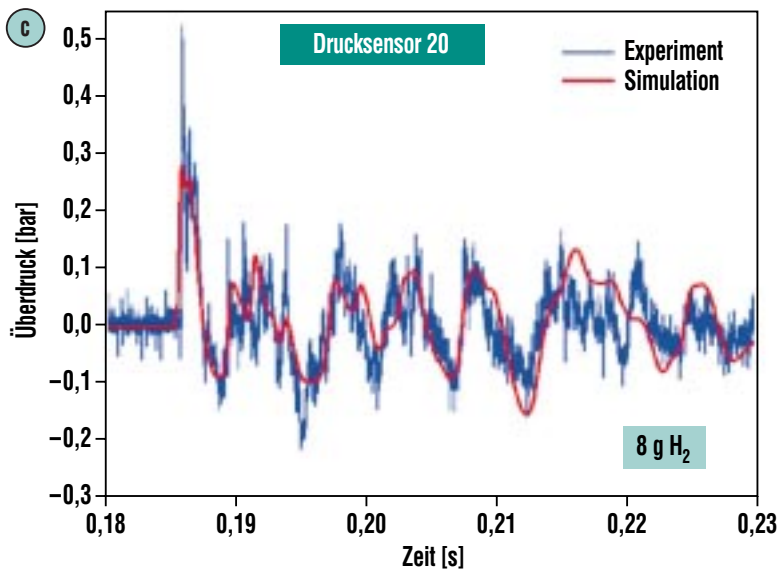


Abb. 3: Experimentelle Einrichtungen des Wasserstoffversuchszentrums HYKA und Vergleich Messung/Rechnung.

erreichten sehr guten Stand der numerischen Verbrennungssimulation. Abb. 3d zeigt einen  $H_2$ -Verbrennungstest in einem mit variablen Längsschlitz versehenen Versuchsrohr. Diese Daten dienen zur Validierung der entsprechenden theoretischen Modelle für teilverspernte Geometrien.

### Ausblick

Das F+E-Programm des FZK soll zukünftig schwerpunktmäßig auf innovative Technologien für die grundlastfähige Energieversorgung ausgerichtet werden [7]. Dazu gehören die Teilprogramme „Nukleare Sicherheitsforschung“, „Kernfusion“ und „Rationelle Ener-

gieumwandlung“. In allen drei Bereichen liefern die hier beschriebenen Forschungsarbeiten bereits seit vielen Jahren international anerkannte Beiträge. Dieses Know-how stellt eine ideale Ausgangsbasis dar zur Bearbeitung der zukünftig anstehenden Aufgaben im Querschnittsthema „Wasserstoffsicherheit“.

---

---

## Literatur

- [1] W. Breitung, W. Baumann, U. Bielert, B. Burgeth, S. Dorofeev, B. Kaup, A. Kotchourko, G. Necker, R. Redlinger, P. Royl, J. Starflinger, G. Stern, J.R. Travis, A. Vesper, Z. Xu, *FZKA 7085 (2005)*
- [2] W. Breitung, U. Bielert, G. Necker, A. Vesper, F.J. Wetzel, K. Pehr, *Proc. 13th World Hydrogen Energy Conf., Beijing, China, June 12-15, 2000, p. 1175*
- [3] W. Breitung, *Proc. Intern. Conf. on Hydrogen Safety, Pisa, 8-10 Sept. 2005 (on CD)*
- [4] R. Redlinger, W. Baumann, W. Breitung, S. Dorofeev, W. Gulden, M. Kuznetsov, A. Lelyakin, G. Necker, P. Royl, R.K. Singh, J.R. Travis, A. Vesper, *Fusions Eng. & Design, Vol. 75-79 (2005), p. 1233*
- [5] W. Breitung, G. Necker, B. Kaup, A. Vesper, *Proc. of 4th Int. Symp. on Hydrogen Power, Strahlsund, 9.-14. Sept. 2001, p. 368*
- [6] W. Baumann, W. Breitung, B. Kaup, R. Redlinger, J.R. Travis, *FZKA 6584 (2001)*
- [7] J. Hoffmann, *Presseinformation 3/2006, www.fzk.de (2006)*