

# Untersuchungen zur Kontrolle von Radiolysegas-Detonationen in deutschen Siedewasserreaktoren

W. Breitung, A. Kotchourko, M. Kuznetsov, R. Redlinger, IKET;  
A. Friedrich, J. Grune, G. Stern, A. Vesper, K. Sempert, ProScience GmbH

## Einleitung

Im Rahmen der Nuklearen Sicherheitsforschung laufen im IKET umfangreiche Untersuchungen zum Wasserstoffverhalten in Druck- und Siedewasserreaktoren. Im vergangenen Jahr wurde eine Reihe von drittmittelgeförderten Projekten durchgeführt (Tab. 1).

Dieser Artikel konzentriert sich auf Arbeiten, die einer verbesserten Radiolysegaskontrolle in laufenden deutschen Siedewasserreaktoren (SWR) dienen. Generelles Ziel ist die Schaffung einer

grundlegenden Datenbasis zum Verständnis der gas- und strukturdynamischen Auswirkungen von Radiolysegasreaktionen, um daraus effektive Gegenmaßnahmen für laufende SWR-Anlagen abzuleiten.

In Siedewasserreaktoren entstehen während des Betriebs durch strahlungsbedingte Spaltung von Wasser erhebliche Mengen an Radiolysegas ( $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ ), z.B. bei einer 900 MWe-Anlage etwa  $180 \text{ Nm}^3/\text{h}$ . Die Gaskonzentrationen im Frischdampf sind zwar sehr gering (22 vol ppm  $\text{H}_2 + 11$  vol ppm  $\text{O}_2$ ), aber in nicht permanent

durchströmten Anschlussleitungen zum Primärkreis kann Dampf kondensieren und das dabei zurückbleibende nicht kondensierbare Radiolysegas kann sich über Wochen und Monate auf hohe Partialdrücke anreichern (bis zu 70 bar). Trotz sorgfältiger Überwachung potentiell gefährdeter Anlagenteile kam es Ende 2001 in dem deutschen Kernkraftwerk Brunsbüttel und in der japanischen Anlage Hamoaka-1 zu Radiolysegasdetonationen mit lokalem Rohrversagen und erheblichen Folgekosten. Die deutschen SWR-Betreiber haben daraufhin das IKET mit der Durch-

Auftraggeber	Anlage / Typ	Arbeitsthema
Deutsche SWR-Betreiber (VGB)	Deutsche SWR	Experimente zur Detonationsfestigkeit kleiner Anschlussleitungen am Primärkreis
EnBW	Philippsburg-1 SWR, 920 MWe	3D-Simulation von Radiolysegasdetonationen im Ringspalt von Abblaserohren
HEW, Vattenfall Europe	Brunsbüttel SWR, 800 MWe	Modellierung von Radiolysegasdetonationen in Sicherheits- und Entlastungsventilen
HEW, Vattenfall Europe	Brunsbüttel SWR, 800 MWe	Entstehung und Verbrennung von Radiolysegas (RG) in Füllstandsmesstöpfchen
Krümmel GmbH	Krümmel SWR, 1310 MWe	3D-Verteilungsrechnungen für neues Konzept zum RG-Abbau in Abblaseleitungen
KKW Leibstadt AG Schweiz	Leibstadt, General Electric SWR, 990 MWe	3D-Modellierung der RG-Kompression und Verbrennung in einem Abblaserohr nach Öffnen des S+E-Ventils
Österreichisches Umweltbundesamt Wien	KKW Temelin, Tschechien WWER-1000	Wasserstoffsituation im Falle eines SB-LOCA-Kernschmelz-Unfalls, Empfehlung von Gegenmaßnahmen
Framatome (FANP) Erlangen	EPR DWR, 1600 MWe	Entwicklung zusätzlicher Modelle für die bei FANP eingesetzten FZK-Programme GASFLOW (Verteilung) und COM3D (Verbrennung)
KAERI Südkorea	APR-1400 DWR, 1400 MWe	Analyse eines SB-LOCA's mit GASFLOW, Implementierung von GASFLOW bei verschiedenen koreanischen Organisationen

**Tab. 1: Drittmittelgeförderte Projekte des IKET im Jahr 2003 zum Wasserstoffverhalten in Druck- und Siedewasserreaktoren (DWR bzw. SWR).**

führung von verschiedenen experimentellen und theoretischen Untersuchungen beauftragt, von denen im Folgenden zwei beschrieben werden.

