

*Institut für Sicherheitsforschung
und Reaktortechnik*

**Probabilistische Zuverlässigkeits- und
Risikountersuchung der Photovoltaik-
Wasserstoff-Brennstoffzellen-
Demonstrationsanlage PHOEBUS Jülich**

Richard Bongartz

Wilfried Jahn

Josefine Marx

Probabilistische Zuverlässigkeits- und Risikountersuchung der Photovoltaik- Wasserstoff-Brennstoffzellen- Demonstrationsanlage PHOEBUS Jülich

Richard Bongartz

Wilfried Jahn

Josefine Marx

Probabilistic Reliability and Risk Analysis of the Photovoltaic-Hydrogen-Fuel Cell-Demonstration-Facility

PHOEBUS Juelich

by

Richard Bongartz, Wilfried Jahn, Josefine Marx

Abstract

The probabilistic reliability and risk analysis of the Photovoltaic-Hydrogen-Fuel Cell-Demonstration-Facility PHOEBUS Juelich, provides comprehensive information on the essential accidents in such plants. The result for PHOEBUS is a high safety level which, in principle, is based upon passively safe components (storage tanks, pipes) and highly reliable safety measures (gas supervision, leak disconnection, active venting system). The hazardous potential of the facility is given by inadvertant hydrogen release with possible explosions, where small releases are controled already by the natural venting.

The study has shown that event sequences with hydrogen release from the high pressure storage tanks outside with subsequent explosion of the evolved hydrogen-air mixture dominate the environmental risk which is low in total though. Major contributions are also provided by uncontroled hydrogen releases within the experimental hall and an emergency corridor.

Operation errors are expected to be rare due to the high degree of automation of the plant and, even then, play an insignificant role. The consequences of processing errors are limited to the immediate area of the respective components. An extension is highly unlikely due to the protection measures.

The study characterizes the accidents investigated by their frequency of occurence, by the amount of hydrogen released, and by the consequences of possible explosions, basically site damages with jeopardization of people.

The individual risk arising by this facility is as low as $1,0 \cdot 10^{-5}/a$ and is restricted to its immediate neighborhood (radius approx. 200 m). Severe earthquakes accompanied by a large-range destruction of most buildings are lying for the site Juelich with $1,0 \cdot 10^{-5}/a$ in a comparable frequency range.

Probabilistische Zuverlässigkeits- und Risikountersuchung der Photovoltaik-Wasserstoff-Brennstoffzellen-Demonstrationsanlage PHOEBUS Jülich

von

Richard Bongartz, Wilfried Jahn, Josefine Marx

Kurzfassung

Die probabilistische Zuverlässigkeits- und Risikountersuchung der Photovoltaik-Wasserstoff-Brennstoffzellen-Demonstrationsanlage PHOEBUS Jülich informiert umfassend über die wesentlichen 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 H_2 -Freisetzungen mit eventuellen Explosionen, wobei geringe Freisetzungen schon durch die natürliche Lüftung beherrscht werden.

Die Studie zeigt, daß Ereignisabläufe mit H_2 -Freisetzung aus den Hochdruckspeichern im Freien mit anschließender Explosion des entstehenden H_2 -Luftgemisches das insgesamt sehr geringe Umgebungsrisiko dominieren. Größere Beiträge liefern auch unbeherrschte H_2 -Freisetzungen innerhalb der Anlagenhalle und eines Fluchtanges.

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 durch die Anlage entstehende Individualrisiko liegt lediglich bei etwa $1,0E-5/a$ und ist auf die engere Anlagenumgebung (Radius etwa 200 m) beschränkt. Schwere Erdbeben mit weiträumiger Zerstörung der meisten Gebäude fallen für den Standort Jülich mit $1,0E-5/a$ in einen ähnlichen Häufigkeitsbereich.

Probabilistische Zuverlässigkeits- und Risikountersuchung der Photovoltaik- Wasserstoff-Brennstoffzellen-Demonstrationsanlage PHOEBUS Jülich

R. Bongartz

J. Marx

W. Jahn

0. Einleitung und Zielsetzung	5
1. Auslegung und Beschreibung der PHOEBUS-Anlage	7
1.1 Beschreibung der Anlage	7
1.1.1 Solar-Felder	7
1.1.2 Gleichstrom-Steller	7
1.1.3 Pb-Akkumulator	9
1.1.4 Elektrolyseur	9
1.1.5 Brennstoffzelle	10
1.2 Regelung und Betriebsmanagement	12
1.3 Betriebsführung der Anlage und der Komponenten	12
1.4 Auslegung der Anlage	12
1.5 Sicherheitskonzept	15
2. Das Solar-Wasserstoff-Projekt in Neunburg vorm Wald als Vergleichsanlage	20
2.1 Hintergrund und Beschreibung der Anlage	20
2.2 Inbetriebsetzung und erste Betriebserfahrungen des alkalischen Niederdruckelektrolyseurs	22
2.3 Betriebsmitteleinrichtungen, Hilfs-, Neben- und Versorgungssysteme	23
2.4 Erste Bewertungen und Empfehlungen	24
2.5 Ausblick auf Phase 2	24
3. Allgemeines zur Wasserstoffwirtschaft	25
3.1 Allgemeines zu Wasserstoff	25
3.2 Allgemeines zur Chemie-Wasserstoffwirtschaft	25
3.3 Allgemeines zur Energie-Wasserstoffwirtschaft	26
3.4 Stoffliche Eigenschaften von Wasserstoff	27
3.4.1 Physikalische Eigenschaften von gasförmigen Wasserstoff	27
3.4.2 Chemische Eigenschaften	27
3.5 Energiepolitische Rahmenbedingungen des Wasserstoffeinsatzes	31
3.6 Wasserstoffgestehungskosten	32
3.7 Höhe des Wasserstoffbedarfs	35
4. Risikopotentiale von Wasserstoff	36
4.1 Allgemeine Betriebserfahrungen	36
4.2 Betriebserfahrungen und Risiken der Elektrolyse	39
4.2.1 Bekannte Schadensfälle	40
4.2.1.1 Beschreibung des Störfalles in Ilford	41
4.2.1.2 Ursache des Störfalles	46
4.2.1.3 Übertragbarkeit des Störfalles	48

4.3 Betriebserfahrungen und Risiken der Wasserstoff-Speicherung	50
4.3.1 Beschreibung des 'Hanauer'-Wasserstoffspeichers	50
4.3.2 Schadensursachen	51
4.3.3 Übertragbarkeit des Störfalls	52
4.3.3.1 Beschreibung der PHOEBUS-Gasspeicher	52
4.3.3.2 Wiederkehrende Prüfungen	55
4.3.3.3 Übertragbarkeit des Hanauer-Druckbehälterversagens	55
5. Probabilistische Analysen	57
5.1 Methodik der probabilistischen Analysen	57
5.2 Störfallauslösende Ereignisse	62
5.3 Wasserstoff-Störfälle innerhalb der Komponenten	66
5.3.1 Beschreibung des Elektrolyseurs	67
5.3.2 Störfälle im Elektrolyseur	74
5.3.2.1 Bruch eines Diaphragmas und fälschlicher Weiterlauf des Elektrolyseurs	74
5.3.2.2 Vermischung von H ₂ und O ₂ infolge von Störungen des Druckgleichgewichtes	78
5.3.2.3 Unzulässige Prozeßparameteränderung am Elektrolyseur	81
5.3.2.4 Vermischung der Produktgase durch Diffusion	82
5.3.2.5 Knallgasbildung im Elektrolyseur	83
5.3.2.6 Störfallbewertung	84
5.3.3 Beschreibung der Brennstoffzelle	85
5.3.4 Störfallbedingte Leckagen an der Brennstoffzelle	88
5.3.4.1 Unzulässige Temperaturerhöhung an der Brennstoffzelle	89
5.3.4.2 Unzulässige Druckerhöhung in der Brennstoffzelle	96
5.3.4.3 Fertigungsbedingte Leckagen an der Brennstoffzelle	98
5.3.4.4 Störfallbewertung	99
5.4 Wasserstoff-Störfälle innerhalb der IEV-Halle	101
5.4.1 Kleine Wasserstoffflecks	104
5.4.1.1 Beherrschung kleiner Wasserstoffflecks	104
5.4.1.2 Hallenluftwechsel	105
5.4.1.3 Wasserstoffkonzentration der Halle	106
5.4.1.4 Störfallbewertung	106
5.4.2 Mittlere Wasserstoffflecks	107
5.4.2.1 Abschätzung der Leckhäufigkeit	107
5.4.2.2 Bewertung der Hallen-Gasüberwachung	108
5.4.2.3 Bewertung der Durchflußüberwachung	114
5.4.2.4 Bewertung der Gasabsperrung	115
5.4.2.5 Bewertung der Hallen-Zwangsentlüftung	121
5.4.2.6 Bewertung der natürlichen Hallenentlüftung	124
5.4.2.7 Störfallbewertung	125
5.4.3 Große Wasserstoffflecks	128
5.4.3.1 Abschätzung der Leckhäufigkeit	128
5.4.3.2 Bewertung der Hallen-Gasüberwachung	129
5.4.3.3 Bewertung der Durchflußüberwachung	130
5.4.3.4 Bewertung der Drucküberwachung	130
5.4.3.5 Bewertung der Überdrucksicherung	131
5.4.3.6 Bewertung der Gasabsperrung	132
5.4.3.7 Bewertung der Hallen-Zwangsentlüftung	136
5.4.3.8 Bewertung der natürlichen Hallenentlüftung	136
5.4.3.9 Störfallbewertung	136

5.4.4	Wasserstoff- und Sauerstofflecks	143
5.5	Wasserstoff-Störfälle im Fluchtgang der Halle	144
5.5.1	Kleine Wasserstofflecks im Fluchtgang	144
5.5.1.1	Abschätzung der Leckhäufigkeit	144
5.5.1.2	Bewertung der Fluchtgang-Gasüberwachung	145
5.5.1.3	Bewertung der Gasabspernung	145
5.5.1.4	Bewertung der Fluchtgang-Entlüftung	147
5.5.1.5	Störfallbewertung	148
5.5.2	Mittlere Wasserstofflecks im Fluchtgang	151
5.5.2.1	Abschätzung der Leckhäufigkeit	151
5.5.2.2	Bewertung der Gasabspernung	151
5.5.2.3	Bewertung der Fluchtgang-Entlüftung	152
5.5.2.4	Störfallbewertung	154
5.5.3	Große Wasserstofflecks im Fluchtgang	156
5.5.3.1	Abschätzung der Leckhäufigkeit	156
5.5.3.2	Bewertung der Gasabspernung	156
5.5.3.3	Bewertung der Fluchtgang-Entlüftung	157
5.5.3.4	Störfallbewertung	159
5.6	Wasserstoff-Störfälle außerhalb der IEV-Halle	161
5.6.1	Bersten eines Wasserstoff-Speicherbehälters	161
5.6.1.1	Schätzung der Häufigkeit	161
5.6.1.3	Mögliche Auswirken des Behälterzerknalls	167
5.6.1.4	Ereignisablaufanalysen	176
5.6.1.5	Störfallbewertung	184
5.6.2	Bersten des Wasserstoff-Zwischenspeichers	191
5.6.3	Behälterlecks, Versagen von Anschlußleitungen und Überdrucksicherungen	192
5.6.4	Verdichter-Leckage	196
5.6.5	EVA-Ereignisse	197
6.	Abschätzungen und Rechnungen zu Wasserstoffleckagen in der Halle und im Freien	200
6.1	Einleitung	200
6.2	Wasserstoff-Freisetzen innerhalb der IEV-Halle	201
6.2.1	Randbedingungen, Annahmen	201
6.2.2	Berechnung der Leckageraten	201
6.2.2.1	Kleines Leck	202
6.2.2.2	Mittleres Leck	202
6.2.2.3	Großes Leck	203
6.2.3	Handabschätzungen der Wasserstoffkonzentration bei homogener Verteilung in der Halle	205
6.2.4	Abschätzung der Wasserstoffkonzentration mit Hilfe des Codes RALOC	206
6.2.4.1	Randbedingungen, Annahmen	206
6.2.4.2	Kleines Leck	208
6.2.4.3	Mittleres Leck	209
6.2.4.4	Großes Leck	212
6.2.5	Wasserstoffdeflagration in der Halle	214
6.2.6	Zusammenfassung	216
6.3	Wasserstoff-Freisetzen im Fluchtgang	222
6.3.1	Leckagen in der Leitung Elektrolyseur - Zwischenspeicher	223
6.3.1.1	Kleines Leck	223
6.3.1.2	Mittleres Leck	224
6.3.1.3	Großes Leck	224
6.3.2	Leckagen in der Leitung Hochdruckspeicher - Brennstoffzelle	225
6.3.2.1	Kleines Leck	226

6.3.2.2 Mittleres Leck	227
6.3.3 Zusammenfassung	228
6.4 Wasserstoff-Freisetzungen im Freien	231
6.4.1 Leckraten	231
6.4.2 Explosion im Freien	233
7. Ergebniszusammenfassung und -bewertung	238
Literatur	255

0. Einleitung und Zielsetzung

Das Forschungszentrum Jülich (KFA) ist im Rahmen der F+E-Arbeiten seines Instituts für Energieverfahrenstechnik (IEV) an der Erprobung einer Anlage zur solar-elektrischen Inselversorgung in praxisorientierter Größenordnung beteiligt. Hierzu sollen unter realen Betriebsbedingungen die Herstellung von Wasserstoff durch Solarstrom-Wasserelektrolyse, seine Zwischenspeicherung und die anschließende Umwandlung in Strom mittels einer Brennstoffzelle demonstriert werden. Die Anlage soll teilweise die Energieversorgung der KFA-Zentralbibliothek - autark vom öffentlichen Netz - übernehmen. Seit Herbst 1993 befinden sich wesentliche Systemschritte (Solarstrom-Wasserelektrolyse) in der Erprobungsphase. Die Einweihung erfolgte im Herbst 1994.

Das KFA-Institut für Sicherheitsforschung und Reaktortechnik (ISR) unterstützt das Projekt durch eine begleitende Zuverlässigkeits- und Risikoanalyse. Die Methodik probabilistischer Sicherheits- und Risikoanalysen (PSA/PRA) wird seit fast zwanzig Jahren erfolgreich angewendet, bisher in großem Umfang vor allem in der Kerntechnik. Der Nutzen dieser Methodik zur Schwachstellenanalyse, zur Systemoptimierung und zur Überprüfung von Sicherheitskonzepten ist allgemein anerkannt.

Das ISR hat Erfahrungen mit PSA/PRA und entwickelt entsprechende Methoden weiter.

Die Anlage PHOEBUS (Photovoltaik, Elektrolyse, Brennstoffzelle und Systemtechnik) eignet sich gut, diese Methodik im Hinblick auf die künftige Bewertung technischer Risiken nichtnuklearer Anlagen beispielhaft anzuwenden. Hierfür sprechen folgende Gesichtspunkte:

- gute organisatorische Voraussetzungen für planungs- und betriebsbegleitende Analysen (Nähe zum Objekt)
- enge Verbindung zu bereits laufenden Arbeiten im ISR bezüglich Sicherheitsaspekten bei Wasserstoff als interessantem Energieträger

Die Analysen des ISR dienen

- der Identifizierung von Gefährdungspotentialen,
- der Identifizierung störfallauslösender Ereignisse,
- der Ermittlung des Bedarfs an spezifischen Zuverlässigkeitsdaten,
- der Abschätzung von Häufigkeiten für risikorelevante Ereignisabläufe,
- der Unterstützung und Ergänzung der F+E-Arbeiten des Projekts, insbesondere hinsichtlich Nutzung von Betriebserfahrungen und Entwicklung von Konzepten zur Störfallbeherrschung mit Schlußfolgerungen für künftige Anlagen.

Störfälle, deren Folgen auf den unmittelbaren Arbeitsplatz beschränkt bleiben, sind nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Die PHOEBUS-Anlage weist einige Besonderheiten auf, die eine Anpassung der Ergebnisse für weitere Anlagen dieser Art erfordern. Da vorhandene Einrichtungen soweit möglich genutzt werden sollten, gibt es in folgenden Bereichen Abweichungen von zukünftigen oder bereits bestehenden Anlagen wie der in Neunburg vorm Wald:

- Untypisch große Halle.
- Keine explosionsgeschützten Abluftventilatoren.
- Speicherung des Wasserstoffs in mehreren 'kleinen' Behältern.

Die Analyse ist auch vor dem Hintergrund der in /Enquete/ skizzierten Strategien für eine zukünftige solare Wasserstoffwirtschaft zu sehen. Erst wenn die Anteile fluktuierender, erneuerbarer Energiequellen am gesamten Endenergieverbrauch der Bundesrepublik Deutschland deutlich über 20 % steigen, wird der Wasserstoff auch als Speichermedium benötigt.

1. Auslegung und Beschreibung der PHOEBUS-Anlage

1.1 Beschreibung der Anlage

Die Photovoltaik-Wasserstoff-Brennstoffzellen-Demonstrationsanlage (PHOEBUS) besteht aus den Solar-Feldern, den Gleichstromstellern, dem Elektrolyseur, einem Sauerstoff- und mehreren Wasserstoffspeichern, der Brennstoffzelle, dem Kurzzeitspeicher (Batterie) und dem Wechselrichter. Gleichstromsteller und Wechselrichter verbinden Solarfelder, Elektrolyseur, Brennstoffzelle und den elektrischen Endverbraucher miteinander, um die unterschiedlichen Arbeitspunkte dieser Komponenten aufeinander abzustimmen (Abb. 1.1-1) /Barthels/.

1.1.1 Solar-Felder

Die projektierten Solar-Felder sind monokristaline Module mit einer Gesamtfläche von 384 m^2 , die in 4 unterschiedlichen Ausrichtungen an der KFA-Zentralbibliothek angebracht werden. Die nominelle Peakleistung beträgt 43 kW, die jährliche solare Einstrahlung im Mittel 253 kWh. Es kommen erstmals PV-Großmodule von ca. 2 m^2 mit 150 Solarzellen zum Einsatz. Abhängig von der Einstrahlung und der Modultemperatur kann die Solarfeld-Spannung in jedem Feld unterschiedlich zwischen 260 bis 400 V schwanken.

1.1.2 Gleichstrom-Steller

Die vier Solarfelder liefern ihren Gleichstrom mit unterschiedlicher Leistung über unabhängig voneinander arbeitende Gleichstrom-Steller (DC/DC-Wandler) auf die Gleichstromschiene, deren Spannung vom aufgeschalteten Pb-Akkumulator geprägt wird. Regelung, Überwachung, MPP-Tracking (Einstellung der maximal möglichen Solarzellenleistung), Meßwerterfassung, Displayansteuerung, automatische Zu- und Abschaltung erfolgen weitestgehend autonom durch die einzelnen Komponenten der Anlage, denen jedoch für Aufgaben des Energie-Managements ein Leitrechner übergeordnet ist.

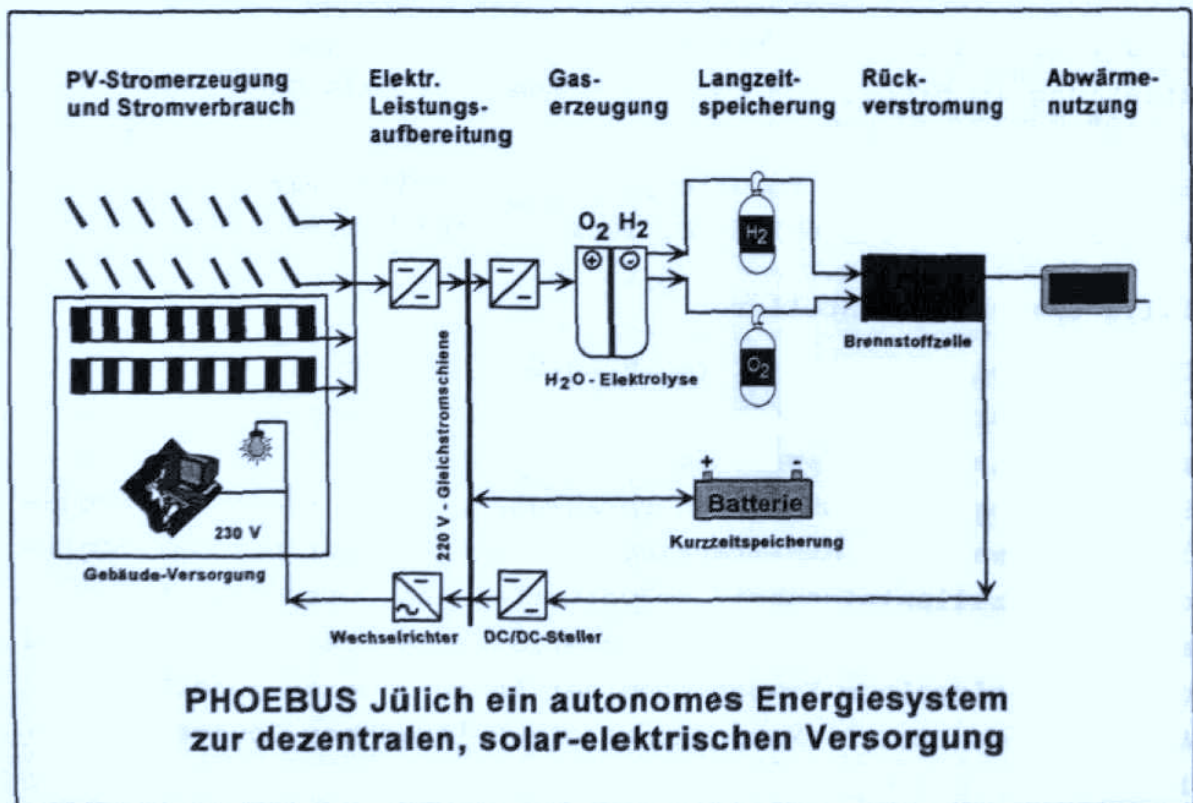
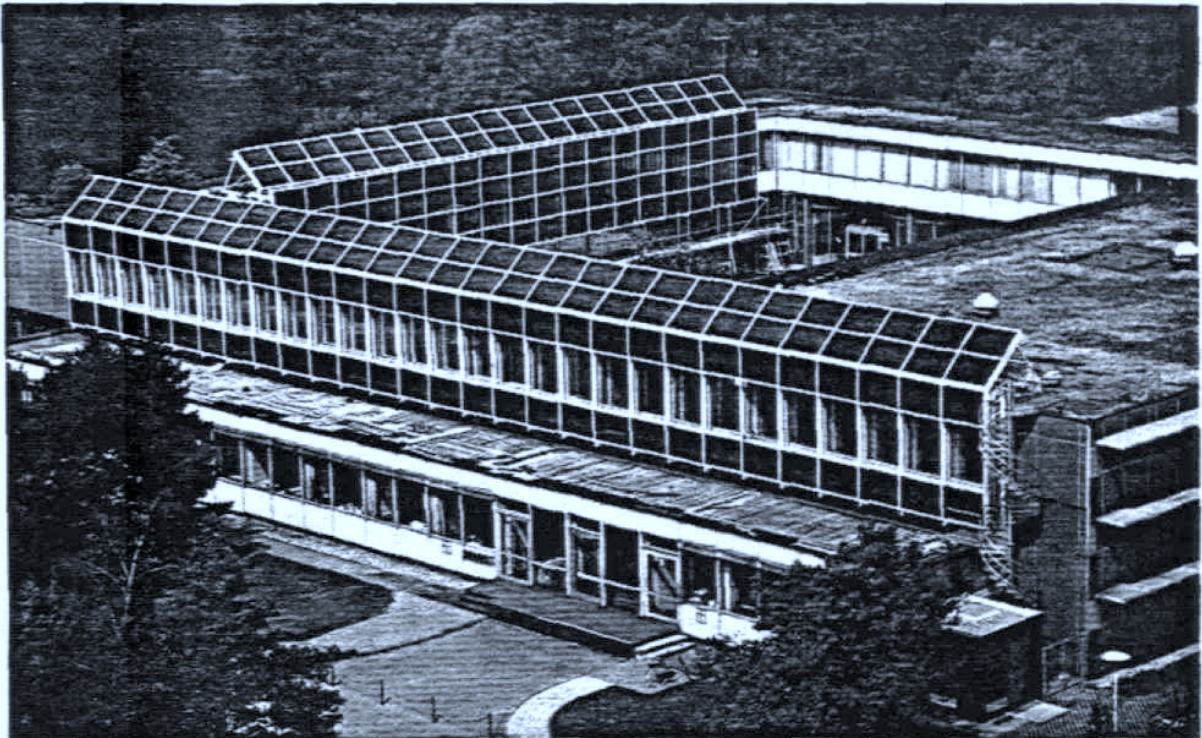


Abb. 1.1-1: Ansicht der KFA-Zentralbibliothek mit Solar-Feldern und Schema der Photovoltaik-Wasserstoff-Brennstoffzellen-Demonstrationsanlage

1.1.3 Pb-Akkumulator

Der Pb-Akkumulator ist als Kurzzeitspeicher für eine Dreitageautonomie mit einer Kapazität von 300 kWh bzw. mit einer 10 h Nennkapazität K_{10} von 1380 Ah konzipiert. Je nach Ladezustand des Akkus schwankt die Spannung der Gleichstromschiene zwischen 200 V (Entladespannung) und 260 V (Gasungsspannung).

Akku-Strom und -Spannung sowie die Elektrolyttemperatur werden gemessen und von der Regelung und der Betriebsführung verarbeitet. Zum Schutz der Batterie wird bei Überschreiten der maximalen Batteriespannung der Ladevorgang abgebrochen (z.B. der Photovoltaik-Ausgangsstrom abgeregelt). Bei Unterschreitung einer minimalen Batteriespannung bzw. einer minimalen Restkapazität wird das Defizit von der Brennstoffzelle ausgeglichen.

1.1.4 Elektrolyseur

Die Wasserzersetzung erfolgt mittels fortgeschrittener alkalischer Wasserelektrolyse. Der Elektrolyseur besteht aus 21 Zellen mit einer effektiven Fläche von je 2500 cm² und arbeitet aus Gründen der Korrosionsbeständigkeit der metallischen Baumaterialien mit einem 30 % KOH-Elektrolyt, das bei 80°C im Naturumlauf umgewälzt wird. Der Kaligehalt muß überwacht und geregelt werden.

Die Einzelzellen sind elektrisch und geometrisch (in Filterpressenanordnung) hintereinandergeschaltet, so daß jede metallische Trennwand, die eine Zelle von der nächsten trennt, bipolar arbeitet, d.h. auf der einen Seite eine Kathode und auf der anderen Seite eine Anode trägt. Zur Verhinderung der wechselseitigen Vermischung der Produktgase Wasserstoff und Sauerstoff wird der Kathoden- und Anodenraum durch ein ionendurchlässiges Diaphragma getrennt.

Die Produktgas/Elektrolyt-Emulsionen werden in Gaskanälen gesammelt und jeweils einem Separator zugeführt, in denen sie sich nach entsprechender Verweilzeit (≈ 1 min.) trennen können.

Die Separatoren sind mit Wasserkühlern ausgerüstet und dienen gleichzeitig als Wärmetauscher zur Abfuhr überschüssiger dissi-

pierter Stromwärme. Den Separatoren sind Filter zur Gastrocknung nachgeschaltet.

1.1.5 Brennstoffzelle

Die zur Rückverstromung erforderliche elektrochemische Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff erfolgt in einer alkalischen Brennstoffbatterie der Fa. Siemens. Dieser Energiewandler ist aus 60 Brennstoffzellen (aktive Fläche pro Zelle ca. 340 cm^2), einem Spaltverdampfer, der Steuerelektronik, sowie mechanischen und elektromechanischen Steuerungskomponenten aufgebaut. Der Spaltverdampfer sorgt für die Ausschleusung des Produktwassers und der Reaktionswärme.

Die Nennleistung beträgt 6,5 kW bei 48 V und 135 A.

Die Stromversorgung der Steuerelektronik erfolgt aus der Brennstoffzellen-Batterie. Für die Einschaltung ist eine externe Energiequelle (24 V, 30 W) für ca. 5 sec. erforderlich.

Bei Überschreiten folgender Grenzwerte erfolgt unmittelbar oder verzögert die Abschaltung des Brennstoffzellen-Modul:

- max. zulässige Elektrolytttemperatur am Batterieaustritt (verzögerungsfrei)
- max. zulässiges Elektrolytvolumen (verzögert)
- untere zulässige Batteriespannung (verzögert bzw. verzögerungsfrei)
- untere zulässige Spannung der H_2 -Spülzelle (verzögert)
- untere zulässige Spannung der O_2 -Spülzelle (verzögert).

Die Störungen werden einzeln, die Abschaltung des BZ-Modul durch ein Sammelsignal gemeldet.

Bei Störung der Kühlwasserversorgung schaltet das BZ-Modul erst nach Ansprechen der internen Temperaturüberwachung ab.

Die Abb. 1.1.5-2 zeigt in der linken Bildmitte die Brennstoffzelle. Vorne rechts befindet sich der Elektrolyseur, im Hintergrund rechts die Bleibatterien.

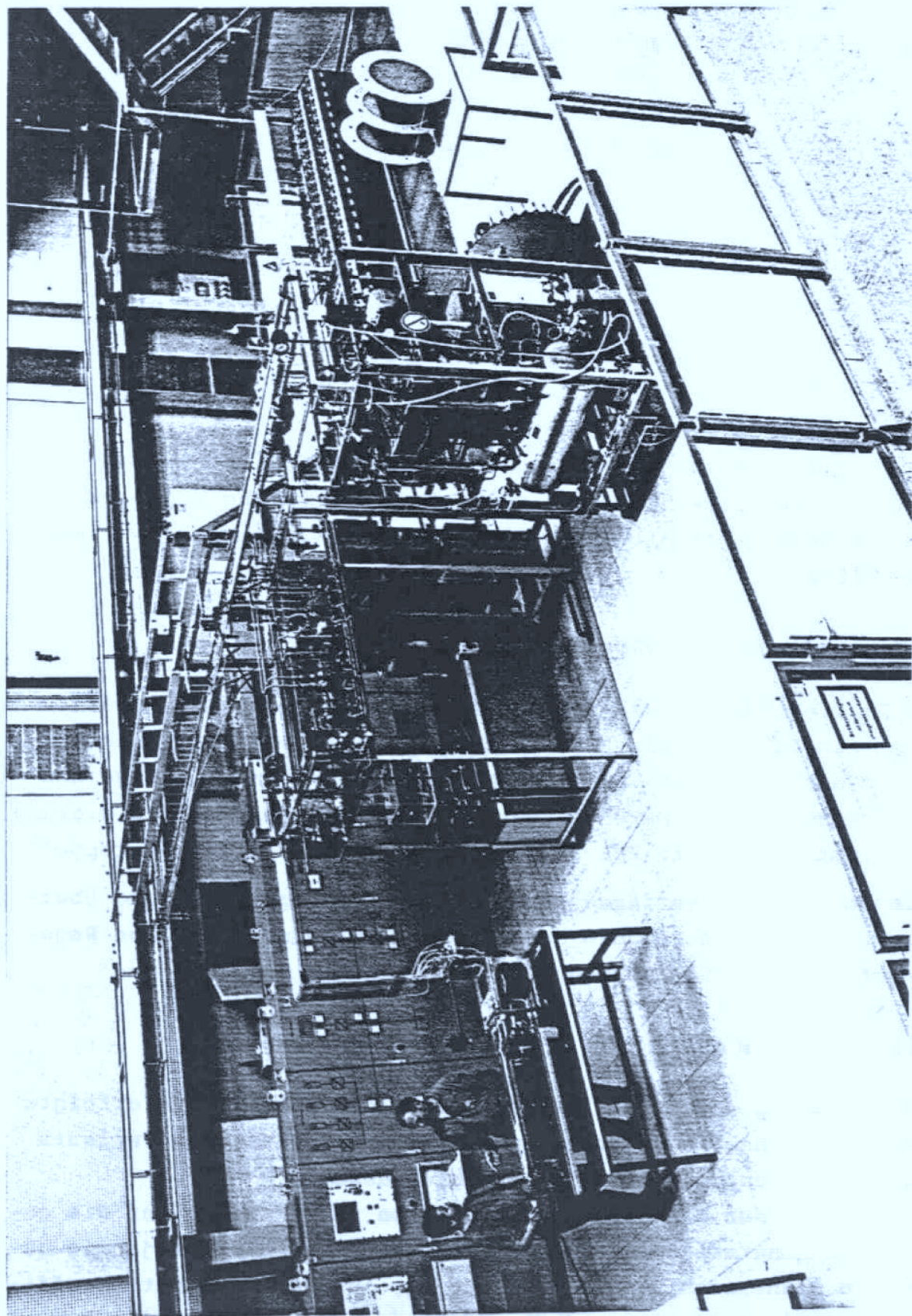


Abb. 1.1.5-2: Aufstellungsbühne der Anlage (links: Brennstoffzelle, vorne rechts: Elektrolyseur)

1.2 Regelung und Betriebsmanagement

Computergestützte Regelungseinrichtungen steuern den komplexen Anlagenbetrieb. Sie sind hierarchisch gegliedert und bestehen im wesentlichen aus den internen Leistungsregelkreisen in den Stromrichtern und dem übergeordneten Energiemanagement. Die Leistungsflüsse können sich daher nicht gegenseitig beeinflussen.

Die wichtigsten Zielvorgaben sind die Sicherstellung der ganzjährigen Verbraucherversorgung und eine schonende Betriebsweise der Bleibatterie. Die Batterie dient als Leistungspuffer. Sie verarbeitet alle schnellen Leistungsänderungen, auf die die Regelung nicht zu reagieren vermag. Die Entladungstiefe (50 %) und die Ladungsgrenze sind festgelegt.

Zur Ausgrenzung von Gefahrenzuständen und Effizienzgrenzen wird für den Elektrolyseur eine Mindesteingangsleistung von 4 kW und für die Brennstoffzelle eine Mindestausgangsleistung von 1 kW eingehalten.

1.3 Betriebsführung der Anlage und der Komponenten

Die Betriebsführung und Meßwertverarbeitung übernehmen zwei PC's. Ein PC dient als Leitrechner, der mit den Elektronik-Einheiten der einzelnen Komponenten kommuniziert und wichtige Meßwerte verarbeitet. Deren Auswertung und die Prozeßvisualisierung übernimmt der zweite PC. Beide sind über ein Netzwerk gekoppelt.

Alle Komponenten verfügen über eine eigene Regelungs- und Überwachungsbaugruppe, so daß der Leitrechner keine schnellen Regelungsfunktionen übernehmen muß.

1.4 Auslegung der Anlage

Die Auslegung der Anlage und der einzelnen Komponenten erfolgte über die rechnerische Bestimmung des jahreszeitlichen Verlaufs der solaren und elektrischen Energieflüsse.

Die Modelle der Einstrahlungssimulation nehmen Bezug auf die gemessenen Monatswerte der Globalstrahlung, auf die langjährig gemessene Sonnenscheindauer und Trübung, auf den Temperaturkoeffizienten, die Reflexion und die Beschattung der Solarzellen.

Die Modelle des Energiemanagements in der Anlage nehmen Bezug auf die gemessene Tageslaststruktur der KFA-Zentralbibliothek, auf die lastabhängigen Wirkungsgrade und auf die An- und Abfahrdynamik der Systemkomponenten.

Die Abb. 1.4-1 zeigt die Energieflußverteilung. Mit den projizierten 384 m^2 Photovoltaikflächen (effektive Solarzellenfläche 312 m^2) in den Fassaden der KFA-Zentralbibliothek ist eine jährliche Solarenergieeinstrahlung von 253 MWh zu erzielen. Durch den Wirkungsgrad der Solarzellen von etwa 13 % erhält man eine elektrische Energie von ca. 32 MWh pro Jahr im Eingang der Solaranlage und durch Verluste in den einzelnen Komponenten eine elektrische Energie von ca. 20 MWh pro Jahr am Verbraucher.

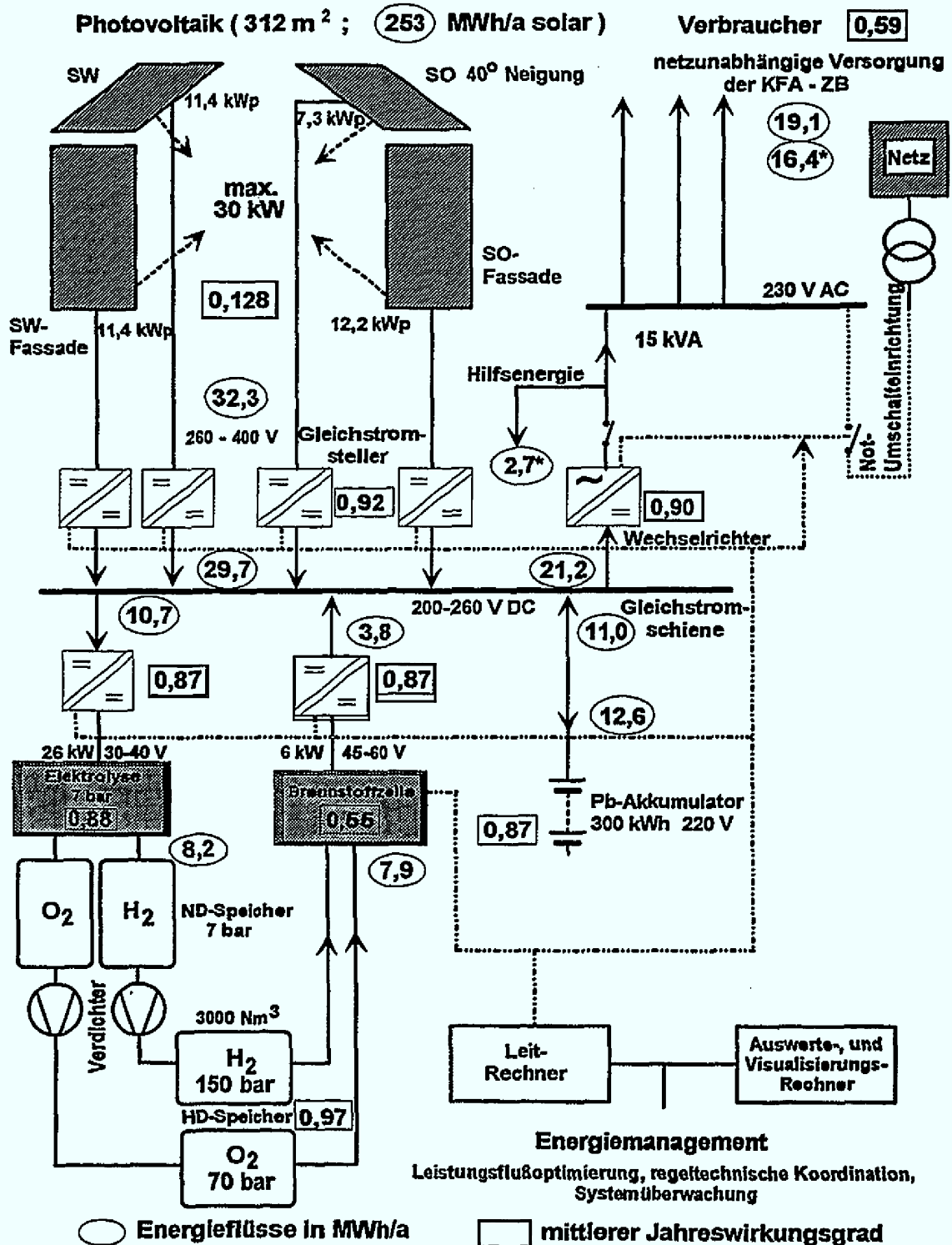


Abb. 1.4-1: Systemtechnische Konfiguration der Photovoltaik-Wasserstoff-Brennstoffzellen Anlage

1.5 Sicherheitskonzept

Das Sicherheitskonzept der PHOEBUS-Anlage ist vornehmlich auf die Beherrschung störfallbedingter H_2 -Freisetzungen in der IEV-Halle ausgerichtet /Sicherh/. Dazu sind über jeder H_2 -führenden Anlagenkomponente (Elektrolyseur mit Gasaufbereitung, Brennstoffzelle mit Versorgung, Bleibatterie) in 1 m Abstand zwei Wasserstoff-Meßköpfe (Ex-Melder) angebracht (Abb. 1.5-1). Zwei weitere Meßköpfe befinden sich an der Hallendecke über dem Aufstellungsbereich der Anlagenkomponenten. Diese 8 Meßköpfe sind an ein Gaswarnsystem angeschlossen. Bei Überschreiten einer H_2 -Konzentration von 10 % des unteren Explosionsgrenzwertes (UEG) von 4 Vol.% Wasserstoff in Luft an einem Meßkopf löst das Gaswarnsystem einen optischen und akustischen Voralarm aus, der ein frühzeitiges Eingreifen des Bedienpersonals, etwa eine Notabschaltung, erlaubt.

Ein Überschreiten des zweiten Grenzwertes (20 % der unteren Explosionsgrenze) an einem der Meßköpfe führt über das Gaswarnsystem und den Leitrechner (SMA) zur automatischen Abschaltung der Gas- und Energieversorgung der betroffenen Komponente und zum Start von drei Abluftventilatoren in Luftschächten der Hallendecke (Abb. 1.5-2) zur Erzielung eines 5-fachen Luftwechsels je Stunde. Außerdem erhält die Sicherheitszentrale der KFA eine Alarm-Meldung. Zusätzlich werden die Gasleitungen (H_2 und O_2) zwischen den Speicherbehältern (Freigelände) und der Brennstoffzelle (Halle) automatisch durch außerhalb der Halle befindliche Ventile redundant abgesperrt; bei der H_2 -Leitung durch V-103.1 und 2 sowie V-111 (Abb. 1.5-3). Die Ventile werden pneumatisch angesteuert und sind im nicht angesteuerten Zustand federkraft schließend ('fail-safe'-Prinzip bei Energieausfall).

In der folgenden Tab. 1.5-1 sind die einzelnen Schutzanregungen und -aktionen in einem Übersichtsschema dargestellt.

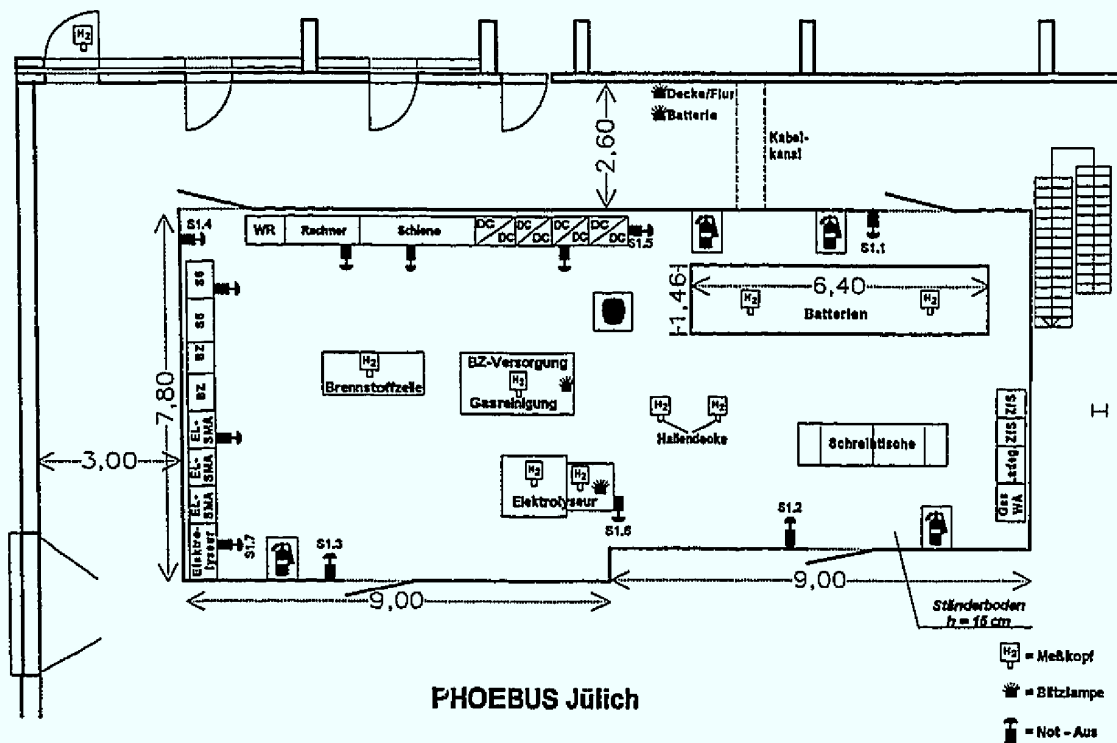


Abb. 1.5-1: Aufstellungsplan der Demonstrationsanlage in der großen Halle des IEV (Anlagenbühne)

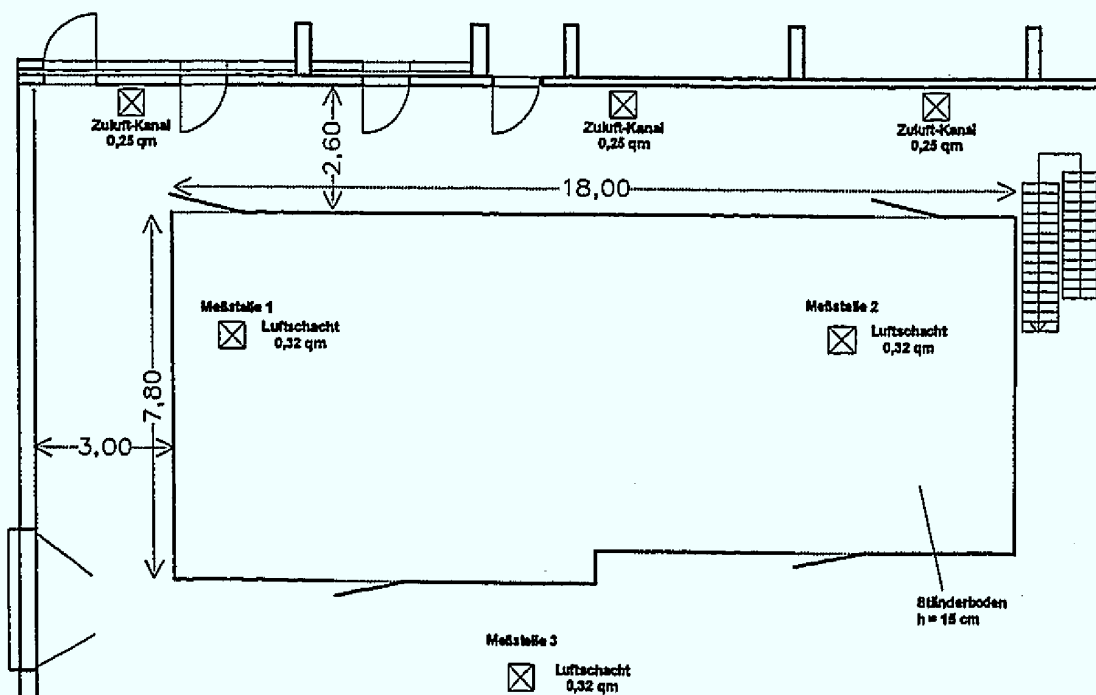


Abb. 1.5-2: Lüftungskonzept der großen Halle des IEV im Bereich der Demonstrationsanlage (Boden/Decke)

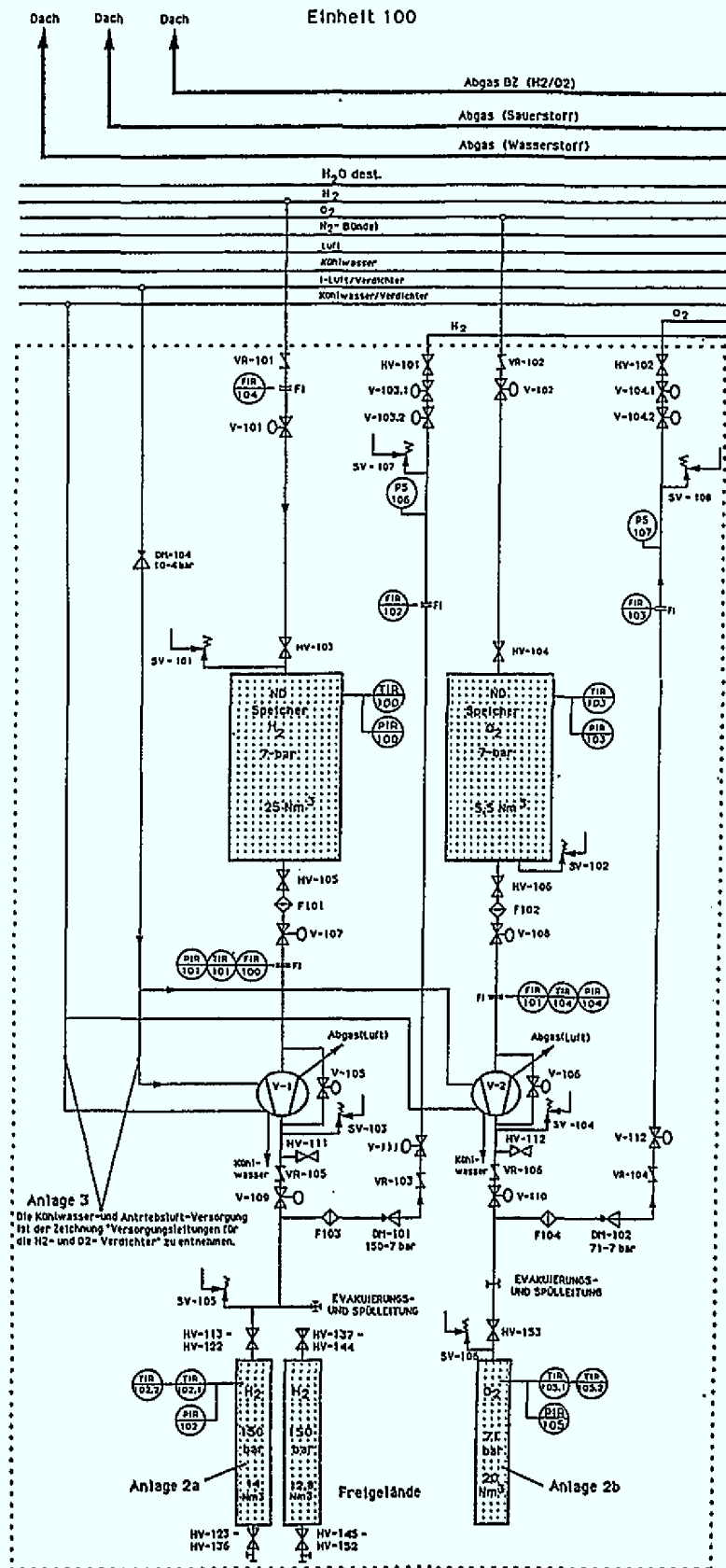


Abb. 1.5-3: Gasspeicheranlage (Freigelände)

ANREGUNG:	H ₂ -/O ₂ - Leitung zu	AUTOMATISCHE SCHUTZAKTIONEN			Alarm an KFA-Sich.- zentrale
		Start Decken- lüfter	Kompon.-Abschaltung E-Versor. aus	Lastab- wurf	
lv2 Ex-Melder Elektrolyseur	X	X	x ¹⁾		X
lv2 Ex-Melder Br.stoffzelle	X	X		x ²⁾	X
lv2 Ex-Melder Hallendecke	X	X			X
lv2 Ex-Melder Batterie		X	x ³⁾		
lv1 Ex-Melder Fluchtgang	X				X
lv13 Notaus von Hand ⁴⁾		x ¹⁾	x ²⁾		
Durchsatz H ₂ -/O ₂ -Leit. >10 Nm ³ /h	X				
Druck H ₂ -/O ₂ -Leit. > 8 bar	X				

Anmerkungen:

- 1) Energieversorgung des Elektrolyseurs wird über DC/DC-Steller abgeschaltet (SMA-EL/TSS-Störung / Notaus). Mittels Back-up Batterie wird der Elektrolyseur über seine interne Steuerung in den sicheren Zustand gefahren. Dabei werden der Elektrolyseur und seine Peripherie-Komponenten (Leitungen und Behälter) über die Abblaseleitung drucklos gefahren und mit N₂ inertisiert.
- 2) Lastabschaltung der Brennstoffzelle über DC/DC-Steller (SMA-BZ1/HSS1-Störung / Notaus). Fahren der BZ über Betriebssteuerung S5 in den sicheren Zustand
- 3) Unterbrechung der Energieversorgung (Ladebetrieb der Batterie) über Leitreechner (SMA-Steuerung). Abschaltung der Elektrolyt-Umwälzung.
- 4) Bei der Betätigung 'Notaus' erfolgt die Freischaltung aller spannungsführender Komponenten (U>60 V) und das Fahren der Komponenten in den sicheren Zustand. Die Versorgung des Leitsystems (SMA) bleibt bestehen.

Tab. 1.5-1: Störfall-Schutzkonzept

Neben der beschriebenen Sicherheitseinrichtung "Gaswarnanlage" besteht ein zweites, davon unabhängig arbeitendes System. Sowohl in der Zuleitung vom Wasserstoff-Hochdruckspeicher in die Halle wie auch vom Sauerstoffspeicher werden jeweils die Durchflußmenge (FIR 102 bzw. 103) zur Halle und der Druck (PS 106 bzw. 107) in den entsprechenden Leitungen durch Grenzwertgeber überwacht (Abb. 1.5-3).

Überschreitet die in die Halle strömende Gasmenge $10 \text{ Nm}^3/\text{h}$ oder übersteigt der Druck in diesen Leitungen 8 bar, werden automatisch durch eine Hardware-Schaltung alle Ventile zwischen Speicher und Halle geschlossen.

Die Wasserstoffleitungen vom Elektrolyseur zu den Speichern und zurück zur Brennstoffzelle führen durch den Hallen-Fluchtgang. Hier sind als Ergebnis der vorliegenden Analyse ein H_2 -Meßkopf, zwei Ablufthauben und Zuluftöffnungen in der Außentür nachgerüstet worden.

Für den sicheren Umgang mit den gasführenden Komponenten erhält das Personal eine Betriebs- und Sicherheitsanleitung.

Für die Ableitung der gebildeten Gase aus dem Elektrolyseur (Wasserstoff und Sauerstoff) werden 12 bzw. 16 mm Edelstahlrohre verwendet. Innerhalb der Halle werden die Rohre mit maximal 7 bar Druck beaufschlagt. Hochdruckleitungen für Wasserstoff (150 bar) und Sauerstoff (70 bar) werden nur im Freien verlegt und auf dem kürzesten Weg vom Kompressor zu den Speicherbehältern geführt. Die Druckreduzierung auf 7 bar für den Gasverbraucher (Brennstoffzelle) wird im Freien installiert, unmittelbar hinter den Speicherbehältern.

2. Das Solar-Wasserstoff-Projekt in Neunburg vorm Wald als Vergleichsanlage

2.1 Hintergrund und Beschreibung der Anlage

Zur besseren Beurteilbarkeit der Solarenergie und zu deren technischen Weiterentwicklung wurde 1986 die Solar-Wasserstoff-Bayern GmbH (SWB) gegründet, die in der Nähe des Städtchens Neunburg vorm Wald in der Oberpfalz, am Rande des Bayrischen Waldes einen geeigneten Standort für ein Solar-Wasserstoff-Projekt fand. Auf diesem leicht nach Süden geneigten Gelände herrscht für mitteleuropäische Verhältnisse mit durchschnittlich 1700 Stunden im Jahr relativ viel Sonnenschein. Auch die geringe Entfernung zum Kohlekraftwerk Schwandorf des Bayernwerks war wichtig, weil dessen Personal, Werkstätten und Labor-einrichtungen für Betrieb und Unterhalt der Solar-Wasserstoff-anlage herangezogen wird. Mit dieser Anlage (Abb. 2.1-1) sind alle Schritte der solaren Wasserstoffgewinnung an einem Ort vereint /Weber/.

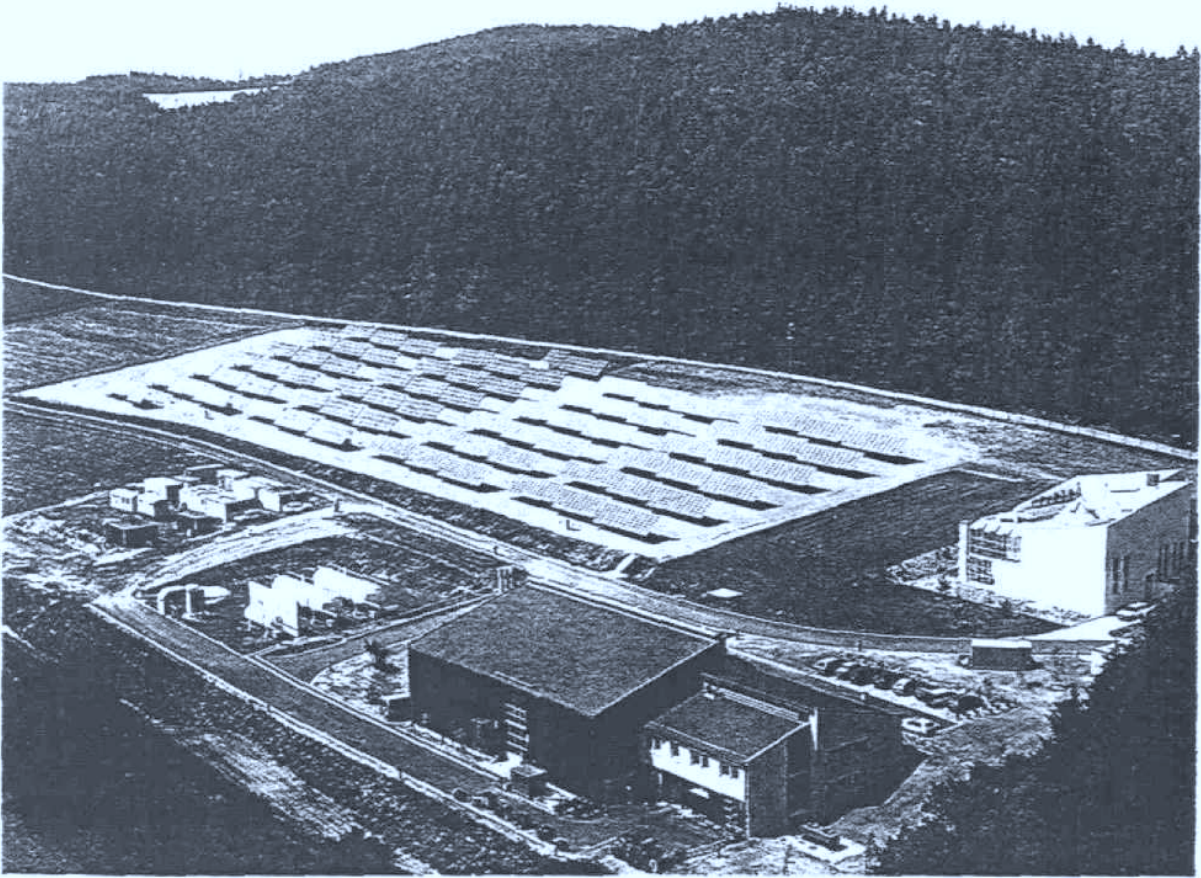
Die Hauptteile der Anlage konnten nacheinander bis 1990 in Betrieb genommen werden:

- 2 PV-Felder (Gesamtleistung ca. 270 kWp),
- 2 Wasserelektrolyseure mit 211 kW_{el} Gesamtleistung,
- Gasverdichtung, -aufbereitung und -speicherung,
- 2 Brennstoffzellenanlagen mit 7 kW_{el} und 80 kW_{th},
- 2 Gasheizkessel mit je 20 kW_{th},
- Flüssigwasserstoff-Tankstelle.

Investitionen und Kosten für die Ende 1991 beendete erste Betriebsphase summierten sich auf 64 Mio. DM.

Jährlich werden rund 47000 m³ Wasserstoff gewonnen (1 m³/5 kW Strom), im Energieinhalt etwa 16000 l Heizöl entsprechend. In 2 Speicherbehältern werden jeweils 2500 m³ unter 30 bar auf 80 m³ komprimiert. Neben den beiden Wasserstoff-Speicherbehältern befindet sich, durch eine Schutzwand getrennt, ein weiterer Speicherbehälter für etwa 500 Nm³ Sauerstoffgas (Abb. 2.1-1).

Für eine zukünftige Wasserstoff-Energiewirtschaft ist diese aufwendige, dezentrale Speichertechnik nicht wünschenswert.



Das Gaslager: Links die beiden Tanks, in denen je 2500 (bei Atmosphärendruck gemessene) m^3 Wasserstoffgas unter 30 Bar Druck auf 80 m^3 zusammengepreßt werden. Rechts der kleine Tank für 500 m^3 komprimierten Sauerstoff.

Die Bauten der Phase 1: links oben die nach Süd orientierten 76 Solarzellen-Tafeln, davor in weiß die beiden großen Wasserstoff-Druckbehälter und der (kleinere) Sauerstofftank, rechts vorne das Betriebsgebäude für Elektrolyseure und Anwendungstechniken, rechts oben das Informationszentrum mit Büros.

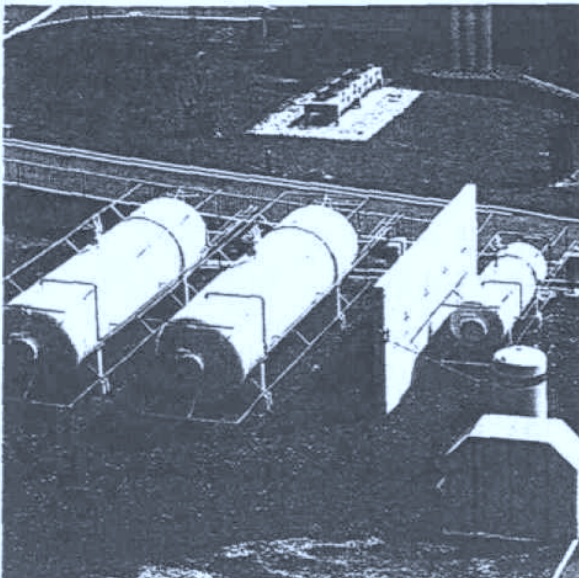


Abb. 2.1-1: Ansichten der Solar-Wasserstoffanlage in Neunburg vorm Wald

Vielmehr wird die Nutzung z.B. ehemaliger Erdgaslagerstätten oder auch unterirdischer Kavernen angestrebt, von wo der Wasserstoff via Pipeline zu den Verbrauchern käme.

Die beiden Elektrolyseure der 100 kW-Klasse (PHOEBUS: 25 kW) sind von unterschiedlicher Technologie:

- fortgeschrittener alkalischer Niederdruckelektrolyseur von der Krebskosmo Gesellschaft für Chemie Ingenieur Technik mbH,
- Solid-Polymer-Elektrolyseur (SPE) von der Asea Brown Boveri AG.

2.2 Inbetriebsetzung und erste Betriebserfahrungen des alkalischen Niederdruckelektrolyseurs

Die folgenden Angaben sind dem VDI-Bericht 912 /Römer/ entnommen. Auf den Solid-Polymer-Elektrolyseur (SPE), der in der PHOEBUS-Anlage nicht vorkommt, wird hier verzichtet.

Wegen Undichtigkeiten mußte während der Inbetriebsetzung des Elektrolyseurs der Zellblock demontiert werden. Nach der Montage traten an einzelnen Zellen beim mechanischen Verspannen des Zellblocks Kurzschlüsse auf. Die Analyse ergab, daß die Kurzschlüsse durch kleine Löcher in den Diaphragmen hervorgerufen wurden, die wiederum durch unebene Anoden und eine damit lokal erhöhte Flächenpressung entstanden waren. Weitere Kurzschlüsse konnten durch ein Redesign der Zellenkonstruktion bisher vermieden werden. Ein Absinken des Elektrolytpegels, das durch Schaumbildung in den Gasabscheidern verursacht wurde, führte öfter zu selbständigem Abschalten der Elektrolyseanlage. Nach einer Modifikation der Füllstandsgeber trat das Abschalten nicht mehr auf. Im niedrigsten Teillastpunkt (20 %), für den Gasreinheiten garantiert waren, wurden 0,3 Vol.% O₂ in H₂ und 0,4 Vol.% H₂ in O₂ erreicht.

Eine kleine Undichtigkeit des Zellblocks an einer Meßstelle für die Zellspannung wurde vom Lieferanten behoben. Große Probleme für die meßtechnische Untersuchung am Elektrolyseur verursachen Druckschwankungen am Elektrolyseurausgang, die konzeptbedingt durch die Abtauchung der Produktgasströme in Wasservorlagen auftreten.

Beim PHOEBUS-Elektrolyseur sind solche Wasservorlagen nicht vorhanden.

Die Gasverunreinigungen (H_2 in O_2 bzw. O_2 in H_2) liegen oberhalb der Abnahmewerte; sie sind im nachgeschalteten Gasreinigungssystem abzubauen, um die für die Speicherung geforderten Gasreinheiten von jeweils mindestens 99,9 % zu erzielen.

Die vorstehenden Erfahrungen betreffen den Zeitraum bis Anfang 1992. Sie weisen hinsichtlich der sicherheitstechnischen Beurteilung keine Besonderheiten auf und ergeben im Hinblick auf die Beurteilung des PHOEBUS-Elektrolyseurs keine neuartigen Gesichtspunkte, vielleicht abgesehen von den relativ hohen Gasverunreinigungen bei Schwachlast.

2.3 Betriebsmitteleinrichtungen, Hilfs-, Neben- und Versorgungssysteme

Einen wesentlichen Anteil an der Gesamtanlage haben die folgenden peripheren Systeme, die im Falle der SWB in erheblichem Umfang Planungspersonal gebunden und auch Kosten verursacht haben:

- Lüftungsanlagen
- Gaswarnanlage
- Gasanalysengeräte
- Unterbrechungsfreie Stromversorgung für sicherheitsrelevante Systeme
- Instrumentenluftversorgung
- Arbeitsluftversorgung
- Inertisierungssystem
- übergeordnete Leittechnik
- fest verdrahtete Sicherheitstechnik
- Deionatversorgung
- Kalilaugenansetzstation
- Kaltwasserversorgung.

Hierfür waren die zu lösenden Detailprobleme vielfältig. Sie unterstreichen nach Ansicht der Betreiber, daß Solar-Wasserstoff-Anlagen individuell zu planende Anlagen des chemischen Anlagenbaus sind und konkrete Bestimmungen und Sicherheitsregeln noch weitgehend fehlen. In zahlreichen Gesprächen mit den Genehmi-

gungsbehörden wurden sie für die SWB-Anlage aus Vorhandenem hergeleitet /Römer/.

2.4 Erste Bewertungen und Empfehlungen

Nach Ansicht von /Fuchs/ sind solche Anlagen nicht für die Versorgung von Einzelhäusern prädestiniert. Zentralisierte Erzeugung, zentrale Speicherung und zentralisierte Umsetzung drängen sich nicht nur aus Gründen einer Kostendegression, sondern auch aus Gründen einer optimalen Betreuung und der Einhaltung einer optimalen Sicherheitsphilosophie auf. Hier sollte auch der Umgang mit O_2 und Laugen (bei SWB auch mit Erdgas) nicht übersehen werden. Darüber hinaus ist man der Ansicht, daß eine solche Anlage wenn möglich ins Freie gehört. Die Entscheidung, die Prototypen der Wasserstofferzeugung und des -verbrauchs aus Betreuungs-, Wartungstechnik- und Bequemlichkeitsgründen in eine Betriebshalle zu stellen, wird für nicht artgerecht gehalten; hierdurch werden hohe Kosten für periphere Anlagenteile verursacht.

2.5 Ausblick auf Phase 2

Die zweite Phase des SWB-Projekts (1992 - 1996) mit einem Volumen von 69 Mio. DM hat den Weiterbetrieb der Systeme zur Gewinnung von Langzeiterfahrungen aber auch die weitere Ergänzung der Anlage mit neueren Entwicklungen zum Inhalt. Folgende Anlagenteile sind vorgesehen:

- Erweiterung des Photovoltaikfeldes mit neuen weiterentwickelten Technologien
- 2 Druckelektrolyseure von je 100 kW_{el}
- 1 katalytisches Heizgerät mit 10 kW_{th}
- 1 katalytisch beheiztes Absorptionskältesystem mit 18 kW_{th}
- 1 PEM-Brennstoffzellenanlage (protonenleitende Membran), die mit einer Leistung von 10 kW_{el} zum Antrieb eines Elektrogabelstaplers eingesetzt werden soll
- Weitere Optimierung der LH_2 -Tankstelle

3. Allgemeines zur Wasserstoffwirtschaft

3.1 Allgemeines zu Wasserstoff

Wasserstoff ist das häufigste Element im Weltall, er stellt über 90 % aller Atome und rund $\frac{3}{4}$ der gesamten Masse. Sein Atom ist das einfachste und leichteste. Das chemische Symbol H steht für Hydrogenium, d.h. Wasserbildner. Atomarer Wasserstoff verbindet sich mit den meisten Elementen zu Hydriden und kommt in Wasser ebenso wie in Kohle, Gemüse und tierischem Bindegewebe vor. Ungebunden bildet Wasserstoff zweiatomige Moleküle der chemischen Formel H_2 und ist dann ein farb- und geruchloses Gas mit einer Dichte von 0,0899 g/l. Wasser enthält 11,2 Gewichtsprozent Wasserstoff. Gemische von 4 bis 75 % Wasserstoff in Luft sind brennbar, die höchste Verbrennungstemperatur wird bei 29 % mit 2318 °C erreicht (mit reinem Sauerstoff über 3000 °C) /Weber/

3.2 Allgemeines zur Chemie-Wasserstoffwirtschaft

Wasserstoff ist gegenwärtig ein wichtiger nicht-energetischer Grundstoff für die Synthese chemischer Verbindungen und für die Verarbeitung von Mineralöl, sowie unverzichtbarer Energieträger in der Raumfahrt.

Die Wasserstoff-Chemie gibt es in ersten Ansätzen seit dem ausgehenden 18. Jahrhundert.

Der Chemiker Fritz Haber fand 1909 ein Verfahren, um die Stickstoff-Wasserstoff-Verbindung Ammoniak (NH_3) aus elementarem Stickstoff und Wasserstoff herzustellen, der den aus Chile bezogenen Grundstoff Salpeter für die Herstellung von Kunstdünger, Schieß- und Sprengstoffen ersetzte. Nach dem 1. Weltkrieg wandten auch andere Industriestaaten die Ammoniak-Synthese an, so daß der Bedarf an Wasserstoff rasch zunahm.

Heute beträgt der Bedarf an Chemie-Wasserstoff rund 400 Mrd. m^3 im Jahr (weitere 100 Mrd. m^3 werden in der chemischen Industrie zur Erzeugung von Prozeßwärme verbrannt). Diese Wasserstoffmenge energetisch genutzt, entspräche mit ca. 185 Mio t SKE gerade etwa 2 % des gegenwärtigen Welt-Endenergieverbrauchs

/Winter/. Da 1 Nm³ H₂ etwa 90 g wiegt, entspricht dieses Volumen einer Masse von 35 Mio. t. Ungefähr die Hälfte davon wird zur Synthese von Ammoniak verbraucht (2000 m³ H₂- und 667 m³ N₂-Gas ergeben 1 t Ammoniak). 80 % dieses Ammoniaks gehen in die Herstellung von Kunstdünger, der Rest dient zur Synthese von Kunststoffen.

Gut ein Viertel des gesamten Chemie-Wasserstoffs benötigen Raffinerien zur Verarbeitung von Schwefel, Stickstoff und metallischen Verunreinigungen sowie zur Umwandlung von schwer- und leichtsiedenden Kohlenwasserstoffen.

Weniger als 1 % des in Deutschland erzeugten Wasserstoffs wird als Druckwasserstoff an produktionsferne Anwender anderer Branchen transportiert. Der Transport geschieht für kleine Verbraucher in den bekannten Stahlflaschen und für Großverbraucher mit Straßen- oder Schienenfahrzeugen mit fest montierten Flaschenbündeln oder großvolumigen Druckgasbehältern.

Drei Viertel der Weltproduktion an Chemie-Wasserstoff kommen heute aus Erdgas, der Rest zu etwa gleichen Teilen aus Kohle und Rohbenzin. Die Elektrolyse trägt weniger als 1 % bei.

Diese Ausgangsstoffe werden wohl solange ihre Anteile behalten, bis eine Nachfrage nach Energie-Wasserstoff erwächst, die diese knapper werdenden Stoffe ersetzen sollen und die weiter als Chemie-Rohstoffe gebraucht werden.

3.3 Allgemeines zur Energie-Wasserstoffwirtschaft

Die Mengen an Energie-Wasserstoff, die eine solche Wasserstoffwirtschaft benötigt, wären allerdings sehr viel größer als die an heutigem Chemie-Wasserstoff. Denn 1 Tonne Erdöl hat den Energiewert von 3000 m³ Wasserstoffgas, so daß zum Ersatz der heute jährlich verbrannten 3 Mrd.t Erdöl rund 9000 Mrd.m³ Wasserstoff nötig wären, etwa das 25 fache der derzeitigen Weltproduktion /Weber/.

Als Energieträger ist Wasserstoff insbesondere in seinem gasförmigen Aggregatzustand interessant und sowohl in seinem Einsatzpotential als auch bezüglich seiner physikalisch-technischen Eigenschaften mit anderen Brenngasen vergleichbar. Unter ökolo-

gischen Gesichtspunkten besonders attraktiv - da ohne No_x -Emissionen - ist die Rekombination mit Luft durch 'kalte' Verbrennung, sei es mittels Brennstoffzellen, sei es mit katalytischen Heizern. Dies bedarf noch großer Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen.

Aus heutiger Sicht kann Energie-Wasserstoff wohl nur durch Elektrolyse aus Wasser gewonnen werden. Die Elektrolyse ist eine Umwandlung von Strom, der gewonnene Wasserstoff also ein Stromspeicher. Auf lange Sicht soll der für die Elektrolyse benötigte Strom vor allem in neuen, riesigen Solar, Wind- und Wasserkraftanlagen erzeugt werden.

3.4 Stoffliche Eigenschaften von Wasserstoff

3.4.1 Physikalische Eigenschaften von gasförmigen Wasserstoff

Wasserstoff bildet 2-atomige Moleküle mit sehr fester Bindung. Sicherheitstechnisch relevante Eigenschaften sind insbesondere:

- die geringe Dichte (leichtestes Element)
- die hohe Diffusionsgeschwindigkeit in anderen Gasen und
- die hohe Wärmeleitfähigkeit.

Bei Austritt in freier Luft steigt der Wasserstoff sehr schnell nach oben, während die hohe Diffusionsgeschwindigkeit für eine schnelle Durchmischung sorgt. Die hohe Wärmeleitfähigkeit in Verbindung mit der relativ niedrigen spezifischen Wärme ist für das Verbrennungsverhalten von Bedeutung.

3.4.2 Chemische Eigenschaften

Sicherheitstechnisch von Bedeutung ist, daß gasförmiger Wasserstoff

- geruch- und geschmacklos,
- farblos und
- nicht toxisch ist.

Bei der Verbrennung von Wasserstoff an Luft wird als Nebeneffekt durch die hohe Flammentemperatur auch der Stickstoff reaktiv und es bilden sich Stickoxide (maximal 5 Promille). Die Möglichkeit

einer explosionsartigen Reaktion ist nur mit Sauerstoff (Knallgas) gegeben /Wolters/.

Weiter Zündbereich

Der Zündbereich von Wasserstoff in Luft, mit deren Sauerstoff er dann reagiert, erstreckt sich von einem Mischungsanteil von 4- bis 75-Vol.-%. Dieser weite Zündbereich ist einerseits ein Vorteil für die kontrollierte Verbrennung mit Wasserstoffbrennern, weil er die Möglichkeit gibt, dank hohem Luftüberschuß das Entstehen von Stickoxiden (dem einzig möglichen Schadstoff der Wasserstoffverbrennung) weitgehend zu unterdrücken. Andererseits bedeutet er, daß schon geringe Anteile von Wasserstoff in der Luft das Potential zu einer unkontrollierten Verbrennung z.B. infolge kleiner Lecks in einer Rohrleitung schaffen.

Geringe Wärmestrahlung

Wasserstoff ist das leichteste aller Gase. Er steigt daher in der Luft rasch nach oben. Versuche haben gezeigt, daß aus diesem Grunde seine Brandzeit viel kürzer ist als die anderer Gase - die Umgebung ist den Flammen und ihrer Wärmestrahlung viel weniger lang ausgesetzt.

Für das Arbeitsplatzrisiko ist von Bedeutung, daß selbst in unmittelbarer Nähe einer - farblosen - Wasserstoffflamme keine Verbrennungsgefahr besteht. Rote Flammen von kohlenstoffhaltigen Brennstoffen strahlen dagegen sehr intensiv. In unmittelbarer Nähe von Bränden geht somit die Gefahr von der Wärmestrahlung und nicht von der Flammentemperatur aus. Zwar ist die Flammentemperatur von Wasserstoff mit rund 2300 °C (Tab. 3.2.4-1) sogar etwas größer als die von Methan, aber die Wärmestrahlung ist viel geringer.

Detonationsgefahr

In bezug auf leichte Entflammbarkeit, Brandzeit und Gefährdung durch Flammen ist Wasserstoff mit anderen Gasen vergleichbar, wenn nicht sogar sicherer (siehe oben). Dem steht allerdings entgegen, daß Wasserstoff-Luft-Gemische viel eher detonieren infolge der viel höheren Geschwindigkeit, mit der sich Wasserstoff-Flammen ausbreiten.

Das Umschlagen einer Deflagration, eines raschen Abbrennens, in eine Detonation tritt nur in geschlossenen Räumen auf, und nur wenn das Wasserstoff-Luft-Gemisch wenigstens 12-Vol.-% Wasserstoff enthält.

Ein solches Umschlagen wird vor allem durch Turbulenzen ausgelöst. Wenn zum Beispiel eine Druckwelle von einer Flamme ausgeht und an einer Wand reflektiert wird, erhöht sie den Druck im Flammenbereich. Dadurch kann die Flammengeschwindigkeit, die normalerweise etwa 10 m/s beträgt, plötzlich auf 2000 m/s anwachsen (Tab. 3.4.2-1). Das äußert sich als Verdichtungsstoß, der die Selbstentzündung des gesamten Wasserstoff-Luft-Gemisches bewirkt. Man spricht dann von einer Detonation /Weber2/.

Innerhalb der Entflammbarkeitsgrenzen genügt eine Zündenergie von 0,02 mJ für ein stöchiometrisches Luft-Wasserstoff-Gemisch (29,5 Vol.-% H_2). Zündquellen wie z.B. Funken von elektrischen Schaltern, Relais, Motoren, aneinanderschlagende Metalle sowie die elektrostatische Entladung des menschlichen Körpers (ca. 10 mJ) setzen genügend Zündenergie frei. Bei Abweichung von der Stöchiometrie steigt die erforderliche Zündenergie stark an (Abb. 3.4.2-1). Die Werte gelten für Fremdzündung bei Atmosphärendruck und Raumtemperatur. Sowohl bei andersartiger Zündung als auch zur Initiierung einer Detonation können sich erhebliche Abweichungen ergeben.

Die Zündgrenzen hängen neben der Gemischzusammensetzung auch von der Gemischtemperatur, dem Vordruck, der relativen Feuchte und der Zündenergie ab. Mit steigender Temperatur oder steigendem Vordruck wird besonders die obere Zündgrenze derart verschoben, daß es zu einer Erweiterung des zündfähigen Konzentrationsbereichs kommt. Der Einfluß auf die untere Zündgrenze ist demgegenüber gering.

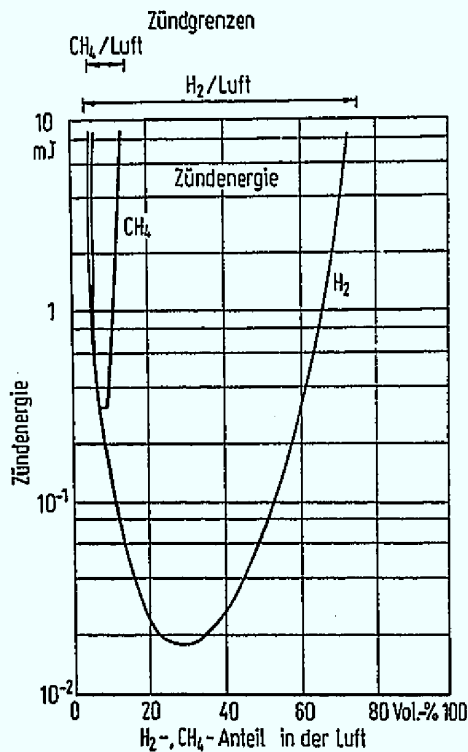


Abb. 3.4.2-1: Minimale Zündenergie
für H_2 - und CH_4 -Luft-
Gemische /Winter/

Kenngrößen	Wasserstoff H_2	Methan (Erdgas) CH_4	Propan C_3H_8
Dichte NTP ^a -Gas (kg/m^3)	0,0838	0,6512	1,8700
Selbstentzündungstemperatur (K)	858	813	760
Minimale Zündenergie in Luft (mJ)	0,02	0,29	0,26
Zündgrenzen in Luft (Vol.-%)	4...75	5,3...15,0	2,1...9,5
Flammentemperatur in Luft (K) ^b	2318	2148	2385
Detonationsgrenzen in Luft (Vol.-%)	18,3...59	6,3...14	
Detonationsgeschwindigkeit in Luft (km/s) ^b	2,0	1,8	1,85
Detonationsüberdruck (bar) ^b	14,70	16,80	18,25
Unterer Heizwert (kJ/g)	119,93	50,02	46,35
Oberer Heizwert (kJ/g)	141,86	55,53	50,41
Spezifische Wärme c_p NTP ^a -Gas (J/gK)	14,89	2,22	1,67
Schallgeschwindigkeit NTP ^a -Gas (m/s)	1294	448	260
Stöchiometrisches Gemisch in Luft (Vol.-%)	29,53	9,48	4,03
Diffusionskoeffizient in NTP ^a -Luft (cm^2/s)	0,61	0,16	0,12
Explosionsenergie (kg TNT/ m^3 NTP ^a Brenngas) ^c	2,02	7,03	20,5
Explosionsenergie (g TNT/g Brennstoff) ^c	24	11	10
Explosionsenergie (g TNT/kJ) ^c	0,17	0,19	0,20

^a NTP: Normal-Temperatur und -Druck, 293,15 K, 1,013 bar.

^b Stöchiometrisches Gemisch.

^c Theoretisches Maximum; realistischer Wert ca. 10% vom theoretischen Maximum.

Tab. 3.4.2-1: Physikalisch-chemische Eigenschaften von Wasser-
stoff und anderen Gasen /Winter/

3.5 Energiepolitische Rahmenbedingungen des Wasserstoffeinsatzes

Im Jahre 1991 wurden die Ergebnisse der Untersuchung *Bedingungen und Folgen von Aufbaustrategien für eine solare Wasserstoffwirtschaft* von der Enquete-Kommission 'Technik-Folgen-Abschätzung und -Bewertung' dem Deutschen Bundestag vorgestellt.

Auf der Basis zweier 'Hauptpfade' der möglichen energiewirtschaftlichen Entwicklung Deutschlands bis zum Jahr 2050 wurden die Bedingungen ermittelt, wann und in welchem Umfang Wasserstoff als Sekundärenergieträger benötigt wird, wenn angenommen wird, daß Solarenergie längerfristig der Hauptträger der Energieversorgung werden soll /Nitsch/.

Steigen die Anteile fluktuierender, erneuerbarer Energiequellen am gesamten Energieverbrauch deutlich über 20 % (Hauptpfad I nach 2010, Hauptpfad II nach 2020), so wird Wasserstoff als Speichermedium benötigt (Tab. 3.5-1).

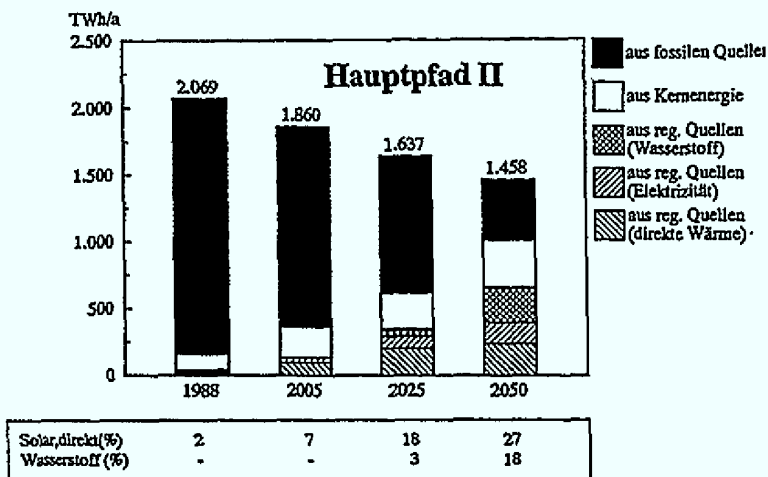
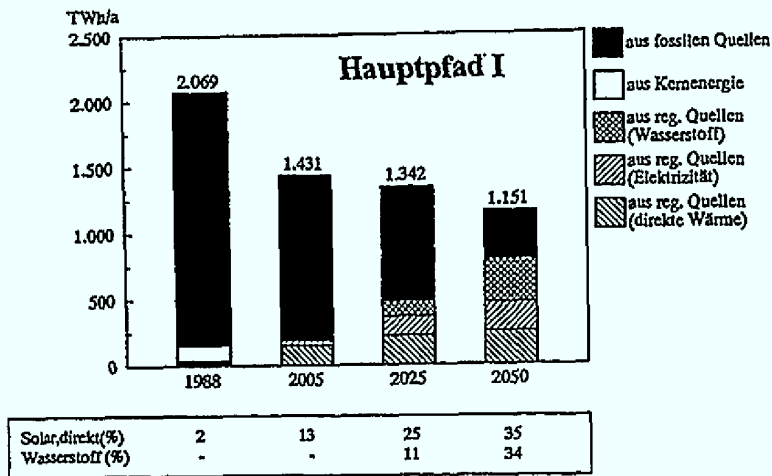
Die der Untersuchung zugrunde liegenden Szenarien einer zukünftigen Energieversorgung (Zeithorizont 2050) lehnen sich an die Empfehlungen der Klimakonferenz in Toronto (Juni 1988) an mit einer 25 %igen Reduktion der energiebedingten CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2005 und einer 75 %igen Reduktion bis zum Jahr 2050.

Insbesondere Pfad I verlangt rasche strukturelle Veränderungen, da der gesamte Endenergieverbrauch wegen der Limitierung zweier Primärenergiequellen (Kernenergie, fossile Energien: Kohle, Mineralöl, Erdgas) bis zum Jahr 2005 um nahezu ein Drittel vermindert werden muß.

Im Hauptpfad II besteht für die Energieverbraucher eine geringer ausgeprägte Notwendigkeit zur rationellen Energieverwendung.

Die Umstrukturierungen haben beträchtliche Auswirkungen auf die Kohle- und Mineralölwirtschaft, während die Gaswirtschaft bei nahezu konstantem Gesamtabsatz nach 2005 zunehmend Erdgas durch Wasserstoff ergänzt bzw. längerfristig ersetzt.

Ab 2025 werden je nach Variante unterschiedliche Anteile solaren Stroms und solaren Wasserstoffs aus einstrahlungsreichen Gebieten importiert, im Jahre 2050 maximal 27 bzw. 12 %, bezogen auf den gesamten Primärenergieverbrauch.



Tab. 3.5-1: Beitrag der Primärenergiequellen zur Endenergiebedarfsdeckung mit Differenzierung im regenerativen Bereich nach direkter thermischer Nutzung, direktem Einsatz von solarem Strom und Wasserstoff /Nitsch/.

3.6 Wasserstoffgestehungskosten

Die Kosten unmittelbar aus Solar- und Windenergie sowie Wasserkraft erzeugten gasförmigen Wasserstoffs zeigt die Tab. 3.6-1. Sie werden mit den Kosten des durch den Wasserstoff ersetzbaren Energieträgers Heizöl verglichen. Für die Erzeugung größerer Mengen gasförmigen Wasserstoffs ist lediglich die Solarstrahlung von Bedeutung, da es günstiger ist, die Windenergie und Wasserkraft weitgehend direkt in das Stromnetz einzukoppeln.

	1988	2005	2025	2050
Leichtes Heizöl, Großverbraucher ²⁾	0,034	0,088 ³⁾	0,176 ³⁾	
Gasförmiger Wasserstoff				
Fossile Herstellung	0,06–0,08			
Elektrolyse mittels Strom aus				
– Wasserkraft, 6500 h/a; 0,04 DM/kWh _e	0,11	0,08	0,07	0,07
– Solarthermische KW; 3600 h/a (NA)				
– Erzeugungsort	0,58	0,30	0,18	0,18
– frei Grenze BRD	0,65	0,33	0,21	0,21
– Photovoltaik; 2800 h/a ⁴⁾ (NA)				
– Erzeugungsort	1,84	0,32	0,19	0,18
– frei Grenze BRD	2,04	0,35	0,22	0,21
– Photovoltaik; 1400 h/a ⁴⁾ (BRD)	2,90	0,58	0,36	0,34
– Wind; 2500 h/a ⁴⁾ (BRD)	0,29	0,20	0,15	0,15

¹⁾ Zins 4 %/a; Abschreibung 30 a; ²⁾ ohne MWSt ³⁾ entspr. Annahmen für CO₂-Aufschlag in Handlungsempfehlungen

⁴⁾ Ausnutzungsdauer der Elektrolyseanlage

Um äquivalente Heizölpreise in DM/l zu erhalten, sind alle Werte mit dem Faktor 10 zu multiplizieren (1 l Heizöl leicht entspricht 10 kWh_{th})

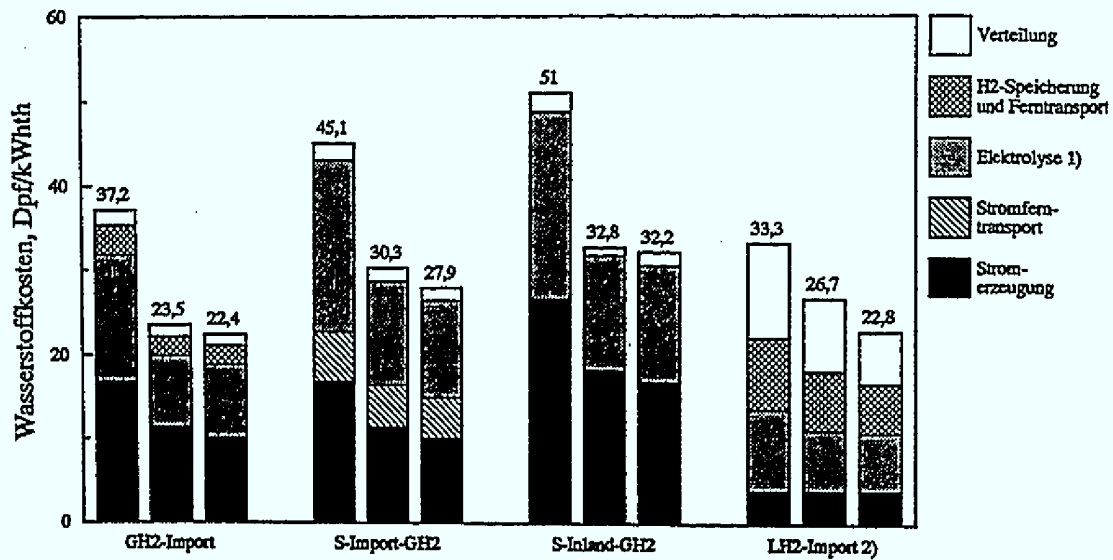
Tab. 3.6-1: Kostenaufstellung für Mineralöl und gasförmigen Wasserstoff in DM (1988)/kWh_{th}¹⁾ /Nitsch/

Erst um das Jahr 2025 könnten die Wasserstoffgestehungskosten – bei konsequenter Durchführung einer CO₂-Reduktionsstrategie – in den Bereich dann denkbaren Energiepreise von 0,20 DM/kWh_{th} gelangen.

Die Abb. 3.6-2 verdeutlicht, daß die Wasserstoffherzeugung am Kraftwerksstandort und der anschließende Transport zum Endverbraucher mit Kosten um 0,23 DM/kWh_{th} (2025) am günstigsten ist. Reine Inlandserzeugung ist die teuerste Variante (0,33 DM). Für die Stromerzeugung stehen drei Varianten im Wettbewerb:

- Inländischer Solarstrom mit Pumpspeichern wegen zeitlichem Auftreten solarer Überschußleistung (1000 h/a).
- Rückverstromung importierten Wasserstoffs.
- Ausländischer Solarstrom, Stromferntransport und anteilige Batteriespeicherung am Erzeugungsort.

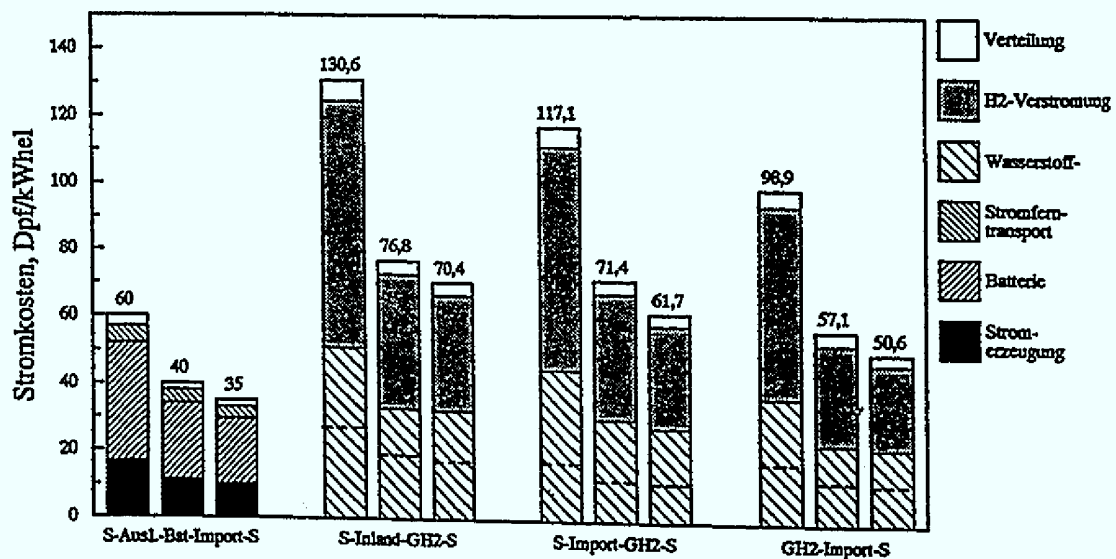
Die Rückverstromung ist die kostengünstigste Variante (Tab. 3.6-3: 'GH2-Import-S'). Die Variante 1 liegt auf einem ähnlichen Niveau wie Variante 3 (Tab. 3.6-3: 'S-Ausl.-Bat-Import-S') mit Kosten von 60, 40 bzw. 35 Dpf/kWh_{el}. in 2005, 2025 bzw. 2050.



linker Balken 2005;
mittlerer Balken 2025;
rechter Balken 2050;

1) bei LH2 einschließlich Verflüssigung
2) Strom aus Wasserkraft

Tab. 3.6-2: Wasserstoffgestehungskosten beim Endverbraucher für unterschiedliche Energieflußketten (Dpf/kWh_{th}; 1988; 4 %/a Zins) /Nitsch/



linker Balken 2005;
mittlerer Balken 2025;
rechter Balken 2050;

— Stromeingangskosten

Tab. 3.6-3: Stromgestehungskosten bei Batteriespeicherung im Ausland und Wasserstoffrückverstromung im Inland (Dpf/kWh_{th}; 1988; 4 %/a Zins) /Nitsch/

3.7 Höhe des Wasserstoffbedarfs

Die Bedeutung des Wasserstoffs hängt sehr stark von der Nutzung erneuerbarer Energiequellen ab. Bei geringer Nutzungsintensität bleibt die Rolle von Wasserstoff im Vergleich zur direkten Wärme- und Elektrizitätsnutzung relativ bedeutungslos; mit wachsenden Anteilen solarer Energie wächst die Bedeutung von Wasserstoff als Speichermedium und als Energieträger.

In welchem Maße Strom direkt genutzt werden kann oder umgewandelt werden muß, wird im wesentlichen durch zwei Kriterien bestimmt:

- Höhe des fluktuierenden Anteils der Stromerzeugung (aus Strahlung und Wind) am Bruttoverbrauch an Strom.
- Deckungslücke bei Treibstoffen, wo Strom nur begrenzt (Individualverkehr) oder überhaupt nicht (Luftverkehr) eingesetzt werden kann.

Das fluktuierende Elektrizitätsangebot kann prinzipiell auf dreierlei Weise genutzt werden:

- direkte Nutzung der Elektrizität durch Einspeisung in Netze und Verbundbetrieb mit konventionellen Kraftwerken. Bis zu einem Anteil von ca. 20 % am Bruttostromverbrauch tritt bei dieser Nutzungsart kein Stromüberschuß auf.

Wenn größere Beiträge angestrebt werden, bieten sich an:

- Speicherung von Strom mittels 'direkter' Elektrizitätsspeicher (Pumpspeicher, Batterien, supraleitende magnetische Speicher). Diese Speicher müssen als Tagesspeicher betrieben werden, d.h. einen Speicherzyklus (Laden/Entladen) innerhalb eines Tages absolvieren.
- Entkopplung des solaren (fluktuierenden) Angebots von der Energienutzung durch Herstellung von Wasserstoff in gasförmiger oder flüssiger Form und seine Nutzung als Brennstoff und Treibstoff sowie eine begrenzte Rückverstromung bei Bedarf. Für die Speicherung großer Wasserstoffmengen (Wochen und Monate) ist der Einsatz von Untertagespeichern und leer-geförderter Erdgasfelder möglich.

4. Risikopotentiale von Wasserstoff

4.1 Allgemeine Betriebserfahrungen

Über Betriebserfahrungen in der Wasserstoffwirtschaft der BRD liegen keine systematischen Auswertungen vor. Die folgenden Ausführungen beruhen im wesentlichen auf Angaben in /LBST/.

In einer bereits 15 Jahre zurückliegenden amerikanischen Erhebung von Wasserstoffunfällen in allen Anwendungen wurde festgestellt, daß 52,5 % der Unfälle zu einer Explosion, 28,5 % zu Feuer, 6 % zu überdruckbedingtem Bruch und 9,5 % zu einer nicht entzündeten Freisetzung führten.

Dazu wurden etwa 300 Fälle (150 vor 1966 und 150 zwischen 1966 und 77) in der Industrie und etwa 100 weitere Fälle im Kraftwerks-, Raumfahrts- und Forschungsbereich ermittelt und ausgewertet, wobei nicht zwischen GH_2 - und LH_2 - Unfällen unterschieden wurde.

Bei der amerikanischen Erhebung von Wasserstoffunfällen waren 17 % der genauer untersuchten Fälle auf ein Versagen der Rohre und Pipelines zurückzuführen. Unter dieser Rubrik wurden jedoch nicht nur Rohrleitungsbrüche, sondern auch Undichtigkeiten der Verbindungsstellen erfaßt. 9 Unfälle ereigneten sich aufgrund fehlerhafter Schweißnähte.

Die NASA erstellte 1974 eine Analyse mit Stör- und Unfällen von Flüssigwasserstoff. Die meisten Unfälle traten im Zusammenhang mit Ventilen bzw. Armaturen und Leckagen bei Verbindungsstellen auf. Diese Beobachtung ist fast deckungsgleich mit der Schadenstatistik des Verbandes der europäischen Gasindustrie. Danach beruhen 80 bis 90 % aller Stör- bzw. Unfälle auf Leckagen an Armaturen und lösbaren Rohrverbindungen sowie auf Fehlbedienungen.

Aus Kostengründen werden für Rohre und Leitungen im allgemeinen Feinkornbaustähle verwendet, die nur eingeschränkt gegen Wasserstoffversprödung sicher sind.

Stationäre GH_2 -Druckspeichertanks sind in der Wasserstoffwirtschaft in einer Übergangsphase, in der GH_2 nicht aus dem Gasnetz bezogen werden kann, von Bedeutung.

Die Auslegung von GH_2 -Druckspeichertanks ist gesetzlich in der Druckbehälterverordnung vom 21. April 1989 mit den Technischen Regeln für Druckbehälter und Technischen Regeln Druckgase festgelegt. In diesen Regelwerken werden die aktuellen Ereignisse nachgetragen. Als Beispiel dient die interkristalline Versprödung von Messingventilteilen, die unter Quecksilberbeaufschlagung auftritt. Der Betrieb eines solchen Bauteils kann z.B. durch folgende Maßnahmen sicher gewährleistet werden:

- Lebensdauerbegrenzung bei Beaufschlagung mit GH_2 aus der Chlor-Alkali-Elektrolyse.
- Festlegung der Qualität des GH_2 (Vermeidung von Quecksilber).

Die Auswertungen des Explosionsunfalles in Hanau (der betroffene Tank mit einem Volumen von 100 m^3 war auf einen Nenndruck von 44 bar ausgelegt) im September 1991 haben gezeigt, daß das Regelwerk noch nicht alle Betriebszustände erfaßt und sich in ständiger Anpassung befindet. Insbesondere die Regeluntersuchungen sollten demnach verschärft bzw. deren Intervalle verkürzt werden.

In der BRD sind ähnliche Untersuchungen für H_2 -Unfälle wie in den USA nicht bekannt. Es existieren lediglich einzelne Untersuchungen z.B. vom TÜV, der im Rahmen von Regeluntersuchungen aufgedeckte Schäden dokumentiert und Auswertungen vorgenommen hat. So wurden für die Untersuchung des 'Hanau'-Störfalles ein unverbindlicher H_2 -Tankkataster in einzelnen Bundesländern ausgewertet, um ähnliche Vorfälle zu vermeiden.

Es wurde ein bundesweiter H_2 -Anlagenkataster vorgeschlagen, der neben den Tanks auch Rohrleitungen und Armaturen erfaßt, um nach einem Stör- oder Unfall auf andere ähnlich gelagerte Anlagenkonfigurationen zu stoßen, wie es z.B. die GRS im Rahmen der Auswertung meldepflichtiger Vorkommnisse in bundesdeutschen und gemeldeter Vorkommnisse in ausländischen KKW unter dem Gesichtspunkt der Übertragbarkeit auf andere Anlagen praktiziert.

In einem ersten Schritt wurde zur Beleuchtung der Einzelrisiken der Komponenten der Wasserstoffwirtschaft die Literatur auf Daten zu Risiken, Gefahrenpotentialen und Unfällen im Umgang mit

H₂ untersucht. Datenbanken wurden wegen der Kürze der Zeit nicht befragt.

Es wurden Unternehmen und Institutionen, welche zur Zeit die weitreichendsten Erfahrungen im Umgang mit Wasserstoff besitzen und eine Auswahl von Repräsentanten einer zukünftigen Wasserstoffwirtschaft darstellen, aufgesucht und zu jedem Teilschritt der Wasserstoffwirtschaft nach möglichen Chancen und Risiken befragt.

Wichtige Aspekte der Befragung waren:

- Schadensursachen und -ausmaße bekannter Schadensfälle mit flüssigem und gasförmigem Wasserstoff und mit ähnlich gefährlichen Substanzen sowie Schadenshäufigkeiten.
- Anlagen- bzw. komponentenspezifische Risiken; Regelwerke und hausinterne Regelungen.

Bei dieser Befragung stand eine übergeordnete Sicht von Sicherheitsaspekten einzelner Anlagen im Hinblick auf einen möglichen verstärkten Einsatz von Wasserstoff im Vordergrund. Hieraus ergaben sich für GH₂ folgende prozeßspezifische Schwerpunkte:

- Elektrolyse
- Pipelineferntransport (Option)
- Straßentransport (z.Z. vorwiegend gasförmig)
- Einsatz im öffentlichen Gasnetz (Option)
- Individualverkehr (teilweise mit GH₂).

Ein Reihe weiterer Schwerpunkte betrafen ausschließlich flüssigen Wasserstoff:

- Verflüssigung
- Seetransportsystem
- Bahntransport
- Anlandung, Umschlag und Speicherung im Hafen
- Binnenschifftransport
- Öffentlicher Nahverkehr (Stadtbusse)
- Luftfahrt.

4.2 Betriebserfahrungen und Risiken der Elektrolyse

Weltweit sind bereits etwa 700 MWel Elektrolyseleistung aus Wasserkraft installiert (1991); hieraus lassen sich $150000 \text{ m}^3 \text{ H}_2/\text{h}$ erzeugen.

Die Wasserelektrolyse ist das einzige großtechnisch durchführbare Verfahren zur Umwandlung von elektrischer Energie in Wasserstoff und nimmt in einer zukünftigen emissionsfreien Wasserstoffenergiewirtschaft eine Schlüsselrolle ein.

Die derzeit üblichen Elektrolyseure haben einen bipolaren Zellaufbau. Die einzelnen Zellen sind in Serie geschaltet, wobei die Kathode der einen Zelle mit der Anode der Nachbarzelle kurzgeschlossen wird. Die Zellen werden stapelartig zu Zellblöcken verbunden, so daß sich ihre Zellspannung additiv zur Anlagengesamtspannung aufaddiert. Durch das Anlegen einer Gleichspannung an die Elektrolysezellen werden an der Kathode Wasserstoff und an der Anode Sauerstoff erzeugt. Die flüssigen Prozeßmedien (H_2 - bzw. O_2 -Emulsionen) werden in den Zellrahmen gesammelt und Separatoren zugeführt, in denen die Prozeßgase abgetrennt werden. Zu jedem Elektrolyseur gehört eine Stromaufbereitungsanlage, die den Versorgungsstrom an die Strom- und Spannungseingangswerte des Elektrolyseurs anpaßt.

Heutige Elektrolyseure mit Wirkungsgraden bis 85 % benötigen etwa 4,3 bis 5 kWh elektrische Energie zur Erzeugung von 1 m^3 Wasserstoff. Die heute in der Industrie zum Einsatz kommenden Elektrolyseure liegen in der 100 kW Leistungsklasse. Für die nahe Zukunft sind Elektrolyseure im MW-Bereich geplant.

Die Risiken und Mängel der Wasser-Elektrolyse-Anlagen bestehen in

- einer möglichen Explosion des in den Elektrolyseuren befindlichen Wasserstoffs
- der Elektrolytleckage (Kalilauge)
- Ausfall des Kühlwassersystems mit der möglichen Folge einer Durchmischung von H_2 und O_2
- Verschlammung der Gasführung verbunden mit Änderungen im Betriebsverhalten und unübersehbarem technischen Versagen

- Korrosion von Bauteilen mit möglichem Austritt von H_2 und O_2 oder der Durchmischung der Gase
- Beschädigung der z.T. innerhalb, z.T. außerhalb der Systemgrenzen befindlichen H_2 -Rohrleitungen.

Die unmittelbare Gefahr die vom Elektrolyseur ausgeht, was Personenschäden angeht, kann aufgrund der geringen entzündbaren Wasserstoffmengen als gering angesehen werden. Zum einen wird der erzeugte Wasserstoff direkt Speicherbehältern außerhalb des Prozeßraumes zugeführt, zum anderen sind die im Schadensfall maximal austretenden Mengen an Wasserstoff und Prozeßmedium durch den modularen Aufbau der Zellen begrenzt.

Zu den Sicherheitseinrichtungen moderner Elektrolyseure gehören explosionsgeschützte elektrische Einrichtungen und automatische Absperrventile, die von den Gasanalyseeinheiten zur Messung der Wasserstoff- und Sauerstoffkonzentration angesteuert werden. Der Austritt von Kalilauge wird ebenfalls durch automatische Absperrventile auf den Inhalt der Zellen begrenzt.

4.2.1 Bekannte Schadensfälle

Nach einer in /LBST/ zitierten Schadensauswertung sind folgende Fehler von wesentlicher Bedeutung:

- Vertauschung der Zellpolarität mit der Folge, daß H_2 in den O_2 -Trakt eindringen kann
- Korrosion an Zellen, was zur Mischung von H_2 mit O_2 führen kann
- Plötzliche Ausfälle der Stromzufuhr, was dazu führen kann, daß nachgeschaltete Anlagenteile nicht rechtzeitig abgeschaltet werden können.

1975 ereignete sich in einer Wasserstoffproduktionsanlage in Ilford (GB) eine Explosion. Zuvor waren über einen längeren Zeitraum die Elektrolytleitungen verschlammt. Dies bewirkte zu hohe Betriebstemperaturen und daher starke Korrosion an Elektroden und Separatoren, so daß schließlich durch den Eintrag von H_2 in den O_2 -Separator eine Explosion hervorgerufen wurde. Der in der Nähe befindliche Operateur wurde durch die ausgeschleuderte Kalilauge tödlich verletzt. Eine genauere Beschreibung des Unfalls erfolgt im nachfolgenden Kapitel.

4.2.1.1 Beschreibung des Störfalles in Ilford

Der schwerste aus der Literatur bekannte Unfall ereignete sich 1975 in Ilford (GB), wo bei einer Explosion an einem Lurgi Elektrolyseur erheblicher Sachschaden entstand und ein Mitarbeiter getötet wurde. Die Anlage war für die Produktion von Wasserstoff errichtet worden. Sie bestand aus 4 Blöcken mit je 135 Zellen (Gesamtproduktionsrate: $920 \text{ Nm}^3/\text{h}$).

Abb. 4.2.1.1-1 zeigt den schematischen Aufbau eines Lurgi-Elektrolyseurs.

Es handelte sich um einen bipolaren Elektrolyseur, in dem die Einzelteile elektrisch und geometrisch hintereinander geschaltet waren, so daß jede metallische Trennwand, die eine Zelle von der nächsten trennte, auf der einen Seite eine Kathode und auf der anderen Seite eine Anode trug. Die bipolaren Trennplatten waren als Waffelbleche ausgebildet, die Metallnetzelektroden aus Nickel trugen und sie gegen die 2 bis 3 mm dicken sehr flexiblen Asbestdiaphragmen preßten (Abb. 4.2.1.1-2 zeigt den Aufbau einer solchen Zelle). Das Elektrolyt floß durch eine Leitung, die sich am unteren Teil der Zelle befand. Durch kleine Öffnungen in dieser Leitung konnte das Elektrolyt an der Kathoden- bzw. Anodenseite von unten in die Zelle einströmen. Eine Mischung von Gas und Elektrolyt strömte durch die Zelle nach oben und wurde dort in Gaskanälen, die im Zellrahmen axial verliefen, gesammelt. Von dort aus wurden sie getrennten Behältern (sogenannten Separatoren) zugeführt, in denen das Elektrolyt vom Wasserstoff bzw. Sauerstoff dank genügend langen Verweilzeiten ($\approx 1 \text{ min}$) getrennt wurde.

Einige Tage vor der Explosion ereignete sich am Elektrolyseur ein Zwischenfall. Während des Normalbetriebes am 2.4. um 2.00 Uhr nachts hörte der Operateur knackende Geräusche am Zellenblock. Daraufhin reduzierte er den Stromdurchfluß und das Geräusch verschwand. Nach drei Stunden ohne weiteren Zwischenfall erhöhte er wieder den Strom auf den normalen Wert und die Anlage arbeitete ohne Zwischenfall weiter. Um 13.00 Uhr führte ein Leck zwischen zwei Platten in der Mitte des Zellblockes zu einem Druckverlust. Der Operateur schaltete daraufhin die Anlage ab.

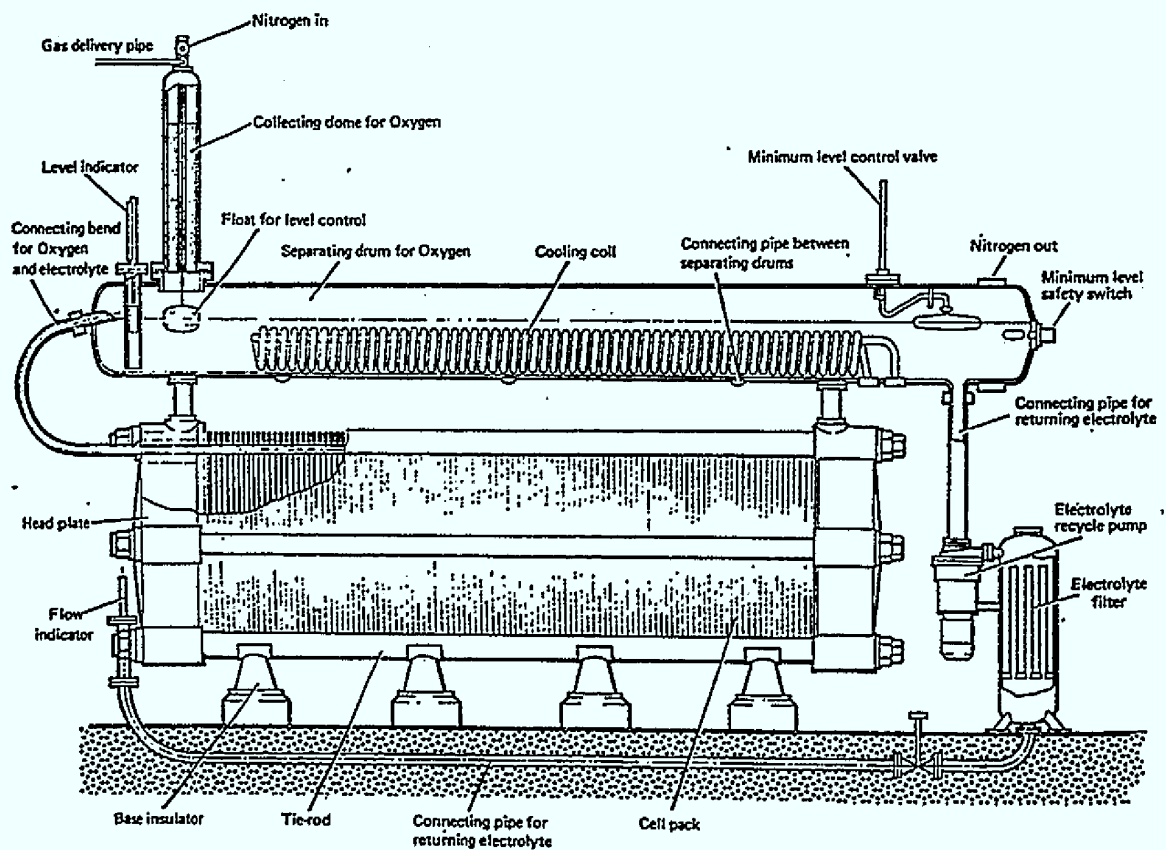


Abb. 4.2.1.1-1: Schema des Lurgi-Elektrolyseurs

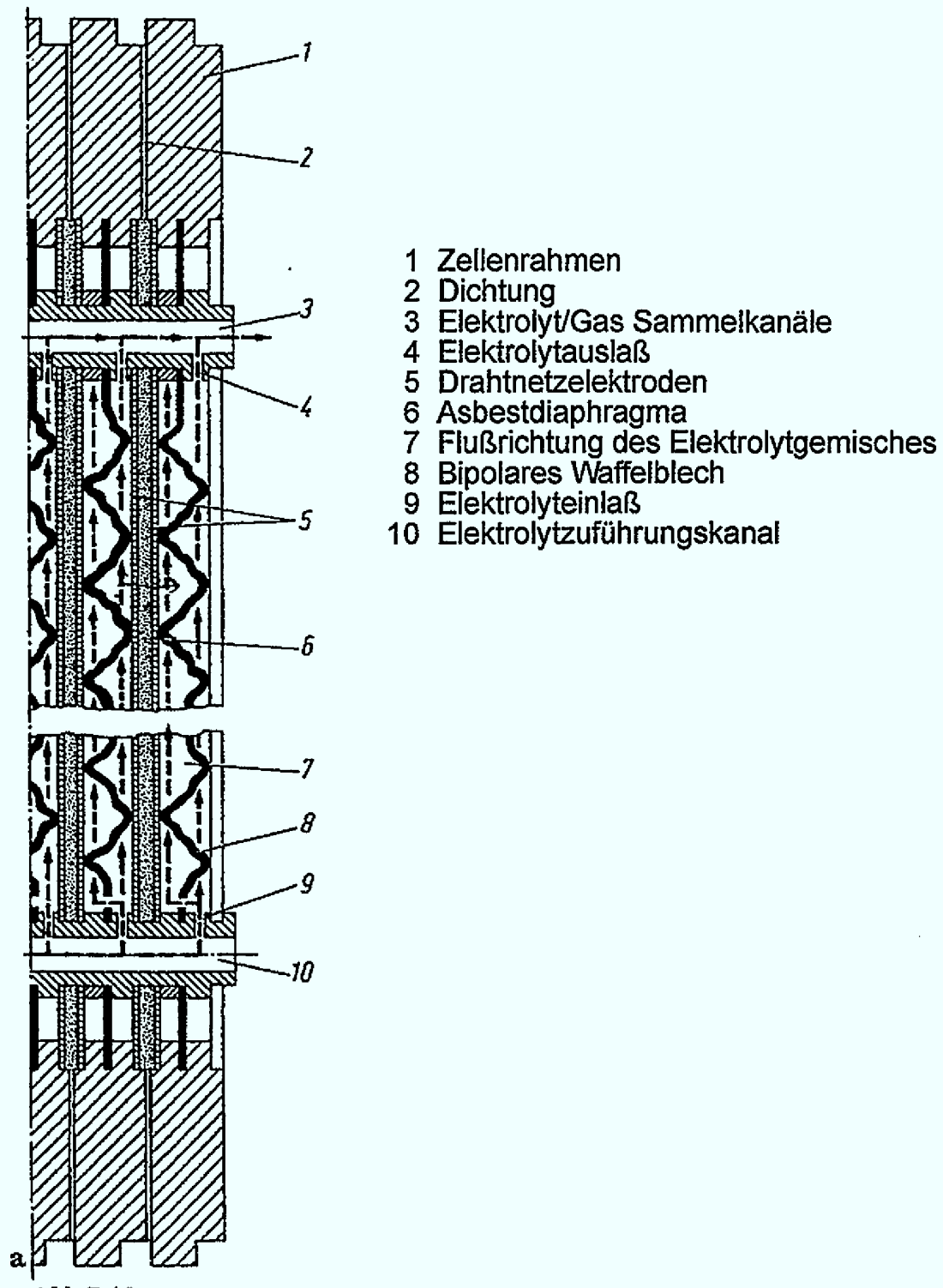


Abb. 4.2.1.1-2: Aufbau einer Elektrolysezelle

Der Vorgang wurde sofort dem Hersteller gemeldet, der einen Fachmann zum Abdichten des Lecks schickte und dieses zwischen dem 2. und 4. April abdichtete. Am 4.4. kontrollierten dieser Spezialist und der Werksingenieur die Reparaturstelle und entschieden, die Anlage wieder anzufahren, um die Reparatur zu testen. Nach dem erfolgreichen Test wurde die Anlage wieder in Betrieb genommen. Das Personal wurde unterwiesen, die Bruchstelle weiter zu beobachten und bei einem Zwischenfall einen der leitenden Angestellten zu benachrichtigen.

Die Anlage verlief bis zum 5.4. 11.10 Uhr störungsfrei. Dann ereignete sich eine Explosion am Sauerstoffseparator. Dieser zerplatzte, und eine große Menge der ätzenden Lösung ergoß sich über den Operateur, der später seinen Verletzungen erlag.

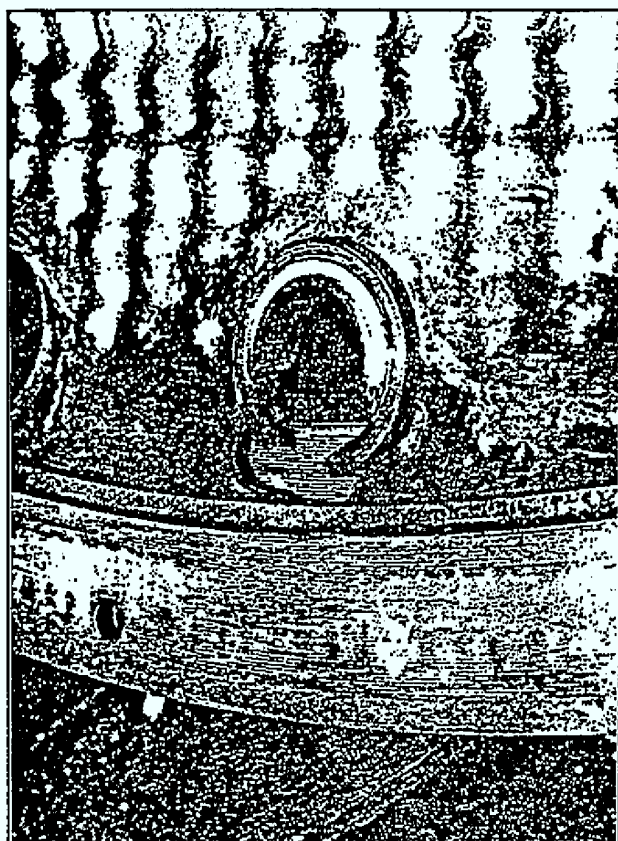
Bei der Besichtigung der Unfallstelle wurde folgender Schaden festgestellt:

- Das leichtgewichtige Gebäudedach war abgerissen worden.
- Angrenzende Gebäude innerhalb des Fabrikgeländes wurden ebenfalls beschädigt.
- Der größte Schaden entstand an der Elektrolyseeinheit. Die Verbindungselemente zwischen Sauerstoffsammelbehälter und Sauerstoffseparator waren gestreckt.
- Der Sauerstoffsammelbehälter war über die gesamte Länge aufgerissen.
- Die Abgabelleitung, die am oberen Ende des Sauerstoffseparators angeschweißt war, wurde abgerissen.
- Der Sauerstoffseparator wurde durch den internen Druck völlig zerstört.

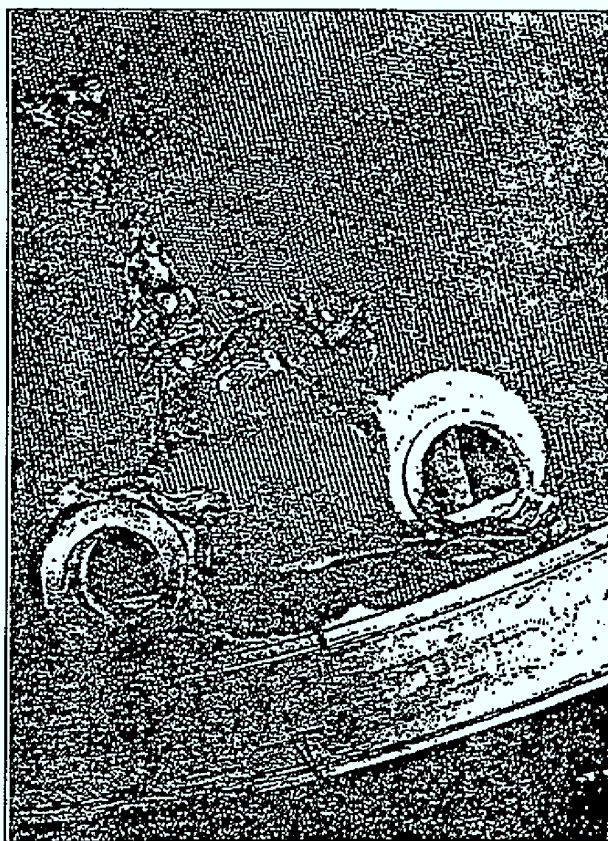
Um ein genaues Bild über den Schaden und die Störfallursache zu bekommen, mußte der Elektrolyseur entmantelt werden.

Nach der Entmantelung konnten zunächst folgende Schäden festgestellt werden (siehe auch Abb. 4.2.1.1-3).

- Einige Durchgänge für Gas und Elektrolyt waren durch Schlamm blockiert.



Perforierte Trennplatte



Korrosionsbedingte Zerstörung der Netzelektroden



Korrosion des Flansches und der Austrittsstellen für das Gas

Abb. 4.2.1.1-3: Einige nach der Entmantelung sichtbare Schäden

- An der Platte, die die Zellenblöcke voneinander trennte, zeigten sich kristalline Ablagerungen als Folge einer starken Überhitzung.
- In einigen Zellen hatten sich starke Schlammablagerungen gebildet.
- Die Oberfläche einiger Trennplatten zeigte eine Körnung.
- Es wurde eine korrosionsbedingte Zerstörung an einigen Netzelektroden festgestellt.
- An der Leckstelle (vom 2.4.) war der Flansch der Zelle bis nach außen hin erodiert.

4.2.1.2 Ursache des Störfalles

Die durch die Entmantelung sichtbar gewordenen Schäden lassen bezüglich der Störfallursache folgende Schlüsse zu:

Im Laufe der Zeit sind die Elektrolytdurchgänge so stark durch Schlammablagerungen blockiert worden, daß sich das Elektrolyt am Boden der Zellen sammeln konnte. Aufgrund der Reduzierung des Elektrolytdurchflusses durch die teilweise blockierten Durchgänge erhöhte sich die innere Zelltemperatur. All dies führte zu einer Korrosion an beiden Drahtnetzelektroden, die zum Versagen des Asbestdiaphragmas führten. Die Zerstörung der Zellstruktur durch den Durchbruch der Drähte führte schließlich zu einer massiven Vermischung der beiden Produktgase. Durch einen internen Kurzschluß in einer der defekten Zellen wurde die Explosion ausgelöst.

Aufgrund des Ausmaßes der Explosion muß in den letzten Stunden eine massive Durchmischung von Sauerstoff und Wasserstoff stattgefunden haben. Das Knackgeräusch am 2.4. ist bereits Ursache einer internen Explosion gewesen, bei der allerdings nur geringe Mengen Wasserstoff und Sauerstoff miteinander reagiert haben.

Hier stellt sich die Frage, ob die Verunreinigung der Gase, die sich laut Untersuchungsergebnis über einen längeren Zeitraum erstreckt haben muß, nicht früher festgestellt werden konnte.

Da die Anlage nur der Wasserstoffproduktion diente und Sauerstoff sozusagen ein Abfallprodukt war, richtete sich das Augen-

merk mehr auf den Wasserstoff. Eine regelmäßige Überwachung der Sauerstoffreinheit, wie sie nach der Betriebsanleitung vorgesehen war, hätte den Unfall verhindern können.

Nach der Explosion wurde der intakte Wasserstofftank untersucht. Die Wasserstoffreinheit, die normalerweise bei 99,9 % liegt, lag nur noch zwischen 99,0 und 99,6 %. Dies deutet ebenfalls daraufhin, daß vor der Explosion eine Durchmischung stattgefunden haben muß. Bei einer regelmäßig durchgeführten Messung hätte die Kontamination festgestellt werden können.

Aber wie nach Gesprächen mit den Operateuren vor Ort festgestellt wurde, wurden die stündlich vorgesehenen Messungen nicht regelmäßig durchgeführt. Die Werte wurden aufgrund von Erfahrungswerten ohne Überprüfung eingetragen. Eine vorschriftsmäßige Analyse wurde in der Regel nur zwei- oder dreimal je Schicht durchgeführt. Selbst die dann gemessenen Gasunreinheiten wurden als Folge der Stromreduzierung angesehen und nicht weiter verfolgt.

Auffallend an den Ereignissen in Ilford ist weiterhin, daß trotz einer vorangegangenen Störung die Störfallursache nicht erforscht wurde. Es wurde lediglich die Leckagestelle abgedichtet, obwohl das Schlammproblem dem Betreiber bekannt gewesen ist.

Nach der Inbetriebnahme des Elektrolyseurs (1962) verursachten nämlich größere Schlammablagerungen eine Verstopfung in den Zellen. Diese Störungen wurden anhand hoher Temperatur- und Spannungswerte identifiziert. 1966 wurden die Störungen so stark, daß der Elektrolyseur entmantelt wurde. Schlamm blockierte die schmalen (2 mm ϕ) Gas- und Elektrolytdurchgänge. Gleichzeitig wurden Korrosionseffekte an den Öffnungen für die Schläuche an den Trennplatten und eine leichte Beschädigung der Metallnetzelektroden (Anode) festgestellt. Daraufhin wurde fast die Hälfte der Zellen entfernt und Polyethylenüberzüge neben den Durchbrüchen für die Gasleitungen montiert. Diese sollten ein Blockieren der Gaspassagen verhindern.

Aber auch weiterhin stellten Schlammablagerungen ein Problem dar. Die monatliche Erhöhung der Zelltemperatur und eine Erhöhung der Spannung zeigten dies. Ein weiteres Anzeichen dafür war

eine Reduzierung des Elektrolytdurchflusses. Bei diesen Prozeßparameterveränderungen wurde die Anlage mit Wasser durchgespült. Im weiteren Betrieb ging man dazu über, den Elektrolyseur periodisch mit Wasser durchzuspülen. Bis zum Auftreten des Knackgeräusches mit späterem Leck traten keine Störungen auf.

Da die Verschlammungsprobleme schon mehrere Jahre zurücklagen und man die Anlage durch regelmäßiges Durchspülen anscheinend in den Griff bekommen hatte, war man sich der mit einer Verschlammung verbundenen Gefahr anscheinend nicht mehr bewußt.

Wenn die Anlage auch kein Sicherheitssystem besaß, so hätte doch bei gewissenhaftem Umgang mit der Gasanalyse und der Interpretation der Werte die Verunreinigung bemerkt und die Anlage rechtzeitig abgeschaltet werden können.

4.2.1.3 Übertragbarkeit des Störfalles

Es stellt sich natürlich die Frage, ob ein solcher Unfall auch an dem in der PHOEBUS-Anlage installierten Elektrolyseur auftreten kann. Der Elektrolyseur in Ilford wurde 1962 installiert. Zwischen den beiden Elektrolyseuren liegen 30 Jahre technischen Fortschritts.

Bei den neu errichteten Elektrolyseuren ist aufgrund der verwendeten hochwertigen Materialien eine Verschlammung zu vernachlässigen. So besteht der PHOEBUS-Elektrolyseur aus 1.4301, einem rost- und säurebeständigem CrNi-Stahl.

Sollte es aber aufgrund einer anderen Ursache zu einem Diaphragmariß kommen, schaltet das interne Regelsystem den Elektrolyseur ab, weil die beiden Gasströme kontinuierlich analysiert werden.

Eine Gasanalyse war in Ilford nur stündlich vorgesehen. Bei einer Befragung des Betriebspersonals stellte sich heraus, daß die Analyse nur sporadisch ca. 2-3 mal pro Schicht durchgeführt worden ist.

Weiterhin findet am PHOEBUS-Elektrolyseur ständig eine Überwachung der Prozeßparameter wie Druck, Temperatur, Stromdurchfluß etc. statt. Unzulässige Veränderungen dieser Prozeßdaten führen zu einer Anlagenabschaltung. So können hier Korrosionseffekte

aufgrund lang anhaltender Temperaturerhöhungen wie in Ilford ausgeschlossen werden.

Sollte es trotzdem zu einer Störung kommen, die zu einer Vermischung der Produktgase führt, besteht in der Gasanalyse eine weitere Möglichkeit, die Anlage in den sicheren Zustand zu bringen.

Fehler in den Meßfühlern können allerdings dazu führen, daß die Signale zur Anlagenabschaltung trotz Grenzwertserhöhung nicht erfolgen. Da es sich bei den Prozeßparametern und bei der Gasanalyse um unterschiedliche Messungen handelt, ist allerdings ein gleichzeitiger Ausfall aller Meßfühler sehr unwahrscheinlich.

Nimmt man trotzdem konservativ an, daß es zu einer unbemerkten Vermischung der Gase im Separator kommt, ist aufgrund der Dimensionierung des Elektrolyseurs keine heftige Reaktion zu erwarten.

Zum Vergleich: Der Ilford Elektrolyseur bestand aus 540 Zellen mit einer Produktionsrate von insgesamt ca. $920 \text{ m}^3 \text{ H}_2/\text{h}$. Der PHOEBUS-Elektrolyseur besteht nur aus 21 Zellen mit einer maximalen Produktionsrate von $6,5 \text{ m}^3 \text{ H}_2/\text{h}$. Dementsprechend kleiner sind auch die Separatoren ausgelegt. Bei einem Betriebsdruck von 7 bar beträgt das Volumen $0,108 \text{ Nm}^3$. In diesem Behälter kann sich keine gefährliche Menge an Gasen ansammeln, zumal die Separatoren noch zu 50 % mit KOH gefüllt sind. Der darin enthaltene Anteil an Gas beträgt nur einige ml/l. Falls bei einem Diaphragmariß zusätzlich die Gasanalyse ausfällt, ist nicht mit einer Reaktion wie in Ilford zu rechnen. Nach Kalkulationen bezüglich des Schadensausmaßes entsprach in Ilford die freigesetzte Energie 22 kg TNT. Im PHOEBUS-Elektrolyseur würde eine Energie kleiner als 0,1 kg TNT erreicht (Kap. 5.3).

4.3 Betriebserfahrungen und Risiken der Wasserstoff-Speicherung

Bei Elektrolyseanlagen mit H_2 -Speicherung zur Rückverstromung (PHOEBUS-Anlage) oder Prozeßnutzung in der Chemie oder Mineral-ölgwirtschaft bilden die H_2 -Speicher das größte Gefährdungspotential. In ihnen wird der produzierte Wasserstoff hochverdichtet gelagert.

Ein spektakulärer Schaden an einem solchen Wasserstofftank ereignete sich am 5. Oktober 1991 im Hanauer Werk der Fa. Heraeus, die dort Glasfaserkabel und ähnliche Produkte herstellt /Behrendl/. Hierfür wird als Brenngas ständig Wasserstoff in größerer Menge benötigt.

Zu diesem Zweck befand sich seit 1982 auf dem Werksgelände ein Druckspeicher (100 m^3 , max. Betriebsdruck 44 bar) für gasförmigen Wasserstoff, der mehrere Male in der Woche nachgefüllt wurde. Etwa eine halbe Stunde nach dem letzten Füllvorgang barst dieser Behälter am Samstagmorgen gegen 5.12 Uhr und setzte den Wasserstoff frei, der sich entzündete und umfangreiche Zerstörungen auf dem Werksgelände und an zahlreichen Wohnhäusern (Dach- und Glasschäden) in einem Umkreis von über 1000 m anrichtete. Der Behälterdeckel fand sich 300 m entfernt auf dem Hanauer Bahnhof wieder. Es gab wegen des Zeitpunktes nur geringfügigen Personenschaden.

Vom Bundesamt für Materialforschung und -prüfung und vom RWTÜV Essen wurde dieser Vorfall untersucht; die Ergebnisse sind in /Behrendl und 2/ veröffentlicht.

4.3.1 Beschreibung des 'Hanauer'-Wasserstoffspeichers

Der 1976 für die Fa. Messer-Griesheim hergestellte Behälter wurde 1982 nach Umbau und Wasserdruckprobe bei der Fa. Heraeus in Hanau aufgestellt. Er wurde in seiner Lebenszeit etwa 1450 mal befüllt und dabei Druckschwankungen zwischen 15 und 45 bar ausgesetzt.

Der zylindrische Behälter aus dem Werkstoff TTSTE 47 hatte einen Durchmesser von 2,8 m, eine Wandstärke von 22 mm und eine Gesamthöhe von 16 m. Der zylindrische Teil bestand aus sieben durch Rundschweißnähte verbundenen Zylinderschüssen. Der zylindrische

drische Teil war an beiden Enden durch Korbbogenböden abgeschlossen. Der Behälter war stehend mit einer Standzarge verschweißt, die mit einer Betonplatte verschraubt war. Am oberen Korbbogen befand sich ein Stutzen (ϕ 50 mm), über den der Behälter gefüllt und entleert wurde. Die Druckabsicherung erfolgte über ein Sicherheitsventil mit einem Ansprechdruck von 48,5 bar /Behrendl/.

4.3.2 Schadensursachen

Die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) schließt ein Versagen des Behälters durch unzulässigen Überdruck infolge einer Explosion innerhalb des Behälters sowie Beschädigungen bei den Prüfungen aus.

Der Behälter wurde dreimal für die Durchführung von Prüfungen geöffnet (1976 nach der Herstellung, 1982 nach dem Umbau, 1987 für die WKP). Nicht völlig geklärt ist der mögliche Einfluß der zweimaligen Wasserdruckprüfung unter 57 bar auf das Verhalten etwa vorhandener Risse.

Als versagensauslösende Schädigung wird ein halblinsenförmiger Riß angesehen, der sich neben der Längsschweißnaht in der Mitte des siebten und obersten Zylinderschusses während der Lebenszeit des Behälters auf einer Länge von 780 mm und einer Tiefe von bis zu 20 mm entwickeln konnte.

Der Entstehungsort wird als ein Bereich hoher Spannungskonzentration angesehen, die durch eine große Nahtüberhöhung, einen abrupten Nahtübergang zum Grundwerkstoff und eine Aufdachung der Naht (Überhöhung der nicht rund gewalzten Enden der Schüsse) von ca. 8 mm entstanden ist.

Die Ermüdungsrißinitiation und das Ermüdungsrißwachstum bis zur versagensauslösenden Größe wurden durch das Zusammenwirken mit dem Druckwasserstoff begünstigt. Ein Werkstoffeinfluß auf das Rißwachstum konnte nicht nachgewiesen werden.

Die das Versagen des Behälters auslösenden Schädigungen basieren auf werkstoff-, fertigungs- und betriebsbedingten Langzeiteinflüssen. Hinzu kommen betriebsbedingte Langzeiteinflüsse durch

die zyklischen Belastungen beim periodischen Füllen und Entleeren des Behälters.

Die BAM kommt bei ihren Untersuchungen letztlich zu der Schlußfolgerung, daß das Behälterversagen vor allem auf die Qualitätsabweichungen bei der Fertigung zurückzuführen ist und der Schaden hätte vermieden werden können, wenn die Bruchausgangsstelle bei der Innenbesichtigung während der WKP gefunden worden wäre /Behrend2/.

4.3.3 Übertragbarkeit des Störfalls

4.3.3.1 Beschreibung der PHOEBUS-Gasspeicher

Für die Speicherung der im Elektrolyseur produzierten Gase H_2 und O_2 ist die Verwendung ehemaliger Heliumbehälter der inzwischen stillgelegten ADAM/EVA-Anlage vorgesehen.

Die 18 kleinen Behälter, die den Wasserstoff aufnehmen, werden in zwei Behälterbatterien zusammengefaßt und setzen sich aus acht Behältern (Fabrikationsnummern 927-821-1N bis 8N, Baujahr 1970) mit einem Volumen von je 1600 l und 10 Behältern (lfd. Nr. 1-10, Baujahr 1971-83), mit einem Volumen von je 1400 l zusammen. Die zulässigen Betriebsdrücke liegen bei 170 bzw. 150 bar.

Die Zwischenspeicherung (7 bar) erfolgt in einem großen Behälter (F.-Nr. 2866-07, Baujahr 1974) mit einem Volumen von 25 m³ und einem zulässigen Betriebsdruck von 71 bar.

Der TÜV Rheinland hält in seiner Sicherheitstechnischen Begutachtung /TÜV/ die vorhandenen Heliumbehälter für die Aufnahme des Wasser- bzw. Sauerstoffs für geeignet.

Das lange schlanke zylinderförmige Design der 18 Heliumbehälter ähnelt vom Erscheinungsbild üblichen Hochdruckflaschen. Der Begriff 'Hochdruckflasche' findet sich denn auch teilweise in den technischen Unterlagen wieder /ASS/.

Die ersten acht Behälter haben einen Außendurchmesser von 572 mm, eine Wandstärke von 25 mm und eine Gesamtlänge von 7830 mm. Die Abmessungen der übrigen 10 Behälter betragen: 419 mm, 9 mm und 11555 mm.

Als Werkstoff wurde 36 Mn4 (Streckgrenze 353 N/mm^2) bzw. 34 CrMo4 (755 N/mm^2) verwendet.

Die 18 'kleinen' Behälter sind aus nahtlos gewalzten Rohren gefertigt, die an beiden Enden halbrund zugeschmiedet und mit eingeschraubten und verschweißten Stopfen versehen sind (Abb. 4.3.3.1-1). Sie sind über die Anschlußleitungen ($\phi_i=21 \text{ mm}$) untereinander verbunden. In der gemeinsamen Sammelleitung befindet sich vor dem Druckmindererventil (150 - 7 bar) ein federbelastetes Sicherheitsventil (150 bar Ansprechdruck).

Der große Heliumbehälter für die H_2 -Zwischenspeicherung hat einen Außendurchmesser von 1900 mm, eine Wandstärke von 28 mm und eine Gesamtlänge von 10,3 m einschließlich Stutzen. Der zylindrische Teil setzt sich aus zwei halbkreisförmigen Schalen, die längsverschweißt sind, zusammen. Die beiden Enden sind als Korbbögen ausgeführt und mittels Rundnaht an den zylindrischen Teil angeschweißt.

Der Behälter ist liegend angeordnet und ruht auf zwei angeschweißten Stahlzargen, die auf Betonfundamenten angeschraubt sind. Der Stutzen für die Überdrucksicherung befindet sich oben auf der Längsachse des Behälters. Im Zentrum des vorderen Korbbogens ist ein Mannlochstutzen mit einem Durchmesser von $\approx 500 \text{ mm}$ eingeschweißt. Der Mannlochdeckel ist mit 24 Schrauben auf dem Stutzen befestigt.

Im vorderen Korbbogen gibt es im oberen Drittel zwei kleinere, verschließbare Öffnungen ($\phi \approx 60 \text{ mm}$) und eine unten am Anfang des zylindrischen Behälterteils.

Die Schweißnähte des Behälters weisen außen keine scharfen Übergänge zum Grundwerkstoff und nur eine geringe Überhöhung ($\approx 1 \text{ mm}$) aus. Allerdings sind die Nähte, wie zu sehen ist, beschliffen worden, was auch ein entsprechendes Prüfblatt des TÜV Rheinland zur Oberflächenrißprüfung aus dem betreffenden Druckbehälterbuch belegt. Danach mußten 1984 zahlreiche Oberflächenrisse in den Nahtübergangszonen der Stumpf- und Kehlnähte ausgeschliffen werden. Die abschließende Beurteilung durch den TÜV ergab keine Oberflächenschäden mehr.

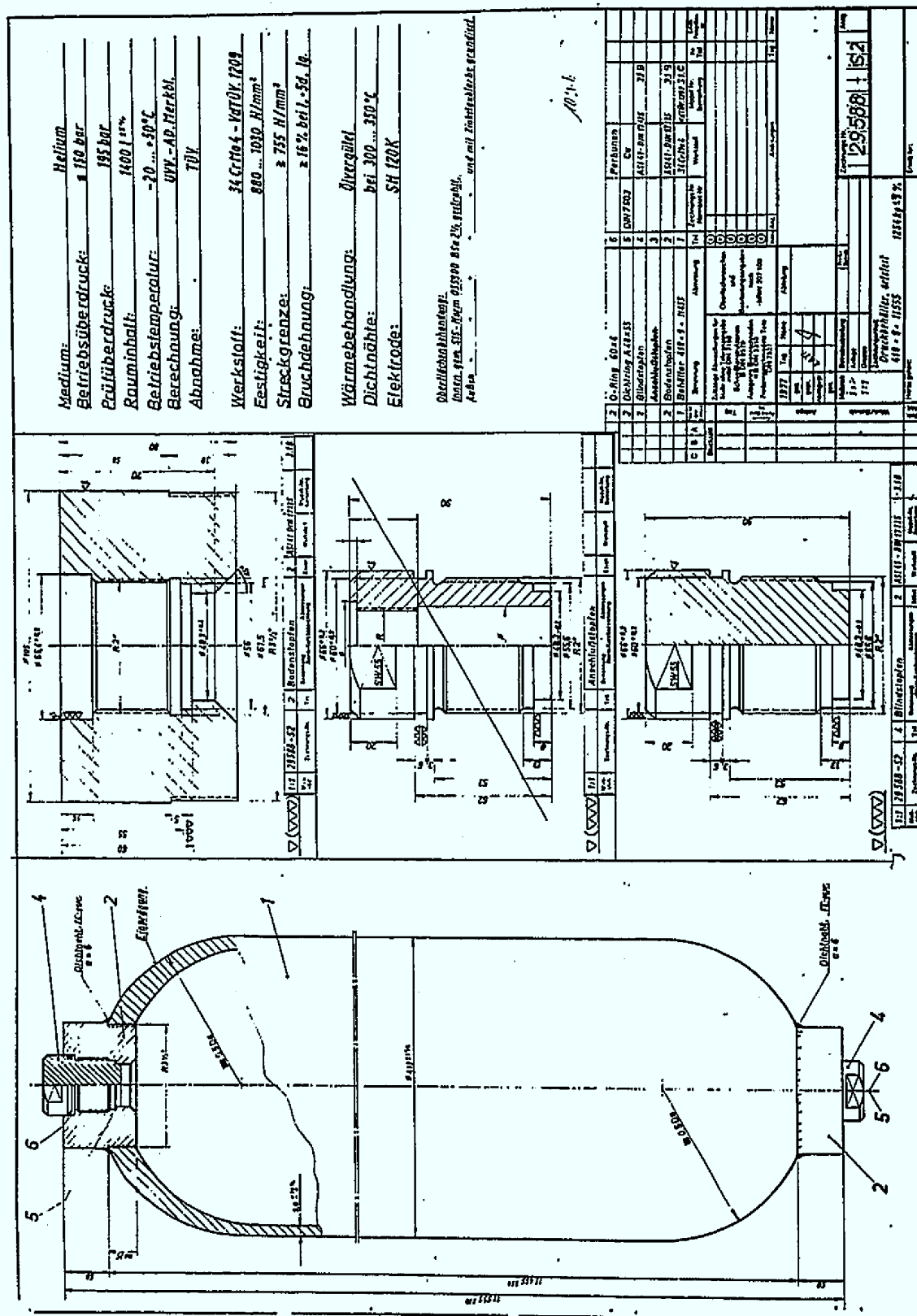


Abb. 4.3.3.1-1: Wasserstoff-Speicherbehälter

4.3.3.2 Wiederkehrende Prüfungen

Bei KFA-ASS wurden die zugehörigen Druckbehälterbücher hinsichtlich Hersteller, Materialdaten, Fertigungsverfahren und Ergebnisse der wiederkehrenden Prüfungen (WKP) eingesehen.

Die letzte WKP der ersten acht 'H₂'-Behälter (Wasserdruckprüfung bei 221 bar) erfolgte am 12.8.1993 aus Anlaß der geplanten Nutzungsänderung. Die vorletzte WKP, die neben der Wasserdruckprüfung auch eine Innenbesichtigung enthielt, fand im September 1989 statt. Die Innenbesichtigung erfolgte mit dem Hensold-Innenbesichtigungsgerät. Es gab keine Beanstandungen. Laut beiliegender TÜV-Bescheinigung sollen beide Prüfungen im Abstand von 8 Jahren erfolgen.

Die letzte und vorletzte Prüfung der anderen 10 Behälter erfolgte etwa zeitgleich nach dem gleichen Schema; die Wasserdruckprüfung erfolgt hier bei 195 bar. Die Prüfberichte weisen keine Beanstandungen aus.

Der große Behälter wurde letztmalig im August 1993 druckgeprüft (195 bar); die letzte Innenbesichtigung war im Dezember 1990. Es gab auch hier keine Beanstandungen.

Für den großen Behälter wird die Prüffrist für die Innenbesichtigung mit 5 und für die Druckprüfung mit 10 Jahren ausgewiesen.

4.3.3.3 Übertragbarkeit des Hanauer-Druckbehälterversagens

Die Versagensursache des 'Hanauer'-Wasserstoff-Druckbehälters geht nach einer Untersuchung der BAM /Behrend2/ vor allem auf Qualitätsabweichungen bei der Verschweißung der Behälterschüsse (hohe Spannungskonzentration) in Verbindung mit einer hohen Lastwechselzahl und der Einwirkung des Druckwasserstoffs auf das Rißwachstum zurück.

Bedingt durch die nahtlose Fertigung der 'kleinen' Behälter aus gewalzten Rohren entfällt für diese die 'Hanauer'-Versagensursache. Die Anzahl der Lastwechsel liegt erheblich niedriger.

Die Entstehung eines Ermüdungsrissses bei der zukünftigen Nutzung wird daher als sehr unwahrscheinlich angesehen, zumal es eigentlich keinen richtigen Lastwechsel mehr gibt (Entleerung und Befüllung erstreckt sich über Monate).

Geht man ferner von der Gültigkeit des Prüfbefundes der letzten Innenbesichtigung aus, der keine Schäden (Risse) ausweist, ist auch der Wechsel des Mediums von Helium zu Wasserstoff als unkritisch anzusehen.

5. Probabilistische Analysen

Die probabilistische Zuverlässigkeits- und Risikountersuchung der PHOEBUS-Anlage hat zum Ziel, das Sicherheitskonzept der Anlage hinsichtlich einer Reihe zu betrachtender störfallauslösender Ereignisse zu bewerten. Von diesen Ereignissen ausgehend werden Ereignisabläufe identifiziert und bewertet, die bei Ausfall der zugehörigen Sicherheitsmaßnahmen zu einer Gefährdung von Personen führen. Wie in probabilistischen Analysen üblich, sind Störfälle, deren Folgen auf den unmittelbaren Arbeitsplatz beschränkt bleiben, nicht Untersuchungsgegenstand.

5.1 Methodik der probabilistischen Analysen

Das generelle Vorgehen und einzelne Schritte bei einer Zuverlässigkeits- und Risikountersuchung sind in Abb. 5.1-1 verdeutlicht. Am Beginn steht die Identifizierung von Gefahrenpotentialen durch Aufsuchen sensitiver Bereiche (Abb. 5.1-2) und relevanter störfallauslösender Ereignisse (Tabelle 5.2-1). Ausgehend von einem solchen Ereignis (z.B. H_2 -Leck in der Halle) wird die Verfügbarkeit von Einrichtungen und Maßnahmen zur Störfallbeherrschung in einem Ereignisbaum abgefragt (Abb. 5.4.2.7-1). Je nach Verfügbarkeit oder Nichtverfügbarkeit der Einrichtungen und Maßnahmen entstehen Verzweigungen; jeder Zweig stellt einen der möglichen Ereignisabläufe dar. Für Abläufe mit nein-Verzweigungen werden die Auswirkungen analysiert (z.B. H_2 -Konzentration).

Für das auslösende Ereignis wird eine Häufigkeit pro Jahr ermittelt (meist Statistik, eventuell Abschätzung). Die Wahrscheinlichkeiten für die Nichtverfügbarkeit von Einrichtungen oder Maßnahmen werden bei komplexen Zusammenhängen mit Hilfe von Fehlerbäumen ermittelt, ansonsten werden bekannte Nichtverfügbarkeiten unmittelbar eingesetzt oder aus vergleichbaren Betriebserfahrungen abgeleitet. Bei neuartigen technischen Systemen wie im Fall der PHOEBUS-Anlage sind in Einzelfällen auch ingenieurmäßige Abschätzungen erforderlich (Tab. 5.1-1: Komponenten-daten).

Die Häufigkeiten der einzelnen Verzweigungen entstehen durch Multiplikation der Häufigkeit des auslösenden Ereignisses und der Wahrscheinlichkeiten der Nichtverfügbarkeiten.

Zur Risikoermittlung sind Häufigkeiten und Schäden zu verknüpfen.

Zur Ermittlung der Gefährdung durch eine Freisetzung von Wasserstoff in Räume (Halle, Hallenfluchtgang) werden die globalen H_2 -Konzentrationen mit dem Rechenprogramm RALOC errechnet (Kap. 6).

Wasserstoff-Luft-Gemische unterhalb einer H_2 -Konzentration von ca. 4 % sind nicht zündfähig. Global auftretende Schäden sind daher unterhalb dieser Konzentration in Räumen nicht möglich. Lokale Schäden aufgrund lokal höherer Konzentrationen, die im Rechenprogramm RALOC nicht erfaßt werden, sind jedoch nicht auszuschließen.

Bei H_2 -Konzentrationen von ca. 4 % bis ca. 10-12 % kommt es bei Zündung in Räumen zu einer deflagrativen Verbrennung. Durch die auftretenden Drücke und Temperaturen ist mit stärkeren Schäden zu rechnen. Bei einer Zündung von H_2 -Luft-Gemischen mit einer Konzentration über 10-12 % ist eine detonative Verbrennung wahrscheinlich.

Bei einer Zündung von H_2 -Luft-Gemischen außerhalb von Gebäuden werden die Schäden nach einem TNT-Energieäquivalent ermittelt, da die Korrelation zwischen der Energiefreisetzung bei Zündung von TNT und den resultierenden Schäden hinreichend genau bekannt ist. Die Abschätzung ergibt im allgemeinen konservative Schadenswerte.

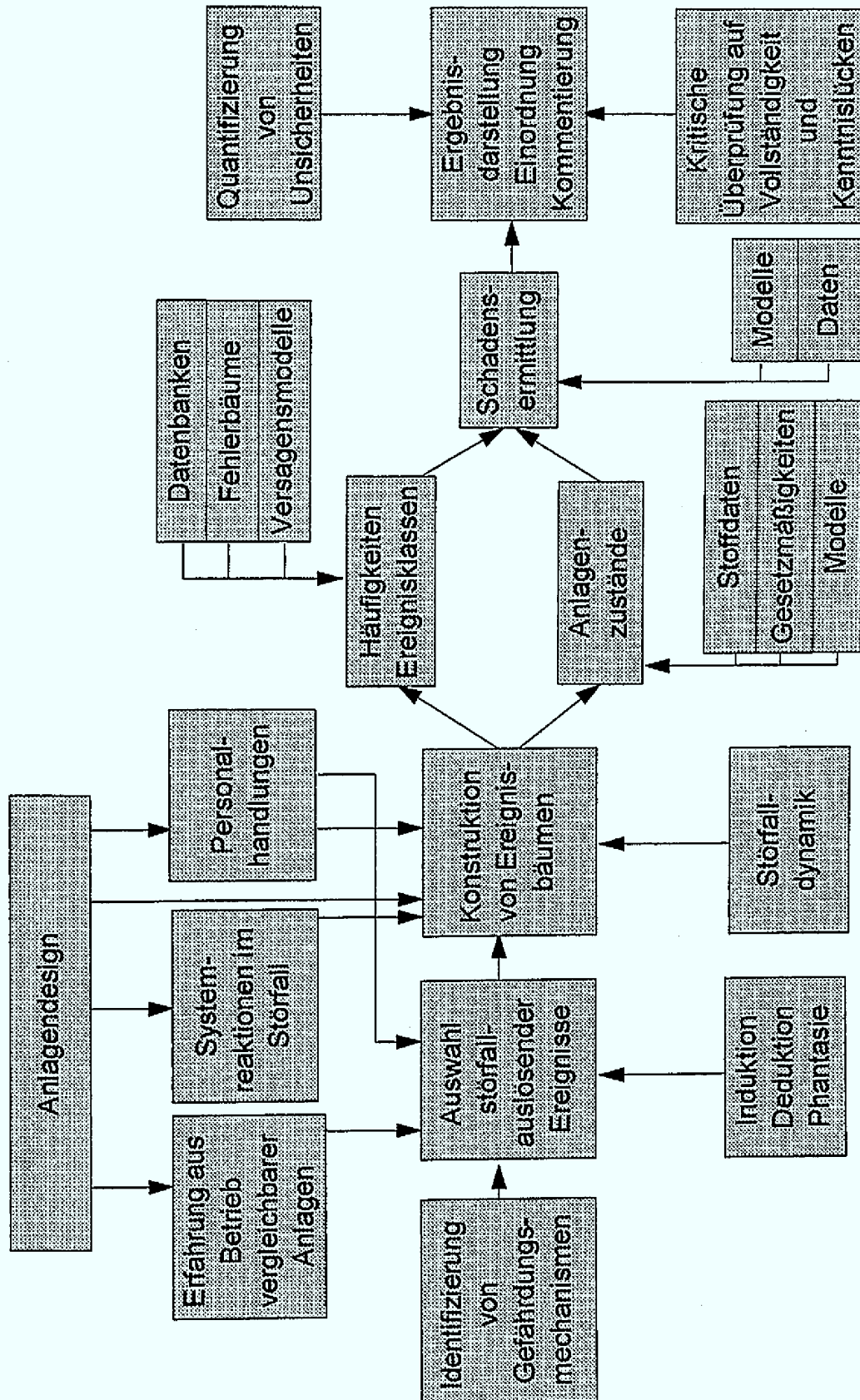


Abb. 5.1-1: Schritte einer probabilistischen Risikoanalyse

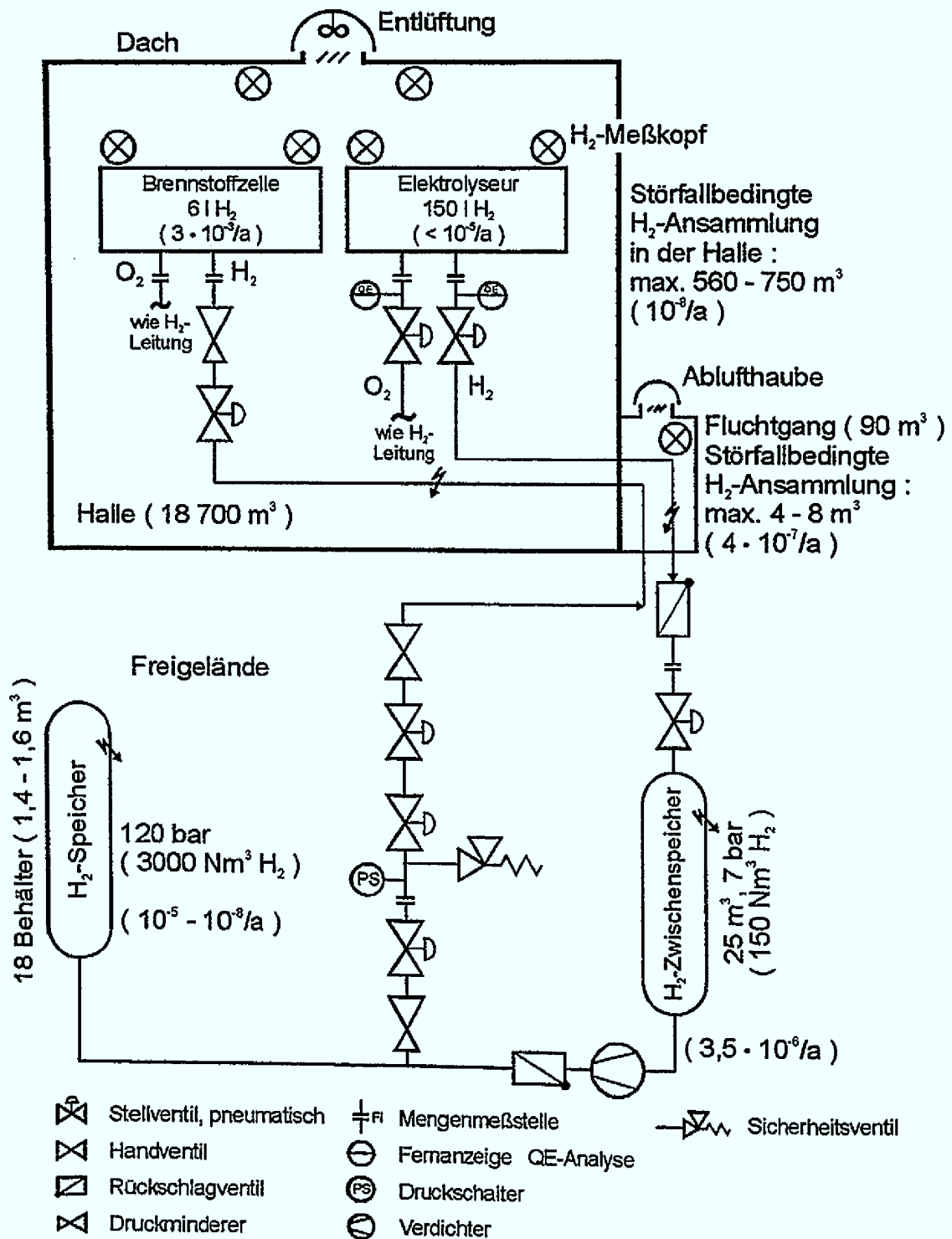


Abb. 5.1-2: Anlagenschema mit Schutzeinrichtungen,
H₂-Gefahrenpotentialen und störfall-
bedingten Freisetzungshäufigkeiten

Komponente, Ausfallart	Wahrschein- lichkeit pro Anforderung	Quelle
H ₂ -Meßkopf spricht nicht an	2,3E-2	Nullfehlerstatistik der IEV-Meß- köpfe bei 44 Einzelprüfungen
6v6 H ₂ -Meßköpfe sprechen nicht an	4E-4	Geschätzter Anteil für Ausfall aus ge- meinsamer Ursache (GVA) = 2 %; abge- leitet aus generischen GVA-Daten (Risikostudie KKW Biblis, Phase B)
Druckwächter PS 106 spricht nicht an	3,6E-2	auf Auswertung von Betriebser- fahrungen im KKW Biblis beruhend
Durchflußmessung FIR 102 bzw. 103 spricht nicht an	3E-2	aus Risikostudie KKW Biblis abge- leitet (Verstopfung an Durchfluß- kanälen $\lambda = 6,9E-6/h$)
Pneumatisches Ab- sperrventil schließt nicht	1E-2	auf Auswertung von AVR-Betriebs- erfahrungen mit pneumatischen He-Ventilen basierend
Pneumatische Ab- sperrventile 103.1 und 103.2 schließen nicht	5E-4	aus generischen GVA-Daten (ameri- kanische Betriebserfahrungen bzw. Risikostudie KKW Biblis) für Motorventile abgeleitet
Sicherheitsventil SV-106 öffnet nicht	2,7E-3	auf Angaben in /Jül-388/ beruhend
Handventil HV-101 schließt nicht	4,4E-3	auf Auswertung von Betriebser- fahrungen im KKW Biblis beruhend
Handventil HV-101 nicht/ nicht recht- zeitig geschlossen	0,17	auf Bewertung menschlicher Fehl- handlungen nach SWAIN-Modell beruhend
Ventilator startet nicht	2,4E-2	auf Auswertung von Betriebser- fahrungen im KKW Biblis beruhend
3v3 Ventilatoren starten nicht	3E-4	aus Risikostudie KKW Biblis abgeleitet
Rückschlagventil schließt nicht innere Leckage	3,5E-3 1,7E-2	auf Auswertung von Betriebserfahrungen im KKW Biblis beruhend
Fehlerhaft installierte Rohrverbindung	1E-4 pro Verbindung	auf repräsentative Raten mensch- licher Fehler basierend (106 Feh- ler pro 1E6 Arbeitsgänge)
Druckminderventil Druck schlägt durch	5E-4	auf Nullfehlerstatistik im KKW Biblis beruhend

Tab. 5.1-1: Verwendete Zuverlässigkeitskenngrößen

5.2 Störfallauslösende Ereignisse

Störungen oder Schäden an Komponenten und Anlagenteilen, die Anforderungen an Sicherheitseinrichtungen auslösen, werden als auslösende Ereignisse bezeichnet.

Von Bedeutung sind Ereignisse, die eine Freisetzung von Wasserstoff zur Folge haben. Die Ursachen können Undichtigkeiten, Risse und Brüche bis hin zum Behälterbersten sein. Ereignisse dieser Art können spontan auftreten oder durch Fehler im Prozeßablauf sowie durch Einwirkungen von außen hervorgerufen werden.

Bedienungsfehler spielen bei der PHOEBUS-Anlage eine untergeordnete Rolle. Der Betrieb der Anlage und die Auslösung von Schutzaktionen sind vollautomatisiert. Der Elektrolyseur und die Brennstoffzelle werden zudem über autonome Überwachungseinrichtungen automatisch abgeschaltet, falls Prozeßparameter Grenzwerte überschreiten.

Störungen in der Energieversorgung der Anlage durch Ausfälle des Netzes sind für die Sicherheit der Anlage unkritisch. Durch Abfall der Haltemagnete schließen alle pneumatischen Absperrventile 'fail safe'. Nach erfolgter Abschaltung über die batteriegepufferte Betriebssteuerung müssen für den sicheren Einschluß des Wasserstoffs keine aktiven Einrichtungen (z.B. Kühlung) dauerhaft funktionieren und mit Energie versorgt werden.

Das alleinige Einschlußversagen der nur geringe H_2 -Mengen führenden Komponenten ($< 0,3 \text{ Nm}^3$) ist hinsichtlich zündfähiger H_2 /Luftgemische auch bei konservativer Betrachtung des Ausbreitungsverhaltens der H_2 -Wolke in der großen Halle unkritisch. Daher müssen neben dem Einschlußversagen dieser 'H₂-Kleinstspeicher' zusätzliche Fehler auftreten, in deren Folge zündfähige Mengen H_2 freigesetzt werden. Dies kann zum einen der fälschliche Weiterbetrieb des Elektrolyseurs nach Auftreten eines äußeren Lecks ($< 7 \text{ Nm}^3$) mit zusätzlichem Ausfall des Gaswarnsystems der Halle bewirken, oder eine nichtfunktionierende Absperrung der Verbindungsleitungen zwischen 'H₂-Speicherbehältern' und Hallen-Komponenten, nach Auftreten eines H_2 -Lecks innerhalb der Halle.

Außerhalb der Halle ist für die Bildung zündfähiger Gasgemische eine rasche Freisetzung des Wasserstoffs aus den Hochdruckspeichern erforderlich, z.B. infolge von Behälterbersten, oder durch Versagen von Anschlußleitungen.

Aus der Ereignisgruppe 'Einwirkungen von außen' auf die Anlage sind der Flugzeugabsturz, Erdbeben und Druckwellen zu betrachten. Der Flugzeugabsturz auf die Speicheranlage mit der Folge großer H_2 -Freisetzungen ist vernachlässigbar selten. Schwere Erdbeben verursachen maximal den Abriß von Anschlußleitungen. Sie sind durch andere häufigere Ereignisse gleichen Schadens abgedeckt. Dies gilt auch für extreme Erdbeben (makroseismische Intensität IX) hinsichtlich Behälterschäden.

Erdbebenbedingte Zerstörungen der Halle erschweren die Bildung zündfähiger Gaskonzentrationen. Andere, durch häufigere Ereignisse verursachte H_2 -Lecks decken erdbebenbedingte Lecks daher in zweifacher Hinsicht ab.

Druckwellenereignisse, beispielsweise durch Explosionen im benachbarten Gaslager ausgelöst, wurden nicht untersucht.

Die Eintrittshäufigkeiten der H_2 -Freisetzungen und deren Ursachen sind in Tab. 5.2-1 angegeben.

Bezeichnung	Eintrittshäufigkeit/a	Ursache
KOMPONENTENINTERNE H₂-STÖRFÄLLE		
1. Inneres H ₂ -Leck im Elektrolyseur mit Eintrag von 0,3 Nm ³ /h H ₂ in O ₂	1E-5	Diaphragmabruch
2. Inneres Leck in der Brennstoffzelle mit Vermischung von H ₂ und O ₂	3,4E-3	Versagen Druckminderventil
3. Äußeres Leck der Brennstoffzelle mit Austritt von H ₂ in die Halle	1,2E-3	Ausfall Elektrolyt-P. u. Temperaturmessung
H₂-LECKAGEN IN DIE HALLE		
1. Kleines Leck (<7 Nm ³ /h) in der Leitung vom Elektrolyseur zum Zwischenspeicher (7 bar)	1E-3	Leckage Klemmringverschraubung
2. Kleines Leck (<10 Nm ³ /h) in der Leitung zur Brennstoffzelle (7 bar)	1E-3	Leckage Klemmringverschraubung
3. Mittl. Leck (10-120 Nm ³ /h) in der Leitung zur Brennstoffzelle (7 bar)	1E-3	Leckage - Versagen Klemmringverschraub.
4. Großes Leck (120-600 Nm ³ /h) in der Leitung zur Brennstoffzelle (150 bar)	5E-5	Vers. Druckminderventil u. Folgeversagen Klemmringverschraub.
H₂-LECKAGEN IN DEN FLUCHTGANG		
1. Kleines Leck (<7 Nm ³ /h) in der Leitung vom Elektrolyseur zum Zwischenspeicher (7 bar)	2E-4	Leckage Klemmringverschraubung
2. Kleines Leck (<10 Nm ³ /h) in der Leitung zur Brennstoffzelle (7 bar)	3E-4	Leckage Klemmringverschraubung
3. Mittl. Leck (10-120 Nm ³ /h) in der Leitung zur Brennstoffzelle (7 bar)	3E-4	Leckage - Versagen Klemmringverschraub.
4. Großes Leck (120-600 Nm ³ /h) in der Leitung vom Elektrolyseur zum Zwischenspeicher mit Rückwärtsentleerung (7 bar)	2E-4	Versagen Klemmringverschraubung

Tab. 5.2-1: Liste der auslösenden Ereignisse

Bezeichnung	Eintrittshäufigkeit/a	Ursache
H₂-LECKAGEN IN DIE UMGEBUNG		
1. Bersten eines Hochdruck-Speicherbehälters (150 bar)	6,3E-5	Spontanes Versagen
2. Bersten des Niederdruck-Zwischenspeichers (7 bar)	3,5E-6	Spontanes Versagen
3. Großes Leck in Behälter-Anschlußleitung	3E-3	Versagen Klemmringverschraubg.
ANLAGENEXTERNE EREIGNISSE		
Flugzeugabsturz auf Lagerbehälter	< 1E-8	
Erdbeben, makroseismische Intensität VIII	1,3E-4	
Erdbeben, makroseismische Intens. VIII-IX	1E-5	
Druckwellen	nicht analysiert	

Anmerkungen zu Tab. 5.2-1 und 5.1-1

Wegen der Neuartigkeit der Anlage beruhen die Angaben in Tabelle 5.2-1 und 5.1-1 weitgehend auf generischen Daten und in Einzelfällen auf Abschätzungen und sind daher mit Unsicherheiten behaftet.

So beruht z.B. die Häufigkeit für das spontane Bersten eines Speicherbehälters auf einer schadensstatistischen Auswertung für konventionelle Druckbehälter durch den TÜV. Bei einem mittleren Bestand von 33000 zu prüfender Behälter über einen Zeitraum von 1959-76 traten 21 relevante Zerknalle in annähernd 6 Mio. Behälter-Betriebsjahren auf.

Daraus ergibt sich eine mittlere Zerknallrate von 3,5E-6 pro Behälterjahr. Die aufgetretenen Zerknalle haben ihren Ausgang überwiegend an Schweißnähten genommen. Vom H₂-Zwischenspeicher abgesehen, sind die Hochdruckspeicher Walzkonstruktionen. Hierfür ist die Übertragung des obigen Wertes als konservativ anzusehen.

Die Wahrscheinlichkeit für den Zerknall eines beliebigen der 18 Hochdruckbehälter ergibt sich zu 6,3E-5/a.

5.3 Wasserstoff-Störfälle innerhalb der Komponenten

Wie eingangs erwähnt, ist bereits bei einer Konzentration von 4 % Sauerstoff in Wasserstoff mit einer heftigen Reaktion zu rechnen. Der Elektrolyseur ist hierbei von besonderem Interesse, weil aufgrund der Bauweise eine direkte Vermischungsmöglichkeit zwischen Wasserstoff und Sauerstoff besteht. Diese Vermischungsmöglichkeit ist sowohl in der Elektrolyseeinheit als auch im Gasabscheider gegeben. Ursache für eine Durchmischung im Gasabscheider sind Druckunterschiede im System, so daß je nach vorliegender Situation der Wasserstoff zum Sauerstoff und umgekehrt strömen kann.

Weiterhin besteht eine allmähliche Vermischungsmöglichkeit im Elektrolyseur durch ein undichtiges Diaphragma oder durch Diffusion z.B. bei einem zu niedrigen Strom.

Die dem Elektrolyseur nachgeschaltete Gasreinigungsanlage (GRA) kann bezüglich einer Bildung zündfähiger Gemische ausgeschlossen werden, weil beide Gase einen separaten Reinigungsstrang haben. Es besteht nur die Möglichkeit, daß ein bereits im Elektrolyseur durchmischter Gasstrahl die Reinigungsanlage passiert. Soweit die Reinigungskapazität ausreicht, wird der Strahl gereinigt und strömt dann in den Speicher. Da die GRA in sich geschlossen ist und nur aus einem Katalysatorbett und einer Kühlschlange besteht, ist eine Zündung innerhalb der GRA sehr unwahrscheinlich.

In der Brennstoffzelle werden wie beim Elektrolyseur Wasserstoff und Sauerstoff gehandhabt. Bei Leckagen innerhalb der Brennstoffzelle wäre eine Durchmischung der beiden Gase denkbar. Da die Brennstoffzelle aus vielen kleinen Zellen aufgebaut ist, die jeweils nur ca. 100 ml H_2 bzw. O_2 enthalten, ist bei einer undichten Zelle aufgrund der geringen Menge nur mit einer schwachen Reaktion zu rechnen. Selbst bei einer Reaktion des gesamten H_2 - und O_2 -Inventars sind aufgrund des Fassungsvermögens von 6 l keine Auswirkungen auf die Halle zu erwarten.

Allerdings ist als Folgeschaden dieser Reaktion mit einer Leckage an der Brennstoffzelle zu rechnen. Durch die Verbindung der Brennstoffzelle mit dem Speicher könnte über diese Leckage eine Freisetzung des Speicherinventares in die Halle erfolgen.

Da nur die Brennstoffzelle und der Elektrolyseur von den in der Halle untergebrachten Komponenten ein nennenswert großes Gefährdungspotential besitzen, beschränkt sich die probabilistische Untersuchung auf diese beiden Komponenten.

5.3.1 Beschreibung des Elektrolyseurs

Die installierte Anlage zur Wasserstofferzeugung ist ein fortschrittlicher Druckelektrolyseur, bei dem die Wasserzersetzung mittels alkalischer Wasserelektrolyse erfolgt (siehe Kapitel 1.2.4).

Die Gesamtgestaltung der Anlage besteht aus zwei Einheiten, dem Elektrolyseur und dem Kontrollsteuerschrank. Der Kontrollsteuerschrank ist in der großen IEV-Halle neben der Elektrolyseeinheit aufgebaut. Der Elektrolyseur wird über einen DC/DC-Tiefsetzsteller auf die Nennbetriebsspannung von 35 V gebracht. Er wurde für eine Nennleistung von 26 kW ausgelegt, was der solaren Summenspitzenleistung aller Solarfelder entspricht. Dabei fließt ein Elektrolysestrom von 750 A mit einer Stromdichte von 3 kA/m^2 /Alyzer/.

Wie die schematische Darstellung (Abb. 5.3.1-1) zeigt, besteht der Elektrolyseur aus mehreren Komponenten, die übereinander angeordnet sind.

Im folgenden wird der Prozeßablauf in der Elektrolyseeinheit und die Funktion der einzelnen Komponenten beschrieben. Die Abkürzungen sind dem Flußdiagramm (Abb. 5.3.1-2) entnommen.

Die Anlage besteht zunächst aus dem eigentlichen Elektrolyseblock (EM), der aus 21 Elektrolysezellen in bipolarer Anordnung besteht und mit einem 30 % KOH-Elektrolyten arbeitet.

Die 21 Elektrolysezellen sind elektrisch und geometrisch hintereinandergeschaltet, so daß jede metallische Trennwand, die eine Zelle von der nächsten trennt, bipolar arbeitet, d.h. auf der einen Seite eine Kathode und auf der anderen Seite eine Anode trägt. Zur Verhinderung der wechselseitigen Vermischung der Produktgase Wasserstoff und Sauerstoff wird der Kathoden- und Anodenraum durch ein NiO-Diaphragma getrennt.

Die im Elektrolyseur hergestellten Gase Wasserstoff und Sauerstoff verlassen in getrennten Gaskanälen als Produktgas/Elektrolyt-Wassergemisch den Elektrolyseur und werden jeweils einem Gasabscheider für O_2 (OV) bzw. für H_2 (HV) zugeführt. Die Gasabscheider sind oberhalb des Elektrolyseurs angebracht. Hier wird der Wasserstoff bzw. der Sauerstoff vom Elektrolyten getrennt. Der Elektrolyt wird durch Kühlschlangen, die sich am unteren Ende des Gasabscheiders befinden, abgekühlt und strömt mittels Schwerkraft zum Elektrolyseblock zurück. Das bei der Elektrolyse verbrauchte Wasser wird automatisch über den Wassertank mittels der Wasserpumpe (WP) eingespeist. Auslöser für die Einspeisung ist das Füllstandsmeßsignal LC02 am H_2 -Gasabscheider (HV). Durch oberhalb am Gasabscheider angebrachte Kühlschlangen werden die Gase abgekühlt, um ein Maximum an kondensierter Feuchtigkeit innerhalb des Elektrolyseprozesses zu erzielen.

Die beiden Gasabscheider sind über eine Leitung (SS20) miteinander verbunden. Die Leitung ist wichtig für das Druckgleichgewicht innerhalb des Systems. Es werden dadurch z.B. Druckunterschiede zwischen den Elektrodenräumen, die während des Normalbetriebes entstehen können, ausgeglichen.

Die abgekühlten Gase strömen vom Gasabscheider aus in den oberen Teil des Filters (OF bzw. HF), wo die feuchten Partikel, die sich im Gasstrom befinden separiert und im unteren Teil des Behälters aufgefangen werden. Die Ventile OFV bzw. HFV geben automatisch das gesammelte Kondensat an den Kondensatsammelbehälter (OS bzw. HS) weiter.

Sauerstoff und Wasserstoff, der sich im oberen Teil des Filters ansammelt, wird an die jeweiligen Pufferbehälter (HD bzw. OD) abgegeben. Von dort strömt das Gas über die Gasreinigungsanlage in den jeweiligen Speicher. Das Ventil für die Abgabe des Wasserstoffs (HDV) ist auf einen Druckgrenzwert von 7 bar eingestellt. Erst beim Erreichen dieses Druckgrenzwertes öffnet das Ventil und der Wasserstoff kann zur Reinigung und Speicherung abgegeben werden.

Alle Sammelbehälter und Verbindungsleitungen sind aus hochlegiertem Stahl gefertigt (1.430 1) und für einen Systemdruck von 8 bar ausgelegt.

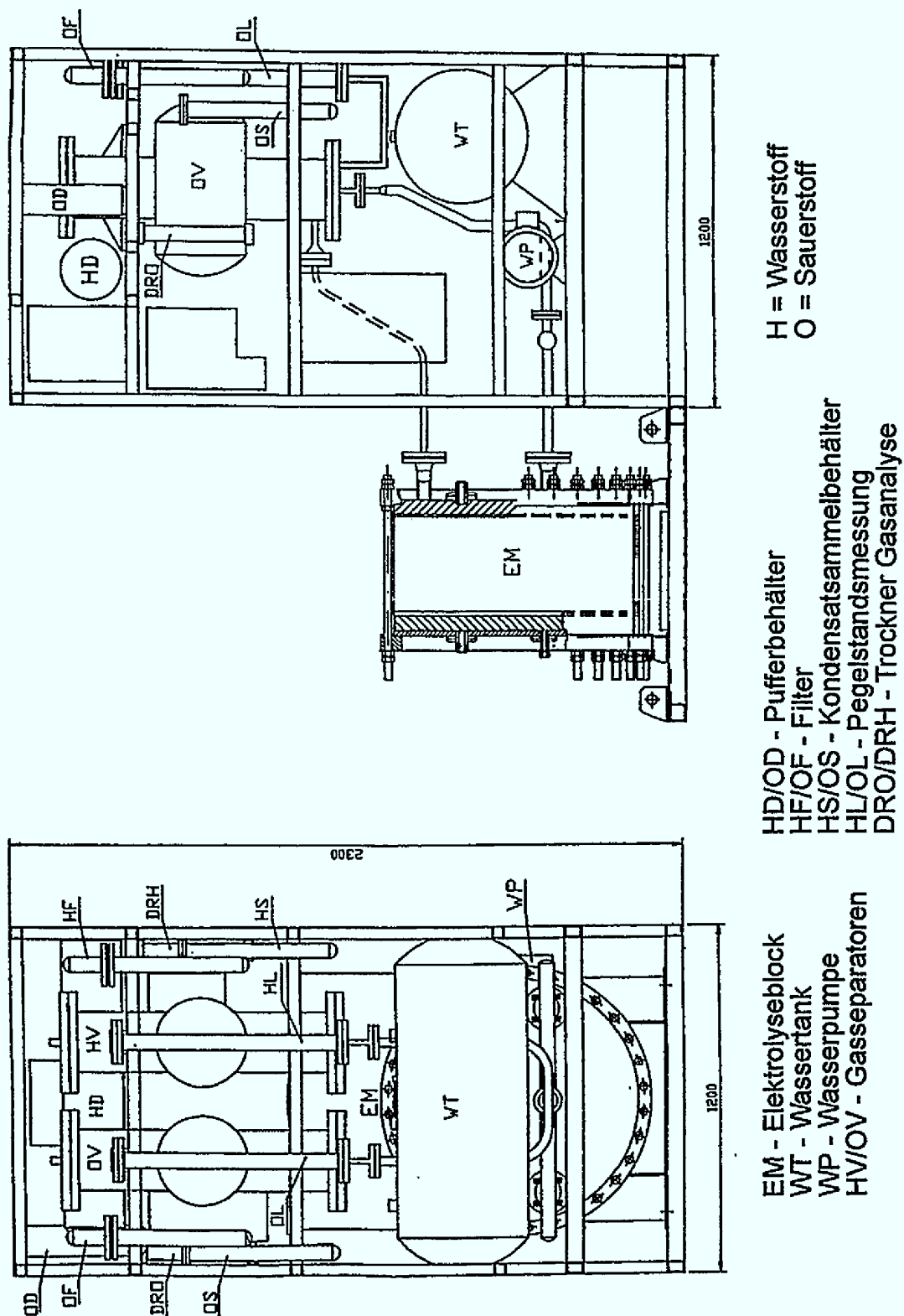


Abb. 5.3.1-1: Schematischer Aufbau des Elektrolyseurs

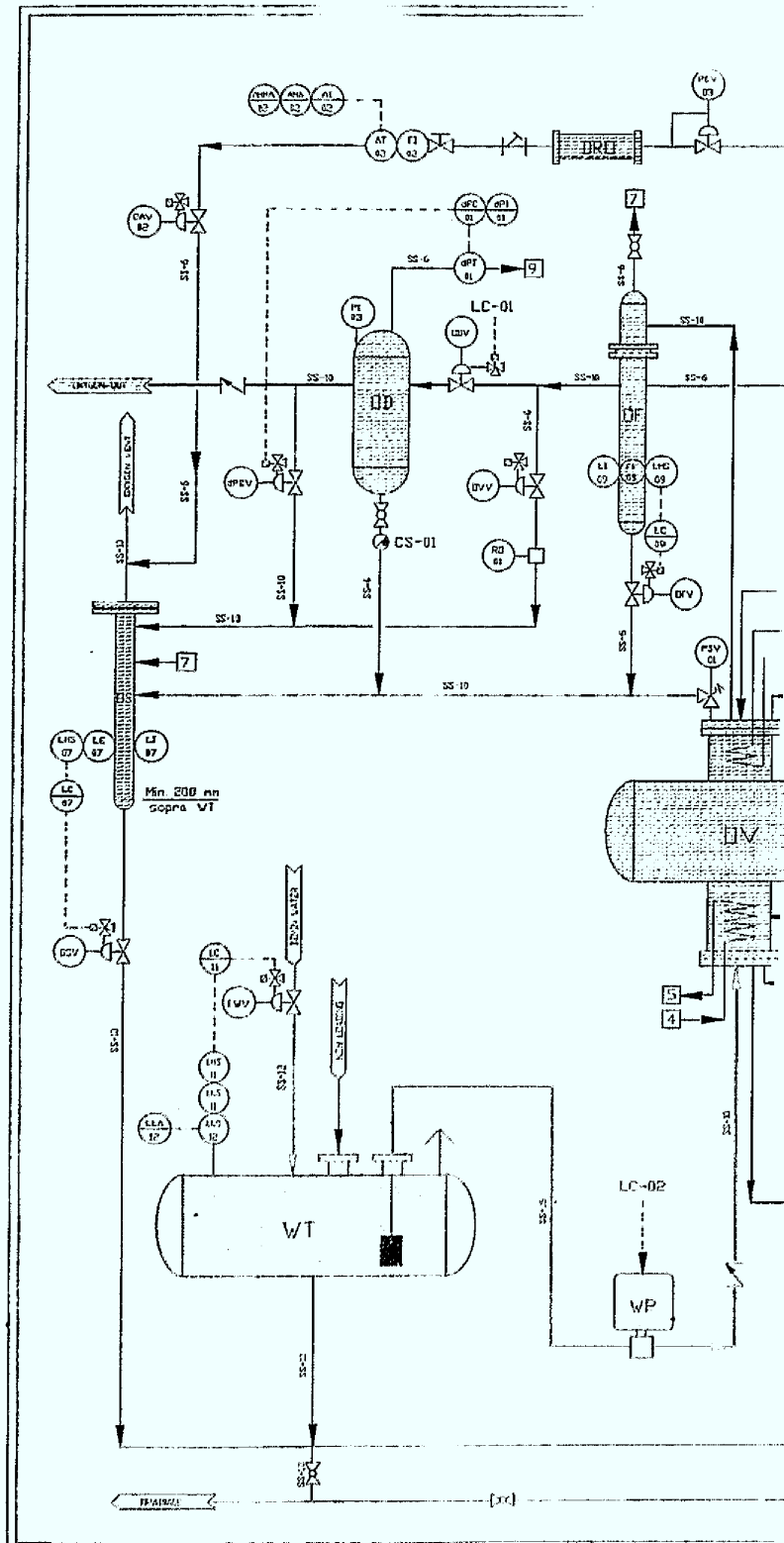


Abb. 5.3.1-2: Flußbild des Elektrolyseurs

Im folgenden werden die internen Regeleinrichtungen des Elektrolyseurs beschrieben.

Hauptaufgabe des Regel- und Sicherheitssystems ist es, eine Vermischung der beiden Gase aufgrund von Druckunterschieden oder Leckagen zu vermeiden. Aus diesem Grund wird bis auf wenige Ausnahmen bei Grenzwertüberschreitungen der Elektrolyseur automatisch abgeschaltet. Alle Daten werden von der Kontrolleinheit gesteuert. Sie besteht aus einem PLC, der alle Prozeßparameter überwacht. Die Eingangssignale kommen von den verschiedenen Meßfühlern, die innerhalb der Einheit angebracht sind. Dies sind Füllstand, Druck, Temperatur, Stromfluß, Spannung und Analysewerte.

Beim Überschreiten der Grenzwerte erfolgt zunächst ein akustischer Alarm, um den Operateur zu warnen. Zusätzlich wird dem Operateur durch eine entsprechend aufleuchtende Lampe gezeigt, welche Störfallursache vorliegt. Bei weiterer Grenzwerterhöhung wird eine automatische Abschaltung mit Druckentlastung und nachfolgender Inertisierung ausgelöst.

Zu diesen Signalen gehören (in Klammern sind die jeweiligen Meßstellen im Flußdiagramm angegeben):

- hohe Elektrolyttemperatur (THA 01)
- zu hoher Stromdurchfluß im Elektrolyseur (IHA 01)
- zu niedriger Stromdurchfluß im Elektrolyseur (ILA 01)
- sehr hoher Systemdruck (PHHA 01)
- sehr hoher Sauerstoffgehalt im Wasserstoff (AHHA 01)
- sehr hoher Wasserstoffgehalt im Sauerstoff (AHHA 02)
- zu niedriger Stickstoffdruck (PLA 01)
- zu niedriger Luftdruck an den Instrumenten (PLA 02)

Die übrigen Signale

- niedriger demineralisierter Wasserspiegel (LLA 12)
- hoher Systemdruck (PHA 01)
- hoher Sauerstoffgehalt im Wasserstoff (AHA 01)
- hoher Wasserstoffgehalt im Sauerstoff (AHA 02)
- niedrige Batteriespannung (VLA 01)
- niedrige Spannung im Elektrolyseur (VLA 02)

lösen einen für den Operateur sichtbaren und hörbaren Alarm aus. Die Signale geben dem Operateur Gelegenheit zum Handeln. Sollten nach dem Auslösen des Drucksignales oder der Analysesignale keine wirksamen Gegenmaßnahmen erfolgen, gibt es einen zweiten Grenzwert, der die Anlage dann automatisch abschaltet, druckentlastet und inertisiert.

Sollte ein Defekt, der zu einer Vermischung führen kann, trotz Überwachung der Prozeßparameter eintreten, weil z.B. ein Meßfühler defekt ist, besteht hierbei aufgrund einer kontinuierlichen Analyse der Gasströme eine redundante Möglichkeit, die Anlage abzuschalten.

Um Vermischungen von H_2 und O_2 durch Druckunterschiede zu vermeiden, ist der Elektrolyseur mit einem komplizierten Druckhaltungssystem ausgestattet, das sowohl während der Anlagenabschaltung als auch während des Betriebes für ein Druckgleichgewicht sorgt.

Bei der automatischen Druckentlastung, die nach der Abschaltung erfolgt, ist, um eine Vermischung der beiden Gase über die Verbindungsleitung der beiden Gasabscheider (SS 20) zu vermeiden, ein schrittweises abwechselndes Abblasen von Sauerstoff und Wasserstoff vorgesehen. Gesteuert wird diese Prozedur über die Füllstandsmeßpunkte LHA 03, LLA 03, LHA 04 und LLA 04.

Die Prozedur läuft folgendermaßen ab:

Die automatische Druckentlastung beginnt mit dem Abblasen von Wasserstoff über HVV. Da es sich um ein geschlossenes System handelt, sinkt der Gasspiegel in HV und der Flüssigkeitsspiegel steigt an. Durch das Ansteigen des Flüssigkeitsspiegels in HV sinkt er in OV ab. Bei einem anhaltenden Abblasen über HVV könnte zunächst die Elektrolytflüssigkeit von OV nach HV strömen und anschließend der Sauerstoff. Um eine Vermischung der Gase bei der Druckentlastung zu verhindern, ist der Gasabscheider mit Füllstandsmessern ausgestattet. Erreicht der Füllstand in OV einen vorgegebenen Minimumgrenzwert, wird das Ventil zum Abblasen des Wasserstoffs (HVV) geschlossen und das zum Abblasen des Sauerstoffs (OVV) geöffnet. Die Druckentlastung läuft jetzt so lange über OVV bis im HV Gasabscheider der Grenzwert erreicht ist. Dann schließt OVV wieder und HVV bläst weiter ab. Diese

gleichgewichtserhaltende Prozedur läuft so lange ab, bis die Druckentlastung abgeschlossen ist. Sollten die Low-Level-Signale versagen, besteht die Möglichkeit, die Ventile über den High-Level Alarm zu steuern.

Während des störungsfreien Betriebes läuft die Prozedur so ab, daß beim Starten zunächst die Abgabeventile HDV und OVD geschlossen sind, damit der Elektrolyseur Druck aufbauen kann.

Beim Erreichen eines vorgegebenen Systemdruckes von 7 bar öffnet PCV, so daß der produzierte Wasserstoff abgegeben werden kann. Nun erfolgt eine kontinuierliche Abgabe von Wasserstoff und eine diskontinuierliche von Sauerstoff. Durch das Abblasen von Wasserstoff sinkt der Flüssigkeitsspiegel in OV. Beim Erreichen eines vorgegebenen Pegelwertes steht das Signal LC 01 an, wodurch das Ventil ODV angesteuert und geöffnet wird. Der produzierte Sauerstoff kann jetzt abgegeben werden. Beim Erreichen eines unteren Grenzwertes wird ODV wieder geschlossen.

Um ein Funktionieren dieser betrieblichen Druckhalteprozedur zu gewährleisten, wird der Druck zwischen den Pufferbehältern gemessen. Bei einem Unterschreiten der Druckdifferenz um 0,5 bar wird der Sauerstoff über dPCV abgeblasen.

Die Anlage wird nach einer Abschaltpause, die länger als 15 min. dauert, automatisch inertisiert. Der Stickstoff strömt dabei aus Flaschen über Leitungen in die jeweiligen Gasabscheider. An der Stickstoffleitung ist ein Druckmeßgerät angebracht, das kontrolliert, ob ausreichend Stickstoffdruck vorhanden ist. Steht kein Druck an, wird Alarm ausgelöst und die Anlage abgeschaltet.

Nach einem Neustart des Elektrolyseurs bleiben HVV und OVV 300 sec. geöffnet, um den Stickstoff und die unreinen Gase abzublasen. Erst danach werden automatisch die beiden Ventile geschlossen und die Anlage auf Betriebsdruck gebracht.

5.3.2 Störfälle im Elektrolyseur

Störfälle mit einer Vermischung der beiden Produktgase Wasserstoff und Sauerstoff stellen das größte Gefährdungspotential dar. Hier können zündfähige Gemische entstehen. Die Heftigkeit der Reaktion bei einer Zündung hängt in erster Linie von der Konzentration der Gase ab, aber auch Druck, Temperatur und die Art der Zündquelle haben einen Einfluß. Die Heftigkeit der Reaktion kann von einer Verbrennung bis zu einer Detonation reichen.

Innerhalb des Elektrolyseurs gibt es verschiedene Störfälle, die zu einer Vermischung der Produktgase führen können:

- Bruch oder Riß in einem Diaphragma
- Störungen im Druckgleichgewicht nach dem Abschalten des Elektrolyseurs
- Störungen im Druckgleichgewicht während des Normalbetriebs.
- Vermischung der Produktgase durch Diffusion.

Eine weitere Störfallart innerhalb des Elektrolyseurs ist der Eintrag von Luft, der zu einer Knallgasbildung führen kann.

Im folgenden werden die einzelnen Störfallmöglichkeiten diskutiert.

5.3.2.1 Bruch eines Diaphragmas und fälschlicher Weiterlauf des Elektrolyseurs

Es wird angenommen, daß aufgrund eines Fertigungsfehlers ein Diaphragma reißt.

Da auf der Wasserstoffseite ein etwas höherer Druck als auf der Sauerstoffseite ist, strömt der Wasserstoff mit dem Sauerstoff zusammen in den Sauerstoffabscheider.

Die maximal mögliche Menge an Wasserstoff, die jetzt in den Gasabscheider einströmt, beträgt entsprechend der Produktionsrate aller 21 Zellen ($6,5 \text{ Nm}^3/\text{h}$) $0,3 \text{ Nm}^3/\text{h}$. Diese Annahme ist allerdings sehr konservativ, da wahrscheinlich nur ein Teilstrom des Wasserstoffs in den Sauerstoffabscheider strömt und der Rest in den Wasserstoffabscheider. Da die maximale Gesamtproduktionsrate von Sauerstoff $3,25 \text{ Nm}^3/\text{h}$ beträgt, würde bei dieser konserva-

tiven Annahme ein bei homogener Verteilung maximal möglicher Anreicherungsgrad für Wasserstoff im Sauerstoff von 9,2 % erreicht. Die Zündgrenze von 4 % würde damit deutlich überschritten. Da die Elektrolyseeinheit mit einem Gasanalyse-System ausgestattet ist, kann die Verunreinigung sofort bemerkt werden. Der Schwellenwert für die Abschaltung der Anlage liegt bei 2 %. Bei einer nichtfunktionierenden Gasanalyse kann der Elektrolyseur nicht betrieben werden. Es ist jedoch denkbar, daß bei einer scheinbar funktionierenden Gasanalyse eine Erhöhung der Gasverunreinigung unbemerkt bleibt. Das ist bei einem Versagen der Meßfühler oder bei einem fälschlich eingestellten Schwellenwert möglich.

Für den weiteren Störfallablauf wird unterstellt, daß die erhöhte Gaskonzentration meßtechnisch nicht erfaßt und somit die Durchmischung der beiden Gase aufgrund des Diaphragmabruchs nicht festgestellt wird. Da durch die Beschädigung des Diaphragmas eine wesentliche Prozeßdatenänderung (Temperatur, Stromdurchfluß und Stromstärke) innerhalb des eigentlichen Elektrolyseurs nicht zu erwarten ist, bleibt die Gasanalyse die einzige Möglichkeit, den Störfall zu bemerken und die Anlage in den sicheren Zustand zu fahren.

Für die Gasreinigungsanlage wird unterstellt, daß der Katalysator zum Zeitpunkt des Störfalls nahezu gesättigt und nur eine unzureichende Reinigung möglich ist. So kann der Gasstrom ungeeignet die GRA passieren und in die Leitung zum Speicher strömen.

In der Leitung von der Gasreinigungsanlage zum Speicher befindet sich allerdings eine weitere Meßstelle zur Kontrolle der Einheit. Diese Meßeinheit soll mit dem Elektrolyseur verbunden werden, so daß hier eine weitere Möglichkeit besteht, die Anlage abzuschalten. Da die Gasanalyse in der Leitung auf einem anderen Meßprinzip als die Analyse am Elektrolyseur beruht, würde hier sowohl ein redundantes als auch diversitäres Meßsystem zur Verfügung stehen.

Die Häufigkeit der Störfälle wird im folgenden bewertet.

Die Umstände, die in Ilford zu einem Diaphragmariß geführt haben (siehe Kapitel 4.2.1), sind hier nicht gegeben, weil ein Weiterbetrieb des Elektrolyseurs bei Strom- bzw. Temperaturerhöhungen nicht möglich ist. Eine Literaturrecherche hat ergeben, daß in einem Zeitraum von 20 Jahren bis auf den Vorfall in Ilford kein weiterer Unfall infolge eines Diaphragmarisses bekannt ist.

Zur Abschätzung einer Eintrittswahrscheinlichkeit für einen Diaphragmariß wird von der jährlichen Wasserstoffproduktionsrate ausgegangen. Literaturangaben /Weber/ zur Folge werden weltweit jährlich ca. $4 \cdot 10^{11} \text{ m}^3$ Wasserstoff produziert, davon weniger als 1 % durch Elektrolyse. Ein 100 kW Elektrolyseur produziert jährlich ca. $160.000 \text{ m}^3 \text{ H}_2$ bei durchschnittlich 8000 Betriebsstunden. Verteilt man die Jahresproduktionsmenge von $4 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ auf 100 kW-Elektrolyseure, beträgt die Anzahl der sich theoretisch in Betrieb befindlichen Elektrolyseure 25000.

Aus dem angesetzten Beobachtungszeitraum, der vorgekommenen Ereignisse und der geschätzten Anzahl der Elektrolyseure errechnet sich eine Eintrittshäufigkeit von $1\text{E}-6/\text{a}$.

Allerdings ist dieser Wert mit großen Unsicherheiten behaftet. Da Störfälle an einem Elektrolyseur nicht meldepflichtig sind, muß angenommen werden, daß die Liste mit Vorkommnissen nicht vollständig ist. Weiterhin wurde bei der Bewertung pauschal von 100 kW-Elektrolyseuren ausgegangen; unterschiedliche Baugrößen oder auch Diaphragmatypen konnten nicht extra berücksichtigt werden.

Um diese Unsicherheiten abzudecken, wird die Eintrittshäufigkeit auf $1\text{E}-5$ pro Anlage und Jahr erhöht.

Für den Ausfall der Gasanalyse wird zum einen das Versagen der Meßfühler und zum anderen das fälschliche Einstellen des Analyssegrenzwertes durch das Personal unterstellt.

Für das Versagen der Wasserstoffanalyse wird eine mittlere Fehlerwahrscheinlichkeit von $1,13\text{E}-4/\text{h}$ angesetzt. Der Wert wurde einer Zusammenstellung von Daten für Chemieanlagen entnommen /GRS59/. Das Testintervall für die Gasanalyse beträgt drei Monate.

Für das fälschliche Einstellen des Analysegrenzwertes wird nach SWAIN /Reer2/ eine mittlere Basisfehlerwahrscheinlichkeit von $1E-3/A$ angenommen. Da die Anzeige für jedermann zugänglich am Elektrolyseur angebracht ist, besteht die Möglichkeit, die Fehleinstellung zu bemerken, hierfür wird ein Recoveryfaktor von 0,5 angesetzt.

Unter Berücksichtigung beider Gasanalysemöglichkeiten ergibt sich eine Eintrittshäufigkeit für eine unbemerkte Anreicherung von Wasserstoff im Sauerstoffspeicher von $1E-7/a$.

Wenn die Eintrittshäufigkeit mit $1E-7/a$ auch sehr gering ist, so stellt sich doch die Frage, was passiert, wenn das Gasgemisch in den Speicher eintritt.

Hier wird zunächst der Zwischenspeicher und dann der große Sauerstoffbehälter befüllt. Wenn im Zwischenspeicher ca. 6 bar erreicht sind, wird der Kompressor eingeschaltet. Bis zu diesem Zeitpunkt kann das durchmischte Gas relativ gefahrlos in den Speicher einströmen.

Beim Zuschalten des Kompressors haben sich ca. 30 m^3 Gas, davon ca. $2,5 \text{ m}^3$ Wasserstoff und $27,5 \text{ m}^3$ Sauerstoff angesammelt. Die prozentuale Anreicherung beträgt 9,2 %.

Da es sich um einen pneumatischen Kompressor handelt, ist eine Zündung des Gasgemisches sehr unwahrscheinlich, so daß das Sauerstoff-Wasserstoff-Gemisch solange in den Sauerstofftank fließt, bis bei ca. 70 bar die Speicherkapazität erschöpft ist. Bis zum Erreichen dieses Druckes haben sich dann ausgehend von der ungünstigsten Annahme, daß der Speicher zu Beginn des Störfalles leer war, ca. $120 \text{ m}^3 \text{ H}_2$ im Sauerstoff angesammelt. Zum Vergleich: Bei einer Explosion dieser Menge im Freien würden noch in 42 m Entfernung mittlere bis schwere Gebäudeschäden wie einstürzende Mauern eintreten /Husmann/.

Diese Reaktion wird hier aber nicht weiter verfolgt, da innerhalb des Speichers nicht mit einer Zündung zu rechnen ist. Es ist keine Zündquelle vorhanden, so daß diese Störfallentwicklung als hypothetisch eingestuft wird.

Wahrscheinlicher ist, daß der mit Wasserstoff verunreinigte Sauerstoff unbemerkt im Speicher bleibt, bis dann während der

Wintermonate die Brennstoffzelle in Betrieb geht. Dann fließt das Gas über die Gasreinigungsanlage in die Brennstoffzelle. Ist hier der Katalysator bereits gesättigt, so daß die GRA nicht mehr reinigen kann, wird ein durchmischter Strahl in die Brennstoffzelle fließen. Als Folge dieser Verunreinigung würde sich der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle verschlechtern und die Brennstoffzelle abgeschaltet werden. Sicherheitstechnische Auswirkungen sind nicht zu erwarten.

5.3.2.2 Vermischung von H_2 und O_2 infolge von Störungen des Druckgleichgewichtes

Der bei der Elektrolyse anfallende Sauerstoff bzw. Wasserstoff wird in Gasabscheidern gesammelt. Diese Gasabscheider sind über eine Elektrolyt-Rücklaufleitung miteinander verbunden, um kleine Druckunterschiede auszugleichen und ein einwandfreies Funktionieren des Elektrolyseurs zu ermöglichen. Damit beim Ableiten der Produktgase keine Druckunterschiede entstehen, ist der Elektrolyseur, wie im vorherigen Kapitel bereits näher beschrieben, mit einem automatischen Druckhaltesystem ausgestattet. Dieses wird sowohl während des Normalbetriebes als auch nach dem Abschalten bis zum Druckausgleich über Pegelstandsmessungen im Gasabscheider gesteuert.

Bei Störungen in diesem Druckhaltesystem kann Wasserstoff in den Sauerstoffabscheider bzw. Sauerstoff in den Wasserstoffabscheider eintreten.

Im folgenden wird zunächst ein Versagen der Druckhalteprozedur nach dem Abschalten des Elektrolyseurs und anschließend ein Versagen der Druckhalteprozedur während des Betriebes diskutiert.

5.3.2.2.1 Versagen der Druckhalteprozedur nach dem Abschalten des Elektrolyseurs

Beim Starten der Druckhalteprozedur öffnet das Abblaseventil HVV, um Wasserstoff abzublasen. (Die Abkürzungen sind dem Übersichtsplan in Abb. 5.3.1-2 entnommen.) Dadurch sinkt der Flüssigkeitsspiegel im Sauerstoffabscheider (OV) ab. Beim Erreichen eines Grenzwertes (LLA03) in OV schließt HVV und OVV öffnet, um Sauerstoff abzublasen. Bei einer Störung dieser Prozedur wird

angenommen, daß LLA03 kein Signal gibt, so daß weiter Wasserstoff abgeblasen werden kann. Der Flüssigkeitsspiegel in HV steigt weiter an. Neben den Niedrigpegelmeldern sind die Gasabscheider zusätzlich mit Hochpegelmeldern ausgerüstet, d.h. wenn LLA03 in OV versagt, könnte als Redundanz der Füllstandsmesser LHA04 in HV die gleiche Reaktion, nämlich Schließen von HVV und Öffnen von OVV bewirken. Sollten beide Füllstandsmesser ausfallen, bleibt das Ventil HVV geöffnet. Nachdem die gesamte KOH in den Wasserstoffbehälter eingeströmt ist, kann auch Sauerstoff in den Wasserstoffbehälter einströmen. Hier wäre dann theoretisch eine Vermischungsmöglichkeit der beiden Gase gegeben. Allerdings wird aufgrund der Füllmenge (ca. 50 % KOH und 50 % Gas) der Wasserstoff bereits abgeblasen sein, so daß der Sauerstoff nur noch mit dem in der KOH gelösten Wasserstoff reagieren kann. Die Löslichkeit von Wasserstoff in KOH beträgt unter diesen Bedingungen ca. 6 ml/l, so daß es bei einer Zündung nur zu einer schwachen Reaktion kommen kann, die bezüglich der Störfallfolgen harmlos ist.

Ein weiteres Versagen wird erreicht, wenn der LLA in OV einen Schließbefehl an HVV gibt; HVV schließt und OVV öffnet. Der LLA in HV ist defekt und gibt kein Signal, ebenso der HLA in OV. So erfolgt ein ständiges Abblasen über OVV. Es erfolgt eine geringe Durchmischung der Produktgase in OV.

Wie die Ausführungen zeigen, gibt es verschiedene Störfallketten, die zu einem Versagen der Druckhalteprozedur führen. Allerdings stellen diese Störfälle aufgrund der Dimensionierung der Anlage und wegen der sozusagen als Puffer wirkenden KOH kein Risiko für die Halle und aufgrund der geringen miteinander reagierenden Mengen auch kein Arbeitsplatzrisiko dar.

5.3.2.2.2 Versagen der Druckhalteprozedur bei laufendem Elektrolyseur

Beim Anfahren des Elektrolyseurs wird das produzierte Gas zunächst 300 sec. über Dach abgeblasen, um die erforderliche Reinheit der Gase zu erreichen. Danach werden die Abblaseventile geschlossen, damit innerhalb der Elektrolyseeinheit Druck aufgebaut werden kann.

Der Wasserstoff verläßt über das Ventil HDV die Elektrolyseeinheit. Dieses Ventil ist ein mechanisches Ventil, das von Hand auf einen Druckgrenzwert von 7 bar eingestellt ist. Wenn der Druckgrenzwert von ca. 7 bar erreicht ist, öffnet das Ventil und der Wasserstoff wird kontinuierlich über die GRA an den Speicher abgegeben.

Beim Abblasen des Wasserstoffs in den Speicher sinkt der Flüssigkeitsspiegel in OV, so daß nach einiger Zeit ein vorgegebener Pegelstandsgrenzwert erreicht wird, der ein Öffnen des Ventils ODV bewirkt. Durch das Abblasen des Sauerstoffs in den Speicher steigt der Flüssigkeitsspiegel in OV wieder an. Bei einem eingestellten Grenzwert wird das Ventil ODV wieder geschlossen. Das bedeutet, daß während des Normalbetriebes eine kontinuierliche Abgabe von Wasserstoff und eine über den Pegelstand gesteuerte diskontinuierliche Abgabe von Sauerstoff erfolgt.

Ein bei dieser Prozedur denkbarer Störfall ist das Versagen der Pegelstandsmessung bei offenem HDV. Hierbei bekommt das Ventil ODV keinen Öffnungsbefehl und bleibt geschlossen. Würde nur auf der Sauerstoffseite die Pegelmessung ausfallen, kann über das High-Level-Signal vom Wasserstoffabscheider der Elektrolyseur automatisch abgeschaltet werden. Konservativ wird jedoch unterstellt, daß beide Pegelstandsmessungen ausfallen, weil z.B. aufgrund eines Fertigungsfehlers die in den Pegelstandsmessungen eingebauten Schwimmer klemmen. Wenn ständig Wasserstoff abströmt und ODV geschlossen bleibt, strömt zunächst die KOH und anschließend der produzierte Sauerstoff in den Wasserstoffabscheider. Da beide Gasabscheider zu 50 % mit KOH gefüllt sind, ist beim Einströmen der KOH aus dem Sauerstoffabscheider mit einem Anstieg des KOH-Pegels bis zum Filterbehälter (HF) zu rechnen. Da der Filter in HF nicht für Flüssigkeiten ausgelegt ist, würde sich das Durchlaufen der Flüssigkeit verzögern. Durch den Stau entsteht ein Druckanstieg im Elektrolyseur, der zu einer Anlagenabschaltung führt.

Sollte keine Anlagenabschaltung erfolgen, können die Gase langsam über den Filter in den Zwischenspeicher strömen. Auf diesem Weg kann eine Verunreinigung des Wasserstoffs mit O₂ über die

Gasanalyse festgestellt und bei einer Überschreitung des Grenzwertes hierüber die Anlage abgeschaltet werden.

Ein gleichzeitiges Versagen der Gasanalyse und der Druckmessung sind bei diesem Störfall sicherheitstechnisch nicht kritisch, da der Elektrolyseur über eine inhärente Sicherheitseinrichtung verfügt:

Durch den ausbleibenden Wassernachschub wird der Anteil an KOH immer höher. Bei einer Konzentration von ca. 50 % beginnt die KOH auszukristallisieren. Dadurch kommt es zunächst zu einer Spannungserhöhung, die zu einer Abschaltung des Elektrolyseurs führt. Sollte diese durch Spannungserhöhung bedingte Abschaltung nicht erfolgen, kristallisiert die KOH weiter aus, bis bei einer Konzentration von ca. 80 % ein Wert erreicht ist, bei dem der Elektrolyseur nicht mehr arbeiten kann und sich selbst abschaltet. Bis zu diesem Zeitpunkt könnten ca. 80 m³ Wasserstoff und 40 m³ Sauerstoff produziert werden, die beim zusätzlichen Ausfall der Gasanalyse hinter der GRA in den Wasserstoffspeicher gelangen könnten. Gemessen am großen Speichervolumen ist diese Menge allerdings unkritisch. Sollte der Hauptspeicher beim Eintritt des Störfalls ca. zur Hälfte gefüllt sein, würde die Verunreinigung deutlich unter der unteren Zündgrenze von 4 % liegen.

5.3.2.3 Unzulässige Prozeßparameteränderung am Elektrolyseur

Neben einer unzulässigen Druckerhöhung besteht beim Elektrolyseur die Möglichkeit der Überschreitung anderer Prozeßparameter. Eine unzulässige Temperaturerhöhung >80 °C würde beim Elektrolyseur zu einer Abschaltung führen. Sollte die Temperaturüberwachung ausfallen, hätte dies für die Sicherheit des Elektrolyseurs keine Konsequenzen, da beim Solarbetrieb der Temperaturgrenzwert nicht erreicht wird. Bei Testläufen mit ausgeschalteter Kühlung wurde nur eine Maximaltemperatur von 75 °C erreicht. Die Kühlung des Elektrolyseurs dient bei der geringen Belastung mehr dem Schutz der Komponenten.

Bei Solarbetrieb ist ebenfalls eine Stromerhöhung über den zulässigen Wert nicht möglich, weil der Maximalwert aller Photovoltaikfelder dem Auslegungswert des Elektrolyseurs entspricht.

Selbst bei einer Bespeisung durch das Netz ist eine unzulässige Leistung unwahrscheinlich, weil die Versorgung der Schiene über 13 Tiefsetzsteller erfolgt, die parallel arbeiten. Der Defekt eines Stellers hätte keine Auswirkungen. Sollte dennoch im Falle einer Netzbespeisung ein unzulässig hoher Stromwert erreicht werden, würde der Elektrolyseur über den High Current Alarm abgeschaltet. Da die elektronische Steuerung des Elektrolyseurs nur bis 40 Volt arbeitet, ist auch eine unzulässige Spannungserhöhung auszuschließen.

Die Ausführungen zeigen, daß während des Solarbetriebes eine unzulässige Erhöhung der Prozeßparameter Strom, Spannung und Temperatur nicht möglich oder extrem unwahrscheinlich ist.

5.3.2.4 Vermischung der Produktgase durch Diffusion

Die Produktgase haben die Tendenz, durch die Zelldiaphragmen zu diffundieren. Dadurch entsteht eine unvermeidbare Verunreinigung, die von der Produktionsrate abhängig ist. Bei Vollastbetrieb ist die Verunreinigung am geringsten und kann in Kauf genommen werden. Mit sinkender Produktionsrate nimmt die Verunreinigung allerdings zu, weil die Diffusionsrate unabhängig vom Stromfluß konstant bleibt.

Um eine starke Verunreinigung der Produktgase und damit ein Erreichen der Zündgrenze zu verhindern, schaltet sich der Elektrolyseur bei einem vorgegebenen Mindeststrom von 60 A ab.

Sollte diese Abschaltung z.B. wegen eines defekten Meßfühlers nicht erfolgen, steigt die Verunreinigung weiter an und überschreitet die Grenzwerte in der Gasanalyse, so daß hierüber eine weitere redundante Möglichkeit besteht, die Anlage abzuschalten.

Bei einem Versagen beider Anagemöglichkeiten, kann stark verunreinigtes Gas die Elektrolyseeinheit verlassen und zum Speicher strömen. Allerdings wird in der Gasreinigungsanlage (GRA) das Gas wieder gereinigt. Bei einer Sättigung des Katalysatorbettes kann der Gasstrom die GRA ungereinigt verlassen und zum Speicher strömen. Hier besteht aber durch den zusätzlichen Einbau einer weiteren Gasanalyse die Möglichkeit, die Anlage abzuschalten.

Da sich innerhalb des Elektrolyseblockes nur 40 l H_2 bzw. 20 l O_2 befinden, würde bei einer Reaktion der Produktgase kein Risiko für die Halle bestehen. Ein Arbeitsplatzrisiko durch z.B. herausspritzende KOH kann nicht ausgeschlossen werden. Das gleiche gilt für eine Ausbreitung der Reaktion über die gesamte Elektrolyseeinheit, deren H_2 -Inventar ca. 150 l beträgt.

Für eine Ansammlung verunreinigter Gase in den Speichern müssen mehrere Fehler - wie ausgeführt - auftreten, so daß die Wahrscheinlichkeit hierfür vernachlässigbar gering ist.

Eine weitere Möglichkeit der Diffusion der Produktgase ist nach der Abschaltung gegeben. Um die Diffusion auf ein Minimum zu begrenzen, muß der Elektrolyseur nach der Abschaltung druckentlastet werden. Bei einem Unterlassen der Druckentlastung könnte bei vorhandener Zündenergie eine Reaktion stattfinden. Aufgrund der geringen miteinander reagierenden Mengen besteht keine Gefahr für die Halle.

5.3.2.5 Knallgasbildung im Elektrolyseur

Um eine Vermischung von Wasserstoff und Luft, die zur Knallgasbildung führt, zu vermeiden, wird der Elektrolyseur nach längeren Stillstandszeiten vor der Inbetriebnahme inertisiert. Die Anlage ist so verschaltet, daß sich der Elektrolyseur dann ohne Inertisierung nicht anfahren läßt. Es ist allerdings denkbar, daß der Stickstoffdruck als Signal für die Steuerung ansteht, aber die beiden Stickstoffventile fälschlicherweise geschlossen sind. So kann der Elektrolyseur angefahren werden, obwohl kein Stickstoff durchgeflossen ist. Allerdings wird die Menge an Luft, die sich im Elektrolyseur anreichern kann, sehr gering sein. Eine größere Ansammlung von Luft ist auch bei abgeschaltetem Elektrolyseur nicht möglich, weil der Elektrolyseur zum Schutz der Elektroden mit einer Schutzspannung beaufschlagt wird. Dadurch wird auch während des Stillstandes Gas (wenn auch in geringen Mengen und verunreinigt) hergestellt, das über Dach abgeblasen wird. Somit kann diese Störfallart vernachlässigt werden.

5.3.2.6 Störfallbewertung

Wie das Kapitel 5.3.2 zeigt, sind beim Elektrolyseur einige Störfallketten mit Freisetzung von Wasserstoff möglich, jedoch spielen sie für die Sicherheit der Halle und damit der Umgebung keine Rolle.

So hat zwar die Störfallkette mit einer unbemerkten Freisetzung von Wasserstoff in den Sauerstoffspeicher das Potential für eine heftige Reaktion. Jedoch wird durch das Fehlen der Zündenergie innerhalb des Speichers eine Störfallentwicklung, die zur Detonation führen kann, hypothetisch.

Störfälle innerhalb des Elektrolyseurs (z.B. Versagen der Druckhalteprozedur) haben ebenfalls keine Auswirkungen auf die Halle. Dies liegt zum einen an der Dimensionierung des Elektrolyseurs, der nur eine geringe Menge an Wasserstoff und Sauerstoff enthält (Elektrolyseblock enthält ca. 40 l H_2 und 20 l O_2), die miteinander reagieren können. So produzieren große kommerziell genutzte Anlagen, wie z.B. Assuan (Ägypten) 33000 oder in Ryukon (Norwegen) 27900 $Nm^3 H_2/h$. Der Unterschied in der Größenordnung beträgt hier Faktor 5500 bzw. 4650. Bei diesen großen Elektrolyseuren sind bei einer Vermischung der Produktgase weitaus heftigere Reaktionen möglich.

Ein weiterer Aspekt, der den Elektrolyseur für die Halle unbedenklich macht, ist das Regel- und Sicherheitskonzept der Anlage. Es ist so ausgelegt, daß kein Einzelfehler zu einem Störfall führen kann. So findet während des gesamten Betriebes eine Überwachung der Prozeßparameter statt. Bei Grenzwertüberschreitungen wird ein Alarm ausgelöst bzw. die Anlage abgeschaltet.

Parallel dazu wird ständig eine Gasanalyse durchgeführt, die H_2 -Verunreinigungen in O_2 und umgekehrt feststellt und die Anlage beim Überschreiten eines Grenzwertes abschaltet.

Durch die nachträglich installierte Gasanalyse hinter der Gasreinigungsanlage besteht für Verunreinigungen, wie sie beim Diaphragmariß oder bei Störungen des Druckgleichgewichtes während des Betriebs vorkommen, eine weitere Redundanz zur Störfallerkennung.

Zusammengefaßt läßt sich sagen, daß der Elektrolyseur aufgrund seiner Dimensionierung und wegen der Konzeption des Sicherheitssystems keine Gefahr für die Halle darstellt. Ein geringes Arbeitsplatzrisiko kann allerdings beim Versagen der Druckhalteprozedur oder durch Diffusion nicht ganz ausgeschlossen werden.

5.3.3 Beschreibung der Brennstoffzelle

In der Brennstoffzelle wird, umgekehrt zur elektrolytischen Spaltung von Wasser zu Sauerstoff und Wasserstoff, die chemische Energie, die bei der Oxidation von Wasserstoff entsteht, in elektrische Energie umgewandelt.

Dabei läuft folgender Prozeß ab:

Eine Brennstoffzelle besteht aus katalytisch wirkenden Elektroden, die durch ein Elektrolyt getrennt werden. Der Anode wird Wasserstoff und der Kathode Sauerstoff zugeführt (Abb. 5.3.3-1). Durch den Katalysator spaltet sich der Wasserstoff in Wasserstoffionen und Elektronen. Während sich Wasserstoff und Sauerstoff wiederum zu Wasser verbinden, laufen die Elektronen über eine externe Verbindung zur Kathode, wobei dieser Elektronenstrom zu elektrischer Arbeit benutzt wird.

Das bei der Reaktion entstehende Wasser wird aus der Zelle ausgeschleust.

Bei der in der IEV-Halle aufgestellten Brennstoffzelle handelt es sich um eine alkalische Brennstoffzelle der Fa. Siemens. Sie besteht aus insgesamt 60 Zellen, einem Spaltverdampfer sowie elektronischen und mechanischen Steuerungskomponenten. Die Nennleistung beträgt 6,5 kW bei 48 V und 135 A. Der Gasverbrauch beträgt dabei $3,5 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2/\text{h}$ und $1,75 \text{ Nm}^3 \text{ O}_2/\text{h}$.

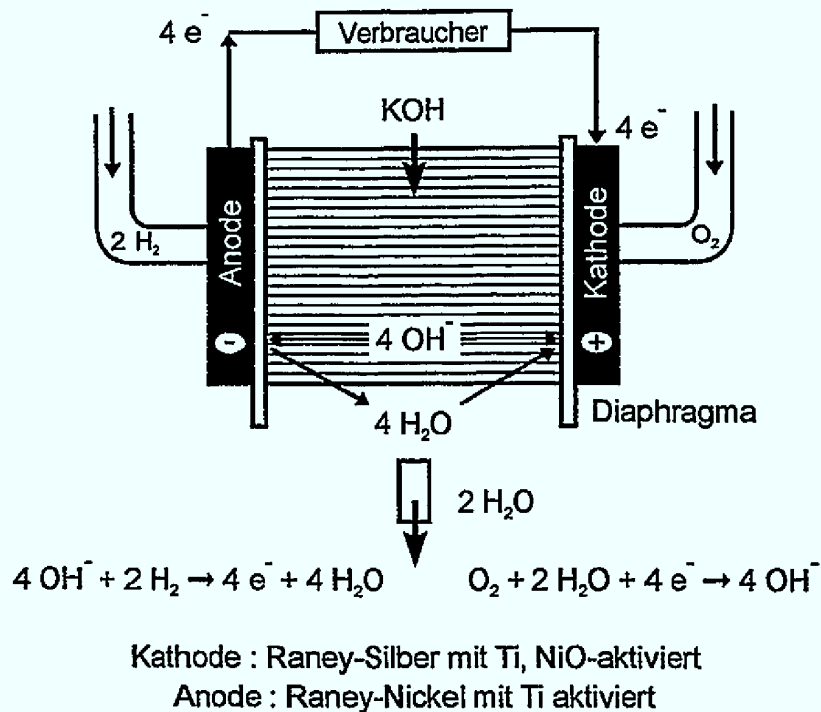


Abb. 5.3.3-1: Prinzip der alkalischen Brennstoffzelle

Bei der Inbetriebnahme der Brennstoffzelle wird das Sauerstoffventil YO_2 geöffnet (Abb. 5.3.3-2). Für diesen Öffnungsvorgang wird extern eine Spannung von 30 V bereitgestellt. Da die Brennstoffzelle auch während des Stillstandes immer mit Wasserstoff gefüllt ist, beginnt die Stromproduktion, sobald Sauerstoff durch die Zelle strömt.

Der Elektrolyt, der die Brennstoffzelle durchströmt, wird von zwei Elektropumpen umgewälzt. Da sich Wasserstoff und Sauerstoff bei der Reaktion verbrauchen, befindet sich im Elektrolyten beim Verlassen der Brennstoffzelle das Reaktionswasser.

In einem nachgeschalteten Spaltverdampfer wird der Elektrolyt wieder aufbereitet, indem er von dem Wasser getrennt wird.

Um die beim Betrieb der Brennstoffzelle angefallene Reaktionswärme abzuführen, wird der Elektrolyt rückgekühlt. Über Temperaturfühler innerhalb der Brennstoffzelle wird der Kühlmitteldurchfluß gesteuert.

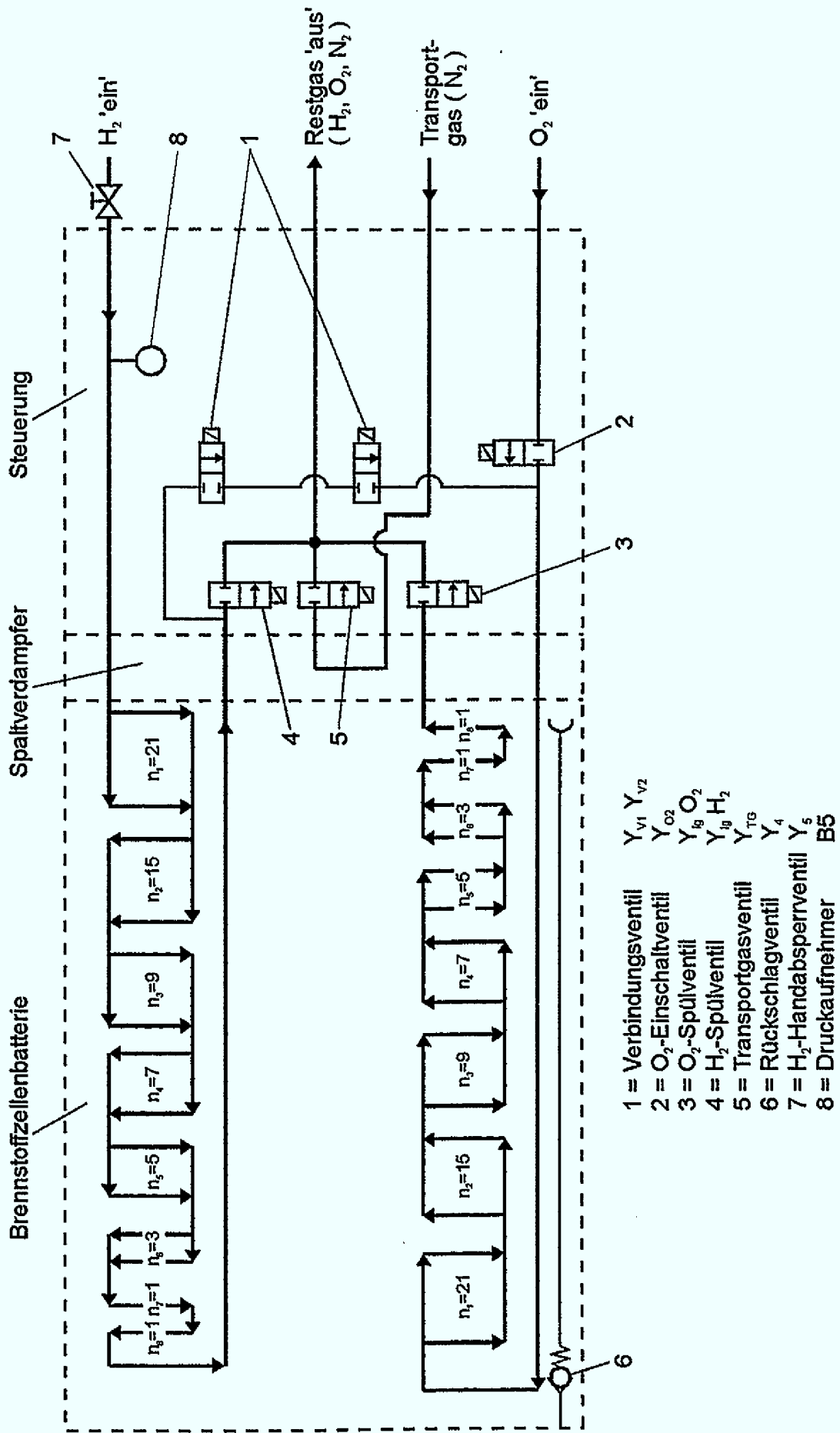


Abb. 5.3.3-2: Brennstoffzellen (Gasver- und -entsorgung)

Bei Verunreinigungen des Sauerstoffs und des Wasserstoffs durch Inertgase verschlechtert sich der Wirkungsgrad der Zelle. Deshalb wird in der letzten Zelle die Spannung überprüft. Fällt diese um 0,1 V ab, werden die Spülventile $Y_{I\text{g}}\text{O}_2$ bzw. $Y_{I\text{g}}\text{H}_2$ kurzzeitig geöffnet und die Zelle mit Wasserstoff bzw. Sauerstoff gespült. Dies geschieht unabhängig voneinander jeweils für H_2 bzw. O_2 .

Um einen störungsfreien Betrieb der Brennstoffzelle zu gewährleisten, erfolgt eine interne Prozeßparameterüberwachung. So ist z.B., da die Membran sehr druckempfindlich ist, innerhalb der Brennstoffzelle ein Druckfühler angebracht, der bei zu niedrigem Wasserstoff-Druck eine interne Abschaltung auslöst. Weiterhin führt eine unzulässige Temperaturerhöhung bzw. ein zu hoher Spannungsabfall zu einer internen Abschaltung. Dabei wird das Sauerstoffventil Y_{O_2} geschlossen, so daß die chemische Reaktion unterbrochen wird.

Durch die interne Abschaltung steht extern das Signal 'Brennstoffzelle nicht betriebsbereit' an, woraufhin über die Anlagensteuerung SPS die Gaszufuhr zur Halle unterbrochen wird. Zusätzlich werden die Ventile V201 und V202, die sich innerhalb der Halle in der Zuleitung zur Brennstoffzelle befinden, geschlossen.

Nach der Abschaltung der Brennstoffzelle wird durch das Öffnen der Verbindungsventile Y_{V1} und Y_{V2} mittels Wasserstoff der restliche Sauerstoff herausgedrückt, um die Zelle vor Korrosion zu schützen. Während des Stillstandes bleibt die Zelle mit Wasserstoff gefüllt.

5.3.4 Störfallbedingte Leckagen an der Brennstoffzelle

Wie bereits erwähnt, stellt die Brennstoffzelle bei störfallbedingten Vermischungen von H_2 und O_2 aufgrund des geringen Gasinventars keine Gefahr für die Halle dar. Wegen der direkten Verbindung mit dem Speicher ist allerdings bei einer Leckage an der Brennstoffzelle die Möglichkeit einer Freisetzung des Wasserstoffinventars in die Halle gegeben.

Eine Leckage an der Brennstoffzelle kann fertigungsbedingt sein oder durch unzulässige Temperatur- bzw. Druckerhöhungen entstehen.

5.3.4.1 Unzulässige Temperaturerhöhung an der Brennstoffzelle

Bei einem Versagen der Kühlung des Elektrolyten z.B. durch den Ausfall einer der Elektrolytpumpen oder durch einen Ausfall im internen Kühlkreislauf kann es zu einer unzulässigen Temperaturerhöhung in der Brennstoffzelle kommen. Da das System nur einige Liter Fassungsvermögen hat, ist beim Ausfall der Kühlung mit einer schnellen Überhitzung der Brennstoffzelle zu rechnen. Aus diesem Grunde ist die Brennstoffzelle mit Temperaturfühlern ausgestattet, die bei einer unzulässigen Temperaturerhöhung eine interne Abschaltung der Brennstoffzelle veranlassen.

Unterstellt man ein Versagen der temperaturbedingten Abschaltung, würde die Temperatur sehr schnell ansteigen und Leckagen an der Brennstoffzelle wären nicht auszuschließen, so daß Wasserstoff und Sauerstoff in die Halle strömen könnten. Je nach Leckgröße und Ort wären die Störfallabläufe unterschiedlich. Würde das Leck im vorderen Brennstoffzellenbereich auftreten, wären nur noch wenige Zellen funktionsbereit und es würde weniger Strom produziert, so daß der Spannungsgrenzwert, der bei 42 V liegt, ansprechen und eine interne Abschaltung auslösen würde.

Würde das Leck im hinteren Brennstoffzellenbereich auftreten, könnte die Zelle zunächst unbemerkt weiterarbeiten. Aufgrund der anhaltend hohen Temperaturen wäre aber schon innerhalb kürzester Zeit mit weiteren Leckagen zu rechnen, so daß der Spannungsgrenzwert, wenn auch etwas verzögert, auf alle Fälle erreicht würde.

Allerdings ist bei bereits vorhandenen Lecks die interne Abschaltung nicht mehr ausreichend. Durch das vorhandene Leck kann auch nach der internen Abschaltung weiterhin Wasserstoff ausströmen, da innerhalb der Brennstoffzelle nur die Sauerstoffzufuhr abgesperrt werden kann. Nach der internen Abschaltung steht extern das Signal 'Brennstoffzelle nicht betriebsbereit' an. Dadurch wird eine externe Abschaltung ausgelöst, die sowohl die

Absperrarmatur innerhalb der Halle als auch die Armaturen in der Zuleitung zur Brennstoffzelle außerhalb der Halle schließt. Sollte die Auslösung dieser Absperrung nicht funktionieren, kann weiterhin Wasserstoff in die Halle einströmen. Der durch das Leck entstehende Druckverlust wird durch das Nachregeln des Druckminderers DM 201 kompensiert. Je nach Leckgröße und Anzahl der Lecks erhöht sich die Durchflußmenge auf mehr als $10 \text{ Nm}^3/\text{h}$, so daß der Durchflußgrenzwert erreicht wird und hierüber die Wasserstoffzufuhr unterbrochen werden kann. Die größtmögliche Ausströmrates beträgt $85 \text{ Nm}^3/\text{h}$ bei maximal offenem Druckminderer. Sollte außerdem die Durchflußüberwachung versagen, besteht über die zu hohe Gaskonzentration die letzte Anregemöglichkeit.

Da die Brennstoffzelle inzwischen von einer Plexiglashaube umgeben ist, über deren Ausströmöffnung ein H_2 -Meßkopf angebracht ist, werden zwei Fälle unterschieden:

1. Durch den geführten Gasstrom spricht der Meßfühler über der Brennstoffzelle innerkürzester Zeit an und löst die Absperrung der Gaszufuhr aus.
2. Beim Versagen des über der Brennstoffzelle installierten H_2 -Meßkopfes muß sich das Gas zunächst in der Halle verteilen, bevor die anderen H_2 -Meßköpfe ansprechen können. Bei der größtmöglichen Ausströmrates dauert es bis zum Erreichen einer homogenen Konzentration von 0,8 %, die zu einer Hallenabschaltung führt, ca. 2 Stunden.

Um die Eintrittswahrscheinlichkeit für ein temperaturbedingtes Leck an der Brennstoffzelle zu bestimmen, wurde der Fehlerbaum in Abb. 5.3.4.1-1 erstellt.

Die Ausfallraten für die einzelnen Komponenten wurden zum größten Teil aus einer Sammlung von Komponenten für Chemieanlagen entnommen /GRS59/.

Für das Versagen der Elektrolytpumpen wurde allerdings auf eine Zuverlässigkeitskenngrößenermittlung im Kernkraftwerk Biblis /GRS2/ zurückgegriffen, da hier eine Differenzierung zwischen den einzelnen Pumpentypen erfolgte.

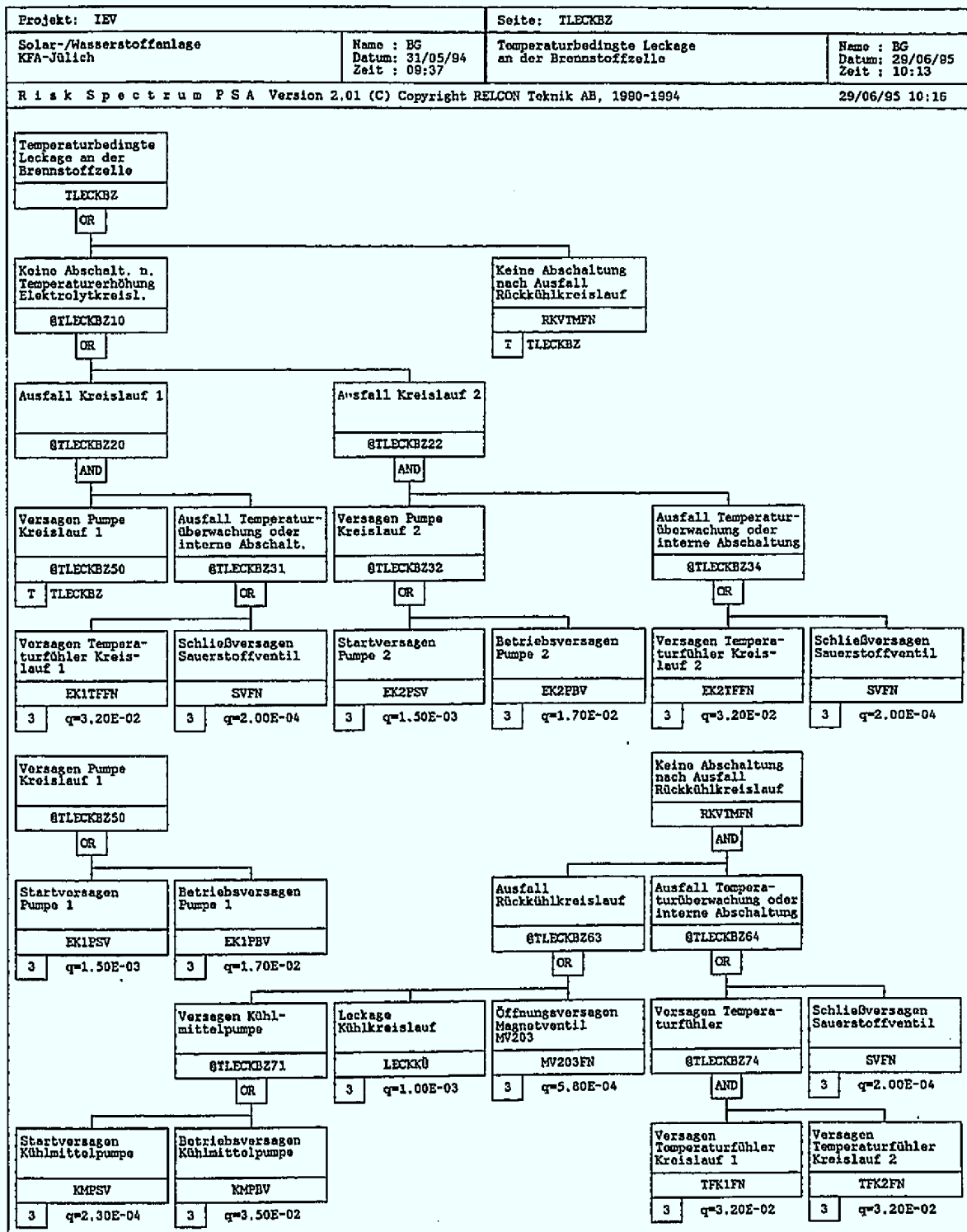


Abb. 5.3.4.1-1: Fehlerbaum 'Temperaturbedingtes BZ-Leck'

Da außerdem die in der Brennstoffzelle installierten Elektrolytpumpen aus kalilaugebeständigem Polysulfon bestehen, erscheint der mit $1,8\text{E}-4/\text{h}$ angegebene Wert aus /GRS59/ zu konservativ. Die in /GRS2/ angegebenen Werte für Kreislaspumpen mit dem Betriebsmittel Chemikalien erscheinen mit $2,1\text{E}-5/\text{h}$ für das Betriebs- und $8,4\text{E}-5/\text{h}$ für das Startversagen realistischer. Für die Ermittlung der jeweiligen Ausfallwahrscheinlichkeiten wurde eine jährliche Betriebszeit von 800 h angesetzt. Für das Startversagen der Pumpen und das Öffnungsversagen des Magnetventils wurde ein Zyklusbetrieb mit durchschnittlich 6 Betriebs- und 18 Stillstandsstunden angenommen.

Die ermittelte Eintrittswahrscheinlichkeit für eine temperaturbedingte Leckage an der Brennstoffzelle beträgt $1,23\text{E}-3$. Ausschlaggebend für das Ergebnis ist die Konstruktion dieser Brennstoffzelle, die für die Umwälzung des Elektrolyten zwei Pumpen benötigt, die jeweils einen Teilbereich versorgen. Somit müssen, um eine Kühlung zu gewährleisten, beide Pumpen funktionieren. Der Betriebsausfall der Pumpen kombiniert mit dem Ausfall des jeweiligen Temperaturfühlers trägt mit 88 % zum Gesamtergebnis bei und ist somit dominierend. Neben jeweils einem Beitrag von 4 % für das Startversagen der Pumpen bei gleichzeitigem Ausfall der Temperaturfühler tragen die anderen Ausfallkombinationen nur unwesentlich zum Ergebnis bei.

Die Eintrittshäufigkeit ist vergleichbar mit einer mittleren Leckage in der Zuleitung zur Brennstoffzelle, die in Kap. 5.4.2 mit $1\text{E}-3$ bewertet wurde. Die Ausströmrates kann hierbei bis $120 \text{ Nm}^3/\text{h}$ betragen. An der Brennstoffzelle wird die maximale Ausströmrates durch den Druckminderer DM 201 begrenzt und ist mit $85 \text{ Nm}^3/\text{h}$ um ca. 30 % geringer.

Die Eintrittswahrscheinlichkeit für eine temperaturbedingte Leckage wurde mit den einzelnen Aktionen des Schutzkonzeptes in einem Ereignisbaum (Abb. 5.3.4.1-2 und 3) verknüpft.

Da für die Absperrung der H_2 -Zufuhr und für die Inbetriebnahme der Lüfter die gleichen Komponenten wie nach einer Leckage in der Zuleitung zur Brennstoffzelle funktionieren müssen, wurden die in den Kapiteln 5.4.2.2 - 5.4.2.4 angesetzten Fehlerraten übernommen. Zusätzlich wurde die Absperrarmatur V201 in der

Mittel. BZ-Leck (82 Rad/0)	Durchlauf- überwachung	Spannungs- überwachung	HZ-Überwachung	Schuttsanierung	Autom. Abschaltung in der Halle	Kumulierte Absparung	Ausgangliche Entladung	Nachfolgende Entladung	No.	Ereignispfad	HAUT.	KONSQUENZ
BZL	FI	SP	MC	AN	AJA	HV	ZL	NL				
									1	BZL	1.20E-03	OK
									2	BE1A1A	2.50E-07	HZK: <0.5%
									3	BE2A1A1V	4.20E-08	HZK: 0.6 - 1.5%
									4	BE2A1A1VZL	1.30E-11	HZK: 2.2 - 3.4%
									5	BE1A1A		ENTFÄLLT
									6	BE2A1A1A		ENTFÄLLT
									7	BE1A1A1A1ZL	1.20E-08	HZK: <0.5%
									8	BE2A1A1A1V		ENTFÄLLT
									9	BE2A1A1A1VZL	2.10E-09	HZK: 2.2 - 3.4%
									10	BE1A1A		ENTFÄLLT
									11	BE2A1A1ZL	2.80E-05	OK
									12	BE1A1A1A		ENTFÄLLT
									13	BE2A1A1A1V		ENTFÄLLT
									14	BE2A1A1A1VZL	5.70E-09	HZK: 2.2 - 3.4%
									15	BE1A1A	3.70E-05	HZK: <0.5%
									16	BE2A1A1V		
									17	BE2A1A1VZL		
									18	BE2A1A1VZL		
									19	BE2A1A1VZL		
									20	BE2A1A1VZL		
									21	BE2A1A1VZL	2.50E-08	HZK: 2.2 - 3.4%

Produkt: IEV	Name: BZ	Reifungsdatum: 19/08/95	Name: BZ
Sozial-/Wasserstoffanlage KFA-Jülich	Datum: 30/08/95	Mittel: 32-Leckrate (82 Rad/0) mit Handbuch, frühe HZ-Anreg.	Datum: 17/08/95
	Zeit: 16:32		Zeit: 16:07

R i s k o s p e k t u m P S A Version 2.01 (c) Copyright REUCOM Technik AG, 1990-1994

Abb. 5.3.4.1-2: Ereignisbaum 'Temperaturbedingtes BZ-Leck'
(Frühe Anregung)

Mittel: BZ-Leck (85 Na2/m)	Durchlauf- überwachung	Spannungs- überwachung	HT-Überwachung	Schutzanordnung	Autos. Absperrung in- und außerhalb der Halle	Manuelle Absperrung	Automatische Entlüftung	Natürliche Entlüftung	No.	Ereignisbaum	HAUF.	FOLGENSEQUEZ
BZL	FI	SP	HK	AN	ALA	HY	ZL	ML	1	BZL	1.20E-03	OK
									2	BZALA	2.90E-07	HEK: <0.5t
									3	BZLAUHV	4.40E-08	HEK: 0.8 - 1.5t
									4	BZLAUVZL	1.30E-11	HEK: 2.2 - 3.4t
									5	BZLAN		ENTFÄLLT
									6	BZLANVA		ENTFÄLLT
									7	BZLAUVAZL	1.20E-08	HEK: <0.5t
									8	BZLAUVAHV		ENTFÄLLT
									9	BZLAUVAHVZL	2.10E-09	HEK: 2.2 - 3.4t
									10	BZLHK		ENTFÄLLT
									11	BZLKEZL	4.90E-07	OK
									12	BZLNOVA		ENTFÄLLT
									13	BZLNOVAHV		ENTFÄLLT
									14	BZLNOVAHVZL	9.60E-13	HEK: 2.2 - 3.4t
									15	BZLFT	3.70E-05	HEK: <0.5t
									16	BZLFTSP		
									17	BZLFTSPHK		
									18	BZLFTSPKAN		
									19	BZLFTSPKANVA		
									20	BZLFTSPKANVAHV		
									21	BZLFTSPKANVAHVZL	4.40E-10	HEK: 2.2 - 3.4t

Projekt: ITV	Name: BG	Ereignisbaum: MZBZL-85NAH	Name: BG
Solac-/Wasserstoffanlage KFA-jülich	Datum: 30/08/95	Mittl. BS-Leckrate (85 Na2/m) mit Randabsp. späte BZ-Anregung.	Datum: 31/08/95
	Zeit: 16:32		Zeit: 16:03

Risk Spectrum F 6 A Version 2.01 (c) Copyright REICOW Technik AG, 1990-1994

Abb. 5.3.4.1-3: Ereignisbaum 'Temperaturbedingtes BZ-Leck'
(Späte Anregung)

Zuleitung zur Brennstoffzelle bei der Bewertung des Absperrkonzeptes berücksichtigt, so daß sich der Wert für das Schließversagen der Armaturen von $4E-4$ auf $2E-4/A$ reduziert.

Der Ereignisbaum zeigt zwei Fälle unterschiedlicher Konsequenz, die zu einer langfristigen Freisetzung von Wasserstoff in die Halle führen.

In beiden Fällen entleeren sich die Speicherbehälter über das Leck in die Halle. Allerdings startet im ersten Fall aufgrund der funktionierenden Anregeebene die Hallen-Zwangsentlüftung, wodurch die H_2 -Konzentration den Ansprechgrenzwert der H_2 -Meßköpfe nur unwesentlich überschreitet. Die Eintrittshäufigkeit für diesen Fall beträgt sowohl für die frühe als auch für die späte Anregung $2,5E-7/a$.

Den zweiten Fall bilden Störfallketten, bei denen infolge des Ausfalls der Anregeebene auch kein Start der Ventilatoren erfolgt, so daß die natürliche Entlüftung der Halle zum Tragen kommt.

Die Eintrittshäufigkeit für diesen zweiten Fall wird gebildet durch die Summe der Ereignispfade 4, 9, 14 und 21 und beträgt für die frühe Anregung $3,3E-8$ und für die späte Anregung $2,7E-9/a$.

Je nach Wirksamkeit dieser natürlichen Lüftung sind H_2 -Konzentrationen zwischen 2 - 3 % zu erwarten, die aufgrund der geringeren Leckrate etwa $1/3$ unter den Werten vergleichbarer Störfallpfade in Kapitel 5.4 liegen. Die dort angegebene maximale Eintrittshäufigkeit von $1,5E-8$ liegt ebenfalls höher als der damit vergleichbare Wert von $2,7E-9$. Der günstigere Wert ergibt sich aus der zusätzlichen Anregemöglichkeit durch die Spannungsüberwachung und aus der zusätzlichen Absperrmöglichkeit durch die Armatur V201 in der Zuleitung zur Brennstoffzelle.

Demzufolge sind Leckagen an der Brennstoffzelle durch die in Kapitel 5.4 betrachteten Lecks abgedeckt.

Als Besonderheit für die temperaturbedingte Leckage ist anzumerken, daß beim Versagen der internen Abschaltung gleichzeitig Sauerstoff und Wasserstoff in die Halle einströmen können. Das ist möglich, wenn nach einem aufgetretenen Leck das Sauerstoff-

ventil in der Brennstoffzelle fälschlich offenbleibt und gleichzeitig die Hallenabspernung versagt.

Bei einer maximalen Ausströmrates von $85 \text{ Nm}^3/\text{h}$ würde bei einer homogenen Durchmischung der Sauerstoffgehalt in der Luft von 21 % auf ca. 23 - 24 % ansteigen. Dieser Anstieg hätte keine störfallverschlimmernden Auswirkungen auf die Halle.

Allerdings sind unmittelbar an der Brennstoffzelle unter der Plexiglashaube Vermischungen der Gase mit Überschreitung der Zündgrenze nicht auszuschließen. Da allerdings die Haube unten offen ist und oben eine ca. 95 cm^2 große Öffnung hat, ist ein Ein- und Abströmen von Luft möglich, so daß sich unter der Haube kein reines Sauerstoff-Wasserstoff-Gemisch bilden kann. Im Falle einer möglichen Zündung des Sauerstoff-Wasserstoff-Luft-Gemisches ist wegen des geringen Volumens von $0,11 \text{ m}^3$ unter der Plexiglashaube keine heftige Reaktion zu erwarten. Für die Halle besteht hier keine zusätzliche Gefahr. Ein Arbeitsplatzrisiko ist allerdings nicht ganz auszuschließen.

5.3.4.2 Unzulässige Druckerhöhung in der Brennstoffzelle

Eine unzulässige Druckerhöhung ist bei einem Versagen des Druckminderers DM 201 möglich. Bleibt hierbei der Druck unter dem Ansprechdruck des Sicherheitsventiles SV 201, der bei ca. 4 bar liegt, kann Wasserstoff mit erhöhtem Druck direkt in die Brennstoffzelle einströmen.

Wird beim Versagen des Druckminderers der größtmögliche Öffnungsquerschnitt erreicht, wird der Druck über 4 bar ansteigen, so daß das Sicherheitsventil SV 201 anspricht. Der Druck kann dann über das Sicherheitsventil abgebaut werden, so daß die Brennstoffzelle verschont bleibt.

Beim Versagen des Druckminderers und dem Nichtansprechen des Sicherheitsventils (entweder weil Ansprechdruck zu niedrig oder Ventil bei Anforderung versagt) steigt der Druck in der Brennstoffzelle schlagartig an. Durch den Druckstoß ist mit einem Einreißen der Membran, die sehr druckempfindlich ist und bereits bei Druckdifferenzen ab 0,5 bar beschädigt werden kann, zu rechnen.

Die Druckregelung auf der Sauerstoffseite (Druckminderer DM 202) wird als funktionierend unterstellt, so daß die kritische Druckdifferenz bereits bei einer Erhöhung des Wasserstoffdruckes um 0,5 bar erreicht wird.

Beim Einreißen der Membran können Wasserstoff und Sauerstoff bei vorhandener Zündenergie miteinander reagieren. Als Folge dieser Reaktion ist mit einer Leckage an der Brennstoffzelle z.B. durch das Herausdrücken von Gummidichtungen zu rechnen. Durch die Drucküberwachung oder über den gemessenen Spannungsabfall in der Zelle kann die Zelle nun intern abgeschaltet werden, indem die Sauerstoffzufuhr unterbrochen wird. Diese Abschaltung reicht allerdings nicht aus, weil die Wasserstoffzufuhr nicht abgesperrt wird und so weiterhin über das unterstellte Leck Wasserstoff in die Halle einströmen kann. Allerdings steht durch die interne Abschaltung extern das Signal 'Brennstoffzelle nicht betriebsbereit' an, woraufhin die externe Gaszufuhr der Brennstoffzelle unterbrochen wird. Dabei werden die Absperrarmaturen vor der Halle und die Absperrarmaturen in der Zuleitung zur Brennstoffzelle zugefahren. Beim Versagen der externen Abschaltung über die Brennstoffzelle würde weiterhin ein erhöhter Wasserstoffdruck anstehen. Aufgrund des Lecks entsteht ein Druckabbau in der Leitung. Der Druckminderer DM 101 kompensiert den durch das Leck bedingten Druckabbau, so daß der Volumenstrom rasch über den Grenzwert von $10 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ansteigt. Über die Durchflußüberwachung in der Leitung wird dann die Wasserstoffzufuhr zur Halle abgesperrt.

Sollte auch die Durchflußmessung versagen, erfolgt die Absperranregung bei zu hoher Wasserstoffkonzentration in der Hallenluft.

Erst beim Ausfall dieser H_2 -Melder, dem Ausfall der Durchflußüberwachung und dem Versagen der brennstoffzelleninternen Prozeßparameterüberwachung ist nach einer Leckage an der Brennstoffzelle eine Freisetzung des H_2 -Speicher-Inventares in die Halle gegeben.

Die ausströmende Menge ist durch den maximalen Strömungsquerschnitt des Druckminderers DM 201 auf $\leq 85 \text{ Nm}^3$ begrenzt.

Die Eintrittswahrscheinlichkeit einer druckbedingten Leckage an der Brennstoffzelle wird bestimmt durch das Versagen des Druckminderers DM 201.

Die Ausfallrate des Druckminderers wurde aus einer GRS-Datensammlung /GRS 2/ entnommen. Für eine jährliche Betriebszeit von 800 h errechnet sich bei einer Ausfallrate von $4,3E-6/h$ eine Eintrittshäufigkeit von $3,4E-3/a$. Da bereits für Drücke < 4 bar ein defekter Druckminderer zu einem Leck in der Brennstoffzelle führen kann, ist die Leckwahrscheinlichkeit gleich der Ausfallrate des Druckminderers.

Bei Drücken > 4 bar steht als zusätzliche Redundanz das Sicherheitsventil SV 201 zur Verfügung, so daß sich die Eintrittshäufigkeit eines Lecks auf $9,2E-6/a$ verringert.

Hierbei wurde für die Bewertung des Sicherheitsventils auf eine Ausfallrate von $1,6E-7/h$ aus /Jül-388/ zurückgegriffen. Bezüglich des Testintervalls gelten die gleichen Annahmen wie in Kapitel 5.4.3.5, so daß sich für ein fiktives Testintervall von vier Jahren eine Ausfallrate von $2,7E-3/A$ ergibt.

Da der weitere Störfallverlauf bei druckbedingten Leckagen identisch mit dem temperaturbedingter Leckagen ist, wurde kein eigener Ereignisbaum erstellt. Es gelten die gleichen Ereignispfade und Konsequenzen wie in Abb. 5.3.4.1 und 3. Bedingt durch die um den Faktor 2,7 höhere Häufigkeit des störfallauslösenden Ereignisses liegen die Ereignispfadhäufigkeiten um diesen Faktor über denen des Kapitels 5.3.4.1.

5.3.4.3 Fertigungsbedingte Leckagen an der Brennstoffzelle

Neben Leckagen, die durch unzulässige Drücke bzw. Temperaturen verursacht werden, sind auch fertigungsbedingte Leckagen an der Brennstoffzelle möglich. Es ist z.B. denkbar, daß beim Zusammenbau der Platten Undichtigkeiten entstanden sind oder sich im Laufe der Zeit Risse in den Gummidichtungen gebildet haben.

Die Brennstoffzelle gehört zu einer Spezialanfertigung, von der nur wenige Exemplare gebaut worden sind. Die anderen Exemplare wurden als U-Boot Antrieb eingesetzt, so daß keine Daten über Betriebserfahrungen zur Verfügung stehen und hierüber keine Ausfallrate ermittelt werden kann.

Aufgrund der relativ hohen Eintrittswahrscheinlichkeit druck- und temperaturbedingter Leckagen wird angenommen, daß fertigungsbedingte Leckagen hierdurch abgedeckt sind.

Auch ist bei fertigungsbedingten Leckagen bezüglich der Ausströmrates eher mit kleinen Mengen zu rechnen. Die maximale Ausströmrates von $85 \text{ Nm}^3/\text{h}$ bei temperatur- bzw. druckbedingten Leckagen wird hier wahrscheinlich seltener erreicht, so daß auch bezüglich der Ausströmrates fertigungsbedingte Leckagen durch andere Störfälle an der Brennstoffzelle abgedeckt sind.

Eine kleine Leckage an der Brennstoffzelle würde in der Regel nicht bemerkt werden, da die kritische Konzentration in der Halle von 0,4 % nicht erreicht würde.

Die Brennstoffzelle wurde jedoch nachträglich mit einer Kunststoffhaube abgedeckt, die nach oben geöffnet ist. Genau über dieser Öffnung befindet sich ein H_2 -Meßkopf, so daß durch den gerichteten Gasstrom auch geringe Mengen an ausströmendem Wasserstoff gemessen werden können. Gleichzeitig bietet die Plexiglashaube auch einen Schutz für das Personal, da eine Funkenbildung an der Leckstelle sehr unwahrscheinlich wird.

5.3.4.4 Störfallbewertung

Von den in der Halle untergebrachten Komponenten hat die Brennstoffzelle das größte Gefährdungspotential, weil hier bei Leckagen eine Freisetzung des Speicherinventars in die Halle möglich ist. Die Eintrittshäufigkeiten für Leckagen betragen infolge unzulässiger Druckerhöhungen $3,4\text{E-}3$ bzw. $9,2\text{E-}6$ und infolge Temperaturüberschreitungen $1,2\text{E-}3/\text{a}$. Die maximale Ausströmrates ist vorgegeben durch den Strömungsquerschnitt des Druckminderers und beträgt $85 \text{ Nm}^3/\text{h}$.

Bezüglich der maximalen Ausströmrates und der Eintrittshäufigkeit sind diese Lecks mit den in Kapitel 5.4.2 bewerteten mittleren Wasserstofflecks vergleichbar. Da nach dem Eintreten einer Leckage in der Zuleitung zur Brennstoffzelle als auch an der Brennstoffzelle selbst die Schutzaktionen identisch sind, sind die in Kapitel 5.4.2.7 und 5.3.4.1 erstellten Ereignisablaufdiagramme, in denen eine Verknüpfung des auslösenden Ereignisses mit eventuellen Mißerfolgen der Schutzaktionen erfolgt, ver-

gleichbar. Die Ergebnisse zeigen, daß das Schutzkonzept der PHOEBUS-Anlage bezüglich der Beherrschung mittlerer Wasserstoff-Leckraten hoch zuverlässig ist. Bei Versagen des Schutzkonzeptes (s. Kapitel 5.4.2) wird in der Halle eine Wasserstoffkonzentration je nach Wetterlage zwischen 2,3 - 3,4 % erreicht. Da bei Brennstoffzellenlecks die Ausströmrates um ca. 30 % geringer ist, wird auch die Wasserstoffkonzentration in der Halle entsprechend niedriger sein.

Also besteht selbst beim Versagen des Schutzkonzeptes keine Gefahr für die Halle, weil aufgrund der Hallendimensionierung und des natürlichen Luftwechsels die untere Zündgrenze von 4 % Wasserstoff in Luft nicht erreicht wird. Da die Verteilung allerdings nicht überall homogen sein wird, sind örtlich begrenzte Konzentrationsansammlungen mit Überschreiten der unteren Zündgrenze möglich, so daß ein Arbeitsplatzrisiko nicht ganz auszuschließen ist. Die mit $85 \text{ Nm}^3/\text{h}$ angegebene Ausströmrates ist maximal. Es ist durchaus mit kleineren Leckagen zu rechnen, bei denen nur ein Bruchteil dieser Leckrate ausströmt. Die Gefahr, daß bei diesen kleinen Leckagen der Grenzwert für einen Alarm oder das Auslösen der Schutzaktionen nicht erreicht wird und über einen längeren Zeitraum Wasserstoff unbemerkt in die Halle einströmen kann, wurde durch das Anbringen einer Plexiglashaube behoben. Hier können durch die Positionierung des H_2 -Meßkopfes direkt an der Austrittsöffnung der Haube auch kleine Lecks, wie z.B. die Undichtigkeit einer Gummidichtung nachgewiesen werden. Gleichzeitig wird durch die Plexiglashaube das Arbeitsplatzrisiko vermindert, weil eine Zündung des Gases an der Austrittsstelle erheblich verringert wird.

Die alkalische Brennstoffzelle soll in den nächsten Jahren durch eine Brennstoffzelle mit einer Polymer-Elektrolyt-Membran (PEM) ersetzt werden. Diese Brennstoffzelle zeichnet sich durch ein günstiges Überlastverhalten und durch das Fehlen eines korrosiven flüssigen Elektrolyten aus, so daß kein Elektrolytkreislauf mehr vorhanden ist und damit Leckagen, die durch den Ausfall der Elektrolytkühlung entstehen, ausgeschlossen werden können. Bei diesem neuen Brennstoffzellentyp ist folglich mit einer niedrigeren Eintrittshäufigkeit für Leckagen zu rechnen.

5.4 Wasserstoff-Störfälle innerhalb der IEV-Halle

Wasserstoff-Störfälle innerhalb der IEV-Halle konzentrieren sich auf die Bereiche Produktion (Elektrolyseur mit Gasreinigungsanlage), Verbrauch (Brennstoffzelle) und Versorgung (Leitungen). Die Gefährdungspotentiale lassen sich in zwei Gruppen einordnen:

1. H_2 -Potentiale, die innerhalb der Halle produziert oder gehandhabt werden (Kap. 5.3);
2. im Freigelände gespeichertes H_2 -Potential, welches störfallbedingt teilweise oder vollständig innerhalb der Halle bzw. des Fluchtanges freigesetzt wird (Kap. 5.4 - 5.5).

Bei der ersten Gruppe konzentriert sich das Augenmerk auf den Elektrolyseur und die Brennstoffzelle. Beispielsweise kann nach einem Diaphragmabruch im Elektrolyseur (inneres Leck) ein Gemisch aus Elektrolyt und Wasserstoff in den O_2 -Separator eingetragen werden. Wenn dann noch die Anlage fälschlich über eine längere Zeit weiterproduziert (weil die interne Gasanalyse versagt), kann es zur Bildung eines detonationsfähigen Gemisches aus Wasserstoff oder Sauerstoff im O_2 -Separator oder, bei Ausfall einer weiteren Analyseeinheit hinter der Gasreinigungsanlage, im O_2 -Zwischenspeicher kommen (Kap. 5.3).

Dagegen reichen Freisetzung von in den Anlagenkomponenten der Halle befindlichen Potentiale für die Bildung zündfähiger Gemische nicht aus. Der Betreiber weist lokale H_2 -Konzentrationen von 0,25, 0,6 bzw. 1 % in Bereichen um die Brennstoffzelle, den Elektrolyseur bzw. der Gasreinigungsanlage bei Inventaren von 0,06, 0,15 bzw. 0,3 Nm^3 aus /Goeres/.

Erst der fehlerhafte Weiterbetrieb des Elektrolyseurs nach Auftreten eines äußeren Lecks ($\max. 7 Nm^3 = \max. \text{Produktionsrate}$) kann unter Umständen lokal zu zündfähigen Gemischen ($\geq 4 \text{ Vol\% } H_2$ in Luft) führen. Selbst unter ungünstigen Luftaustauschverhältnissen (Ausfall der Abluftventilatoren und geringer natürlicher Luftwechsel) sind zündfähige Gemische großräumig kaum denkbar (Kap. 5.3).

In der Kategorie 2 werden Störfälle behandelt, bei denen der in den Speichern gelagerte Wasserstoff teilweise oder vollständig

in die Halle oder den Fluchtgang gelangt. Ausgangspunkt sind hier Leckagen an Abschnitten der Verbindungsleitungen 'Speicher - Anlagenkomponenten' innerhalb der Halle oder des Fluchtanges.

Das Spektrum möglicher Wasserstoff-Leckagen reicht bis zu Raten von $600 \text{ Nm}^3/\text{h}$ und wurde entsprechend anlagentechnischer Randbedingungen in drei Bereiche unterteilt (siehe auch Tab. 5.4-1):

- Kleine Lecks, welche die maximale Wasserstoffproduktionsrate im Elektrolyseur ($7 \text{ Nm}^3/\text{h}$) einschließen und bis zum Grenzwert der Durchflußüberwachung von $10 \text{ Nm}^3/\text{h}$ reichen;
- Mittlere Lecks, die den Bereich von $10 \text{ Nm}^3/\text{h}$ bis zur maximal möglichen Ausströmrate von $120 \text{ Nm}^3/\text{h}$ aus den Speicherbehältern bei funktionierender Hochdruckreduzierung umfassen;
- Große Lecks, die das Versagen der Hochdruckreduzierung voraussetzen und bei funktionierender Überdrucksicherung zu einer maximalen Leckrate von $600 \text{ Nm}^3/\text{h}$ führen.

Der Fluchtgang (Verbindungsgang von der Halle zum Freigelände) stellt einen separaten Gefährdungsbereich dar. Durch ihn werden die Wasserstoffleitungen von den Speichern zu den Anlagenkomponenten der Halle geführt. Aufgrund von Nachrüstmaßnahmen werden Lecks in diesem Bereich nun auch vom Gaswarnsystem erfaßt (Kap. 5.5).

Die Berechnungen und Abschätzungen der Leckraten und der störfallbedingt zu erwartenden H_2 -Konzentrationen finden sich in Kapitel 6.

Anlageninterne Störfälle mit Eintrag von H_2 in O_2 (Kap. 5.3):

- Inneres Leck ($0,3 \text{ Nm}^3/\text{h}$) im Elektrolyseur.
(Diaphragmabruch, Ausfall interner Gasanalyse, Weiterlauf der Anlage).
- Inneres Leck in der Brennstoffzelle.
(Versagen Druckminderventil, Folgeversagen Zellmembranen)
- Äußeres Leck an der Brennstoffzelle.
(Versagen Elektrolytpumpe, Ausfall interner Überwachungseinrichtungen, temperaturbedingtes Einschlußversagen)

Leckagen mit H_2 -Freisetzung in die Halle (Kap. 5.4):

- Kleine Lecks ($\leq 10 \text{ Nm}^3/\text{h}$) in der Gasleitung zwischen Hochdruckspeichern und Brennstoffzelle bzw. Elektrolyseur und Zwischenspeicher.
- Mittlere Lecks ($< 120 \text{ Nm}^3/\text{h}$) in der Gasleitung zwischen Hochdruckspeichern und Brennstoffzelle.
- Große Lecks ($\leq 600 \text{ Nm}^3/\text{h}$) in der Gasleitung zwischen Hochdruckspeicher und Brennstoffzelle.
(Versagen Druckreduzierventil und Folgeversagen der Gasleitung).

Leckagen mit Freisetzung von H_2 in den Fluchtgang (Kap. 5.5):

- Kleine Lecks ($\leq 10 \text{ Nm}^3/\text{h}$) in der Gasleitung zwischen Elektrolyseur und Zwischenspeicher bzw. Hochdruckspeichern und Brennstoffzelle.
- Mittlere Lecks ($\leq 120 \text{ Nm}^3/\text{h}$) in der Gasleitung zwischen Hochdruckspeichern und Brennstoffzelle.
- Große Lecks ($\leq 600 \text{ Nm}^3/\text{h}$) in der Gasleitung zwischen Elektrolyseur und Zwischenspeicher.
(Rückwärtsentleerung des Zwischenspeichers)

Freisetzung von H_2 in die Umgebung (Kap. 5.6):

- Versagen von H_2 -Speicherbehältern, Anschlußleitungen

Tab. 5.4-1 Betrachtete Wasserstoff-Störfälle

5.4.1 Kleine Wasserstofflecks

5.4.1.1 Beherrschung kleiner Wasserstofflecks

Als kleines H_2 -Leck wird der Austritt von bis zu $10 \text{ Nm}^3/\text{h}$ betrachtet. Diese Grenze wurde gewählt, weil der Grenzwert für die Durchflußüberwachung (FIR 102) wegen Spülvorgängen bei $10 \text{ Nm}^3/\text{h}$ liegt. Der Arbeitsbereich der Brennstoffzelle liegt bei einem Verbrauch zwischen $1 - 4 \text{ Nm}^3/\text{h}$; die H_2 -Produktion des Elektrolyseurs liegt bei maximal $6,5 \text{ Nm}^3/\text{h}$. Verluste von bis zu $10 \text{ Nm}^3/\text{h}$ aus den Speichern in die Halle werden also nicht von der Durchflußüberwachung als Störung erkannt. Allerdings steht das Gaswarnsystem als eigentliches Störfallerkennungssystem für die Wasserstofffreisetzung zur Verfügung (Ex-Melder, Grenzwert: 20% der UEG; UEG: 4 Vol% in Luft). Hierfür sind sechs Wasserstoff-Meßköpfe in der Halle installiert, zwei direkt unter der Hallendecke über dem Aufstellungsbereich der Anlagenkomponenten, jeweils zwei unmittelbar oberhalb jeder H_2 -führenden Komponente (Abb. 1.5-1).

Für die Erkennung von O_2 -Lecks in die IEV-Halle ist dagegen lediglich die Durchflußüberwachung FIR 103 vorhanden (Abb. 1.5-3). Auch hierfür liegt der Erkennungsgrenzwert bei $10 \text{ Nm}^3/\text{h}$.

Die Durchflußüberwachungen steuern die außerhalb der Halle angeordneten redundanten Absperrventile V-103.1/2 und 111 (H_2 -Abströmleitung) bzw. V-104.1/2 und 112 (O_2 -Abströmleitung) an (Abb. 1.5-3).

Als Leckort wird der Leitungsbereich zwischen Eintritt in die Halle (Westseite, Kote 3m) und der Druckreduzierstation an der BZ (Rohrlänge etwa 12 m) betrachtet.

Bei kleinen Lecks sprechen - wenn überhaupt - nur die beiden Ex-Melder unter dem Dach der Halle (Kote 17m) an. Da der Wasserstoff in Luft aufgrund seiner niedrigen Dichte sehr schnell aufsteigt (Literatur: $1,2 - 9 \text{ m/s}$), kommt es dort eventuell zu einer Konzentrationsanreicherung im Bereich des Ansprechwertes.

Bleibt die Konzentration dagegen langfristig unterhalb des Grenzwertes oder fallen die Ex-Melder aus, könnte Wasserstoff unter Umständen unbemerkt über einen längeren Zeitraum (Tage) in

die Halle einströmen. Dies gilt allerdings nur für die Freisetzung des Speicherinventars.

Bei einer produktionsgerichteten Leckage von Wasserstoff ist dies nur während des Elektrolysebetriebes möglich; an einem Hochsommertag ca. 14 Stunden, wobei die Spitzenleistung von $6,5 \text{ Nm}^3/\text{h}$ nur für ca. 3,5 Stunden erreicht wird.

Bei der Freisetzung des Speicherinventars handelt es sich um deutlich größere Mengen, so daß produktionsbezogene Leckagen abgedeckt sind.

5.4.1.2 Hallenluftwechsel

Für die Entstehung eines zündfähigen Luftgemischs in der Halle ist deren Luftbewegung und Luftwechsel entscheidend.

Bezüglich der sicherheitstechnischen Begutachtung der Anlage durch den TÜV verlangt dieser im Bereich der Experimentieraufstellung (s. Abb.1.5-1, $18 \text{ m} \times 7,80 \text{ m}$) einen 5-fachen Luftwechsel /Sicherh/.

Als anzunehmender Luftwechselraum werden die Grundfläche (140 m^2) und eine Höhe von $3,50 \text{ m}$ angenommen. Daraus ergibt sich ein Luftvolumen von 491 m^3 mit einem erforderlichen Luftwechsel von $2457 \text{ m}^3/\text{h}$.

Über dem Experimentierbereich sind im Dach 3 Öffnungen mit je $0,32 \text{ m}^2$ Querschnitt vorhanden (Abb. 1.5-2). Die zugehörigen Abluftventilatoren befinden sich auf dem Hallendach. In diesen Öffnungen befinden sich Jalousie-Klappen, deren Antriebe inzwischen stillgelegt wurden, damit die Offenstellung gewährleistet ist.

Die Ventilatoren sind mit Hauben und Gittern gegen Witterungseinflüssen geschützt. Eine Besichtigung der Ventilatoren ergab keine erkennbaren Verstopfungsmöglichkeiten der Abluftkanäle.

Aufgrund durchgeführter Messungen des Betreibers ist über die drei Dachöffnungen ein natürlicher Luftwechsel von $3570 \text{ m}^3/\text{h}$ bei stehenden Ventilatoren möglich. Werden die Ventilatoren bei Ansprechen des Gaswarnsystems gestartet, erhöht sich dieser Durchsatz auf ebenfalls gemessene $21380 \text{ m}^3/\text{h}$.

5.4.1.3 Wasserstoffkonzentration der Halle

Auf der Basis des gemessenen, natürlichen Luftwechsels ergeben Berechnungen in Kapitel 6, daß auch bei vollständiger Einströmung der maximal gespeicherten Wasserstoffmenge (3000 Nm^3) die maximale H_2 -Konzentration in der Halle bei homogener Vermischung unter 0,5 % und damit noch unterhalb des Ansprechgrenzwertes der Ex-Melder (20 % des UEG) und etwa im Ansprechbereich des Voralarms (10 % des UEG) bleibt. Der Ausströmvorgang erstreckt sich über mehr als 300 Stunden. Vermutlich wird die Konzentration nicht homogen verteilt sein, sondern im Deckenbereich höher liegen, so daß ein Ansprechen der dort angeordneten Ex-Melder zu erwarten ist. Unter Umständen können zündfähige Gasgemische örtlich begrenzt auftreten, die für die Hallenintegrität als unbedeutend einzustufen sind.

5.4.1.4 Störfallbewertung

In der untersten Leckkategorie mit Wasserstofflecks bis zu $10 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ist auch im ungünstigsten Fall, falls der gesamte gespeicherte Wasserstoff von 3000 Nm^3 in einem Zeitraum von etwa 300 Stunden in die Halle einströmen würde, nicht mit einer die Hallenintegrität gefährdenden Wasserstoffkonzentration von global mindestens 4 Vol.% in der Hallenluft zu rechnen. Auf die probabilistische Bewertung von Störfallsequenzen kann daher verzichtet werden. Selbst bei ungünstigster Wetterlage mit Umgebungstemperaturen, die deutlich über der Hallentemperatur liegen (der natürliche Luftwechsel über die Öffnungen in der Hallendecke wird dadurch verringert), werden keine zündfähigen Konzentrationen erwartet (Kap. 6).

5.4.2 Mittlere Wasserstofflecks

Die mittleren Wasserstofflecks decken den Bereich von 10 bis etwa $120 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ab. Die untere Grenze ergibt sich aus dem Grenzwert der Durchflußüberwachung von $10 \text{ Nm}^3/\text{h}$ und die obere Grenze aus der bei funktionierender Druckreduzierung (150 - 7 bar) maximal möglichen Ausströmrates. Diese Lecks können nur an der Gasleitung von den Hochdruckspeichern zur Brennstoffzelle auftreten. Aus der Leitung zwischen Elektrolyseur und Zwischenspeicher kann prozeßbedingt nur die H_2 -Produktionsrate des Elektrolyseurs von $\leq 7 \text{ Nm}^3/\text{h}$ entweichen. Für die weitere Störfallbetrachtung wird konservativ die obere Ausströmrates angesetzt.

5.4.2.1 Abschätzung der Leckhäufigkeit

Die Gasleitungen zwischen den Anlagenkomponenten und den Gas speichern bestehen aus Edelstahl (VA 1.45.74 oder 71, $\phi_a=16 \text{ mm}$, $s=1 \text{ mm}$). Etwa 10 Preßverbindungen ('flareless tube fittings') der Fa. Hoke, verbinden die einzelnen Rohrabschnitte in der Halle. Die Wahrscheinlichkeit für das plötzliche Ab- oder Aufreißen eines solchen - nichtgeschweißten - Rohres aufgrund von Werkstoff- oder Fertigungsfehlern wird in der Fachwelt als sehr gering angesehen ($<1\text{E}-9/\text{m a}$). Wahrscheinlicher ist, daß eine der Rohrverbindungen fehlerhaft ausgeführt wird und im Laufe der Zeit z.B. durch Erschütterungen eine Leckage oder ein vollständiges Versagen der Verbindung auftritt. Fehler die die Verbindung direkt beeinträchtigen, werden bei der Druckprüfung (30 bar) entdeckt.

Eine Durchsicht statistisch erhobener Fehlhandlungen weist in /Reer/ für ein hier infrage kommendes Fehlhandlungsmuster der Art: 'Falsches Drehmoment aufgebracht', eine Wahrscheinlichkeit von $1\text{E}-4$ pro Handlung aus. Daraus folgt bei ca. 10 herzustellen den Verbindungen eine Fehlerwahrscheinlichkeit von etwa $1\text{E}-3$ an einer der Verbindungen.

Dieser Wert ist noch zu verknüpfen mit der Wahrscheinlichkeit für eine diese unkorrekt ausgeführte Verbindung lösende Einwirkung. Über solche Einwirkungen liegen keine Erfahrungen vor. Sie werden im Sinne einer konservativen Abschätzung mit der Wahr-

scheinlichkeit 1 unterstellt. Die Häufigkeit für ein mittleres Wasserstoffleck wird dementsprechend zu $1\text{E-}3$ pro Jahr angesetzt.

5.4.2.2 Bewertung der Hallen-Gasüberwachung

Zur Überwachung der Hallenluft auf unkontrolliert austretenden Wasserstoff sind sechs ex-geschützte H_2 -Meßköpfe (Fernsensoren der Fa. Sieger) in der Nähe potentieller Leckstellen (Elektrolyseur, Brennstoffzelle, Batterie) und zwei unterhalb der Hallendecke installiert.

Der ausströmende Wasserstoff diffundiert durch eine Sintermetall-Scheibe zur eigentlichen Meßkammer und wird dort quantitativ bestimmt. Das hieraus resultierende Meßsignal wird zum zugehörigen Gaswarngerät geführt.

Der Sensor arbeitet nach dem Prinzip der Wärmetönung (katalytische Verbrennung). Hierbei wird die Verbrennungswärme von Gasen als Meßgröße ausgenutzt. Die Verbrennung wird durch die Vorheizung des katalytisch aktiven Sensorelementes eingeleitet. Die entstehende Reaktionswärme verursacht eine Temperatur- und Widerstandserhöhung des katalytisch aktiven Sensorelementes, die gemessen wird. Die Widerstandsänderung dient als Maß für die verbrannte Gaskomponente. Es fließt ein Strom, der ins Verhältnis zur herrschenden Gaskonzentration gebracht wird. Dieses Signal wird im Gaswarngerät zum Schalten der Alarme (1. und 2. Grenzwert) und zur Anzeige der Gaskonzentration genutzt.

Bei der Messung muß gewährleistet sein, daß die Meßkomponente (hier Wasserstoff) restlos verbrennt. Der Reaktionspartner (hier Sauerstoff) muß deshalb im Überfluß vorhanden sein.

Wird nach Auftreten eines Wasserstofflecks in der Halle an einem der sechs Wasserstoff-Meßköpfe eine H_2 -Konzentration in der Hallenluft von 20% des unteren Explosionsgrenzwertes (4% in Luft) erreicht, löst das Gaswarnsystem folgende automatische Schutzaktionen aus:

- Anlagenabschaltung
- Schließen der Gasleitungen zwischen den H_2 - bzw. O_2 -Speichern und den Hallenkomponenten
- Start der drei Abluftventilatoren in der Hallendecke.

Der überwiegende Teil der Gasleitungen liegt außerhalb des direkten Erfassungsbereichs der Meßköpfe, die unmittelbar oberhalb der Anlagenkomponenten 'Elektrolyseur' und 'Brennstoffzelle' installiert sind. Auf Grund der hohen Auftriebsgeschwindigkeit von Wasserstoff und der unterhalb der Leitungen befindlichen Hallen-Zuluftschächte werden diese Meßköpfe für die frühe Störfallerfassung (Start der Abluftventilatoren) nicht berücksichtigt.

Strömt allerdings Wasserstoff ungehindert in die Halle (Ausfall der übrigen Störfallerfassungssysteme (Decken-Meßköpfe und Durchflußmessung), erreicht die H_2 -Konzentration im Laufe der Zeit auch im Bereich der Komponenten den Störfallgrenzwert, so daß die Auslösung der Schutzaktionen später auch durch deren Meßköpfe erfolgt.

Für die Bewertung des Gasüberwachungssystems wird daher hinsichtlich der Erfassung der H_2 -Konzentration zwischen zweifach redundanter Schutzanregung in der 'frühen' und sechsfach redundanter Anregung in der 'späten' Störfallphase unterschieden.

Bei Ausfall der 'frühen' Schutzanregung besteht die Gefahr der Entstehung örtlich zündfähiger Gemische, vor allem unterhalb der Hallendecke, und damit die Gefahr, daß beim Start der nicht explosionsgeschützten Ventilatoren die Gaswolke gezündet wird und Folgeschäden an den Ventilatoren auftreten.

Im IEV sind seit einigen Jahren funktionsgleiche Wasserstoff-Überwachungseinrichtungen dreier Hersteller (Dräger, Sieger und Ados) im Einsatz. Seit zwei Jahren werden diese insgesamt 36 Meßköpfe (25 Dräger, 9 Sieger, 2 Ados) der verschiedenen H_2 -Labors regelmäßig zweimal jährlich mit einem konditionierten Gas getestet. Diese Tests werden von der KFA-Feuerwehr (einmal in Anwesenheit des TÜV) durchgeführt. Hierbei wurden keine Ausfälle registriert.

Die Ergebnisse früherer, nichtdokumentierter Tests (ohne TÜV) können für eine Bewertung nicht herangezogen werden.

Die etwa seit einem Jahr installierten 8 'Sieger'-Meßköpfe der PHOEBUS-Anlage wurden bislang einmal von der KFA-Feuerwehr ohne Befund getestet. Sie werden mit der Inbetriebsetzung der Anlage

auch vom TÜV überwacht (gleiches Testintervall wie bei den übrigen Meßköpfen).

Der Bewertung der Wasserstoff-Überwachungseinrichtungen können somit insgesamt 140 Testanforderungen mit Null Ausfällen zugrundegelegt werden. Die Nutzung dieser Nullfehlerstatistik zur Ermittlung einer IEV-spezifischen Ausfallwahrscheinlichkeit der Gasüberwachung ergibt für den Ausfall eines Meßkopfes einen Wert von $7,1E-3$ pro Anforderung. Bei der Nullfehlerstatistik wird unterstellt, daß bei der nächsten Anforderung ein Ausfall auftreten würde. Bei Fortschreibung der Nullfehlerstatistik verbessert sich der Wert mit der Verbreiterung der Betriebserfahrungen.

Berücksichtigt man lediglich die Betriebserfahrungen mit den 'Sieger'-Meßköpfen, erhält man bei 44 Nullfehler-tests eine spezifische Ausfallwahrscheinlichkeit von $2,3E-2$ pro Anforderung. Um auf der sicheren Seite zu liegen, wird dieser vermutlich konservative Wert für die Bewertung der Wasserstoff-Überwachung der Halle angesetzt.

Für den Ausfall des Gasüberwachungssystems müßten in der 'frühen' Störfallphase die beiden Decken-Meßköpfe und in der 'späten' Phase alle sechs Meßköpfe unverfügbar sein. Neben Mehrfach-Ausfällen, deren Ursachen unabhängig voneinander auftreten, sind für baugleiche Komponenten auch Ausfälle zu berücksichtigen, die durch gemeinsame Ursachen hervorgerufen werden. Im vorliegenden Fall wird unterschieden zwischen dem gemeinsam verursachten Ausfall der beiden Decken-Meßköpfe und dem aller Meßköpfe. Kritisch sind Totalausfälle oder Kenndatendriffs, wodurch die Meßköpfe gar nicht oder zu spät ansprechen.

Da im vorliegenden Fall noch keinerlei Ausfälle aufgetreten sind, müssen Anteile für gemeinsam verursachte Ausfälle in Anlehnung an Erfahrungen aus der Nuklearindustrie mit redundanten Sicherheitseinrichtungen geschätzt werden.

Im folgenden wird für den gemeinsam verursachten Ausfall von zwei bestimmten Meßköpfen (Hallendecke) eine Wahrscheinlichkeit von $2,3E-3$ pro Anforderung angesetzt. Dieser Wert beinhaltet die Schätzung, daß in 10 % der Fälle neben dem Ausfall eines Kopfes

auch der benachbarte aufgrund der gleichen Ursache nicht verfügbar ist.

Der gemeinsam verursachte Ausfall aller sechs in größerer räumlicher Distanz angeordneter Meßköpfe, wird demgegenüber als deutlich unwahrscheinlicher angesehen. Aus in probabilistischen Sicherheitsanalysen verwendeten Daten lassen sich in Abhängigkeit vom betroffenen Redundanzgrad Ausfallanteile von etwa 2 % für einen hohen Ausfallgrad (z.B. 4 v 4 Ausfall) und bis zu 10 % für einen niedrigen Ausfallgrad (z.B. 2 v 4 Ausfall) ableiten. In Anlehnung hieran wird für den gemeinsam verursachten Ausfall aller sechs Meßköpfe (6 v 6 Ausfall) konservativ ein Ausfallanteil von 2 % und damit eine Ausfallwahrscheinlichkeit von $4E-4/A$ angesetzt.

Für den Ausfall der zentralen Meßwertverarbeitungsanlage (Meßschrank) wird mangels Daten eine Wahrscheinlichkeit von $1E-4$ pro Anforderung geschätzt.

Die Auswertung des Fehlerbaums in Abb. 5.4.2.2-1 liefert für die Wasserstoff-Schutzanregung in der frühen Störfallphase eine Ausfallwahrscheinlichkeit von etwa $3E-3$ pro Anforderung. Die 'minimal-cut-set'-Liste 'H2ANREG12' in Tab. 5.4.2.2-1 weist den geschätzten Wert für einen gemeinsam verursachten Ausfall der beiden Meßköpfe mit einem Anteil von 78,6 % als deutlich dominierend aus. Der unabhängige Ausfall der beiden Meßköpfe liefert bei diesem geringen Redundanzgrad noch einen Beitrag von etwa 18 %. Der Ausfall des Meßschanks spielt hier nur eine untergeordnete Rolle (3,4 %).

Für die Wasserstoff-Schutzanregung in der späten Störfallphase (Abb. 5.4.2.2-2) ergibt sich eine Ausfallwahrscheinlichkeit von etwa $5E-4$ pro Anforderung. Die 'minimal-cut-set'-Liste 'H2ANREG18' (Tab. 5.4.2.2-2) weist den Wert für einen gemeinsam verursachten Ausfall aller sechs Meßköpfe als mit 80 % deutlich dominierend aus.

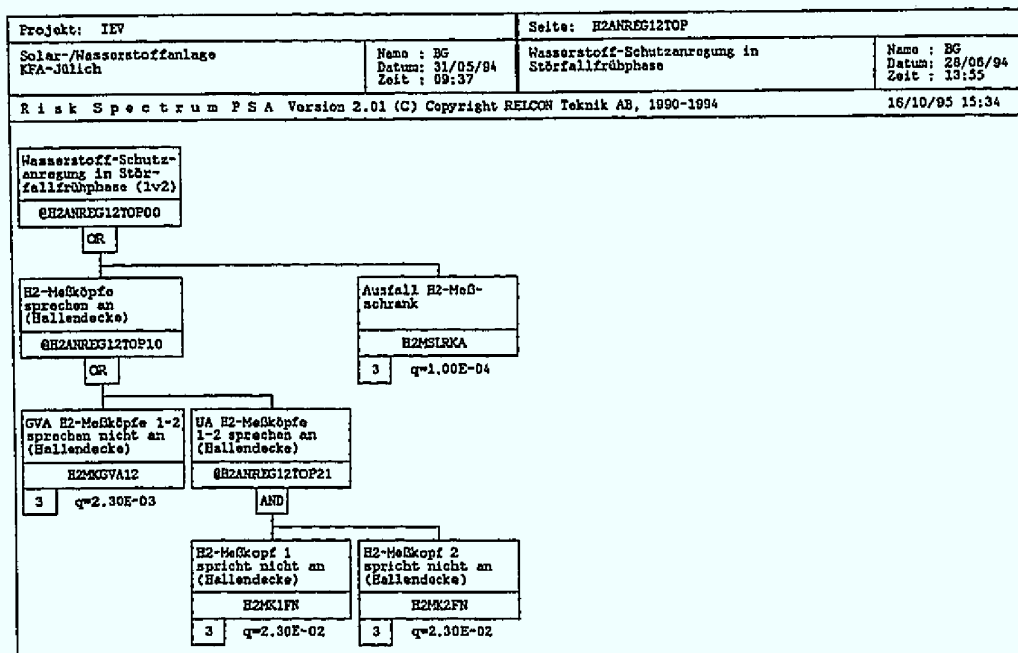


Abb. 5.4.2.2-1: Fehlerbaum 'Frühe Wasserstoff-Schutzanregung'

16/10/95 16:04

Risk Spectrum MCS Version 2.02

Projekt : IEV Solar-/Wasserstoffanlage KFA-Jülich
 TOP-Ereignis: H2ANREG12 Keine Wasserstoff- Schutzanregung; Frühe Störfallphase

Mittlere Unverfügbarkeit = 2.93E-03

Nr	Unverfüg.	%	Ereignisse	
1	2.30E-03	78.57	H2MKGVA12	GVA H2-Meßköpfe 1-2 sprechen nicht an (Hallendecke)
2	5.29E-04	18.07	H2MK1FN H2MK2FN	H2-Meßkopf 1 spricht nicht an (Hallendecke) H2-Meßkopf 2 spricht nicht an (Hallendecke)
3	1.00E-04	3.42	H2MSLRKA	Ausfall H2-Meß- schrank

Tab. 5.4.2.2-1: 'Cut-set'-Liste: 'Frühe Wasserstoff-Schutzanregung'

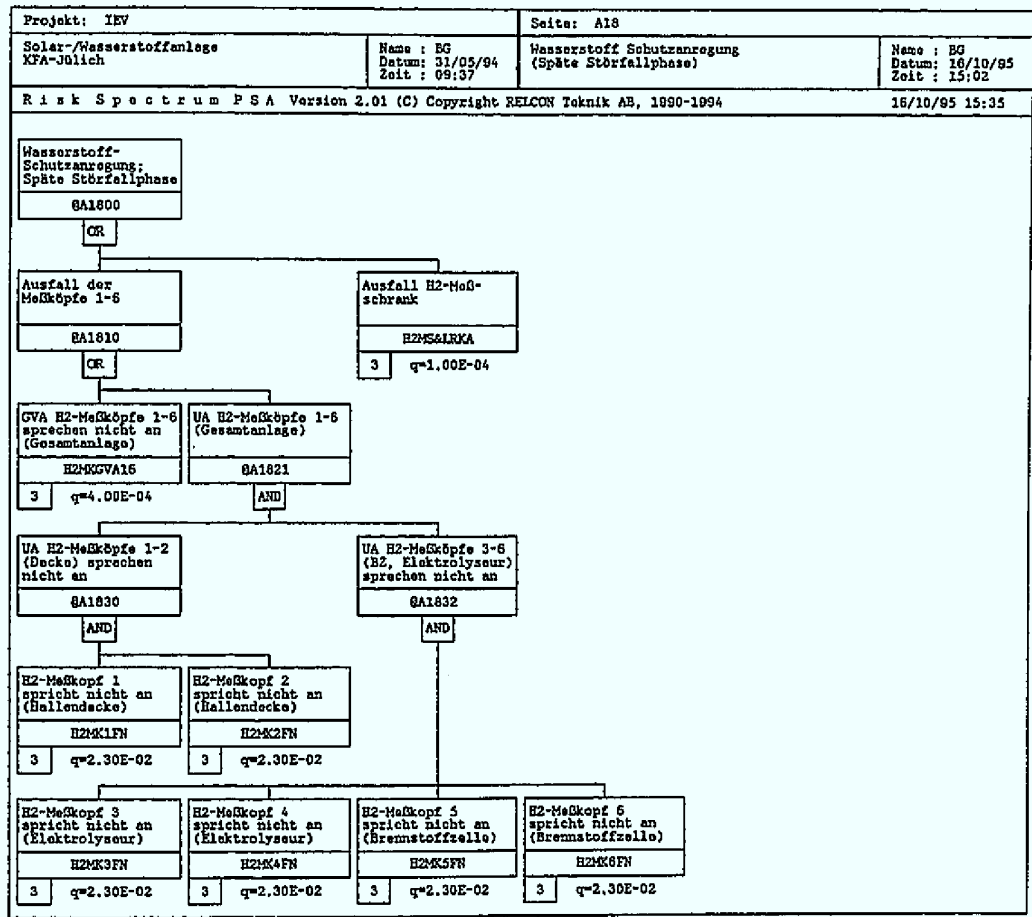


Abb. 5.4.2.2-2: Fehlerbaum 'Späte Wasserstoff-Schutzanregung'

16/10/95 16:02

Risk Spectrum MCS Version 2.02

Projekt : IEV Solar-/Wasserstoffanlage KFA-Jülich
TOP-Ereignis: A18 Keine Wasserstoff- Schutzanregung; Späte Störfallphase

Mittlere Unverfügbarkeit = 5.00E-04

Nr	Unverfüg.	%	Ereignisse
1	4.00E-04	80.01	H2MKGVA16 GVA H2-Meßköpfe 1-6 sprechen nicht an (Gesamt)
2	1.00E-04	20.00	H2MS&LRKA Ausfall H2-Meß- schrank
3	1.48E-10	.00	H2MK3FN H2-Meßkopf 3 spricht nicht an (Elektrolyseur) H2MK4FN H2-Meßkopf 4 spricht nicht an (Elektrolyseur) H2MK5FN H2-Meßkopf 5 spricht nicht an (Brennstoffzell H2MK6FN H2-Meßkopf 6 spricht nicht an (Brennstoffzell H2MK1FN H2-Meßkopf 1 spricht nicht an (Hallendecke) H2MK2FN H2-Meßkopf 2 spricht nicht an (Hallendecke)

Tab. 5.4.2.2-2: 'Cut-set'-Liste 'Späte Wasserstoff-Schutz-anregung'

5.4.2.3 Bewertung der Durchflußüberwachung

Die Gasdurchfluß-Überwachung in den beiden Wasserstoff- bzw. Sauerstoff-Versorgungsleitungen erfolgt mittels thermischer Massendurchfluß-Meßgeräte der Fa. Bronkhorst (Baureihe 'EL-FLOW'). Im Gegensatz zu volumetrischen Durchflußmessern benötigen die thermischen Massendurchfluß-Meßgeräte dieser Baureihe keine zusätzlichen Temperatur- und Druckfühler.

Die Laminarströmungsvorrichtung setzt sich aus einer Kombination mehrerer Edelstahl-Scheiben mit eingeätzten Durchflußkanälen zusammen. Jeder Durchflußkanal entspricht strömungstechnisch der Sensorkapillare, und jede Scheibe einem festgelegten Durchflußbereich. Diese Konstruktion gewährleistet ein konstantes Durchflußverhältnis zwischen dem gemessenen Teilstrom und dem Hauptstrom. Auch bei extrem schwankenden Betriebsverhältnissen bleibt das kalibrierte Verhältnis unverändert.

In den verschiedenen Labors des IEV sind diese Durchflußmeßgeräte im Einsatz. Sie unterliegen keinen wiederkehrenden Funktionsprüfungen durch den TÜV, so daß keine Aufzeichnungen über die bisherigen Betriebserfahrungen vorliegen. Nach Auskunft des Betreibers arbeiten diese Geräte zuverlässig. Ob die Durchfluß-Meßgeräte der PHOEBUS-Anlage wiederkehrend vom TÜV geprüft werden, ist noch offen. Im Rahmen dieser Analyse wird ein jährliches Funktionsprüfintervall unterstellt.

Für die in Kernkraftwerken zur Durchflußmessung hauptsächlich zum Einsatz kommenden radizierenden Differenzdruck-Meßwerke - vorwiegend Bartonzellen - wurde in /GRS2/ für den Totalausfall eine relativ hohe Ausfallrate von $20\text{E-}6/\text{h}$ ermittelt. Dieser Wert ist wegen des andersartigen Funktionsprinzips nicht übertragbar. Bei den vorliegenden Meßwerken spielen vermutlich Fehler an elektronischen Bauteilen oder Funktionsgruppen eine größere Rolle. Solche Teile weisen eine hohe Zuverlässigkeit aus. Ausfälle könnten aber auch durch Verstopfungen an den Durchflußkanälen der Laminarströmungsvorrichtung hervorgerufen werden. In /GRS3/ wird für die Verstopfung einer Durchflußmeßstelle eine Eintrittsrate von $6,9\text{E-}6/\text{h}$ angegeben. Im vorliegenden Fall könnten wegen der Gasmedien günstigere Verhältnisse vorliegen. Da keine spezifischen Ausfalldaten vorliegen, wird dieser Wert

als ergebnisbestimmend für den Ausfall der vorliegenden Meßwerke angesetzt, also auch abdeckend für Ausfälle an den elektrischen Bauteilen. Korreliert man diese Ausfallrate mit einem jährlichen Inspektionsintervall, ergibt sich für den Ausfall der Gasdurchflußüberwachung bei Anforderung im Störfall d.h. bei Durchsätzen $>10 \text{ Nm}^3/\text{h}$, eine Wahrscheinlichkeit von $3\text{E}-2$.

5.4.2.4 Bewertung der Gasabsperrung

Bei zu hoher Wasserstoffkonzentration in der IEV-Halle ($\geq 20\%$ UEG) oder zu hohem Gasdurchsatz in einer der Versorgungsleitungen ($\geq 10 \text{ Nm}^3/\text{h}$) werden außerhalb der IEV-Halle befindliche Absperrventile automatisch geschlossen. Bei der hier interessierenden H_2 -Leitung 'Hochdruckspeicher - Brennstoffzelle' sind dies die redundanten Ventile 111, 103.1 und 103.2 (Abb. 1.5-3).

Die Ventile werden pneumatisch angesteuert und schließen bei Ausfall der Steuerluft selbsttätig durch Federkraft ('fail safe' Prinzip).

Für diese Ventile, gleiche befinden sich in den IEV-Labors, liegen keine spezifischen Zuverlässigkeitskenngrößen vor. Für die Bewertung des Gasabsperrkonzeptes ist somit die Verwendung generischer Erfahrungen mit pneumatisch gesteuerten Absperrventilen erforderlich. Hierzu wird die Auswertung von AVR-Betriebserfahrungen mit heliumbeaufschlagten Ventilen herangezogen /Jül-514/.

Für pneumatisch betriebene Absperrventile in den Heliumkreisläufen (Gasreinigung, Sperrgas, Spülgas und Reingas) wurde eine mittlere Ausfallrate von $4,8\text{E}-6/\text{h}$ ermittelt. In dieser Ausfallrate sind alle aufgetretenen Schäden, die im wesentlichen auf die Bereiche 'Endschalter', 'Dichtigkeit' und 'Betätigung' entfallen, erfaßt.

Es wurden keine spezifischen Angaben für die Ausfallarten 'öffnet oder schließt nicht', 'innere oder äußere Leckage', ausgewiesen. Allerdings wird ein Grobraster für die Verteilung der Schäden gezeigt. Danach dominiert der Bereich 'Endschalter' mit einem Anteil von mehr als 40 %, gefolgt von Undichtigkeiten (innere bzw. äußere Leckagen) mit etwa 20 % und dem Bereich 'Betätigung' mit 10 bis 20 %.

Zur Abdeckung von Unsicherheiten wird der oben genannte Wert von $4,8\text{E-}6/\text{h}$ voll auf die PHOEBUS-Anlage für die Ausfallart 'öffnet oder schließt nicht' angesetzt.

Dieser Wert deckt sich zudem recht gut mit Angaben in /GRS2/ für gesteuerte Absperrventile mit Wasserstoff als Betriebsmedium. Für die Ausfallart 'öffnet oder schließt nicht', wird dort eine mittlere Ausfallrate von $6,5\text{E-}6/\text{h}$ ausgewiesen. In dieser Untersuchung sind Unterscheidungen zwischen Ventiltypen nicht näher spezifiziert.

Bei Außerachtlassung des Einflußmerkmals 'Betriebsmedium' weist die Untersuchung für die Ausfallart 'öffnet oder schließt nicht' mit $14,1\text{E-}6/\text{h}$ eine um den Faktor 2,2 höhere Ausfallrate aus. Dieser Wert wird für die vorliegenden Absperrventile als nicht repräsentativ angesehen.

In der gleichen Untersuchung wurden für innere bzw. äußere Ventilleckagen Ausfallraten von $3,8$ bzw. $4,1\text{E-}6/\text{h}$ ermittelt. Diese Werte liegen im Bereich der aus den AVR-Erfahrungen /Jül-514/ ableitbaren Daten.

Das Schließen eines Ventils reicht für die Absperrung der Leitung aus. Ob bei einer erfolgreichen Absperraktion alle Ventile ihre Funktion erfüllt haben, läßt sich hieraus nicht erkennen. Da außerdem noch unklar ist, ob und in welchem Umfang wiederkehrende Funktionsprüfungen erfolgen, werden bei der Bewertung konservativ nur zwei der drei redundanten Absperrventile berücksichtigt.

Korreliert man die oben genannte Ausfallrate von $4,8\text{E-}6/\text{h}$ mit einem jährlichen Prüfintervall, erhält man für das Schließversagen eines Ventiles einen Erwartungswert von $2,1\text{E-}2$ pro Anforderung. Für das hier interessierende Winterhalbjahr reduziert sich dieser Wert auf $1\text{E-}2$. Das Schließversagen von zwei Absperrventilen aufgrund unabhängig voneinander verursachter Fehler ergibt sich zu $1,1\text{E-}4$ pro Anforderung.

Für einen gemeinsam verursachten Ausfall (GVA) der redundanten Ventile liegen keine 'passenden' Daten vor. In /GRS4/ wird für den abhängigen Ausfall von '2 von 2' Motorabsperrventilen ein Erwartungswert von $1,3\text{E-}4$ pro Anforderung angegeben, bezogen auf

ein Fehlererkennungsintervall von 12 Monaten. In /Jül-422/ wurden auf der Basis amerikanischer Betriebserfahrungen mit Motorabsperrventilen eine Ausfallrate von $2,3E-7/h$ für das Funktionsversagen von '2 von 2' Ventilen ermittelt. Hieraus ergibt sich für das interessierende Winterhalbjahr mit $5E-4$ pro Anforderung ein ähnlicher Wert wie oben und ein ähnlicher Wert wie für den unabhängigen Ausfall der Ventile. Dieser ungünstigere Wert von $5E-4/\text{Anforderung}$ wird trotz der nicht zutreffenden Ventilart dieser Analyse zugrundegelegt, um den Bereich der durch gemeinsame Fehler verursachten Ausfälle abzudecken.

Würden alle drei Ventile in Rechnung gestellt, spielten unabhängig voneinander verursachte Ventilausfälle fürs Ergebnis keine Rolle mehr. Der Zugewinn durch die höhere Absperrredundanz würde aber durch gemeinsam verursachte Ausfälle auf etwa $1E-4/A$ beschränkt.

Der Fehlerbaum in Abb. 5.4.2.4-1 zeigt die Fehlerverknüpfungen, die zum Absperrversagen der Wasserstoff-Versorgungsleitung führen.

Bei Ausfall der automatisch schließenden Ventile kann bei vorhandenem Personal und zulässiger Zeitverzögerung die Gasleitung alternativ über das Handabsperrventil HV-101 außerhalb der Halle abgesperrt werden.

Für das Schließversagen des Handabsperrventils wird aus der Literatur /GRS2/ eine Ausfallrate von $1E-6/h$ abgeleitet. Mit einem Prüfintervall von einem Jahr ergibt sich eine Versagenswahrscheinlichkeit von $4,4E-3$ pro Anforderung. Dieser Wert ist im Vergleich zu menschlichen Fehlhandlungen bei dieser Notmaßnahme unbedeutend. Aus /Reer2/ wird für das Ausbleiben oder fehlerhafte, oder nicht rechtzeitige Ausführen dieser Handmaßnahme innerhalb eines zulässigen Zeitfensters von 30 Minuten insgesamt eine Wahrscheinlichkeit von $0,17/A$ angesetzt.

Diese Handmaßnahme kommt in der frühen Störfallphase ($< 30 \text{ min}$) nicht zum Tragen.

Bei der Bewertung des Absperrkonzeptes wird somit unterschieden zwischen praktisch verzögerungsfreier Absperrung ('frühe' Störfallphase) und verzögerter Absperrung ('späte' Störfallphase).

Die zugehörigen Fehlerbäume sind in den Abb. 5.4.2.4-1 und 2 dargestellt.

Die Auswertung der Fehlerbäume ergibt für das frühe Absperrversagen der Gasleitung eine Wahrscheinlichkeit von $6,2E-4$ pro Anforderung. Die 'minimal cut set'-Liste in Tabelle 5.4.2.4-1 weist mit einem Anteil von knapp 80 % den gemeinsam verursachten Ausfall beider Absperrventile als deutlich ergebnisbestimmend aus, gefolgt vom unabhängigen Ausfall beider Ventile, mit ca. 17 %. Auf Rang 3, mit ca. 3 %, folgt der Ausfall der Ventilanregung (Ausfall der zwei H_2 -Deckenmeßköpfe und der Durchflußüberwachung). Die beiden restlichen Ausfallkombinationen sind nicht ergebnisrelevant.

Unter Einbezug der Handabsperrung innerhalb von 30 Minuten ergibt die Auswertung des Fehlerbaums in Abb. 5.4.2.4-2 eine Wahrscheinlichkeit von $1,08E-4$ pro Anforderung.

Ergebnisbestimmend, mit einem Anteil von mehr als 78 %, ist das gemeinsam verursachte Schließversagen der beiden pneumatisch betriebenen Absperrventile in Kombination mit der nicht oder zu spät erfolgten Schließaktion des Handventils HV-101 (Tab. 5.4.2.4-2). Mit einem Anteil von 17 % folgt die Kombination: 'Unabhängiges Schließversagen der Ventile und Handventil nicht oder nicht rechtzeitig geschlossen'. Die Kombination: 'Gemeinsam verursachtes Schließversagen und Handventil schließt nicht', trägt mit einem Anteil von 2 % nur noch geringfügig zum Absperrversagen der Gasleitung bei. Der erste Beitrag mit Fehlern in der Ansteuerung, in Verbindung mit dem nicht geschlossenen Handventil, liegt bei 1,9 % (cut set 4).

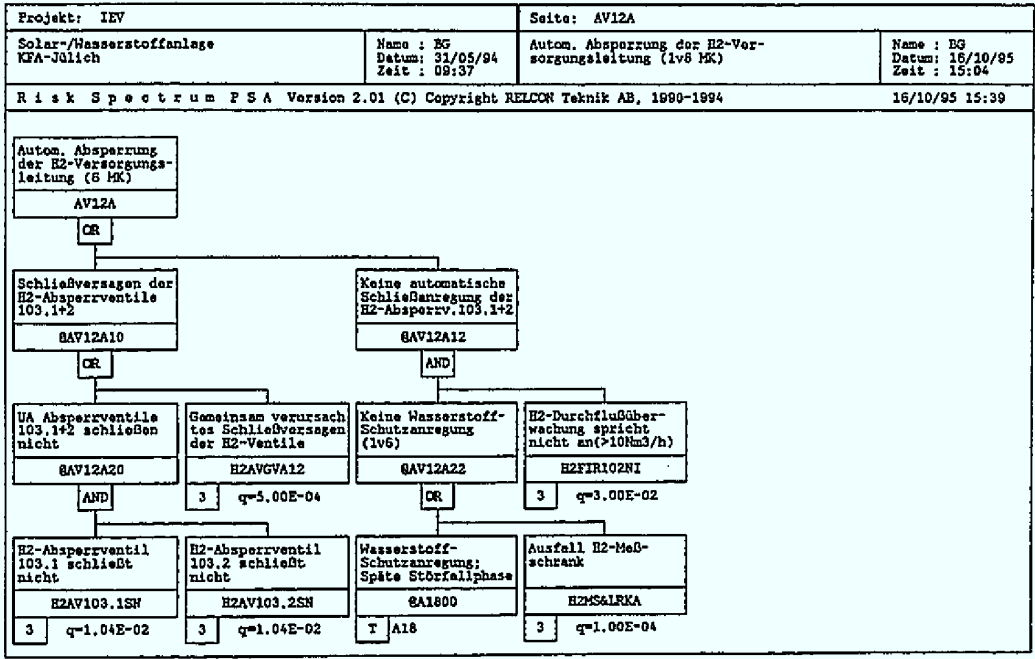


Abb. 5.4.2.4-1: Fehlerbaum 'Automatische Absperrung der H₂-Versorgungsleitung'

16/10/95 15:58

Risk Spectrum MCS Version 2.02

Projekt : IEV Solar-/Wasserstoffanlage KFA-Jülich
TOP-Ereignis: AV12A Autom. Absperrung der H₂-Versorgungsleitung (lv6 MK)

Mittlere Unverfügbarkeit = 6.23E-04

Nr	Unverfüg. %	Ereignisse
1	5.00E-04	80.24 H2AVGVA12 Gemeinsam verursach tes Schließversagen der H
2	1.08E-04	17.36 H2AV103.1SN H2AV103.2SN H2-Absperrventil 103.1 schließt nicht H2-Absperrventil 103.2 schließt nicht
3	1.20E-05	1.93 H2FIR102NI H2MKGVA16 H2-Durchflußüber- wachung spricht nicht an(>1 GVA H2-Meßköpfe 1-6 sprechen nicht an (Gesamt
4	3.00E-06	.48 H2MS&LRKA H2FIR102NI Ausfall H2-Meß- schrank H2-Durchflußüber- wachung spricht nicht an(>1
5	4.44E-12	.00 H2FIR102NI H2MK3FN H2MK4FN H2MK5FN H2MK6FN H2MK1FN H2MK2FN H2-Durchflußüber- wachung spricht nicht an(>1 H2-Meßkopf 3 spricht nicht an (Elektrolyseur) H2-Meßkopf 4 spricht nicht an (Elektrolyseur) H2-Meßkopf 5 spricht nicht an (Brennstoffzell H2-Meßkopf 6 spricht nicht an (Brennstoffzell H2-Meßkopf 1 spricht nicht an (Hallendecke) H2-Meßkopf 2 spricht nicht an (Hallendecke)

Tab. 5.4.2.4-1: 'Cut-set'-Liste: 'Automatische Absperrung der H₂-Versorgungsleitung'

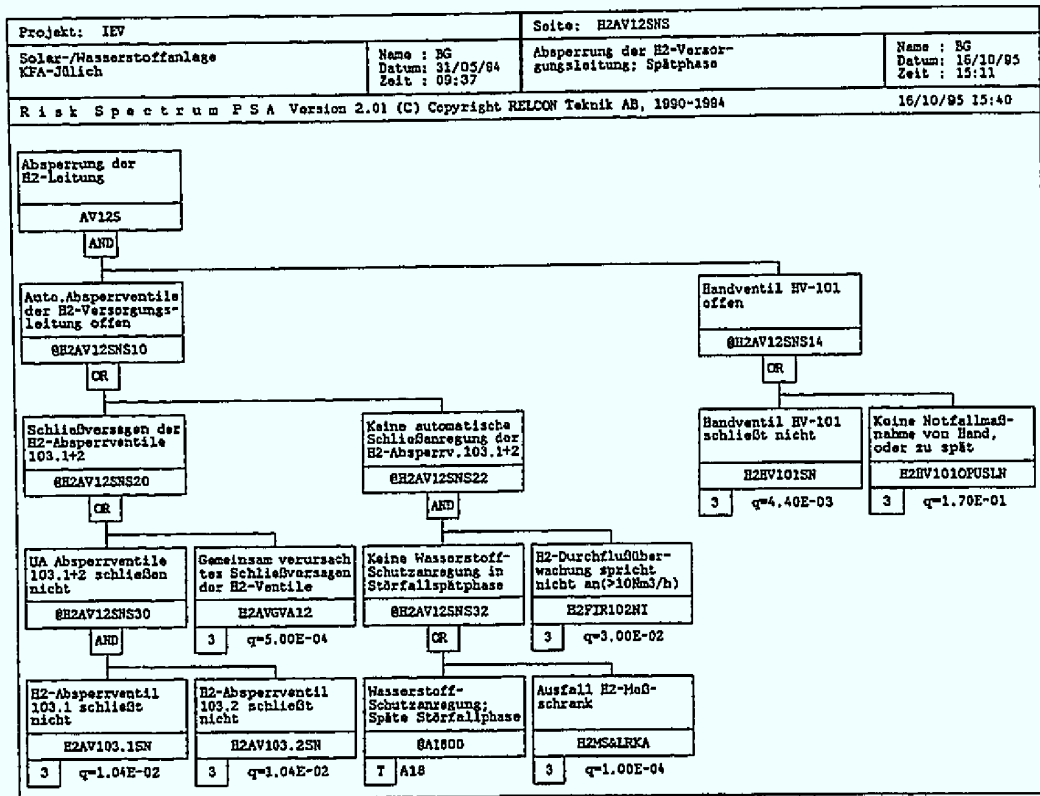


Abb. 5.4.2.4-2: Fehlerbaum 'Absperrung H₂-Versorgungsleitung'

Risk Spectrum MCS Version 2.02						
Projekt : IEV Solar-/Wasserstoffanlage KFA-Jülich						
TOP-Ereignis: H2AV12SNS Absperrung der H ₂ -Versorgungs- leitung (Spätphase)						
Mittlere Unverfügbarkeit = 1.08E-04						
Nr	Unverfüg.	%	Ereignisse			
1	8.50E-05	78.56	H2AVGVA12	H2HV101OPUSLN		
2	1.84E-05	16.99	H2AV103.1SN	H2HV101OPUSLN	H2AV103.2SN	
3	2.20E-06	2.03	H2HV101SN	H2AVGVA12		
4	2.04E-06	1.89	H2MKGVA16	H2HV101OPUSLN	H2FIR102NI	
5	5.10E-07	.47	H2FIR102NI	H2HV101OPUSLN	H2MS&LRKA	
6	4.76E-07	.44	H2HV101SN	H2AV103.1SN	H2AV103.2SN	
7	5.28E-08	.05	H2FIR102NI	H2HV101SN	H2MKGVA16	
8	1.32E-08	.01	H2MS&LRKA	H2HV101SN	H2FIR102NI	
9	7.55E-13	.00	H2MK3FN	H2HV101OPUSLN	H2FIR102NI	
			H2MK4FN	H2MK5FN	H2MK6FN	
			H2MK1FN	H2MK2FN		
10	1.95E-14	.00	H2FIR102NI	H2HV101SN	H2MK3FN	
			H2MK4FN	H2MK5FN	H2MK6FN	
			H2MK1FN	H2MK2FN		

Tab. 5.4.2.4-2: 'Cut-set'-Liste: 'Absperrung der H₂-Versorgungs- leitung'

5.4.2.5 Bewertung der Hallen-Zwangsentlüftung

Über dem Aufstellungsbereich der PHOEBUS-Anlage befinden sich 3 Öffnungen der Hallendecke mit Querschnittsflächen von je $0,32 \text{ m}^2$ (Abb. 1.5-2). In den Öffnungen befinden sich Jalousie-Klappen; ihre Antriebe wurden stillgelegt. Auf dem Hallendach sind die zugehörigen Abluftventilatoren installiert.

Bei Überschreiten einer Wasserstoff-Konzentration von 20 % des unteren Explosionsgrenzwertes von 4 % Wasserstoff in Luft an einem der sechs Wasserstoff-Meßköpfe in der IEV-Halle, werden neben der Anlagenabschaltung und der Absperrung der Gasleitung die drei der PHOEBUS-Anlage zugeordneten Abluftventilatoren angeregt.

Der spezifizierte Volumenstrom dieser Ventilatoren (Baujahr 1961) beträgt $6650 \text{ m}^3/\text{h}$; gemessen wurden zwischen 6935 und $7396 \text{ m}^3/\text{h}$. Der gemessene Volumenstrom bei stehenden Ventilatoren über die vorhandenen Durchführungen betrug zwischen 1037 und $1313 \text{ m}^3/\text{h}$, also insgesamt $3571 \text{ m}^3/\text{h}$. Der natürliche Luftwechsel liegt damit oberhalb des vom TÜV im Aufstellungsbereich der Anlage geforderten 5-fachen Luftwechsels von insgesamt $2457 \text{ m}^3/\text{h}$.

Eine Besichtigung ergab, daß die Ventilatoren mit Hauben und Gittern gegen Witterungseinflüsse und Fremdkörpereintrag geschützt sind. Ein Ausfall der Zwangsentlüftung durch Verstopfung oder Blockade der Abluftkanäle wird daher als vernachlässigbar selten angesehen.

Bei der Bewertung der Ausfallwahrscheinlichkeit der Hallen-Zwangsentlüftung wird daher nur der Ausfall der Ventilatoren und ihrer automatischen bzw. manuellen Ansteuerung berücksichtigt. Wie in Kapitel 5.4.1.2 ausgeführt, spielen die in den Ansaugöffnungen befindlichen Jalousie-Klappen keine Rolle, da ihre Antriebe stillgelegt wurden.

Da keine spezifischen Betriebserfahrungen vorliegen, wurde aus /GRS2/ für das Startversagen eines Ventilators eine Rate von $5,5\text{E}-6/\text{h}$ angesetzt. Daraus ergibt sich bei einem unterstellten Prüfintervall von einem Jahr eine Wahrscheinlichkeit von $2,4\text{E}-2$ pro Anforderung.

Wegen der dreifachen Lüfter-Redundanz spielen gemeinsam verursachte Ausfälle fürs Ergebnis eine entscheidende Rolle. In /GRS4/ wird für das gemeinsam verursachte '3 von 3' Lüfter-Startversagen eine Wahrscheinlichkeit von $3E-5$ pro Anforderung (Fehlerentdeckungszeit: 2 Wochen) angegeben. Da im vorliegenden Fall geringere Anforderungen an die Qualitätssicherung bestehen und die Fehlerentdeckungszeit einsatzbedingt größer ist, wird eine Korrektur des obigen Wertes um den Faktor 10 auf $3E-4$ /Anf. vorgenommen.

Der Fehlerbaum in Abb. 5.4.2.5-1 zeigt die den Ausfall der Hallen-Zwangsentlüftung verursachenden Fehlerverknüpfungen. Die zur automatischen Ansteuerung der Ventilatoren bestehende manuelle Anregealternative wurde nicht berücksichtigt, da die Handlungsdiagnose schwierig und die schnelle Räumung der Halle dringend geboten ist.

Die Auswertung des Fehlerbaums ergibt eine Ausfallwahrscheinlichkeit von $3,24E-3$ pro Anforderung. Ergebnisbestimmend ist mit insgesamt ca. 90 % der Ausfall der Ansteuerung ('cut-sets' 1, 2 und 4), gefolgt vom gemeinsam verursachten Startversagen der 3 Ventilatoren mit knapp 10 % (Tab. 5.4.2.5-1).

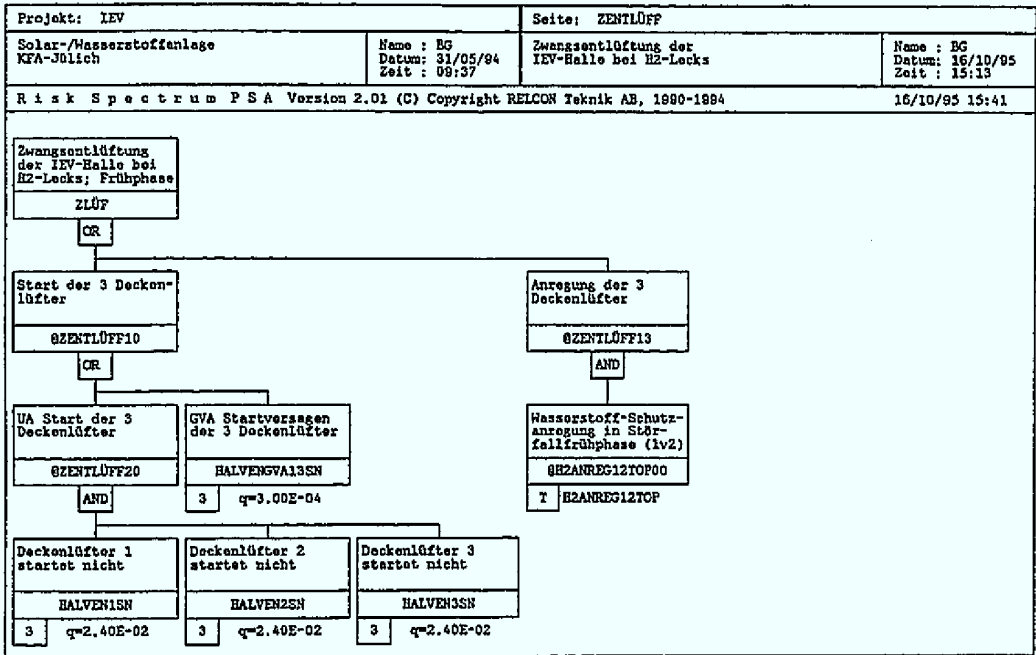


Abb. 5.4.2.5-1: Fehlerbaum 'Zwangsentlüftung der IEV-Halle

Risk Spectrum MCS Version 2.02				
Projekt : IEV Solar-/Wasserstoffanlage KFA-Jülich				
TOP-Ereignis: ZENTLÜFF Zwangsentlüftung der IEV-Halle bei H2-Lecks; Frühphase				
Mittlere Unverfügbarkeit = 3.24E-03				
Nr	Unverfügb.	%	Ereignisse	
1	2.30E-03	70.98	H2MGVA12	GVA H2-Meßköpfe 1-2 sprechen nicht an (Hallendecke)
2	5.29E-04	16.33	H2MK1FN H2MK2FN	H2-Meßkopf 1 spricht nicht an (Hallendecke) H2-Meßkopf 2 spricht nicht an (Hallendecke)
3	3.00E-04	9.26	HALVENGVA13SN	GVA Startversagen der 3 Deckenlüfter
4	1.00E-04	3.09	H2MSLRKA	Ausfall H2-Meß- schrank
5	1.38E-05	.43	HALVEN1SN HALVEN2SN HALVEN3SN	Deckenlüfter 1 startet nicht Deckenlüfter 2 startet nicht Deckenlüfter 3 startet nicht

Tab. 5.4.2.5-1: 'Cut-set'-Liste: 'Zwangsentlüftung der IEV-Halle'

5.4.2.6 Bewertung der natürlichen Hallenentlüftung

Messungen des Betreibers ergaben, daß bei stehenden Abluftventilatoren der natürliche Luftwechsel über die drei zugehörigen Dachöffnungen bei Abwesenheit von Wasserstoff und nicht näher definierten Randbedingungen $3570 \text{ m}^3/\text{h}$ beträgt. In Kapitel 6 wurde der Luftwechsel für verschiedene Temperaturbedingungen (außen/innen: $35/20$, $20/20$ und $5^\circ/20^\circ\text{C}$) für ein nichtabgesperrtes mittleres H_2 -Leck gerechnet. Die globale H_2 -Konzentration in der Halle schwankt danach zwischen 2,2 % im günstigsten ($5/20^\circ\text{C}$) und 2,7 % im ungünstigsten Fall ($35/20^\circ\text{C}$). Der leichtere Wasserstoff unterstützt die natürliche Entlüftung und hält sie selbst bei ungünstigen Bedingungen wirkungsvoll in Gang. Das erklärt, daß der gemessene Luftwechsel bei reiner Luftströmung niedriger liegt und sich demzufolge mit 3,4 % eine höhere Konzentration errechnet. Eine temperaturbedingte Unterdrückung der natürlichen Hallenentlüftung findet also hier praktisch nicht statt. Zudem sind während des regulären Brennstoffzellenbetriebes (Winterhalbjahr) Außentemperaturen von 35°C unwahrscheinlich bzw. der Betrieb der Brennstoffzelle dann entbehrlich.

Ein Ausfall der natürlichen Hallenentlüftung könnte allerdings von einer Blockade der Abluftkanäle herrühren. Die Jalousieklappen-Antriebe wurden inzwischen stillgelegt und sind für eine Strömungsblockade nicht mehr relevant. Somit bleibt nur die Blockade durch äußere Einwirkungen wie extremer Eisregen oder Schneefall. Solche, den Luftwechsel über die drei Abluftkanäle zum Erliegen bringenden Verhältnisse werden für einen Brennstoffzellen-Betriebstag pro Winterhalbjahr postuliert, wohl wissend, daß die warme Hallenablufte diesen Ursachen entgegenwirkt.

Die Wahrscheinlichkeit einer weitgehenden Blockade der Abluftkanäle und damit eines Ausfalls der natürlichen Hallenentlüftung im Anforderungsfall wird folglich zu $5,5\text{E-}3$ angesetzt. Hierbei reichert sich die globale H_2 -Konzentration in der Halle bis auf maximal 15,3 % (Kap. 6.2.4) an.

5.4.2.7 Störfallbewertung

Im folgenden Störfallablaufdiagramm (Abb. 5.4.2.7-1) wird ausgehend vom störfallauslösenden Ereignis: 'Mittlere H₂-Leckrate innerhalb der Halle', die Verfügbarkeit der zuvor bewerteten Störfall-Schutzmaßnahmen abgefragt. Die Kombination von Erfolgs- und Mißerfolgspfaden führt zu Ereignisablaufpfaden, von denen die wichtigsten aufgeführt sind. Die Eintrittshäufigkeiten (bezogen auf ein Jahr) weist die vorletzte Spalte aus. In der letzten Spalte 'KONSEQUENZ' sind die für Abläufe mit nein-Verzweigungen analysierten H₂-Konzentrationen angegeben. Pfade die zum unerwünschten Top-Ereignis: 'Erreichen einer zündfähigen H₂-Konzentration' führen, tragen dann entsprechend ihrer Häufigkeit zum Risiko der Anlage bei.

Die Störfallpfade 1, 2, 7, 11 und 12 führen wegen der funktionierenden Gasabsperrung zu keinen nennenswerten H₂-Konzentrationen - vom unmittelbaren Bereich um den Leckort abgesehen. Sie sind daher für das Anlagenrisiko ohne Bedeutung. Ein eventuell am Leckort bestehendes Arbeitsplatzrisiko ist nicht Gegenstand dieser Analyse (Kapitel 5).

Bei Pfad 3 (mit Ausfall der Gasabsperrung, aber funktionierender Zwangsentlüftung), wird nach 1,3 - 3 Stunden - je nach Wirksamkeit der anfänglichen natürlichen Entlüftung - eine Konzentration um ca. 1 Vol.% erreicht (Tab. 6.2.4.3-1). Auch hier besteht nur in unmittelbarer Nähe des Leckortes eine Personengefährdung. Der automatische Start der Zwangsentlüftung erfolgt frühestens nach ca. 1,3 Stunden bei Erreichen von 20 % des unteren Explosionsgrenzwertes (UEG). Optischer und akustischer Gasalarm wird frühestens nach 30 Minuten bei 10 % des Wertes ausgelöst. Allerdings sind gleich zu Störfallbeginn deutlich vernehmbare Ausströmgeräusche zu erwarten. Die Häufigkeit dieser Sequenz liegt bei 1,1E-7/a.

Die Störfallpfade 4, 9, 14 und 20 beinhalten ein weitgehendes Versagen des Störfallbeherrschungskonzeptes (Ausbleiben von Gasabsperrung und Hallen-Zwangsentlüftung wegen fehlerhaft nichterfolgter Anregung). Je nach Wirksamkeit der natürlichen Hallenentlüftung führt dies zu globalen H₂-Konzentrationen zwischen 2,2 und 3,4 Vol.% nach mehr als 8 Stunden (Tab. 6.2.4.3-1). Lo-

kal können höhere Konzentrationen vorliegen. Obwohl lokale Schäden dadurch nicht auszuschließen sind, spielen diese Pfade allein schon wegen ihrer extrem niedrigen Eintrittshäufigkeiten von maximal $1,5\text{E}-8/\text{a}$ fürs Risiko praktisch keine Rolle.

Nur bei Pfad 21 (mit Ausfall auch der natürlichen Hallenentlüftung) liegt die H_2 -Konzentration überall oberhalb der Zündgrenze. Sie erreicht gegen Ende des Auströmvorganges nach etwa 24 Stunden maximal 15,3 Vol.%. Die Eintrittshäufigkeit dieses Pfades ist mit $8,5\text{E}-11/\text{a}$ allerdings vernachlässigbar selten.

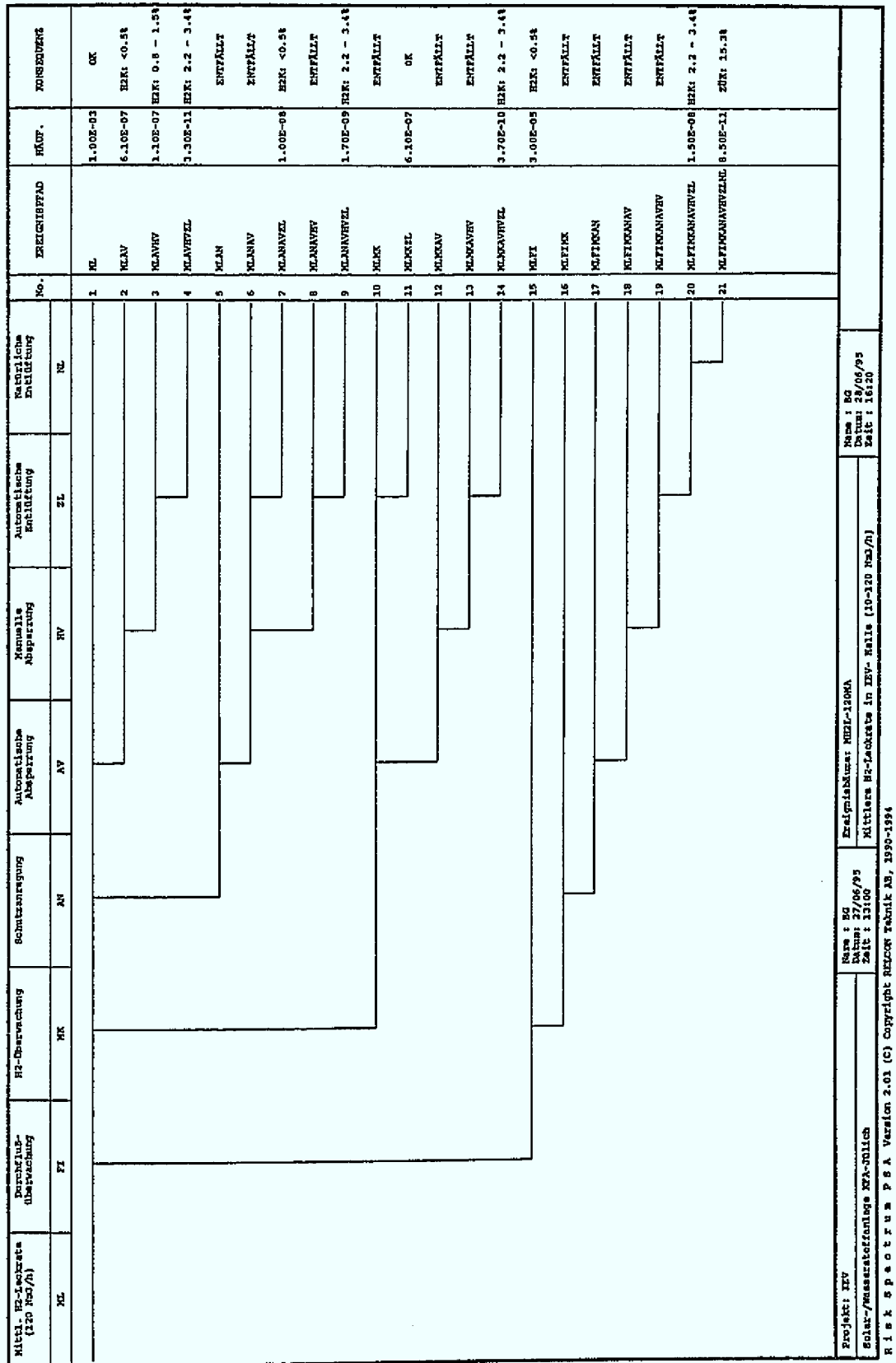


Abb. 5.4.2.7-1: Ereignisablaufdiagramm 'Mittleres H₂-Leck innerhalb der Halle'

5.4.3 Große Wasserstofflecks

Die großen Wasserstofflecks decken den Bereich von 120 bis 600 Nm³/h ab. Sie setzen das Versagen der Hochdruckreduzierung (150 - 7 bar) zwischen Speicher und Brennstoffzelle voraus.

5.4.3.1 Abschätzung der Leckhäufigkeit

Für das Auftreten großer Wasserstofflecks ist folgende Ereigniskoinzidenz erforderlich: 'Totales Versagen des Druckminderers DM-101 und praktisch zeitgleich auftretendes Leitungsleck in der Halle'. Hierzu sind zwei Fehlerkombinationen denkbar:

- Spontanes Versagen der Gasleitung wie unter 5.4.2.1 und anschließendes Versagen des Druckminderers.
- Spontanes Versagen des Druckminderers und Abriß der Gasleitung als Folge der plötzlichen Druckbeaufschlagung.

Die erste Ereigniskombination ist vernachlässigbar selten, da vor dem Versagen der Leitung (1.0E-3/a) der Druckminderer ordnungsgemäß funktionierte. Sein zufälliges Versagen während der leckbedingten Entleerung der Speicher (Dauer ca. 25 h) wird als extrem unwahrscheinlich eingeschätzt.

Die zweite Ereigniskombination geht vom spontanen Versagen des Druckminderers aus, wodurch der Hochdruck auf die Niederdruckseite durchschlägt und zu einem Folgeschaden an der Gasleitung (Aufdrücken einer Quetschverbindung) innerhalb der Halle führt. Ein Ansprechen der inzwischen auf der Niederdruckseite nachgerüsteten Überdrucksicherung (9 bar Ansprechdruck) begrenzt den Druckaufbau wegen der geringen Abblaseleistung anfänglich auf lediglich ca. 35 bar (Kap. 6). Versagt die Leitung außerhalb der Halle (Freigelände), ist die Ausbildung einer zündfähigen Gaswolke nennenswerter Größe nicht zu erwarten. Dieser Fall wird im übrigen vom Versagen einer Behälteranschlußleitung ($\phi_1=21$ mm) abgedeckt.

Ein massives Versagen des Druckminderers ist nach Durchsicht der vorliegenden Betriebserfahrungen /GRS2/ sehr unwahrscheinlich. Während einer kumulierten Betriebszeit von ca. 1,4E6 Stunden trat an 58 ausgewerteten Druckminderventilen ein solches Ereignis nicht auf. Lediglich aufgrund innerer Leckagen kam es in

einigen Fällen zu einer Druckerhöhung im zu bespeisenden System und zum Ansprechen von Sicherheitsventilen.

Nutzt man die vorliegende Betriebserfahrung im Sinne einer Nullfehlerstatistik, erhält man eine Ausfallrate von $7,2E-7/h$. Bezieht man diesen Wert auf ein im Winterhalbjahr interessierendes Zeitfenster von ca. 1000 h, erhält man eine Versagenshäufigkeit von $7,2E-4/A$. Für das spontane Auftreten massiver struktureller Ventilschäden mit Totalversagen der Druckreduzierung wird dieser Wert als unrealistisch hoch angesehen. Im Rahmen dieser Analyse wird der Wert allerdings nur geringfügig auf $5E-4/a$ korrigiert.

Die Gasleitung auf der Niederdruckseite wird vor Inbetriebnahme der Anlage mit 30 bar abgedrückt. Ein Durchschlagen des Hochdrucks wird damit nicht abgedeckt. Die Rohre selbst halten diesen Belastungen rein rechnerisch stand. Mögliche Folgeschäden werden entweder an den Quetschverbindungen außerhalb der Halle erwartet (z. B. an Kniestücken im Bereich der Absperrung an der Hallenwand), oder, mit geringerer Wahrscheinlichkeit, an einer der Verbindungen innerhalb der Halle.

Der Folgeschaden wird konservativ mit der Wahrscheinlichkeit 1 angesetzt und zwar mit 0,9 außerhalb und mit 0,1 innerhalb der Halle. Damit ergibt sich für die Ereigniskombination 'Totalversagen des Druckminderers und Folgeschaden an der Gasleitung innerhalb der Halle' eine mit großen Unsicherheiten behaftete Häufigkeit von $5E-5/a$.

5.4.3.2 Bewertung der Hallen-Gasüberwachung

Bei großen Wasserstofflecks werden für die Anregung der automatischen Schutzaktionen (Leckabspernung, Start der Abluftventilatoren) alle sechs Wasserstoff-Meßköpfe berücksichtigt. Für die Bewertung der Gasüberwachung gilt somit der in Abb. 5.4.2.2-2 dargestellte Fehlerbaum, dessen Auswertung (Kap. 5.4.2.2) eine Wahrscheinlichkeit für den Ausfall der kompletten Gasüberwachung von $5E-4/A$ ergab.

5.4.3.3 Bewertung der Durchflußüberwachung

Die Konstruktion des Meßgerätes gewährleistet laut Herstellerangaben ein konstantes Durchflußverhältnis zwischen gemessenem Teilstrom und Hauptstrom auch bei extrem schwankenden Betriebsverhältnissen.

Für das Ausbleiben der Schließenanregung der Absperrventile bei zu hohem Durchsatz ($\geq 10 \text{ Nm}^3/\text{h}$) wurde in Kapitel 5.4.2.3 eine Wahrscheinlichkeit von $3\text{E-}2$ /Anforderung ermittelt, die auch beim vorliegenden Störfall angesetzt wird.

5.4.3.4 Bewertung der Drucküberwachung

Auf der Niederdruckseite der Gasleitungen zwischen Speicher und Brennstoffzelle wurden die Druckwächter PS 106 (H_2 -Leitung) und 107 (O_2 -Leitung) nachgerüstet (Abb. 1.5-3). Hierüber soll entweder bei abgeschalteter Anlage und innerer Leckage eines Druckminderers und der nachgeschalteten Hochdruck-Absperrarmatur eine unzulässige Druckerhöhung erkannt werden, oder während des Anlagenbetriebes bei unzulässigen Druckanstieg ($> 8 \text{ bar}$) die Absperrung der Gasleitungen ausgelöst werden. Über die ebenfalls nachgerüsteten Sicherheitsventile SV-106 und 107 in der H_2 - bzw. O_2 -Leitung wird der Druckaufbau durch Abblasen von Gas in die Umgebung auf 9 bar begrenzt. Die Schließenanregung der Absperrventile zwischen Speicher und Halle erfolgt bei 8 bar.

Die Abblasekapazität der Sicherheitsventile reicht allerdings nicht aus, um bei einem Totalversagen eines Druckminderers den Druckaufbau auf 9 bar zu begrenzen; die Niederdruckseite würde mit etwa 35 bar beaufschlagt werden (Kap. 6).

In /GRS2/ wurden Betriebserfahrungen von 331 Druckwächtern, die sich in 34 Typen aufteilen, ausgewertet. Bei einer kumulierten Betriebszeit von annähernd $7,9\text{E}6$ Stunden traten 59 Totalausfälle auf. Hieraus ergibt sich eine Ausfallrate von $7,5\text{E-}6/\text{h}$. Dieser Wert wird auf die Druckwächter der PHOEBUS-Anlage mangels eigener spezifischer Daten übertragen.

Von den in /GRS2/ untersuchten Einflußmerkmalen spielen die Einsatzart (Dauer-, Zyklus- oder Standby-Betrieb), Erschütterungen und Wartungsmaßnahmen (mit/ohne) fürs Ergebnis eine Rolle.

Bei der Einsatzart wird die höchste Ausfallrate im Dauerbetrieb ($9,6E-6/h$), die niedrigste im Standby-Betrieb ($3,8E-6/h$) beobachtet. Der Wert für Zyklus-Betrieb der für die PHOEBUS-Druckwächter zutrifft, liegt bei $4,3E-6/h$. Druckwächter, die wie im vorliegenden Fall normalen Vibrationen unterworfen sind, haben bei diesem Einflußmerkmal die niedrigste Ausfallrate ($6E-6/h$).

Dagegen liegt die Ausfallrate für Druckwächter ohne besondere Wartungsmaßnahmen mit $8,3E-6/h$ um den Faktor 4 höher im Vergleich zur Klasse 'mit Wartung'. Auf die PHOEBUS-Anlage trifft dieses Einflußmerkmal zu, so daß statt des oben ausgewiesenen Wertes von $7,5E-6/h$ der geringfügig höhere Wert von $8,3E-6/h$ verwendet wird.

Bei Berücksichtigung eines jährlichen Inspektionsintervalls ergibt sich hieraus eine Ausfallwahrscheinlichkeit für den Druckwächter PS 106 von $3,6E-2$ pro Anforderung.

Die Ausfallart 'Leckage nach außen', die wegen des damit verbundenen Druckverlustes einen Einfluß auf das Ansprechverhalten des betroffenen Druckwächters haben kann, ist mit einem ausgewiesenen Anteil von 4,7 % an den aufgetretenen Schäden relativ unbedeutend. Außerdem ist bei einem Totalversagen der Hochdruckreduzierung der Druckanstieg so stark, daß diese Ausfallart hier keine Rolle spielt und nicht weiter verfolgt wird.

5.4.3.5 Bewertung der Überdrucksicherung

Auf der Niederdruckseite der Gasleitungen zwischen Speicher und Brennstoffzelle wurden die Sicherheitsventile SV-106 bzw. 107 in der H_2 - bzw. O_2 -Leitung nachgerüstet (Abb. 1.5-3). Hierüber soll - bei abgeschalteter Anlage - im Falle innerer Leckagen eines Druckminderers und der nachgeschalteten Hochdruck-Absperrarmatur der Druckaufbau durch Abblasen von Gas in die Umgebung auf 9 bar begrenzt werden, ebenso während des Betriebes bei einem unzulässigen Druckanstieg (>8 bar).

Die Abblasekapazität der Sicherheitsventile reicht allerdings nicht aus, um bei einem unwahrscheinlichen Totalversagen eines Druckminderers den Druckaufbau auf 9 bar zu begrenzen; die Niederdruckseite würde mit etwa 35 bar beaufschlagt (Kap. 6).

Falls das Sicherheitsventil nicht öffnet, ist im Bereich einer Quetschverbindung ein Leck der Niederdruckleitung zu erwarten.

Zur Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeit des federbelasteten Sicherheitsventils wird auf eine Ausfallrate von $1,6E-7$ pro Stunde ('Standby'-Zeit) in /Jül-388/ zurückgegriffen. Da das Ventil während des Normalbetriebes nicht angefordert wird und keine Funktionsprüfungen vorgesehen sind, wird die Ausfallrate mit einem fiktiven Inspektionsintervall von 4 Jahren korreliert. Hieraus ergibt sich eine Wahrscheinlichkeit von $2,7E-3$ für das Öffnungsversagen bei Anforderung. Dieser Wert ist als konservativ einzustufen, da es sich um ein Öffnungsversagen bei sehr hoher Drucküberschreitung handelt.

5.4.3.6 Bewertung der Gasabspernung

Bei zu hoher Wasserstoffkonzentration in der IEV-Halle ($\geq 20\%$ UEG), zu hohem Gasdurchsatz ($\geq 10 \text{ Nm}^3/\text{h}$) oder zu hohem Druck ($\geq 8 \text{ bar}$) in einer der Gasleitungen werden außerhalb der IEV-Halle befindliche Absperrventile automatisch geschlossen. Bei der hier interessierenden Wasserstoffleitung von den Speichern zur Brennstoffzelle sind dies die redundanten Ventile V-111, -103.1 und -103.2 (Abb. 1.5-3). Die Ventile werden pneumatisch angesteuert und schließen bei Ausfall der Steuerluft selbsttätig durch Federkraft ('fail safe' Prinzip).

Es wird angenommen, daß die Ventile ihre Funktion auch nach einem Versagen der Hochdruckreduzierung bei einem Störfalldruck von ca. 35 bar (Begrenzung durch Druckabbau über Sicherheitsventil) erfüllen. Anderenfalls schließen die beiden Niederdruckventile V-103.1 und 2 erst, wenn durch das Abblasen der Druck auf 30 bar abgebaut wurde.

Gegenüber dem in Abb. 5.4.2.4-1 dargestellten Fehlerbaum für mittlere Lecks ist zusätzlich die Ventilanregung durch den Druckwächter zu berücksichtigen.

Es werden zwei Bewertungen des Absperrkonzeptes vorgenommen:

- Im ersten Fall wird die Möglichkeit einer Handabspernung (Notfallmaßnahme) bis 30 Minuten nach Störfallbeginn berücksichtigt (vgl. Kap. 5.4.2.4).

- Im zweiten Fall werden im Sinne einer konservativen Abschätzung nur automatische Schutzmaßnahmen berücksichtigt.

Die Auswertung der Fehlerbäume ergibt für den ersten Fall (Abb. 5.4.3.6-1) eine Wahrscheinlichkeit von $1,1E-4/A$ und für den zweiten Fall (Abb. 5.4.3.6-2) von $6,1E-4/A$.

Die beiden 'minimal cut set'-Listen (Tab. 5.4.3.6-1 und 2) weisen den gemeinsam verursachten Ausfall der Absperrventile mit Anteilen von ca. 80 % als deutlich ergebnisbestimmend aus (im Fall 1 in Kombination mit der Notfallmaßnahme). Die Ventilanregung spielt wegen der hohen Diversität in beiden Fällen fürs Ergebnis keine Rolle.

Falls der Störfalldruck über das Sicherheitsventil - wegen Öffnungsversagen - nicht abgebaut wird, werden die beiden Niederdruckventile V-103.1 und 2 als nicht verfügbar gewertet. Für die Absperrung der Gasleitung stehen dann nur das Hochdruck-Absperrventil V-111 und die Handarmatur HV-101 zur Verfügung. Die Versagenswahrscheinlichkeit des Absperrventils wird entsprechend der Bewertung in Kapitel 5.4.2.4 zu $1,04E-2$ pro Anforderung angesetzt.

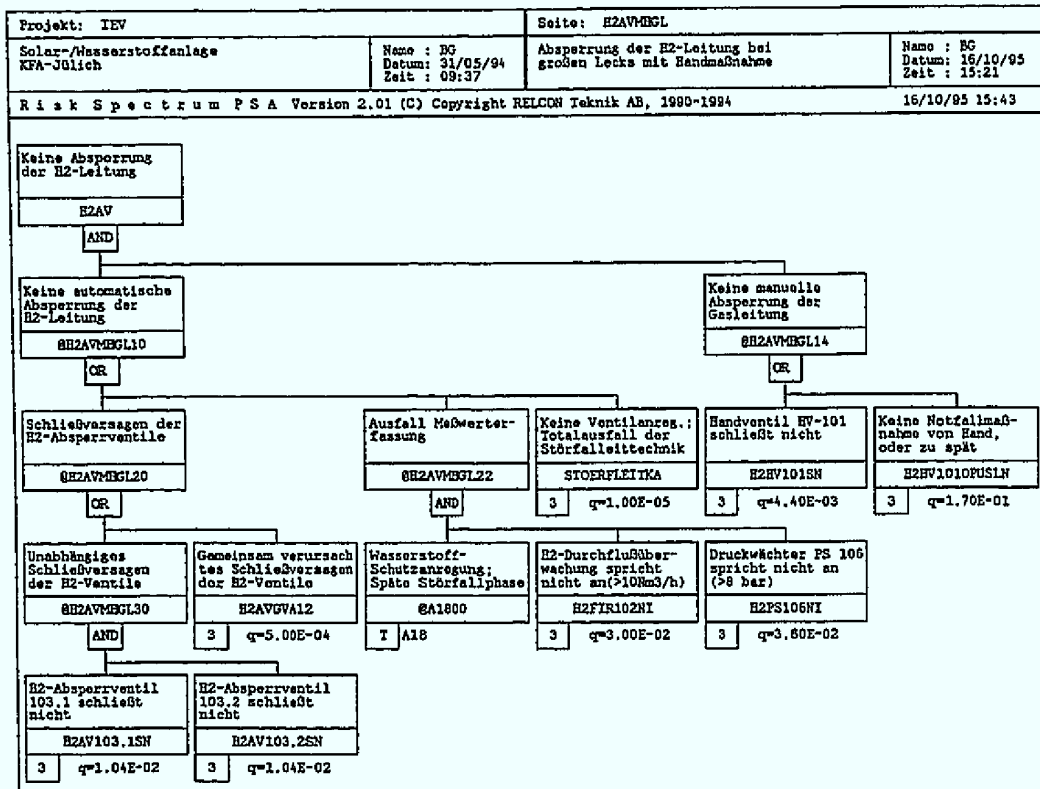


Abb. 5.4.3.6-1: Fehlerbaum 'Absperrung der H₂-Leitung'
(Große H₂-Leaks; mit Handmaßnahme)

Risk Spectrum MCS Version 2.02			
Projekt	: IEV	Solar-/Wasserstoffanlage KFA-Jülich	
TOP-Ereignis:	H2AVMHGL	Absperrung der H2- Leitung bei großen Lecks mit Handmaßn.	

Mittlere Unverfügbarkeit = 1.07E-04

Nr	Unverfügbar.	%	Ereignisse
1	8.50E-05	79.12	H2AVGVA12
2	1.84E-05	17.12	H2AV103.1SN
3	2.20E-06	2.05	H2HV101SN
4	1.70E-06	1.58	STOERFLEITKA
5	4.76E-07	.44	H2HV101SN
6	7.34E-08	.07	H2MKGVA16
7	4.40E-08	.04	H2HV101SN
8	1.84E-08	.02	H2PS106NI
9	1.90E-09	.00	H2PS106NI
10	4.75E-10	.00	H2MS&LRKA

Tab. 5.4.3.6-1: 'Cut-set'-Liste: 'Absperrung der H₂-Leitung'
(Große H₂-Leaks; mit Handmaßnahme)

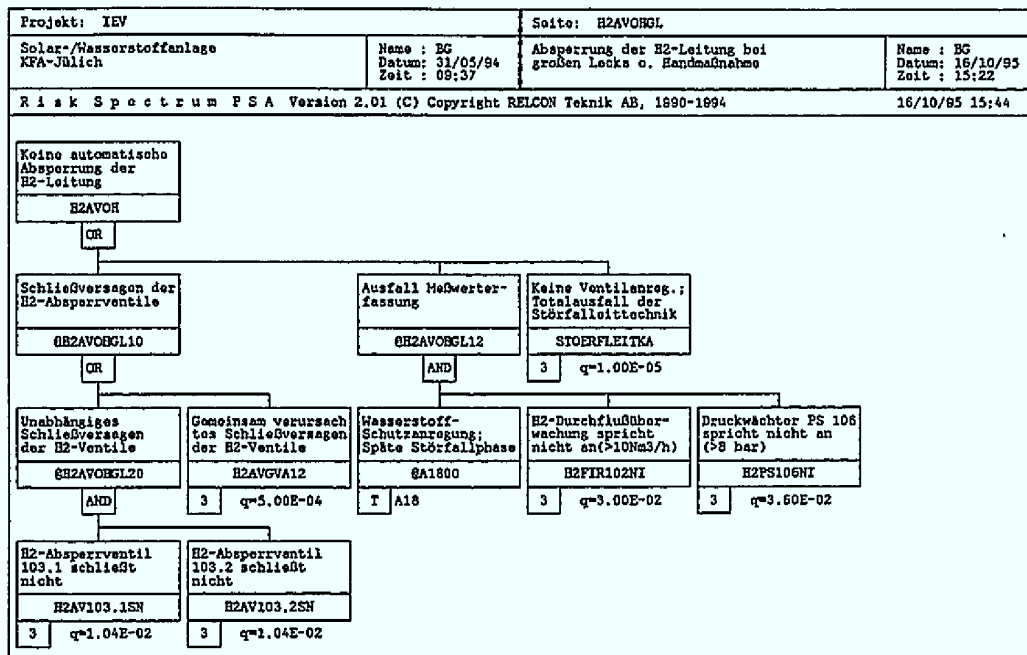


Abb. 5.4.3.6-2: Fehlerbaum 'Automatische Absperrung der H₂-Leitung' (Große H₂-Lecks)

Risk Spectrum MCS Version 2.02	
Projekt : IEV	Solar-/Wasserstoffanlage KFA-Jülich
TOP-Ereignis: H2AVOHGL	Absperrung der H2- Leitung bei großen Lecks o. Handmaßn.

Mittlere Unverfügbarkeit = 6.19E-04

Nr	Unverfüg. %	Ereignisse
1	5.00E-04 80.82	H2AVGVA12 Gemeinsam verursachtes Schließversagen der H
2	1.08E-04 17.48	H2AV103.1SN H2-Absperrventil 103.1 schließt nicht H2AV103.2SN H2-Absperrventil 103.2 schließt nicht
3	1.00E-05 1.62	STOERFLEITKA Keine Ventilanreg.; Totalausfall der Störfall
4	4.32E-07 .07	H2PS106NI Druckwächter PS 106 spricht nicht an (>8 bar) H2FIR102NI H2-Durchflußüber- wachung spricht nicht an(>1 H2MKGVA16 GVA H2-Meßköpfe 1-6 sprechen nicht an (Gesamt
5	1.08E-07 .02	H2MS&LRKA Ausfall H2-Meß- schrank H2FIR102NI H2-Durchflußüber- wachung spricht nicht an(>1 H2PS106NI Druckwächter PS 106 spricht nicht an (>8 bar)

Tab. 5.4.3.6-2: 'Cut-set'-Liste: 'Automatische Absperrung der H₂-Versorgungsleitung' (Große H₂-Lecks)

5.4.3.7 Bewertung der Hallen-Zwangsentlüftung

Der in Kapitel 5.4.2.5 für das Versagen der Zwangsentlüftung ermittelte Wert von $3,24E-3$ pro Anforderung wird bei großen Lecks in zwei der drei untersuchten Störfallablaufvarianten berücksichtigt.

Wie die Rechnungen in Kapitel 6 zeigen, bleiben die Wasserstoffkonzentration in der Halle auch bei längerfristig großen Wasserstoffleckraten mit global 1,7 % unterhalb der Zündgrenze von 4 %; allerdings sind lokal höhere Konzentrationen z.B. im Deckenbereich nicht auszuschließen.

Bei der Störfallbewertung in Kapitel 5.4.3.9 wird daher bei Variante drei eine örtlich begrenzt auftretende Gaswolkenzündung im Bereich der nicht ex-geschützten Abluftventilatoren unterstellt und damit deren Folgeausfall.

5.4.3.8 Bewertung der natürlichen Hallenentlüftung

Bei einem Ausfall der Leckabspernung schwankt die globale H_2 -Konzentration bei natürlicher Be- und Entlüftung der Halle in Abhängigkeit von der Außentemperatur (5 - 35 °C) zwischen 3,1 und 4,3 Vol.% (5,3 - 8,3 % ohne Überdrucksicherung), bei Hallentemperaturen von jeweils 20 °C (Kap. 6).

Die Wahrscheinlichkeit einer weitgehenden Blockade der Abluftkanäle und damit eines Ausfalls der natürlichen Hallenentlüftung im Anforderungsfall wird entsprechend der Bewertung in Kapitel 5.4.2.6 zu $5,5E-3$ angesetzt. Hierbei reichert sich die globale H_2 -Konzentration in der Halle bis auf maximal 15,3 % an.

5.4.3.9 Störfallbewertung

In den folgenden 3 Störfallablaufdiagrammen (Abb. 5.4.3.9-1 - 3) wird ausgehend vom störfallauslösendem Ereignis: 'Große H_2 -Leckrate innerhalb der Halle', die Verfügbarkeit der zuvor bewerteten Störfall-Schutzmaßnahmen abgefragt. Die Kombination von Erfolgs- und Mißerfolgspfaden führt zu Ereignisablaufpfaden, von denen die wichtigsten aufgeführt sind. Die Eintrittshäufigkeiten (bezogen auf ein Jahr) weist die vorletzte Spalte aus. In der letzten Spalte 'KONSEQUENZ' sind die für Abläufe mit nein-Verzweigungen analysierten H_2 -Konzentrationen angegeben. Pfade, die

zum unerwünschten Top-Ereignis: 'Erreichen einer zündfähigen H_2 -Konzentration' führen, tragen entsprechend ihrer Häufigkeit zum Risiko der Anlage bei.

Angeichts der Unsicherheiten bezüglich der H_2 -Konzentrationsverteilung (Schichtungen, Nester) und der Durchführbarkeit manueller Notfallmaßnahmen (Anlage soll letztlich ohne Personal gefahren werden), wurden drei Störfallablaufvarianten untersucht:

Variante 1 mit Handmaßnahmen (Abb. 5.4.3.9-1):

- Gasabsperrung von Hand berücksichtigt;
- keine örtlich begrenzte Zündung im Bereich der nicht ex-geschützten Abluftventilatoren.

Variante 2 ohne Handmaßnahmen (Abb. 5.4.3.9-2):

- Keine Gasabsperrung von Hand;
- keine örtlich begrenzte Zündung im Bereich der nicht ex-geschützten Abluftventilatoren.

Variante 3 mit ungünstigem Verlauf (Abb. 5.4.3.9-3):

- örtlich begrenzte Zündung im Bereich der nicht ex-geschützten Abluftventilatoren und deren Folgeausfall.
- Gasabsperrung von Hand berücksichtigt, da H_2 -Alarm erfolgt

Die größte Häufigkeit für das Auftreten eines zündfähigen Gasgemisches liefert der Störfallpfad 4 der Variante 3 (ungünstiger Verlauf) mit $5,2E-9/a$. Sie ist bereits als vernachlässigbar selten einzustufen. Vergleichbare Pfade der übrigen Varianten sind noch unwahrscheinlicher (Tab. 5.4.3.9-1).

Der Störfallpfad 4 der Variante 3 verläuft wie folgt:

Bei einem plötzlichen Versagen des Druckminderers (150 - 7 bar) im Abzweig der Hochdruck-Speicherbehälter schlägt der Druck auf den Niederdruckbereich der Wasserstoffleitung durch. Die automatische Absperrung der Gasleitung wird angeregt (über zu hohen Durchsatz oder zu hohen Druck), mißlingt aber wegen Schließversagen der Absperrventile. Das ansprechende Sicherheitsventil (≥ 8 bar) begrenzt den Druckaufbau in der Leitung - wegen der niedrigen Abblaseleistung - anfänglich auf lediglich ca. 35 bar; ein Folgeversagen an einer Rohrverbindung innerhalb der Halle wird daher angenommen. Die Beendigung der Leckage durch eine Handabsperrung unterbleibt. Der austretende Wasserstoff wird von

H₂-Meßköpfen detektiert, die den Start der drei nicht ex-geschützten Abluftventilatoren anregen, die aber durch eine im Deckenbereich unterstellte begrenzte Deflagration ausfallen.

Etwa 50 % des Inventars der Hochdruckspeicher (3000 Nm³) gelangen über das Sicherheitsventil in die Umgebung; der andere Teil über das Leck in die Halle. Je nach Wirksamkeit der natürlichen Hallenentlüftung werden etwa 3 Stunden nach Störfalleintritt H₂-Konzentrationen von max. 4,3 Vol.% global erreicht, die nach knapp 5 Stunden 4 % wieder unterschreiten (Kap. 6.2.4.4). Bei einer Zündung der Gaswolke ist mit einer Zerstörung der Halle zu rechnen (Kap. 6).

Beim vergleichbaren Pfad 9 (2,4E-10/a) mit zusätzlichem Versagen des Sicherheitsventils gelangt der gesamte gespeicherte Wasserstoff in die Halle. Entsprechend höher sind die H₂-Konzentrationen mit 5,3 bis 8,3 Vol.%, je nach Wirksamkeit der natürlichen Hallenentlüftung.

Damit sind die Häufigkeiten für zündfähige H₂-Konzentrationen selbst bei pessimistischer Betrachtung als extrem niedrig einzustufen. Das Störfall-Schutzkonzept der PHOEBUS-Anlage ist also auch bezüglich der Beherrschung großer Wasserstoff-Leckraten als hochwirksam anzusehen.

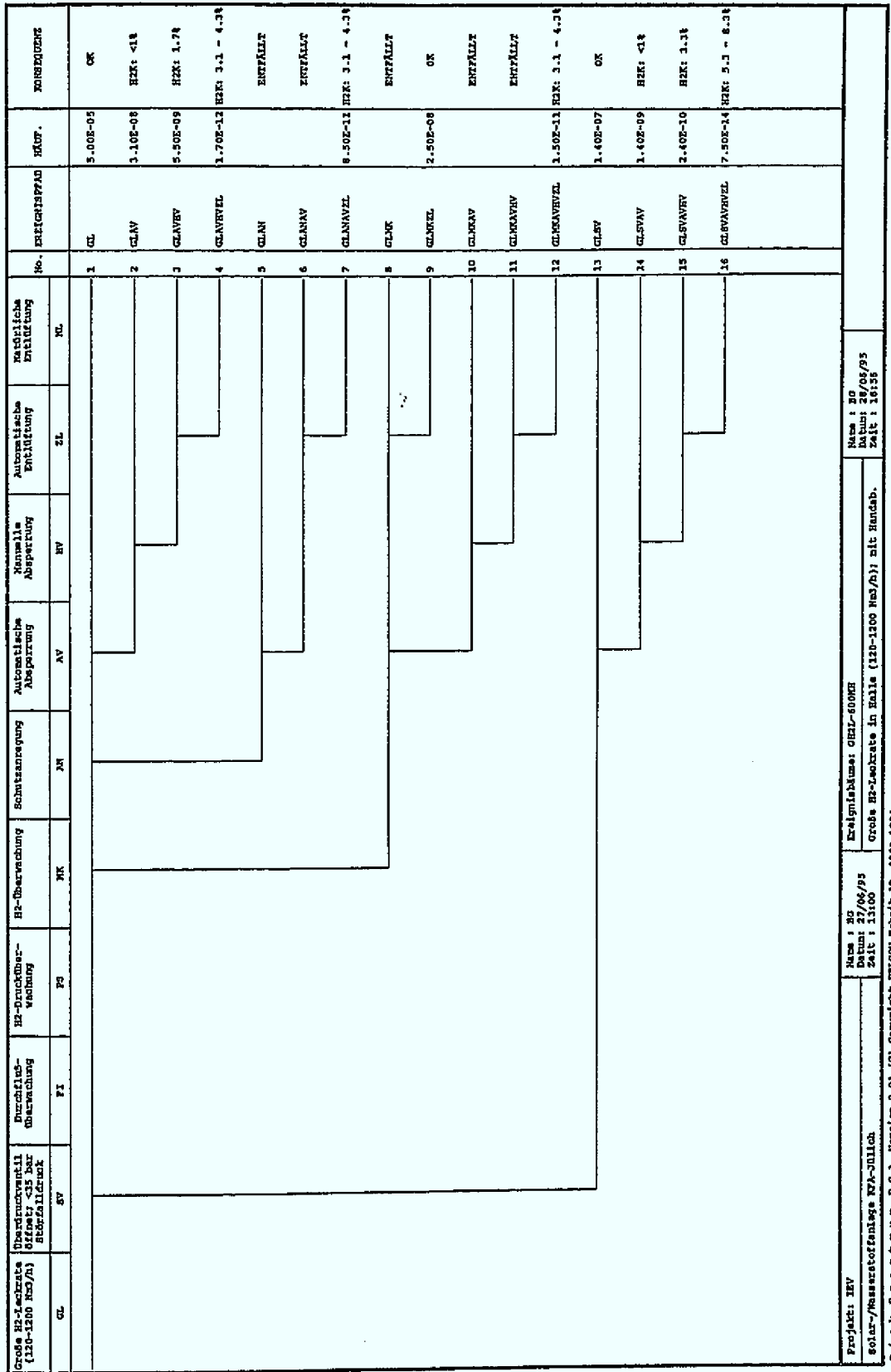


Abb. 5.4.3.9-1: Ereignisablaufdiagramm 'Grosses H₂-Leck innerhalb der Halle' (Variante 1 mit Handmaßnahmen)

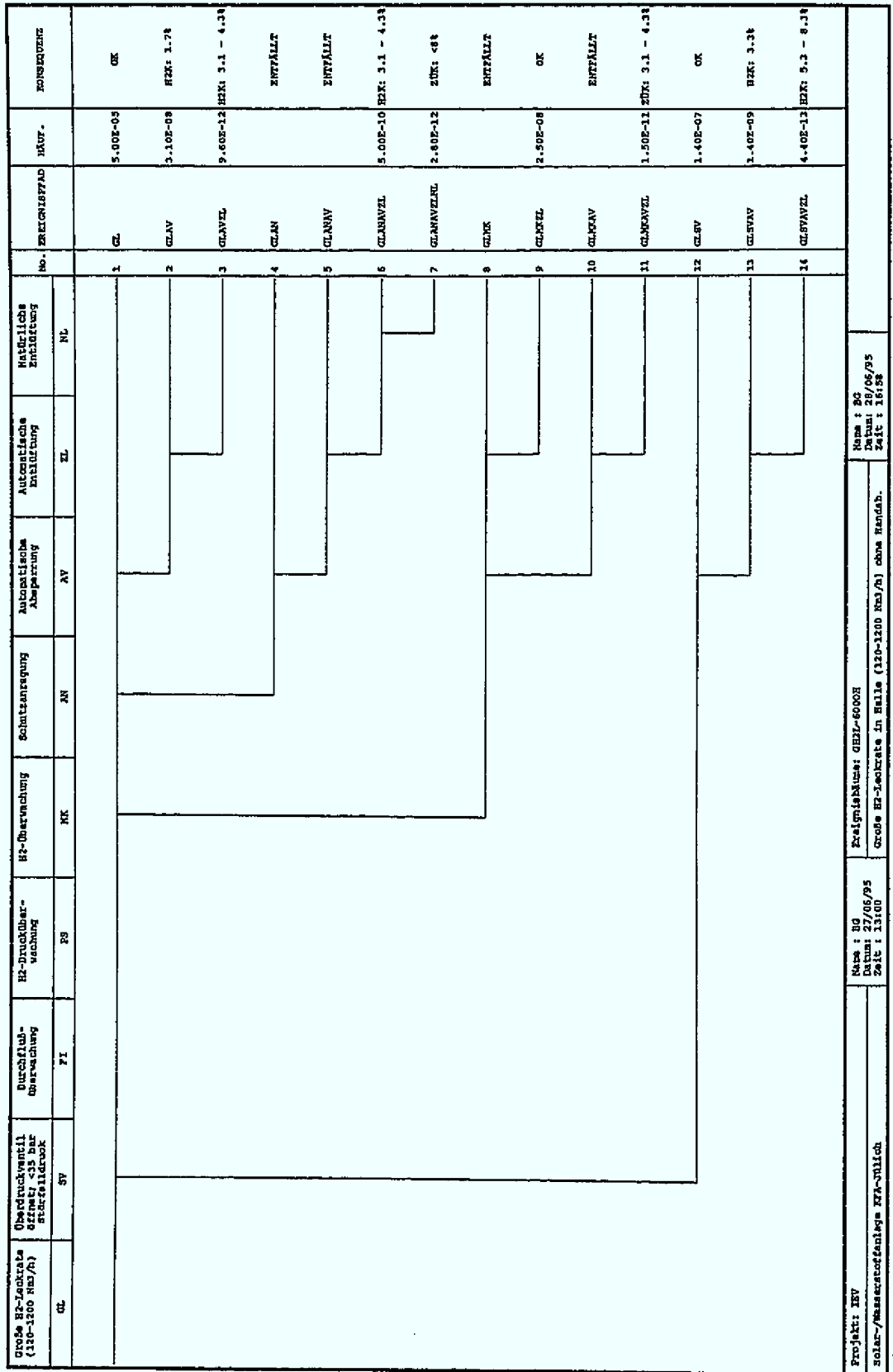


Abb. 5.4.3.9-2: Ereignisablaufdiagramm 'Grosses H₂-Leck innerhalb der Halle' (Variante 2 ohne Handmaßnahmen)

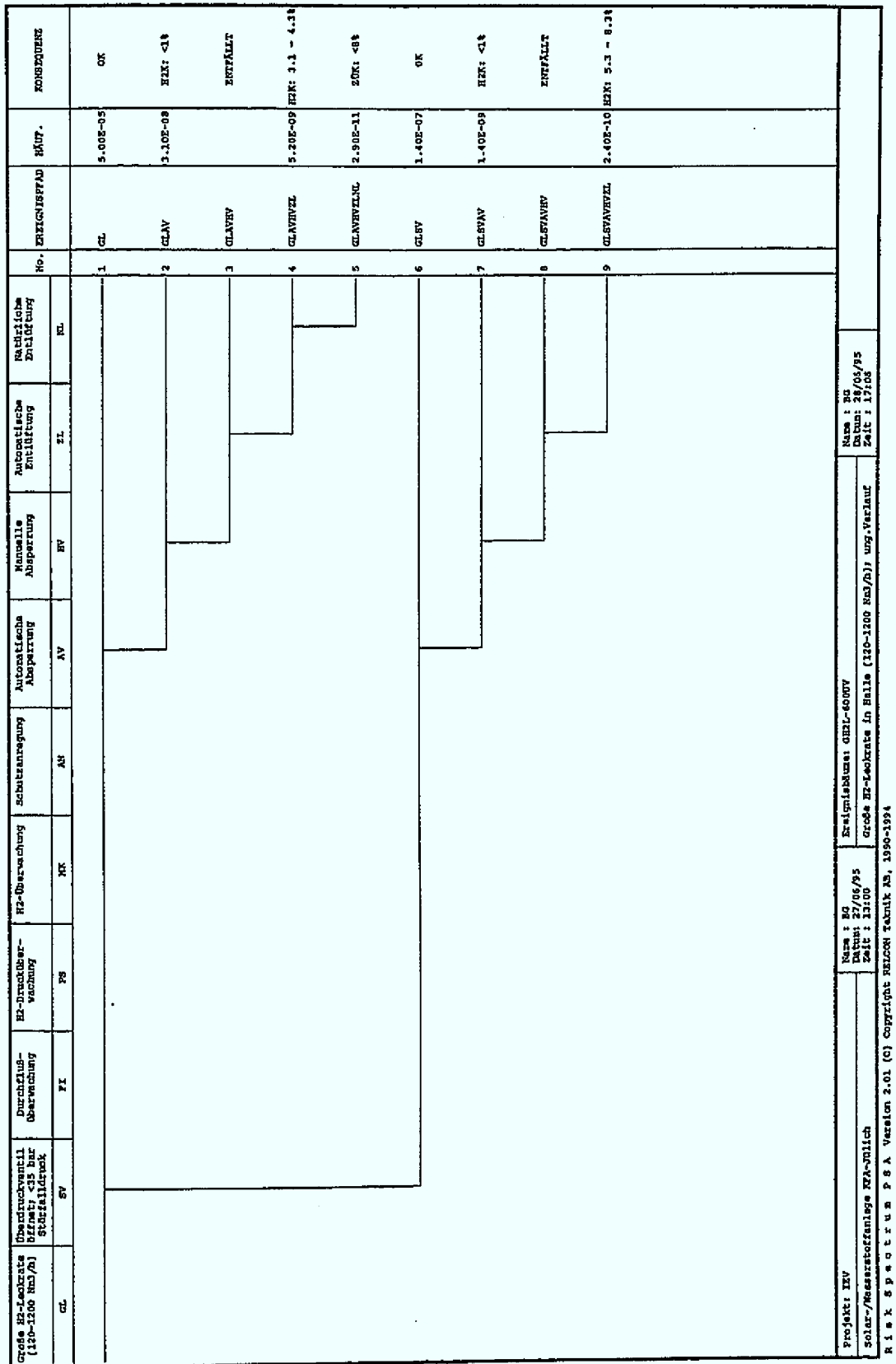


Abb. 5.4.3.9-3: Ereignisablaufdiagramm 'Grosses H₂-Leck innerhalb der Halle' (Variante 3 mit ungünstigem Verlauf)

In der folgenden Tabelle 5.4.3.9-1 sind die wichtigsten Ergebnisse der drei Varianten aufgeführt und einander gegenübergestellt.

		Ereignispfadhäufigkeiten für Variante:		
		1 mit HM	2 ohne HM	3 ungünstig
Schutzaktionen:				
ja/nein		EP 3:	EP 2:	
Druckbegrenzung:	ja	5,5E-9/a	3,1E-8/a	-
Absperrung:	nein			
Zwangsentlüftung:	ja	H ₂ -HK: 1,7% PZÜK wahrsch. (320 m ³ H ₂)	H ₂ -HK: 1,7% PZÜK wahr. (320 m ³ H ₂)	PDFG=Ausfall Zw.entlüft.
Druckbegrenzung: nein		EP 15:	EP 13:	
Absperrung:	nein	2,4E-10/a	1,4E-9/a	
Zwangsentlüftung:	ja	H ₂ -HK: 3,3% PZÜK wahrsch. (620 m ³ H ₂)	H ₂ -HK: 3,3% PZÜK wahr. (620 m ³ H ₂)	PDFG=Ausfall Zw.entlüft.
Druckbegrenzung: ja		EP 4+7+12:	EP 3+6+11:	EP 4:
Absperrung:	nein	1.0E-10/a	5,2E-10/a	5,2E-9/a
Zwangsentlüftung:	nein	H ₂ -ZÜK:	H ₂ -ZÜK:	H ₂ -ZÜK:
Naturkonvektion:	ja	3,1-4,3%	3,1-4,3% (580 - 800 m ³ H ₂)	3,1-4,3%
Druckbegrenzung: nein		EP 16:	EP 14:	EP 9:
Absperrung:	nein	7,5E-14/a	4,4E-13/a	2,4E-10/a
Zwangsentlüftung:	nein	H ₂ -ZÜK:	H ₂ -ZÜK:	H ₂ -ZÜK:
Naturkonvektion:	ja	5,3-8,3%	9,5-15,3% (990 - 1550 m ³ H ₂)	9,5-15,3%
Legende: H ₂ HK: H ₂ -Hallenkonzentration (global)				
ZÜK: Zündfähige Konzentration (global)				
PZÜK: Partiell zündfähige Konzentration				
PDFG: Partielle Deflagration				
HM: Handmaßnahmen (Notfallmaßnahmen)				
EP: Ereignispfad-Nummer				

Tab. 5.4.3.9-1: Ereignispfadhäufigkeiten und H₂-Konzentrationen bei großen H₂-Leckraten innerhalb der IEV-Halle

5.4.4 Wasserstoff- und Sauerstofflecks

Wasserstoff- und Sauerstofflecks, die praktisch gleichzeitig und unabhängig voneinander in beiden Gasleitungen auftreten, werden als extrem unwahrscheinlich und daher als vernachlässigbar angesehen. Lediglich im Bereich der Anlagenkomponenten werden beide Leitungen zusammengeführt und liegen über eine Strecke von ca. 5 m nebeneinander. Sie verlassen auf entgegengesetzten Wegen die Halle zu den Speichern.

Auf dem kurzen, parallel verlaufenden Leitungsabschnitt könnten z.B. durch äußere Einwirkungen beide Leitungen gleichzeitig beschädigt werden. Da sich der Aufstellungsbereich der Anlage auf einer 25 cm hohen, eingefaßten Bühne befindet, entfallen praktisch Gefahren durch eventuelle Transportvorgänge oder Handlungen (erlaubter oder unerlaubter Art).

Das bedeutet, daß im Grunde nur Folgeschäden an der Sauerstoffleitung, die bei Wasserstoffstörfällen in der Halle durch Hitze- oder Druckeinwirkung denkbar sind, probabilistisch eine Rolle spielen. Allerdings müßte - wenn es zu schwerwiegenden Gasgemischkonzentrationen als zuvor kommen soll - sowohl das Absperrversagen der Wasserstoff- als auch der Sauerstoffleitung eintreten.

Durch diesen zusätzlichen Fehler reduzieren sich die ohnehin schon extrem niedrigen Häufigkeiten derart, daß auf eine Betrachtung dieses Störfalles verzichtet wird.

In Kapitel 6 wird kurz auf die zu erwartenden Gaskonzentrationen eingegangen.

5.5 Wasserstoff-Störfälle im Fluchtgang der Halle

Die Wasserstoffleitungen vom Elektrolyseur zu den Speichern und zurück zur Brennstoffzelle führen durch den Hallen-Fluchtgang. Hier sind als Sicherheitseinrichtungen ein H_2 -Meßkopf, zwei Ablufthauben und Zuluftöffnungen in der Außentür installiert.

Das ursprüngliche Konzept einer gemeinsamen Wasserstoffleitung zwischen den Anlagenkomponenten und den Speichern wurde abgeändert in separate Verbindungen zwischen Speichern und Brennstoffzelle sowie zwischen Speichern und Elektrolyseur (Abb. 1.5-3).

Das Spektrum möglicher Wasserstoff-Leckagen wurde entsprechend anlagentechnischer Randbedingungen in drei Bereiche unterteilt:

- Kleine Lecks, welche die maximale Wasserstoffproduktionsrate im Elektrolyseur ($6,5 \text{ Nm}^3/\text{h}$) einschließen und bis zum Grenzwert der Durchflußüberwachung von $10 \text{ Nm}^3/\text{h}$ reichen;
- Mittlere Lecks, die den Bereich von $10 \text{ Nm}^3/\text{h}$ bis zur maximal möglichen Ausströmrates von $120 \text{ Nm}^3/\text{h}$ aus den Speicherbehältern bei funktionierender Hochdruckreduzierung umfassen;
- Große Lecks, die den Bereich von $120 \text{ Nm}^3/\text{h}$ bis zur maximal möglichen Ausströmrates von $600 \text{ Nm}^3/\text{h}$ aus dem Zwischenspeicher (Rückwärtsentleerung) umfassen.

5.5.1 Kleine Wasserstofflecks im Fluchtgang

Kleine Lecks umfassen die maximale Wasserstoffproduktionsrate von $6,5 \text{ Nm}^3/\text{h}$ im Elektrolyseur und reichen bis zum Grenzwert der Durchflußüberwachung von $10 \text{ Nm}^3/\text{h}$.

5.5.1.1 Abschätzung der Leckhäufigkeit

Wie in Kapitel 5.4.2.1 ausgeführt, werden Leckagen der Gasleitungen am ehesten an der Verbindungsstelle (Quetschverbindung) zweier Rohrstücke erwartet. Die wahrscheinlichste Ursache hierfür sind menschliche Fehler bei der Installation der Leitungen und Verbindungen. Die Wahrscheinlichkeit für eine fehlerhaft installierte Quetschverbindung wurde in 5.4.2.1 zu $1E-4$ abgeschätzt. Fehler, die die Verbindung direkt beeinträchtigen, werden bei der Druckprüfung (30 bar) in der Inbetriebnahmephase entdeckt.

Die beiden Leitungen enthalten insgesamt 5 Verbindungselemente, 2 in der Abströmleitung vom Elektrolyseur und 3 in der Zuleitung zur Brennstoffzelle.

Mit der Wahrscheinlichkeit 1 wird angenommen, daß die unsachgemäß ausgeführte Verbindung im Laufe der Zeit durch Erschütterungen zu einer Undichtigkeit führt. Die Häufigkeit für ein kleines H₂-Leck im Fluchtgang wird daher je nach Leitung zu 2 bzw. 3E-4/a angesetzt.

5.5.1.2 Bewertung der Fluchtgang-Gasüberwachung

Ursprünglich war die Gasüberwachung des Fluchtanges, in dem keine H₂-produzierenden oder -verbrauchenden Komponenten vorhanden sind, nicht vorgesehen. Leitungsleckagen unterhalb von 10 Nm³/h wären allerdings dann unerkannt geblieben.

Daher wurde die Installation eines H₂-Meßkopfes empfohlen, der, wie die Meßköpfe der Halle, bei Erreichen einer H₂-Konzentration von 20 % des UEG die automatischen Störfall-Schutzaktionen (Anlagenabschaltung und Gasabsperrung) anregt.

Für den Ausfall des H₂-Meßkopfes wird der im Kapitel 5.4.2.2 abgeleitete Wert von 2,3E-2 pro Anforderung angesetzt.

5.5.1.3 Bewertung der Gasabsperrung

Für die automatische Absperrung der Gaszuleitung 'Speicher - Brennstoffzelle' ist der in Kapitel 5.4.3.4 ermittelte Wert hinsichtlich der Anregung zu korrigieren. Wie zuvor ausgeführt, ist im Fluchtgang ein H₂-Meßkopf für die Anregung der Schutzaktionen (Anlagenabschaltung und Gasabsperrung) vorhanden. Daraus ergibt sich der in Abb. 5.5.1.3-1 dargestellte Fehlerbaum, dessen Auswertung eine Versagenswahrscheinlichkeit von 2,36E-2 pro Anforderung ergibt. Die 'cut-set'-Liste in Tab. 5.5.1.3-1 weist den Ausfall der Anregung als dominierend aus (97,5 %).

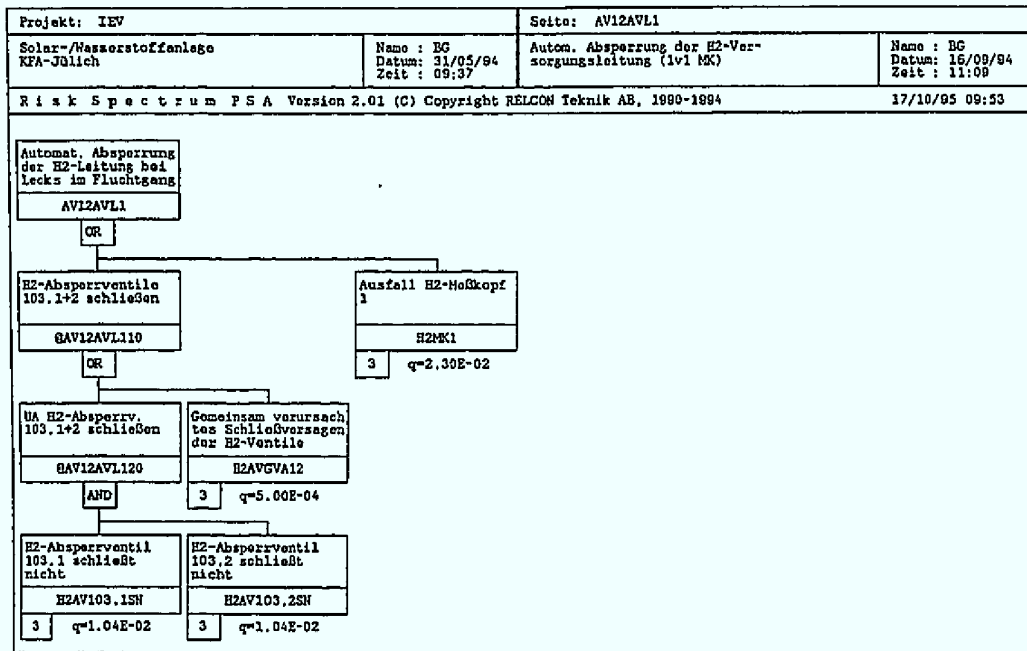


Abb. 5.5.1.3-1: Fehlerbaum 'Automatische Absperrung der H₂-Versorgungsleitung'
(Kleines H₂-Leck im Fluchtgang; 1 H₂-Meßkopf)

Risk Spectrum MCS Version 2.02				
Projekt : IEV Solar-/Wasserstoffanlage KFA-Jülich				
TOP-Ereignis: AV12AVL1 Autom. Absp. der H2-Leit. bei Lecks im Fluchtgang;lv1MK				
Mittlere Unverfügbarkeit = 2.36E-02				
Nr	Unverfügbar.	%	Ereignisse	
1	2.30E-02	97.48	H2MK1	Ausfall H2-Meßkopf 1
2	5.00E-04	2.12	H2AVGVA12	Gemeinsam verursachtes Schließversagen der H
3	1.08E-04	.46	H2AV103.1SN H2AV103.2SN	H2-Absperrventil 103.1 schließt nicht H2-Absperrventil 103.2 schließt nicht

Tab. 5.5.1.3-1: 'Cut-set'-Liste: 'Automatische Absperrung der H₂-Versorgungsleitung'
(Kleines H₂-Leck im Fluchtgang; 1 H₂-Meßkopf)

Bei einem Leck in der Abströmleitung vom Elektrolyseur zum Zwischenspeicher wird mit der Anlagenabschaltung die H_2 -Produktion im Elektrolyseur beendet. Zur Störfallbeherrschung ist eine erfolgreiche Absperrung des Lecks daher nicht erforderlich.

Die Leckrate kann bei fälschlichem Weiterlauf des Elektrolyseurs (bei Ausfall der Abschaltanregung) auslegungsbedingt maximal für wenige Stunden am Tag $6,5 \text{ Nm}^3/\text{h}$ betragen.

Falls allerdings das Rückschlagventil VR-101 und das Absperrventil V-101 vor dem Zwischenspeicher nicht schließen, kommt es zu einer Rückwärtsentleerung des Speichers. Dieser Fall wird aber häufigkeitsmäßig von dem zuerst diskutierten Leck in der Gaszuleitung wegen der höheren Zuverlässigkeit des Rückschlagventils abgedeckt.

5.5.1.4 Bewertung der Fluchtgang-Entlüftung

Die Berechnungen der Fluchtgang-Lüftung (Kapitel 6) führten zur Verwirklichung eines passiven Lüftungskonzeptes. In der Außentür zum Freigelände wurden für den Luftzutritt Lüftungsschlitze eingebracht und in der Decke zwei Lichtkuppeln durch Ablufthauben ersetzt.

Bei Leckagen bis $10 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ist diese Lüftung allein in der Lage, die H_2 -Konzentrationen sicher unterhalb der Zündgrenze von 4 Vol.% zu halten.

Eine temperaturbedingte Unterdrückung dieser natürlichen Raumentlüftung findet praktisch nicht statt, lediglich nimmt die Wirksamkeit etwas ab. Bei großen Temperaturunterschieden (z.B. 35°C Außen- und 20°C Innentemperatur) erfolgt allerdings eine Strömungsumkehr.

Kleine Wasserstofflecks während des Sommerbetriebes der Anlage führen also wegen der gesicherten natürlichen Raumentlüftung nicht zu zündfähigen Gaskonzentrationen.

Während des Winterhalbjahres kann allerdings eine Lüftungsblockade durch extreme Witterungseinflüsse (extremer Schneefall oder Eisregen) nicht vollkommen ausgeschlossen werden. Im Sinne einer konservativen Abschätzung wurde eine den Naturzug behindernde Blockade von mehr als 50 % der Strömungsquerschnitte an

insgesamt fünf Brennstoffzellen-Betriebstagen unterstellt. Im Gegensatz zur beheizten Halle wirkt hier keine warme Abluft einer Blockade der Abluftpfade entgegen. Somit ergibt sich für den Ausfall der Fluchtgang-Entlüftung im Winterhalbjahr eine Wahrscheinlichkeit von $2,74 \cdot 10^{-2}$ pro Anforderung.

5.5.1.5 Störfallbewertung

Kleine Wasserstoffleckagen in den Hallen-Fluchtgang führen bei Lecks in der Abströmleitung des Elektrolyseurs auch bei dessen fälschlichem Weiterlauf (Ausfall der Abschaltanregung) wegen der ausreichend natürlicher Raumentlüftung nicht zu zündfähigen Gasgemischen. Eine Blockade der Abluftöffnungen während des Sommerbetriebes der Anlage wird ausgeschlossen.

Im folgenden Störfallablaufdiagramm (Abb. 5.5.1.5-1) wird daher das Leck in der Gaszuleitung zur Brennstoffzelle als abdeckend betrachtet. Vom Leck während des Winterbetriebes ausgehend, wird die Verfügbarkeit der zuvor bewerteten Störfall-Schutzmaßnahmen abgefragt.

Die Kombination von Erfolgs- und Mißerfolgspfaden führt zu Ereignisablaufpfaden, von denen die wichtigsten aufgeführt sind. Die Eintrittshäufigkeiten (bezogen auf ein Jahr) weist die vorletzte Spalte aus. In der letzten Spalte 'KONSEQUENZ' sind die für Abläufe mit nein-Verzweigungen analysierten H_2 -Konzentrationen angegeben. Pfade die zum unerwünschten Top-Ereignis: 'Erreichen einer zündfähigen H_2 -Konzentration' führen, tragen dann entsprechend ihrer Häufigkeit zum Risiko der Anlage bei.

Der Störfallpfad 1 führt wegen der funktionierenden automatischen Leckabspernung zu keinen nennenswerten H_2 -Konzentrationen und ist daher bedeutungslos.

Auch die Pfade 2 und 6 mit verzögerter Leckabspernung von Hand bleiben mit H_2 -Konzentrationen von $<1,3$ - <2 Vol.% - je nach Wirksamkeit der natürlichen Entlüftung -, deutlich unterhalb der Zündgrenze.

Die Störfallpfade 3, 7 und 12 beinhalten ein langfristiges Ausbleiben der Leckabspernung. Je nach Wirksamkeit der natürlichen Hallenentlüftung führt dies zu globalen H_2 -Konzentrationen zwi-

schen 1,3 und 2,0 Vol.% nach 0,25 bzw. 3 Stunden (Tab. 6.3.1-1). Lokal können höhere Konzentrationen vorliegen. Schäden am Fluchtgang sind bei Deflagration dieser geringen Gasmenge nicht zu erwarten. Diese Pfade spielen daher fürs Risiko praktisch keine Rolle; ihre Eintrittshäufigkeiten von maximal $4,6E-6/a$ sind außerdem sehr gering.

Nur bei den Pfaden 4, 8 und 13 (mit Ausfall der natürlichen Lüftung) liegen die H_2 -Konzentrationen überall oberhalb der unteren Zündgrenze. Die Strömungsquerschnitte sind dann mindestens zu 75 % blockiert. Bei einer Totalblockade wird die obere Zündgrenze längere Zeit überschritten; bei der wahrscheinlicheren Teilblockade bleiben die Konzentrationen über die ganze Phase der Speicherentleerung im zündfähigen Bereich. Die Zündgrenze wird nach etwa einer halben Stunde erreicht und - wenn die Blockade anhält - erst nach mehr als einer Woche wieder verlassen.

Die Eintrittshäufigkeiten dieser Pfade sind allerdings mit maximal $1,7E-7/a$ extrem niedrig. Bei einer Zündung der Gaswolke ist mit einer Zerstörung des Fluchtanges und einer Beschädigung der Halle zu rechnen.

Kleines Leck in Abstrahlleitung vom Elektrolyseur	H ₂ -Überwachung Fluchtgang	Schuttsanierung	Automatische Absperrung	Manuelle Absperrung	Natürliche Entlüftung	No.	Ereignispfad	RAMP.	KONSEQUENZ
KLAS	RTG	ASAV	AV	RV	RLTG				
1						1	KLAS	2.00E-06	OK
2						2	KLASV	1.20E-07 HZK: <1.3 - 23	
3						3	KLASVAV	2.10E-08 HZK: 1.3 - 23	
4						4	KLASVAVNLPQ	5.70E-10 ZTK: >48	
5						5	KLASVAV		ENTFÄLLT
6						6	KLASVAVAV	2.00E-08 HZK: <1.3 - 23	
7						7	KLASVAVAVV	3.40E-05 HZK: 1.3 - 23	
8						8	KLASVAVAVNLPQ	9.30E-11 HZK: >48	
9						9	KLASVAV		ENTFÄLLT
10						10	KLASVAVAVAV		ENTFÄLLT
11						11	KLASVAVAVAVV		ENTFÄLLT
12						12	KLASVAVAVAVNLPQ	4.60E-06 HZK: 1.3 - 23	
13						13	KLASVAVAVAVAVNLPQ	1.70E-07 ZTK: >48	

Projekt: HV	Num : 86	Reignisdatum: KEIL-1070	Num : 86	Zeit : 11:07/95	Zeit : 11:07/95
Polier-/Messstoffanlage KPA-Julich	Num : 11/07/95	kleine H ₂ -Leckrate im Hallen-Fluchtgang (<10 Hz/h)	Num : 11/07/95	Zeit : 11:07/95	Zeit : 11:07/95
	Zeit : 11:07/95		Zeit : 11:07/95		

Risk Spectrum PSA Version 2.01 (C) Copyright MELCON Technik AG, 1990-1994

Abb. 5.5.1.5-1: Ereignisablaufdiagramm 'Kleines H₂-Leck innerhalb des Fluchtanges'

5.5.2 Mittlere Wasserstofflecks im Fluchtgang

Mittlere Lecks umfassen den Bereich von $10 \text{ Nm}^3/\text{h}$ bis zur maximal möglichen Ausströmrates von $120 \text{ Nm}^3/\text{h}$ aus den Speicherbehältern bei funktionierender Hochdruckreduzierung. Gleich große Lecks in der Abströmleitung vom Elektrolyseur zum Zwischenspeicher führen aufgrund geringerer Druckverluste zu Ausströmraten bis $600 \text{ Nm}^3/\text{h}$. Definitionsgemäß fallen sie damit in die Gruppe der großen Lecks und werden in Kapitel 5.5.3 behandelt.

5.5.2.1 Abschätzung der Leckhäufigkeit

Wie in Kapitel 5.4.2.1 ausgeführt, wird das Versagen einer Gasleitung am ehesten an einer Verbindungsstelle (Quetschverbindung) zweier Rohrstücke erwartet. Die wahrscheinlichste Ursache hierfür sind menschliche Fehler bei der Installation der Leitungen und Verbindungen. Durch äußere Einwirkungen (Erschütterungen) kann diese unkorrekt ausgeführte Verbindung vollständig verloren gehen und der volle Strömungsquerschnitt freigelegt werden, der dann zu den hier betrachteten Leckraten führt.

Die Wahrscheinlichkeit für eine fehlerhaft installierte Quetschverbindung wurde in 5.4.2.1 zu $1\text{E-}4$ abgeschätzt. Bei drei Verbindungen in der Leitung innerhalb des Fluchtanges ergibt sich eine Fehlerwahrscheinlichkeit von $3\text{E-}4$.

Dieser Wert ist noch zu verknüpfen mit der Wahrscheinlichkeit für äußere Einwirkungen, die diese unkorrekt ausgeführte Verbindung lösen.

Installationsfehler, die sich unmittelbar auswirken, werden bei der Druckprüfung (30 bar) in der Inbetriebnahmephase entdeckt.

Äußere Einwirkungen auf die Gasleitungen lassen sich derzeit kaum quantifizieren; ihre Wahrscheinlichkeit wird daher analog zur Leckbewertung in der Halle konservativ mit 1 angesetzt.

Die Häufigkeit für mittlere Wasserstofflecks im Fluchtgang ergibt sich unter diesen Randbedingungen zu $3\text{E-}4/\text{a}$.

5.5.2.2 Bewertung der Gasabsperrung

Für die Erkennung mittlerer Wasserstofflecks im Fluchtgang steht sowohl die Durchflußüberwachung ($>10 \text{ Nm}^3/\text{h}$) der Gasleitungen,

als auch die H_2 -Überwachung auf unzulässige Konzentrationen (>20 % UEG) zur Verfügung. Das Erreichen eines Grenzwerts löst neben der Anlagenabschaltung die automatische Absperrung der Gasleitungen aus.

Mißlingt die Leckabspernung, reicht die natürliche Lüftung des Fluchtanges nicht aus, die H_2 -Konzentration unterhalb der Zündgrenze zu halten (Kap. 6).

Der in Abb. 5.5.2.2-1 dargestellte Fehlerbaum berücksichtigt bei der Anregung der automatischen Leckabspernung die H_2 -Überwachung (ein Meßkopf) und die Durchflußüberwachung. Hierfür wurden in Kap. 5.4.2.2 bzw. 5.4.2.3 Werte von $2,3E-2$ bzw. $3,0E-2$ pro Anforderung abgeleitet. Eine manuelle Absperrung der Leitungen kommt wegen der schnellen Konzentrationserhöhung (7 - 9 Vol.% nach ca. 3 min.) nicht zum Tragen.

Die Auswertung des Fehlerbaums liefert für den Ausfall der automatischen Absperrung der Gasleitung eine Wahrscheinlichkeit von $1,3E-3$ pro Anforderung. Den dominierenden Beitrag mit etwas mehr als 50 % liefert der Ausfall der Anregung (H_2 -Meßkopf und Durchflußüberwachung), gefolgt vom gemeinsam verursachten Ausfall der Absperrventile mit 38,5 % (Tab. 5.5.2.2-1).

5.5.2.3 Bewertung der Fluchtang-Entlüftung

Nichtabgesperrte mittlere Lecks werden durch die natürliche Fluchtang-Lüftung nicht beherrscht.

Wie die Rechnungen in Kapitel 6 zeigen, werden bereits nach weniger als einer Minute zündfähige Konzentrationen erreicht, die innerhalb der nächsten 3 Minuten auf einen konstanten Wert von 7 - 9 Vol.% - je nach Wirksamkeit der natürlichen Lüftung - ansteigen, der bis zur Entleerung der Speicher nach 25 Stunden erhalten bleibt.

Bei einer etwa 50 % Blockade der Lüftungskanäle infolge extremer Witterungseinflüsse erreichen die Konzentrationen mit 12 Vol.% einen Wert, bei dem bereits eine detonative Verbrennung von in Räumen gezündeten H_2 -Luft-Gemischen wahrscheinlich wird.

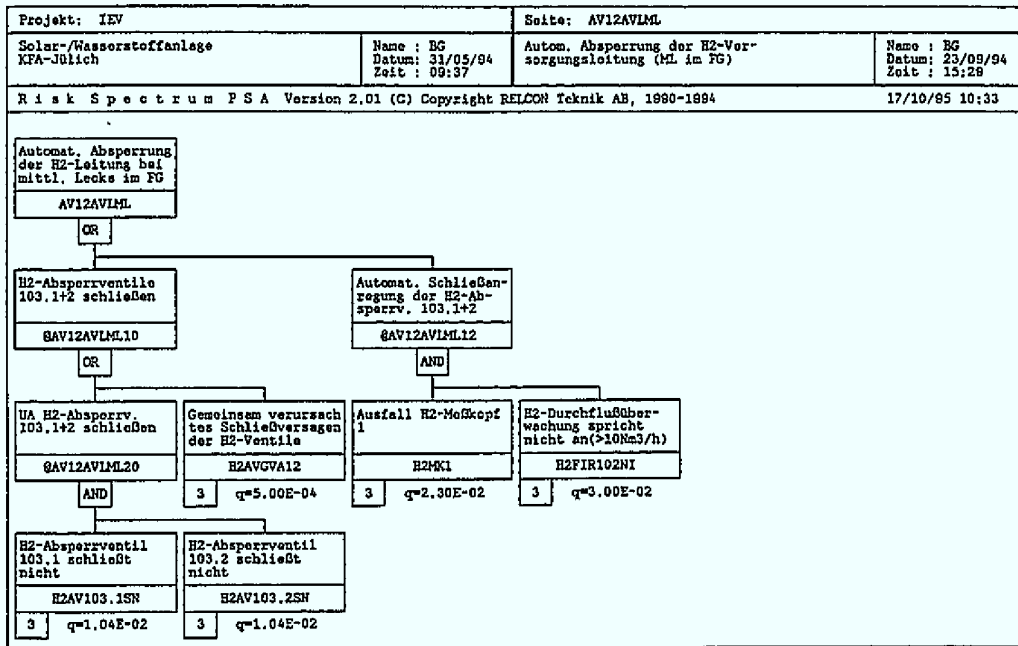


Abb. 5.5.2.2-1: Fehlerbaum 'Automatische Absperrung der H₂-Leitung' bei mittleren Lecks im Fluchtgang'

Risk Spectrum MCS Version 2.02				
Projekt : IEV Solar-/Wasserstoffanlage KFA-Jülich TOP-Ereignis: AV12AVLML Autom. Absperrung der H2-Leitung bei mittl. Lecks im FG				
Mittlere Unverfügbarkeit = 1.30E-03				
Nr	Unverfüg. %	Ereignisse		
1	6.90E-04 53.17	H2MK1 H2FIR102NI	Ausfall H2-Meßkopf 1 H2-Durchflußüberwachung spricht nicht an(>1	
2	5.00E-04 38.53	H2AVGVA12	Gemeinsam verursachtes Schließversagen der H	
3	1.08E-04 8.33	H2AV103.1SN H2AV103.2SN	H2-Absperrventil 103.1 schließt nicht H2-Absperrventil 103.2 schließt nicht	

Tab. 5.5.2.2-1: 'Cut-set'-Liste: 'Automatische Absperrung der H₂-Leitung bei mittleren Lecks im Fluchtgang'

Die Wahrscheinlichkeit einer Blockade der Lüftungskanäle ($\geq 50\%$) zum Zeitpunkt des Störfalleintritts wurde in 5.5.1.4 zu $2,74E-2$ abgeschätzt.

5.5.2.4 Störfallbewertung

Im Störfallablaufdiagramm der Abb. 5.5.2.4-1 wird ausgehend von einem mittleren Leck in der Gasleitung 'Speicher - Brennstoffzelle' die Verfügbarkeit der zuvor bewerteten Störfall-Schutzmaßnahmen abgefragt.

Die Kombination von Erfolgs- und Mißerfolgspfaden führt zu Ereignisablaufpfaden, von denen die wichtigsten aufgeführt sind.

Die Pfade 1, 7 und 8 führen wegen der funktionierenden Leckabspernung zu keinen nennenswerten H_2 -Konzentrationen und sind daher bedeutungslos.

Die Pfade 2, 5 und 11 erfassen nichtabgesperrte Lecks. Sie führen nach weniger als einer Minute zu zündfähigen H_2 -Konzentrationen, die innerhalb der nächsten 3 Minuten auf einen konstanten Wert von 7 - 9 Vol.% - je nach Wirksamkeit der natürlichen Lüftung - ansteigen, der bis zur Entleerung der Speicher nach 25 Stunden erhalten bleibt. Falls eine Zündung erfolgt, wird weniger als 0,5 kg Wasserstoff verbrannt. Die Summenhäufigkeit der Störfallpfade ist mit $4,2E-7/a$ sehr gering.

Die Pfade 3, 6 und 12 beinhalten zusätzlich den Ausfall (Blockade) der Lüftung. Bereits bei einer 50 %igen Blockade erreichen die Konzentrationen mit 12 Vol.% einen Wert, bei dem bei einer Zündung eine detonative Verbrennung des H_2 -Luft-Gemisches wahrscheinlich ist. Bei 80 % werden etwa 18 Vol.% erreicht. Die Wasserstoffmengen liegen zwischen ca. 1 - 5 kg. Falls eine Zündung erfolgt, ist mit der Zerstörung des Fluchtanges und mit Schäden im Umfeld zu rechnen. Für das Risiko der Anlage spielen diese Störfallpfade angesichts der sehr geringen Summenhäufigkeit von $1,1E-8/a$ kaum eine Rolle.

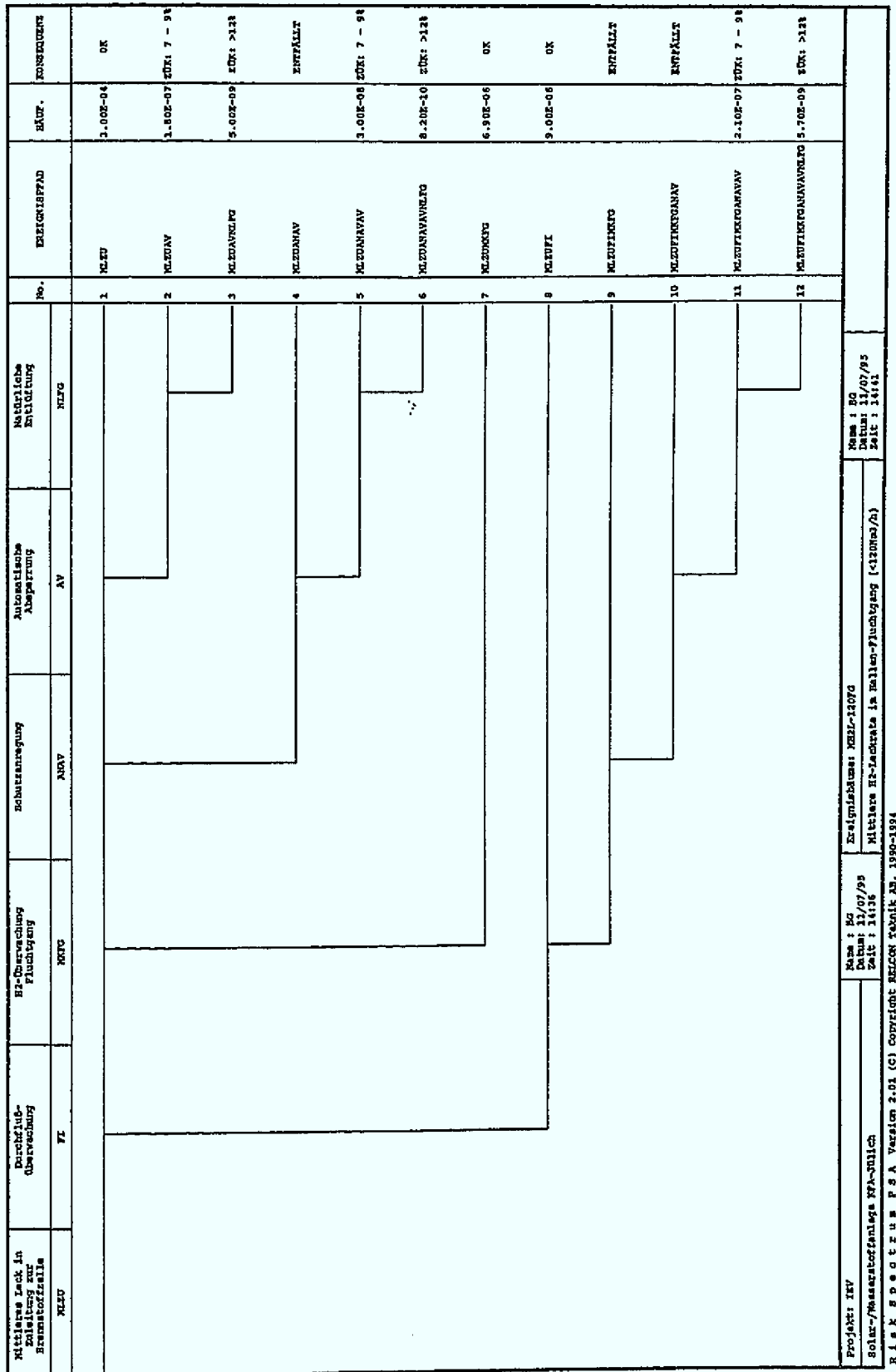


Abb. 5.5.2.4-1: Ereignisablaufdiagramm 'Mittleres H₂-Leck innerhalb des Fluchtanges'

5.5.3 Große Wasserstofflecks im Fluchtgang

Große Lecks decken den Bereich von $120 \text{ Nm}^3/\text{h}$ bis zur maximal möglichen Ausströmrates von $600 \text{ Nm}^3/\text{h}$ aus dem Wasserstoff-Zwischenspeicher (150 Nm^3) bei Rückwärtsentleerung ab.

Große Lecks, die das Versagen der Hochdruckreduzierung (150 - 7 bar) zwischen Speicher und Brennstoffzelle voraussetzen, werden für den Fluchtgang als sehr unwahrscheinlich und als abgedeckt angesehen. Im Fluchtgang weist die Gasleitung keine Eckverbindungen auf. Der druckbedingte Folgeschaden wird aber am ehesten außerhalb oder innerhalb der Halle an einer der Eckverbindungen erwartet (Auftrennen der Quetschverbindungen).

Im Unterschied zum Leck in der Leitung 'Speicher - Brennstoffzelle', führt ein in der Abströmleitung 'Elektrolyseur - Zwischenspeicher' auftretendes Leck aufgrund geringerer Druckverluste (s. Kap. 6) zu einer anfänglichen Ausströmrates von $600 \text{ Nm}^3/\text{h}$ - bei Rückwärtsentleerung des Zwischenspeichers - und fällt damit definitionsgemäß in die Kategorie 'große Lecks'.

5.5.3.1 Abschätzung der Leckhäufigkeit

Die Abschätzung der Leckhäufigkeit für den Abschnitt der Gasleitung 'Elektrolyseur - Zwischenspeicher' innerhalb des Fluchtanges beruht auf der Bewertung in Kapitel 5.5.2.1.

Bei nur zwei Rohrverbindungselementen ergibt sich für das große Leck eine unter konservativen Randbedingungen abgeschätzte Häufigkeit von $2\text{E}-4/\text{a}$.

5.5.3.2 Bewertung der Gasabsperrung

Zur Beherrschung großer Wasserstofflecks in der Leitung 'Elektrolyseur - Zwischenspeicher' muß entweder die Rückschlagklappe VR-101 oder das Absperrventil V-101 schließen. Das Absperrventil wird über 'H₂-Konzentration hoch (>20 % UEG)' oder über 'Gasdurchsatz hoch ($\geq 10 \text{ Nm}^3/\text{h}$)' angesteuert, das Rückschlagventil schließt durch den Druckabfall in der Leitung passiv.

In Abb. 5.5.3.2-1 ist der Fehlerbaum für die Absperrung des Lecks dargestellt. Für das Versagen des Rückschlagventils wurde eine auf /GRS2/ beruhende Ausfallrate von $2\text{E}-7/\text{h}$ angesetzt und

mit einem Prüfintervall von vier Jahren verknüpft. Hieraus ergibt sich eine Wahrscheinlichkeit von $3,5E-3$ für das Schließversagen bei Anforderung.

Die Auswertung des Fehlerbaums liefert für das Absperrversagen der Gasleitung eine Wahrscheinlichkeit von $3,9E-5$ pro Anforderung (Tab. 5.5.3.2-1). Dieser niedrige Wert beruht auf der bei der Rückwärtsentleerung zum Tragen kommenden Kombination zweier diversitärer Absperrarmaturen.

5.5.3.3 Bewertung der Fluchtgang-Entlüftung

Nichtabgesperrte große Lecks werden durch die natürliche Fluchtgang-Lüftung nicht beherrscht.

Wie die Rechnungen in Kapitel 6 zeigen, werden durch die anfänglich hohe Ausströmrate von $600 \text{ Nm}^3/\text{h}$ bereits nach 10 - 20 Sekunden zündfähige Konzentrationen erreicht, die innerhalb der nächsten 3 Minuten auf maximale Werte von 15 - 17 Vol.% - je nach Wirksamkeit der natürlichen Lüftung - ansteigen. Die rasche Entleerung des Zwischenspeichers (ca. 40 min.) begrenzt das Zündzeitfenster auf ca. 45 Minuten; für etwa 15 Minuten liegen die Konzentrationen oberhalb 12 Vol.%.

Wie bereits im Kapitel 5.5.1.4 angesprochen, findet eine temperaturbedingte Unterdrückung der natürlichen Raumentlüftung praktisch nicht statt. Ein Ausfall durch Blockade der Abluftkanäle ist höchstens infolge extremer Witterungsverhältnisse während des Winterbetriebes vorstellbar, hier jedoch wegen des vorliegenden 'Sommerlecks' nicht relevant.

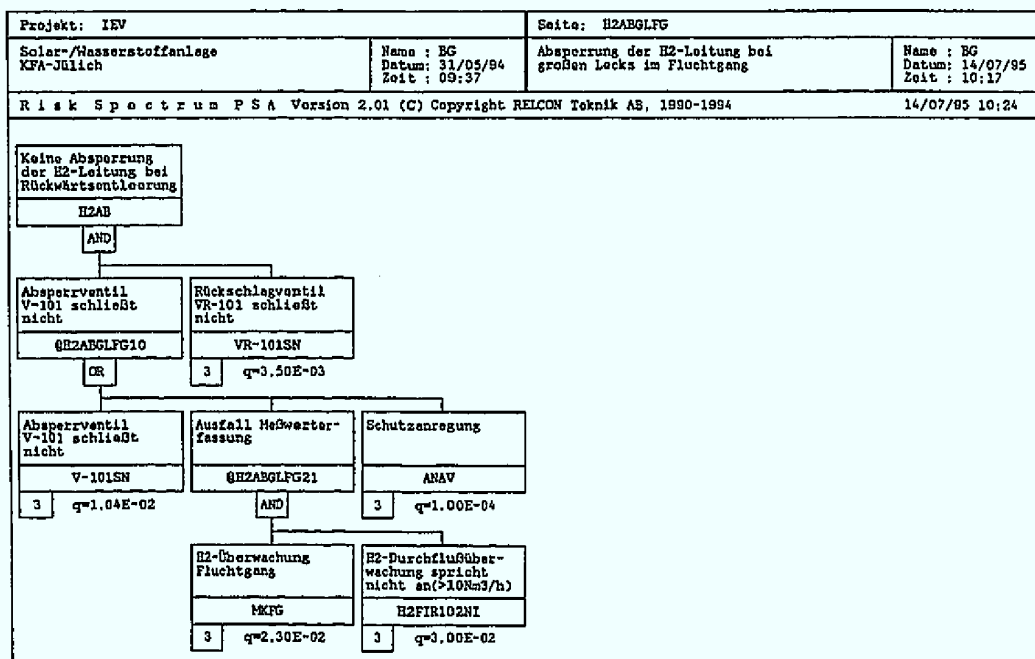


Abb. 5.5.3.3-1: Fehlerbaum 'Automatische Absperrung der H₂-Leitung' bei großen Lecks im Fluchtgang'

Risk Spectrum MCS Version 2.02				
Projekt : IEV Solar-/Wasserstoffanlage KFA-Jülich				
TOP-Ereignis: H2ABGLFG Keine Absperrung H2-Leitung bei Rückwärtsentleerung				
Mittlere Unverfügbarkeit = 3.91E-05				
Nr	Unverfügbb.	%	Ereignisse	
1	3.64E-05	93.01	V-101SN VR-101SN	Absperrventil V-101 schließt nicht Rückschlagventil VR-101 schließt nicht
2	2.41E-06	6.17	VR-101SN MKFG H2FIR102NI	Rückschlagventil VR-101 schließt nicht H2-Überwachung Fluchtgang H2-Durchflußüberwachung spricht nicht an(>1
3	3.50E-07	.89	VR-101SN ANAV	Rückschlagventil VR-101 schließt nicht Schutzanregung

Tab. 5.5.3.3-1: 'Cut-set'-Liste: 'Automatische Absperrung der H₂-Leitung bei großen Lecks im Fluchtgang'

5.5.3.4 Störfallbewertung

Bei einem Leck in der Abströmleitung vom Elektrolyseur zum Zwischenspeicher sind hohe Leckraten ($600 \text{ Nm}^3/\text{h}$) nur bei Rückwärtsentleerung des Zwischenspeichers möglich.

Im Störfallablaufdiagramm der Abb. 5.5.3.4-1 wird ausgehend vom Leck in der Abströmleitung 'Elektrolyseur - Zwischenspeicher' die Verfügbarkeit der zuvor bewerteten Störfall-Schutzmaßnahmen abgefragt.

Der Ereignispfad 1 führt wegen der verzögerungsfreien Leckabsperrung durch das Rückschlagventil zu keinen nennenswerten H_2 -Konzentrationen und gilt daher als beherrscht.

Bei den Pfaden 2 und 6 erfolgt die Absperrung wegen des Schließversagens des Rückschlagventils einige Sekunden verzögert durch das vom Durchsatz- oder Konzentrationsgrenzwert angeregte Absperrventil. Aufgrund der hohen Ausströmrate (anfänglich $600 \text{ Nm}^3/\text{h}$) und der geringen Raumgröße sind zündfähige H_2 -Konzentrationen lokal für kurze Zeit nicht auszuschließen; die Lüftung sorgt allerdings für einen schnellen Abbau. Angesichts des kleinen Störfallzeitfensters und der geringen Eintrittshäufigkeit von maximal $7\text{E-}7/\text{a}$ spielen diese Pfade für das Risiko der Anlage keine Rolle.

Die Pfade 3, 5, 7 und 10 erfassen nichtabgesperrte Lecks. Der maximale Speicherinhalt von 150 Nm^3 strömt mit einer anfänglichen Rate von $600 \text{ Nm}^3/\text{h}$ innerhalb von 45 Minuten aus. Nach ca. 3 Minuten werden detonationsfähige Konzentrationen von maximal 17 - 19 Vol.% - je nach Wirksamkeit der natürlichen Lüftung - erreicht; sie sinken innerhalb der nächsten etwa 10 Minuten unter 12 %. Mit fallender Leckrate und natürlicher Raumentlüftung wird nach spätestens 45 Minuten die Zündgrenze von 4 % wieder unterschritten.

Die Störfallhäufigkeit ist mit $8,1\text{E-}9/\text{a}$ vernachlässigbar selten. Der ausgewiesene kurze Gefährdungszeitraum ist aufgrund des zwischen 0 und 100 % schwankenden Speicherfüllungsgrades als oberer Grenzwert anzusehen.

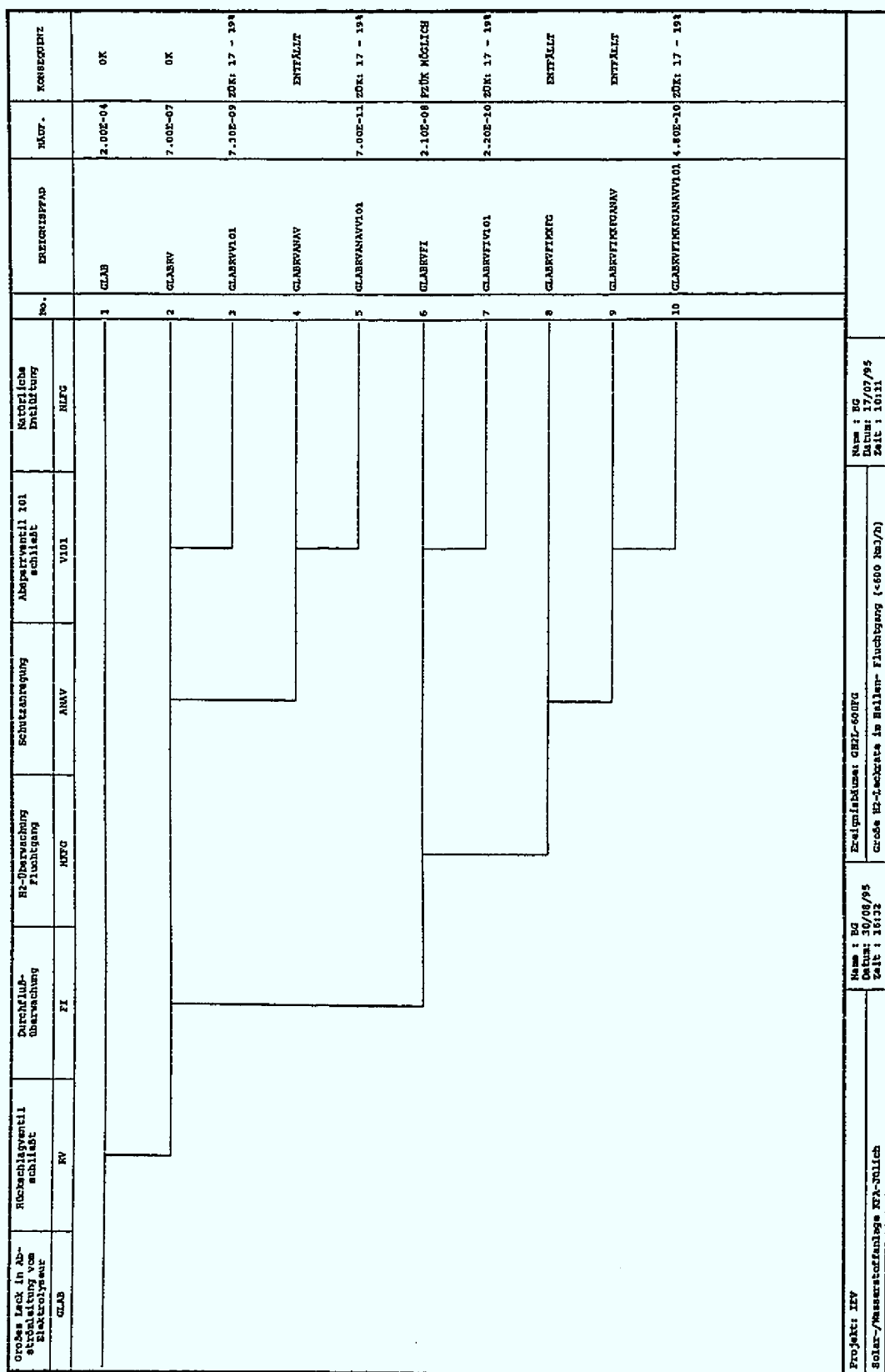


Abb. 5.5.3.4-1: Ereignisablaufdiagramm 'Großes H₂-Leck innerhalb des Fluchtanges'

5.6 Wasserstoff-Störfälle außerhalb der IEV-Halle

5.6.1 Bersten eines Wasserstoff-Speicherbehälters

Das Bersten eines Behälters (auch Zerknall genannt) ist als spontane Werkstofftrennung in der druckführenden Umschließung des Behälters (einschließlich der Stutzen und Verschraubungen) definiert, die mit dem plötzlichen Verlust eines großen Volumens des eingeschlossenen Druckmittels verbunden ist /TÜV78/.

5.6.1.1 Schätzung der Häufigkeit

Den Verfassern liegen keine verwertbaren Betriebserfahrungen mit Druckbehältern der Gaswirtschaft vor.

Vom Umweltbundesamt wurde 1983 eine Dokumentation über Störfälle in Chemieanlagen veröffentlicht, die in ihrem Auftrag vom TÜV-Rheinland weltweit gesammelt und in Form von Störfall-Datenblättern ausgewertet wurden /Handbuch/.

Bis 1980 konnten annähernd 1000 Schadensereignisse der vergangenen 80 Jahre gesammelt werden. Diese Sammlung wird nur als eingeschränkt repräsentativ und vollständig angesehen. Dies gilt sowohl für die tatsächlich in diesem Zeitraum aufgetretenen Fälle als auch für die Vollständigkeit und Authentizität der im einzelnen für das jeweilige Ereignis mitgeteilten Angaben.

Für die letzten 30 Jahre glaubt man, aufgrund von Vergleichen mit anderen Untersuchungen die aufgetretenen Störfälle in den Industriestaaten außerhalb des Ostblocks weitgehend vollständig erfaßt zu haben.

Hierbei ist allerdings zwischen spektakulären Ereignissen mit ausgesprochenem Störfallcharakter und den übrigen Schadensfällen und Unfällen zu unterscheiden, die wegen ihrer vergleichsweise geringen Auswirkungen die Aufmerksamkeit der Medien oder der Öffentlichkeit nur begrenzt auf sich ziehen. Einige Lücken des letzten Bereichs werden im In- und Ausland durch die systematische Sammlung von Schadensereignissen bei Behörden, Verbänden und anderen Institutionen geschlossen.

Für eine statistische Auswertung eignet sich diese Störfallsammlung nicht, da wesentliche Informationen wie Einsatzdauer

und -bedingungen nicht erfaßt sind. Für eine qualitative Auswertung ist diese Sammlung geeignet, da alle wesentlichen Störfälle erfaßt und das damit verbundene Spektrum der möglichen Gefahren weitgehend repräsentativ ist.

Bezüglich Behälterbersten enthält die Störfallsammlung bei großzügiger Auslegung dieses Begriffs insgesamt 10 Ereignisse, bei denen stationäre Behälter betroffen waren:

- 1926: Frankreich, Bersten eines Chlorgas-Vorratstanks (26 t), Ursache unbekannt, Toxische Auswirkungen (40 Tote).
- 1928: Deutschland, Abriß eines Mannlochdeckels entlang einer Schweißnaht eines Phosgentanks; Ursache unbekannt, Toxische Auswirkungen (11 Tote).
- 1939: Rumänien, Bersten eines Chlorgastanks (25 t), Ursache unbekannt, Toxische Auswirkungen (60 Tote).
- 1947: USA, Aufreißen eines Chlorgasbehälters (70 kg), Ursache unbekannt, Toxische Auswirkungen (2 Tote).
- 1949: USA, Ein Behälter zur Abscheidung von Wasser aus einem Butan-Propan-Gemisch versagte beim Wiederauffüllen wegen ungeeigneter Auslegung, (5 Tote).
- 1952: Deutschland, Ein alter Wassertank aus dem Jahr 1897 war mit Chlor gefüllt (15 t) und versagte unter dieser Art Beanspruchung, Toxische Auswirkungen (7 Tote).
- 1962: USA, Ein mit Isopentan gefüllter Tank riß entlang einer Bodenschweißnaht aufgrund von Materialversagen auf, so daß sein Inhalt in kurzer Zeit ausfloß, Brand.
- 1973: Südafrika, Die Tankwandung eines Druckbehälters brach infolge Sprödbrechens auf und gab 38 t Ammoniak frei, Toxische Auswirkungen (18 Tote).
- 1978: Deutschland, Durch wasserstoffinduzierte Spannungsrißkorrosion entstand an einem Hochdruck-Kugelgasbehälter (Wasserstoff-Methan) entlang einer Schweißnaht ein ca. 40 cm langes Leck. Durch Absaugen und späteres Abblasen konnte ein weiteres Aufreißen der Kugel verhindert werden. Das freigesetzte Gas wurde nicht gezündet. (Ereignis fällt strenggenommen nicht unter 'Bersten').
- 1979: USA, Aus unbekannter Ursache kam es zum Bersten eines Wasserstoff-Behälters. Die dabei auftretende Druckwelle verursachte Gebäudeschäden und wirkte sich bis in eine Entfernung von 1,5 km aus. Durch fortgeschleuderte Trümmer wurde ein Ammoniaktank beschädigt.

Von diesen 10 Ereignissen werden nur die letzten vier für eine qualitative Aussage zum Behälterbersten als geeignet angesehen, wobei das vorletzte Ereignis strenggenommen nicht unter Behälterbersten fällt. Die früheren Ereignisse dürften auf Grund der zeitlichen Distanz für 'heutige' Druckbehälter und heutige Qualitätssichernde Maßnahmen nicht mehr gültig sein.

Insgesamt belegt diese umfangreiche Störfallsammlung, daß Behälterbersten ein seltenes Ereignis ist.

TÜV-Versagensstatistik

Von der TÜV Arbeitsgemeinschaft Kerntechnik West wurde eine schadenstatistische Auswertung für konventionelle Druckbehälter durchgeführt /TÜV78/. Es wurden 7435 Schadensfälle untersucht und ausgewertet, die in 4 Gruppen von Behälterarten (Tab. 5.6.1.1-1) und in 10 verschiedene Versagensklassen eingruppiert wurden (Tab. 5.6.1.1-2).

Behälterart	Anzahl der Schadensfälle im Zeitraum:			
	1959-64	1965-70	1971-76	1959-1976
Dampfkessel	1646	1624	2295	5565
Druckbehälter	196	370	1020	1586
Druckgasbehälter	23	41	7	71
Verschiedene	91	122	-	213
Summen:	1956	2157	3322	7435

Tab. 5.6.1.1-1: Untersuchte Schadensfälle und Behälterarten

Von den 7435 Schadensfällen entfallen 6788 (ca.91 %) auf Objekte, die dem Bestand der bei den TÜV als 'wiederkehrend zu prüfen' registrierten Objekten zugeordnet werden können.

Für die aufgeführten Druckgasbehälter, die nicht zu diesem Bestand gehören, waren wegen fehlender Informationen (Bestand, Betriebsjahre) keine schadenstatistischen Auswertungen möglich.

Entsprechend nachfolgender Definition der Versagensklassen (Tab. 5.6.1.1-2) wurden von den registrierten 282 Zerknallen im Sinne einer konservativen Abschätzung 135 als risikorelevant eingestuft. Eine Durchsicht der in /TÜV78/ beschriebenen Ereignisse zeigt, daß es sich bei den betroffenen Behältern weitgehend um Schweißkonstruktionen handelte und die Schäden dabei an den Nähten ihren Ausgang genommen hatten.

Symbol	Kurzbezeichnung	Definition
A		Versagen mit Bersten des Behälters
A _R	Risikorelevante Zerknalle	Im Hinblick auf das zu beurteilende Versagensrisiko von Druckbehältern der Kerntechnik grundsätzlich als relevant betrachtete Versagensfälle.
A _i	Nicht Risiko-relevant	Nicht relevante Zerknalle für Druckbehälter der Kerntechnik:
A ₁		Wassermangelschäden an Großwasser-raumkesseln;
A ₂		Verpuffungen an Dampfkesseln;
A ₃		An Wasserrohrkesseln durch Aufreißen von Rohren verursachte Folgezerknalle;
A ₄		Zerknalle von Graugußarmaturen;
A ₅		Zerknalle von Druckgasbehältern;
A ₆		Auf- bzw. Abreißen von Schnellverschlüssen.
B		Versagen ohne Bersten des Behälters
B.1	Potentieller Zerknall	Versagen mit potentielltem Bersten: Ein durch Fehlergröße und/oder Rißwachstumsrate charakterisierter, durch geeignete Maßnahmen zu behebender Zustand, deren Unterlassung zum Bersten hätte führen können.
B.2	Unkritischer Schadensfall	Nicht-kritisches Behälterversagen: Eine lokale Beeinträchtigung der druckführenden Umschließung des Behälters durch örtlich begrenzte Rißbildung oder andere Fehler, welche kein kritisches Ausmaß erreichen und nicht zum Bersten führen würde.

Tab. 5.6.1.1-2: Definition der Versagensklassen

Eine Übertragung dieser Erfahrungen auf die hier vorliegenden gewalzten Behälter erscheint daher sehr konservativ. Als am ehesten zutreffend werden die Betriebserfahrungen der Gruppe der Druckbehälter angesehen. Von den in Tab. 5.6.1.1-1 aufgeführten 1586 Schadensfällen entfallen 1424 auf auswertbare TÜV-Objekte. Die hierbei aufgetretenen 77 Zerknalle wurden vom TÜV differenziert untersucht. Durch Selektion ausschließlich schadensbeschreibender Merkmale wurden 21 Zerknalle ermittelt, die im Hinblick auf das zu beurteilende Versagensrisiko von Reaktordruckbehälter als relevant bewertet wurden (Tab. 5.6.1.1-3).

Für die Übertragung der Erfahrungen auf die PHOEBUS-Behälter erscheint es gleichfalls vernünftig, die Ereignisse der Spalten 14 (erstmalige Druckprüfung) und 16 (gestörter Betrieb in Verbindung mit unzulässiger Druck- oder Temperaturbeaufschlagung z.B. in Rührwerkskesseln), die laut Tabelle 5.6.1.1-3 zusammen sechs Ereignisse umfassen, nicht zu berücksichtigen.

Die Einsatz- und Betriebsbedingungen der PHOEBUS-Behälter lassen die Ursachen für einen Zerknall am ehesten ebenfalls in den Bereichen 'Werkstoffe' und 'Verarbeitung' erwarten. Die in /TÜV78/ vorgenommene Selektion wird daher auf die PHOEBUS-Behälter übertragen. Strenggenommen müßte die Anzahl der Zerknalle um diejenigen bereinigt werden, die ihren Ausgang an den Schweißnähten genommen haben. Da die vorliegenden Behälter an den Walzenden als Abschluß eingeschweißte Stopfen besitzen, werden konservativ alle 21 als risikorelevant eingestuften Zerknalle berücksichtigt.

Daraus ergibt sich bei einer kumulierten Betriebserfahrung von 5948652 Druckbehälter-Betriebsjahren eine mittlere Zerknallrate von $3,5E-6$ pro Behälterjahr. Dieser Wert wird mangels spezifischer Daten der Sicherheitsanalyse der Solar-/Wasserstoffanlage zugrundegelegt. Die Wahrscheinlichkeit für den Zerknall eines beliebigen der 18 Wasserstoff-Behälter läge demnach bei etwa $6,3E-5/a$.

Dieser Wert gilt nur unter der Voraussetzung, daß die Behälter entsprechend den Prüfbefunden keine Vorschädigungen aufweisen, die sich durch Einwirkungen des Druckwasserstoffs ausweiten könnten.

1	Größe	Zeichen	Einheit	Erläuterungen und Zahlenwerte							
2	Behälterart	DB	-	Druckbehälter nach AD und UVV-VBG 17							
3	Bezugsmenge	-	-	+)							
4	Zeitraum	-	-	1959-1964	1965-1970	1971-1976	1959-1976				
5	Betriebsjahre	T	a	6	6	6	18				
6	Mittlerer Bestand	$\bar{N}$	-	158999	321337	511106	330481 ¹⁾				
7	Mittlere Behälter-Betriebsjahre	$\bar{N} \times T$	B x a	953994	1928022	3066636	5948652				
8	Zahl der untersuchten Schadensfälle	Z	-	146	290	988	1424				
9	Zerknalle	A_R	-	18	32	27	77				
10	Betriebszustand bei Schadensseintritt	Beschreibung in Tab. bis Tab.		Ursachen im Bereich Werkstoffe/Verarbtg.							
				JA	NEIN	JA	NEIN	JA	NEIN	JA	NEIN
11	- Dauerbetrieb	1.1 1.10	1.6 1.13	4	2	6	8	1	10	11	20
12	- An-/Abfahren	2.1 2.10	2.2 -	2	1	0	4	0	1	2	6
13	- Druckprüfungen	3.1 3.10	3.3 -	(4)	(0)	(2)	(0)	(3)	(2)	(9)	(2)
14	-- Erstmalige	-	-	1	0	0	0	0	2	1	2
15	-- Wiederkehrende	-	-	3	0	2	0	3	0	8	0
16	- Gestörter Betrieb	4.1 4.10	4.8 4.15	2	3	1	11	2	8	5	22
17	- SUMMEN			12	6	9	23	6	21	27	50
18	-- nicht risikorelevante Zerknalle	Zeile 11-16: NEIN Zeile 14+16: JA		3	6	1	23	2	21	6	50
19	-- risikorelevante Zerknalle	Zeilen 11, 12 + 15: JA		9		8		4		21	
20	Schätzwert der Schadensrate	$\bar{\lambda}$	1/B x a	$0,94 \cdot 10^{-5}$		$0,41 \cdot 10^{-5}$		$0,13 \cdot 10^{-5}$		$0,35 \cdot 10^{-5}$	
21	Oberer Grenzwert der Schadensrate für 99%-Vertrauensbereich	$\hat{\lambda}_{99}$	1/B x a	$1,97 \cdot 10^{-5}$		$0,90 \cdot 10^{-5}$		$0,38 \cdot 10^{-5}$		$0,58 \cdot 10^{-5}$	

+) Mittlerer Bestand der bei den TÜV als wieder
Objekte

Tab. 5.6.1.1-3: Bersthäufigkeit für Druckbehälter des TÜV-
Bestandes

5.6.1.3 Mögliche Auswirken des Behälterzerknalls

Durch die Aufteilung des geplanten H_2 -Produktionsvolumens von 3000 Nm^3 auf 18 Behälter mit geometrischen Volumina von $1,4$ bzw. $1,6 \text{ m}^3$ reduziert sich das Gefährdungspotential entsprechend. Durch die stapelförmige Anordnung der Behälter ist nach Bersten eines Behälters ein kaskadenartiger Versagensprozeß weiterer Behälter durch Bruchstück- oder Hitzeeinwirkung (Zündung des sich bildenden H_2 /Luftgemisches im Bereich der Behälter) denkbar. Zumindest ist das Abreißen der H_2 -Anschlußleitungen durch Verlagerung der Behälter wahrscheinlich.

Auch im günstigsten Fall, wenn der Störfall auf einen Behälter begrenzt bleibt, wird der gesamte H_2 Vorrat freigesetzt, da die Anschlußleitungen (ϕ_i 21mm) der Behälter untereinander verbunden sind. Sie sind mit jeweils zwei Handarmaturen bestückt und enthalten keine Rückschlagventile, weil sie in beide Richtungen benutzt werden. Der Ausströmvorgang dauert beim Versagen der Verbindungsleitung der beiden Behälterbatterien 5 - 6 Minuten und reduziert sich auf ca. 30 Sekunden, wenn alle Anschlußleitungen versagen (Kap. 6).

Die Gefährdung der Umgebung geht neben umherfliegenden Behälterteilen, die, wie die Unfallberichte zeigen, in einem Radius von bis zu mehreren 100 m Entfernung einwirken, von dem freigesetzten Wasserstoff aus. Am ungünstigsten ist es, wenn die Zündung erst nach der vollständigen Freisetzung erfolgt. Bei austauscharmen Witterungslagen können Gaswolken relativ lange zündfähig bleiben und sich vom Unfallort verlagern, bis sie gegebenenfalls fremdgezündet werden.

Daß bei einer Zündung die Deflagration in eine Detonation umschlagen kann, ist nicht wahrscheinlich. Nach Ansicht der Experten tritt ein solches Umschlagen nur in geschlossenen Räumen bei einer Wasserstoffkonzentration von mindestens 12 Vol.% auf. Ein solches Umschlagen wird vor allem durch Turbulenzen ausgelöst, wenn zum Beispiel die von der Flamme ausgehende Druckwelle von einer Wand zurückgeworfen wird und sich dadurch der Druck im Flammenbereich erhöht, wodurch die Flammengeschwindigkeit, die normalerweise 10 m/s beträgt, plötzlich auf mehr als 2000 m/s anwachsen kann. Das äußert sich als Verdichtungsstoß, der die

Selbstentzündung des gesamten Wasserstoff-Luft-Gemisches bewirkt /Weber2/.

5.6.1.3.1 Maximale Energiefreisetzung

In /Husmann/ werden die möglichen Folgen eines mit Helium gefüllten Druckbehälters des HTR-MODUL betrachtet. Um sich ein Schadensbild bei diesem postulierten Versagen machen zu können, wurden zum Vergleich die folgenden Explosionsereignisse mit bekannten TNT¹-Äquivalenten herangezogen:

- 1974, Flixborough GB, Cyclohexananlage, Riß einer Behelfsleitung, Freisetzung von 20 bis 50 t Cyclohexan, geschätzte Stärke (basierend auf dem Schadensausmaß) der Explosion: 15 - 45 t TNT-Äquivalent, rechnerisch mögliches Energieäquivalent bei 30 t Cyclohexan: 297 t TNT.
Durch die mit der Explosion verbundene Druckwelle wurden auf einem Areal von 300 x 300 m alle Gebäude und Strukturen bis auf die Grundmauern zerstört. Von den 70 zu diesem Zeitpunkt Beschäftigten, kamen 28 ums Leben. Im Umkreis von 6 km waren die Fensterscheiben zersplittert, 1821 Häuser wurden zum Teil schwer beschädigt.
- 1991, Hanau BRD, Zerknall eines Wasserstofftanks (Schadensursache siehe Kapitel 4.3.2), Freisetzung von etwa 4500 Nm³ GH₂ (366 kg). Hierfür wird in /Husmann/ eine maximal mögliche Energiefreisetzung von 46,3 GJ (10,2 t TNT Äquivalent) errechnet. Demgegenüber ist die gespeicherte Druckenergie des Tanks mit 1,1 GJ (0,25 t TNT Äquivalent) praktisch vernachlässigbar.
- 1974, Los Angeles USA, Explosion eines Tanklastzuges mit oxidierender Flüssigkeit (organisches Peroxid) im Lagergebäude einer Spedition. Aus ungeklärter Ursache entstand im Gebäude ein Brand, der auf das Fahrzeug übergriff. Die Hitzeeinwirkung führte zur Explosion der Ladung. An Gebäuden in einer Entfernung bis ca. 120 m wurden Fensterscheiben zerstört. Andere Schäden wurden nicht festgestellt. Der obere Schätzwert der Explosionsenergie wird mit einem TNT Äquivalent von 300 kg angegeben.

Für diese Explosionsenergien bzw. Äquivalenten Sprengstoffmassen lassen sich aus der Abb. 5.6.1.3.1-1, dessen Graph auf in der Literatur übliche Berechnungsverfahren beruht, die Spitzenüberdrücke P_s für definierte skalierte Entfernungen R entnehmen.

¹ Sprengstoff Trinitrotoluol (Energieinhalt = 4520 kJ/kg TNT)

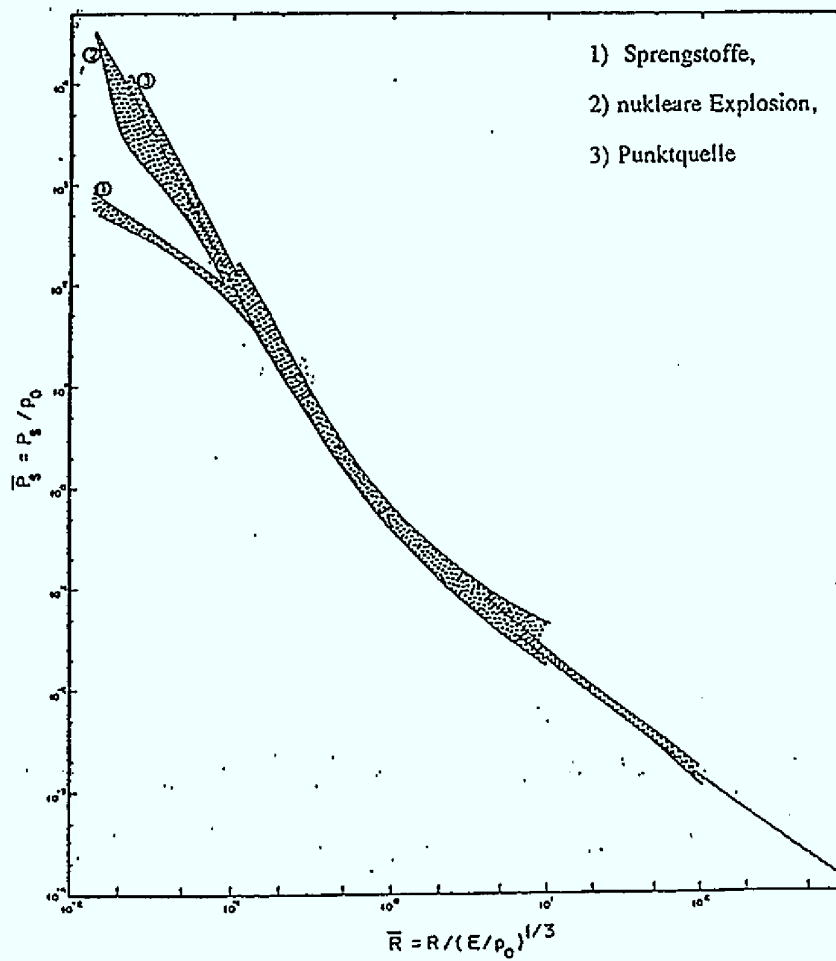


Abb. 5.6.1.3.1-1: Darstellung des Druckwellenüberdruckes gegenüber der Entfernung

Die skalierte Entfernung $\bar{R}$ errechnet sich über die Beziehung

$$\bar{R} = R / (E / P_0)^{1/3}$$

mit:

E = Gesamtenergie der Explosion in Joule

P_0 = Umgebungsdruck in N/m^2

R = Entfernung von der Explosion in m

Soll dieser Zusammenhang für Oberflächenexplosionen (in Luft) angewendet werden, muß die Explosionsenergie für Sprengstoffe mit 1,8 und für Gaswolkenexplosionen mit 2 multipliziert werden. In Bodennähe stattfindende Explosionen bewirken reflektierende und damit sich verstärkende Druckwellen. Sprengstoffe leiten dabei eine größere Energie in den Erdboden als Gaswolken und werden deshalb mit dem kleineren Faktor multipliziert.

Der Spitzenüberdruck wird meistens als alleiniges Kriterium für die Zerstörung angesetzt, obwohl in der Realität der Schaden durch den gesamten Druck-Zeit-Verlauf bestimmt wird. Dieser Impuls ist aber im Gegensatz zum Überdruck nur schwer meßbar.

Ausgehend vom Spitzendruck lassen sich mit Hilfe einer einfachen Formel die Radien R_i (m), bis zu denen Schäden des Typs i zu erwarten sind, ermitteln:

$$R_i = C_i W^{1/3}$$

mit

W = Explosionsenergie, TNT-Äquivalent in kg

C_i = Korrelationwert für den Schaden i

Die folgende Tabelle 5.6.1.3.1-1 zeigt die Druckminima der Überdrücke für das Auftreten des Schadens vom Typ i und den dazugehörigen Korrelationsfaktor C_i . Diese aus /Husmann/ entnommene Tabelle entstammt dem Handbuch der niederländischen Feuerwehr.

Für die PHOEBUS-Anlage läßt sich nach dem obigen Berechnungsverfahren unter der konservativen Annahmen der vollständigen Explosion der in den Behältern vorhandenen Wasserstoffmenge von ca. 250 kg ($\approx$ Speichermenge) eine größtmögliche Energiefreisetzung von 31,5 GJ, mit einem TNT-Äquivalent von 6,98 t ermitteln. Demgegenüber ist die potentielle Energie (gespeicherte Druckenergie) eines Wasserstofftanks mit 0,035 GJ um den Faktor 900 geringer.

Für diese Explosionsenergie lassen sich mit Hilfe obiger Beziehung Schadensradien ermitteln.

In /Husmann/ wurde dies u.a. für die oben aufgeführten Explosionsereignisse 'Flixborough', 'Heraeus' und 'Los Angeles' vorgenommen.

Schäden (i) Gesundheitliche / Materielle	Minimalwert des Über- druckes für den Schaden (i) (bar)	C _i -Faktor (-)
1. Gesundheitsschäden:		
a) primäre Schäden		
Zeitliche Beeinträchtigung des Gehörs	0,02	36
Umfallen, Aufprallen auf Hindernisse	0,1	9
Riß des Trommelfells	0,3	4,5
Lungenschaden	1	2,6
Tödlich	2	1,8
b) Sekundäre Schäden		
Fensterbruch mit z.T. töd- licher Scherbenwirkung	0,03	24
Einstürzende Mauern, herab- fallende Objekte mit be- grenzter Tötungswahrschein- lichkeit, einige Verletzte	0,17	7
Einstürzende Gebäude mit wahrscheinlich einigen Toten	0,4	4
2. Materielle Schäden		
Vereinzelte Fensterbruch	0,01	65
Fensterbruch mit z.T. töd- licher Scherbenwirkung	0,03	24
Begrenzter Schaden an Ge- bäuden, Mauern, und Giebel, z.T. eingerissen, Dächer beschädigt	0,045	15
Mittlere bis schwere Ge- bäudeschäden, einstürzende Mauern, Versagen einzelner Tragkonstruktionen	0,17	7
Oberirdische Lagerbehälter beschädigt	0,2	6
Apparatur beschädigt	0,3	4,5
Schwere Schäden an niedrigen Gebäuden, 50 - 75 % der Mauern zerstört, Einsturz- gefahr	0,4	4
Umkippen eines vollen Tanklastzuges	0,5	3,5

Tab.: 5.6.1.3.1-1 Grenzwerte für gesundheitliche und materielle
Schäden durch Druckwellen /Husmann/

Die folgende Tabelle 5.6.1.3.1-2, die um die größtmöglichen Schadensradien der PHOEBUS-Anlage erweitert wurde, gibt die Ergebnisse der Explosionsereignisse 'Flixborough', 'Heraeus' und 'Los Angeles' wieder.

Gesundheitliche Schäden	Druck- grenz- wert (bar)	Flixborough 10-45t TNT	Heraeus 10t	PHOEBUS 6,9t	Los Angeles 0,3t
a) primäre Schäden		SCHADENSRADIEN R (m)			
Umfallen, Auf- prallen auf Hindernisse	0,17	250	154	134	47
Riß des Trom- melfells	0,3	160	99	86	30
Lungenschaden	1,0	93	58	50	18
Tödlich	2,0	64	40	34	12
b) Sekundäre Schäden					
Fensterbruch mit z.T.töd- licher Scher- benwirkung	0,03	852	528	459	160
Einstürzende Mauern, herab- fallende Ob- jekte mit begrenzter Tötungswahr- scheinlichkeit	0,17	250	154	134	47
Einstürzende Gebäude mit wahrscheinlich einigen Toten	0,4	142	90	77	27

Tab.: 5.6.1.3.1-2 Druckwellenschäden, hervorgerufen durch
Explosionen verschiedener Stärken

Danach unterscheiden sich die Schadensradien für das 'Heraeus'- und für das fiktive 'PHOEBUS'-Ereignis nur um etwa den Faktor 1,2.

Die folgende Abbildung 5.6.1.3.1-2 zeigt einen Übersichtslageplan des Forschungszentrums Jülich mit Entfernungsradien. Eine Übertragung der Schadensradien zeigt, daß schwere Personenschäden, die durch primäre Einwirkungen hervorgerufen werden, weitgehend auf das IEV beschränkt bleiben. Allerdings sind auch schwere Personenschäden bis hin zu einzelnen Todesfällen durch sekundäre Einwirkung (einstürzende Mauern oder herabfallende Objekte bzw. Fensterbruch) in einer Entfernung von bis zu 134 bzw. bis zu 459 m möglich. Fensterbruch ist vereinzelt noch in den Außenbereichen der KFA zu erwarten.

Die kerntechnischen Einrichtungen 'Merlin', 'DIDO', 'AVR' 'Heiße Zellen' und 'BE-Trockenlager' liegen mit einem Abstand von mindestens 350 m weit außerhalb der Zone, in der noch erhebliche Schäden an Gebäuden ($R = 134$ m) zu erwarten sind.

Die Tankstelle liegt knapp innerhalb dieser Zone, allerdings durch ein dazwischenliegendes, zusammenhängendes Waldstück relativ geschützt.

In unmittelbarer Nähe des Explosionsortes (<20 m) befinden sich auf dem Freigelände der angrenzenden Hauptwerkstatt zwei gegenüberliegende Reihen Lagerschuppen für Gasflaschen, u.a. mit den brennbaren Gasen Acetylen, Methan und H_2 . Analog zum 'Heraeus'-Ereignis /VGB/ sind in diesem Bereich Folgeschäden zu erwarten.

Störfälle, die vom Gaslager ausgehen und Folgeschäden an der PHOEBUS-Anlage, insbesondere an den H_2 -Speicherbehältern verursachen können, sind nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Die Ereignisvarianten mit begrenzten Energiefreisetzungsanteilen (<25 %) sind in der Ereignisablaufanalyse des Kapitels 5.6.1.4 behandelt.

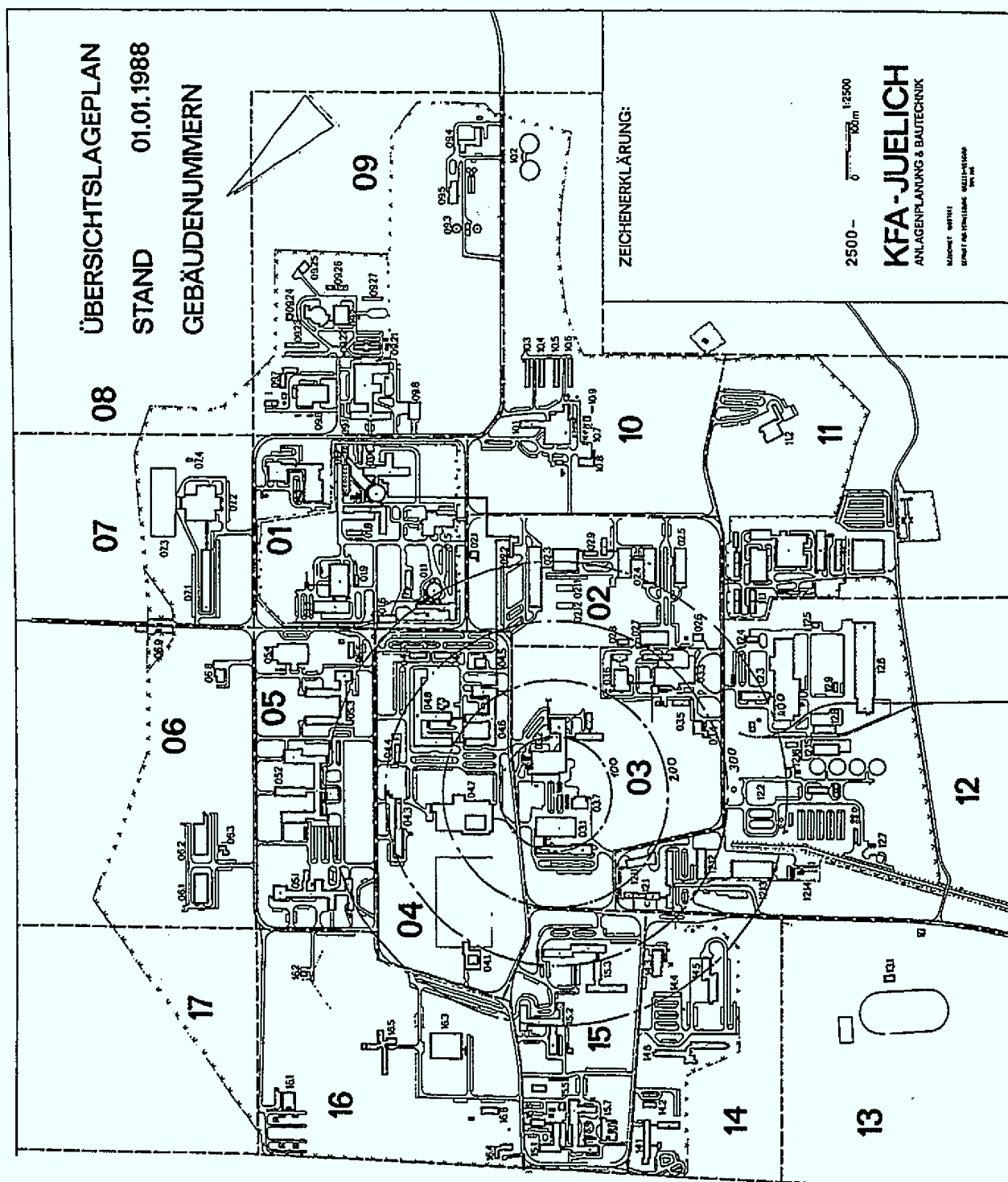


Abb. 5.6.1.3.1-2 KFA-Lageplan mit Entfernungsradien

Für die Ergebnisse ist einschränkend anzumerken, daß die Darstellung von Explosionspotentialen in äquivalenten Mengen TNT in der Literatur nur für die Auswirkungen in großer Entfernung von der Explosion für brauchbar gehalten wird. Für die Auswirkungen in kurzer Distanz zum Explosionsort bestehen erhebliche Unterschiede in Form und maximaler Amplitude der Impulsfunktion zwischen TNT und Brenngas-/Luft-Gemischen. Obwohl somit das TNT-Vergleichskonzept grundsätzlich Mängel aufweist, wird es nach wie vor benutzt, bis nichtideale Explosionen, wie sie bei Brenngasen vorliegen, durch entsprechende Kenngrößen charakterisiert werden können /Dechema/.

5.6.1.3.2 Begrenzte Energiefreisetzung

In diesem Kapitel sollen die möglichen Folgen einer Wasserstoff-freisetzung aus nur einem der 18 Speicherbehälter als Folge eines Behälterzerknalls betrachtet werden.

Dieser Fall ist dann relevant, wenn keine weiteren Behälter bzw. keine Anschlußleitungen in Folge des Behälterzerknalls zerstört werden. Es ist zu erwarten, daß das relativ langsame Nachströmen von Wasserstoff aus den intakten Behältern über die Anschlußleitung des zerstörten Behälters ($\phi_i = 21$ mm; Zeitdauer etwa 11 min.) zu keinen weiteren, gleichwertigen Explosionsereignissen führt.

Eine Begrenzung der an der Explosion beteiligten Wasserstoffmenge dürfte auch für die meisten Wetterlagen den realistischen Fall darstellen.

Im folgenden wird die Freisetzung und vollständige Reaktion von 15 kg H_2 ($\approx$ Behälterinhalt) betrachtet. Hieraus errechnet sich eine größtmögliche Energiefreisetzung von 1,896 GJ, mit einem TNT-Äquivalent von 419,5 kg (4520 KJ = 1 kg TNT-Äquivalent). Die gespeicherte Druckenergie des Behälters beträgt 0,035 GJ.

Die Energiefreisetzung liegt damit etwas über dem für das Los Angeles-Ereignis angegebenen Wert von 0,3 t.

Die Ereignisvarianten mit Folgeschäden und begrenzten Energiefreisetzungsanteilen (<25 %) sind in der Ereignisablaufanalyse im folgenden Kapitel 5.6.1.4 behandelt.

5.6.1.4 Ereignisablaufanalysen

Die oben ermittelten Schadensradien für die PHOEBUS-Anlage gelten für die größtmöglichen Energiefreisetzung stöchiometrischer Gemischzündungen (29 % H_2 in Luft).

Für die Ermittlung realistischerer Ereignisabläufe wird eine Begrenzung der an der Explosion beteiligten Wasserstoffmenge selbst für Inversions-Wetterlagen, die ein schnelles Aufsteigen des freigesetzten Wasserstoffs behindern, für erforderlich gehalten.

Eine Auflistung von 113 Gasunfällen in /Lenoir/ enthält für einen kleinen Teil der Unfälle (19) auch Angaben zu den freigesetzten Energieanteilen und zum TNT-Äquivalent.

Der maximal ausgewiesene Energiefreisetzungsanteil betrug 18 % für einen 1974 in den USA aufgetretenen Schienentransportunfall mit 69 t Isobutan. Bei einem Raffinerie-Unfall 1967 in den USA zündeten etwa 10 % des 10 t TNT-Äquivalents von 9 t Isobutylen. Die übrigen Werte liegen bei einigen Prozent bzw. Zehntelprozent. Zu den wenigen H_2 -Unfällen gibt es drei Freisetzungsangaben und zwar über zwei, einem und weniger als einem Prozent.

In /Dechema/ werden Ergebnisse experimenteller und analytischer Untersuchungen zitiert, nach denen sich weniger als 10 % der freigesetzten H_2 -Menge bei einer Explosion zu irgendeinem Zeitpunkt innerhalb der Zündgrenze befinden.

In Anlehnung an diese beiden Quellen werden für die Schadensabläufe der PHOEBUS-Anlage in Abhängigkeit von den drei betrachteten Wetterlagen (Inversion, Austauscharm, Austauschintensiv) bis zu drei Energiefreisetzungsanteile (25 %, 10 %, 1 %) berücksichtigt. Die hierfür in der nachfolgenden Tabelle 5.6.1.4-1 angegebenen Wahrscheinlichkeiten sind grob geschätzt. Hier besteht Forschungsbedarf.

Wettertyp	Energiefreiset- zungsanteil (%)	Bedingte Wahr- scheinlichkeit
Inversion	25	0,1
	10	0,3
	1	0,6
Austauscharm	10	0,1
	1	0,3
Austausch- intensiv	1	0,1

Tab. 5.6.1.4-1: Geschätzte Wahrscheinlichkeiten für
Energiefreisetzungssanteile

In den Ereignisablaufdiagrammen (Abb. 5.1.1.4-1a - d) wird ausgehend vom plötzlichen Versagen (Bersten) eines der 18 H₂-Speicherbehälter (Störfallauslösendes Ereignis: Z) zunächst die unmittelbare Zündung des dabei freigesetzten Wasserstoffs auf Grund der Funkenbildung durch Trümmerstücke des Behälters unterstellt (Ereignis A). Hierbei wird allerdings nach den oben skalierten Energiefreisetzungssanteilen unterschieden, die in den Varianten a - d der Ereignisablaufdiagramme weiter verfolgt werden. Neben der Wetterlage beeinflusst hier die Druckwelle die Ausbreitung der Gaswolke. Andererseits, ist wie das 'Hanau'-Ereignis gezeigt hat, mit einer raschen Zündung zu rechnen.

Daher werden hier, von der Tab. 5.6.1.4-1 abweichend, die bedingten Wahrscheinlichkeiten - unabhängig von der Wetterlage - für das Ereignis A1 (25 %-Freisetzungssanteil) zu 0,1, für A2 (10 %) zu 0,5, für A3 (1 %) zu 0,3 und für A4 (0 %) zu 0,1 abgeschätzt.

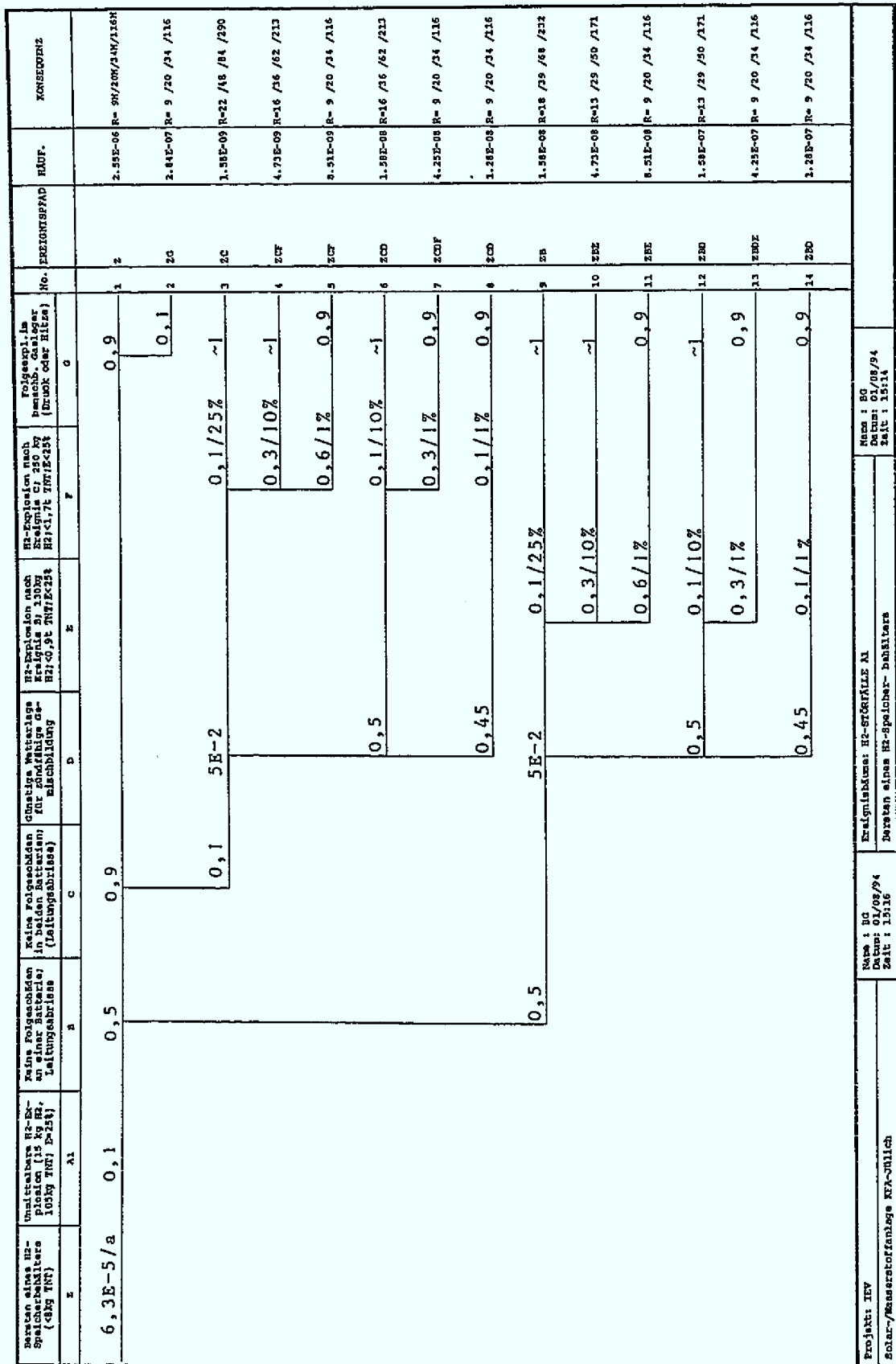


Abb. 5.6.1.4-1a: Ereignisablaufdiagramm 'Bersten eines H₂ Speicherbehälters' (E ≤ 25 %)

Barren eines H ₂ -Speicherbehälters (<8kg H ₂)	Unmittelbare H ₂ -Explosion (10kg H ₂ , 40kg H ₂ P-104)	Keine Folgeschäden an einer Batterie; Leitungsabbrüche	Keine Folgeschäden in beiden Batterien; (Leitungsabbrüche)	Günstige Wetterlage zur zündfähigen Gasbildung	H ₂ -Explosion nach Ereignis E1 10kg H ₂ /0,9t H ₂ /E-25%	H ₂ -Explosion nach Ereignis E1 250 kg H ₂ /4,7t H ₂ /E-25%	Folgespl. in benachb. Gebäuden (max. 100m)	no.	Ereignispaar	BAUF.	KONSEQUENZ
6,3E-5/a	0,5	0,5	0,9	0,1	5E-2	0,1/25%	~1	1	1	1.28E-05	R= 74/144/264/ 82M
							0,1	2	2A	1.42E-06	R= 7 / 14 / 26 / 82
							~1	3	3C	7.50E-09	R=22 /18 /84 /290
							0,3/10%	4	4CF	2.40E-08	R=16 /36 /62 /213
							0,6/1%	5	5CF	4.30E-08	R= 8 /17 /29 / 99
							~1	6	6CD	7.50E-08	R=16 /36 /62 /213
							0,3/1%	7	7CDF	2.10E-07	R= 8 /17 /29 / 99
							0,1/1%	8	8CD	6.40E-08	R= 8 /17 /29 / 99
	0,5	5E-2	0,1/25%	~1	9	9B	~1	9	9B	7.50E-08	R=18 /39 /68 /232
							~1	10	10BE	2.40E-07	R=13 /29 /50 /171
							0,9	11	11BE	4.30E-07	R= 7 /14 /26 / 82
							~1	12	12B	7.50E-07	R=13 /29 /50 /171
							0,9	13	13BE	2.13E-06	R= 7 /14 /26 / 82
							0,1/1%	14	14B	6.40E-07	R= 7 /14 /26 / 82

Projekt: IEV	Nr. : 80	Ereignisabläufe: H ₂ -STÜCKFÄLLE A2	Nr. : 80
Solar-/Wasserstoffanlage NFA-01/11	Datum: 01/08/94	Bersten eines H ₂ -Speicherbehälters	Datum: 01/08/94
	Zeit : 15:31		Zeit : 15:31

Risk spectrum PSA Version 2.01 (C) Copyright NUCON Technik AG, 1990-1994

Abb. 5.6.1.4-1b: Ereignisablaufdiagramm 'Bersten eines H₂ Speicherbehälters' (E ≤10 %)

Unter Ereignis B wird nach Folgeschäden an H_2 -Behältern oder Anschlußleitungen der betroffenen Batterie gefragt. Im Rahmen dieser Analyse werden mit relativ hoher Wahrscheinlichkeit (0,5 bei 25 bzw. 10 % und 0,1 bei nur 1% Energiefreisetzung) Folgeschäden an den Anschlußleitungen unterstellt, so daß der gespeicherte Wasserstoff (≤ 130 kg) innerhalb von nur ca. 30 sec. freigesetzt wird. Dagegen dauert der Ausströmvorgang der zweiten Batterie über die Verbindungsleitung mehr als 5 Minuten. Die Ausbildung einer zweiten zündfähigen Gaswolke wird als wenig wahrscheinlich angesehen. Eher zu erwarten ist das Abfackeln des zweiten Batterieinhalts.

Die Ereignisabfrage C betrachtet mögliche Folgeschäden an beiden Behälterbatterien aufgrund der H_2 -Explosion (A1 - 4) und/oder auf Grund des Behälterzerknalls.

Bei H_2 -Explosionen mit hohen Energiefreisetzungsanteilen (25 bzw. 10 %) werden Folgeschäden obiger Form in beiden Behälterbatterien mit der Wahrscheinlichkeit 0,1 unterstellt; für Energiefreisetzungen von 1 % (12 kg TNT einschließlich 8 kg potentieller Behälterenergie) wird hierfür ein Wert von $1E-2$ angesetzt.

Die Ereignisabfrage D unterscheidet probabilistisch das Vorliegen einer der drei in Tab. 5.6.1.4-1 definierten Wetterlagen am Standort.

Für diese Wetterlagen werden in den nächsten beiden Abfragen (E und F) H_2 -Folgeexplosionen mit unterschiedlichen Energiefreisetzungsanteilen probabilistisch entsprechend der Angaben in Tab. 5.6.1.4-1 berücksichtigt. Die Abfrage E geht dabei vom H_2 -Potential einer und die Abfrage F vom H_2 -Potential beider Batterien aus.

Die letzte Ereignisabfrage G behandelt mögliche Folgeschäden im benachbarten Gaslager, die analog zum 'Hanau'-Ereignis mit hoher Wahrscheinlichkeit zumindest begrenzt unterstellt werden.

Das Spektrum der dort möglichen Auswirkungen reicht vom Abfackeln leckgeschlagener Gasflaschen, großen Brandherden mit Folgeschäden an Gasflaschen bis hin zu weiteren Explosionen.

Das Ausmaß der Folgeschäden sollte durch schnelle, brandbekämpfende Maßnahmen der KFA-Feuerwehr erheblich eingedämmt werden

können. Das vermittelt zumindest der Bericht von G. Reichhardt über den Einsatz der Feuerwehr beim 'Hanau'-Ereignis /VGB/:

Demnach bestand durch den Folgebrand von Acetylenflaschen mit weiteren Behälterzerknallen über mehrere Stunden die Gefahr, daß sich das Schadensereignis ausweiten würde. Durch die Druckwelle der H_2 -Explosion wurde die etwa 2 m vom Explosionsobjekt entfernte Acetylenstation schwer beschädigt. Diese ebenerdige, nach zwei Seiten hin offene Station war zum H_2 -Tank hin mit einer feuerbeständigen Wand abgetrennt. Zum Zeitpunkt der Explosion befanden sich hier 5 Bündel zu je 12 Flaschen Acetylen (50 kg Flaschen). Der Füllungsgrad schwankte zwischen maximalem und minimalem Fülldruck.

Beim Eintreffen der ersten Feuerwehren waren in unmittelbarer Nähe des Explosionsortes ein Folgebrand und starke Abblasgeräusche von Gasflaschen festzustellen, und eine erste Acetylenflasche zerknallte mit anschließender Raumexplosion. Es brannten Acetylgas und Leichtmetall (Halterungen). Durch die Einsatzleitung wurde u.a. die Kühlung der Acetylenflaschen aus der Deckung noch vorhandener Gebäude heraus angeordnet. In der Anfangsphase kam es zu mindestens drei weiteren Zerknallen von Acetylenflaschen. Zwei Flaschen brannten über etwa 10 Stunden aus. Die Flaschenbündel wurden insgesamt 30 Stunden gekühlt.

Durch die Explosion wurden u.a. zwei Gebäude (erdgeschossig, massiv) in einer Entfernung von 16 bzw. 17 m und ein Schuppen (erdgeschossig, massiv) in einer Entfernung von etwa 32 m teilweise zerstört. In diesen Gebäuden waren u.a. ein Sauerstofftank (32400 l, zu 50 % befüllt), Tanks mit etwa 6000 l Salzsäure, 300 l Natronlauge, 3000 l Natriumbisulfid und kleinere Mengen Benzin, Alkohol und andere Flüssigkeiten untergebracht.

In einer Entfernung von 30 m befanden sich oberirdisch zwei Flüssiggastanks mit je 60 m^3 und ein unterirdischer Tank mit 100 m^3 Fassungsvermögen (Füllgrad etwa 50 %).

Die Flüssiggasanlage war unbeschädigt und wurde abgesperrt. Der Sauerstofftank hatte eine leichte Schiefstellung, war aber unbeschädigt. Aus dem 'Salzsäure'-Gebäude trat HCL-Gas aus, das von der Feuerwehr niedergeschlagen werden konnte.

Aus einem etwa 20 m entfernten teilweise total zerstörten Gebäudedekomplex konnten später drei erheblich deformierte aber nicht leckende Behälter mit je 400 l Flußsäure geborgen werden.

Trotz erheblicher Beschädigung des Lagerschuppens kam es an den dort befindlichen Behältern mit kleineren Mengen Benzin, Alkohol und anderen brennbaren Gasen nicht zu Undichtigkeiten.

Die Werksstraßen und Zufahrtsstraßen waren von Glassplittern und kleineren Trümmern bedeckt, jedoch befahrbar.

Aus Sicht des Berichters waren die Explosionsfolgen verheerend. Er regt an, solche Gefahrgut-Konzentrationen zu reduzieren oder so zu lagern, daß ein gleichzeitiges Explodieren der gesamten Masse verhindert wird.

Diese Anregungen, auf die PHOEBUS-Anlage bezogen, könnten für das angrenzende Gasflaschenlager Veränderungen bedeuten. Dabei wirkt die eher unbeabsichtigte Aufteilung der Wasserstoffmenge auf 18 Behälter bereits im Sinne der obigen Anregung.

Bei der Solar-Wasserstoffanlage in Neunburg vorm Wald wird dagegen die Speicherung von bis zu 5000 Nm³ Wasserstoff in zwei großen Druckbehältern mit einem geometrischen Volumen von je 80 m³, das auf 30 bar komprimiert wird, vorgenommen (Abb. 2.1-1). Sie entsprechen größtmäßig etwa dem 'Hanau'-Behälter. Allerdings liegt die Anlage abgelegen, und es gibt in der Nähe keine weiteren Gefährdungspotentiale.

5.6.1.5 Störfallbewertung

Die Ergebnisse der Ereignisablaufanalysen in Kapitel 5.6.1.4 lassen sich zu 4 Gruppen mit jeweils etwa gleichen Konsequenzen (Schadensradien) zusammenfassen. Die im Ereignisablaufdiagramm 'Bersten eines Speicherbehälters' (Abb. 5.6.1.4-1a - d) angegebenen Schadensradien gelten für vier ausgewählte Druckgrenzwerte (2; 0,4; 0,17 und 0,03 bar) der Tabelle 5.1.3-1.

Der unter 'Konsequenzen' aufgeführte erste Wert gibt an, in welcher Entfernung vom Explosionsort noch ein Spitzenüberdruck von 2 bar zu erwarten ist, mit tödlichen Folgen für dort befindliche Personen. Der zweite Entfernungswert gilt für einen Spitzenüberdruck von 0,4 bar, der über einstürzende Gebäude zu sekundären

Gesundheitsschäden mit einigen Todesfällen führt. Der dritte Wert von 0,17 bar führt über einstürzende Mauern und herabfallende Objekte ebenfalls zu sekundären Gesundheitsschäden mit einer geringeren Tötungswahrscheinlichkeit. Der letzte Wert markiert die Reichweite für einen Überdruck von 0,03 bar. Bis hierhin ist mit Fensterbruch und durch Scherbenwirkung vereinzelt mit tödlichen Verletzungen zu rechnen. Die folgende Tabelle 5.6.1.5-1 veranschaulicht noch einmal den Zusammenhang zwischen den Angaben im Ereignisablaudiagramm und den zu erwartenden Gesundheitsschäden.

Reichweiten in Abb.5.6.1.4-1a - d	Schäden vom Typ (i)	Druckgrenzwert (bar)
1. Wert	I) Tödliche Verletzungen durch Primäre Gesundheitsschäden	2
2. Wert	II) Einsturz von Gebäuden; einige Todesfälle durch sekundäre Gesundheitsschäden	0,4
3. Wert	III) Einsturz von Mauern, herabfallen von Objekten; begrenzte Tötungswahrscheinlichkeit	0,17
4. Wert	IV) Fensterbruch; vereinzelt tödliche Verletzungen durch Scherbenwirkung	0,03

Tab. 5.6.1.5-1: Grenzwerte für gesundheitliche und materielle Schäden durch Druckwellen

Die Ereignispfade in Abb. 5.6.4-1a - d lassen sich zu vier Ereignisgruppen mit etwa ähnlichen Konsequenzen zusammenfassen. Die Ergebnistabelle 5.6.1.5-2 enthält die zu jeder Gruppe gehörenden Ereignispfade und deren Häufigkeit. Die rechte Spalte weist die Summenhäufigkeit der Ereignisgruppe aus.

Die Auswirkungen der ersten Gruppe mit der größten Häufigkeit (2,26E-5/a) bleiben praktisch auf den unmittelbaren Explosionsort beschränkt, da von 15 kg Wasserstoff lediglich 1% beteiligt sind und nur ein TNT-Äquivalent von lediglich 4 kg freigesetzt wird. Auch die gespeicherte Druckenergie des Behälters ist mit einem TNT-Äquivalent von etwa 8 kg entsprechend niedrig.

EREIGNISPFADNAME/ HÄUFIGKEIT (1/a)		REICHWEITEN DER SCHÄDEN VOM TYP: I, II, III, IV		EREIGNISPFAD- SUMMENHÄUFIG- KEIT (1/a)	
Gruppe 1, 12 kg TNT-Äquivalent:				2,26E-5	
A4-Z	5,61-8	A4-ZG	5,61-6	3, 8, 14,	48m
A3-Z	1,68-7	A3-ZG	1,68-5	4, 9, 16,	55
Gruppe 2, 40 - 105 kg TNT-Äquivalent:				1,83E-5	
A3-ZBE	5,10-8	A4-ZBE	1,70-8	6, 13, 23,	79m
ZBDE	2,55-7	ZBDE	8,51-8		
ZBD	8,51-8	ZBD	2,55-8		
A2-Z	1,28-5	A2-ZBE	4,30-7	7, 14, 26,	82
ZG	1,42-6	ZBDE	2,13-6		
		ZBD	6,40-7		
A2-ZCF	4,30-8	A3-ZCF	4,59-9	8, 17, 29,	99
ZCDF	2,10-7	ZCDF	2,30-8		
ZCD	6,40-8	ZCD	6,89-9		
A4-ZCF	1,52-9	A4-ZCD	2,27-9		
ZCDF	7,58-9				
A1-Z	2,55-6	A1-ZCD	1,28-8	9, 20, 34,	116
ZG	2,84-7	ZBE	4,73-8		
ZCF	8,51-9	ZBDE	4,25-7		
ZCDF	4,25-8	ZBD	1,28-7		
Gruppe 3, 360 - 900 kg TNT-Äquivalent:				1,645E-6	
A1-ZBE	4,73-8	A3-ZBE	2,84-8	13, 29, 50,	171m
ZBD	1,58-7	ZBD	9,45-8		
A2-ZBE	2,40-7	A4-ZBE	9,45-9		
ZBD	7,90-7	ZBD	3,15-8		
A1-ZCF	4,73-9	A3-ZCF	2,55-9	16, 36, 62,	213
ZCD	1,58-8	ZCD	8,51-9		
A2-ZCF	2,40-8	A4-ZCF	8,42-10		
ZCD	7,90-8	ZCD	2,81-9		
A1-ZB	1,58-8	A3-ZB	9,45-9	18, 39, 68,	232
A2-ZB	7,90-8	A4-ZB	3,15-9		
Gruppe 4, 1,7 t TNT-Äquivalent:				1,06E-8	
A1-ZC	1,58-9	A3-ZC	8,51-10	22, 48, 84,	290m
A2-ZC	7,90-9	A4-ZC	2,81-10		

Tab.5.6.1.5-2: Ergebnisse der Ereignisablaufanalysen hinsichtlich Häufigkeiten und Konsequenzen

Der dominierende Ereignispfad A3-ZG bestimmt zu 75 % das Ergebnis. Folgeschäden sowohl an weiteren Speicherbehältern als auch im angrenzenden Gaslager sind unwahrscheinlich. Abgesehen von Fensterbrüchen werden Gebäudeschäden auch an den nächstgelegenen Objekten (IEV-Halle) nicht erwartet.

Nur für in unmittelbarer Nähe des Explosionsortes befindliche Personen besteht Lebensgefahr.

In der zweiten Gruppe trägt der Ereignispfad A2-Z mit 70 % zur Summenhäufigkeit von $1,83E-5/a$ bei. Nach Bersten des Behälters werden hier 10 % der maximal möglichen Energie und zwar 40 kg TNT-Äquivalent freigesetzt. Folgeschäden in der betroffenen Batterie werden mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,5 (Schätzwert), nicht erwartet. Im Gaslager werden allerdings konservativ ($P=0,9$) begrenzte Folgeschäden durch Hitzeeinwirkung unterstellt und zwar in Form von Zerknallen einzelner Gasflaschen oder Undichtigkeiten mit Abfackeln der entweichenden Gase.

Auch hier bleiben die Auswirkungen, wie ein Blick auf die Schadensradialen der Tab. 5.6.1.5-2 und auf die Entfernungsradien in Abb. 5.6.1.5-1 zeigt, sehr begrenzt.

Gebäudeschäden in Form einstürzender Mauern und herabfallender Objekte sind im Gaslager und eventuell im Frontbereich der IEV-Halle zu erwarten. Hiervon geht eine zusätzliche Personengefährdung aus.

In der dritten Gruppe haben die Ereignispfade A2-ZBD (48%), A2-ZBE (14,6%) und A1-ZBD (9,6%) zusammen einen Anteil von 72 % an der Summenhäufigkeit von $1,65E-6/a$.

Der Pfad A2-ZBD beinhaltet Folgeschäden an Behälter-Anschlußleitungen der betroffenen Batterie durch die Energiefreisetzung von 40 kg TNT-Äquivalent.

Nach Abriß der Leitungen treten an den Leckstellen Rückstoßkräfte von anfangs etwa 2000 N auf, die nach etwa 4 Sekunden auf die Hälfte zurückgehen (Kap. 6).

Die Behälter liegen in zwei Gestellen, leicht nach hinten geneigt, lose auf jeweils zwei Ringsegmenten und weisen - entlang der Rückseite des nahen Gaslagers - in Richtung Hauptwerkstatt.

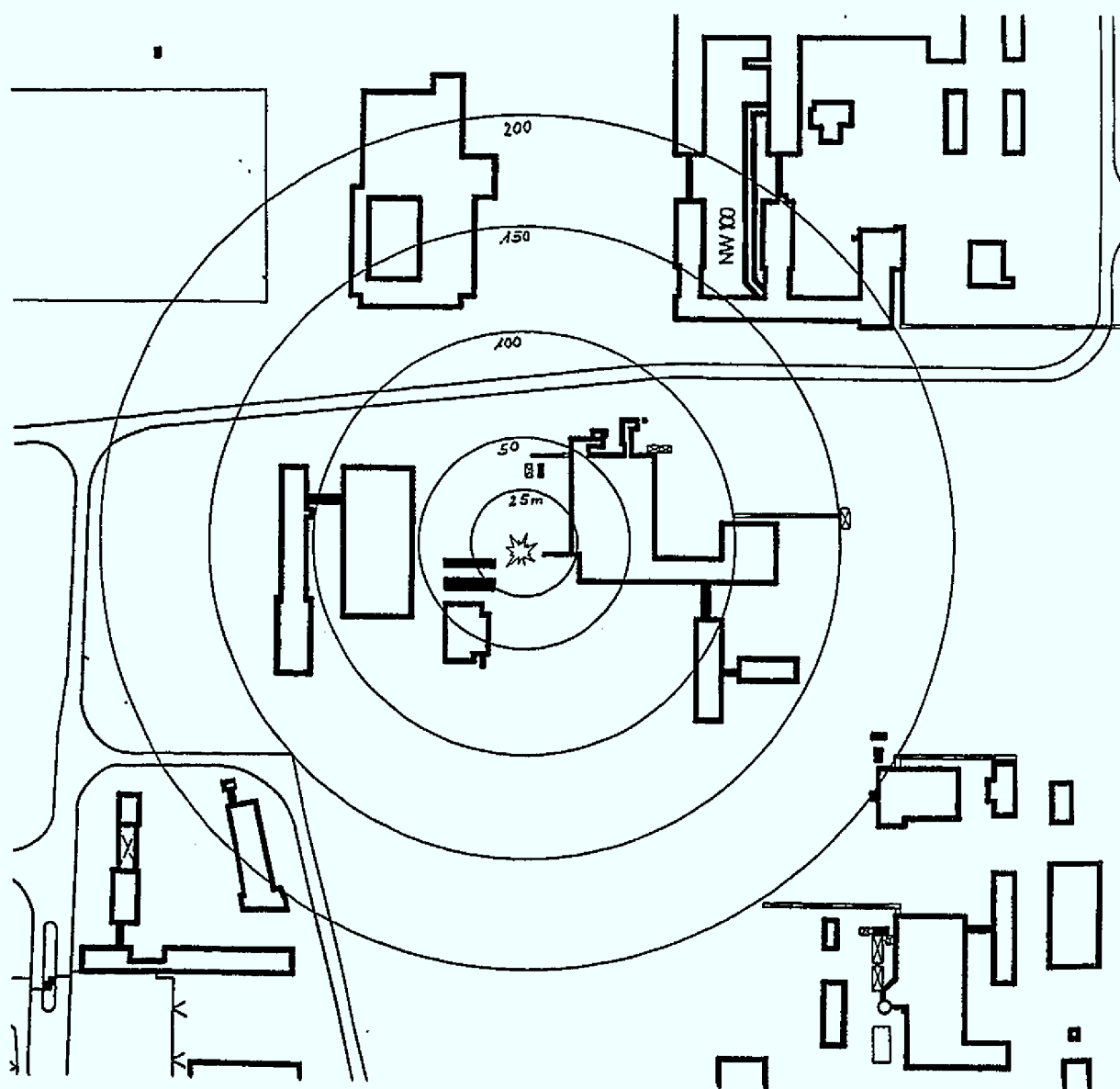


Abb. 5.6.1.5-1: Ausschnitt aus KFA-Lageplan mit Explosionsort und Entfernungsradien

Unter Berücksichtigung der Gleit- bzw. Haftreibung von Stahl auf Stahl liegen die Gleit- bzw. Haftreibungskräfte ($\mu=0,1$; $\mu_0=0,15$) bei den 'schweren' Behältern (2,5 t) oberhalb der Rückstoßkräfte und bei den 'leichten' (1,2 t) in der ersten Phase (>4 s) darunter. Bei den 'leichten' Behältern ist mit einer geringen Verlagerung in Richtung Gaslager zu rechnen. Für die Hauptwerkstatt besteht keine Gefahr. Zusätzliche Schubkräfte, die bei Zündung des austretenden Gases auftreten könnten, wurden nicht berücksichtigt. Es wird vielmehr erwartet, daß sich die freiwerdende Energie wegen des fehlenden Brennkammereffektes im Raum rasch verteilt und dadurch keine nennenswerten Schubkräfte entstehen.

Das Inventar von 130 kg H_2 der betroffenen 'leichten' Behälter strömt über die defekten Anschlußleitungen innerhalb von ca. 30 Sekunden in die Umgebung. Hiervon werden unter den hier betrachteten 'normalen' Witterungsverhältnissen 10 % als an der Zündung der Gaswolke beteiligt angesetzt. Dieser Anteil bewirkt eine Energiefreisetzung von 360 kg TNT-Äquivalent und ruft Folgeschäden in der zweiten Batterie hervor, so daß zeitlich versetzt eine weitere Gaswolke mit maximal dem gleichen Energieinhalt entstehen kann.

Im Gaslager treten Folgeschäden durch Druck- und Hitzeeinwirkung mit hoher Wahrscheinlichkeit ($P=1$) auf. Mit dem Einsturz der IEV-Halle ist zu rechnen. Der zugehörige Überdruck von 0,4 bar reicht bis etwa 35 m. Eine Reflexion der Druckwelle an Gebäuden ist hierin nicht berücksichtigt. Entsprechende Betrachtungen hierzu werden in Kapitel 6 vorgenommen. Mit Reflexion erhöhen sich die Druckwerte etwa um den Faktor 2.

Mauereinstürze treten im Bereich der nahegelegenen Hauptwerkstatt (≈ 50 m vom Explosionsort) und in Außenbereichen des IEV auf. Eine Gefährdung durch Fensterbrüche besteht im gesamten Bereich der ZB, Teilen des IFF, der Feuerwehr und am Gebäude 3.6. Für die Tankstelle besteht keine Gefährdung.

Die Wahrscheinlichkeit der Energiefreisetzung von 10 % ist mit 0,1 im Ereignispfad A2-ZBD ('normaler' Witterung) vermutlich überschätzt. Dies gilt auch für die Annahme, daß in 50 % der Fälle als Folge der Energiefreisetzung von 40 kg TNT-Äquivalent

alle Behälter-Anschlußleitungen in der betroffenen Batterie abreißen.

Trotz dieser vermutlich konservativen Abschätzungen ist das Risiko der Ereignisgruppe 3 bei einer Summenhäufigkeit von $1,65E-6/a$ und einem relativ kleinen Gefährdungsbereich als niedrig einzustufen und stellt angesichts des bestehenden Gaslagers keine grundsätzliche neue Gefährdungsqualität dar.

In der Gruppe 4 ($1,06E-8/a$) kommen Ereignispfade mit einer maximalen Energiefreisetzung aus beiden Batterien zum Tragen. Mit einem Anteil von knapp 75 % dominiert der Pfad A2-ZC deutlich. Bei diesem Pfad werden nach einer ersten Energiefreisetzung von 40 kg TNT-Äquivalent in beiden Batterien die Anschlußleitungen versagen. Es wird angenommen, daß bei sehr günstigen Wetterbedingungen maximal 25 % der freigesetzten 250 kg Wasserstoff an der folgenden Explosion beteiligt sind, die eine Energiefreisetzung von 1,7 t TNT-Äquivalent bewirken.

Mit der Wahrscheinlichkeit 1 werden Folgeschäden im Gaslager (Zerknalle von Gasflaschen) erwartet. Die IEV-Halle, eventuell ein Teil der Hauptwerkstatt und ein angrenzendes kleines Gebäude (3.6) stürzen ein. Schwere Gebäudeschäden sind in einem Umkreis von knapp 100 m zu erwarten. Eine Gefährdung durch Fensterbruch besteht in einem Radius bis zu 300 m.

Insgesamt liefert diese Ereignisgruppe auf grund ihrer extrem niedrigen Häufigkeit ($1,06E-8/a$) einen vernachlässigbaren Risikobeitrag aus der Wasserstoffspeicherung.

Aus Sicht der probabilistischen Sicherheitsanalyse weist das Speicherkonzept keine Schwachstellen auf. Die Aufteilung des Wasserstoffs auf 2 Batterien mit insgesamt 18 Behältern ist im Sinne einer Verteilung des Gefährdungspotentials positiv. Durch relativ dicke Anschlußleitungen ($\phi_a=25$ mm) geht dieser Effekt bei Folgeschäden aber teilweise wieder verloren.

5.6.2 Bersten des Wasserstoff-Zwischenspeichers

Der im Elektrolyseur produzierte Wasserstoff wird außerhalb der Halle in einem Zwischenspeicher gesammelt, bevor er mit Hilfe der Verdichterstation in die 18 Speicherbehälter gepumpt wird (Abb. 1.5.-3). Als Zwischenspeicher ist ein ehemaliger Heliumbehälter der ADAM/EVA-Anlage (Nr. 2866-07, Baujahr 1974) vorgesehen. Eine genaue Beschreibung des Behälters findet sich in Kapitel 4.3.3.1. Der Behälter hat ein Volumen von 25 m^3 und wird mit maximal 7 bar (Druckniveau des Elektrolyseprozesses) beaufschlagt. Ist dieser Druck bei einem Inhalt von etwa 160 Nm^3 Wasserstoff erreicht, muß der Abpumpvorgang mit der Verdichterstation zu den Speicherbehältern einsetzen, bis der Zwischenspeicher wieder leer ist.

Für das Behälterversagen (Bersten) wird der in Kapitel 5.6.1.1 abgeleitete Wert von $3,5\text{E}-6/\text{Behälterjahr}$ zugrundegelegt.

Der Zwischenspeicher wird zyklisch betrieben. Der Auffüllvorgang dauert bei einer maximalem Wasserstoff-Produktion von $6,5 \text{ Nm}^3/\text{h}$ mindestens einen Tag. In der Regel soll der Zwischenspeicher nachts abgepumpt werden. Für die Freisetzung der maximal gespeicherten Menge müßte das Berstereignis gegen Ende eines Auffüllvorganges eintreten. Aus Gründen der Vereinfachung wird der Behälter im zeitlichen Mittel als halbvoll angesetzt. Die freigesetzte Wasserstoffmenge liegt dann bei etwa $80 - 90 \text{ Nm}^3$ ($6,7 - 7,5 \text{ kg}$). Dies führt bei stöchiometrischer Verbrennung in Luft zu einer größtmöglichen Energiefreisetzung von etwa $180 \text{ kg TNT-Äquivalent}$.

Wie in Kapitel 5.6.1.4 ausgeführt, sind Energiefreisetzungsanteile von weniger als 25 % zu erwarten. Das TNT-Äquivalent reduziert sich mit den in Tabelle 5.6.1.4-1 angesetzten Energiefreisetzungsanteilen von 25, 10, bzw 1% auf 45, 18 bzw. knapp 2 kg. Wegen des niedrigen Betriebsdruckes ist die gespeicherte Druckenergie mit ca. 3 kg TNT-Äquivalent gering.

Für die beiden oberen Energiemengen (45 bzw. $18 \text{ kg TNT-Äquivalent}$) sind Folgeschäden an den Speicherbehältern (Abriß von Anschlußleitungen) analog zu entsprechenden Sequenzen im Ereignisablaufdiagramm der Abb.5.6.1.4-1 (a - d) denkbar, da Zwi-

schenspeicher und Speicherbehälter unmittelbar nebeneinander angeordnet sind. Die Sequenzwahrscheinlichkeiten sind allerdings aufgrund der um den Faktor 20 geringeren Eintrittshäufigkeit (hierfür maßgebend ist das Behälterverhältnis von 1 : 18) entsprechend seltener. Außerdem liegt die maximale Speichermenge etwa um den Faktor 8 unter der eines in Kapitel 5.6.1 betrachteten Speicherbehälters.

Das Bersten des Zwischenbehälters ist daher sowohl hinsichtlich der Eintrittshäufigkeit als auch des Schadensausmaßes durch vergleichbare Sequenzen nach Bersten eines Hochdruck-Speicherbehälters (Kapitel 5.6.1) abgedeckt.

5.6.3 Behälterlecks, Versagen von Anschlußleitungen und Überdrucksicherungen

Der Abriß einer H₂-Speicherbehälter-Anschlußleitung ($\phi_1 = 21\text{mm}$) hat bei einer anfänglichen Ausströmrates von etwa $23 \text{ Nm}^3/\text{s}$ die Entleerung aller 18 Behälter in ca. 11 min zur Folge (Kap. 6).

Die Behälter sind drucküberwacht und können einzeln von Hand vor Ort abgesperrt werden. Diese Möglichkeit wird im Rahmen der Analyse nicht berücksichtigt, da zum einen zur wirkungsvollen Begrenzung der Freisetzungsmenge wenig Zeit zur Verfügung steht und zum anderen die Maßnahmen vor Ort mit hohem Risiko verbunden sind, wobei aufgrund der Ausströmdauer aber nicht mit der Bildung einer nennenswert zündfähigen Gaswolke gerechnet wird, sondern mit einem Abfackeln des ausströmenden Wasserstoffs.

Als Schadensursachen für das Ausgangsereignis sind zum einen Einwirkungen von außen (Beschädigungen durch Transportvorgänge, Unachtsamkeiten, Fehlverhalten), zum anderen Materialversagen z.B. durch Hitzeeinwirkung infolge Abfackeln kleinster H₂-Lecks oder ein zufälliges Versagen im Bereich der Verbindungen (Klemmverbindungen) denkbar. Die Ableitung einer statistisch zu belegenden Versagenhäufigkeit ist für die konkreten Verhältnisse nicht möglich.

Bei analoger Vorgehensweise wie zur Bestimmung der Leckhäufigkeit von Leitungen in der Halle ergibt sich für die 18 Anschlußleitungen einschließlich der Sammelleitung bei etwa 30 infrage

kommenden Quetschverbindungen eine Versagenshäufigkeit von $3E-3$ pro Jahr ($1E-4$ /Verbindung).

Dieser Wert ist noch zu verknüpfen mit der Wahrscheinlichkeit für eine diese unkorrekt ausgeführte Verbindung lösende Einwirkung (z.B. Erschütterungen). Fehler, die die Verbindung direkt beeinträchtigen, werden bei der Druckprüfung in der Inbetriebnahmephase entdeckt. Da keine Erfahrungen vorliegen, wird eine solche Einwirkung konservativ mit der Wahrscheinlichkeit 1 unterstellt.

Ein Abfackeln des Wasserstoffs kann bei ungünstiger Ausrichtung des Flammenstrahls benachbarte Anschlußleitungen in ihrer Integrität gefährden; dadurch können weitere Leckorte entstehen. Im ungünstigsten Fall kann der Flammenstrahl auf einen Behälter treffen. Ob dann in relativ kurzer Zeit ein Folgeschaden auftritt, läßt sich im Rahmen dieser Arbeit nicht klären; eine zündfähige Gaswolke nennenswerter Größe ist nämlich nur bei einem schnellen Behälterversagen (innerhalb weniger Minuten) zu erwarten, da sich das Speicherinventar über das Anfangsleck rasch abbaut.

Angesichts der erheblichen Unsicherheiten über den Störfallablauf (Eintritt und Ausmaß von Folgeschäden) ist die weitere Behandlung des Störfalls im Rahmen dieser Arbeit nicht sinnvoll.

Größere Leckraten können ansonsten nur durch Behälterlecks z.B. im Bereich der beiden eingeschweißten Stopfen (ein Blindstopfen, der zweite nimmt die Anschlußleitung auf) bzw. durch das Versagen der zugehörigen Einsatzstücke hervorgerufen werden, was probabilistisch eher im Bereich des Behälterversagens anzusiedeln ist. Solche großen Leckagen werden vom Ereignis 'Behälterzerknall' als mitabgedeckt angesehen.

Bezüglich der Leckagemöglichkeiten über Sicherheitsventile weist die Komponentenliste (Tab. 5.6.3-1) ein federbelastetes Sicherheitsventil (SV-105) mit einem Ansprechdruck von 150 bar (Abblaseleistung $10 \text{ m}^3/\text{h}$) aus. Es befindet sich in der Sammelleitung vor dem Abzweig zu den einzelnen Behältern (Abb. 1.5-3). Wegen des kommunizierenden Systems wird diese Lösung für ausreichend angesehen.

Baukomponenten des Gaspfades der Demonstrationsanlage
PHOEBUS-Jülich
(Gaspfad, Bereich 100)

Bezeichnung	Bauteil, Abmaße	Medium	Bemerkung
V - 101	Membranventil, Ø 12 mm	H ₂	pneumat. Antrieb
V - 102	Membranventil, Ø 12 mm	O ₂	pneumat. Antrieb
V - 103.1	Membranventil, Ø 12 mm	H ₂	pneumat. Antrieb
V - 103.2	Membranventil, Ø 12 mm	H ₂	pneumat. Antrieb
V - 104.1	Membranventil, Ø 12 mm	O ₂	pneumat. Antrieb
V - 104.2	Membranventil, Ø 12 mm	O ₂	pneumat. Antrieb
V - 105	Membranventil, Ø 10 mm, HD	H ₂	pneumat. Antrieb
V - 106	Membranventil, Ø 10 mm, HD	O ₂	pneumat. Antrieb
V - 107	Membranventil, Ø 12 mm	H ₂	pneumat. Antrieb
V - 108	Membranventil, Ø 12 mm	O ₂	pneumat. Antrieb
V - 109	Membranventil, Ø 10 mm, HD	H ₂	pneumat. Antrieb
V - 110	Membranventil, Ø 10 mm, HD	O ₂	pneumat. Antrieb
V - 111	Membranventil, Ø 8 mm, HD	H ₂	pneumat. Antrieb
V - 112	Membranventil, Ø 8 mm, HD	O ₂	pneumat. Antrieb
HV - 101	Handventil, Ø 25 mm, Faltenbalgventil	H ₂	
HV - 102	Handventil, Ø 25 mm, Faltenbalgventil	O ₂	
HV - 103	Handventil, Ø 25 mm, Kugelhahn	H ₂	

HV - 104	Handventil, Ø 25 mm, Kugelhahn	O ₂	
HV - 105	Handventil, Ø 25 mm, Kugelhahn	H ₂	
HV - 108	Handventil, Ø 25 mm, Kugelhahn	O ₂	
HV - 111	Handventil, Ø 10 mm, Kugelhahn	H ₂	zur Entlüftung
HV - 112	Handventil, Ø 10 mm, Kugelhahn	O ₂	zur Entlüftung
HV - 113→ HV - 122	Handventil, Ø 25 mm, Kugelhahn	H ₂	auf der Vorderseite der Hochdruckbehälter angebracht
HV - 123→ HV - 136	Handventil, Ø 25 mm, Kugelhahn	H ₂	auf der Rückseite der Hochdruckbehälter angebracht
HV - 137→ HV - 144	Handventil, Ø 25 mm, Kugelhahn	H ₂	noch nicht in die Anlage eingebunden
HV - 145→ HV - 152	Handventil, Ø 25 mm, Kugelhahn	H ₂	noch nicht in die Anlage eingebunden
HV - 153	Handventil, Ø 25 mm, Kugelhahn	O ₂	
VR - 101	Rückschlagventil, Ø 12 mm	H ₂	
VR - 102	Rückschlagventil, Ø 16 mm	O ₂	
VR - 103	Rückschlagventil, Ø 12 mm	H ₂	
VR - 104	Rückschlagventil, Ø 12 mm	O ₂	
VR - 105	Rückschlagventil, Ø 12 mm, HD	H ₂	
VR - 106	Rückschlagventil, Ø 12 mm, HD	O ₂	
SV - 101	Sicherheitsventil 8 bar (LESER)	H ₂	
SV - 102	Sicherheitsventil 8 bar (LESER)	O ₂	

Tab. 5.6.3-1: Komponentenliste (Gaspfad, Bereich 100)

PIR - 102	Drucksensor, 0 - 149 bar	H ₂	
PIR - 103	Drucksensor, 0 - 6 bar	O ₂	
PIR - 104	Drucksensor, 0 - 10 bar	O ₂	
PIR - 105	Drucksensor, 0 - 69 bar	O ₂	
TIR - 100	Temperatursensor, -50°C - 100°C	H ₂	
TIR - 101	Temperatursensor, -50°C - 100°C	H ₂	
TIR - 102.1	Temperatursensor, -50°C - 100°C	H ₂	
TIR - 102.2	Temperatursensor, -50°C - 100°C	H ₂	
TIR - 103	Temperatursensor, -20°C - 100°C	O ₂	
TIR - 104	Temperatursensor, -20°C - 100°C	O ₂	
TIR - 105.1	Temperatursensor, -20°C - 100°C	O ₂	
TIR - 105.2	Temperatursensor, -20°C - 100°C	O ₂	

SV - 103	Sicherheitsventil 150 bar (LESER)	H ₂	
SV - 104	Sicherheitsventil 71 bar (SEMPELL)	O ₂	
SV - 105	Sicherheitsventil 150 bar (SEMPELL)	H ₂	
SV - 106	Sicherheitsventil 71 bar (SEMPELL)	O ₂	
SV - 107	Sicherheitsventil 9 bar (LESER)	H ₂	
SV - 108	Sicherheitsventil 9 bar (LESER)	O ₂	
DM - 101	Druckminderer 150 bar - 7 bar	H ₂	
DM - 102	Druckminderer 71 bar - 7 bar	O ₂	
F - 101	Filterelement, Ø 8 mm	H ₂	zur Filterung von Feststoffverunreinigungen
F - 102	Filterelement, Ø 8 mm	O ₂	zur Filterung von Feststoffverunreinigungen
F - 103	Filterelement, Ø 8 mm	H ₂	zur Filterung von Feststoffverunreinigungen
F - 104	Filterelement, Ø 8 mm	O ₂	zur Filterung von Feststoffverunreinigungen
FIR - 100	Durchflußmesser, 0 - 8 Nm³/h	H ₂	
FIR - 101	Durchflußmesser, 0 - 8 Nm³/h	O ₂	
FIR - 102	Durchflußmesser, 0 - 8 Nm³/h	H ₂	
FIR - 103	Durchflußmesser, 0 - 4 Nm³/h	O ₂	
FIR - 104	Durchflußmesser, 0 - 8 Nm³/h	H ₂	
PIR - 100	Drucksensor, 0 - 6 bar	H ₂	
PIR - 101	Drucksensor, 0 - 10 bar	H ₂	

Fortsetzung Tab. 5.6.3-1

Angeichts der geringen Abblaseleistung und der Ventilposition hat ein vorzeitiges Ansprechen und Versagen des Ventils in Offenstellung keine Risikorelevanz. Bei einem Abfackeln des austretenden Wasserstoffs ist nicht mit Folgeschäden an Leitungen oder an Behältern zu rechnen. Das Ereignis ist vernachlässigbar.

5.6.4 Verdichter-Leckage

Die Produktgase H_2 und O_2 werden vor der Speicherung mittels Druckwandler (pneumatisch arbeitendes, indirektes System) hochverdichtet. Verdichtet wird primär Preßluft; über ein Differentialkolbensystem wird der erzeugte Druck übertragen. Druckwandler passen sich sehr gut dem Gegendruck an.

Mit Hilfe dieser Verdichterstation wird der im Zwischenspeicher mit etwa 7 bar anfallende Wasserstoff in die Speicherbehälter gefördert und auf maximal 150 bar verdichtet. Die Station arbeitet im Zyklusbetrieb und wird über die Drücke im Zwischenspeicher (min./max.) ein- und ausgeschaltet.

Die hier interessierende Versagensart ist eine Verdichterleckage nach außen. Für Druckwandler liegen keine Ausfalldaten vor. Die Zuverlässigkeitskenngrößenermittlung im Kernkraftwerk Biblis /GRS2/ weist für Membranverdichter eine Versagensrate von $28E-6/h$ (bezogen auf Kalenderzeit) und von $79E-6/h$ (bezogen auf tatsächliche Betriebszeit) aus. Bei einer angenommenen Betriebszeit von 500 h im Jahr und Übertragung des obigen Betriebszeitwertes ergibt sich eine Wahrscheinlichkeit von etwa $4E-2$ für ein Leck im Verdichter, das zur Freisetzung von Wasserstoff in die Umgebung führt. Da der Durchsatz etwa der Wasserstoffproduktionsrate von maximal $7 \text{ Nm}^3/h$ entspricht, spielt ein solches Leck hinsichtlich der Bildung zündfähiger Gemische keine Rolle.

Störfallsequenzen mit Rückströmung aus den Hochdruckspeichern sind angesichts der Rückschlagsicherungen und Absperrarmaturen vernachlässigbar selten.

5.6.5 EVA-Ereignisse

In diesem Kapitel wird die Bedeutung von EVA-Ereignissen (Einwirkungen von außen) für das Risiko der PHOEBUS-Anlage untersucht. Zu diesen EVA-Ereignissen zählen:

- Erdbeben
- Flugzeugabsturz
- Überschwemmung
- Druckwelle
- Brand
- Blitzschlag.

Überschwemmungen in einem die Anlagensicherheit gefährdenden Ausmaß sind für die hiesige Region auszuschließen.

Druckwellen mit Gefahr für die PHOEBUS-Anlage können durch Unfälle im in unmittelbarer Nachbarschaft gelegenen Gasflaschenlager verursacht werden (z.B. Folgeschäden an Anschlußleitungen der Speicherbehälter). Die Tankstelle ist aufgrund der größeren Distanz (ca. 250 m) weit weniger zu beachten. Explosionsquellen in der Nähe der KFA sind nicht zuletzt wegen des abseits gelegenen Standortes und damit von Verkehrswegen mit Gefahrguttransporten nicht erkennbar.

Diese vom Standort abhängigen Druckwellenereignisse sind vermeidbar. Um eine Aussage über die Zuverlässigkeit des Anlagentyps zu erhalten, werden in die Bewertung die vermeidbaren EVA-Ereignisse nicht einbezogen.

Dies gilt auch für das EVA-Ereignis 'Brand', deren Hauptgefahrenquellen wieder im Gaslager oder in der Tankstelle zu sehen sind. Weiter sind aufgrund der geografischen Gegebenheiten der KFA Brände im angrenzenden Waldgebiet zu beachten, deren Gefahren aber als vergleichsweise gering einzustufen sind, zumal durch die auf dem Gelände befindliche Feuerwehr ein schnelles Eingreifen zu erwarten ist (z.B. Berieselung der Gasspeicher).

Blitzschlagereignisse werden für die Anlagensicherheit als unproblematisch angesehen, sofern nicht zeitgleich Wasserstoff störfallbedingt freigesetzt wird. Diese Ereigniskoinzidenz wird als sehr unwahrscheinlich angesehen und kann daher vernachlässigt werden.

Eine wichtige EVA-Ereignisgruppe stellen die Erdbeben dar. Für den Standort KFA liegen seismologische Gutachten von Prof. Ahorner aus den Jahren 1974 und 1984 vor. Das Sicherheitserdbeben mit Beschleunigungswerten von 0,25 g in horizontaler und 0,125 g in vertikaler Richtung ist mit einer Häufigkeit von $1,3E-4$ pro Jahr zu erwarten /Jül-222/.

Die Auswirkungen eines solchen Erdbebens der makroseismischen Intensität VIII sind in Tab. 5.6.5-1 beschrieben. Die meisten Gebäude zeigen schwere Schäden (große Mauerrisse, Abbrechen von Schornsteinen), bei einzelnen Gebäuden kommt es zu Zerstörungen (Absturz von Deckenteilen).

Für die PHOEBUS-Anlage ist bezüglich der Wasserstoffspeicher maximal der Abriß von Anschlußleitungen zu erwarten. Schwere Erdbeben sind somit durch andere häufigere Ereignisse gleichen Schadens abgedeckt. Dies gilt auch für extreme Erdbeben (makroseismische Intensität $\geq IX$, Eintrittshäufigkeit $< 1E-6/a$) hinsichtlich möglicher Behälterschäden.

Erdbebenbedingte Zerstörungen der Halle erschweren die Bildung zündfähiger Gaskonzentrationen. Andere, durch häufigere Ereignisse verursachte H_2 -Leckagen decken erdbebenbedingte Lecks daher in zweifacher Hinsicht ab.

Das EVA-Ereignis 'Flugzeugabsturz auf die PHOEBUS-Anlage' ist als extrem selten einzustufen. Untersuchungen zum Risiko eines Flugzeugabsturzes auf das Reaktorgebäude des AVR (Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor) ergaben eine Trefferhäufigkeit von etwa $4E-7$ pro Jahr /Umbau/. Dieser Wert ist für Abstürze auf die IEV-Halle als abdeckend anzusehen. Ein Direkttreffer der Speicherbehälter liegt aufgrund der erheblich geringeren Trefferfläche unter $1E-8$ pro Jahr. Für die Beurteilung des Anlagenrisikos spielen diese extrem hypothetischen Ereignisse keine Rolle.

GRAD	ERDBEBENWIRKUNGEN	MAX. BODEN- BESCHLEUNI. (cm/s ²)
V	<u>Aufweckend.</u> In den Häusern von allen, im Freien von vielen Personen beobachtet. Viele Schlafende erwachen. Vereinzelt fliehen Personen ins Freie. Hängende Gegenstände pendeln deutlich, Wandbilder verschieben sich. Wenig standfeste Gegenstände (Flaschen) fallen um. Pendeluhrn bleiben stehen. Türen öffnen sich oder schlagen zu.	12-25
VI	<u>Erschreckend.</u> Viele Personen laufen erschrocken ins Freie. Geschirr, Gläser und Fensterscheiben zerbrechen. <u>Erste leichte Gebäudeschäden:</u> Feine Risse im Verputz, Abbröckeln kleiner Verputzteile, Teile von Schornsteinen lösen sich.	25-50
VII	<u>Schäden an Gebäuden.</u> Im fahrenden Auto zu spüren. Große Glocken schlagen an. <u>Viele Gebäude zeigen mäßige Schäden:</u> Kleine Mauerrisse, Abgleiten von Dachpfannen, Abbrechen schadhafter Schornsteine. Rohrleitungen können an Nahtstellen undicht werden.	50-100
VIII	<u>Zerstörungen an Gebäuden.</u> Panik entsteht. Möbel werden von der Stelle gerückt und fallen um. <u>Die meisten Gebäude zeigen schwere Schäden:</u> Große Mauerrisse, Abbrechen von Schornsteinen. <u>Bei einzelnen Gebäuden kommt es zu Zerstörungen:</u> Deckenteile stürzen herab, Giebelteile brechen heraus. <u>Wirkungen im Gelände:</u> Abbrechen von Baumzweigen, Bodenrisse von einigen cm Breite, Quellen versiegen oder entspringen neu.	100-200
IX	<u>Allgemeiner Gebäudeschaden.</u> Mehr als die Hälfte aller Gebäude wird zerstört. Unterirdische Rohrleitungen zerbrechen. Bodenrisse von 10 cm Breite. Sand- und Schlammfontänen.	200-400
X	<u>Allgemeine Gebäudezerstörung.</u> Die meisten Gebäude werden zerstört, mehr als die Hälfte stürzt völlig zusammen. Schwere Schäden an Brücken, Dämmen und Straßen. Bodenspalten bis 1 m Breite. Verbiegen von Eisenbahnschienen.	400-800
XI	<u>Katastrophe.</u> Zerstörung selbst bestkonstruierter Gebäude. Straßen werden unbrauchbar. Unterirdisches Leitungsnetz wird zerstört.	>800
XII	<u>Landschaftsverändernd.</u> Kein Werk von Menschenhand hält stand. Erdoberfläche wird tiefgreifend umgestaltet.	>800

Auszug aus Makroseismische Erdbebenskala (Mercalli-Skala)
Modifiziert von Medvedev, Sponheuer & Karnik (1965) (MSK-Skala)

Tab. 5.6.5-1: Erdbebenwirkungen

6. Abschätzungen und Rechnungen zu Wasserstoffleckagen in der Halle und im Freien

6.1 Einleitung

Im Folgenden werden für die in Kapitel 5 betrachteten Leckstörfälle die H_2 -Ausströmraten in der Halle, im Fluchtgang und im Freien sowie die Wasserstoffkonzentrationen in den Gebäuden ermittelt.

Ansichts der in Kapitel 5 ausgewiesenen geringen Störfallhäufigkeiten und wegen des sehr hohen Rechenaufwandes wurde auf eine detaillierte Berechnung der Wasserstoffausbreitung mit multi-dimensionalen Modellen verzichtet.

Der Druckaufbau in Räumen wird mit Hilfe von Parameterrechnungen für Deflagrationen bei unterschiedlichen Wasserstoffkonzentrationen sowie Verbrennungsgeschwindigkeiten abgeschätzt.

Im Freien werden lediglich rechnerische Abschätzungen zum Druckaufbau unter Verwendung des TNT-Modells durchgeführt.

Aufwendige Analysen zu H_2 -Störfällen in Gebäuden und der Umgebung sowie Modellerweiterungen werden im ISR im Rahmen von zwei F+E-Vorhaben bearbeitet /Rehm/, /Verfondern/.

In einem Bereich von 4 - 75 % sind Wasserstoff-Luft-Gemische bei Raumtemperatur zündfähig. Zwischen 18 und 59 % liegt ein detonationsfähiges Gemisch vor. Experimente (RUT-Anlage, GUS; FLAME, USA) haben gezeigt, daß eine Deflagration ab etwa 12 - 15 Vol.% H_2 durch Turbulenzen und Flammenbeschleunigung - durch Hindernisse und/oder Verdämmungen verursacht -, in eine Detonation (DDT) übergehen kann /Rehm2/.

Bei den Untersuchungen werden stets konservative Randbedingungen zugrunde gelegt, d.h. es wird davon ausgegangen, daß die Speicherbehälter bei Störfalleintritt komplett gefüllt sind und jeweils die obere Rate der betrachteten drei Leckbereiche ausströmt.

Die probabilistische Bewertung und Einordnung der Fälle erfolgt in Kapitel 5.

6.2 Wasserstoff-Freisetzen innerhalb der IEV-Halle

6.2.1 Randbedingungen, Annahmen

Das Wasserstoffinventar der innerhalb der Halle befindlichen Anlagen-Komponenten ist gering ($< 0.3 \text{ Nm}^3$). Eine Freisetzung dieser Menge ist unkritisch (siehe Kapitel 5.3).

Bei den Untersuchungen wird daher von Freisetzungen bei fälschlich weiterlaufender Anlage oder von einer Entleerung der außerhalb der Halle befindlichen Wasserstoffspeicherbehälter über ein Rohrleitungsleck in die Halle ausgegangen. Sicherheitseinrichtungen (z.B. der Ex-Melder in der Halle oder die Durchflußmengenmessung), die zur Begrenzung der ausströmenden Wasserstoffmengen führen, werden im Rahmen der probabilistischen Störfallanalysen als nicht verfügbar betrachtet.

Die gesamte Halle hat ein Luftvolumen von ca. 18700 m^3 . Bei natürlichem Luftwechsel wird vom Betreiber eine Rate von $3600 \text{ m}^3/\text{h}$ ausgewiesen (Kap. 5.4.1.2); bei laufenden Gebläsen werden $21400 \text{ m}^3/\text{h}$ erzielt.

Bei natürlichem Luftwechsel beeinflussen Randbedingungen wie die Temperatur in der Halle und im Freien sowie die Hallenatmosphäre (Wasserstoffanteil) den Lüftungsstrom. Die Messung der Luftwechselrate wurde an einem Tag unter nicht näher ausgewiesenen Randbedingungen (Hallen- und Außentemperatur) und ohne Wasserstoffanteil vorgenommen. Ergänzend zu Rechnungen mit vorgegebenem konstanten Lüftungsdurchsatz von $3600 \text{ Nm}^3/\text{h}$ wurde deshalb bei Störfällen mit höherem Wasserstoffanteil in der Halle (mittleres und großes Leck) auch der Lüftungsdurchsatz selbst berechnet.

6.2.2 Berechnung der Leckageraten

Die Leckraten werden mit Hilfe eines einfachen Programmes zur Ermittlung von Ausströmraten für ideale Gase bei unter- und überkritischen Druckverhältnissen ermittelt. Die Druckverluste in der Rohrleitung und in den Ventilen werden iterativ berücksichtigt.

Ereignis- bzw. störfallbedingt läßt sich das Spektrum der Leckraten in die drei Bereiche kleine, mittlere und große Lecks unterteilen.

6.2.2.1 Kleines Leck

Ein Leck von 1-2 Quadratmillimetern verursacht bereits eine Freisetzungsrates in der Größe der vom Elektrolyseur maximal produzierten Wasserstoffmenge von $7 \text{ Nm}^3/\text{h}$. Daher wird für das kleine Leck eine kontinuierliche Freisetzung der maximalen H_2 -Produktionsmenge in die Halle unterstellt.

Ergänzend zum kleinen Wasserstoffleck mit $7 \text{ Nm}^3/\text{h}$ wurde eine gleichzeitige Leckage der Sauerstoff- und der Wasserstoffleitung betrachtet. Sauerstoffleckagen werden lediglich über die Durchflußüberwachung erkannt (Kapitel 5.4.1). Der Erkennungsgrenzwert liegt bei $10 \text{ Nm}^3/\text{h}$. Der Grenzwert für die Wasserstoffdurchflußüberwachung beträgt ebenfalls $10 \text{ Nm}^3/\text{h}$.

Entsprechend den in Kapitel 5.4.1 diskutierten Werten für kleine Lecks wurden diese $10 \text{ Nm}^3/\text{h}$ als Leckraten den Betrachtungen zugrunde gelegt.

6.2.2.2 Mittleres Leck

Höhere Leckraten können sich nur ergeben, wenn die außerhalb der Halle befindlichen Wasserstoffspeicher sich über Lecks in den Leitungen (Innendurchmesser 14 mm) zwischen den Behältern und Anlagenkomponenten in die Halle entleeren. Aufgrund des im Verhältnis zum Hallenvolumen (18700 m^3) relativ geringen Inhaltes des Zwischenspeichers (150 Nm^3) führen Leckagen der Leitung 'Elektrolyseur-Zwischenspeicher' in die Halle nicht zu zündfähigen Gemischen. Es werden daher nur Leckagen in der Verbindungsleitung 'Hochdruckspeicher-Brennstoffzelle' betrachtet. Die Einstrommenge ist somit auf den Speicherinhalt von 250 kg H_2 (ca. 3000 Nm^3) begrenzt. Unterstellt wird eine intakte Hochdruckreduzierung (120 - 7 bar) und eine Gastemperatur von 20° Celsius . Bei vollständiger Öffnung der Hochdruckreduzierstation beträgt bei 120 bar Eintrittsdruck die maximal mögliche Durchflußmenge nach Herstellerangaben ca. $1560 \text{ Nm}^3/\text{h}$.

In der Leitung befinden sich hinter der Hochdruckreduzierstation ein Rückschlagventil, drei pneumatisch betriebene Absperrventile und ein Handventil. Die ursprünglich vorgesehenen Ventile hatten alle einen geringen Strömungswiderstand, so daß die Leckrate praktisch durch die Leckgröße bestimmt wurde. Dabei ergab sich bei einem effektiven Leckdurchmesser von 12 mm eine maximale Leckrate von $800 \text{ Nm}^3/\text{h}$.

Um bei einem Versagen der Hochdruckreduzierung eine Absperrung der Leitung zu gewährleisten, wurde das erste Ventil hinter dem Hochdruckreduzierventil durch ein Hochdruckventil anderer Bauart ersetzt. Dieses Ventil begrenzt durch seinen erheblich kleineren (engsten) Strömungsquerschnitt die maximale Leckrate auf unter $120 \text{ Nm}^3/\text{h}$.

Als Obergrenze für das mittlere Leck wird daher eine vollständige Entleerung der maximal gefüllten Hochdruckspeicher innerhalb von 25 h mit einer Rate von $120 \text{ Nm}^3/\text{h}$ angesetzt.

6.2.2.3 Großes Leck

Beim großen Leck wird vom Versagen der Hochdruckreduzierung und einer Leckage in der Niederdruckleitung innerhalb der Halle ausgegangen (siehe Kapitel 5.4.3). Druck- und Durchsatzüberwachung, die ein Absperrn der Leitung auslösen würden, werden als ausgefallen betrachtet. Bei einem Druck von 9 bar in der Rohrleitung hinter der Hochdruckreduzierstation öffnet das Sicherheitsventil 107 und bläst ins Freie ab. Konservativ abgeschätzt, beträgt der Druck vor dem offenen Sicherheitsventil bei vollständiger Öffnung des HD-Reduzierventils anfänglich etwa 35 bar. Öffnet das Sicherheitsventil fehlerhaft nicht, so steigt der Druck auf maximal 120 bar. Die Gasleitung auf der Niederdruckseite wird vor der Inbetriebnahme der Anlage mit 30 bar abgedrückt. Zu einer Leckage in die Halle kommt es, wenn man als Folgeereignis ein Versagen der Gasleitung in der Halle unterstellt.

Bei vollständiger Öffnung des Hochdruckreduzierventils beträgt die maximal mögliche Durchflußmenge bei 120 bar nach Herstellerangaben bauartbedingt ca. $1560 \text{ Nm}^3/\text{h}$. Durch den Strömungswiderstand des nachfolgenden Hochdruckabsperrventils reduziert sich

die Durchflußmenge weiter auf ca. 1200 Nm³/h. Der Wasserstoffspeicherbehälter entleert sich unter diesen Randbedingungen innerhalb von 10 h mit anfänglichen Leckraten von 1200 Nm³/h (Abbildung 6.2.2.3-1).

Diese Leckrate verteilt sich je nach Leckgröße und Zustand des Sicherheitsventils über das Sicherheitsventil ins Freie und über das Leck in die Halle.

Untersucht wurden die folgenden zwei Fälle:

1. bis zum Schließen des Sicherheitsventils bei 7 bar strömen 50 % der Durchflußrate in die Halle, anschließend erhöht sich die Ausströmrage auf 100 %.
2. 'Sicherheitsventil öffnet fehlerhaft nicht', d.h. die gesamte Durchflußrate (1200 Nm³/h) strömt in die Halle.

Die Raten für den Fall 2 sind als oberer Grenzwert für große Lecks zu verstehen.

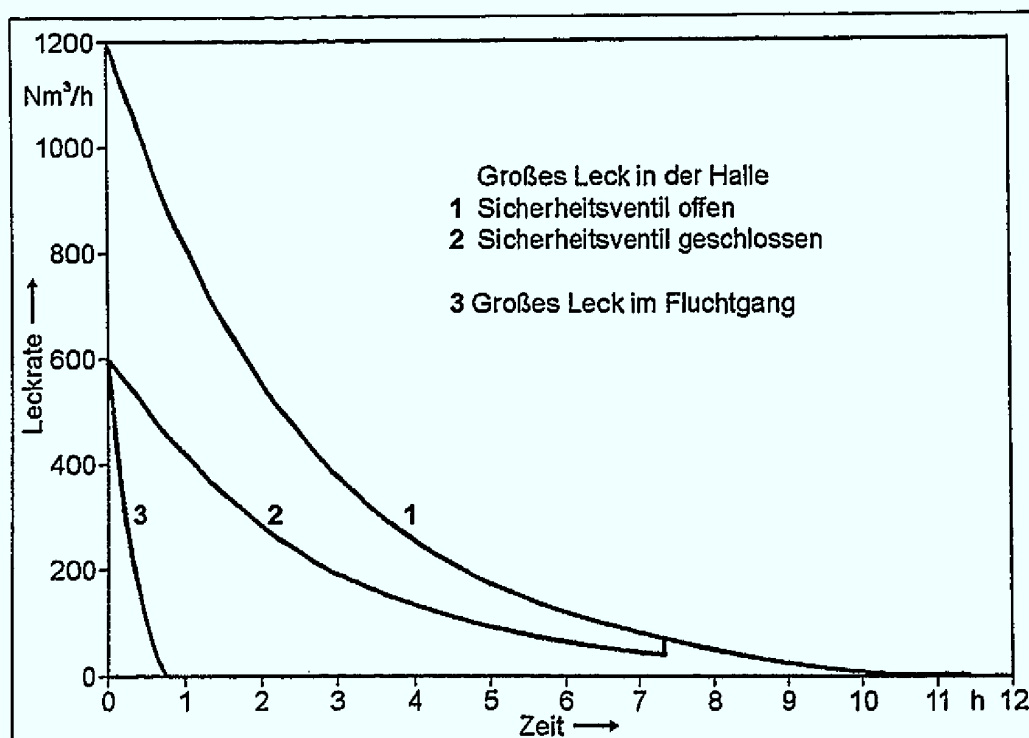


Abb. 6.2.2.3-1: Zeitlicher Verlauf der Leckraten für große Lecks in der Halle und im Fluchtgang

6.2.3 Handabschätzungen der Wasserstoffkonzentration bei homogener Verteilung in der Halle

Die globale Wasserstoffkonzentration in der Halle wird durch die H_2 -Quelle (Leckrate und Menge), durch das Speichervermögen der Halle (Volumen) und durch die als Senke wirkende Hallenlüftung bestimmt.

Unterstellt man bei ausgefallener Zwangsentlüftung und Blockade der Lüftungskanäle die Einströmung des gesamten Speicherinhalts von 3000 Nm^3 Wasserstoff bei einer gleichzeitigen Abströmung der entsprechenden Luftmenge (Druckausgleich mit der Umgebung), so ergibt sich eine maximal mögliche Wasserstoffkonzentration von knapp 16 % bei homogener Verteilung.

Bei unterstellter Lüftung mit den gemessenen Werten stellen sich stationäre Verhältnisse ein, wenn die über Dach ins Freie abgeführte H_2 -Menge der Leckrate entspricht. Die maximale Wasserstoffkonzentration in der Halle entspricht dann dem Verhältnis des Leckstromes zum Lüftungsstrom (Tab. 6.2.3.-1).

Leckrate Nm^3/h		Lüftungsdurchsatz Nm^3/h	max. H_2 -Konzentration in der Halle (%)
kleines Leck	7	3600	0.2
mittleres Leck	120	3600	3.3
	120	21400	0.6
großes Leck	600	3600	< 8
	600	21400	< 3
	(50 % Wert)		
großes Leck	1200	3600	< 16
	1200	21400	< 6

Tab.: 6.2.3-1: Von Hand abgeschätzte H_2 -Konzentrationen in der Halle bei homogener Verteilung

Beim großen Leck und natürlicher Lüftung der Halle begrenzt die einströmende H_2 -Menge und das Speichervermögen der Halle die H_2 -Konzentrationen bei geschlossenem Sicherheitsventil auf deutlich unter 16 % und bei offenem Ventil auf weniger als 8 %.

6.2.4 Abschätzung der Wasserstoffkonzentration mit Hilfe des Codes RALOC

6.2.4.1 Randbedingungen, Annahmen

Der RALOC-Code /Jahn/ wurde von der GRS zur Berechnung der Radiolyse und der lokalen Wasserstoffkonzentration im Containment entwickelt. Der Code in der derzeitigen im ISR implementierten Version Mod 2.2 beinhaltet ein einfaches Einzonenmodell zur Analyse von Verbrennungsvorgängen /Pham/. Das Programm benutzt die "Lumped parameter" Technik. Dabei wird ein räumlich ausgedehntes und vielfach unterteiltes System, wie z.B. der Sicherheitshälter eines Reaktors, in einzelne Zonen unterteilt. Diese werden durch entsprechende Raumverbindungen miteinander gekoppelt. Innerhalb einer Zone wird als Näherung angenommen, daß alle Zustandsgrößen örtlich homogen verteilt sind. Die Wahl der Zonenanordnung richtet sich nach den baulichen Gegebenheiten. Der Vorteil dieses Punktmodells liegt in der Begrenzung des analytischen Aufwandes.

Nachrechnungen von Experimenten zur Wasserstoffpropagation im Rahmen des HDR-Sicherheitsprogramm /HDR/ zeigen die Brauchbarkeit des Rechen-Codes zur Berechnung von Wasserstoffkonzentrationsverteilungen in Raumgeometrien.

Die IEV-Halle wurde durch 19 Subvolumina dargestellt, wobei der Bereich der Anlagenkomponenten feiner unterteilt ist. Abbildung 6.2.4.1-1 zeigt schematisch das verwendete Rechengitter. Im Bereich der Wasserstoffanlage ist die Halle in 5 Höhenschichten mit 10 Teilvolumen (1-10) unterteilt. Die Wasserstoffeinspeisung erfolgt unten im Volumen 2. Entsprechend der Anordnung der Zu- und Abluft befinden sich Zuluftanschlüsse in den Volumen 1, 2 und 18 sowie die Abluftventilatoren in den Volumen 9, 10 und 20. Die Umgebung wird durch die Volumen 17, 21 und 22 dargestellt (Modell 1).

Bei den Rechnungen mit gemessenen Werten für Zwangsbelüftung und Naturkonvektion wurde der Luftstrom durch Gebläse in den Abluftleitungen simuliert.

Außerdem wurden Rechnungen durchgeführt, bei denen das Programm aufgrund der Dichteunterschiede in den einzelnen Volumen den Naturkonvektionslüftungsdurchsatz selbst berechnet.

Als "worst case" wurde zusätzlich der Ausfall jeglicher Lüftung betrachtet, bei dem lediglich ein Druckausgleich mit der Umgebung unterstellt wurde. Die abströmende Luftmenge entspricht also der Leckrate. Ein Unterdrücken jeglicher Lüftung durch Witterungseinflüsse ist unwahrscheinlich, da der steigende Wasserstoffanteil in der Halle den natürlichen Luftwechsel der Halle verbessert. Eine Verstopfung oder anderweitige Blockaden der Ab- und Zuluftkanäle sind wenig wahrscheinlich (Kapitel 5.4.2.6). Der totale Ausfall der Lüftung stellt somit einen eher unwahrscheinlichen Grenzfall dar.

Aus rechentechnischen Gründen (Rechenzeit) erfolgte die Aufteilung der Halle in Subvolumina relativ grob. Lokale Wasserstoffkonzentrationen werden daher nicht erfaßt. Die Annahme der homogenen Gasverteilung in jedem Subvolumen des RALOC's und die Nichtberücksichtigung der Einströmrichtung und Geschwindigkeit führen zusätzlich zu einer rascheren 'Verdünnung' des Wasserstoffs. Im näheren Bereich des Leckageortes sind die tatsächlichen Konzentrationen daher größer als die berechneten Werte. Wasserstoffnester und Strähnen lassen sich aus diesen Gründen ebenfalls nicht erfassen.

In zwei Fällen wurden Rechnungen für einen Hallenausschnitt, der den Aufstellungsbereich der Anlage (18 x 7.8 m) erfaßt, durchgeführt. Diese 'kleinere' Halle wurde mit insgesamt 48 Subvolumina feiner unterteilt. Abbildung 6.2.4.1-2 zeigt schematisch das Rechengitter. Die Hallenzuluft wird unter Berücksichtigung der Anordnung der Zuluftkanäle und deren teilweise Abschirmung durch Schaltschränke in die Volumen 3, 4, 9 und 10 eingespeist. Die Abluftventilatoren befinden sich in den Teilräumen 41, 44 und 45. Die Wasserstoffeinspeisung erfolgt im Raum 5. Die Umgebung wird durch Volumen 49 abgebildet (Modell 2).

Diese Rechnungen sollen zum einen wegen der feineren Diskretisierung Aufschlüsse über lokal auftretende höhere Wasserstoffkonzentrationen geben, zum anderen dienen sie dazu, den Einfluß der Hallengröße aufzuzeigen.

6.2.4.2 Kleines Leck

Bereits die Handabschätzungen in Kap. 6.2.3 haben gezeigt, daß bei einem kleinen Leck die Wasserstoffkonzentration bei natürlicher und erst recht bei Zwangsbelüftung der Halle nicht über 0,2 % ansteigt, mit Ausnahme des unmittelbaren Bereichs der Leckstelle (Tab. 6.2.3-1).

Eine RALOC-Rechnung für den Hallenausschnitt (Model 2, Abb. 6.2.4.1-2) und Naturkonvektion mit $3600 \text{ Nm}^3/\text{h}$ bestätigt die Handabschätzungen. Die maximalen Konzentrationen betragen 0,22 % im Strömungspfad von der Leckstelle zu den Abluftventilatoren. In den übrigen Bereichen liegen die Werte zwischen 0,1 und 0,2 % (Abbildung 6.2.4.2-1). Diese Werte liegen noch unterhalb des Voralarmgrenzwertes (0,4 %) der Ex-Melder. Aufgrund der Rechengenauigkeit werden allerdings lokale Konzentrationen nicht erfaßt, so daß ein Ansprechen der beiden Ex-Melder an der Hallendecke nicht völlig auszuschließen ist.

Zur Ermittlung der zeitlichen Entwicklung der Wasserstoffkonzentration bei vollständig unterdrücktem Luftwechsel wurde eine Rechnung für die komplette Halle (Modell 1) bis zu einer Problemzeit von 3,6 Tagen durchgeführt. Der Wasserstoff ist praktisch homogen in der Halle verteilt. Die Konzentration steigt um etwa 0,9 %/Tag. Die Zündgrenze wird erst nach mehr als 4 Tagen überschritten. Der Grenzwert der Ex-Melder für den Voralarm wird somit nach etwa 11 h erreicht. Nach 21,5 h führt die Überschreitung des zweiten Grenzwertes (0,8 % H_2 , 20 % UEG) zur automatischen Abschaltung der Anlage und somit zur Beendigung der Leckage.

Kombinierte Wasserstoff- und Sauerstoffleckage

Beim kleinen Leck lag die H_2 -Konzentration in der Halle bei natürlicher Lüftung um mehr als eine Größenordnung unter der Zündgrenze. Die Wasserstoffkonzentration wird daher auch beim kombinierten Leck bei natürlichem Luftwechsel und erst recht bei Zwangsbelüftung deutlich unterhalb kritischer Werte liegen.

Daher wurde nur eine Rechnung für den "worst case" (geschlossene Halle) durchgeführt. Die Leckagemengen wurden auf den maximal

möglichen Speicherinhalt von 3000 Nm³ Wasserstoff und 1500 Nm³ Sauerstoff begrenzt.

Die rechnerischen Abschätzungen zeigen, daß der Voralarm der Ex-Melder nach etwa 6,75 h und der 2. Grenzwert, der zum Abschalten der Anlage führt, nach 14,2 h erreicht wird.

Unterstellt man den Ausfall der Ex-Melder, so erreichen die Sauerstoffkonzentrationen ihren Maximalwert von 25,3 % am Ende der Sauerstoffleckage nach 150 h und fallen anschließend bis zur Beendigung der Wasserstoffleckage auf 23,3 % ab.

Nach 76 h überschreiten die Wasserstoffkonzentrationen die untere Zündgrenze von 4 %. Der Maximalwert von 15 % wird mit Beendigung der Wasserstoffeinspeisung nach 300 h erreicht (Abbildung 6.2.4.2-2).

Die lokalen Konzentrationen im Bereich der Leckstellen können aufgrund der Größe der Subvolumina der Rechengitter nicht erfaßt werden.

6.2.4.3 Mittleres Leck

Bei den Rechnungen wurde die in Kapitel 6.2.2 ermittelte Leckrate und Ausströmdauer zugrunde gelegt. Es wurde weiterhin angenommen, daß weder von der Durchflußmengenüberwachung, noch von den Ex-Meldern in der Halle, noch von Hand (z.B. akustische Erkennung der Leckage) eine Abschaltung der Anlage und eine Absperrung der Gasleitungen erfolgt. Die Durchflußmengenüberwachung würde praktisch zu einer unmittelbaren Abschaltung der Anlage führen. Die Ex-Melder führen verzögert bei einer Wasserstoffkonzentration von 0,8 % in der Halle zur Beendigung der Leckage.

6.2.4.3.1 Mittleres Leck ohne natürlichen Luftwechsel

Eine vollständige Unterdrückung des natürlichen Luftwechsels, sei es durch Blockade der Lüftungskanäle oder durch extrem ungünstige Witterungsbedingungen, ist sehr unwahrscheinlich, aber nicht völlig auszuschließen. Die folgenden Ergebnisse zeigen, daß selbst unter so extremen Randbedingungen bei mittleren Lecks eine Zeitspanne von ca. 6 Stunden für Gegenmaßnahmen verbleibt, bevor global zündfähige Gemische erreicht werden.

Bei ausgefallener Lüftung und Druckausgleich mit der Umgebung hängt die maximale Wasserstoffkonzentration von der insgesamt eingeströmten Menge ab. Bei 3000 Nm^3 wird die maximale Konzentration von 15,3 % mit Beendigung der Leckage nach 25 h erreicht.

In der Nähe der Leckstelle werden der 1. und 2. Grenzwert der Ex-Melder innerhalb von 1 Minute überschritten. Unter der Hallendecke, oberhalb der Leckstelle, wird der Voralarmgrenzwert nach 0,5 und der 2. Grenzwert nach etwa 1,1 Stunden erreicht. In den restlichen Bereichen der Halle werden 0,8 % (2. Grenzwert) nach 1,2 - 1,6 Stunden überschritten. Die untere Zündgrenze (4 %) wird nach 6,2 Stunden erreicht. Im Bereich der Leckstelle werden allerdings unmittelbar wesentlich höhere H_2 -Konzentrationen vorliegen.

6.2.4.3.2 Mittleres Leck mit natürlichem Luftwechsel

Vom Betreiber wurde unter bestimmten Randbedingungen (Wetterverhältnisse, Hallenatmosphäre ohne Wasserstoff) ein natürlicher Luftwechsel von ca. $3600 \text{ Nm}^3/\text{h}$ gemessen. Um die Beeinflussung der Luftaustauschrate durch die einströmende Wasserstoffmenge, die Wasserstoffkonzentration in der Halle und Temperaturdifferenzen zwischen der Hallen- und der Umgebungsluft zu erfassen, wurden zusätzlich zu der Rechnung mit dem gemessenen Wert, mit dem RALOC-Code die Luftwechselraten selbst berechnet. Dabei wurde von einer anfänglichen Hallentemperatur von 20°C und zur Abdeckung unterschiedlicher Witterungsverhältnisse von drei verschiedenen Umgebungstemperaturen (5°C , 20°C und 35°C) ausgegangen. Die Temperaturunterschiede zwischen der Halle und der Umgebung werden im Laufe der Transiente durch den Luftaustausch abgebaut.

Je höher die Dichteunterschiede zwischen Hallenatmosphäre und Umgebungsluft sind, desto intensiver ist die natürliche Belüftung der Halle. Die berechneten Luftwechselraten steigen daher mit zunehmendem Wasserstoffanteil in der Hallenluft und mit geringer werdender Umgebungstemperatur. In allen drei Fällen sind die berechneten Werte integral höher als der bei Luftatmosphäre gemessene Wert. Daher treten die höchsten H_2 -Konzentra-

tionen mit ca 3,3 % bei 3600 Nm³/h auf. Bei den Fällen mit der berechneten Naturkonvektion ergeben sich maximale Wasserstoffkonzentrationen von 2,7 % (Umgebungstemperatur $T_u = 35\text{ °C}$), 2,3 % ($T_u = 20\text{ °C}$) und 2,2% ($T_u = 5\text{ °C}$) (Abbildung 6.2.4.3-1).

Unter der Hallendecke wird der 1. Grenzwert der Ex-Melder je nach Strömungsrichtung und -intensität nach 0,5 bis 2,2 h erreicht. Der Grenzwert für automatische Abschaltung der Anlage und Starten der Zwangsbelüftung wird nach 1,1 - 3 h überschritten (Tab. 6.2.4.3-1).

Mit dem gemessenen Lüftungsstrom wurde eine Rechnung für den Hallenausschnitt (Modell 2) durchgeführt. Die maximale Konzentration entspricht mit 3,4 % praktisch dem Wert für die große Halle von 3,3 %. Die Ursache hierfür ist der gleich große Lüftungsstrom, dessen Verhältnis zum Leckstrom die Wasserstoffkonzentrationen bestimmt. Der schnellere Anstieg - 0,8 % werden unter der Hallendecke bereits nach 9 Minuten erreicht - wird durch die kleinere Halle (geringeres Speichervolumen) verursacht.

Auch bei ungünstigen Witterungsbedingungen bleiben die globalen Wasserstoffkonzentrationen unterhalb der Zündgrenze von 4 %. Die Richtung und der Impuls des einströmenden Wasserstoffs werden vom RALOC nicht erfaßt. Zudem haben die Teilvolumina auch beim Hallenausschnittsmodell noch eine Größe von einigen 10 Kubikmetern. Lokal, im Bereich des Freistrahls des einströmenden Wasserstoffs, werden daher höhere Konzentrationen als berechnet auftreten. Nicht auszuschließen ist, daß lokal höhere Konzentrationen wie z.B. in schlecht belüfteten Teilbereichen unter der Hallendecke auftreten.

6.2.4.3.3 Mittleres Leck mit Zwangskonvektion

Für die erzwungene Hallenlüftung von 21400 Nm³/h wurde jeweils eine Rechnung für die gesamte Halle (Modell 1) und für den Hallenausschnitt (Modell 2) durchgeführt.

Vereinfachend wurde die Zwangskonvektion von Störfalleintritt an unterstellt. Tatsächlich liegen bis zum Ansprechen der Ex-Melder bei 0,8 % (Startpunkt der Ventilatoren) Naturkonvektionsbedingungen vor und zwar je nach Wirksamkeit der natürlichen Belüf-

tung etwa 1,3 - 3 Stunden. In Teilen der Halle betragen zu diesem Zeitpunkt die Konzentrationen bis zu 1,5 %.

Bei der Rechnung mit Zwangskonvektion von Anfang an ergeben sich deutlich geringere Wasserstoffkonzentrationen von etwa 0,6 %. Tatsächlich treten die höchsten Wasserstoffkonzentrationen am Ende der Naturkonvektionsphase zum Zeitpunkt des Ansprechens der Ex-Melder (Startbeginn der Ventilatoren) auf. Anschließend werden die Wasserstoffkonzentrationen durch den höheren Lüftungsdurchsatz auf deutlich unter 1 % abgesenkt (Abbildung 6.2.4.3-1, Tabelle 6.2.4.3-1).

Betrachtet man den Hallenausschnitt (Modell 2) so ergeben sich im wesentlichen die gleichen Wasserstoffkonzentrationen. Lediglich die Transienten sind aufgrund des kleineren Hallenvolumens schneller.

6.2.4.4 Großes Leck

Das große Leck wird durch ein Versagen der Hochdruckreduzierung (120 → 7 bar) ausgelöst. Der Druck der Hochdruckspeicher schlägt dabei in den Niederdruckteil durch. Drucküberwachung, Überdrucksicherung sowie Durchflußüberwachung sprechen praktisch sofort an. Die Absperrung der Leitung wird als ausgefallen betrachtet. Als Folge des Druckanstieges in der Leitung kommt es in der Halle zu einer Leitungsleckage (siehe Kapitel 6.2.2.3). Der zeitliche Verlauf der Leckraten ist in Abbildung 6.2.2.3-1 dargestellt.

Bei funktionierender Überdrucksicherung steigen die Wasserstoffkonzentrationen in der Halle, je nach Wirksamkeit der natürlichen Hallenbelüftung, innerhalb von 2-4 Minuten auf 0,4 % (Voralarmgrenzwert). Nach 8-15 Minuten wird durch Überschreitung des zweiten Grenzwertes von 0,8 % automatisch der Start der Hallenzwangselüftung angeregt.

Bei der nun einsetzenden Zwangselüftung ergeben sich global maximale Wasserstoffkonzentrationen von 1,7 % in der Halle. Lokale Konzentrationen oberhalb von 4 %, z.B. verursacht durch Strähnen, sind allerdings möglich. Ein kompletter Ausfall der nicht ex-geschützten drei Abluftventilatoren durch lokale Deflagrationen ist nicht auszuschließen.

Versagen die Abluftventilatoren, so bleibt noch die natürliche Belüftung der Halle erhalten. Untersucht wurde die Wirksamkeit der Lüftung bei dem gemessenen Durchsatz sowie für drei unterschiedliche Umgebungstemperaturen (5, 20, und 35 °C) bei Hallenlufttemperaturen von jeweils 20 °C. Die globalen maximalen Wasserstoffkonzentrationen liegen dabei mit Werten zwischen 3,1 - 4,3 % ungünstigstenfalls knapp oberhalb der unteren Zündgrenze von 4 % (Tab. 6.2.4.4-1, Abb. 6.2.4.4-1), wobei für einen Zeitraum von 2,2 - 4,8 h ein zündfähiges Gemisch in der Halle vorliegt.

Unterstellt man zusätzlich das Versagen der Überdrucksicherung, so betragen Leckrate und Leckmenge etwa das Doppelte (Abb. 6.2.2.3-1). Nach etwas mehr als 4 Minuten wird über die Ex-Melder der Start der Abluftventilatoren angeregt. Bei Zwangsbelüftung werden nach 1,3 h mit 3,3 % maximale globale Konzentrationen knapp unterhalb der Zündgrenze erreicht. Ein Ausfall der nicht ex-geschützten Ventilatoren durch lokale Deflagrationen wird unterstellt.

Kommt es zu einem Ausfall der Zwangsbelüftung, sei es durch fehlerhaftes Nichtstarten oder durch lokale Deflagrationen, so begrenzt die natürliche Hallenbelüftung die maximalen Konzentrationen auf 5,3 - 8,3 %. Je nach Wirksamkeit der natürlichen Hallenlüftung wird die untere Zündgrenze (4 %) nach 37 bis 45 Minuten überschritten, die Maximalwerte nach 2 bis 3 h erreicht und die Zündgrenze nach 4,7 - 10,3 h wieder unterschritten (Tab. 6.2.4.4-2, Abb. 6.2.4.4-2). Durch Handabspernung der Leitung 'Hochdruckspeicher - Brennstoffzelle' läßt sich die Leckage vorzeitig beenden.

Betrachtet man zum Vergleich eine Halle, deren Grundfläche der Aufstellungsfläche der Wasserstoffanlage entspricht, so zeigt sich der Einfluß des Speichervermögens auf die maximalen Konzentrationen bei großen Leckraten und natürlicher Belüftung deutlich. Bei gleichen Hallen- und Umgebungstemperaturen erhöhen sich die maximalen H₂-Konzentrationen von 3,4 auf 6,8 % bei offener Überdrucksicherung und von knapp 6 % auf etwas über 10 % bei fehlerhaft geschlossenem Sicherheitsventil. Aufgrund des hohen Lüftungsdurchsatzes bei Zwangsbelüftung sind die Unter-

schiede mit 2,4 % gegenüber 1,7 % bei funktionierendem Sicherheitsventil und 4,8 % gegenüber 3,3 % bei fehlerhaft geschlossenem Sicherheitsventil geringer. Außerdem laufen die Vorgänge in der kleineren Halle aufgrund des geringeren Speichervermögens schneller ab, d.h. die Ex-Melder sprechen bereits innerhalb 1 Minute an und die Zeitspanne, in der zündfähige Gemische vorliegen, ist kürzer.

6.2.5 Wasserstoffdeflagration in der Halle

Die Möglichkeit einer Wasserstoffdeflagration besteht, wenn die H_2 -Konzentrationen 4 % überschreiten. In den weitaus meisten Fällen liegen die globalen Wasserstoffkonzentrationen deutlich unter 4 %. Lokal existieren im Bereich der Leckstelle bis zur Durchmischung des Wasserstoffs mit der Hallenluft zündfähige Konzentrationen. Die Größe dieses Bereiches hängt von der Höhe der Leckrate und der Intensität der Lüftung ab. In der Nähe der Wasserstoffrohrleitungen, den potentiellen Leckorten, sind keine natürlichen Zündquellen vorhanden. Eine Zündung des Wasserstoffs durch Fremdeinwirkung (z.B. Funken bei Beschädigung der Leitung) ist möglich. Sollte es zu einer Entzündung des ausströmenden Gases kommen, so ist eher mit einem Abfackeln zu rechnen. Die Auswirkungen sind in jedem Fall lokal begrenzt.

Unterstellt man beim mittleren Leck den Ausfall der Leckabsperrrung und das Versagen der Hallen-Zwangsbelüftung, so werden unter ungünstigen Randbedingungen globale Konzentrationen knapp unterhalb der Zündgrenze erreicht, wobei sich etwa 560 Nm^3 Wasserstoff in der Halle befinden. Aufgrund der Rechenungenauigkeit kann in diesem Fall ein partiell vorliegendes zündfähiges Gemisch nicht ausgeschlossen werden. Bei einer Zündung würde es vermutlich zu begrenzten Schäden in und an der Halle kommen.

Lediglich in dem sehr unwahrscheinlichen Fall: 'Großes Leck und kompletter Ausfall des Schutzsystems' (siehe 5.4.3), bilden sich global zündfähige H_2 -Luft-Gemische in der gesamten Halle.

Dabei werden bei funktionierender Überdrucksicherung nur bei ungünstigen Randbedingungen die untere Zündgrenze mit maximal 4,3 % für längstens etwa 2,6 h überschritten.

Unterstellt man das Versagen der Überdrucksicherung, so ergeben sich bei natürlicher Belüftung maximale Konzentrationen von 5,3 - 8,3 % und bei Zwangsbelüftung von 3,3 %.

Parameterrechnungen wurden mit Hilfe des einfachen Verbrennungsmodells des RALOC-Codes - unter Vorgabe einer Wasserstoffkonzentration von 5 % und 8 % - für den Aufstellungsbereich der Versuchsanlage und für die gesamte Halle zur Abschätzung des Druckaufbaus durchgeführt. Die Halle wurde dabei mit Ausnahme der Zu- und Abluftöffnungen als geschlossen betrachtet.

Befindet sich in der gesamten Halle ein zündfähiges Gemisch mit 5 % H_2 , so kommt es bei einer Verbrennungsgeschwindigkeit von 10 m/s zu einem maximalen Druck von 2 bar. Bei Wasserstoffkonzentrationen von 8 % werden maximale Drücke von 3 bar bei 10 m/s und von 4 bar bei 100 m/s erreicht.

Bei einer globalen Wasserstoffdeflagration würde somit die Halle zerstört.

Bei der Deflagration einer Wasserstoffwolke von 1350 m³ im Aufstellungsbereich der Wasserstoffanlage ergeben sich maximale Drücke von 1,07 bar (5 % H_2 , 10 m/s) bis 1,6 bar (8 % H_2 , 100 m/s). In entfernten Hallenbereichen sind die Spitzendrücke mit 1,05 - 1,1 bar niedriger.

Diese Parameteruntersuchungen zeigen, daß bei einer partiellen Deflagration je nach Wasserstoffmenge und -konzentration mit massiven lokalen Schäden, nicht aber mit einer vollständigen Zerstörung der Halle gerechnet werden muß.

6.2.6 Zusammenfassung

Das Wasserstoffinventar der innerhalb der Halle befindlichen Anlagenteile ist gering. Zu risikorelevanten Freisetzungen innerhalb der Halle kann es nur dann kommen, wenn sich die im Freien befindlichen Speicherbehälter über ein Rohrleitungsleck in die Halle entleeren. Dieses ist nur bei einem Versagen des Schutzsystems möglich.

Selbst in diesem unwahrscheinlichen Fall reicht die natürliche Belüftung der Halle aus, um die globale Wasserstoffkonzentration bei kleinen und mittleren Lecks auf Werte unterhalb der unteren Zündgrenze zu begrenzen.

Bei großen Lecks und natürlicher Hallenlüftung hingegen stellen sich bei offenem Sicherheitsventil ungünstigstenfalls Konzentrationen knapp über 4 % und bei fehlerhaft geschlossenem Sicherheitsventil von 5 - 8 % für einige Stunden ein.

Die automatisch bei einer Konzentration von 0,8 % einsetzende Zwangsbelüftung reicht in jedem Fall aus, um die globalen Wasserstoffkonzentrationen unterhalb der unteren Zündgrenze zu halten.

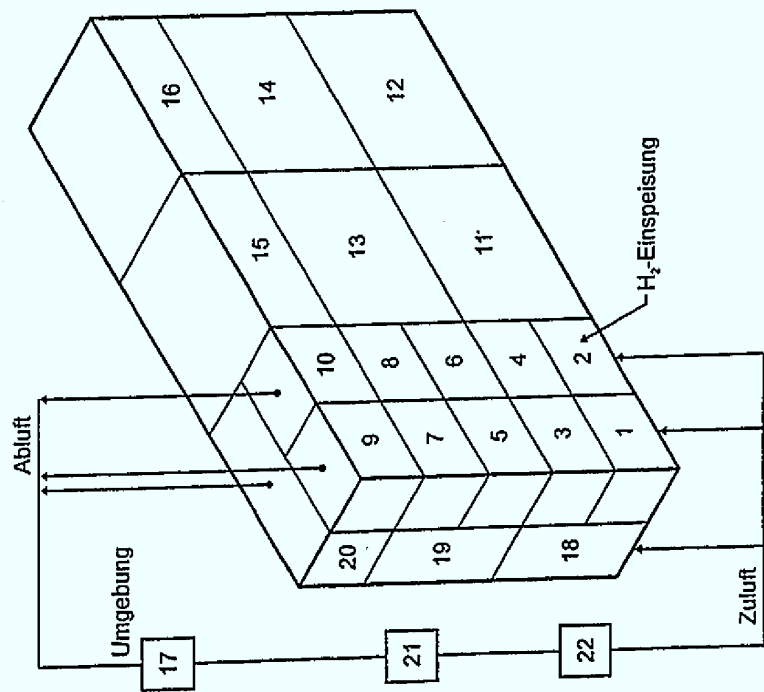


Abb. 6.2.4.1-1: Schematische Darstellung des RALOC-Rechengitters für die IEV-Halle

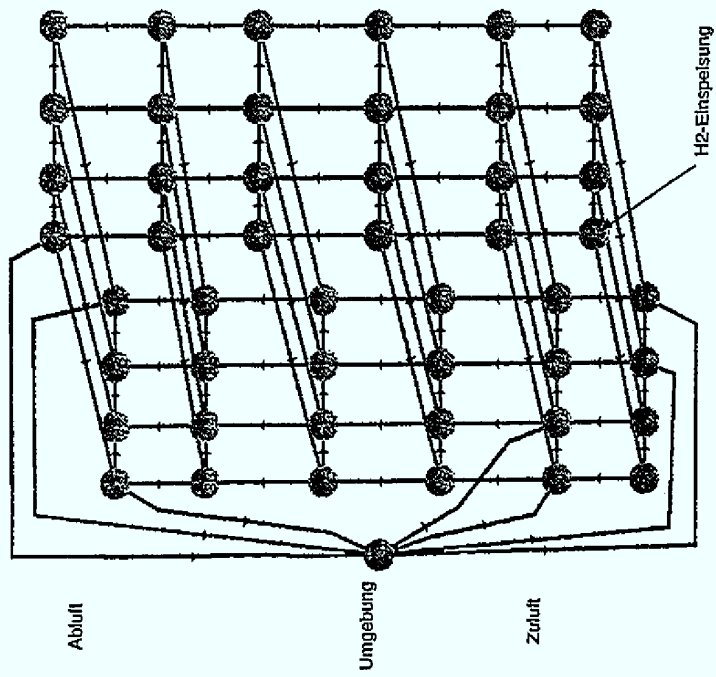


Abb. 6.2.4.1-2: Schematische Darstellung des RALOC-Rechengitters für den Hallenausschnitt der Wasserstoffanlage in der IEV-Halle

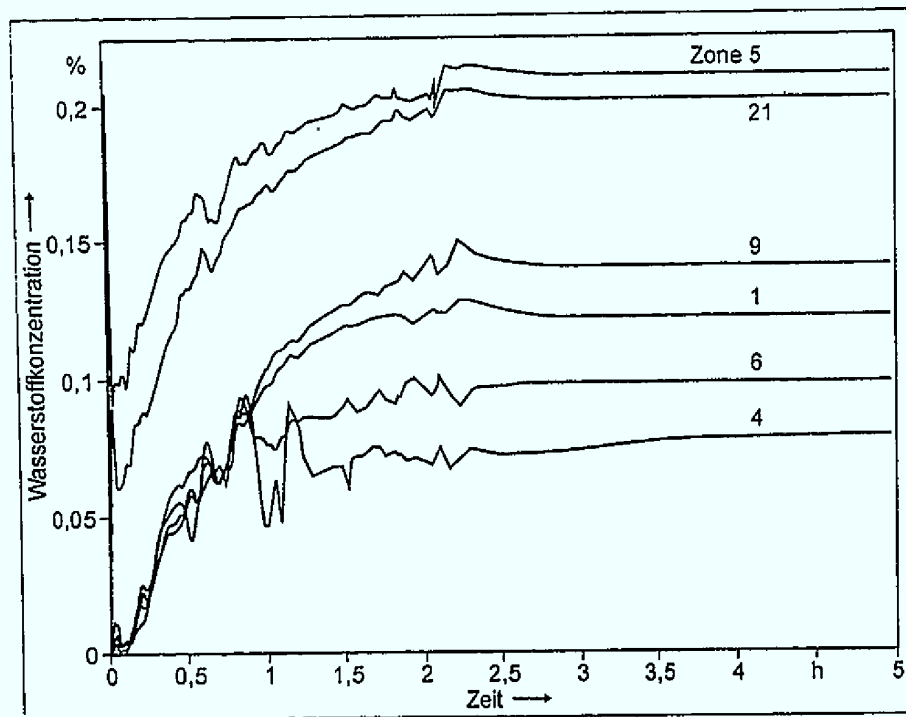


Abb. 6.2.4.2-1: Wasserstoffkonzentration in der Halle bei einem kleinen Leck ($7 \text{ m}^3/\text{h}$) und natürlicher Belüftung

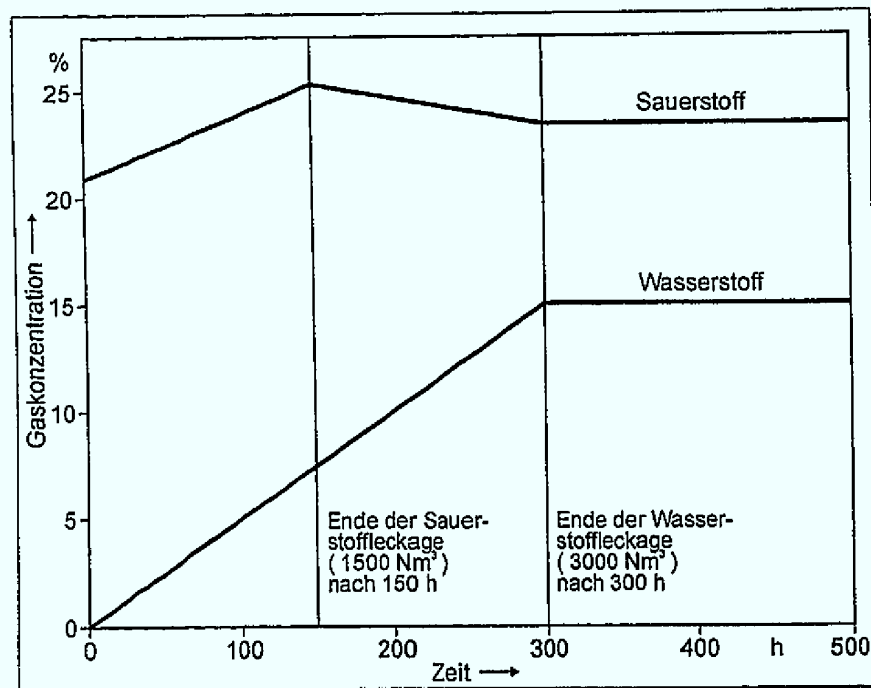


Abb. 6.2.4.2-2: Gaskonzentration in der Halle bei einem kombinierten Wasserstoff- und Sauerstoffleck ($10 \text{ Nm}^3/\text{h}$) und Ausfall jeglicher Lüftung

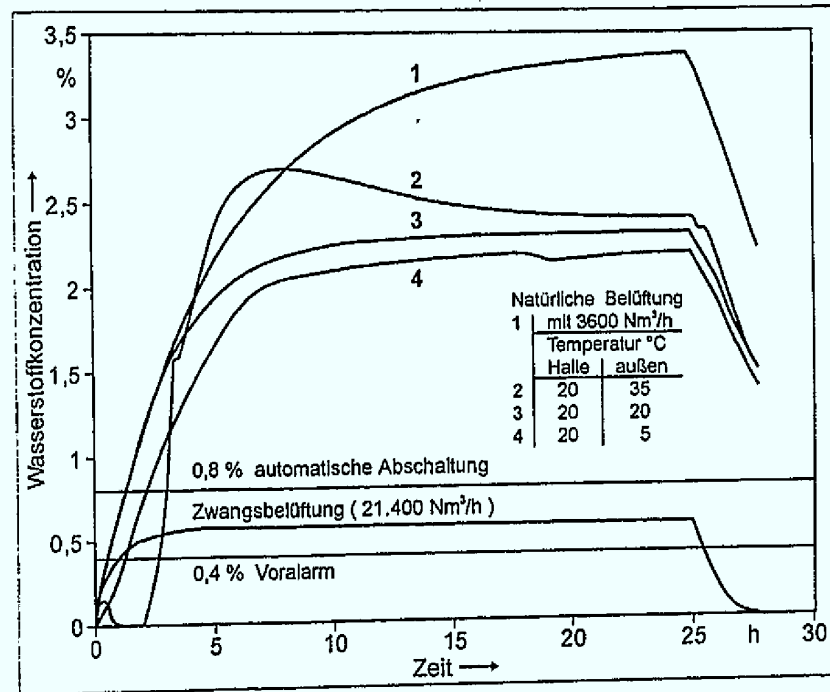


Abb. 6.2.4.3-1: Zeitlicher Verlauf der globalen Wasserstoffkonzentrationen in der Halle bei mittleren Lecks (120 m³/h)

Hallenlüftung	Zeit bis zum Erreichen			Maximale Wasserstoff-Konzentration % nach h	Konzentration wieder unter 4 %
	0,4 % Hallendecke	0,8 %	4 % Halle		
Natürliche Hallenbelüftung					
1) Meßwert 3600 Nm³/h	31 min	1,3 h	---	3,4 % 25 h	---
2) Berechnet mit Außentemperatur 35 °C Hallentemperatur 20 °C	2,2 h	3,0 h	---	2,7 % 8,4 h	---
3) Berechnet mit Außentemperatur 20 °C Hallentemperatur 20 °C	30 min	1,3 h	---	2,3 % 25 h	---
4) Berechnet mit Außentemperatur 5 °C Hallentemperatur 20 °C	1,1 h	2,0 h	---	2,2 % 18 h	---
Zwangsbelüftung mit 21400 Nm³/h (Anregung bei 0,8 %)			---	0,8-1,5 % 1,3-3 h	---

Tab. 6.2.4.3-1: Globale Wasserstoffkonzentrationen in der Halle bei einem mittleren Leck (120 m³/h)

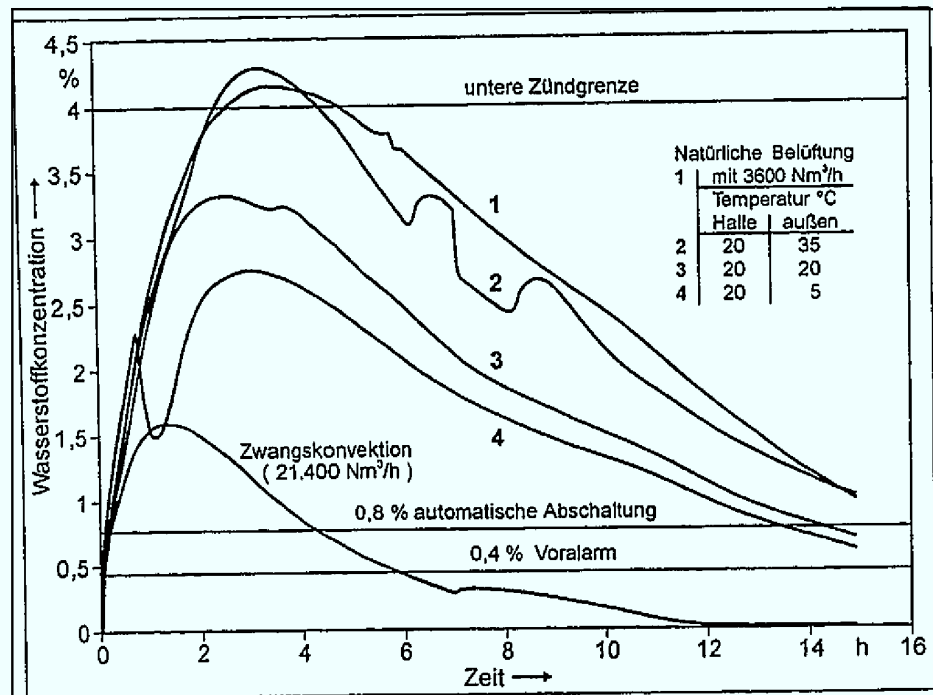


Abb. 6.2.4.4-1: Zeitlicher Verlauf der globalen Wasserstoffkonzentrationen in der Halle bei einem großen Leck und offenem Sicherheitsventil (Aufteilung der Leckrate: 50 % über Sicherheitsventil ins Freie, 50 % in die Halle)

Hallenlüftung	Zeit bis zum Erreichen			Maximale Wasserstoff-Konzentration % nach h	Konzentration wieder unter 4 %
	0,4 % Hallendecke	0,8 % Hallendecke	4 % Halle		
Natürliche Hallenbelüftung					
1) Meßwert 3600 Nm³/h	3,3 min	11,0 min	2,45 h	4,2 % 3,3 h	4,54 h
2) Berechnet mit Außentemperatur 35 °C Hallentemperatur 20 °C	4,2 min	15,0 min	2,2 h	4,3 % 3,1 h	4,84 h
3) Berechnet mit Außentemperatur 20 °C Hallentemperatur 20 °C	2,1 min	12,0 min	---	3,4 % 2,4 h	---
4) Berechnet mit Außentemperatur 5 °C Hallentemperatur 20 °C	2,1 min	7,8 min	---	3,1 % 2,0 h	---
Zwangsbelüftung mit 21400 Nm³/h (Anregung bei 0,8 %)			---	1,7 % 1,2 h	---

Tab. 6.2.4.4-1: Globale Wasserstoffkonzentrationen in der Halle bei einem großen Leck und offenem Sicherheitsventil (Aufteilung der Leckrate: 50 % über Sicherheitsventil ins Freie, 50 % in die Halle)

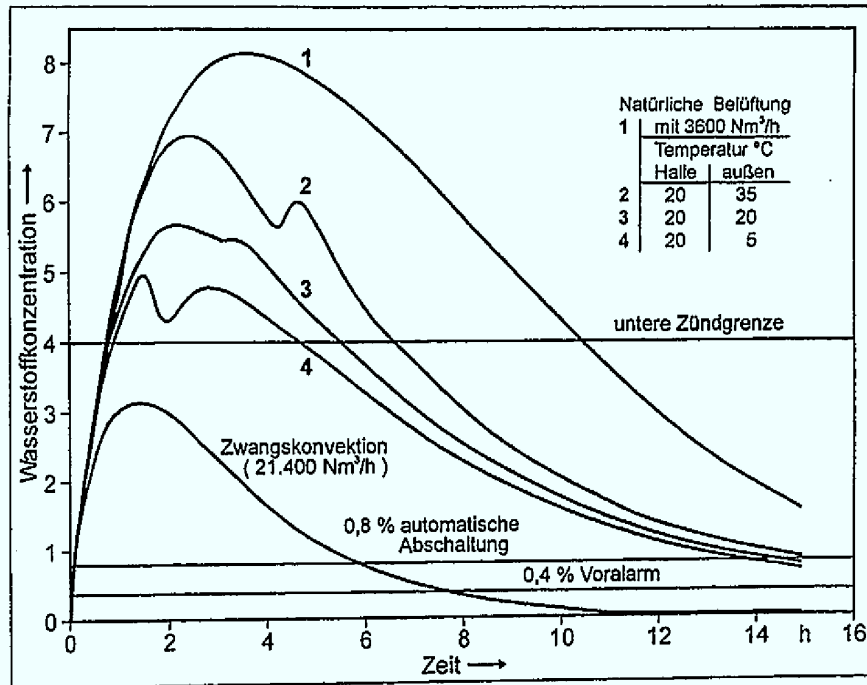


Abb. 6.2.4.4-2: Zeitlicher Verlauf der globalen Wasserstoffkonzentrationen in der Halle bei einem großen Leck und fehlerhaft geschlossenem Sicherheitsventil

Hallenlüftung	Zeit bis zum Erreichen			Maximale Wasserstoff-Konzentration % nach h	Konzentration wieder unter 4 %
	0,4 % Hallendecke	0,8 %	4 % Halle		
Natürliche Hallenbelüftung 1) Meßwert 3600 Nm³/h	1,0 min	4,3 min	40,0 min	8,24 - 3,3 h	10,3 h
2) Berechnet mit Außentemperatur 35 °C Hallentemperatur 20 °C	1,1 min	4,5 min	37,0 min	7,1 - 2,3 h	6,6 h
3) Berechnet mit Außentemperatur 20 °C Hallentemperatur 20 °C	1,1 min	4,4 min	41,5 min	5,8 - 2,1 h	5,3
4) Berechnet mit Außentemperatur 5 °C Hallentemperatur 20 °C	2,2 min	3,5 min	45,0 min	5,3 - 2,0 h	4,7
Zwangsbelüftung mit 21400 Nm³/h			---	3,3 - 1,3 h	---

Tab. 6.2.4.4-2: Globale Wasserstoffkonzentrationen in der Halle bei einem großen Leck und fehlerhaft geschlossenem Sicherheitsventil

6.3 Wasserstoff-Freisetzen im Fluchtgang

Durch den Fluchtgang führen in halber Raumhöhe zwei Wasserstoffleitungen mit einem Innendurchmesser von 14 mm. Eine Leitung verbindet den Elektrolyseur mit dem Zwischenspeicher im Freien, die andere Leitung führt von den Hochdruckspeichern über die Hochdruckreduzierstation zur Brennstoffzelle in die Halle.

Der Fluchtgang hat bei Abmessungen von 10 m Länge, 1,5 m Breite und einer mittleren Höhe von 6,25 m und abzüglich der Einbauten (Lüftungskanal), ein Volumen von ca. 90 m³.

Durch Einbringung von Lüftungsschlitzen in der Außentür und Austausch der beiden Lichtkuppeln in der Decke gegen Lüftungshauben wurde für eine natürliche Belüftung des Fluchtangesesorgt. Bei den Rechnungen wird ein freier Querschnitt von 0,25 m² für jede der drei Öffnungen unterstellt.

Die Wasserstoffkonzentration im Fluchtgang wird durch einen Ex-Melder überwacht. Bei einer Konzentration von 0,4 % (10 % der unteren Zündgrenze) erfolgt ein optischer und akustischer Voralarm. Werden 0,8 % erreicht (20 % der unteren Zündgrenze), so wird die Anlage automatisch abgeschaltet und die Rohrleitungen abgesperrt.

Die beiden Rohrleitungen besitzen zwei bzw. drei Rohrverbindungen, die etwa unterhalb der Lüftungskuppeln liegen. Eine Undichtigkeit bzw. ein Versagen einer dieser Rohrverbindungen wird als Leckursache unterstellt.

Die Rechnungen zur Wasserstoffkonzentrationsverteilung wurden mit dem Code RALOC durchgeführt. Der Verbindungsgang wird dabei in insgesamt 63 Subvolumina unterteilt. Die Wasserstoffeinspeisung erfolgt in halber Raumhöhe (3 m) unterhalb der zweiten Lüftungshaube in der Nähe der Hallenwand. Vergleichsrechnungen für Leckagen der anderen Rohrverbindung ergaben im wesentlichen die gleichen Ergebnisse.

6.3.1 Leckagen in der Leitung Elektrolyseur - Zwischenspeicher

6.3.1.1 Kleines Leck

Die maximale Leistung des Elektrolyseurs von $7\text{Nm}^3/\text{h}$ wird als Leckrate für ein kleines Leck zugrunde gelegt. Diese Leistung wird nur während einiger Stunden des Tages erbracht. Die Betriebszeit des Elektrolyseurs begrenzt damit die Leckdauer. Längerfristige Leckagen sind nur bei einer Rückwärtsentleerung des Zwischenbehälters möglich.

Da Intensität und Strömungsrichtung der natürlichen Belüftung von den Temperaturen im Gang und in der Umgebung abhängen, wurde eine Rechnung mit gleichen Außen- und Innentemperaturen von $20\text{ }^\circ\text{C}$ und eine zweite Rechnung für eine Außentemperatur von $35\text{ }^\circ\text{C}$ bei einer Raumtemperatur von $20\text{ }^\circ\text{C}$ durchgeführt.

Bei gleichen Innen- und Außentemperaturen wird die Belüftung des Fluchtanges nur durch den Wasserstoff bestimmt. Durch den Auftrieb des leichten Wasserstoffs stellt sich eine Aufwärtsströmung im Fluchtang ein. Mit $1.3\text{ } \%$ bleibt die maximale Wasserstoffkonzentration deutlich unterhalb der unteren Zündgrenze von $4\text{ } \%$ (Tab. 6.3.1-1). Der untere Bereich des Fluchtanges bleibt dabei praktisch wasserstofffrei. Sind die Umgebungstemperaturen geringer als die Temperaturen im Fluchtang, so erhöht sich der Lüftungsdurchsatz. Die Wasserstoffkonzentrationen sind dann noch geringer.

Geht man im Sommerbetrieb von höheren Umgebungstemperaturen während des Tages aus, so wird der Fluchtang abwärts durchströmt. Je nach Position der Leckstelle stellen sich dabei unterschiedliche Wasserstoffkonzentrationsverteilungen mit lokalen, maximalen Werten von bis zu $2\text{ } \%$ ein (Tab. 6.3.1-1). Dabei kann bei guter Lüftung die Wasserstoffkonzentration in leckfernen Bereichen (oberhalb der Leitung) über einen längeren Zeitraum (einige Stunden) unterhalb der Ansprechwerte des Ex-Melders liegen. Erst durch Richtungsumkehr der natürlichen Lüftung, sei es durch steigende Wasserstoffkonzentrationen oder durch fallende Umgebungstemperaturen, führen steigende Wasserstoffkonzentrationen oberhalb der Rohrleitung sicher zum Ansprechen des Ex-Melders. Die schnelle Detektion des kleinen

Lecks durch den Ex-Melder ist somit nicht in jedem Falle gewährleistet, wobei allerdings die untere Zündgrenze global im Fluchtgang nirgends erreicht wird.

6.3.1.2 Mittleres Leck

Mittlere Lecks mit Ausströmraten zwischen $10 - 120 \text{ Nm}^3/\text{h}$ sind in der Leitung 'Elektrolyseur-Zwischenspeicher' nur bei einer Rückwärtsentleerung des Zwischenspeichers ($150 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2$ bei 7 bar) möglich (Kap. 5.5.2).

Parameterrechnungen zeigen, daß im Sommerbetrieb (Umgebungstemperatur 35°C und Raumtemperatur 20°C) bei Leckagen oberhalb von $15 \text{ Nm}^3/\text{h}$ einige Stunden nach Umschlagen der anfangs abwärts gerichteten natürlichen Lüftung mit zündfähigen Gemischen gerechnet werden muß.

Bei einer anfänglichen Leckrate von $120 \text{ Nm}^3/\text{h}$ (Obergrenze mittlere Lecks) entleert sich der Zwischenbehälter mit abnehmender Leckrate innerhalb von 3 Stunden in den Fluchtgang. Der Fall wird durch das mittlere Leck in der Leitung 'Hochdruckspeicher-Brennstoffzelle' mit einer über 25 Stunden konstanten Leckrate abgedeckt (siehe Kapitel 6.3.2.2).

6.3.1.3 Großes Leck

Beim großen Leck und Rückwärtsentleerung des Zwischenspeichers wird ein vollständiges Versagen des Rückschlagventils vor dem Zwischenspeicher, ein hinreichend großes Leck in der Leitung und der Ausfall der Absperrung der Wasserstoffleitung unterstellt. Der Strömungswiderstand im Rückschlagventil wurde bei der Ermittlung der Leckrate konservativ vernachlässigt. Je nach der Art des Versagens des Rückschlagventils ist mit unterschiedlichen Strömungswiderständen und somit einer geringeren maximalen Leckrate zu rechnen. Entsprechend länger dauert es, bis der Zwischenspeicher entleert ist. Im Fluchtgang treten dann geringere Wasserstoffkonzentrationen - allerdings über eine größere Zeitspanne - auf.

Ein voller Zwischenspeicher (150 Nm^3 , 7 bar) entleert sich über das Leck innerhalb von 42 Minuten (Abb. 6.2.2.4-1). Untersucht wurden 3 Fälle mit unterschiedlichen Umgebungstemperaturen von

5, 20 und 35°C und einer Anfangsraumtemperatur der Luft und der Wände von 20°C.

Bereits nach einigen Sekunden würde der oberhalb der H₂-Leitungen angebrachte Ex-Melder die Leckage detektieren und eine automatische Abschaltung der Anlage auslösen. Dabei wird die Leitung zum Zwischenspeicher abgesperrt und damit die Leckage beendet.

Unterstellt man das Versagen der Absperrung, so entleert sich der Zwischenspeicher in den Fluchtgang. Durch die anfänglich hohe Leckrate von 600 Nm³/h steigt die Wasserstoffkonzentration im Fluchtgang oberhalb der Leckstelle rasch an. Bereits nach 10 - 20 Sekunden wird die untere Zündgrenze (4 %) überschritten und nach ca. 3 Minuten die maximalen Werte von 15 - 17 %, je nach Außentemperatur, erreicht (Tab. 6.3.1-1).

Im ungünstigsten Fall (Sommerbetrieb 35°C) liegen für eine Zeitspanne von 45 Minuten zündfähige Konzentrationen vor. Für 15 Minuten werden dabei Konzentrationen von 12 % überschritten.

Bei einer gegenüber dem Fluchtgang um 15°C niedrigeren Umgebungstemperatur wird die untere Zündgrenze aufgrund des höheren Naturkonvektionsdurchsatzes bereits nach 30 Minuten wieder unterschritten und die Zeitspanne für Konzentrationen oberhalb 12 % reduziert sich auf 8 Minuten. Im unteren Bereich des Fluchtanges bilden sich praktisch keine zündfähigen Gemische.

Konservativ abgeschätzt beträgt die maximale Wasserstoffmenge im Fluchtgang knapp 0,75 kg.

6.3.2 Leckagen in der Leitung Hochdruckspeicher - Brennstoffzelle

Die Leitung von den Hochdruckspeichern zur Brennstoffzelle ist nur bei Betrieb der Brennstoffzelle geöffnet. Unterstellt wird bei "Winterbetrieb" eine aufwärts gerichtete natürliche Belüftung des Fluchtanges (Umgebungstemperatur niedriger als die Raumtemperatur). Bei den Rechnungen wird konservativ von gleichen Raum- und Umgebungstemperaturen ausgegangen, so daß nur die Wasserstoffkonzentration im Fluchtgang den natürlichen Luftwechsel bestimmt.

In Kapitel 5.5 wird mit einer geringen Wahrscheinlichkeit eine Lüftungsblockade durch extreme Witterungseinflüsse (extremer Schneefall oder Eisregen) unterstellt. Mit Hilfe von Parameterrechnungen für gleichmäßig verringerte Strömungsquerschnitte aller drei Lüftungsöffnungen wird der Einfluß von Teilblockaden auf die Wasserstoffkonzentration im Fluchtgang abgeschätzt. Am ungünstigsten sind dabei Belüftungsreduzierungen, die während der gesamten Leckagedauer zünd- bzw. detonationsfähige Wasserstoff-Luftgemische verursachen.

In allen betrachteten Fällen würde der oberhalb der Rohrleitungen angeordnete Ex-Melder die Leckage detektieren und die Abschaltung der Anlage sowie die Absperrung der Gasleitung auslösen. Die Leckagen wären damit frühzeitig beendet, Wasserstoffkonzentrationen oberhalb von 4 % entstünden allenfalls bei hohen Leckraten lokal für einen sehr begrenzten Zeitraum. Bei den Berechnungen wird die Absperrung der Leitung als ausgefallen betrachtet.

6.3.2.1 Kleines Leck

Als Leckrate für ein kleines Leck wird der obere Grenzwert von $10 \text{ Nm}^3/\text{h}$ zugrunde gelegt (siehe Kapitel 5.5).

Die maximalen Wasserstoffkonzentrationen bei natürlicher Belüftung liegen mit 1,7 % deutlich unterhalb der unteren Zündgrenze (Tab. 6.3.1-1). Durch den Ex-Melder oberhalb der Wasserstoffrohrleitungen würde die Leckage unabhängig vom Leckort spätestens innerhalb von 1-2 Minuten erkannt und der Störfall durch automatische Absperrung der Gasleitung beendet.

Parameterrechnungen zeigen, daß erst bei einer Blockierung aller Lüftungsquerschnitte um mehr als 75 % zündfähige Wasserstoff-Luft-Gemische in der oberen Hälfte des Fluchtanges vorkommen können. Die Zeitspanne bis zum Erreichen der unteren Zündgrenze (4 %) nimmt dabei von etwas über 1 h bei 75 % Blockade auf etwa 20 min bei 95 % Blockade ab. Erst bei Restöffnungsflächen von weniger als 2,5 % bilden sich detonationsfähige Gemische (Abb. 6.3.2-1).

6.3.2.2 Mittleres Leck

Der Bereich der mittleren Lecks umfaßt Leckraten von 10-120 Nm³/h (siehe Kapitel 6.4.2.3). Diese Leckagen werden zusätzlich über die Durchflußmengenüberwachung erkannt und durch automatische Leitungsabspernung beendet. Die weiteren Betrachtungen unterstellen den Ausfall der Abspernung.

Durch Variation der Leckraten wurde festgestellt, daß bei aufwärts durchströmtem Fluchtgang bei Leckagen von mehr als 40 Nm³/h mit zündfähigen Gemischen (> 4 % H₂) gerechnet werden muß. Geht man von der maximalen Rate (120 Nm³/h) aus, so sind die mit 3000 Nm³ komplett gefüllten Hochdruckspeicher nach 25 h entleert. Die Wasserstoffkonzentrationen in Fluchtgang steigen innerhalb von 20-30 Sekunden über 4 %, um sich nach ca. 3 Minuten oberhalb der Rohrleitungen auf ihren konstanten, maximalen Wert von bis zu 7 % zu stabilisieren (Tab. 6.3.1-1). Während der gesamten Zeit befinden sich maximal etwa 0,3 kg Wasserstoff im Fluchtgang. Nach Beendigung der Leckage wird innerhalb von wenigen Minuten die untere Zündgrenze (4 %) wieder unterschritten. Im unteren Teil des Fluchtanges bilden sich keine zündfähigen Gemische.

Bei einer Blockade der Lüftungsöffnungen erhöht sich die Wasserstoffkonzentration im Fluchtgang. Parameterrechnungen zeigen, daß bei einer Querschnittsreduzierung auf weniger als 25 % mit detonationsfähigen Gemischen gerechnet werden muß. Bei Restöffnungen von etwa 10 % stellt sich ein stöchiometrisches Gemisch ein. Erst bei praktisch vollständiger Blockierung der Lüftungsöffnungen steigen die H₂-Konzentrationen auf über 75 % und verlassen somit den Zündbereich von Wasserstoff-Luftgemischen (Abb. 6.3.2-1).

Bei nicht ausgefallenem Ex-Melder würde praktisch unmittelbar nach Leckagebeginn die Anlage abgeschaltet und durch Abspernung der Hochdruckspeicher die Leckage beendet werden. Die bis dahin eingeströmte geringe Wasserstoffmenge wird sich bei stärkerer Blockierung der Lüftungsöffnungen dabei unter der Decke des Fluchtanges sammeln und über längere Zeit örtlich begrenzt für ein zündfähiges H₂-Luftgemisch sorgen.

6.3.3 Zusammenfassung

Leckagen im Fluchtgang werden durch den Ex-Melder und bei mittleren Lecks zusätzlich über die Durchflußmengenüberwachung erkannt. Nur bei Ausfall der Absperrung der Rohrleitung können sich global zündfähige Gemische bilden.

Die vorgesehene natürliche Belüftung des Fluchtanges reicht aus, um bei kleinen Lecks die Wasserstoffkonzentrationen im Fluchtgang sicher unterhalb von 4 % zu halten. Eine Blockade der Lüftungsöffnungen im Sommerbetrieb ist praktisch auszuschließen. Im Winterbetrieb kann es bei extremen Witterungsbedingungen (Kapitel 5) mit einer geringen Wahrscheinlichkeit zu einer Blockade kommen. Erst bei einer Blockierung der Lüftungsöffnungen um mehr als 75 % treten hierbei zündfähige Gemische auf.

Mittlere Lecks im Hochdruckspeicher/Brennstoffzellen-Pfad werden durch die Durchflußmengenüberwachung unmittelbar erkannt und durch Abschalten der Anlage beendet. Bei einem Ausfall der Absperrung und maximaler Leckrate von $120 \text{ Nm}^3/\text{h}$ bilden sich in der oberen Hälfte des Fluchtanges über die gesamte Leckagezeit zündfähige Gemische von 7 %. Parameteruntersuchungen mit dem einfachen 1-Zonen Verbrennungsmodell des Rechen-Codes RALOC ergeben je nach gewählter Verbrennungsgeschwindigkeit (10-100 m/s) Druckspitzen von 1,2 bis 2,5 bar absolut. Bei einer Zündung ist daher mit größeren Schäden bis hin zur Zerstörung des Fluchtanges zu rechnen.

Bei einer Blockierung der Lüftungsöffnungen im Winterbetrieb erhöhen sich die Wasserstoffkonzentrationen bis hin zu detonationsfähigen Gemischen. Bei einer möglichen Zündung käme es dann zu einer Detonation mit einer Zerstörung des Fluchtanges und Schäden in angrenzenden Räumen.

Die höchsten Wasserstoffkonzentrationen im Fluchtgang stellen sich bei einem großen Leck im Elektolyseur/Zwischenspeicher-Pfad bei Rückwärtsentleerung des Zwischenspeichers ein. Dabei liegen die Wasserstoffkonzentrationen, je nach Randbedingung, in einem Zeitfenster von 8-15 Minuten oberhalb von 12 % (Maximalwert 15 - 17 %). Kommt es in diesem Zeitraum zu einer Zündung, so ist infolge von Turbulenzen und Flammbeschleunigung mit einem Über-

gang der Deflagration in eine Detonation (DDT) /Rehm2/ und maximalen Detonationsdrücken über 10 bar zurechnen. Als Folge käme es dann zu einer Zerstörung des Fluchtanges und Schäden in den angrenzenden Räumen.

Fall	Temperaturen Außen/ Fluchtgang (°C)	Zeit bis zum Erreichen von Flucht- gang			Zeitspanne der H ₂ -Konzentration oberhalb von		Maximale Wasserstoff- Konzentration %
		unter der Decke 0,4 %	0,8 %	4 %	4 %	12 %	
Leckagen in der Leitung Elektrolyseur - Zwischenspeicher							
Kleines Leck (7 Nm ³ /h)	35/20 20/20	2-3 h ≈ 4 min	2-3 h 5 min	---	---	---	2,0 % - 3 h 1,3 % - 15 min
Großes Leck (600 → 0 Nm ³ /h)	35/20 20/20 5/20	< 10 s < 10 s < 10 s	< 10 s < 10 s < 10 s	10 s 10 s 10 s	45 min 34 min 30 min	14 min 10 min 8 min	17,4 % - 3 min 16,0 % - 3 min 15,0 % - 3 min
Leckagen in der Leitung Hochdruckspeicher - Brennstoffzelle							
Kleines Leck (10 Nm ³ /h)	20/20	3 min	4 min	---	---	---	1,7 % - 15 min
Mittleres Leck (120 Nm ³ /h)	35/20 20/20 5/20	110 s 110 s 110 s	120 s 120 s 120 s	140 s 160 s 125 s	≈ 25 h ≈ 25 h ≈ 25 h	---	8,7 % - 7 min 7,2 % - 9 min 6,6 % - 10 min

Tab. 6.3.1-1: Maximale Wasserstoffkonzentrationen im Fluchtgang bei Lecks mit natürlicher Belüftung

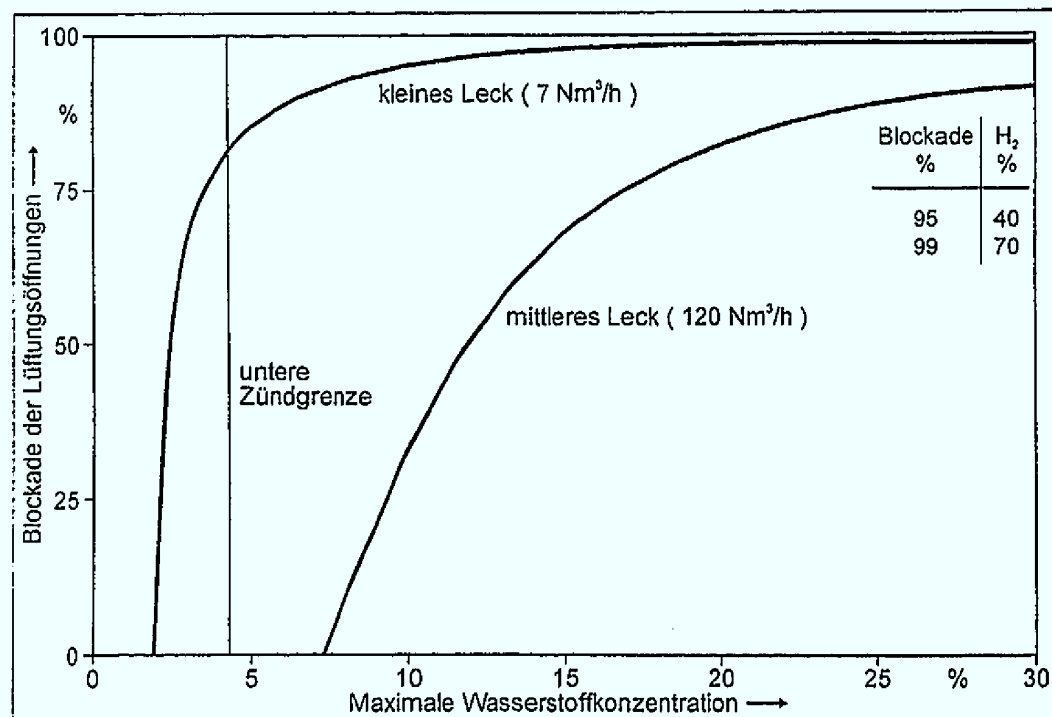


Abb. 6.3.2-1: Maximale Wasserstoffkonzentrationen im Fluchtgang bei 'Winterbetrieb' in Abhängigkeit vom Blockierungsgrad der Lüftungsöffnungen

6.4 Wasserstoff-Freisetzen im Freien

6.4.1 Leckraten

Die Wasserstoffspeicher im Freien bestehen aus 18 Einzelbehältern, die in zwei Batterien ($8 \times 1,6 \text{ m}^3$ und $10 \times 1,4 \text{ m}^3$) angeordnet sind (Kapitel 4.3.3.1, Abbildung 6.4.1-1). Bei einem Druck von 120 bar beträgt der Inhalt ca. $3000 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2$. Die Behälter einer Batterie sind jeweils durch eine Rohrleitung (Innendurchmesser 21 mm) verbunden. Die gemeinsame Leitung zur Hochdruckreduzierstation hat ebenfalls einen Durchmesser von 21 mm. In der Anschlußleitung jedes Behälters befindet sich ein Handabsperrventil. Bei erkannten kleinen Leckagen mit hinreichend langen Leckzeiten besteht somit die Möglichkeit, durch Absperrung der betroffenen Hochdruckbehälter von Hand die Leckage zu beenden. Bei einer Leckage ohne Absperrung sind aufgrund der Verbindungsleitung stets alle 18 Behälter betroffen.

Bei den Abschätzungen zur Ermittlung der Leckraten wird konservativ von gefüllten Speichern ausgegangen. Untersucht wurden vier Fälle mit unterschiedlichen Leckquerschnitten und Positionen. Bei einem Abriß von Anschlußleitungen besteht aufgrund der schnellen Behälterentleerung (wegen des großen Leckquerschnitts) für eine Handabsperrung nicht genügend Zeit zur Verfügung, so daß es stets zur vollständigen Freisetzung des Wasserstoffinventars aus den Hochdruckspeichern kommt.

Die Leckraten werden mit Hilfe eines einfachen Programmes zur Ermittlung von Ausströmraten für ideale Gase bei unter- und überkritischen Druckverhältnissen ermittelt. Die Druckverluste in der Rohrleitung werden iterativ berücksichtigt.

Fall 1: Bruch der Sammelleitung

Alle Wasserstoffspeicher werden über ein 1F-Leck ($d_i = 21 \text{ mm}$) entlastet. Die mittlere Rohrlänge von den Behältern zum Leck beträgt 5,5 m. Innerhalb von ca. 11,5 Minuten ist der Ausströmvorgang abgeschlossen. Die anfängliche Leckrate, die schnell abfällt, beträgt etwa $23 \text{ Nm}^3/\text{s}$.

Fall 2: Bruch der Verbindungsleitung zwischen den beiden Behälterbatterien

Jede Batterie wird über ein 1F-Leck entlastet. Durch die Verdopplung des Leckquerschnitts reduziert sich die Ausströmzeit gegenüber Fall 1 auf etwas mehr als 5 Minuten für Batterie 1 und auf ca. 6 Minuten für Batterie 2.

Fall 3: Ein Behälter von Batterie 1 versagt spontan

Durch Folgeschäden (Abriß der Verbindungsleitung in der betroffenen Batterie und zwischen den beiden Batterien) erfolgt ein paralleles Entlasten von jeweils 3 bzw. 4 Behältern sowie der 2 Batterien über 1F-Lecks. Beim Behälterversagen werden spontan ca. 112 Nm^3 freigesetzt. Die Gruppen mit 3 bzw. 4 Behältern entleeren sich in 1,5 bzw. 2,5 Minuten, während die Druckentlastungszeit von Batterie 2 (wie im Fall 2) ca. 6 Minuten beträgt.

Fall 4: Abriß aller Behälteranschlußleitungen als 'worst case'

Jeder der 18 Behälter hat also ein 1F-Leck. Innerhalb von 30 Sekunden wird hierbei der gesamte Speicherinhalt von 3000 Nm^3 freigesetzt.

Bei der Ausströmung treten Rückstoßkräfte von anfänglich ca. 2000 N auf, die rasch innerhalb von 4 Sekunden auf 1000 N und nach 10 Sekunden auf unter 400 N abfallen. Die größeren Wasserstoffbehälter ($1,6 \text{ m}^3$) haben ein Eigengewicht von 2600 kg, während die kleineren Behälter jeweils etwa 1050 kg wiegen. Sie liegen lose, leicht nach hinten geneigt, in den Lagergestellen. Einer Verlagerung der Behälter durch den Rückstoß des ausströmenden Wasserstoffs wirken somit nur die Reibungskräfte in der Auflagerung entgegen. Eine grobe Abschätzung ergab, daß bei den schwereren Behältern mit keiner Verlagerung gerechnet werden muß. Bei den leichteren Behältern hingegen ist der Rückstoß in den ersten Sekunden größer als der Reibungswiderstand, wodurch es zu einer Verlagerung innerhalb des Gestells kommt.

6.4.2 Explosion im Freien

Zur genaueren Berechnung der Auswirkungen von Wasserstoffexplosionen sind aufwendige Analysen erforderlich. In /Verfondern/ werden die Phänomene und Berechnungsmethoden zur Dispersion und Explosion freier Wasserstoff-Gaswolken ausführlich diskutiert. Für die Berechnung stehen als 'state-of-the-art' Rechencodes CFD-Codes (Computerized Fluid Dynamics), wie z.B. POLLUT und IFSAS-3D Version 1.4, sowohl für die Dispersion als auch für die Zündung zur Verfügung.

In Rahmen dieser Arbeit werden wegen des großen Aufwandes genauerer Berechnungen nur einfache Abschätzungen mit dem TNT-Äquivalent Modell zur Gaswolkenexplosion durchgeführt. Dabei wird unterstellt, daß die Auswirkungen einer Gasexplosion durch die Detonation einer TNT-Menge gleichen Energieinhalts abgebildet werden können. Trotz einiger Schwächen dieses Modells (anderer Zeitlauf des Drucks, Punktquelle, grundsätzliche Detonation, keine Berücksichtigung von Reflexionen) lassen sich so konservativ die Auswirkungen auf die Umgebung mit relativ geringem Aufwand zumindest abschätzen.

Vergleiche von mit dem TNT-Modell ermittelten Ergebnissen mit Nachrechnungen von Experimenten mit dem eindimensionalen Detonationscode DET1D /Rehm3/ zeigten, daß außerhalb der Gaswolke die mit dem TNT-Modell berechneten Drücke oberhalb der experimentellen und der DET1D Ergebnisse lagen.

Zu beachten ist außerdem, daß im Freien bei unverdämmten Gaswolken in einer hindernisfreien Umgebung eine Detonation gegenüber einer milderer Deflagration der eher unwahrscheinliche Fall ist.

In Kapitel 5.6 wurden mit Hilfe des TNT-Modells und in der Literatur üblicher empirischer 'Faustformeln' /Husmann/ umfangreiche Abschätzungen für verschiedene Energiefreisetzungen durchgeführt. Dort wurden auch anhand von Schadensradien die Auswirkungen auf die Gebäude in der Umgebung der Wasserstoffanlage diskutiert. Dabei wurden die in Kapitel 5.6.1.5 ermittelten Störfallpfade entsprechend ihrer Energiefreisetzung einer von 4

Gruppen (12, 40, 360, 1700 kg TNT-Äquivalent; 1 Nm³ H₂ entspricht 2.02 kg TNT) zugeordnet.

Für diese 4 Gruppen wurden mit Hilfe eines verbesserten TNT-Modells (Berücksichtigung von Reflexion am Boden und Gebäudewänden) des Ray Tracer Moduls des IFSAS-3D CODE Version 1.4 ergänzende Rechnungen durchgeführt. Abbildung 6.4.2-1 zeigt die den Rechnungen zugrunde liegende Geometrie und die Position der Detonationquelle, die in 3 m Höhe über dem Boden angeordnet wurde. Die Gebäude wurden durch einfache Wände mit einer einheitlichen Höhe von 18 m (entspricht der Höhe der IEV-Halle) abgebildet. Kleinere Hindernisse und Bäume, die zum Teil abschirmend wirken, können nicht erfaßt werden.

Die zeitliche Entwicklung des Drucks an der Wand der IEV-Halle, der Zentralwerkstatt, eines Nebengebäudes und des Bibliotheksgebäudes ist für die 4 Gruppen in den Abbildungen 6.4.2-2 bis 6.4.2-5 dargestellt. Die berechneten maximalen Reflexionsdrücke sind etwa doppelt so hoch wie die in Kapitel 5.6 ohne Berücksichtigung der Reflexion abgeschätzten.

Bei einer Vergleichsrechnung mit dem Ray Tracer Modul ohne Reflexion waren die Ergebnisse im wesentlichen mit denen in Kapitel 5.6 ermittelten Drücken identisch.

Bei einer deflagrativen Verbrennung der Gaswolke oder einem Abfackeln des Wasserstoffs sind die Druckbelastungen geringer.

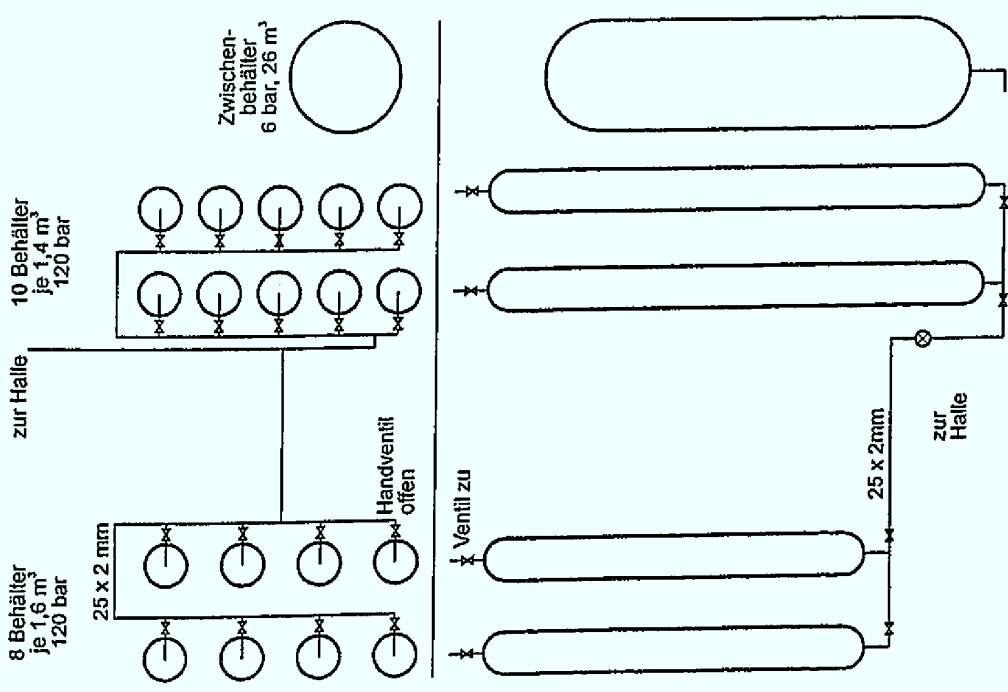


Abb. 6.4.1-1: Lageskizze der Wasserstoffbehälter außerhalb der Halle

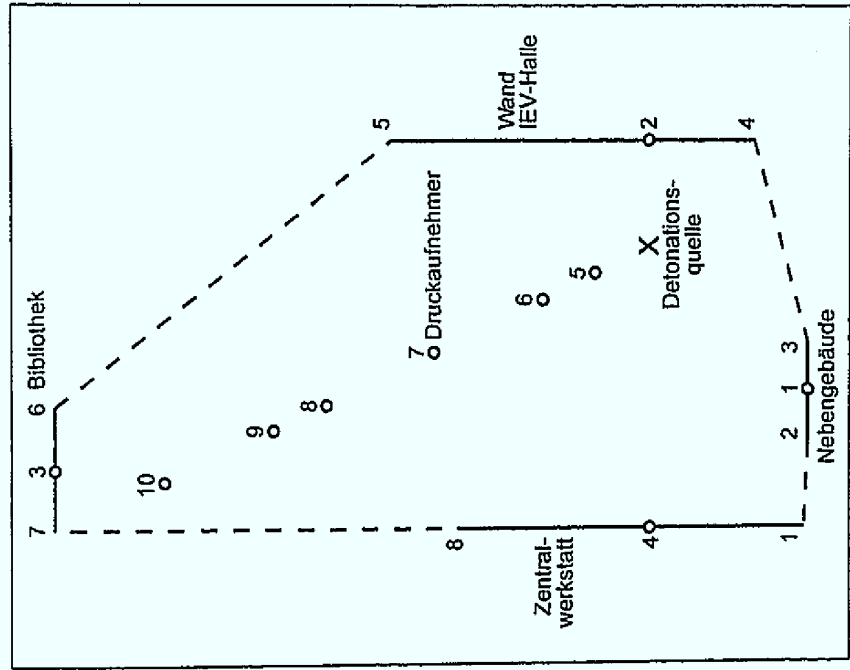


Abb. 6.4.2-1: Geometrie für die Berechnung der Explosion im Freien mit Hilfe des Ray-Tracer Moduls vor IFSAS-3D

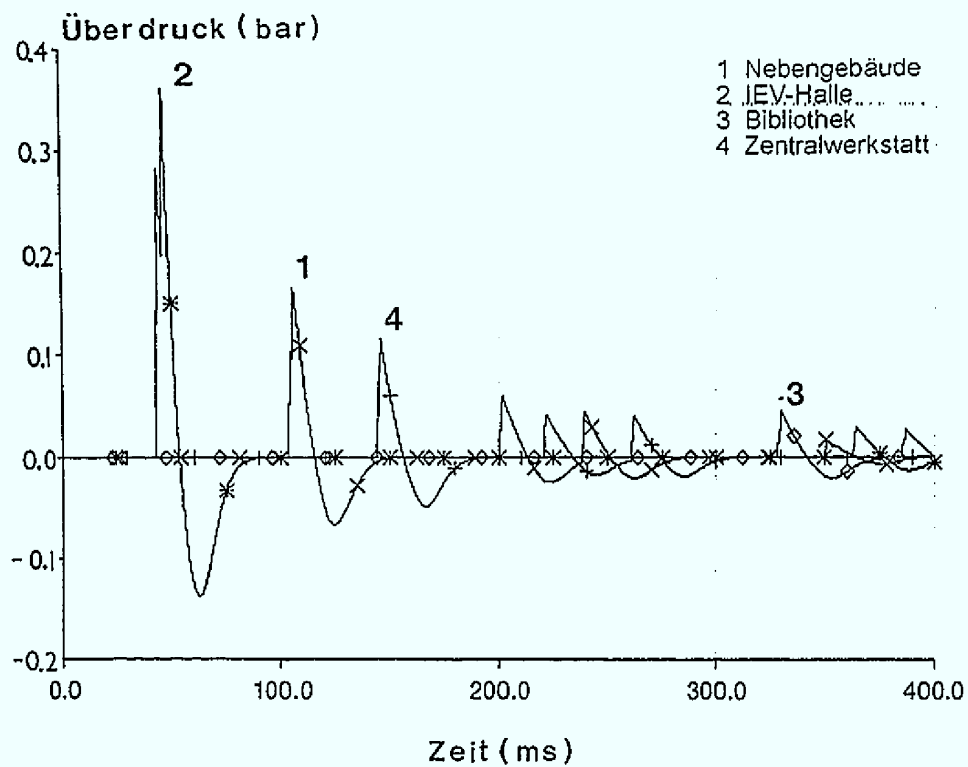


Abb. 6.4.2-2: Druckverlauf auf den Gebäudewänden bei einer Detonation von 12 kg TNT-Äquivalent

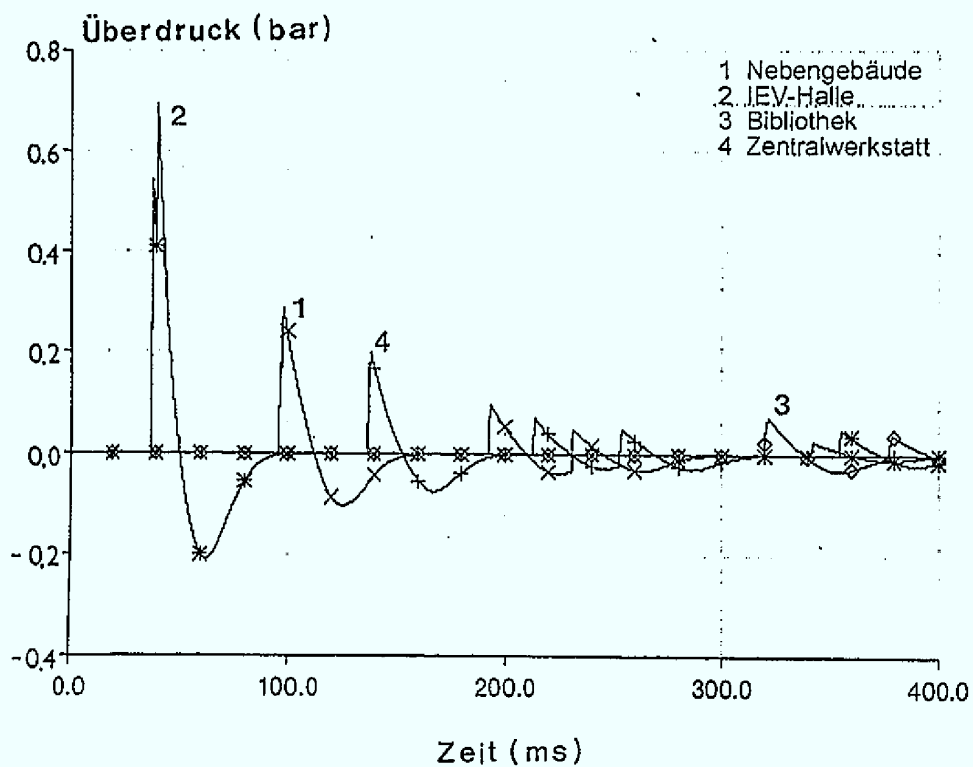


Abb. 6.4.2-3: Druckverlauf auf den Gebäudewänden bei einer Detonation von 40 kg TNT-Äquivalent

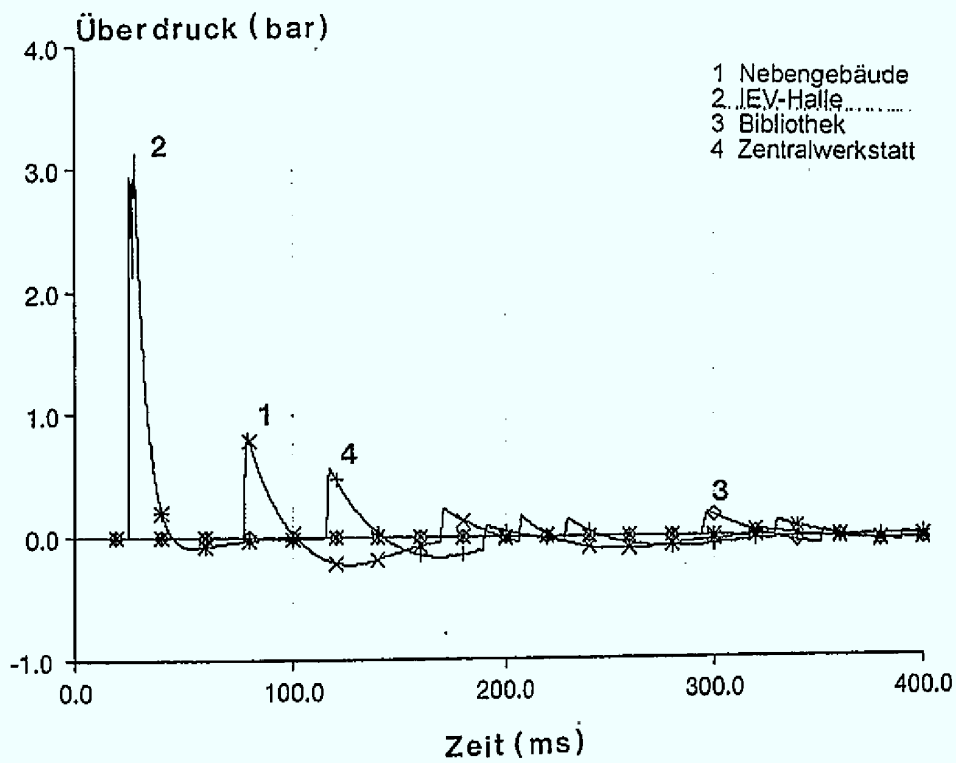


Abb. 6.4.2-4: Druckverlauf auf den Gebäudewänden bei einer Detonation von 360 kg TNT-Äquivalent

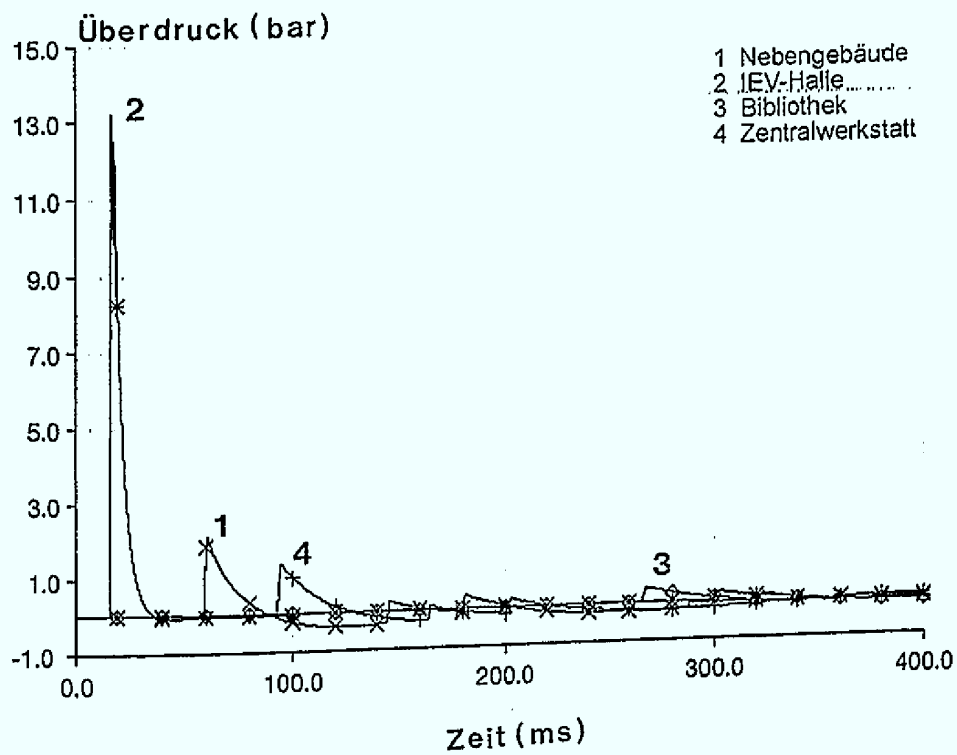


Abb. 6.4.2-5: Druckverlauf auf den Gebäudewänden bei einer Detonation von 1700 kg TNT-Äquivalent

7. Ergebniszusammenfassung und -bewertung

Die Zuverlässigkeits- und Risikountersuchung der Photovoltaik-Wasserstoff-Brennstoffzellen-Demonstrationsanlage PHOEBUS Jülich (Abb. 7-1) zeigt, daß Ereignisabläufe mit H_2 -Freisetzungen aus den Hochdruckspeichern ins Freie mit anschließender Explosion des H_2 -Luftgemisches das Umgebungsrisiko dominieren (Abb. 7-2).

Weitere Risikobeiträge liefern störfallbedingte H_2 -Freisetzungen mit nachfolgenden Explosionen innerhalb der Halle und des Fluchtanges (Abb. 7-2). Allerdings lassen sich die Energiefreisetzungen zur Zeit nur konservativ abschätzen.

Das geringe Individualrisiko in der Umgebung der Anlage (etwa $E-5/a$), das im wesentlichen vom Speicherversagensereignis 2 (Abb. 7-2) bestimmt wird, liegt bei einigen Prozent der Werte, die in der Literatur für durchschnittliche Risiken infolge Berufstätigkeit angegeben werden. Zum Vergleich: Sehr schwere Erdbeben (Intensität VIII-IX), die großflächig massive Gebäudeschäden verursachen, liegen für den KFA-Standort mit $1,0E-5/a$ in einem ähnlichen Häufigkeitsbereich.

Häufigere Störfallabläufe (Abb. 7-2, Ereignisse 1 und 3) erfassen wegen der geringen Energiefreisetzungen - außer der Anlagenhalle selbst - keine Einrichtungen und Gebäude mit ständig anwesendem Personal.

Bedienungsfehler spielen bei der PHOEBUS-Anlage eine untergeordnete Rolle. Der Betrieb der Anlage und die Auslösung von Schutzaktionen sind vollautomatisiert. Der Elektrolyseur und die Brennstoffzelle werden zudem über autonome Überwachungseinrichtungen automatisch abgeschaltet, falls Prozeßparameter Grenzwerte überschreiten.

Störungen in der Energieversorgung der Anlage durch Ausfälle des Netzes sind für die Sicherheit der Anlage unkritisch. Durch Abfall der Haltemagnete schließen alle pneumatischen Absperrventile 'fail safe'. Nach erfolgter Abschaltung über die batteriegepufferte Betriebssteuerung müssen für den sicheren Einschluß des Wasserstoffs keine aktiven Einrichtungen (z.B. Kühlung) dauerhaft funktionieren und mit Energie versorgt werden.

Der Flugzeugabsturz auf die Speicheranlage mit der Folge großer H_2 -Freisetzungen ist vernachlässigbar selten. Schwere Erdbeben verursachen maximal den Abriß von Anschlußleitungen. Sie sind durch andere häufigere Ereignisse gleichen Schadens abgedeckt. Dies gilt auch für extreme Erdbeben (makroseismische Intensität IX) hinsichtlich Behälterschäden.

Erdbebenbedingte Zerstörungen der Halle erschweren die Bildung zündfähiger Gaskonzentrationen. Andere, durch häufigere Ereignisse verursachte H_2 -Lecks decken erdbebenbedingte Lecks daher in zweifacher Hinsicht ab.

Die vom Standort abhängigen, vermeidbaren Druckwellenereignisse wurden nicht untersucht.

Die Eintrittshäufigkeiten der H_2 -Freisetzungen und deren Ursachen sind in Tab. 7-1 angegeben.

Folgende Störfälle wurden im Detail untersucht:

H_2 -Störfälle innerhalb von Komponenten

Vermischungen der Produktgase Wasserstoff und Sauerstoff, die innerhalb der Anlagenkomponenten durch Prozeßfehler oder innere Leckagen verursacht werden, beschränken sich in ihren Auswirkungen wegen der geringen gehandhabten Mengen sowohl im Elektrolyseur als auch in der Brennstoffzelle auf den unmittelbaren Bereich der Komponenten und stellen höchstens ein Arbeitsplatzrisiko dar. Eine Ausweitung dieser Störfälle ist aufgrund interner Schutzeinrichtungen (z.B. Gas- und Drucküberwachung mit Abschaltung und Absperrung der Komponenten) unwahrscheinlich.

Gleiches gilt auch für Lecks in der Umschließung der Komponenten, insbesondere der Brennstoffzelle, hervorgerufen beispielsweise durch mit zu hohem Druck einströmenden Wasserstoff aufgrund eines Versagens der Druckreduzierung.

Wasserstoffleckagen in die Halle

Das Spektrum möglicher Wasserstoff-Leckagen wurde entsprechend anlagentechnischer Randbedingungen in drei Bereiche unterteilt:

- Kleine Lecks, welche die maximale Wasserstoffproduktionsrate im Elektrolyseur ($7 \text{ Nm}^3/\text{h}$) einschließen und bis zum Grenzwert der Durchflußüberwachung von $10 \text{ Nm}^3/\text{h}$ reichen;

- Mittlere Lecks, die den Bereich von $10 \text{ Nm}^3/\text{h}$ bis zur maximal möglichen Ausströmrates von $120 \text{ Nm}^3/\text{h}$ aus den Speicherbehältern bei funktionierender Hochdruckreduzierung umfassen;
- Große Lecks, die das Versagen der Hochdruckreduzierung voraussetzen und bei funktionierender Überdrucksicherung zu einer maximalen Leckrate von $600 \text{ Nm}^3/\text{h}$ führen.

Kleine Wasserstofflecks führen auch bei vollständigem Ausfall der Schutzaktionen (Gasabspernung, Zwangsentlüftung) wegen ausreichender natürlicher Hallenentlüftung und wegen der übergroßen Halle nicht zu zündfähigen Gaskonzentrationen und sind - von einem möglichen Arbeitsplatzrisiko abgesehen - daher nicht risikorelevant.

Nicht beherrschte mittlere Wasserstofflecks (Ausfall von Gasabspernung und Hallen-Zwangsentlüftung) führen je nach Wirksamkeit der natürlichen Hallenentlüftung zu globalen H_2 -Konzentrationen zwischen 2,2 und 3,4 Vol.% (Tab. 7-2). Lokal können höhere Konzentrationen vorliegen. Die Eintrittshäufigkeit dieses Störfalls liegt bei $1,5\text{E-}8/\text{a}$ (Abb. 7-2, Nr. 5).

Dagegen können nicht beherrschte große Wasserstofflecks (Abb. 7-2, Nr. 6) je nach Wirksamkeit der natürlichen Hallenentlüftung auch global nach 2,2-4,8 Stunden zu zündfähigen Konzentrationen mit maximal 4,3 Vol.% führen (Tab. 7-3).

Es wurden drei Störfallablaufvarianten betrachtet. Die Tabelle 7-4 enthält neben den Ergebnissen und Randbedingungen der drei Abläufe die Beschreibung der ungünstigsten Variante. Aufwendige Explosions- und Schadensberechnungen wurden angesichts der geringen Eintrittshäufigkeit ($< \text{E-}8/\text{a}$) dieses Störfalls nicht durchgeführt.

Wasserstoffleckagen in den Hallen-Fluchtgang

- Kleine Lecks ($< 7\text{-}10 \text{ Nm}^3/\text{h H}_2$)

Kleine Wasserstoffleckagen in den Hallen-Fluchtgang (Abb. 7-1) führen auch bei ausbleibender Abspernung der Brennstoffzellen-Gaszuleitung oder - bei Lecks in der Abströmleitung des Elektrolyseurs - trotz ausbleibender Anlagenabschaltung wegen ausreichend natürlicher Raumentlüftung nicht zu zündfähigen Gaskon-

zentrationen. Nur bei einer Blockade der Lüftungskanäle ($\geq 75\%$) würde die untere Zündgrenze von 4 Vol.% nach etwa einer halben Stunde erreicht und nach mehr als einer Woche - bei Fortdauer der Blockade - erst wieder unterschritten. Eine solche Blockade ist unwahrscheinlich, bei extremen Witterungseinflüssen (Eisregen, Schneechaos) aber nicht völlig auszuschließen. Die Häufigkeit dieses Störfalls liegt bei $1,7E-7/a$.

- Mittlere Lecks ($10-120 \text{ Nm}^3/h \text{ H}_2$)

Mit einer Häufigkeit von $4,2E-7/a$ führen nichtabgesperrte mittlere Lecks in der Zuführungsleitung zur Brennstoffzelle bereits nach weniger als einer Minute zu zündfähigen H_2 -Konzentrationen, die innerhalb der nächsten 3 Minuten auf einen konstanten Wert von 7-9 % - je nach Wirksamkeit der natürlichen Lüftung - ansteigen, der bis zur Entleerung der Speicher nach 25 Stunden erhalten bleibt. Falls eine Zündung erfolgt, wird weniger als 0,5 kg Wasserstoff verbrannt (Abb. 7-2, Nr. 8).

- Große Lecks ($120-600 \text{ Nm}^3/h \text{ H}_2$)

Bei einem Leck in der Abströmleitung vom Elektrolyseur zum Zwischenspeicher sind hohe Leckraten nur bei Rückwärtsentleerung des Zwischenspeichers möglich (Abb. 7-2, Nr. 7). Der maximale Inhalt von 150 Nm^3 strömt mit einer anfänglichen Rate von $600 \text{ Nm}^3/h$ innerhalb von 45 Minuten aus. Nach ca. 3 Minuten werden detonationsfähige H_2 -Konzentrationen von maximal 17,4 % erreicht; sie sinken innerhalb der nächsten etwa 10 Minuten unter 12 %. Mit fallender Leckrate und natürlicher Raumentlüftung wird nach spätestens 45 Minuten die Zündgrenze von 4 % wieder unterschritten.

Die Störfallhäufigkeit ist vernachlässigbar selten ($<E-8/a$). Der ausgewiesene kurze Gefährdungszeitraum ist aufgrund des zwischen 0 und 100 % schwankenden Speicherfüllungsgrades als oberer Grenzwert anzusehen.

H₂-Freisetzungen im Freien

Durch Leckagen und Undichtigkeiten an Speicherbehältern verursachte und somit relativ langsame Freisetzungen führen nicht zur Bildung zündfähiger, die Umgebung gefährdender Gaswolken. Für die Wasserstoff-Freisetzung in die Umgebung stellt daher das plötzliche Bersten eines der Speicherbehälter das risikorelevante Ereignis dar.

- Schadensermittlung

Vom plötzlichen Versagen eines Hochdruck-Speicherbehälters ausgehend, wurde bei der Störfallablaufanalyse zunächst die unmittelbare, bodennahe Zündung des freigesetzten Wasserstoffs (15 kg) aufgrund der durch Trümmerstücke verursachten Funkenbildung unterstellt. Die theoretisch mögliche Energiefreisetzung bei stöchiometrischer Gemischzündung wird in der Praxis nicht erreicht. Daher wurden von den 15 kg H₂ lediglich Anteile (25, 10 und 1 %) betrachtet, die bei Zündung Folgeschäden in den beiden Behälterbatterien verursachen können, insbesondere an den Anschlußleitungen durch Verlagerung der Behälter. Bei einer schnellen Entleerung der betroffenen Behälter (30 sec) werden in Abhängigkeit von der Wetterlage Folgeexplosionen mit begrenzten Energiefreisetzungsanteilen (< 25 %) berücksichtigt. Für die Abschätzung der Explosionsfolgen wurde das einfache TNT-Äquivalentmodell angewendet. Es unterstellt, daß die Auswirkungen einer Gasexplosion durch die Detonation einer TNT-Menge gleichen Energieinhaltes abgebildet werden kann. Ausgehend von diesem Modell wurden für die verschiedenen Explosionsenergien (Tab. 7-5) Schadensradien ermittelt.

Diese Radien markieren die Grenzen definierter Explosionsdrücke, für deren Folgeschäden Erfahrungswerte vorliegen (Tab. 7-5).

- Störfallkategorien und Häufigkeiten

Die Ergebnisse der Ereignisablaufanalysen lassen sich zu vier Gruppen mit jeweils ähnlichen Auswirkungen zusammenfassen. Die Tabelle 7-5 weist die zu jeder Gruppe gehörenden Ereignispfade, deren Häufigkeit, die Summenhäufigkeit der Pfade und die Reichweiten der vier betrachteten Schadensbilder aus.

Die beiden etwa gleich häufigen Ereignisgruppen 1 und 2 (2,3 bzw. $1,8E-5/a$) zeigen aufgrund der niedrigen Energiefreisetzung (12 bzw. 30-105 kg TNT-Äquivalent) die geringsten Auswirkungen. Nur Personen in unmittelbarer Nähe vom Explosionsort sind direkt gefährdet. Eine sekundäre Gefährdung durch einstürzende Mauern oder vereinzelt durch Scherbenwirkung bei Fensterbrüchen besteht in einem Umkreis von 35 bzw. etwa 100 m.

In der dritten Gruppe ($1,7E-6/a$) sind bei einer Energiefreisetzung von 360-900 kg TNT-Äquivalent der Einsturz der IEV-Halle und Schäden an bis zu 70 m entfernten Gebäuden zu erwarten.

Bei der mit Abstand seltensten Ereignisgruppe 4 ($1,1E-8/a$), die aber die höchsten Energiefreisetzung aufweist (1700 kg TNT-Äquivalent), sind im Umkreis von 50 m Gebäude einsturzgefährdet. Mauereinstürze bzw. Fensterbrüche treten bis in 100 bzw. 300 m auf.

Die Tabelle 7-6 beschreibt die Abläufe der ergebnisbestimmenden Ereignispfade.

Die Abbildung 7-2 stellt die Ergebnisse der betrachteten Störfälle vergleichend dar.

Die Analyseergebnisse beruhen zum Teil auf konservativen Annahmen. Forschungsbedarf besteht hinsichtlich der Zuverlässigkeit passiver Komponenten und der Modellierung von Gasaustauschvorgängen und Gasbränden. Das untypisch große Hallenvolumen erweist sich für die Beherrschung kleiner Lecks als Vorteil. Die Leitungsführung durch den Fluchtgang erfordert dort Schutzmaßnahmen (Lüftung). Die Aufteilung des Wasserstoffs auf viele kleine Behälter erhöht zwar die Leckhäufigkeit, reduziert aber die Konsequenzen.

Rechnet man die Ergebnisse fiktiv auf einen massiven Einsatz solcher photovoltaischer Inselsysteme hoch, wäre bei etwa 25000 vergleichbarer 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 ca. 100 bzw. 250 m, in dessen Außenzonen im Einzelfall noch tödliche Verletzungen durch Scherbenwirkung auftreten könnten (Tab. 7-5).

Allerdings lassen sich die Ergebnisse der Studie wegen einiger Besonderheiten der analysierten Anlage (Bauart, Größe und Lüftungskonzept der Halle, Leistung des Elektrolyseurs, Speicherkonzept) nicht einfach auf zukünftige photovoltaische Inselsysteme übertragen und hochrechnen. Solche Anlagen werden sich aus Kostengründen vor allem durch eine weniger aufwendige Anlagenperipherie von der PHOEBUS-Anlage unterscheiden.

Der Verzicht auf eine Anlagenhalle wird beispielsweise von den Betreibern der Anlage in Neunburg vorm Wald als erstrebenswert angesehen. Dies würde auch die Kosten für Schutzeinrichtungen (Überwachung, Lüftung) reduzieren.

Bei Wegfall einer geschlossenen Halle würden die untersuchten Wasserstoff-Störfälle innerhalb der Halle gegenstandslos. Hält man am Hallenkonzept fest, erhalten diese im Vergleich zur PHOEBUS-Halle eine adäquate Baugröße. Die Lüftung wird geschützt sein. Auch bei 'kleineren' Hallen besteht bei einem vergleichbaren Schutzkonzept nur eine sehr geringe Eintrittshäufigkeit für zünd- bzw. detonationsfähige H_2 -Konzentrationen.

Das Risiko wird vom Versagen eines Druckgasspeichers bestimmt werden. Abweichend von der bewerteten Anlage (18 'kleine' Behälter für zusammen 3000 Nm^3 Wasserstoff) werden künftige Anlagen aus Kostengründen Großspeicher mit höheren Energieinhalten einsetzen. Die Neunburg vorm Wald-Anlage besitzt beispielsweise zwei Speicherbehälter für zusammen 5000 Nm^3 Wasserstoff. Höhere Störfallauswirkungen sind dadurch im Vergleich zur bewerteten Anlage (Tab. 7-5: Ereignisgruppe 4) häufiger (etwa $1E-6/a$ gegenüber ca. $1E-8/a$).

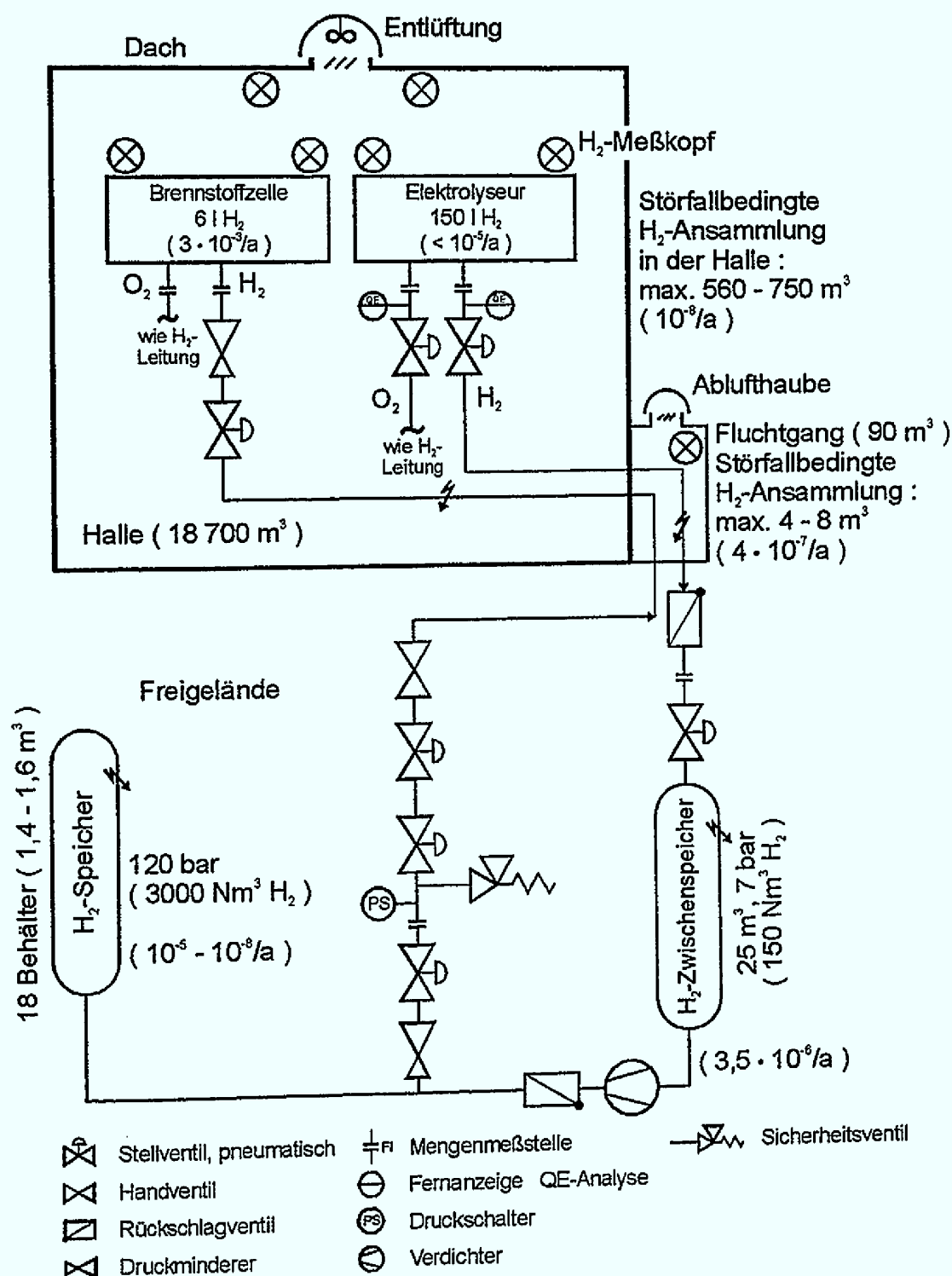
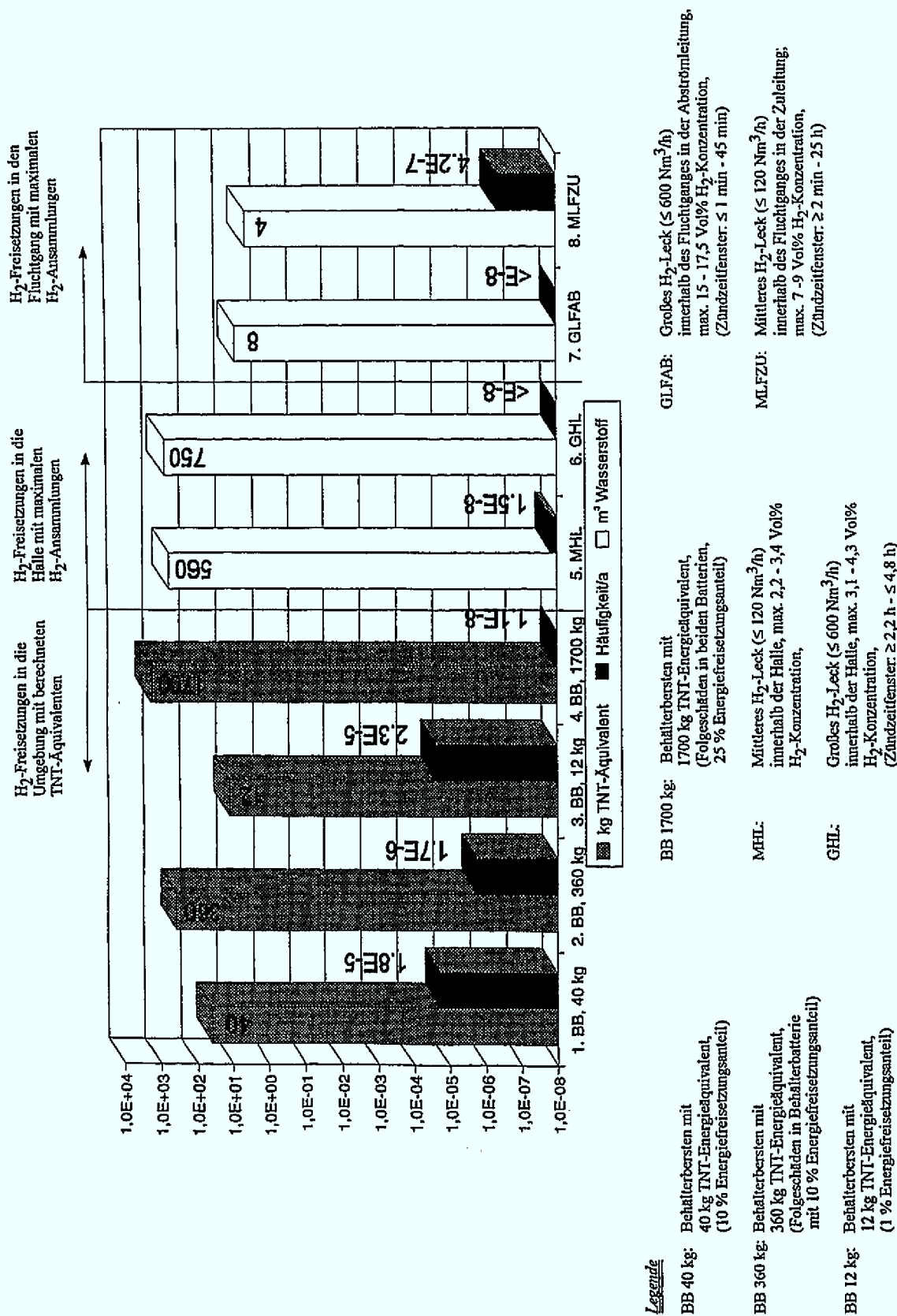


Abb. 7-1: PHOEBUS-Anlagenschema mit Schutzeinrichtungen, H₂-Gefahrenpotentialen und störfallbedingten Freisetzungshäufigkeiten

Abb. 7-2: Häufigkeiten und Freisetzungen von H₂-Störfällen

Bezeichnung	Eintrittshäufigkeit/a	Ursache
KOMPONENTENINTERNE H₂-STÖRFÄLLE		
1. Inneres H ₂ -Leck im Elektrolyseur mit Eintrag von 0,3 Nm ³ /h H ₂ in O ₂	1E-5	Diaphragmabruch
2. Inneres Leck in der Brennstoffzelle mit Vermischung von H ₂ und O ₂	3,4E-3	Versagen Druckminderventil
3. Äußeres Leck der Brennstoffzelle mit Austritt von H ₂ in die Halle	1,2E-3	Ausfall Elektrolyt-P. u. Temperaturmessung
H₂-LECKAGEN IN DIE HALLE		
1. Kleines Leck (<7 Nm ³ /h) in der Leitung vom Elektrolyseur zum Zwischenspeicher (7 bar)	1E-3	Leckage Klemmringverschraubung
2. Kleines Leck (<10 Nm ³ /h) in der Leitung zur Brennstoffzelle (7 bar)	1E-3	Leckage Klemmringverschraubung
3. Mittl. Leck (10-120 Nm ³ /h) in der Leitung zur Brennstoffzelle (7 bar)	1E-3	Leckage - Versagen Klemmringverschraub.
4. Großes Leck (120-600 Nm ³ /h) in der Leitung zur Brennstoffzelle (150 bar)	5E-5	Vers. Druckminderventil u. Folgeversagen Klemmringverschraub.
H₂-LECKAGEN IN DEN FLUCHTGANG		
1. Kleines Leck (<7 Nm ³ /h) in der Leitung vom Elektrolyseur zum Zwischenspeicher (7 bar)	2E-4	Leckage Klemmringverschraubung
2. Kleines Leck (<10 Nm ³ /h) in der Leitung zur Brennstoffzelle (7 bar)	3E-4	Leckage Klemmringverschraubung
3. Mittl. Leck (10-120 Nm ³ /h) in der Leitung zur Brennstoffzelle (7 bar)	3E-4	Leckage - Versagen Klemmringverschraub.
4. Großes Leck (120-600 Nm ³ /h) in der Leitung vom Elektrolyseur zum Zwischenspeicher mit Rückwärtsentleerung (7 bar)	2E-4	Versagen Klemmringverschraubung

Tab. 7-1: Liste der auslösenden Ereignisse

Bezeichnung	Eintrittshäufigkeit/a	Ursache
H ₂ -LECKAGEN IN DIE UMGEBUNG		
1. Bersten eines Hochdruck-Speicherbehälters (150 bar)	6,3E-5	Spontanes Versagen
2. Bersten des Niederdruck-Zwischenspeichers (7 bar)	3,5E-6	Spontanes Versagen
3. Großes Leck in Behälter-Anschlußleitung	3E-3	Versagen Klemmringverschraubg.
ANLAGENEXTERNE EREIGNISSE		
Flugzeugabsturz auf Lagerbehälter	< 1E-8	
Erdbeben, makroseismische Intensität VIII	1,3E-4	
Erdbeben, makroseismische Intens. VIII-IX	1E-5	
Druckwellen	nicht analysiert	

Anmerkungen zu Tabelle 7-1

Wegen der Neuartigkeit der Anlage beruhen die Angaben weitgehend auf generischen Daten und in Einzelfällen auf Abschätzungen und sind daher mit Unsicherheiten behaftet.

So beruht z.B. die Häufigkeit für das spontane Bersten eines Speicherbehälters auf einer schadensstatistischen Auswertung für konventionelle Druckbehälter durch den TÜV. Bei einem mittleren Bestand von 33000 zu prüfender Behälter über einen Zeitraum von 1959-76 traten 21 relevante Zerknalle in annähernd 6 Mio. Behälter-Betriebsjahren auf.

Daraus ergibt sich eine mittlere Zerknallrate von 3,5E-6 pro Behälterjahr. Die aufgetretenen Zerknalle haben ihren Ausgang überwiegend an Schweißnähten genommen. Vom H₂-Zwischenspeicher abgesehen, sind die Hochdruckspeicher Walzkonstruktionen. Hierfür ist die Übertragung des obigen Wertes als konservativ anzusehen.

Die Wahrscheinlichkeit für den Zerknall eines beliebigen der 18 Hochdruckbehälter ergibt sich zu 6,3E-5/a.

Hallenlüftung	Zeit bis zum Erreichen			Maximale Wasserstoff- Konzentration % nach h	Konzentration wieder unter 4 %
	0,4 % Hallendecke	0,8 %	4 % Halle		
Natürliche Hallenbelüftung					
1) Meßwert 3600 Nm ³ /h	31 min	1,3 h	---	3,4 % 25 h	---
2) Berechnet mit Außentemperatur 35 °C Hallentemperatur 20 °C	2,2 h	3,0 h	---	2,7 % 8,4 h	---
3) Berechnet mit Außentemperatur 20 °C Hallentemperatur 20 °C	30 min	1,3 h	---	2,3 % 25 h	---
4) Berechnet mit Außentemperatur 5 °C Hallentemperatur 20 °C	1,1 h	2,0 h	---	2,2 % 18 h	---
Zwangsbelüftung mit 21400 Nm ³ /h (Anregung bei 0,8 %)			---	0,8-1,5 % 1,3-3 h	---

Tab. 7-2: Globale Wasserstoffkonzentration in der Halle bei einem mittleren Leck (120 Nm³/h)

Hallenlüftung	Zeit bis zum Erreichen			Maximale Wasserstoff- Konzentration % nach h	Konzentration wieder unter 4 %
	0,4 % Hallendecke	0,8 %	4 % Halle		
Natürliche Hallenbelüftung					
1) Meßwert 3600 Nm ³ /h	3,3 min	11,0 min	2,45 h	4,2 % 3,3 h	4,54 h
2) Berechnet mit Außentemperatur 35 °C Hallentemperatur 20 °C	4,2 min	15,0 min	2,2 h	4,3 % 3,1 h	4,84 h
3) Berechnet mit Außentemperatur 20 °C Hallentemperatur 20 °C	2,1 min	12,0 min	---	3,4 % 2,4 h	---
4) Berechnet mit Außentemperatur 5 °C Hallentemperatur 20 °C	2,1 min	7,8 min	---	3,1 % 2,0 h	---
Zwangsbelüftung mit 21400 Nm ³ /h (Anregung bei 0,8 %)			---	1,7 % 1,2 h	---

Tab. 7-3: Globale Wasserstoffkonzentration in der Halle bei einem großen Leck und offenem Sicherheitsventil (Anfangs 1200 Nm³/h, davon 50 % in die Halle)

Ereignispfad-Nr. