

## RSK - STELLUNGNAHME

### Gefährdung des Sicherheitsbehälters von DWR durch Wasserstoffreaktionen infolge der Zünderwirkung von passiven autokatalytischen Rekombinatoren

03.09.2009 (419. Sitzung der RSK)

#### Inhalt

<b>1</b>	<b>Anlass der Beratung</b> .....	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Überblick über die bisherigen Beratungen</b> .....	<b>3</b>
2.1	Überblick über die bisherigen Beratungen in der RSK, sowie in den RSK-Ausschüssen LEICHTWASSERREAKTOREN und ANLAGEN- UND SYSTEMTECHNIK.....	3
2.2	Bericht von Herrn Dr. Jahn zur Klärung des Problems der Gefährdung des Containments durch Wasserstoff-Explosion nach Kernschmelzen.....	5
<b>3</b>	<b>Sachstand</b> .....	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>Bewertung</b> .....	<b>6</b>
4.1	Bewertungskriterien und Nachweisführung.....	6
4.2	Beantwortung der Fragen des BMU .....	7
4.3	Bewertung relevanter Einzelaspekte .....	14
4.3.1	Repräsentativität der ausgewählten Ereignisablaufsequenzen .....	14
4.3.2	Beurteilung der Wasserstoffkonzentration.....	16
4.3.3	Zündquellen und Rekombinator-Wirksamkeit unter probabilistischen Gesichtspunkten.....	18
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>19</b>

## 1 Anlass der Beratung

Mit Schreiben RS I 3 – 17018/1 vom 24.05.2005 [1] hat das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) die RSK darüber informiert, dass Herr Dr. Jahn in mehreren Schreiben an das BMU und an das Bundesinnenministerium (BMI) [2] grundsätzliche Bedenken an den in deutschen Druckwasserreaktoren verwirklichten Maßnahmen gegen Wasserstoff-Verbrennung oder Deflagration mittels autokatalytischer Rekombinatoren geäußert habe. Das BMU bat in seinem Beratungsauftrag die RSK, zu folgenden Fragen, die im Kern die Fragen von Herrn Dr. Jahn wiedergeben, Stellung zu nehmen:

- 1 Welches Quellterm- und Freisetzungsverhalten von Wasserstoff ( $H_2$ ) ist unter Stör- und Unfallbedingungen zu erwarten?
- 2 In welchem Bereich liegen die Zündgrenzen von  $H_2$ ? Welche Zündquellen existieren unter Stör- und Unfallbedingungen im Containment? Mit welchem Ablauf erfolgt die Zündung? Können Rekombinatoren als Zündquellen wirken (wenn ja, was ist die Ursache: Überhitzung und/oder Partikel)? In welchem Bereich liegen die Zündkonzentrationen, -temperaturen, wie groß ist der Einfluss des Dampfes?
- 3 Welche Wirksamkeit haben die autokatalytischen Rekombinatoren?
- 4 Welche Wirksamkeit haben Katalysatorgifte wie z. B. Spaltprodukte, Aerosole usw. auf die katalytischen Oberflächen und damit auf die Wirksamkeit der Rekombinatoren?
- 5 Wie ist der derzeitige Stand bei der Modellierung des Verbrennungsverhaltens von  $H_2$  ( $CO$ ) unter Einschluss der Modellierung der Zünderwirkung der Rekombinatoren (Lumped Parameter (LP)- und Computational Fluid Dynamics (CFD)-Codes)?
- 6 Wie ist der derzeitige Stand auf dem Gebiet der experimentellen Absicherung des Zünd- und Verbrennungs-/Deflagrations- sowie Rekombinatoren-Verhaltens (einschließlich Zündverhalten) bei  $H_2$ -Reaktionen (Bestandsaufnahme/Ausweisung von Lücken)?
- 7 Welche Sprengstücke können bei  $H_2$ -Verbrennungen/Deflagrationen im Sicherheitsbehälter erzeugt werden und welche Belastungen resultieren hieraus auf den Sicherheitsbehälter (Abtragbarkeit)?
- 8 Welches Integritätsverhalten zeigt der Sicherheitsbehälter unter Einwirkung von  $H_2$ -Verbrennungen/Deflagrationen, wo liegen die Grenzbelastungen?
- 9 Sind autokatalytische Rekombinatoren als eindeutig sicherheitsgerichtete Maßnahme zu betrachten?
- 10 Wie ist die sicherheitstechnische Wirksamkeit von autokatalytischen Rekombinatoren im Vergleich zu anderen  $H_2$ -Gegenmaßnahmen, z. B. der Nachintertisierung einzuschätzen.

- 11 Welche H<sub>2</sub>-Gegenmaßnahmen werden international bei der Beherrschung der H<sub>2</sub>-Problematik bei auslegungübergreifenden Störfällen speziell bei Druckwasserreaktoren verfolgt?
- 12 Ist die Übernahme von Prinzipien der Explosionsschutz-Richtlinie (ExRL) zur Behandlung der H<sub>2</sub>-Problematik bei auslegungsüberschreitenden Störfällen sinnvoll?

Die Stellungnahme sollte eine Beurteilung enthalten, ob nach dem Stand von Wissenschaft und Technik autokatalytische Rekombinatoren sicherheitsgerichtet wirken und zur Reduzierung des Risikos eines Sicherheitsbehälterversagens infolge von Wasserstoff-Deflagration oder -Detonation maßgeblich beitragen. Gegebenenfalls seien Empfehlungen zum weiteren Vorgehen auszusprechen.

## **2 Überblick über die bisherigen Beratungen**

### **2.1 Überblick über die bisherigen Beratungen in der RSK, sowie in den RSK-Ausschüssen LEICHTWASSERREAKTOREN und ANLAGEN- UND SYSTEMTECHNIK**

Die RSK hat sich seit den 80er Jahren mehrfach mit der Frage zusätzlicher Maßnahmen zur Gewährleistung der Sicherheitsbehälterintegrität und damit zur Risikominderung in Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktor bei auslegungsüberschreitenden Ereignissen befasst. Auf der Basis ihrer Beratungen empfahl die RSK auf ihrer 284. Sitzung am 20.04.1994, passive autokatalytische Rekombinatoren<sup>1</sup> als Maßnahme des anlageninternen Notfallschutzes zur weiteren Verminderung des Risikos eines frühzeitigen oder späten Verlustes der Integrität des Sicherheitsbehälters von Druckwasserreaktor (DWR) Anlagen durch Wasserstoff-Verbrennungsprozesse einzubauen. Im Rahmen dieser Empfehlung waren seitens der RSK zunächst zwei eingrenzende Szenarien mit Wasserstofffreisetzungen in Höhe von 1.350 bzw. 2.000 kg definiert worden. Diese wurden im Verlauf der weiteren Beratungen durch die Betrachtung eines Fallspektrums ersetzt. In einem weiteren Schritt wurde seitens der RSK geprüft, inwieweit ein Konzept für katalytische Rekombinatoren durch ergänzende Maßnahmen (z. B. durch Zünder im Dual-Konzept) in seiner Wirksamkeit erweitert werden könnte.

Aus Sicht der RSK und ihrer Aussagen auf der 314. RSK-Sitzung [30] konnte die für eine Festlegung von Anzahl und Position der Rekombinatoren benötigte Verteilung des Wasserstoffs durch numerische Berechnungen mit „Lumped Parameter“ Codes hinreichend genau ermittelt werden. Die Ergebnisse der Lumped-Parameter-Berechnungen wurden durch Vergleich mit Rechnungen eines CFD-Codes abgesichert. Die Übertragung auf ähnliche Anlagen (Konvoi auf Vor-Konvoi) erfolgte durch ingenieurmäßige Betrachtung (Delta-Verfahren).

Für ältere Anlagen sollten unter Nutzung der vorliegenden Erkenntnisse ergänzende Analysen durchgeführt werden. Zur Durchführung der Analysen stufte die RSK den Lumped Parameter Code RALOC mit entsprechend validierter Eingabedatenbasis als geeignet ein.

Für die Absicherung der RALOC-Analysen der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) führte das Forschungszentrum Karlsruhe (FZK) mit dem CFD-Code GASFLOW Untersuchungen zur

---

<sup>1</sup> Im Folgenden nur noch als „Rekombinatoren“ bezeichnet.

Wasserstoffausbreitung im Containment des Kernkraftwerkes Neckarwestheim (GKN-2) für einen großen Kühlmittelverluststörfall durch Abriss der Druckhalter-Anschlussleitung am heißen Strang der Hauptkühlmittleitung durch. Ziel dieser Untersuchungen war neben der Absicherung der mit dem Lumped Parameter Code RALOC erzielten Ergebnisse die Gewinnung von zusätzlichen Informationen.

Die Untersuchungen führten letztlich dazu, dass der Ausschuss LEICHTWASSERREAKTOREN in seiner 155. Sitzung am 30.09.1998 und die RSK auf ihrer 314. Sitzung zu dem Ergebnis kamen, dass aus Sicht des Ausschusses für Konvoi- und Konvoi-ähnliche Anlagen die Basis vorhanden sei, ohne weitere Rechnungen mit Hilfe von Plausibilitätsbetrachtungen und ingenieurmäßigen Abschätzungen Zahl und Anordnung der Rekombinatoren festzulegen. Der RSK-Ausschuss LEICHTWASSERREAKTOREN befasste sich auf seiner 157. Sitzung am 09.12.1998 zum letzten Mal mit Maßnahmen zur Risikominderung bei Freisetzung von Wasserstoff in den Sicherheitsbehälter.

Der RSK-Ausschuss ANLAGEN- UND SYSTEMTECHNIK setzte die Beratungen des RSK-Ausschusses LEICHTWASSERREAKTOREN fort und hörte in seiner 1. Sitzung am 27.10.1999 einen Bericht der Betreiber über den aktuellen Stand der Implementierung von Rekombinatoren in deutschen DWR-Anlagen. In der 6. Sitzung des Ausschusses ANLAGEN- UND SYSTEMTECHNIK am 19.10.2000 legte die GRS die Wasserstoffentstehung im Sicherheitsbehälter bei Auslegungsstörfällen und bei auslegungsüberschreitenden Ereignissen einschließlich von Kernschmelzen dar. Die Betreiber berichteten in der 7. Sitzung des Ausschusses am 04.12.2000 zu den Themengebieten

- Sicherheitstechnische Einordnung der H<sub>2</sub>-Gegenmaßnahmen,
- Festlegung der Referenzszenarien,
- Referenzkonzept für den Einbau katalytischer Rekombinatoren,
- H<sub>2</sub>-Verteilungsrechnungen zur Verifizierung des Rekombinator-Referenzkonzeptes,
- Übertragbarkeit des Rekombinator-Referenzkonzeptes auf deutsche DWR-Anlagen und
- Sicherheitstechnische Bewertung des Einbaus der Rekombinatoren.

Ein RSK-Mitglied gab in der 16. Sitzung des Ausschusses am 29.08.2002 einen Überblick über die bisherigen Überlegungen zur Installation von katalytischen Wasserstoffrekombinatoren und führte seine Bedenken zu diesem Konzept aus.

Veranlasst durch den Beratungsauftrag des BMU [1] berichtete die GRS in der 34. Sitzung des Ausschusses am 30.06.2005 über einen Vorschlag für einen Workshop zu Wasserstoffreaktionen infolge der Zünderwirkung von autokatalytischen Rekombinatoren [12], [13], [14]. In seiner 36. Sitzung am 27.10.2005 beriet der Ausschuss seine weitere Vorgehensweise [15]. In ihrem daraufhin vorgelegten Bericht zu Unfallszenarien mit Bildung brennbarer Gemische ging die GRS in der 41. Sitzung des Ausschusses am 13.07.2006 auf die Frage „Welches Quellterm- und Freisetzungsverhalten von Wasserstoff ist unter Stör- und Unfallbedingungen zu erwarten?“ ein [16], [17]. In der 42. Sitzung des Ausschusses am 26.09.2006 berichtete Herr Dr. Breitung (Forschungszentrum Karlsruhe) über die Analyse von schnellen Wasserstoff-Verbrennungsprozessen und Containment-Lasten bei Kernschmelzunfällen [18]. Herr Dr. Reinecke (Forschungszentrum Jülich) stellte zum Thema „Erkenntnisse aus experimentellen Untersuchungen zum Verhalten katalytischer Rekombinatoren“ die experimentellen und theoretischen Untersuchungen zur Wasserstoffproblematik im Institut für Sicherheitstechnik und Reaktortechnik (ISR) des Forschungszentrums

Jülich (FZJ) mit dem Schwerpunkt der Wasserstoffbeseitigung mittels katalytischer Rekombinatoren dar [19]. Der Ausschuss bat die GRS, auf der Grundlage des aktuellen Kenntnisstandes einen Vorschlag für die Beantwortung der Fragen des BMU zu erstellen. In der 43. Sitzung des Ausschusses am 26.10.2006 berichtete Herr Dr. Kanzleiter (Becker Technologies) über Battelle-Versuche zum Verhalten katalytischer Rekombinatoren [20] und gab einen Überblick über die Battelle-Wasserstoff-Versuche [21]. In der 44. Sitzung des Ausschusses am 30.11.2006 kommentierte der Ausschuss die von der GRS auf seine Bitte beantworteten Fragen des BMU zur Erhöhung des Risikos eines Sicherheitsbehälterversagens durch heftige Wasserstoffreaktionen infolge der Zünderwirkung von autokatalytischen Rekombinatoren [22]. In seiner 47. Sitzung am 24.05.2007 hörte der Ausschuss einen Bericht von Herrn Dr. Jahn zum Thema „Beitrag zur Klärung des Problems der Gefährdung des Containments durch Wasserstoff-Explosion nach Kernschmelzen (DWR)“ [9], [23] sowie Berichte der GRS über den Entwurf einer Stellungnahme zu den BMU-Fragen und zum JED-Bericht [24], [25], [26].

In seiner 49. Sitzung am 04.10.2007 bat der Ausschuss ANLAGEN- UND SYSTEMTECHNIK eine Ad-hoc-Arbeitsgruppe um die Vorbereitung einer Stellungnahme. Diese Ad-hoc-Arbeitsgruppe bereitete in drei Sitzungen einen Stellungnahmeentwurf vor. Der Ausschuss trat in seiner 57. Sitzung am 11./12.12.2008 in die Beratung des Stellungnahmeentwurfs ein und verabschiedete diesen in seiner 58. Sitzung am 22.01.2009. Die RSK beriet die Stellungnahme beginnend in ihrer 414. Sitzung am 12.02.2009 in mehreren Sitzungen und verabschiedete sie in der 419. Sitzung am 03.09.2009.

## **2.2 Bericht von Herrn Dr. Jahn zur Klärung des Problems der Gefährdung des Containments durch Wasserstoff-Explosion nach Kernschmelzen**

Im Verlauf der Beratungen des Ausschusses übersandte Herr Dr. Jahn die Schreiben [3], [4], [5], [6], [7], [8], [41] sowie die Berichte [9], [10], [11], [29], [42] und [43].

Eine mit Herrn Jahn abgestimmte Zusammenfassung der von ihm im Rahmen der 47. Sitzung des RSK-Ausschusses ANLAGEN- UND SYSTEMTECHNIK am 24.05.2007 vorgetragenen Argumente betreffend das Problem der Gefährdung des Containments durch eine Wasserstoff-Explosion nach Kernschmelzen bei DWR [23] ist in [33] dokumentiert.

Die wesentlichen Kritikpunkte von Herrn Jahn am Rekombinator-Konzept lassen sich aus Sicht des Ausschusses wie folgt zusammenfassen:

- Eine Wasserstoff-Explosion in Multi-Compartment Geometrie verlaufe nach eigenen Gesetzen, bei denen eine starke Rückkopplung zwischen Flammfrontausbreitung und Gasbewegung dominiere.
- Rekombinatoren seien im entscheidenden Zeitraum, ca. 1 h nach Beginn der Freisetzung, nur sehr begrenzt wirksam, ihre Effektivität liege bei 10 - 20 % der Freisetzung.
- Rekombinatoren könnten explosionsfähige Gemische nicht verhindern, diese aber zünden.

- Die bislang hierzu vorgelegten Rechnungen seien unbrauchbar, ebenso im Rahmen der Probabilistische Sicherheits-Analyse (PSA) für GKN-2 angestellte Betrachtungen zum Vergleich von Zündwahrscheinlichkeiten.
- Eine Mehrraum-Explosion sei bislang nicht zu berechnen gewesen, dies sei mit dem von Herrn Jahn entwickelten Code „MCEvan“ mittlerweile aber möglich.
- Die aus Battelle Versuchen abgeleiteten Grenzen für eine „sanfte“ Deflagration seien voll zu bestätigen, die entsprechenden Grenzen von 8,4 Vol.- % H<sub>2</sub> in Luft und 10 Vol.- % H<sub>2</sub> bei 40 % Dampf müssten sichergestellt werden.

Diese Kritikpunkte sind in die Fragen des BMU eingeflossen. Antworten werden im Zusammenhang mit der Beantwortung der BMU-Fragen und den darauf folgenden Abschnitten gegeben.

### **3 Sachstand**

Für die nachfolgenden Bewertungen relevante Sachverhaltsdarstellungen werden an den jeweiligen Stellen dieser Stellungnahme dargestellt. Eine darüber hinausgehende detaillierte Darstellung des Sachstandes, die ergänzende Informationen enthält, erfolgt im Rahmen einer separaten Information des Ausschusses (AST-Information) [31]. Diese Unterlage enthält eine Zusammenfassung der Beratungen im RSK-Ausschuss ANLAGEN- UND SYSTEMTECHNIK und in der Ad-hoc-Arbeitsgruppe WASSERSTOFF zu den Punkten:

- Unfallszenarien,
- unfallbedingte Zündquellen im Reaktorsicherheitsbehälter (RSB),
- experimentelle Erkenntnisse zur Zündung durch Rekombinatoren,
- experimentelle Erkenntnisse zu Wasserstoffverbrennungen,
- Repräsentativität von Ereignisablaufsequenzen,
- Analysen zur Wasserstoffverteilung im Containment und
- Sicherheitsbehälter-Integrität unter Verbrennungslasten.

## **4 Bewertung**

### **4.1 Bewertungskriterien und Nachweisführung**

Übergeordnetes Ziel einer Schadensbegrenzung bei auslegungüberschreitenden Ereignissen durch die Wirkung eines Systems von Rekombinatoren ist es, die Häufigkeit für ein Containmentversagen durch Wasserstoffverbrennungsprozesse infolge eines Kernschmelzunfalls deutlich zu verringern.

Dieses Ziel wird dann als erfüllt angesehen, wenn

- großräumige detonationsfähige Gasgemische, insbesondere außerhalb des Trümmerschutzzylinders in der Nähe der Sicherheitsbehälter (SHB)-Stahlschale und

- großräumige brennbare Gasgemische mit höheren Wasserstoffkonzentrationen, die durch Verbrennungslasten infolge schneller Deflagrationen mit Flammbeschleunigung die Integrität des SHB gefährden könnten,

weitgehend vermieden werden.

