

Analyse des Wasserstoffverhaltens in einem ITER-Unfallszenario

W. Breitung, W. Baumann, S. Dorofeev, M. Kuznetsov, A. Lelyakin, R. Redlinger, P. Royl, R. K. Singh, IKET; J. R. Travis, Fa. DPT, Offenbach; G. Necker, A. Vesper, Pro-Science GmbH, Ettlingen; W. Gulden, EFDA Support Unit, Garching

Einleitung

Im standortunabhängigen ITER-Sicherheitsbericht (GSSR) werden unter anderem Unfallszenarien identifiziert und analysiert, die zur Bildung von brennbaren Mischungen in Systemkomponenten führen [1]. Die sicherheitstechnische Bedeutung von brennbaren Substanzen liegt dabei darin, dass ein Verbrennungsprozess gleichzeitig Tritium sowie radioaktiven Staub mobilisieren und die Integrität der Sicherheitsbarrieren gegenüber der Umwelt gefährden kann. Bei Unfallszenarien mit Lufteinbruch können sich insbesondere brennbare Staub-Luft-Mischungen,

Wasserstoff-Luft-Gemische oder Kombinationen von beiden bilden.

Ziel der hier an einem Beispiel vorgestellten Arbeiten ist die sicherheitstechnische Bewertung brennbarer Substanzen im ITER und ihre Beherrschung durch geeignete Gegenmaßnahmen. Zum Verständnis der Vorgänge und zur Voraussage von Druck- und Temperaturlasten, sowie der strukturellen Konsequenzen, wird eine umfassende Analyse methodisch eingesetzt, die zunächst im Rahmen des Programms NUKLEAR entwickelt und dann auf ITER-typische Fragestellungen erweitert wurde [2].

Unfallanalyse nach einem Bruch im Kühlwasserkreislauf außerhalb des Vakuumgefäßes

Als Beispiel für eine durchgehende Unfallanalyse wird hier von einem Bruch in einem Kühlkreislauf außerhalb des Vakuumgefäßes ohne Plasmaabschaltung ausgegangen (ex-vessel loss-of-coolant-accident, LOCA [3]). Dieses Ereignis verursacht durch unzureichende Kühlung des betreffenden Abschnitts der Ersten Wand einen weiteren Bruch mit Freisetzung von Dampf in das Vakuumgefäß (Abb. 1). Die Reaktion des Dampfes mit heißen Berylliumoberflächen führt zur Wasserstoffentstehung, entsprechend der Gleichung $\text{Be} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{BeO} + \text{H}_2$. Nachdem der betroffene Kühlkreislauf ausgedampft ist, strömt Luft über das primäre und sekundäre Leck in das Vakuumgefäß nach (rechts bzw. links in Abb. 1), wodurch sich brennbare H_2 -Luft-Dampfgemische bilden können. Im Folgenden wird eine mechanistische Analyse dieses Unfalls dargestellt.

Gemischbildung

Die Entwicklung der Gasmischungen, die sich bei dem hier untersuchten Unfallszenario in den verschiedenen ITER-Behältern ansammeln, wurde mit dem 3D-Programm GASFLOW berechnet [4]. Das Geometriemodell ist in Abb. 2 dargestellt. Bei Normalbetrieb ist der Vakuumbehälter (VB) vom Druckabbausystem (DAS) und vom Sammelbehälter (SB) getrennt und erst wenn der Differenzdruck 0,8 bar übersteigt,

