

Solar-Wasserstoff-Anlage

Zuverlässigkeits- und Risikoanalyse von R. Bongartz, W. Jahn, J. Marx, J. Mertens

Wasserstoff wird häufig als einer der wichtigen zukünftigen Energieträger genannt. Hauptgrund ist seine umweltfreundliche, weil weitgehend schadstofffreie Verbrennung. Sicherheitstechnisch bedeutsam ist die leichte Entzündbarkeit nahezu aller Gemische von Luft und Wasserstoff. Ein breiter Einsatz von Wasserstoff in der Energietechnik erfordert deshalb eine begleitende und vorausschauende Bewertung von Sicherheit und Risiko. Das *Institut für Sicherheitsforschung und Reaktortechnik (ISR)* des *Forschungszentrums Jülich* entwickelt entsprechende Prognoseverfahren und hat PHOEBUS als Testbeispiel gewählt.

Solarenergie steht rein quantitativ gesehen im Überfluß zur Verfügung. Nachteilig sind die geringe Energiedichte und die starke Zeitabhängigkeit des Angebots. Mögliches Speichermedium ist Wasserstoff (H_2), der mittels Solarstrom durch Elektrolyse von Wasser erzeugt und bei Bedarf in einer Brennstoffzelle zusammen mit Sauerstoff (O_2) wieder in Strom umgewandelt wird.

Ein derartiger Einsatz von Wasserstoff und Sauerstoff findet sich in einer solar-elektrischen Anlage zur Energieversorgung, die von der *Arbeitsgemeinschaft Solar NRW* gefördert wurde und zur Zeit im *Forschungszentrum Jülich* erprobt wird. Sie wird betrieben vom *Institut für Energieverfahrenstechnik (IEV)* und deckt mit einer Spitzenleistung von 43 kW_p den überwiegenden Teil des Strombe-

darfs der benachbarten Zentralbibliothek des Zentrums. Der Name PHOEBUS (Photovoltaik, Elektrolyse, Brennstoffzelle und Systemtechnik) verweist als Akronym auf die charakteristischen energietechnischen Komponenten.

Ziele und Vorgehensweisen probabilistischer Risikoanalysen

Häufig werden in technischen Anlagen Stoffe hergestellt oder verwendet, die ein Gefährdungspotential darstellen. So dürfen etwa toxische Stoffe nicht oder nur dosiert in die Umgebung gelangen. Explosionsfähige Stoffe müssen unter kontrollierten, ungefährlichen Bedingungen gehandhabt werden. Eine entsprechende Gestaltung der Anlagen und ihrer Betriebsweisen wird durch Sicherheitsbetrachtungen unterschiedlicher Art nachgewiesen.

Neben eventuellen Folgen des bestimmungsgemäßen Betriebs technischer Anlagen muß auch deren Verhalten bei Auftreten von Störfällen bewertet werden. Dies geschieht beispielsweise durch den Nachweis ausreichender Maßnahmen zur Störfallbeherrschung. Hierzu werden Annahmen getroffen, die im wesentlichen auf den Erfahrungen beruhen, die im Laufe der technischen Entwicklung gewonnen wurden und die zu einem System von Gesetzen, Verordnungen, Regeln, Richtlinien und Empfehlungen geführt haben; beispielsweise für die Auslegung von Komponenten, für die Qualitätssicherung, den Brandschutz und auch für Unfallverhütungsvorschriften.

Bei dem beschriebenen Vorgehen erfolgt die Auswahl der zu betrachtenden Störfälle zwar auf der Basis von Erfahrungen, aber zugleich auch intuitiv. Diese Intuition erstreckt sich sowohl auf die Verlässlichkeit der technischen Einrichtungen als auch auf die Folgen unbeherrschter Störfälle. Dies ist jedoch um so weniger tragfähig, je weiter denkbare Störfallabläufe den Bereich der direkten Erfahrung überschreiten und je größer die möglichen Schäden sind.

Zunächst wurden in der Kerntechnik systematische Prognoseverfahren für das Auftreten und die Folgen unbeherrschter Störfälle angewendet. Sie wurden im Laufe von etwa 25 Jahren erheblich weiterentwickelt und sind in der Form probabilistischer Sicherheits- und Risikoanaly-