Ereignisablaufsequenzen mit Kernzerstörung führen aufgrund ihrer Abhängigkeit von den jeweiligen Randbedingungen (wie auslösendes Ereignis und die zeitliche Unverfügbarkeit von Sicherheitsfunktionen) zu einem großen Spektrum von hinsichtlich der H<sub>2</sub>-Situation charakteristischen Zuständen (H<sub>2</sub>-Freisetzungsrates, Containmentzustand, Konvektionsbedingungen). „Weitgehend vermieden“ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die genannten Gasgemische für einen großen Bereich der charakteristischen Zustände vermieden werden.

Der Wirksamkeitsnachweis für das Rekombinatorsystem im Sinne der o. g. Zielstellung erfolgt für repräsentative Ereignisablaufsequenzen. Diese Ereignisablaufsequenzen sind so auszuwählen, dass sowohl die hinsichtlich ihrer Häufigkeit dominierenden Pfade als auch ein weiter Bereich der charakteristischen Zustände abgedeckt werden (siehe auch Abschnitt 4.3.1). Bei der Auswahl der repräsentativen Ereignisablaufsequenzen werden sowohl qualitative als auch quantitative Erkenntnisse aus probabilistischen Untersuchungen herangezogen.

Für die repräsentativen Ereignisablaufsequenzen werden die Wasserstoffkonzentrationen in den einzelnen Räumen im Sicherheitsbehälter unter Berücksichtigung des Rekombinatorsystems untersucht und die Wirksamkeit des Rekombinatorsystems bewertet. Nachzuweisen ist, dass die o. g. Gasgemische vermieden werden.

## **4.2 Beantwortung der Fragen des BMU**

Die GRS hat auf der 44. Sitzung des Ausschusses ANLAGEN- UND SYSTEMTECHNIK am 30.11.2006 zur Beantwortung der vom BMU in seinem Beratungsauftrag gestellten Fragen zur Erhöhung des Risikos eines Sicherheitsbehälterversagens durch Wasserstoffreaktionen infolge der Zünderwirkung von Rekombinatoren vorgetragen. Die schriftliche Beantwortung der Fragen des BMU seitens der GRS liegt dem Ausschuss mit der Unterlage [24] vor. Ergänzende Detailfragen und Anmerkungen aus der 44. Sitzung des Ausschusses am 30.11.2006 sind eingearbeitet worden. In den Schreiben [27] und [28] ist die GRS auf weitere Argumente von Herrn Jahn zur Auswirkung der Freisetzung von Wasserstoff in das Containment eingegangen.

Im Folgenden werden die BMU-Fragen kurz zusammengefasst beantwortet. Detailliertere Ausführungen sind in [24] zu finden.

- 1 Welches Quellterm- und Freisetzungsverhalten von Wasserstoff (H<sub>2</sub>) ist unter Stör- und Unfallbedingungen zu erwarten?

Bei Störfällen der Sicherheitsebene 3 entstehen lediglich sehr geringe Mengen Wasserstoff. Unter Unfallbedingungen (auslegungsüberschreitende Ereignisse mit Kernschmelzen) entsteht Wasserstoff hauptsächlich durch die bei hohen Temperaturen ausgelösten Metall-Wasser-Reaktionen des Zirkalloys der Brennstab-Hüllrohre. Dabei sind die Raten der Wasserstoff- und Dampffreisetzung unter Unfallbedingungen, ihre zeitliche Überlagerung und die integral erzeugte Menge Wasserstoff wesentlich für die Gemischbildung im Sicherheitsbehälter. Wichtig ist die transiente Überlagerung von Dampf- und Wasserstoff-Ausströmung. Hierbei darf eine Übertragung von Versuchsergebnissen (QUENCH) auf Anlagenverhältnisse nur mit Hilfe validierter Rechenprogramme (Einzelbündelversuche → großer Kern) erfolgen. Dabei zeigt sich, dass eine Wasserstofffreisetzung ohne Dampffreisetzung bei Anlagenverhältnissen nicht auftritt, eine dampfarme Freisetzung ist jedoch möglich (nähere Ausführungen siehe Abschnitt 4.3.1).

In der Ex-vessel-Phase (nach Versagen des Reaktordruckbehälters (RDB)) erodiert die in die Reaktorkaverne ausgetretene und abgelagerte heiße Schmelze den Beton (Schmelze-Beton-Wechsel-Wirkung). Dabei werden ebenfalls brennbare Gase (Wasserstoff und Kohlenmonoxid) durch Oxidation in der Schmelze befindlicher Metalle und der Armierung des Betons freigesetzt. Die Art der Betonzusammensetzung bestimmt die Anteile der freigesetzten brennbaren Gase Wasserstoff und Kohlenmonoxid wesentlich. Darüber hinaus werden auch nichtbrennbare Gase (Kohlendioxid und Wasserdampf) in unterschiedlicher Menge freigesetzt.

2 In welchem Bereich liegen die Zündgrenzen von  $H_2$ ? Welche Zündquellen existieren unter Stör- und Unfallbedingungen im Containment? Mit welchem Ablauf erfolgt die Zündung? Können Rekombinatoren als Zündquellen wirken (wenn ja, was ist die Ursache: Überhitzung und/oder Partikel)? In welchem Bereich liegen die Zündkonzentrationen, -temperaturen, wie groß ist der Einfluss des Dampfes?

Je nachdem, ob ein wasserstoffarmes oder wasserstoffreiches Gemisch vorliegt, unterscheidet man zwischen unterer (Brennbarkeit bei 4,0 bis 4,1 Vol.-% Wasserstoff in Luft) und oberer Zündgrenze (Wasserstoffanteil 75 bis 75,6 Vol.-%). Der Verlauf der Brennbarkeitsgrenze ist dem Dreistoffdiagramm (Luft-Wasserstoff-Inertgas) zu entnehmen.

Verbrennungsversuche im Battelle-Modellcontainment zeigten, dass sich Wasserstoffgemische mit Dampfanteilen – wie sie in Anlagen hauptsächlich auftreten - schwerer entzünden lassen und erst bei Konzentrationen ab ca. 8 Vol.-% Wasserstoff ein sich selbst fortpflanzender Verbrennungsvorgang ausgelöst wird.

Die erforderliche Zündenergie ist im Wesentlichen von der Temperatur und der Zusammensetzung des Gemisches abhängig. Notwendige Voraussetzung für die Zündung eines Gasgemisches ist das Vorliegen eines brennbaren Gemisches aus Luft und Wasserstoff. Dampf kann das Gasgemisch inertisieren und so eine Verbrennung verhindern.

Zündungen können durch Funken mit ausreichender Zündenergie oder durch Temperaturen größer als der Selbstzündtemperatur von Wasserstoff ( $> 550 - 650 \text{ }^\circ\text{C}$ ) ausgelöst werden. Hinsichtlich der bei Unfällen vorliegenden Zündquellen sind verschiedene Randbedingungen wie Verfügbarkeit von Strom/Notstrom, Leckstörfall oder nicht, In-vessel- oder Ex-vessel-Phase und ob die Zündquellen stetig oder unstetig wirken,



von Bedeutung. Während der In-vessel-Phase sind eine Reihe von verschiedenen Zündquellen möglich [24], hauptsächlich in bruchnahen Raumbereichen und Folgeräumen. Nach RDB-Versagen entstehen zusätzliche Zündquellen durch die austretende Schmelze. Mögliche Zündquellen bei Auslegungstörfällen sind irrelevant, da bei diesen Ereignissen brennbare Wasserstoffgemische durch Gegenmaßnahmen vermieden werden.

Experimente haben gezeigt, dass Rekombinatoren brennbare Gemische in ihrer Umgebung unter bestimmten Bedingungen zünden können, aber nicht zwangsläufig zünden. Mögliche Ursachen für eine Zündung können die Erhitzung von Gehäuseteilen oder mit dem Abgasstrom austretende Partikel sein. Die Möglichkeit der Zündung durch Rekombinatoren hängt wesentlich von der Bauart des Rekombinators, der Fertigung der katalytisch wirksamen Teile und der Konzentration des Gasgemisches ab.

### 3 Welche Wirksamkeit haben die autokatalytischen Rekombinatoren?

Autokatalytische Rekombinatoren bewirken als passive Maßnahme ohne Fremdenergie eine Oxidation des Wasserstoffs zu Wasserdampf und senken so lokal und integral das Niveau der Wasserstoffkonzentration. Dies erfolgt zu einem frühen Zeitpunkt auch bei dampfner Gasgemischen, bei niedrigen Wasserstoffkonzentrationen von etwa 2 Vol.-% (konstruktionsabhängig) unterhalb der untersten Zündgrenze von 4 Vol.-%. Nach dem Anlaufen erlischt die Rekombination erst ab einer Wasserstoffkonzentration  $< 0,5$  Vol.-% und bei Sauerstoffmangel, kann aber später wieder starten.

Weitere Ausführungen zur Wirksamkeit erfolgen in Abschnitt 4.3.2.

### 4 Welche Wirksamkeit haben Katalysatorgifte wie z. B. Spaltprodukte, Aerosole usw. auf die katalytischen Oberflächen und damit auf die Wirksamkeit der Rekombinatoren?

Die Adsorption z. B. von Kohlenmonoxid, Borsäure, Jod und sonstiger gasförmiger Verunreinigungen sowie die Abdeckung der Katalysatoroberflächen z. B. durch Aerosole und Fettstoffe können grundsätzlich die Funktion von Katalysatoren im Anforderungsfall einschränken. Daher wurden Rekombinatoren in einer Vielzahl von Experimenten den verschiedenartigen gasförmigen Verunreinigungen und Katalysatorgiften ausgesetzt, wie sie beim bestimmungsgemäßen Betrieb, bei Wartungsarbeiten im SHB oder während denkbarer Unfallszenarien in der Atmosphäre des SHB auftreten können. Die Experimente zeigten für repräsentative Betriebs- und Unfallbedingungen keine wesentlichen Beeinträchtigungen der katalytischen Wirksamkeit.