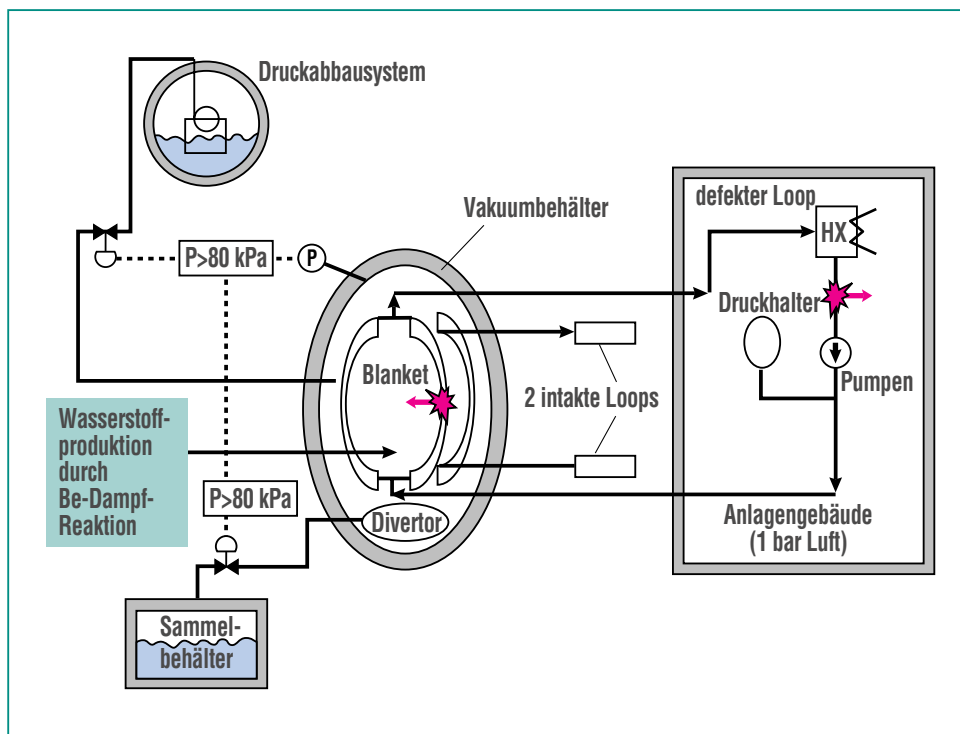


Abb. 1: Untersuchtes Unfallszenario im ITER: Bruch einer externen Kühlwasserleitung im Anlagegebäude (rechts) bewirkt eine lokale Überhitzung und Versagen des Blankets im Vakuumbehälter (links), einströmender Dampf reagiert mit heißem Be zu Wasserstoff, und der nachfolgende Lufteintritt über beide Bruchstellen führt zur Bildung von brennbaren H_2 -Luft-Dampfmischungen (sog. ex-vessel loss-of-coolant-accident) [3].

öffnen sich die Ventile in den Verbindungsleitungen. Das DAS ist zur Aufnahme von Dampf, und der SB zur Aufnahme von Wasser bei Unfällen vorgesehen. Das Geometriemodell besteht aus insgesamt 23.000 Rechenzellen. In der GASFLOW-Simulation wurde das DAS, das aus einem

horizontal liegenden, halb mit Wasser gefüllten Zylinder besteht, vereinfacht als vertikaler Zylinder mit dem gleichen freien Gasvolumen abgebildet.

Wasserstoff entsteht nur im VB während der ersten 2000 s mit einer maximalen Rate von ca. 18 g/s und einer Gesamtmenge

von 14,2 kg [5]. Luft tritt nach den in [5] durchgeführten Analysen des Kühlwasserkreislaufs etwa 10.000 s nach Unfallbeginn in den Vakuumbehälter ein. Nach ca. 800 s öffnen sich die Ventile in den beiden Verbindungsleitungen, und Dampf und Wasserstoff strömen nun vom VB in den SB und das DAS. Durch Dampfkondensation im mit kaltem Wasser gefüllten Druckabbausystem wird ständig Wasserstoff mitgerissen, so dass sich am Ende der Simulation fast der gesamte Wasserstoff im DAS befindet. Abb. 3 zeigt die berechnete zeitliche Entwicklung der Gaszusammensetzung im Druck-