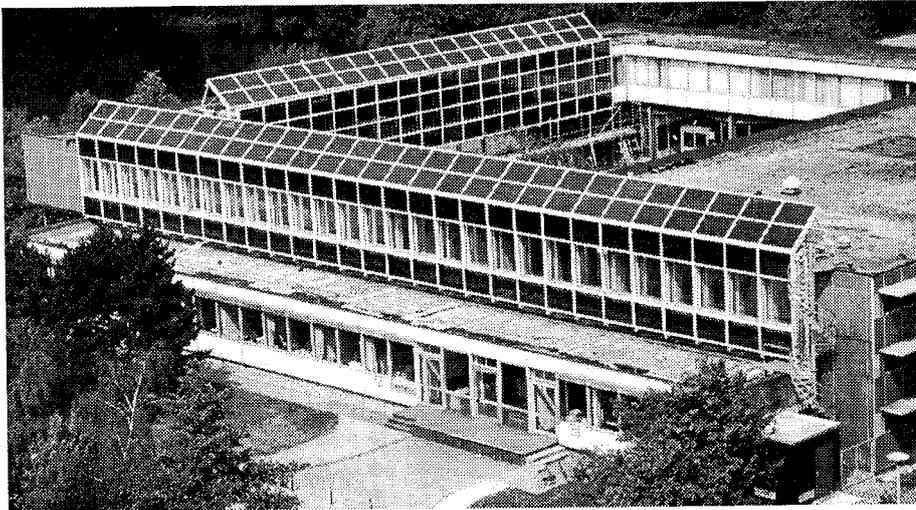


Abb. 1: Die 43 kW_p -Photovoltaik-Anlage mit einer Modulfläche von 312 m^2 am Gebäude der Zentralbibliothek des Forschungszentrums Jülich

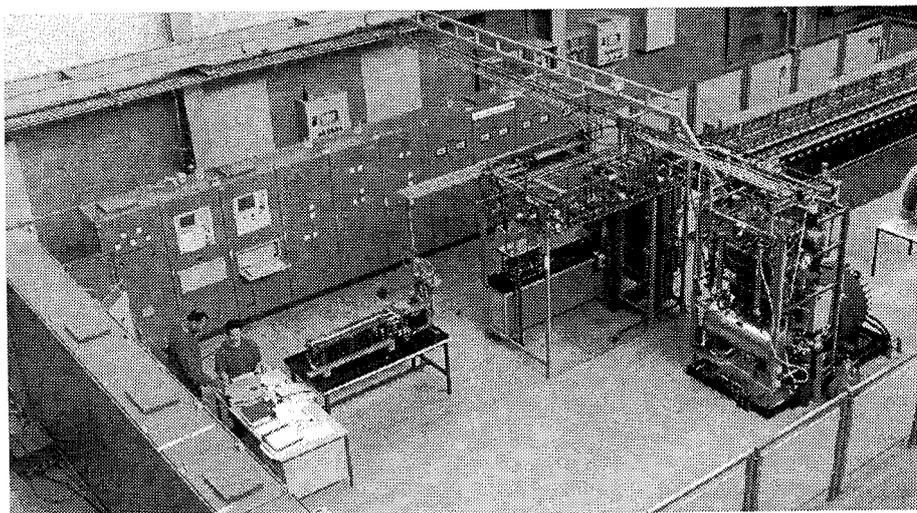


Abb. 2: Anlage zur Aufbereitung der Solarenergie mit Leistungselektronik, Brennstoffzelle, Elektrolyseur, Gasaufbereitung und Akkumulator in der Halle des IEV

sen heute aus der Beurteilungspraxis von Kernkraftwerken nicht mehr wegzudenken.

Solche Analysen verknüpfen die zu erwartende Häufigkeit störfallauslösender Ereignisse mit den bedingten Wahrscheinlichkeiten für das Versagen störfallbeherrschender Einrichtungen oder Maßnahmen und sind dabei auf Vollständigkeit angelegt.

Sie ermöglichen Rückschlüsse auf die Bedeutung von auslösenden Ereignissen, von sicherheitstechnisch relevanten Systemen oder auch Komponenten, von Maßnahmen des Betriebspersonals sowie von Wartungs- und Reparaturstrategien. Hieraus lassen sich Hinweise auf Schwachstellen und auf Verbesserungsmöglichkeiten ableiten.

Die Analysen erlauben ebenfalls einen bewertenden Vergleich technischer Gestaltungsalternativen.

Ordnet man den zu erwartenden Häufigkeiten von Störfallabläufen die resultierenden Schäden zu, erhält man ein Maß für das Risiko und damit die Möglichkeit, die Sicherheit einer Technik nicht nur nach ihrem Gefährdungspotential zu beurteilen.

In der deutschen Bewertungspraxis für Anlagen der nicht-nuklearen Energietechnik sind probabilistische Analysen der beschriebenen Art nicht üblich. Ihr zu vermutender Nutzen wird kontrovers diskutiert. Die PHOEBUS-Analyse des ISR hatte zum Ziel, Anwendungsmöglichkeiten zu prüfen und Bedarf für Weiterentwicklungen zu erkennen.

Die PHOEBUS-Anlage

Charakteristische Komponenten der PHOEBUS-Anlage sind die Photovoltaik-Module zur Stromerzeugung, Gleichstromsteller, Wechselrichter und Batterien zur elektrischen Leistungsaufbereitung und Kurz-

zeitspeicherung, der Elektrolyseur zur Gaserzeugung, das Gaslager zur Langzeitspeicherung sowie die Brennstoffzelle zur Rückverstromung. Abb. 3 zeigt die räumliche Anordnung dieser Komponenten.

Die Photovoltaik-Module befinden sich am Gebäude der Zentralbibliothek, die Gaslager im Freien neben einer Halle, die die restlichen Komponenten enthält. Tab. 1 faßt die Daten der charakteristischen Anlagenkomponenten zusammen.

Die Anlage dient zur netzunabhängigen Stromversorgung der Zentralbibliothek. Die Überschußenergie des Sommerhalbjahres wird als Gas gespeichert und im Winter wieder in Strom zurückverwandelt. Zum tagesweisen Ausgleich zwischen Bedarf und Angebot an Energie dienen Bleibatterien, die auch einen Drei-Tage-Betrieb ermöglichen. Die Anlage arbeitet vollautomatisch und kann ohne Personal betrieben werden.

Das Sicherheitskonzept (unter dem hier die Vorgehensweise zur Beherrschung von Störfällen durch aktive Maßnahmen verstanden wird) richtet sich vornehmlich gegen Wasserstoff-Freisetzungen innerhalb der Halle. Hierzu dient ein Gaswarnsystem mit Meßköpfen direkt über sensitiven Komponenten und zusätzlich unter der Hallendecke. Bei 0,4 Volumenprozent Wasserstoff wird Alarm ausgelöst. Bei der doppelten Menge werden die Gasleitungen zwischen den Speichern und der Halle automatisch abgesperrt, ebenso die Gas- und Energieversorgung der betroffenen Komponente. Gleichzeitig starten Abluftventilatoren in der Hallendecke. Die Sicherheitszentrale des Forschungszentrums wird automatisch alarmiert.

Unabhängig von diesem Gaswarnsystem führt eine Durchfluß- und

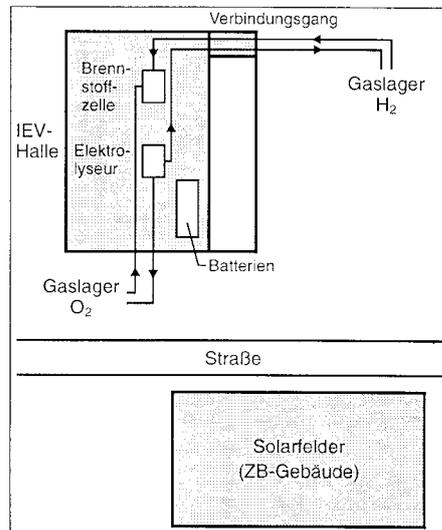


Abb. 3: Räumliche Anordnung der charakteristischen Komponenten von PHOEBUS

Drucküberwachung in den Gaszuleitungen zur Halle bei Überschreitung von Grenzwerten zur Absperrung der Leitungen.

Zur Vermeidung von Störfällen dient eine spezielle Auslegung der Anlage. So wurde z.B. für die Wasserstoff oder Sauerstoff führenden Leitungen Edelstahl verwendet. Sie werden in der Halle bei einem Maximaldruck von 7 bar betrieben. Hochdruckleitungen (H₂ bis 150 bar, O₂ bis 70 bar) sind nur im Freien verlegt.

Verwendung und Gefahrenpotential von Wasserstoff

Wasserstoff ist das am häufigsten vorkommende Element. Dementsprechend ist er Bestandteil vieler natürlicher Stoffe und ein wichtiger Grundstoff in der Chemie. Als Energieträger ist Wasserstoff wegen seiner schadstoffarmen Verbrennung attraktiv. Die Verwendungsmöglichkeiten sind mit denen anderer Brenngase vergleichbar. In Szenarien mit intensiver Nutzung von Solarenergie wird Wasserstoff zusätzlich als Speichermedium diskutiert. Insgesamt bedeutet dies sowohl die häufige Handhabung kleinerer Mengen als auch die Lagerung großer Mengen an Wasserstoff.

Gemische von Wasserstoff und Luft sind zündfähig bei Wasserstoffanteilen zwischen 4 und 75 Volumenprozent. Somit können bereits geringe Mengen an ungewollt freigesetztem Wasserstoff, etwa bei Undichtigkeiten, die Ursache unkontrollierter Verbrennungen sein. Hinzu kommt, daß die erforderliche Zündenergie über weite Mischungsbereiche sehr niedrig ist und minimal nur 0,02 mJ beträgt. Verglichen mit anderen Gasen kann aus einer Deflagration (Verpuffung) von Wasserstoff in geschlossenen Räumen mit Unterteilungen oder Hindernissen besonders

<p>Stromerzeugung Solarfläche: 312 m² effektiv Installierte Leistung: 43 kW_p Solarenergie: 253 MWh/a Elektrische Solarenergie: 32 MWh/a Endenergie: 19 MWh/a Anlagenwirkungsgrad: 0,59</p>	<p>Brennstoffzelle (alkalisch) 60 Zellen Nennleistung bei 48 V und 135 A: 6,5 kW Betriebstemperatur: 80°C Wasserstoffverbrauch: 3,5 Nm³/h Wasserstoffvolumen: 0,006 Nm³ Betriebsdruck: 2,3 bar</p>
<p>Elektrolyseur (alkalischer Druckelektrolyseur) 21 Zellen in bipolarer Anordnung 30%ige Kalilauge als Elektrolyt (80°C) Nennleistung: 26 kW Nennbetriebsspannung: 35 V effektive Zellfläche: 21 x 2.500 cm² max. Wasserstoffproduktion: 6,5 Nm³/h max. Sauerstoffproduktion: 3,25 Nm³/h Wasserstoffvolumen: 0,150 Nm³ Betriebsdruck: 7 bar</p>	<p>Batterie (Kurzzeitsspeicher) Blei-Batterie mit 110 Zellen Kapazität: 300 kWh Spannung je nach Ladezustand: 200 - 260 V</p> <p>Langzeitspeicher Wasserstoff: 18 Hochdruckspeicher (120 bar) Gesamtvolumen: 27 m³ Speicherkapazität: 3.000 Nm³</p> <p>Sauerstoff: 1 Hochdruckspeicher (70 bar) Volumen: 20 m³ Speicherkapazität: 1.400 Nm³</p>

Tab. 1: Charakteristische Daten der PHOEBUS-Anlage

leicht eine Detonation mit hohen Druckspitzen bis etwa 15 bar und entsprechenden Folgen werden.

Schließlich ist auch die als Knallgas bekannte Mischung von Wasserstoff und Sauerstoff explosionsfähig.

Ablauf denkbarer Störfälle

Der Begriff „Störfallablauf“ steht hier für eine Reihenfolge von Ereignissen. Zu Beginn steht das „auslösende Ereignis“; die Abläufe sind beendet durch Erreichen von Zuständen, die hinsichtlich ihrer Risikorelevanz stabil sind. Nach auslösenden Ereignissen ergeben sich in der Regel Ablaufalternativen, etwa durch fehlerhafte statt auslegungsgemäße Anlagenreaktionen. Nach dieser Logik lassen sich sogenannte Ereignisbäume konstruieren.

Als Endzustände im beschriebenen Sinn werden im weiteren das Vorliegen zündfähiger Gasmischungen oder die erfolgreiche Vermeidung solcher Mischungen betrachtet. Drei typische Endzustände mit zündfähigen Gasmischungen sind zu unterscheiden:

- eine Knallgasbildung,
- die Bildung eines Wasserstoff-Luft-Gemisches in der Halle,
- die Entstehung einer Wasserstoff-Luft-Wolke im Freien.

Eine Zündung des Gemisches wird bei vorhandener Zündquelle aufgrund der geringen benötigten Fremdenenergie stets unterstellt.

Zur Ermittlung und Klassifizierung denkbarer Störfallabläufe wurden alle Bereiche der Anlage umfassend auf Gefahrenpotentiale und Wirkungsweise von Sicherheitseinrichtungen untersucht. Hierzu wurde die Möglichkeit intensiver Anlagenbegehungen genutzt.

Die aus Störfallabläufen resultierenden Gasgemische wurden mit Hilfe des Codes RALOC ermittelt.

Bei Leckagen ist unmittelbar an der Ausströmstelle stets mit zündfähigen Gemischen zu rechnen. Sie sind keine Gefahr für die Anlagenumgebung und werden nicht weiter untersucht.

Knallgasbildung

Eine Vermischung von Wasserstoff und Sauerstoff zu Knallgas ist im Elektrolyseur und in der Brennstoffzelle möglich. Wie die Analysen zeigten, können komponenteninterne Undichtigkeiten als solche lediglich zu einer Vermischung relativ geringer Gasmengen im Bereich von Litern führen. Nur bei Versagen von Schutzeinrichtungen sind umfangreiche Gemischbildungen möglich bis hin zur schleichenden Einspeisung von Wasserstoff in den Sauerstoff-Lagertank. Dort befindet sich allerdings keine Zündquelle.

Bildung zündfähiger Gemische innerhalb der Halle

In diesem Fall handelt es sich um Gemische von Wasserstoff und Luft. Auslösende Ereignisse sind Lecks an Wasserstoff-führenden Komponenten. Gesondert zu betrachten sind Wasserstoff-Freisetzen in einem an die Halle angrenzenden Verbindungsgang (vergl. Abb. 3).

Die Auslegung von Komponenten und die Gestaltung der Schutzmaßnahmen legen es nahe, drei Leckklassen zu bilden:

- kleine Lecks reichen bis zu einer Ausströmrate von 10 m³/h, die dem Grenzwert der Durchflußüberwachung entspricht, und decken die maximale Produktionsrate des Elektrolyseurs ab,
- mittlere Lecks enden bei der maximal möglichen Ausströmrate von 120 m³/h aus den Speicherbehältern bei funktionierender Hochdruckreduzierung,
- große Lecks reichen bis zu der maximalen Leckrate von 600 m³/h bei Versagen der Hochdruckreduzierung, aber funktionierender Überdrucksicherung der Speicherbehälter, die gleichzeitig ins Freie entlastet.

In allen Fällen wirkt die natürliche Hallenentlüftung der Bildung zündfähiger Gasgemische entgegen. Aktive Schutzaktionen sind Gasabsperung und Zwangsentlüftung der Halle.

In der Halle reicht bei kleinen Wasserstoff-Lecks die natürliche Entlüftung aus, zündfähige Gemische zu vermeiden. Bei mittleren Lecks können bei Versagen der aktiven Schutzmaßnahmen großräumige zündfähige Gemische ausgeschlossen werden, kleinräumige nicht mit Sicherheit. Große, aktiv nicht beherrschte Lecks können bei ungünstigen Entlüftungsbedingungen, etwa durch hohe Außentemperaturen, zu großvolumigen, zündfähigen Gasgemischen führen.

Im Verbindungsgang neben der Halle sind die Verhältnisse ungünstiger. Hier sind schon mittlere Lecks nur durch Absperrung eindeutig zu beherrschen. Bei großen Lecks ist sogar die zuverlässige Funktion des schnell schließenden Rückschlagventils erforderlich. Kleine Lecks sind problemlos, solange eine natürliche Lüftung gewährleistet ist, wie RALOC-Rechnungen zeigen.

Wasserstoff-Freisetzung im Freien

Die 18 im Freien aufgestellten und in zwei Batterien zusammengefaßten Hochdruck-Speicherbehälter enthalten bis zu 3.000 Nm³ Wasserstoff. Sie stellen im Prinzip das mit Abstand größte Gefährdungspotential dar.

Die relativ langsame Freisetzung von Wasserstoff aufgrund von Lecka-

gen führt im Freien wegen des großen Auftriebs nicht zur Bildung zündfähiger Gaswolken. Dies kann jedoch beispielsweise durch plötzliches Bersten eines der Speicherbehälter oder durch Bruch einer Anschlußleitung eintreten. Eine Zündung durch Funken aufgrund umherfliegender Trümmer muß dabei unterstellt werden.

Prognosen zur statistischen Häufigkeit denkbarer Störfälle

Prognosen zur Häufigkeit von Störfällen erfordern die Ermittlung der Häufigkeiten auslösender Ereignisse und der bedingten Wahrscheinlichkeiten für die Nichtverfügbarkeit von Schutzmaßnahmen.

Hierzu werden alle sicherheitsrelevanten Anlagenkomponenten aufwendig auf Fehlermöglichkeiten analysiert. Den identifizierten Fehlermöglichkeiten wurden Häufigkeiten oder bedingte Wahrscheinlichkeiten zugeordnet.

Wegen des Prototypcharakters der Anlage konnten kaum direkte Betriebserfahrungen genutzt werden. Daher wurden in der Regel generische Daten verwendet, in Einzelfällen auch Abschätzungen. Hieraus rühren vergleichsweise große Unsicherheiten.

Die für das Gesamtergebnis bedeutsamen Werte für das Bersten von Speicherbehältern wurden aus einer schadensstatistischen Auswertung des TÜV für allgemein gebräuchliche Druckbehälter abgeleitet. Für Leckagen an Leitungen ist das Versagen von Klemmringverschraubungen aufgrund falscher Montage maßgeblich. Die Zuverlässigkeitskenngrößen für Komponenten wie Ventile, Ventilatoren oder Meßeinrichtungen stammen im wesentlichen aus vorliegenden Datenerhebungen in der Reaktortechnik. Dies erscheint aufgrund vergleichbarer Einsatzbedingungen zulässig.

In den nachfolgenden Tabellen 2 und 3 sind die verwendeten Werte zusammengestellt.

Auslösende Ereignisse

Auslösende Ereignisse für komponenteninterne Störfälle mit Knallgasbildung sind beispielsweise ein Diaphragmabruch in einer Elektrolysezelle ($1.0 \times 10^{-5}/a$) oder das Versagen eines Druckminderventils vor der Brennstoffzelle ($3.4 \times 10^{-3}/a$). Nur nach einem Diaphragmabruch können problematische Mengen Knallgas entstehen, und dann auch nur, falls der Elektrolyseur ungewollt weiterbetrieben wird, falls zwei Möglichkeiten zur Gasanalyse versagen. Für den Gesamtlauf ergibt sich eine Häufigkeit von $1.0 \times 10^{-7}/a$.

Eine mögliche Sekundärfolge komponenteninterner Störfälle sind Wasserstoff-Freisetzungen in die Halle.

Das Ereignisablaufdiagramm (Abb. 4) für ein mittleres Wasserstoff-Leck innerhalb der Halle verdeutlicht den Einfluß von Sicherheitseinrichtungen auf die Differenzen zwischen der Häufigkeit des auslösenden Ereignisses und den Häufigkeiten von Endzuständen. Für zwei der Endzustände können lokal zündfähige Gemische nicht ausgeschlossen werden. Die zugehörigen Häufigkeiten sind mit $\leq 1.5 \times 10^{-8}/a$ extrem gering.

Beim Auftreten kleiner Lecks ist in keinem Fall die Bildung zündfähiger Gaskonzentrationen zu erwarten. Daher ist eine probabilistische Bewertung nicht erforderlich.

Große Wasserstoff-Leckagen werden ausgelöst durch das Versagen eines Druckminderers mit nachfolgendem Versagen nicht entsprechend ausgelegter Leitungen. Die Sicherheitseinrichtungen bewirken, daß nur in einem von 10.000 Fällen eine großvolumige zündfähige Gaswolke entsteht. Die errechnete Häufigkeit des gesamten Störfallablaufs liegt bei $5 \times 10^{-9}/a$.

Aufgrund der ungünstigen Volumenverhältnisse ergeben sich bei Wasserstofffreisetzungen innerhalb des Verbindungsganges der geringen Häufigkeit der auslösenden Ereignisse größere Häufigkeiten für das Auftreten zündfähiger Gemische. Bei kleinen und mittleren Lecks liegen entsprechende identifizierte Abläufe im Bereich zwischen $2 \times 10^{-7}/a$ und $1 \times 10^{-8}/a$. Bei den selteneren dieser Abläufe ist eine Detonation zu erwarten, ebenfalls mit etwa gleicher Häufigkeit bei großen Leckagen.

Zur Beherrschung von Störfällen mit Wasserstoff-Freisetzungen im Freien sind keine aktiven Maßnahmen vorgesehen. Verzweigungen in den Ereignisabläufen entstehen hier durch eventuelle Folgeausfälle beziehungsweise durch unterschiedliche Bedingungen für Ausmaß und Wirkung gezündeter Gasmischungen.

Die Auswertung aufgetretener Gasunfälle im Freien zeigt, daß praktisch immer ein deutlich geringerer als der theoretisch mögliche Energieumsatz stattfindet. Größe und Zusammensetzung der zündfähigen Gaswolken hängen von den Wetterbedingungen und natürlich vom Zündzeitpunkt ab.

Unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen wurden Ereignisablaufdiagramme entwickelt (Abb. 4). Auslösendes Ereignis ist das Bersten eines Speicherbehälters. Die einzelnen Verzweigungsabfragen sind:

- unmittelbare Explosion (Auswirkungen abhängig vom Energieumsatz),

Komponente, Ausfallart	Bedingte Wahrscheinlichkeit [10 ⁻² /Anforderung]
H ₂ -Meßkopf spricht nicht an	2,3
6 von 6 H ₂ -Meßköpfen sprechen nicht an	0,04
Druckwächter spricht nicht an	3,6
Durchflußmessung spricht nicht an	3,0
Pneumatisches Absperrventil schließt nicht	1,0
2 von 2 Absperrventilen schließen nicht	0,05
Sicherheitsventil öffnet nicht	0,27
Handventil schließt nicht	0,44
Handventil nicht oder nicht rechtzeitig geschlossen	17
Ventilator startet nicht	2,4
3 von 3 Ventilatoren starten nicht	0,03
Rückschlagventil: schließt nicht	0,35
innere Leckage	1,7
Fehlerhaft installierte Rohrverbindung	0,01
Druckminderventil; Druck schlägt durch	0,05

Tab. 2: Verwendete Zuverlässigkeitskenngrößen

Bezeichnung	Eintrittshäufigkeit [10 ⁻³ /Jahr]
Komponenteninterne H₂-Störfälle	
Inneres H ₂ -Leck im Elektrolyseur	0,01
Inneres Leck in der Brennstoffzelle	3,4
H₂-Leckagen in die Halle	
Kleines Leck	2,0
Mittleres Leck	1,0
Großes Leck	0,05
H₂-Leckagen in den Verbindungsgang	
Kleines Leck	0,05
Mittleres Leck	0,03
Großes Leck	0,02
H₂-Leckagen in die Umgebung	
Bersten eines Hochdruck-Speicherbehälters	0,063
Bersten des Niederdruck-Zwischenspeichers	0,0035
Großes Leck in Behälter-Anschlußleitung	3,0

Tab. 3: Liste der auslösenden Ereignisse

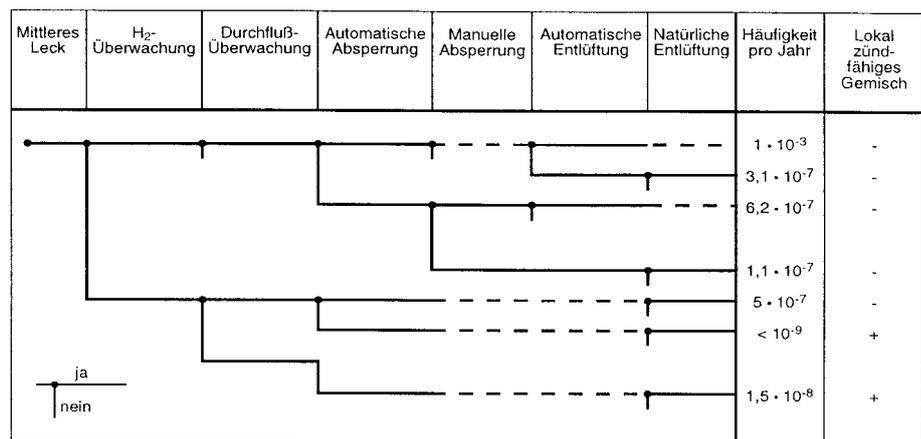


Abb. 4: Beispielhaftes Ereignisablaufdiagramm „Mittleres H₂-Leck innerhalb der Halle“

- Folgeschäden an Behältern der betroffenen Behälterbatterie,
- Folgeschäden an beiden Behälterbatterien,
- Vorliegen einer von drei Wetterlagen (Inversion, austauscharm, austauschintensiv),
- nachfolgende Explosion,
- Folgeschäden an einem benachbarten Gaslager.

Störfallabläufe mit ähnlicher Explosionsenergie wurden zu insgesamt vier Gruppen zusammengefaßt. Tab. 4 enthält die jeweils reagierende Wasserstoff-Menge und die Sum-

menhäufigkeit der zur Gruppe beitragenden Ereignisabläufe. Im Fall 1 übertrifft die gespeicherte Druckenergie die Explosionsenergie um 200%, in den Fällen 2 bis 4 ist sie vergleichsweise unbedeutend.

Störfallfolgen und Risiko

Störfallfolgen und Anlagenrisiko beziehen sich hier nicht auf Arbeitsunfälle, sondern auf die Schädigung unbeteiligter Dritter. Aufgrund der örtlichen Gegebenheiten zählt hierzu aber auch eine Zerstörung der auch andere Anlagen als PHOEBUS ent-

Ereignisgruppe		Reagierende H ₂ -Menge [kg]	Summenhäufigkeit [10 ⁻⁵ /a]
1	Bersten eines Behälters Energieumsatz 1%	0,2	2,3
2	Bersten eines Behälters mit bis zu 25% Energieumsatz	1,5 - 4,0	1,8
3	Bersten eines Behälters, schnelle Entleerung einer Behälterbatterie (9 Behälter) als Folge mit bis zu 25 % Energieumsatz	15 - 35	0,2
4	Bersten eines Behälters, schnelle Entleerung beider Batterien (18 Behälter) als Folge, Energieumsatz 25 %	65	0,001

Tab. 4: Ereignisgruppen mit Wasserstoff-Freisetzungen im Freien

Ereignisgruppe	Häufigkeit [10 ⁻⁵ /a]	Gebäudeschäden // Glasschäden schwer/gering	Radien [m]
1	2,3	+ +	- / 15 // 50
2	1,8	+ +	- / 35 // 100
3	0,2	+ +	20 / 50 // 200
4	0,001	+ +	40 / 60 // 300

Tab. 5: Folgen von Wasserstoff-Freisetzungen im Freien

haltenden Halle. Dies ist aufgrund von Wasserstoff-Leckstörfällen innerhalb der Halle prinzipiell möglich. Die Häufigkeit ist allerdings mit rund 5×10^{-9} /a extrem gering, selbst im Vergleich zu schweren Unfällen in Kernkraftwerken.

Analoge Störfälle im Verbindungsgang mit Beschädigungen der Halle sind mehr als zwei Größenordnungen häufiger. Die Störfallfolgen sind jedoch deutlich geringer.

Die Folgen von Wasserstoff-Störfällen im Freien lassen sich griffig durch Gebäudeschäden und, errechnet über TNT-Äquivalente, durch Entfernungen beschreiben (Tab. 5).

Das Individualrisiko drückt die Wahrscheinlichkeit pro Jahr aus, daß eine Person durch ein bestimmtes Ereignis zu Tode kommt. In der Analyse wurde unterstellt, daß auch geringe Gebäude- sowie Glasschäden Todesfälle verursachen können.

Das am PHOEBUS-Standort entstehende Individualrisiko liegt demnach im Bereich von 10^{-5} /a und ist mit einem zugehörigen Radius von etwa 200 m auf die engere Anlagenumgebung beschränkt.

Zusammenfassung und Ausblick

Die probabilistische Zuverlässigkeits- und Risikountersuchung der Photovoltaik-Wasserstoff-Brennstoffzellen-Demonstrationsanlage PHOEBUS Jülich informiert umfassend über die wichtigen Störfälle in derartigen Anlagen.

Für PHOEBUS ergibt sich ein hohes Sicherheitsniveau, das im wesentlichen auf passiv sicheren Bauteilen (Speicherbehälter, Rohrleitungen) und sehr zuverlässigen Sicherheitseinrichtungen (Gasüberwachung, Leckabspernung, aktive Lüftung) beruht. Das Gefährdungspotential der Anlage liegt in ungewollten Wasserstoff-Freisetzungen

mit eventuellen Explosionen, wobei geringe Freisetzungen schon durch natürliche Lüftungsvorgänge beherrscht werden.

Die Studie zeigt, daß Ereignisabläufe mit Wasserstoff-Freisetzung aus den im Freien stehenden Hochdruckspeichern mit anschließender Explosion des entstehenden Wasserstoff-Luftgemisches das insgesamt sehr geringe Umgebungsrisiko dominieren. Größere Beiträge liefern auch unbeherrschte Wasserstoff-Freisetzungen innerhalb der Anlagenhalle und in einem Verbindungsgang.

Bedienungsfehler können wegen der hohen Automatisierung der Anlage kaum auftreten und spielen auch dann eine untergeordnete Rolle. Prozeßfehler beschränken sich in ihren Auswirkungen auf den unmittelbaren Bereich der beteiligten Komponenten. Eine Ausweitung ist aufgrund der Schutzeinrichtungen sehr unwahrscheinlich.

Die Studie charakterisiert die untersuchten Störfälle durch ihre Eintrittshäufigkeit, durch die Menge des freigesetzten Wasserstoffs und die Folgen möglicher Explosionen (im wesentlichen Gebäudeschäden mit Gefährdung von Personen). Das so entstehende Individualrisiko liegt im Bereich von 10^{-5} /a und ist auf die engere Anlagenumgebung (Radius etwa 200 m) beschränkt. Zum Vergleich: Schwere Erdbeben mit weiträumiger Zerstörung der meisten Gebäude fallen für den Standort Jülich in einen ähnlichen Häufigkeitsbereich.

Das untypisch große Hallenvolumen der untersuchten Prototypanlage erwies sich für die Beherrschung kleiner Lecks als Vorteil. Die Aufteilung des Wasserstoffs auf viele kleine Speicherbehälter erhöht zwar die Leckhäufigkeit, reduziert aber die Häufigkeit schwerer Störfallfolgen.

Rechnet man die Ergebnisse fiktiv auf einen massiven Einsatz solcher photovoltaischer Inselsysteme hoch, wäre bei etwa 25.000 vergleichbaren Anlagen einmal pro Jahr mit einem „kleineren“ Wasserstoff-Störfall der Ereignisgruppen 1 oder 2 und einmal in 25 Jahren mit einem Störfall der Gruppe 3 zu rechnen. Die maximalen Gefährdungsbereiche lägen in einem Umkreis von etwa 100 bzw. 200 m. In den Außenzonen könnten im Einzelfall noch tödliche Verletzungen auftreten. Die Ergebnisse der Studie lassen sich wegen einiger Besonderheiten der analysierten Anlage wie Bauart, Größe und Lüftungskonzept der Halle, Leistung des Elektrolyseurs oder auch Speicherkonzept nicht direkt auf zukünftige photovoltaische Inselsysteme übertragen und hochrechnen.

Bei Wegfall einer geschlossenen Halle würden die untersuchten Wasserstoff-Störfälle innerhalb der Halle gegenstandslos. Hält man am Hallenkonzept fest, wären die Hallen wohl in Relation zu den Anlagen wesentlich kleiner. Auch bei kleineren Hallen besteht bei einem vergleichbaren Schutzkonzept nur eine sehr geringe Eintrittshäufigkeit für zünd- bzw. detonationsfähige Wasserstoff-Konzentrationen.

Insgesamt gesehen wird das Risiko von Solar-Wasserstoff-Anlagen aller Voraussicht nach vom Versagen eines Speicherbehälters und nicht von Störungen in aktiven Komponenten bestimmt werden.

Die Ergebnisse der PHOEBUS-Analyse beruhen zum Teil auf konservativen Annahmen. Forschungsbedarf besteht hinsichtlich der Zuverlässigkeit passiver Komponenten und der Modellierung von Gasaustauschvorgängen und Gasbränden sowohl in Gebäuden als auch im Freien. Dennoch zeigte sich, daß die für probabilistische Analysen typischen Erkenntnisse in Form von begründeten Häufigkeiten für denkbare Störfälle auch hier zu gewinnen sind. Die Ergebnisse wurden für eine interne Sicherheitsbewertung genutzt und ermöglichten eine Optimierung des Lüftungskonzeptes der Anlage.

Literatur

R. Bongartz et al.: Probabilistische Zuverlässigkeits- und Risikountersuchung der Photovoltaik-Wasserstoff-Brennstoffzellen-Demonstrationsanlage PHOEBUS Jülich, Berichte des Forschungszentrums Jülich; 3176 (1996)

Richard Bongartz, Wilfried Jahn, Josefine Marx und Johannes Mertens sind wissenschaftliche Mitarbeiter des Instituts für Sicherheitsforschung und Reaktorsicherheit am Forschungszentrum Jülich.