### 5 Wie ist der derzeitige Stand bei der Modellierung des Verbrennungsverhaltens von $H_2$ (CO) unter Einschluss der Modellierung der Zünderwirkung der Rekombinatoren (LP- und CFD-Codes)?

Hinsichtlich der Ermittlung von Verbrennungsdrücken und ihrem zeitlichen Verlauf bei Wasserstoffverbrennungen und der Validierung entsprechender Rechenprogramme liegen dem Ausschuss im Wesentlichen folgende Aussagen vor:

Die 3D-Codes des FZK (FLAME3D, COM3D, DET3D) werden gemäß den Ausführungen des FZK auf der 42. Sitzung des Ausschusses ANLAGEN- UND SYSTEMTECHNIK am 26.09.2006 von FZK als ausreichend validiert und hinreichend prognosefähig für alle Verbrennungsarten angesehen [18].

Herr Jahn hat dem Ausschuss gegenüber ausgeführt, dass das von ihm erstellte Programmsystem Multi-Compartment Explosion and Venting Analyses (MCEvan) durch Nachrechnung von Battelle Modell Containment (BMC)-Versuchen validiert worden und zur Simulation von Mehrraum-Explosionen geeignet sei [23].

Nach Kenntnisstand der GRS sind Verbrennungslasten bei niedrigen H<sub>2</sub>-Konzentrationen hinreichend genau prognostizierbar, während solche bei erhöhten H<sub>2</sub>-Konzentrationen (> 10 Vol.-%) mit Flammfrontbeschleunigung und den Wechselwirkungen verschiedener Flammfronten in einem SB derzeit nur mit großen Unsicherheiten prognostizierbar [24], aber konservativ abschätzbar sind.

Der Ausschuss ANLAGEN- UND SYSTEMTECHNIK hat eine eigenständige Bewertung der unterschiedlichen Aussagen zur Prognostizierbarkeit von Wasserstoffverbrennungsdrücken bei erhöhten Wasserstoffkonzentrationen (> 10 Vol.-%) nicht vorgenommen.

6 Wie ist der derzeitige Stand auf dem Gebiet der experimentellen Absicherung des Zünd- und Verbrennungs-/Deflagrations- sowie Rekombinatoren-Verhaltens (einschließlich Zündverhalten) bei H<sub>2</sub>-Reaktionen (Bestandsaufnahme/Ausweisung von Lücken)?

Nach und neben den experimentellen Untersuchungsprogrammen zur Wasserstoffverbrennung in den USA (hauptsächlich an Rohrgeometrien mit/ohne flammbeschleunigende Blenden) wurden umfangreiche Versuchsprogramme in Deutschland u. a. am Battelle-Modellcontainment (BMC), am Heißdampfreaktor (HDR) in Mehrraumgeometrien und an der russischen RUT-Anlage durchgeführt. Insbesondere bei den BMC-Versuchen wurden Verbrennungsvorgänge in Raumketten und Raumanordnungen untersucht. Für beschleunigte Verbrennungsvorgänge bis hin zur Deflagration-Detonation-Transition (DDT) wurden Versuche in einer Rohrgeometrie bei Battelle und vor allen Dingen in der russischen RUT-Versuchsanlage (bis zu 480 m<sup>3</sup>) mit größeren Volumina, begleitet und betreut durch FZK, durchgeführt. Die Versuchsprogramme wurden mit verschiedenen Wasserstoffkonzentrationen und mit/ohne Dampf ausgeführt. Dabei zeigte sich die starke Dämpfungswirkung des Dampfes auf die Verbrennungsvorgänge. In Japan wurden ab 1997 Versuche von Nuclear Power Engineering Corporation (NUPEC) an einem 270 m<sup>3</sup> Kugelbehälter (ca. 8 m Durchmesser) im linearen Maßstab 1:5 eines Westinghouse DWR-Containments mit vereinfachten Einbauten zur Simulation der Raumbereiche durchgeführt. Wesentliche Ergebnisse sind in [39] enthalten.

Die Zündung durch Rekombinatoren wurde gemäß GRS bisher nicht systematisch untersucht. Im Zuge der Bewertungen im Rahmen dieser Stellungnahme sieht die RSK derzeit keine Relevanz diesbezüglich vertiefter Analysen, da bei Zündfähigkeit grundsätzlich eine Zündung unterstellt wird.

7 Welche Sprengstücke können bei H<sub>2</sub>-Verbrennungen/Deflagrationen im Sicherheitsbehälter erzeugt werden und welche Belastungen resultieren hieraus auf den Sicherheitsbehälter (Abtragbarkeit)?

Im Zuge der RSK-Beratungen wurde als Grenzfall eine Projektilbildung mit freiem Aufprall auf die Stahlschale betrachtet. Dieser Grenzfall unterstellt ein Versagen bzw. Abreißen von Verschlusselementen wie Türen und Klappen umschlossener Räume, ausgelöst durch Wasserstoffverbrennungen. Durch Anlagenbegehung u. a. bei Vorkonvoi- und Konvoi-Anlagen wurde untersucht, welche Räume entsprechende Türen oder Klappen haben, die bei Versagen ungehindert in Richtung SB-Stahlhülle beschleunigt werden können. Identifiziert wurden hierbei einzelne Türen in den Treppenhäusern im Bereich des TSZ.

Aus dem untersuchten Szenarium liegt kein Hinweis dafür vor<sup>2</sup>, dass es im Bereich von Treppenhäusern zu erhöhten H<sub>2</sub>-Konzentrationen mit der Möglichkeit von Wasserstoffreaktionen derart kommt, dass Projektile gebildet werden können, die auf die Stahlhülle des Reaktorsicherheitsbehälters geschleudert werden. Trotzdem wurde in [40] hierzu eine Grenzbetrachtung durchgeführt. Es wurde angenommen, dass es in Raumbereichen, die nur durch eine Wand von der Stahlhülle getrennt sind, zu einem Anstieg der Wasserstoffkonzentration und als Folge zu einer heftigen Explosion (stöchiometrisches Gemisch mit ca. 30 Vol.-% H<sub>2</sub>; Explosionsdruck beschleunigt die Tür unvermindert) kommt, wodurch eine Tür losgerissen und auf die Sicherheitsbehälterstahlschale geschleudert wird.

Die Beanspruchungen des Sicherheitsbehälters beim Aufprall der Tür gemäß dem vorstehend unterstellten Szenario wurden mit dem für derartige Anwendungsfälle verifizierten Finite-Element-Programm MSC.MARC [42] berechnet. Die Randbedingungen für die Berechnung sind in [40] angegeben. Ergebnis der Finite-Elemente-Berechnungen, welche für eine Konvoi-SB-Stahlschale durchgeführt wurden, ist, dass die maximal erreichten plastischen Dehnungen einen deutlichen Abstand zu der für diesen auslegungüberschreitenden Fall ermittelten zulässigen Grenzdehnung haben. Die Integrität der SB-Stahlschale wird demnach durch diese Belastung bei den unterstellten Randbedingungen nicht gefährdet.

Vor diesem Hintergrund sieht die RSK keinen weiteren Klärungsbedarf zur Belastung des Sicherheitsbehälters durch Projektilbildung.

Im Hinblick auf eventuelle Auswirkungen von Verbrennungen innerhalb des Trümmerschutzzylinders (TSZ) auf die SB-Stahlschale wurde festgestellt (vgl. [40]), dass bei der Auslegung des TSZ für KMV-Störfälle Differenzdruckbelastungen und Projektilbildungen berücksichtigt wurden. Die Betonstrukturen innerhalb des SHB wurden so ausgelegt, dass die bei 2F-Brüchen der Primär- und Sekundärrohrleitungen als Folge von Differenzdrücken auftretenden Belastungen abgetragen werden. In Bezug auf die Belastungen durch Projektilbildung wurden im Sinne einer Grenzbetrachtung die Auswirkungen von repräsentativen Bruchstücken aus verschiedenen Armaturen analysiert. Es wurde festgestellt, dass die dabei berechneten Eindringtiefen bei den vorhandenen Wanddicken keine Perforationsgefährdung darstellen (vgl. [40]).

Die relevanten Freisetzungsorte von Wasserstoff aus dem Reaktorkreislauf liegen innerhalb des Trümmerschutzzylinders, wo dann die höchsten H<sub>2</sub>-Konzentrationen zu erwarten sind. Aufgrund der

---

<sup>2</sup> Nachauswertung mit Schwerpunkt H<sub>2</sub>-Konzentrationen in Treppenhäusern für ein großes Leck in der Anlage Grafenrheinfeld (KKG); berechnete Konzentrationen < 5Vol.-% H<sub>2</sub>, Analyse ohne H<sub>2</sub>-Verbrennung

Auslegung des Trümmerschutzzylinders erwartet der Ausschuss, dass dessen globale Standsicherheit und Schutzfunktionen erhalten bleiben.

8 Welches Integritätsverhalten zeigt der Sicherheitsbehälter unter Einwirkung von  $H_2$ -Verbrennungen/Deflagrationen, wo liegen die Grenzbelastungen?