### 3D-Analyse von gasdynamischen Detonationslasten

Die Radiolysegasdetonation in der Deckelsprühleitung des Kernkraftwerks Brunsbüttel (KKB) wurde mit dem im IKET entwickelten 3D-Programm COM3D [1] simuliert, um lokale Druckverläufe, gasdynamische Impulse und Temperaturtransienten in der Umgebung der versagenden Leitung zu berechnen. Die Deckelsprühleitung wird während des Normalbetriebs nicht benutzt. Nur bei der Vorbereitung eines Brennelementwechsels wird über diese Leitung der Reaktordeckel mit Wasser von innen besprüht, um eine schnellere Temperaturabsenkung zu erreichen. Im KKB war es durch Leckage eines vorgelagerten Ventils zu langfristig erhöhter Dampfkondensation und Ansammlung von Radiolysegas gekommen. Die komplexen Vorgänge sind in [2] detailliert beschrieben.

Vor Wiederanfahren der Anlage musste der Betreiber nachweisen, dass Sekundärschäden an sicherheitsrelevanten Komponenten ausgeschlossen werden können. Das Nahfeld der beschädigten Deckelsprühleitung wurde dazu mit einem sehr detaillierten Modell abgebildet (5 Millionen kubische Rechenzellen, 4 cm Kantenlänge). Abb. 1 zeigt ein halbtransparentes „Glasmodell“

des interessierenden Containmentbereichs. Da die Anfangsbedingungen der Gasdetonation nicht genau bekannt sind, wurden verschiedene Rechnungen mit unterschiedlichen Ausgangszuständen des Gases in der Deckelsprühleitung durchgeführt. Der wahrscheinlichste Ablauf der Radiolysegasdetonation ist in Abb. 2 dargestellt [3].

Hierbei wurde eine voll entwickelte Detonation im gesamten Gasvolumen der Deckelsprühleitung simuliert. Der im Unfall zerstörte Rohrabschnitt wurde mit einem dynamischen Wandmodell beschrieben, bei dem die Rohrwand 10 cm hinter der führenden Detonationsfront versagt. Abb. 2 zeigt berechnete Schlierenaufnahmen,



Abb.1: „Glasmodell“ des oberen Teils des KKB-Sicherheitsbehälters in der Nähe der durch Radiolysegasdetonation beschädigten Deckelsprühleitung. Geometriemodell für die COM3D-Simulation mit 5 Millionen kubischen Rechenzellen von 4 cm Kantenlänge.