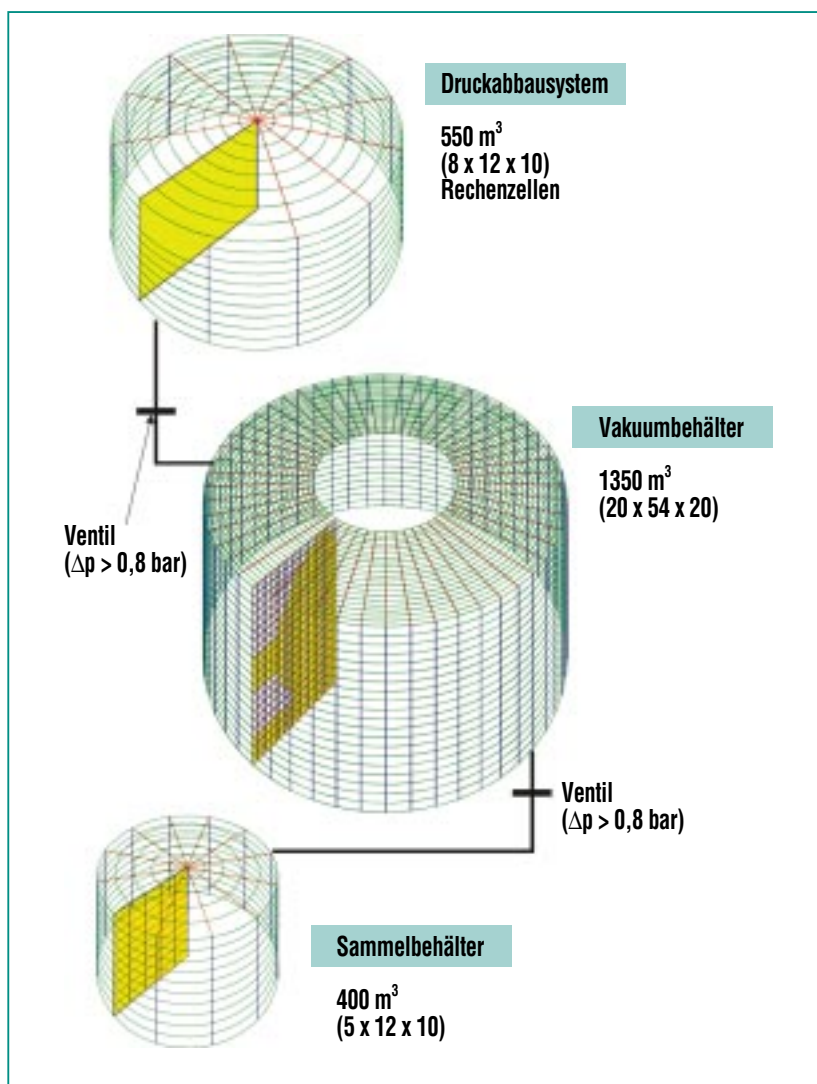


Abb. 2: GASFLOW-Geometriemodell zur Berechnung der Gasmischungen in den drei ITER-Behältern, die nach Öffnen der Ventile (bei ca. 800 s) miteinander verbunden sind. Insgesamt werden ca. 23.000 Rechenzellen in drei zylindrischen Gittern benutzt. Die mit Gas gefüllte Rechendomäne ist als gelb gekennzeichnete Querschnittsfläche dargestellt [4].

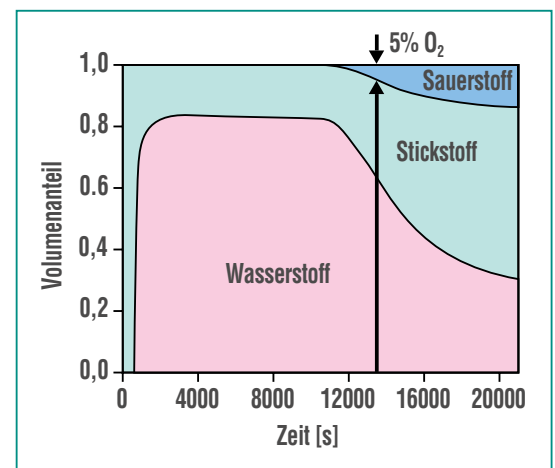


Abb. 3: Zeitliche Entwicklung der Gasmischung im Druckabbausystem (DAS). Die ständige Dampfkondensation im Druckabbausystem, das ein Reservoir an kaltem Wasser enthält, bewirkt eine kontinuierliche Strömung vom Vakuumbehälter in das DAS und dort eine Anreicherung der un-kondensierbaren Gase (H_2 , O_2 , N_2). Am Ende der GASFLOW-Simulation befinden sich 14,0 von insgesamt 14,2 kg Wasserstoff im Druckabbausystem. Die Gasmischung ist brennbar, nachdem 5% Sauerstoff überschritten wurden. Bei 21.000 s liegt eine mit N_2 verdünnte, nahezu stöchiometrische H_2 - O_2 -Mischung vor.

abbausystem. Sauerstoff wird durch den Lufteinbruch etwa ab 10.000 s zugeführt [5]. Die H₂-N₂-O₂-Mischung im DAS ist brennbar, sobald mehr als 5 % O₂ vorhanden sind. Nach etwa 21.000 s herrscht im DAS ein Druck von ca. 0,95 bar bei einer mittleren Gastemperatur von 303 K. Die Gasmischungen im Vakuumgefäß und im Sammelbehälter enthalten zu wenig Wasserstoff um die Zündgrenze zu erreichen.

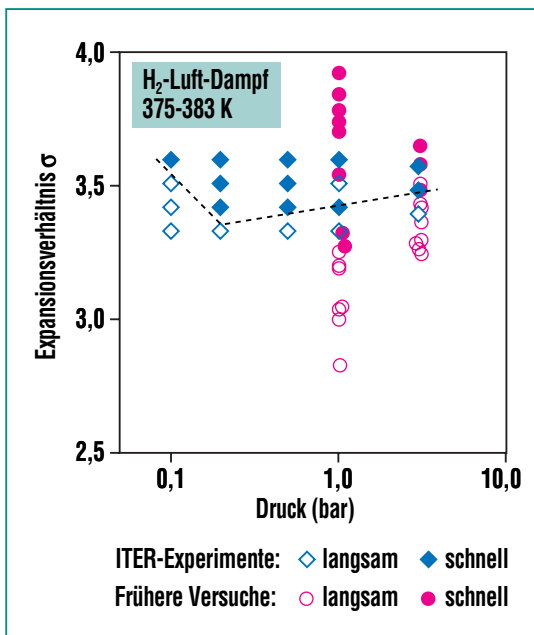


Abb. 4: Zur Bewertung des Risikopotentials der berechneten Gasmischungen im DAS wurden Verbrennungsversuche in geschlossenen Rohren durchgeführt [6]. Für spontane Flammenbeschleunigung ist das Expansionsverhältnis σ der Gasmischung entscheidend. Die bisher für höhere Drücke gefundene Grenze für Flammenbeschleunigung ($\sigma > 3,4 \pm 0,1$, rote Symbole) wurde auch für ITER-typische Drücke bis zu 0,1 bar experimentell bestätigt (blaue Symbole). Die neu bestimmten Kriterien besagen, dass die hier berechneten Mischungen im DAS detonationsfähig sind (Abb. 3).

Risikopotential der Gasmischung im Druckabbau-system

Als nächstes stellt sich die Frage, welches Risiko mit einer Zündung der Gasmischung im DAS verbunden ist. Die potentiellen Drucklasten werden entscheidend von der maximal möglichen Flammengeschwindigkeit (FG) bestimmt: Je schneller die Flamme desto höher sind Druckentwicklung und potentielle Schäden. Im Rahmen des Programms NUKLEAR wurden deshalb Kriterien abgeleitet, die es erlauben, für eine gegebene H₂-Luft-Dampf-Mischung sowohl die Möglichkeit für eine schnelle turbulente Deflagration (FG ca. 800 m/s) als auch für den Umschlag in eine Detonation (FG ca. 2000 m/s) zu bestimmen. Allerdings gab es bisher keine Daten für die hier im ITER relevanten Gasdrücke unter 1 bar.

Entscheidend für die Flammenbeschleunigung ist das Expansionsverhältnis $\sigma = \text{Dichte des unverbrannten Gases} / \text{Dichte des verbrannten Gases}$. Die bisher vorliegende Datenbasis für 1 – 3 bar wurde durch neue Experimente bis auf 0,1 bar erweitert (blaue Symbole in Abb. 4, [6]). Flammenbeschleunigung wurde in diesen Versuchen nur bei Mischungen beobachtet, deren Expansionsverhältnis größer als $3,4 \pm 0,1$ ist. Insgesamt erwies sich die Flammenbeschleunigungsgrenze in dem Druckbereich von 0,1 bis 3 bar als nahezu druckunabhängig.

Das Kriterium für den Übergang zur Detonation enthält die Detonationszellgröße λ der Mischung als einen wesentlichen Parame-

ter. Auch hier wurden neue Daten für ITER-relevante Drücke unterhalb von 1 bar bestimmt [7]. Generell nimmt λ mit abnehmendem Druck zu, was die Möglichkeit für den Umschlag von einer schnellen Deflagration in eine Detonation mit geringer werdendem Anfangsdruck der Gasmischung vermindert.

Die Anwendung der neuen erweiterten Kriterien auf die hier berechneten Gasmischungen im Druckabbau-system (Abb. 3) ergab, dass diese über viele Stunden detonationsfähig sind.

Detonationssimulation

Damit stellt sich als nächstes die Frage welche Drucklasten bei einer detonativen Verbrennung der Gasmischung im Druckabbau-system entstehen würden. Die Gasdetonation im DAS wurde mit dem 3D-Programm DET3D modelliert, das die Euler-Gleichungen der kompressiblen Gasdynamik für chemisch reagierende Gase löst [8]. Das DAS wurde als horizontaler Halbzylinder mit 2,9 m Radius und 46 m Länge modelliert, weil die unteren 3 m der horizontal positionierten Röhre mit Wasser gefüllt sind und nicht an der Gasdetonation teilnehmen (Abb. 5, x-y-Schnitt). Die im oberen y-z-Schnitt dargestellten Strukturen repräsentieren das Rohrleitungssystem innerhalb des DAS.

Für die Simulation wurden 750.000 kubische Rechenzellen von 10 cm Kantenlänge benutzt. Abb. 5 zeigt die Problemgeometrie und das berechnete Druckfeld in Form von drei orthogonalen 2D-Schnitten, 20 ms nach

Zündung der Mischung am linken Rand. Die Detonationsgeschwindigkeit beträgt 1960 m/s. Etwa 22 ms nach der Zündung erreicht die Detonationsfront die rechte Endwand des DAS. Die berechneten Druckverläufe an verschiedenen Positionen auf der Endplatte sind in Abb. 6 dargestellt. Sie dienen als Eingabedaten für den abschließenden Schritt der Analyse, nämlich die Untersuchung des Strukturverhaltens der Endplatte, mit dem Ziel, Aussagen über die Integrität des DAS zu erhalten.

Strukturdynamische Modellierung des Druckabbausystems

Um die Auswirkungen der berechneten Detonation auf die Endplatte des DAS zu untersuchen, wurden zwei verschiedene Modellrechnungen mit dem Programm ABAQUS durchgeführt. In der ersten vereinfachten Analyse wurde rein elastisches Materialverhalten der 3 cm starken Endplatte unterstellt [9]. Jedes Flächenelement oberhalb der Wasserlinie wurde mit dem in DET3D berechneten lokalen Druck-Zeit-Verlauf beaufschlagt, während die Flächenelemente unterhalb der Wasserlinie keiner Druckkraft unterlagen. Es kann gezeigt werden, dass diese Annahme physikalisch gerechtfertigt ist.

Mit dem rein elastischen Modellansatz erreichen die lokalen Spannungen für fast alle Flächenelemente Spitzenwerte, die weit über der elastischen Dehngrenze des verwendeten Stahls liegen. Für die adäquate Beurteilung des Materialverhaltens ist deshalb ei-

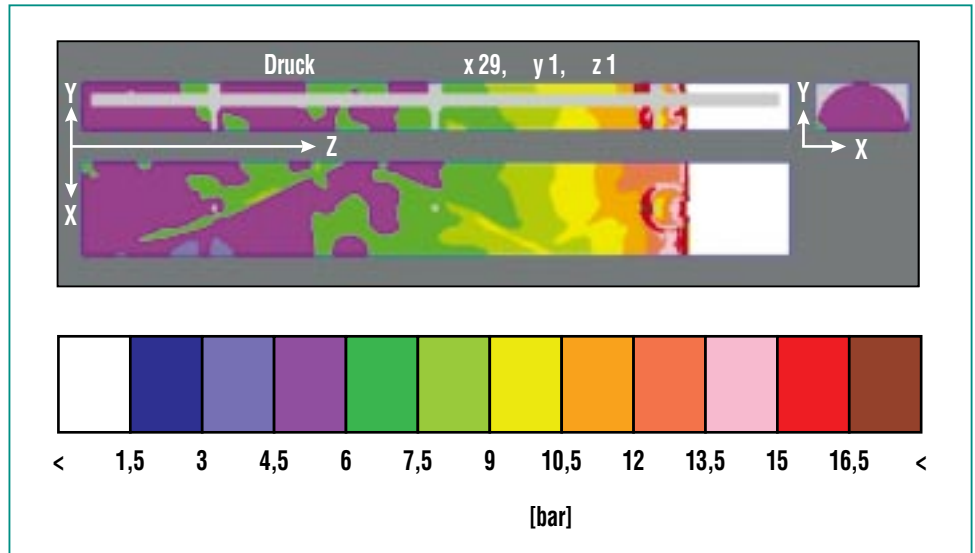


Abb. 5: 3D-Simulation einer Gasetonation im Druckabbausystem (DAS) mit dem Programm DET3D [8]. Die Gasmischung entspricht Abb. 3 bei 21.000 s (30% H₂, 13% O₂, 57% N₂), Anfangsdruck 0,96 bar, Anfangstemperatur 30 °C, Druckfeld 20 ms nach Zündung der Mischung am linken Rand, Detonationsgeschwindigkeit 1960 m/s. Das Bild zeigt drei orthogonale 2D-Schnitte durch den halb-zylinderförmigen Gasraum im DAS, die hellgrauen Flächen in der y-z-Ebene kennzeichnen Einbauten des DAS.

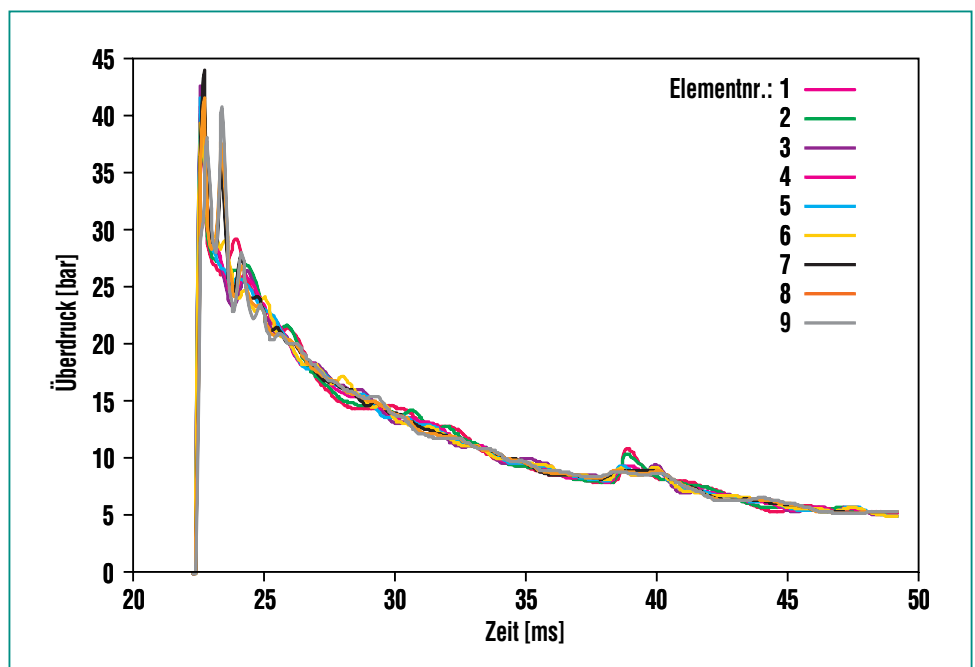


Abb. 6: Mit DET3D berechnete lokale Überdrücke an Flächenelementen der Endwand des Druckabbausystems (x-y-Ebene in Abb. 5). Diese lokalen transienten Drucklasten dienen als Eingabe für strukturmechanische Analysen mit ABAQUS.

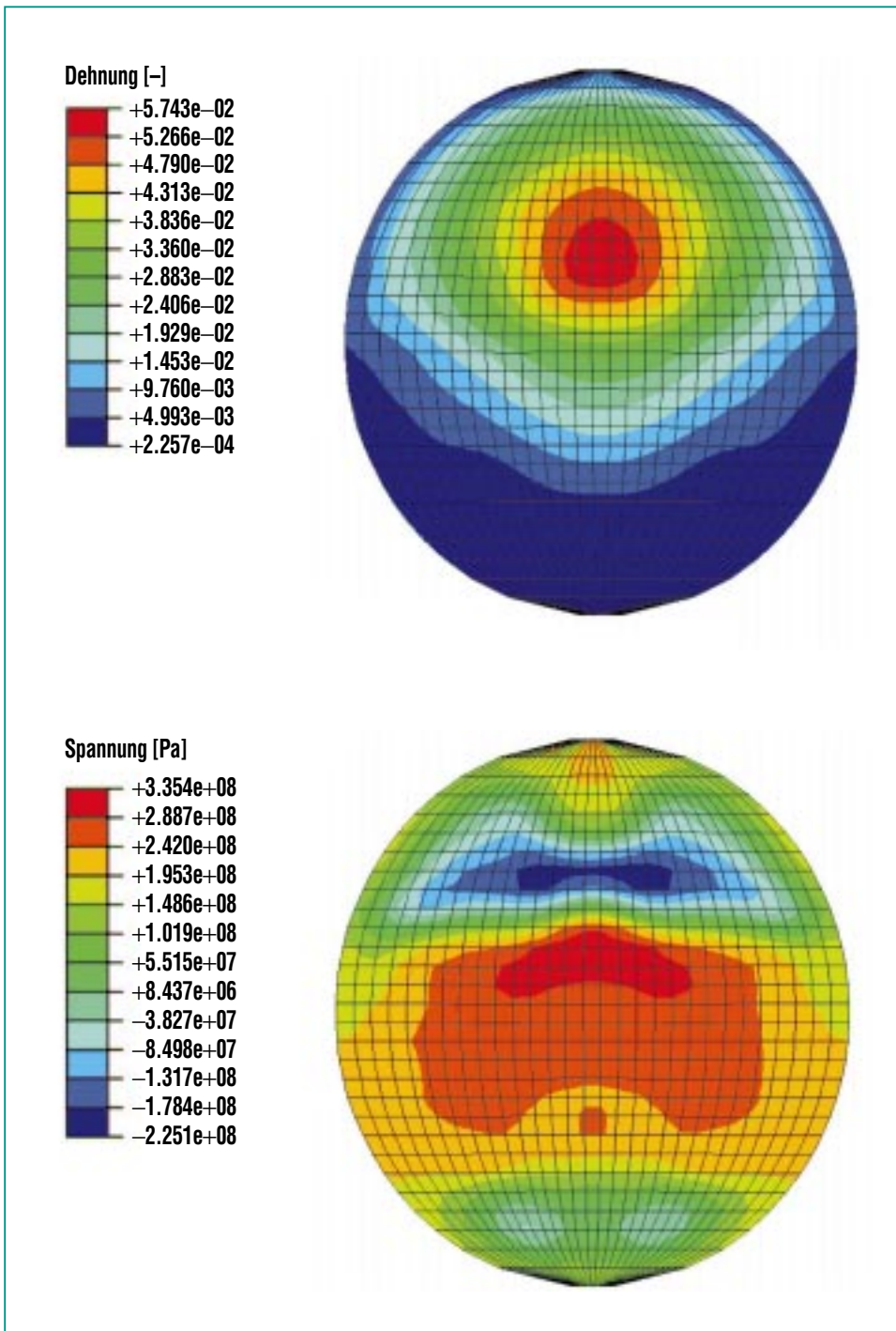


Abb. 7: Mit ABAQUS berechnete maximale Dehnungen und Spannungen in der Endplatte des Druckabbausystems. Diese Maximalwerte werden etwa 14 ms nach Ankunft der Detonationswelle erreicht, wobei die plastischen Deformationen nahezu die gesamte Dicke der Endplatte (3 cm) betreffen. Bei diesem Unfallszenario könnte nach den Designrichtlinien des ITER-Projekts die Integrität des Druckabbausystems nicht gewährleistet werden.

ne transiente inelastische Simulation erforderlich.

Ergebnisse aus dieser Analyse sind in Abb. 7 dargestellt. Die maximalen Spannungen und Dehnungen werden etwa 14 ms nach Ankunft der Detonationswelle erreicht, wobei die Endplatte nahezu über ihre gesamte Dicke von 3 cm in einen plastischen Zustand übergeht. Entsprechend den Design-Richtlinien des ITER-Projekts kann damit die Integrität des Druckabbausystems nicht gewährleistet werden.

Zusammenfassung

Das Wasserstoffverhalten im ITER wurde am Beispiel eines sog. „Ex-vessel-LOCA“-Unfalls durchgehend analysiert. Ausgehend von der Problemgeometrie und den vorgegebenen Gasquellen wurde zunächst die Gemischbildung in den verschiedenen ITER-Behältern mit dem 3D-Programm GASFLOW berechnet. Zündfähige Gemische entstehen bei dem hier untersuchten Szenario nur im Druckabbausystem. Das Risikopotential dieser Mischungen wurde mit neu ermittelten Kriterien für schnelle, turbulente Verbrennung, bzw. für Detonation bei ITER-typischen Drücken bewertet. Die im DAS auftretenden Mischungen sind demnach ausgesprochen detonationsfähig. Im nächsten Schritt der Analyse wurde deshalb eine Detonation unterstellt und mit dem 3D-Programm DET3D numerisch simuliert. An der höchstbelasteten Endwand des DAS treten kurzzeitig Spitzendrücke bis 45 bar auf. Die Auswirkungen der komplexen orts- und

zeitabhängigen Drucklasten auf das strukturdynamische Verhalten der Endplatte wurden mit ABAQUS in einem transienten inelastischen Modell untersucht. Die berechneten plastischen Deformationen sind so groß, dass nach den Designrichtlinien des

ITER-Projekts die Integrität des Druckabbausystems bei diesem Unfallszenario nicht gewährleistet wäre.

Die hier dargestellten Analysen führen zu der Schlussfolgerung, dass bei ITER zusätzliche De-

signmaßnahmen ergriffen werden sollten, um das untersuchte Unfallszenario sicher auszuschließen. Entsprechende Überlegungen wurden im ITER-Projekt aufgenommen.

Literatur

- [1] *ITER Generic Safety Report (GSSR), Volume VIII, ITER Garching JWS, G 84 RI 7 01-0706 RI.O (Juli 2001)*
- [2] W. Breitung, P. Royl, *Nuclear Eng. Design* 202 (2000) 249
- [3] M. J. Gaeta, B. J. Merrill, H.-W. Bartels, C. R. Laval, L. Topilski, *Fusion Technology* Vol.32 (1997) 23
- [4] W. Baumann, W. Breitung, B. Kaup, G. Necker, P. Royl, J. R. Travis, *Bericht FZKA 6663 (2001), EFDA Bericht TW0-TSS-SEA 3.5 / D4*
- [5] *Pers. Mitteilung über MELCOR-Rechnungen, ITER-Team Japan, e-mails von H.W. Bartels und L. Topilski, ITER-JCT, Garching (28.2 bzw. 20.4.2001)*
- [6] M. Kuznetsov, V. Alekseev, I. Matsukov, W. Breitung, S. Dorofeev, *Bericht FZKA-6811 (2003)*
- [7] A. Gavrikov, A. Lelyakin, W. Breitung, S. Dorofeev, *Report EFDA Task TW2-TSS-SEA 3.5, Report FZKA 6812 (2003)*
- [8] R. Redlinger, *Interner Bericht /IKET-Nr. 1/03, FZK (2003)*
- [9] R. Redlinger, R. K. Singh, *Interner Bericht IKET-Nr. 6/03, FZK (2003)*