Dynamische Untersuchungen zur Grenztragfähigkeit eines SB bei Verbrennungslasten außerhalb des Trümmerschutzzylinders wurden z. B. im Rahmen der Deutschen Risikostudie Kernkraftwerke, Phase B [36] und bei FZK [35] durchgeführt. Die Ergebnisse wurden in [24] zusammengefasst und bewertet. Die Untersuchungen für den SB vom Typ Biblis B unter postulierter  $H_2$ -Deflagration, approximiert durch eine global wirkende Druckrampe, zeigen, dass ein Versagen ab etwa 0.85 MPa nicht ausgeschlossen werden kann. Für eine Konvoi Anlage wird gezeigt, dass selbst eine Detonation bei stöchiometrischem Gemisch [35] (Annahme einer zylinderförmigen Gemischwolke mit rund 30 Vol.-%  $H_2$ , 550 kg  $H_2$  innerhalb des Trümmerschutzzylinders bei einem Containmentdruck von 2,25 bar) nicht zwangsläufig zum Integritätsverlust des SHB führen muss. Eine einfache Übertragbarkeit der Ergebnisse für einen Sicherheitsbehälter auf einen anderen, wobei sich beide z. B. im Material und in der Wanddicke voneinander unterscheiden, ist nur für Beanspruchungen im linear-elastischen Bereich gegeben. Aussagen zur Grenzbelastbarkeit, insbesondere im Bereich von Störstellen sind deshalb nur durch Detailuntersuchungen zu erlangen.

9 Sind autokatalytische Rekombinatoren als eindeutig sicherheitsgerichtete Maßnahme zu betrachten?

Rekombinatoren sind dann als eindeutig sicherheitsgerichtete Maßnahme zu betrachten, wenn die Nachweisziele des Abschnitts 4.1 erfüllt sind. Hierzu nimmt der Ausschuss im Abschnitt 4.3 detailliert Stellung.

Rekombinatoren können neben anderen, unfallbedingten Zündquellen unter bestimmten Bedingungen (insbesondere bei erhöhten  $H_2$ -Konzentrationen) selbst zur Zündquelle werden.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass Rekombinatoren frühzeitig auch bei dampfverfinerten Gasgemischen in der SB-Atmosphäre einen Wasserstoffabbau bewirken und damit die mittleren Konzentrationen senken. Sie führen damit, falls dennoch  $H_2$ -Verbrennungen auftreten, zu tendenziell weniger gefährdenden Verbrennungen.

10 Wie ist die sicherheitstechnische Wirksamkeit von autokatalytischen Rekombinatoren im Vergleich zu anderen  $H_2$ -Gegenmaßnahmen, z. B. der Nachintertisierung einzuschätzen?

Als Notfallmaßnahmen zur Verhinderung von Wasserstoff-Luft-Wasserdampf-Gemischen, deren Verbrennung zu einer Gefährdung der Integrität des Sicherheitsbehälters führen könnte, kommen unter den gegebenen konzeptionellen Randbedingungen (Begehbarkeit des Containments während des Leistungsbetriebs) gemäß [24] folgende Möglichkeiten in Betracht:

- Nachinertisierung (Voll- oder Teil-),
- Nachverdünnung (Entlüftung),
- Kombination der Entlüftung des Sicherheitsbehälters mit der Nachinertisierung,
- gezielte frühzeitige Verbrennung durch Zünder mit kurzen Flammenweglängen,
- Katalytische Rekombinatoren,
- Kombination der katalytischen Rekombination und der gezielten frühzeitigen Verbrennung durch Zünder („Dual-Konzept“) und
- Kombination der Nachverdünnung und der katalytischen Rekombination.

Nach Ansicht der RSK weist der ausschließliche Einsatz von katalytischen Rekombinatoren zur Erfüllung der Nachweisziele gegenüber allen anderen genannten Möglichkeiten Vorteile auf. So erfordert der Einsatz katalytischer Rekombinatoren u. a. keine frühzeitige Öffnung des Containments (wie bei der Nachverdünnung) sowie keine Bevorratung von Inertgasen und deren aktive Zuspeisung (wie bei der Entlüftung/Verdünnung mit Nachinertisierung). Ebenso ist eine aktive Absenkung der H<sub>2</sub>-Konzentration mit Zündern nicht erforderlich. Insgesamt schließt sich die RSK daher den diesbezüglichen Argumenten der GRS in [24] an.

11 Welche H<sub>2</sub>-Gegenmaßnahmen werden international bei der Beherrschung der H<sub>2</sub>-Problematik bei auslegungsübergreifenden Störfällen speziell bei Druckwasserreaktoren verfolgt?

Weltweit werden bei großen Containments (DWR) überwiegend Rekombinatoren als Gegenmaßnahme gegen Wasserstoff nach auslegungsüberschreitenden Ereignissen eingesetzt.

In den USA werden, wenn überhaupt, Maßnahmen gegen Wasserstoff bei Unfällen vorgesehen sind, Glühkerzen (mit Stromversorgung oder Batterie gestützt) als Zünder verwendet.

12 Ist die Übernahme von Prinzipien der Explosionsschutz-Richtlinie (ExRL) zur Behandlung der H<sub>2</sub>-Problematik bei auslegungsüberschreitenden Störfällen sinnvoll?

Bei der Explosionsschutz-Richtlinie (EX-RL) handelt es sich um Regeln der Berufsgenossenschaften die sich in erster Linie an den Unternehmer richten und ihm Hilfestellung bei der Umsetzung seiner Pflichten aus staatlichen Arbeitsschutzvorschriften und/oder Unfallverhütungsvorschriften geben sowie Wege aufzeigen sollen, wie Arbeitsunfälle, Berufskrankheiten und arbeitsbedingte Gesundheitsgefahren vermieden werden können. Auf der Basis des Berichts der GRS [24] lassen sich folgende Aussagen machen: In allen bisherigen Beratungen von Wasserstoffgegenmaßnahmen im Rahmen der RSK wurde bisher nicht die Notwendigkeit gesehen, die Anwendung der EX-RL einzufordern. Speziell für die Anwendung bei Kernkraftwerken besteht im KTA-Regelwerk die KTA Regel 2103 'Explosionsschutz in Kernkraftwerken mit Leichtwasserreaktoren (allgemeine und fallbezogene Anforderungen)' Fassung 6/00. In dieser Regel wird davon ausgegangen, dass im Hinblick auf betriebliche Vorsorgemaßnahmen (Sicherheitsebenen 1 und 2) und die Beherrschbarkeit von Auslegungstörfällen (Sicherheitsebene 3) die EX-RL eingehalten werden.

Im Anwendungsbereich der KTA-Regel wird die Anwendung dieser Regel auf die Freisetzung von Wasserstoff beim Kühlmittelverlust und bei sonstigem radiolytisch gebildetem Wasserstoff explizit ausgenommen. Dieser Sachverhalt und die möglichen radiologischen Auswirkungen sind in anderen Regelwerken gesondert geregelt (Störfallberechnungsgrundlagen des BMU und RSK-Leitlinien DWR).

Die Übertragung der in der EX-RL niedergelegten Grundprinzipien der Prävention und Mitigation auf auslegungsüberschreitende Ereignisse in einem Kernkraftwerk findet sich auch in den zur Anwendung kommenden kerntechnischen Regelwerken. Aufgrund der Entstehungsart des Wasserstoffs bei diesen Ereignissen, den kernkraftwerksspezifischen Randbedingungen hinsichtlich der Bildung brennbarer Gasgemische und angesichts der bei einer Wasserstofffreisetzung in den Sicherheitsbehälter zahlreich vorhandenen und nicht beeinflussbaren Zündquellen ist der Schwerpunkt bei auslegungsüberschreitenden Ereignissen im Unterschied zur EX-RL die Mitigation.

Im Zuge der Beratungen der RSK wurden die technischen Schutzmaßnahmen der EX-RL bewertet [44].

### **4.3 Bewertung relevanter Einzelaspekte**

Im Rahmen der Beantwortung der BMU Fragen hat sich die RSK generisch mit der Frage der Wirksamkeit des Rekombinatorsystems und damit in Verbindung stehender relevanter Einzelaspekte befasst.

#### **4.3.1 Repräsentativität der ausgewählten Ereignisablaufsequenzen**

Seinen Überlegungen zur Wirksamkeit von Rekombinatoren für S-KWU DWR in [9] legt Herr Jahn entweder die Freisetzungen und Zeitverläufe zu Grunde, wie sie in der Deutschen Risikostudie Kernkraftwerke Phase B ermittelt wurden [9], oder aber die abdeckenden Werte aus der RSK-Stellungnahme des Jahres 1994. Letztere wurden bei den RSK Beratungen zum Rekosystem im Jahr 1997 dann durch ein Fallspektrum ersetzt [30].

Nach Auffassung der RSK entsprechen die von Herrn Jahn in Bezug genommenen Ergebnisse der Deutschen Risikostudie Kernkraftwerke Phase B zur Wasserstofffreisetzung nicht mehr dem Stand von Wissenschaft und Technik. Weiterhin ist nach Auffassung der RSK eine Betrachtung, die unabhängig von den ereignisablaufbedingten möglichen Wasserstofffreisetzungen und Freisetzungsraten bestimmte Freisetzungen postuliert, nicht zielführend. Stattdessen sollte die Bewertung der Wirksamkeit der Rekombinatoren weiterhin anhand von ausgewählten charakteristischen und rechnerisch analysierten Ereignisablaufsequenzen erfolgen (repräsentative Ereignisablaufsequenzen gemäß Abschnitt 4.1). Dieses Vorgehen ist erforderlich, da für eine Bewertung der Wirksamkeit der Rekombinatoren zusätzlich zur Wasserstofffreisetzung stets auch deren zeitlicher Verlauf und die jeweiligen Containment-Zustände (Dampfgehalt, Druck, Temperaturen) bekannt sein müssen. Insbesondere ist relevant, ob während bzw. kurz nach Phasen mit hohen H<sub>2</sub>-Freisetzungsraten eine Dampf inertisierung im Containment vorliegt. Die zu betrachtenden Ereignisablaufsequenzen sind anhand geeigneter Kriterien festzulegen. Die Kriterien für die Auswahl repräsentativer Ereignisablaufsequenzen waren in der Vergangenheit in Analysen der GRS [32], [34] beschrieben und sollten nach Auffassung der RSK auch weiterhin sein:

- a) Häufigkeit des angenommenen Ereignisablaufpfades,
- b) Ort und zeitlicher Verlauf der H<sub>2</sub>-Freisetzung,
- c) Konvektionsbedingungen im Containment,
- d) Containment-Zustände (Kondensationspotential, Höhe des Dampfgehalts).

Der RSK liegen keine neuen Erkenntnisse vor, die die Repräsentativität des dem Rekombinator-Konzept gemäß [30] zu Grunde gelegten Spektrums von Ereignisablaufsequenzen unter den Gesichtspunkten a) bis c) in Frage stellen.

Hinsichtlich des Kriteriums d) ist allerdings festzustellen, dass im Zuge der den RSK-Bewertungen der Jahre 1997/1998 zu Grunde gelegten Ereignisablaufanalysen jeweils der Ausfall der aktiven Notkühleinrichtungen bereits zu Beginn des Ereignisses angenommen worden ist (Einspeisung nur über die Druckspeicher). Bei diesen Szenarien wird daher nur wenig kaltes Notkühlwasser eingespeist und es ergeben sich Containment Zustände mit höheren Dampfgehalten. Dies führt tendenziell zu einer anfänglichen Dampf inertisierung, insbesondere in den Anlagengeräumen.

Im Nachgang zur Rekombinator-Auslegung sind für GKN-2 Rechnungen für die PSA der Stufe 2 mit dem Integralcode MELCOR auf Basis ähnlicher Szenarien durchgeführt worden [16]. Hierbei wird der Ausfall der Notkühlsysteme jedoch erst bei Umschaltung auf Sumpfansaugung unterstellt. Die Rechnungen zeigen tendenziell niedrigere Containmentdrücke und niedrigere Dampfgehalte bei Freisetzung der gleichen Menge von Wasserstoff mit ähnlichen Freisetzungsraten wie die Rechnungen mit dem unterstellten sofortigen Ausfall der aktiven Notkühleinrichtungen. Es zeigen sich im Falle von bis zur Sumpfansaugung verfügbaren Notkühlsystemen folglich frühzeitiger brennbare Gasgemische. Eine differenzierte Untersuchung der Wasserstoffverteilung mit einem Detailcode wurde jedoch nicht vorgenommen. Für differenziertere Aussagen zu den maximal erreichbaren zündfähigen H<sub>2</sub>-Konzentrationen und zu der Frage, ob es zu einer die Integrität des Sicherheitsbehälters gefährdenden Deflagration kommen kann, wären Detailrechnungen zur Wasserstoffverteilung, beispielsweise aufbauend auf den MELCOR Ergebnissen zur Massen- und Energiefreisetzung, erforderlich.

Die RSK empfiehlt im Hinblick auf eine ergänzende Bewertung der sicherheitstechnischen Folgen einer Wasserstofffreisetzung in den Sicherheitsbehälter für ein Ereignis ‚kleines Leck‘ für eine DWR-Anlage, deterministische Analysen zur Wasserstoffverteilung im Containment unter der Randbedingung Ausfall der Notkühlsysteme bei Sumpfansaugung im gleichen Umfang und in der gleichen Tiefe wie die Szenarien mit sofortigem Ausfall der aktiven Notkühleinrichtungen durchzuführen. Hierbei sind die maximal auftretenden Wasserstoffkonzentrationen zu ermitteln sowie die Zündfähigkeit der auftretenden Gemische zu bewerten. Die Analysen sollten aus Konsistenzgründen zu den vorangegangenen Untersuchungen für die Referenzanlage durchgeführt werden.

Hierbei ist insbesondere relevant, in welchem Maße bei ‚trockenen‘ Szenarien erhöhte zündfähige Wasserstoffkonzentrationen auch außerhalb des Trümmerschutzzylinders sowie in Räumen, für die die Gefahr von Projektilbildungen besteht (Treppenhäuser), auftreten können.

### 4.3.2 Beurteilung der Wasserstoffkonzentrationen

Die Auslegung des Rekombinatorsystems in deutschen DWR-Anlagen basiert auf einer detaillierten Analyse der Rekombinator-Wirksamkeit für die Referenzanlage GKN-2 für vier repräsentative Szenarien ohne Simulationen einer Verbrennung [32]. Zur deterministischen Beurteilung der Wirksamkeit eines solchen Systems wurden seinerzeit die Wasserstoffkonzentrationen, die sich mit einem Rekombinatorsystem im Sicherheitsbehälter einstellen, mit RALOC/COCOSYS [32] und GASFLOW [38] detailliert untersucht. Bei der Beurteilung der Analyseergebnisse kommt es nicht darauf an, wie viel Wasserstoff in der ersten Stunde nach Freisetzung rekombiniert wird, sondern darauf, dass sich die Gemischsituation in den einzelnen Raumbereichen durch die Wirkung der Rekombinatoren zu weniger reaktiven Gemischen hin verändert.

In diesem Sinne ist die Wirksamkeit des Rekombinatorsystems, auf die Kritik von Herrn Jahn hin, wonach Rekombinatoren im entscheidenden Zeitraum, ca. 1 h nach Beginn der Freisetzung, nur sehr begrenzt wirksam seien, seitens des Ausschusses neu geprüft worden. Zu diesem Zweck ist eine Nachauswertung der vorliegenden Unterlagen bezüglich der Wasserstoffkonzentrationen vorgenommen worden [31]. Die darin dokumentierten Rechnungen mit Rekombinatorsystem wurden ohne die Simulation möglicher H<sub>2</sub>-Verbrennungen durchgeführt. Nach einer Verbrennung würden die Konzentrationen deutlich niedriger ausfallen.<sup>3</sup>

Für eine sicherheitstechnische Bewertung der rechnerisch ermittelten Wasserstoff-Konzentrationen und dem aus der Verbrennung solcher Gasgemische resultierenden Gefährdungspotenzial wurden folgende Erkenntnisse herangezogen:

- Die in [18], [21], [37], [39] aufgeführten zahlreichen Verbrennungsexperimente zeigen, dass für H<sub>2</sub>-Konzentrationen > 10,5 Vol.-% (ohne Dampf im Gemisch) mit schnellen, turbulenten Verbrennungen und einem erhöhten Lastniveau durch den Gesamtdruckaufbau zu rechnen ist. Für die Einschätzung des Gefährdungspotentials wurden auch die für das Kernkraftwerk Biblis B (KWB-B) im Rahmen der Deutschen Risikostudie Kernkraftwerke, Phase B [36] zu Grunde gelegten Druck-Zeitverläufe und die damit durchgeführten strukturmechanischen Analysen, sowie die Untersuchungen des FZK [35] mit einbezogen.
- Lokale Verbrennungen mit H<sub>2</sub>-Konzentrationen > 10 Vol.-% und erhöhtem Lastniveau stellen nach [30] dann keine Gefährdung des SB dar, wenn sie innerhalb des Trümmerschutzzylinders auftreten. Im Hinblick auf eventuelle Auswirkungen von Verbrennungen innerhalb des Trümmerschutzzylinders (TSZ) auf die SB-Stahlschale wurde festgestellt (vgl. [40]), dass bei der Auslegung des TSZ für KMV-Störfälle Differenzdruckbelastungen und Projektilbildungen berücksichtigt wurden. Die Betonstrukturen innerhalb des SHB wurden so ausgelegt, dass die bei 2F-Brüchen der Primär- und Sekundärrohrleitungen als Folge von Differenzdrücken auftretenden Belastungen abgetragen werden. In Bezug auf die Belastungen durch Projektilbildung wurden im Sinne einer Grenzbetrachtung die Auswirkungen von repräsentativen Bruchstücken aus verschiedenen

---

<sup>3</sup> Diese maximalen Konzentrationen ergeben sich unter der Randbedingung, dass vor Erreichen der maximalen H<sub>2</sub>-Konzentrationen keine Verbrennungen auftreten. Dies ist für Szenarien, bei denen über einen längeren Zeitraum Zündfähigkeit gegeben ist, eine konservative Annahme – siehe z. B. die Analysen zum Kühlmittelverluststörfall (KMV) mit kleinem Leck [38]. Frühzeitig auftretende Verbrennungen könnten hier zu einer Öffnung weiterer Konvektionspfade sowie einer lokalen Absenkung der H<sub>2</sub>-Konzentrationen und damit insgesamt zu einer Verminderung der maximal erreichbaren H<sub>2</sub>-Konzentrationen führen.



Armaturen analysiert. Es wurde festgestellt, dass die dabei berechneten Eindringtiefen bei den vorhandenen Wanddicken keine Perforationsgefährdung darstellen (vgl. [40]).

Die relevanten Freisetzungsorte von Wasserstoff aus dem Reaktorkreislauf liegen innerhalb des Trümmerschutzzylinders, wo dann die höchsten H<sub>2</sub>-Konzentrationen zu erwarten sind. Aufgrund der Auslegung des Trümmerschutzzylinders erwartet der Ausschuss, dass seine globale Standsicherheit und Schutzfunktionen erhalten bleiben.

Die Nachauswertung der Verteilungsrechnungen ergibt, dass sich Wasserstoffkonzentrationen > 10 Vol.-% H<sub>2</sub> auf lokale Bereiche innerhalb des Trümmerschutzzylinders und im untersuchten Fall großes Leck auf ein kleines Teilvolumen oberhalb der Dampferzeuger Decke beschränken. Diese Bereiche oberhalb der Dampferzeuger Decken mit max. 12 Vol.-% H<sub>2</sub> und ca. 57 Vol.-% Dampf und mit deutlich abnehmender H<sub>2</sub>-Konzentration in den Dombereich hinein lassen - basierend auf einer ingenieurmäßigen Abschätzung auf der Basis der zahlreichen Versuchsergebnisse [18], [21], [37], [39] - bei einer Zündung keine Druck-Zeitverläufe mit einem Lastniveau erwarten, das die SB-Integrität gefährden könnte. Dies ergibt sich aus dem begrenzten Energieinhalt des genannten Teilvolumens von 250 m<sup>3</sup> mit 12 Vol.-% H<sub>2</sub>, 57% Dampf und in den Dombereich abnehmender H<sub>2</sub>-Konzentration gegenüber der FZK Untersuchung [35], bei der 7.500 m<sup>3</sup>, gefüllt mit einem stöchiometrischen H<sub>2</sub>-Luftgemisch, detonierten und die SB-Integrität erhalten blieb.