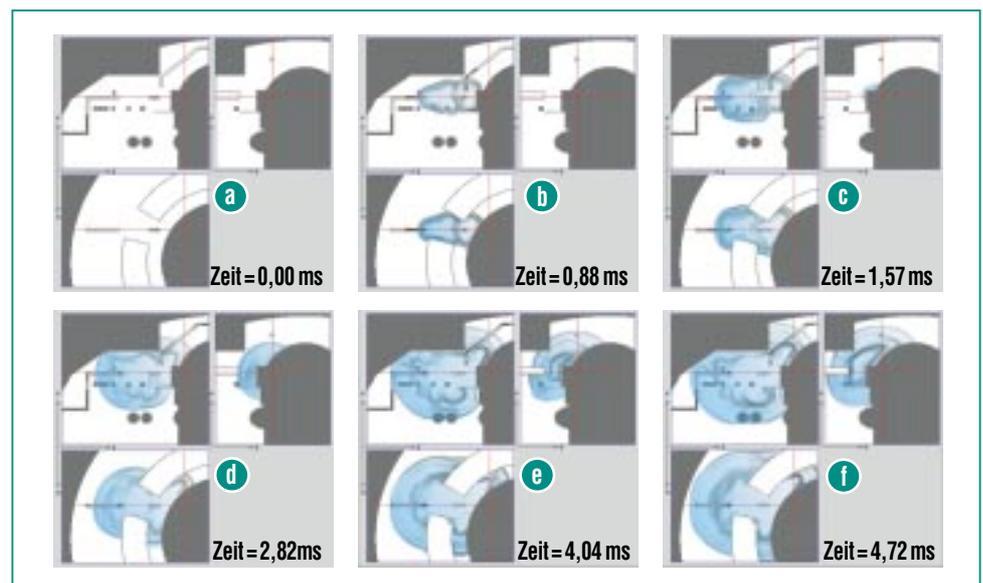


Abb. 2: Mit COM3D berechnete „Schlieren“-Aufnahmen zur Darstellung der Detonationsdruckwelle im Nahbereich der versagenden Deckelsprühleitung des KKW Brunsbüttel. Dargestellt ist der Gradient der Gasdichte. Für jeden festen Zeitpunkt sind drei orthogonale Schnitte durch die 3D-Geometrie gezeigt, oben = Vertikalschnitte, unten = Horizontalschnitt. Die äußerste dunkelblaue Zone kennzeichnet den führenden Druckstoß, der sich in der Containmentatmosphäre ausbreitet. Die dahinter folgende zweite dunkelblaue Zone entspricht dem Rand der expandierenden heißen Verbrennungsgase (= Dampf).

d.h. den Gradienten der Gasdichte, für drei orthogonale Schnittebenen durch die 3D-Geometrie zu verschiedenen Zeitpunkten. Die beiden oberen Abbildungen zu jedem festen Zeitpunkt repräsentieren vertikale und die dritte Abbildung einen horizontalen Schnitt. Die große Struktur jeweils rechts im Bild stellt den Reaktordruckbehälter dar. Darüber befindet sich die obere Containmentbegrenzung. In den Abbildungen stellt die erste dunkelblaue Zone den führenden Stoß dar, der sich in der Umgebungsatmosphäre ausbreitet. Die zweite dahinter auftretende dunkelblaue Zone (= großer Gradient der Gasdichte) kennzeichnet die Grenze der heißen expandierenden Verbrennungsgase. Insgesamt wurde eine Verbrennungsenergie von 14,5 MJ freigesetzt.

Abb. 3 zeigt Beispiele für berechnete Drucklasten in der Umgebung der versagenden Deckelsprühleitung. Die Daten lassen folgende Schlüsse zu:

- Die gasdynamischen Lasten fallen wegen des kleinen Verhältnisses von Radius der Deckelsprühleitung (0,05 m) zur charakteristischen Entfernung weiterer Einbauten (Meter) sehr rasch mit zunehmender Entfernung vom Explosionsort ab.
- Die strukturdynamischen Schäden beschränken sich auf dünne Einbauten ( $\leq 1$  mm Wandstärke) nahe am Versagensort ( $\leq 1$  m).
- Die Temperaturtransienten im Gas sind auf kurze Zeiten

(< 1 s) und einige Meter Entfernung von der Versagensstelle beschränkt.

- Das aufgetretene Schadensbild wird nicht von der expandierenden Detonationsdruckwelle, sondern von der Splitterwirkung beim Rohrversagen dominiert.

Aufgrund dieser Ergebnisse konnten unerkannte Sekundärschäden an sicherheitsrelevanten Kabeln, Messeinrichtungen und Rohrleitungen durch Druck- oder Temperatureinwirkung ausgeschlossen werden. Die geschilderten Berechnungen haben wichtige Daten für die erneute Betriebsgenehmigung von KKB geliefert.

### Detonationsversuche mit Radiolysegas in DN-15-Rohren

In deutschen Siedewasserreaktoren sind viele Messleitungen am Primärkreis mit sog. DN-15 Rohren aus austenitischen Stahl ausgeführt, die einen Innendurchmesser von 15 mm und eine relativ große Wandstärke von 2,9 mm besitzen. Solche nicht permanent gespülten Messleitungen könnten im Extremfall mit 70 bar Radiolysegas gefüllt sein. Einfache Abschätzungen zeigten, dass DN-15 Leitungen wegen ihrer hohen Wandstärke eventuell auch einer Radiolysegasdetonation bei 70 bar Ausgangsdruck standhalten könnten. Unsicher