Die GRS-Verteilungsrechnungen mit RALOC [32] für das Rekombinator-Basiskonzept ergaben für das kleine Leck mit und ohne Wärmeabfuhr über die Dampferzeuger sowie insbesondere für den Ausfall der Speisewasserversorgung mit primärseitiger Druckentlastung, dass eine Gemischzündung in einzelnen Räumen außerhalb des Trümmerschutzzylinders (z. B. im Rohrkanal R72, einem Sackgassenraum in direkter Nachbarschaft zum Sicherheitsbehälter) auf Basis der ermittelten Verteilungen nicht ausgeschlossen werden konnte. Vor diesem Hintergrund wurde für die Referenzanlage GKN-2 ein erweitertes Rekombinatorkonzept erarbeitet, mit dem nach Auffassung der GRS die Schwachstellen des Basiskonzepts ausgeglichen werden konnten. RALOC-Analysen zur Wirksamkeit des erweiterten Rekombinatorkonzepts sowie für das letztlich in der Anlage realisierte Konzept (mit nochmals erhöhter integraler Abbaurrate) wurden für den Fall großes Leck durchgeführt, jedoch nicht mehr für die o. g. Fälle. Insofern liegen quantitative Aussagen dazu, welche Konzentrationsabsenkung durch das letztlich realisierte Rekombinatorkonzept in den relevanten Raumbereichen außerhalb des Trümmerschutzzylinders für die Fälle mit kleinem Leck sowie für den Ausfall der Speisewasserversorgung erreicht werden, z. Z. nicht vor.

Die von Herrn Jahn zitierten, aus Battelle-Versuchen [21] abgeleiteten Grenzen für eine „sanfte“ Deflagration von 8,4 Vol.-% H<sub>2</sub> in Luft und 10 Vol.-% H<sub>2</sub> bei 40 % Dampf gelten für die Einhaltung von Differenzdrücken < 0,15 bar (siehe [21]) auf innere Strukturen im SB. Für die Integrität des SHB mit einem Auslegungsdruck von 5,3 bar Überdruck (Konvoi-Anlagen) ist jedoch die Gesamtdruckbelastung ausschlaggebend. Somit sind die o. g. Differenzdrücke für die Schale des SB ohne Relevanz.

### 4.3.3 Zündquellen und Rekombinator-Wirksamkeit unter probabilistischen Gesichtspunkten

Untersuchungen im Zuge einer PSA der Stufe 2 für DWR vom Typ Konvoi liefern ergänzende Informationen zur Wirksamkeit eines Systems von Rekombinatoren für ein umfassendes Spektrum von Ereignisablaufanalysen. Erkenntnisse zum potenziellen wasserstoffbedingten SHB-Versagen ergeben sich dabei aus einer Einschätzung der Häufigkeit für das Auftreten von H<sub>2</sub>-Verbrennungen infolge verschiedener Zündquellen. Die dynamischen Wirkungen von Wasserstoffverbrennungen auf die Struktur wurden seinerzeit bei der vereinfachten Ermittlung der maximalen Drücke in Abstimmung mit FZK durch einen Zusatzfaktor bis hin zum doppelten Wert auf den Gleichgewichtsverbrennungs-(Adiabatic Isochoric Complete Combustion, AICC)-Druck berücksichtigt.

Seitens der GRS wurde in der 41. Sitzung des Ausschusses ANLAGEN- UND SYSTEMTECHNIK am 13.07.2006 über Ergebnisse der PSA der Stufe 2 für die Anlage GKN-2 berichtet [17], [22]. In der 42. Sitzung des Ausschusses am 26.09.2006 wurden diese Ausführungen bezüglich der Fragestellungen zu Zündquellen und der Rekombinator-Wirksamkeit unter probabilistischen Gesichtspunkten wie nachfolgend zusammengefasst.

Die Untersuchungen der PSA der Stufe 2 ergaben, dass es unter Berücksichtigung des Rekombinatorsystems bei weniger als 1 % aller Kernschadenzustände zu einem Integritätsverlust des SB in Folge von Wasserstoffverbrennungen kommt. Zu diesem Ergebnis tragen folgende Aspekte bei:

- Rekombinatoren können neben anderen unfallbedingten Zündquellen selbst zur Zündquelle<sup>4</sup> werden (bei erhöhter H<sub>2</sub>-Konzentration) und erhöhen damit die Zahl der Zündquellen.
- Rekombinatoren führen durch ihren Wasserstoffabbau zu geringeren mittleren Konzentrationen, die weniger zur Zündung neigen.
- Verbrennungsvorgänge bei niedrigeren mittleren Konzentrationen führen tendenziell zu weniger heftigen Verbrennungslasten.

Insgesamt verringert sich durch das Rekombinatorsystem die Häufigkeit für H<sub>2</sub>-Verbrennungen bei hohen H<sub>2</sub>-Konzentrationen (> 10 Vol.-% H<sub>2</sub>) und es ergibt sich eine Tendenz zu H<sub>2</sub>-Verbrennungen, die die SB-Integrität weniger gefährden.

Die Kritik von Herrn Jahn, wonach die im Rahmen der PSA GKN-2 angestellte Betrachtungen zum Vergleich von Zündwahrscheinlichkeiten unbrauchbar seien, wurde in der RSK diskutiert. Die Diskussion hat ergeben, dass zwar grundsätzlich nicht auszuschließen ist, dass sich die von der GRS ermittelte relative Häufigkeit von Kernschadenzuständen mit Integritätsverlust des SHB infolge von Wasserstoffverbrennungen bei anderen Zündwahrscheinlichkeiten verändert, es gelten aber die im vorherigen Absatz genannten zusammenfassenden qualitativen Aussagen unabhängig davon, welche Zündwahrscheinlichkeiten im Detail angesetzt werden.

---

<sup>4</sup> Versuche dazu laufen zurzeit an der Thermal Hydraulics, Aerosols and Iodine (THAI)-Anlage.

Weitergehende Überprüfungen sind aus Sicht der RSK nicht erforderlich.

## 5 Zusammenfassung

Die RSK hat mit der vorliegenden Stellungnahme dem Beratungsauftrag des BMU [1] entsprochen und die entsprechenden Fragen des BMU beantwortet. Sie hat sich dabei im Wesentlichen auf die technische Notiz [24] gestützt.

Die zentrale Frage aus der Liste der Fragen des BMU ist nach Auffassung der RSK, ob passive autokatalytische Rekombinatoren eindeutig sicherheitsgerichtet wirken und ob sie zu einer deutlichen Reduzierung des Risikos eines Sicherheitsbehälterversagens infolge von H<sub>2</sub>-Verbrennung oder -Detonation beitragen.

Diese Frage wird wie folgt beantwortet:

- Rekombinatoren bewirken frühzeitig auch bei dampfignerten Gasgemischen in der SHB-Atmosphäre einen Wasserstoffabbau, senken damit die mittleren Wasserstoff-Konzentrationen und führen damit, zu tendenziell weniger gefährdenden Verbrennungen, falls dennoch H<sub>2</sub>-Verbrennungen auftreten.
- Rekombinatoren können neben anderen ohnehin vorhandenen Zündquellen unter bestimmten Bedingungen (insbesondere bei erhöhten H<sub>2</sub>-Konzentrationen) selbst zur Zündquelle werden. Damit steigt die Zahl der potenziellen Zündquellen.
- Insgesamt ergibt eine probabilistische Gesamtbetrachtung, dass das Rekombinatorsystem über den Abbau von Wasserstoff die Häufigkeit für Wasserstoffverbrennungen bei H<sub>2</sub>-Konzentrationen > 10 Vol.-% senkt. Falls dennoch brennbare Gemische auftreten, trägt es zu weniger heftigen Verbrennungen bei. Die PSA der Stufe 2 für die Anlage GKN-2 ergab unter Berücksichtigung des Rekosystems einen geringen wasserstoffbedingten Anteil an der Häufigkeit für Schäden am Sicherheitsbehälter < 1 % aller Kernschadenszustände.

Darüber hinaus empfiehlt die RSK im Hinblick auf eine ergänzende Bewertung der sicherheitstechnischen Folgen einer Wasserstofffreisetzung in den Sicherheitsbehälter für ein Ereignis ‚kleines Leck‘ für eine DWR-Anlage, deterministische Analysen zur Wasserstoffverteilung im Containment unter der Randbedingung Ausfall der Notkühlsysteme bei Sumpfschaltung im gleichen Umfang und in der gleichen Tiefe wie die Szenarien mit sofortigem Ausfall der aktiven Notkühleinrichtungen durchzuführen.

## **Beratungsunterlagen**

- [1] BMU-Schreiben RS I 3 – 17018/1 vom 24.05.2005  
Erhöhung des Risikos eines Sicherheitsbehälterversagens durch Wasserstoffreaktionen  
infolge der Zünderwirkung von autokatalytischen Rekombinatoren
  
- [2] Schreiben Dr. Hermann Jahn, JED, Jahn Engineering & Design GmbH  
vom 22.03.2005  
Persönliches Ersuchen in Sachen Reaktorsicherheit und Katastrophenschutz
  
- [3] Schreiben von Herrn Dr. Jahn vom 10.07.2006 mit Anlagen
  
- [4] Schreiben von Herrn Dr. Jahn vom 28.08.2006
  
- [5] Schreiben von Herrn Dr. Jahn an die RSK-Geschäftsstelle und an das BMU  
vom 26.11.2006  
Betreff: RSK-Ausschuss ANLAGEN- UND SYSTEMTECHNIK, Ergebnisprotokoll  
der 43. Sitzung am 26.10.2006
  
- [6] Schreiben von Herrn Dr. Hermann Jahn vom 11.02.2007 mit Anlage  
Betreff: Wasserstoff-Problematik, 43. und 45. AST-Sitzung
  
- [7] Schreiben von Herrn Dr. Hermann Jahn vom 25.05.2007 mit Anlagen
  
- [8] Schreiben von Herrn Dr. Hermann Jahn vom 03.08.2007 mit Anlagen
  
- [9] Wasserstoff-Problematik in Containments bei schweren Unfällen  
Technischer Bericht/Technical Report  
JED-Bericht Nr. 2006-02  
München, 20. Juni 2006, Dr. Hermann Jahn
  
- [10] Severe Accident Containment Analyses on Hydrogen Explosions and Measures  
An evaluation on the present state of the art including comparison with TMI-2 and  
Chernobyl  
Technischer Bericht,/Technical Report  
JED-Bericht Nr. 2008-01,  
München, Januar 2008, Dr. Hermann Jahn
  
- [11] Auszug aus Severe Accident Containment Analyses on Hydrogen Explosions and  
Measures  
An evaluation on the present state of the art including comparison with TMI-2 and  
Chernobyl  
Technischer Bericht,/Technical Report  
JED-Bericht Nr. 2008-01,  
München, Januar 2008, Dr. Hermann Jahn

- [12] GRS-Bericht „Kompendium zur Wasserstoffproblematik und Wirksamkeit eines Systems autokatalytischer Rekombinatoren, Vorhaben SR 2468: Auswertungen von Ereignissen in Kraftwerken, GRS –V-SR 2468-1/2005
  
- [13] Beratungsauftrag des BMU  
Erhöhung des Risikos eines Sicherheitsbehälerversagens durch Wasserstoffreaktionen infolge der Zünderwirkung von autokatalytischen Rekombinatoren  
34. Sitzung des RSK-Ausschusses Anlagen- und Systemtechnik  
Bonn, 20. Juni 2005, H.-J. Allelein, GRS, Folienkopien
  
- [14] Workshop zur Wasserstoffproblematik  
H.-J. Allelein, GRS
  
- [15] ENTWURF  
E. Kersting  
Beratung zur Wasserstoffproblematik
  
- [16] Dr. Martin Sonnenkalb  
Unfallszenarien mit Bildung brennbarer Gemische  
GRS, Folienkopien, 13. Juli 2006
  
- [17] Horst Löffler  
Unfallbedingte Zündquellen im Sicherheitsbehälter  
GRS, Folienkopien, 13. Juli 2006
  
- [18] Analyse von schnellen Wasserstoffverbrennungsprozessen und Containmentlasten bei Kernschmelzunfällen  
BMU, Bonn, 26. September 2006  
W. Breitung, Institut für Kern- und Energietechnik, Forschungszentrum Karlsruhe, Folien
  
- [19] Erkenntnisse aus experimentellen Untersuchungen zum Verhalten katalytischer Rekombinatoren  
42. Sitzung des RSK-Ausschusses Anlagen- und Systemtechnik, BMU, Bonn, 26. September 2006  
E.-A. Reinecke, Institut für Sicherheitsforschung und Reaktortechnik (ISR), Forschungszentrum Jülich, Folien
  
- [20] Battelle-Versuche zum Verhalten katalytischer Rekombinatoren  
Dr.-Ing. Teja Kanzleiter, Becker Technologies, Eschborn  
Folien, 43. Sitzung des RSK-Ausschusses AST am 26.10.2006
  
- [21] Battelle-Versuche zur Wasserstoff-Deflagration  
Dr.-Ing. Teja Kanzleiter, Becker Technologies, Eschborn

Folien, 43. Sitzung des RSK-Ausschusses AST am 26.10.2006

- [22] Fragen zur Erhöhung des Risikos eines Sicherheitsbehälterversagens durch Wasserstoffreaktionen infolge der Zünderwirkung von autokatalytischen Rekombinatoren bei Unfällen  
B. Schwinges, M. Heitsch, P. Eisert, J. Sievers, 44. Sitzung des RSK-Ausschusses ANLAGEN- UND SYSTEMTECHNIK, 30.11.2006, Folien
- [23] Beitrag zur Klärung des Problems der Gefährdung des Containments durch Wasserstoff-Explosion nach Kernschmelzen (DWR)  
Vortrag 24. Mai 2007 zur 47. Sitzung des RSK-Ausschusses Anlagen- und Systemtechnik  
Autor: D. Hermann Jahn, Jahn Engineering & Design GmbH, Folien
- [24] Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH  
Technische Notiz  
Stellungnahme zu Fragen des BMU zur Erhöhung des Risikos eines Sicherheitsbehälterversagens durch Wasserstoffreaktionen infolge der Zündwirkung autokatalytischer Rekombinatoren bei Unfällen  
B. Schwinges, P. Eisert, H. Löffler, J. Sievers, M. Sonnenkalb, H.-J. Allelein  
April 2007
- [25] Bericht zum Entwurf einer Stellungnahme zu „Erhöhung des Risikos eines Sicherheitsbehälterversagens durch Wasserstoffreaktionen infolge der Zünderwirkung autokatalytischer Rekombinatoren bei Unfällen“  
B. Schwinges, GRS, 24. Mai 2007, Folien
- [26] Status der Bearbeitung des JED-Berichts (Mai 2007)  
H.-J. Allelein, GRS, 24. Mai 2007, Folien
- [27] E-Mail von Herrn Dr. Sonnenkalb, GRS, vom 06.08.2007 mit Anlage
- [28] E-Mail von Herrn Schwinges, GRS, vom 07.08.2007
- [29] Ausarbeitung vier wesentlicher Fragen zum Themenkomplex „Wasserstoff-Explosion/Maßnahmen“ auf Basis de GRS-Berichts Stellungnahme zu Fragen des BMU zur Erhöhung des Risikos eines Sicherheitsbehälterversagens durch Wasserstoffreaktionen infolge der Zünderwirkung autokatalytischer Rekombinatoren bei Unfällen, GRS-V-SR 2483 – 1/2007, April 2007, Dr. Hermann Jahn, 23. April 2008
- [30] Reaktorsicherheitskommission; Empfehlung: Maßnahmen zur Risikominderung bei Freisetzung von Wasserstoff in den Sicherheitsbehälter von bestehenden Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktor nach auslegungsüberschreitenden Ereignissen; Anlage 1 zum Ergebnisprotokoll der 314. RSK-Sitzung am 17.12.1997

- [31] AST Information 57/6.2 vom 27.11.2008  
Zusammenstellung des Sachverhaltes als Anhang zur Stellungnahme „Erhöhung des Risikos eines Sicherheitsbehälterversagens durch Wasserstoffreaktionen infolge der Zünderwirkung autokatalytischer Rekombinatoren“.
- [32] GRS; Wirksamkeit eines Systems katalytischer Rekombinatoren in Sicherheitsbehältern von DWR-Anlagen deutscher Bauart; GRS-A-2628; Oktober 1998
- [33] Reaktorsicherheitskommission, Ausschuss AST; 47. Sitzung vom 24.05.2007, Ergebnisprotokoll
- [34] GRS; Unfallanalysen für DWR mit dem Integralcode MELCOR 1.8.3; GRS-A-2579, Juni 1998
- [35] Krieg, P. et al.; Assessment of the load-carrying capacities of a spherical pressurized water reactor steel containment under a postulated hydrogen detonation; Nuclear Technology, Vol. 141, Feb. 2003 S. 109 ff
- [36] Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS)  
Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke, Phase B  
Verlag TÜV Rheinland, 1990
- [37] Dorofeev, S. B. et al.; Deflagration to Detonation Transition in Large Confined Volume of Lean Hydrogen-Air Mixtures; Combustion and Flame, Vol. 104, S. 95-110 (1996)
- [38] Royl, P. et al.; GASFLOW Analysis of Hydrogen Recombination in a Konvoi Type PWR Containment under Hypothetical Small Break and Large Break LOCA Conditions; Jahrestagung Kerntechnik 2000
- [39] W. Breitung, C. Chan, S. Dorofeev, A. Eder, B. Gelfand, M. Heitsch, R. Klein, A., Malliakos, J. Shepherd, E. Studer, and P. Thibault  
Flame Acceleration and Deflagration to Detonation Transition in Nuclear Safety,  
SOAR. NEA/CSNI/R(2000)7, August 2000
- [40] Beurteilung einer möglichen Containmentgefährdung durch Projekttilbildung, Bericht, J. Huber, TÜV SÜD IS, 21.11.2008
- [41] Schreiben von Herrn Dr. Jahn vom 16.09.2008 mit 2 Anlagen:
- [42] Dr. Hermann Jahn  
INTRA-mod7, Catalytic Recombiner Modeling, Auszug aus einem in Arbeit befindlichen Bericht (Fertigstellung Nov. 2008)

- [43] Dr. Hermann Jahn  
INTRA-Analyse von Maßnahmen gegen Wasserstoff-Explosion bei Kernschmelz-  
Umfällen  
Berechnungen auf Basis der Konfiguration der Battelle Zx-Versuche (Multi-Reko-  
Experimente)  
Technischer Bericht JED-Bericht Nr. 2008-04 vom 16.09.2008