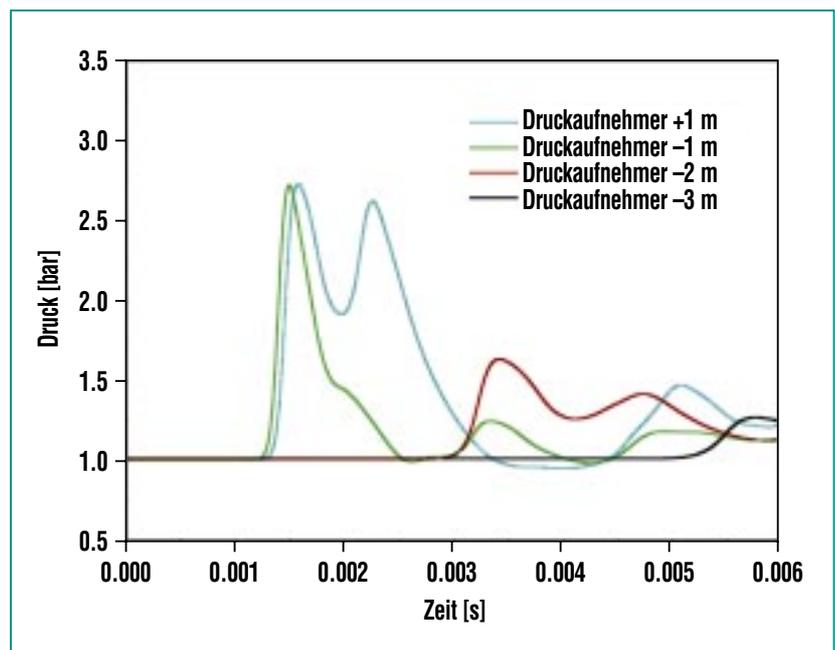


Abb. 3: Berechnete lokale Drucklasten in der Umgebung der versagenden Deckelsprühleitung. Die Überdrücke klingen rasch mit zunehmender Entfernung von der Leitung ab. Auf Grund dieser und weiterer Daten konnten unerkannte Sekundärschäden an sicherheitsrelevanten Einrichtungen ausgeschlossen werden. Die Rechnungen haben die Wiedezulassung des KKW's Brunsbüttel unterstützt.

war insbesondere das komplizierte strukturmechanische Verhalten von Rohrbiegungen die in der Anlage in großer Anzahl vorkommen. Im Auftrag der deutschen SWR-Betreiber wurden deshalb im IKET Detonationsversuche mit Radiolysegas in einem U-förmig gebogenen DN-15 Testrohr aus dem KKW Gundremmingen durchgeführt [4].

Abb. 4 zeigt ein Schema der Versuchsanlage. Alle Komponenten, die während der Versuchsdurchführung Radiolysegas enthalten, wurden in einem Sicherheits-

behälter untergebracht (Volumen 22 m<sup>3</sup>, Auslegungsdruck 40 bar). Der Behälter ist mit H<sub>2</sub>- und O<sub>2</sub>-Sensoren, Sicherheitslüftung und weiteren Schutzmaßnahmen ausgerüstet. Ventile werden pneumatisch und nicht elektrisch angesteuert, um potentielle Zündquellen zu minimieren. Das H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>-Verhältnis der eingefüllten Gasmischung wurde über zwei Massenstromregler eingestellt. Wichtigster Versuchsparameter war der Anfangsdruck des Radiolysegases im U-förmigen Testrohr. Die Anfangstemperatur ent-

sprach der Umgebungstemperatur von ca. 293 K. Das Rohr war mit fünf schnellen Druckaufnehmern, zwei Thermoelementen und 16 Dehnmessstreifen instrumentiert. Insgesamt wurden 31 Versuche mit Radiolysegas bei Ausgangsdrücken von 0.5 bis 70 bar durchgeführt. Trotz sorgfältiger Konditionierung der Anlage durch verschiedene chemische Reinigungsverfahren, vorheriges Ausbrennen bei niedrigen Radiolysegasdrücken, Vermeidung von Partikeleinschleppung und bewusst langsamen Füllprozeduren

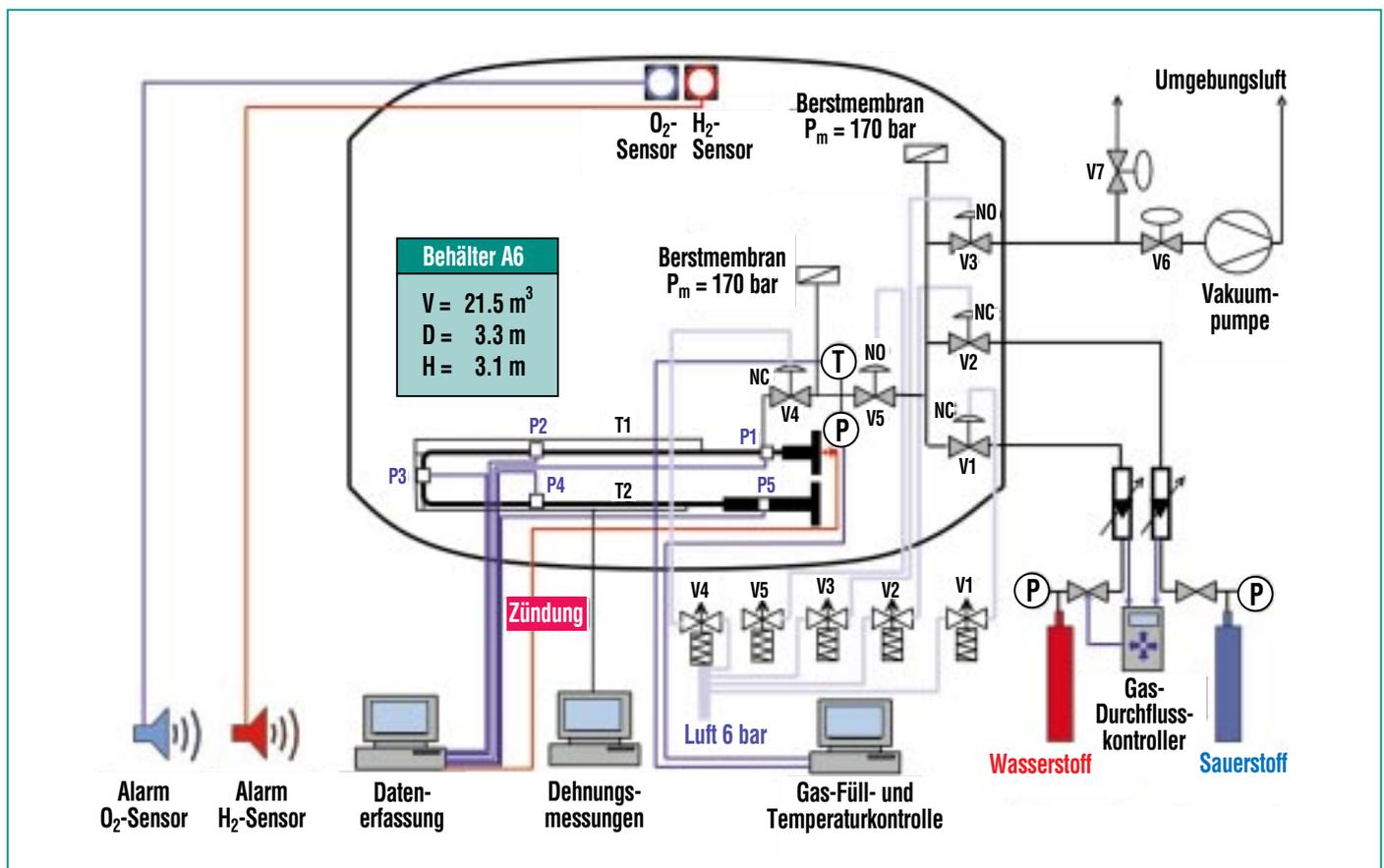


Abb. 4: Anlage zur Durchführung von Detonationsversuchen mit Radiolysegas in einem U-förmigen D-15-Testrohr aus dem KKW Gundremmingen. Alle Radiolysegas enthaltenden Komponenten befinden sich in einem Schutz- und Sicherheitsbehälter. Das Versuchsrohr war mit Druckaufnehmern, Dehnmessstreifen und Thermoelementen instrumentiert. Der Ausgangsdruck des Radiolysegases wurde von 0.5 bis 70 bar variiert, die Spitzendrücke im Rohr lagen zwischen 9 und 1540 bar.

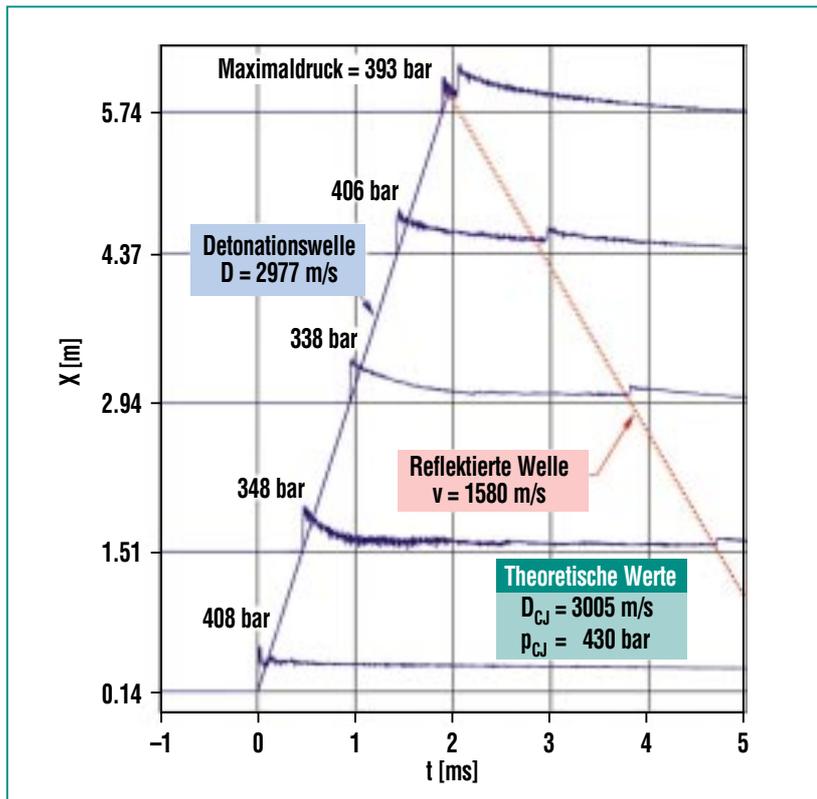


Abb. 5: Gemessene Druckdaten für das Experiment mit 20 bar Radiolysegas. In diesem sog. x-t-Diagramm ergibt sich die Geschwindigkeit der Detonationswelle aus der Steigung der Verbindungsgeraden (blau). Vom Rohrende läuft eine reflektierte Druckwelle in das verbrannte Gas zurück (rot).

kam es vereinzelt zu spontanen Zündungen während des Füllvorgangs und Schäden an der Versuchsanlage.

Abb. 5 zeigt ein Beispiel für gemessene Druckdaten in Form eines sog. x-t-Diagramms, bei dem die Drucksignale entlang der vertikalen x-Achse angeordnet sind. Die x-Koordinate entspricht dem Abstand des jeweiligen Druckaufnehmers vom Zündort ( $x=0$ ). In dieser Darstellung ergibt sich die Geschwindigkeit der Detonationswelle aus der Steigung der blauen Verbindungsgeraden ( $D = dx/dt$ ). Überraschenderweise hatten die beiden  $90^\circ$ -Bögen des U-förmigen Testrohrs keinen messbaren Einfluss auf die Detonationsgeschwindigkeit. Die Detonationswelle wird am Rohrende bei  $x=5.9$  m reflektiert; dadurch entsteht eine Stoßwelle die nun im verbrannten Gas (= Dampf) zum Zündort bei  $x=0$  zurückläuft (rote Linie in Abb. 5).

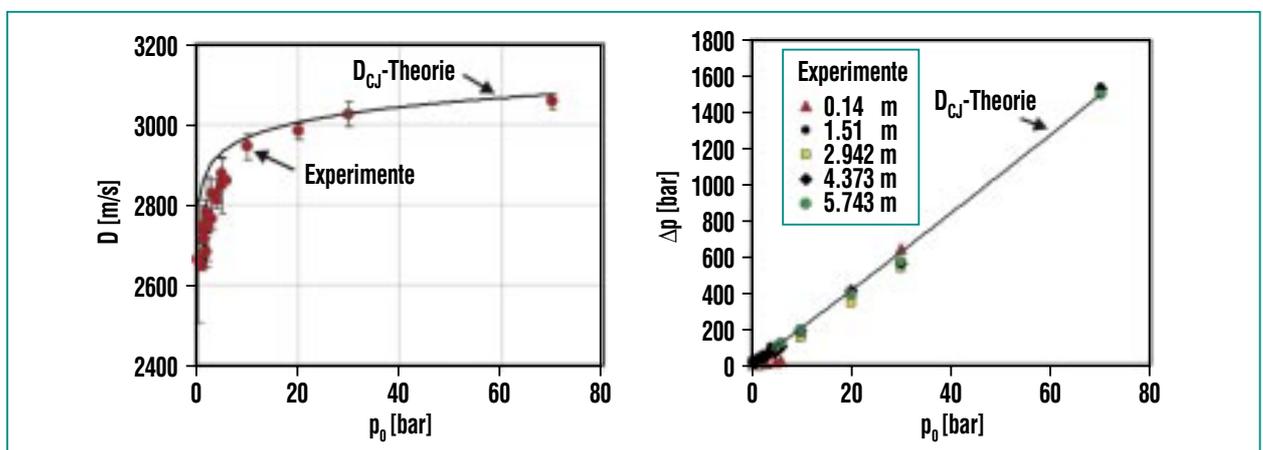


Abb. 6: Gemessene Detonationsgeschwindigkeiten und Spitzendrücke aller Versuche. Die Messdaten stimmen sehr gut mit dem null-dimensionalen Chapman-Jouguet-(CJ)-Modell überein. Selbst im Grenzfall mit 70 bar Radiolysegas trat kein Rohrversagen auf. DN-15-Rohre in SWR-Anlagen können deshalb unter bestimmten Nebenbedingungen als detonationsfest gelten, was erhebliche Kosteneinsparungen erlaubt.

Abb. 6 fasst alle gemessenen Detonationsgeschwindigkeiten und Detonationsspitzen drücke zusammen. Die Messdaten stimmen sehr gut mit null-dimensionalen Rechnungen für den sog. Chapman-Jouguet (CJ) Zustand [5] überein. In diesem vereinfachten Modell werden Massen-, Energie- und Impulserhaltung über die Detonationsfront betrachtet, ergänzt durch die Annahme, dass die verbrannten Gase hinter der Front mit der lokalen Schallgeschwindigkeit abströmen (sog. CJ-Bedingung). Bei 70 bar Ausgangsdruck beträgt der CJ-Druck 1504 bar, die CJ-Ge-

schwindigkeit 3064 m/s und die CJ-Temperatur 4570 K.

Als wesentliches Ergebnis der Versuche ist festzuhalten, dass das DN-15 Versuchsrohr unreflektierten Detonationslasten bei bis zu 70 bar Anfangsdruck standhielt. Damit ist der experimentelle Nachweis erbracht, dass dieser Rohrtyp selbst im Extremfall bei einer stabilen Detonation nicht versagen würde. DN-15 Leitungen können damit aus den Überwachungsprogrammen in deutschen SWR-Anlagen entlassen werden, wenn sie in ein offenes System münden (keine Re-

flektion) und Zündungen am Rohrende, dem wahrscheinlichsten Ort, unterstellt werden. Weiterhin ist es nicht mehr erforderlich, bei Anzeichen von Radioanalysegasansammlungen in solchen Leitungen vorsorglich den Leistungsbetrieb einzustellen, um Gegenmaßnahmen einzuleiten. Beide Änderungen in den Betriebsvorschriften können zu erheblichen Kosteneinsparungen führen, bei gleichbleibend hohem Sicherheitsniveau für den Anlagenbetrieb.

## Literatur

- [1] A. Kotchourko, W. Breitung, *Nachrichten, Jahrgang 32, Heft 3/2000, S. 222*
- [2] W. Hartel, U. Kleen, *atw (2002) Heft 7, Juli 2002*
- [3] A. Kotchourko, W. Breitung, S. Dorofeev, A. Vesper, H. Ohlmeyer, *Jahrestagung Kerntechnik, 2003, 20.-22. Mai 2003, Berlin, S. 153*
- [4] M. Kuznetsov, R.K. Singh, S. Dorofeev, G. Stern, W. Breitung, *Jahrestagung Kerntechnik 2004, 25. - 27. Mai 2004, Düsseldorf*
- [5] B. Lewis, G. von Elbe, *Combustion, Flames and Explosions of Gases, Academic Press, Inc. ISBN 0-12-446751-2, 1987, p. 532*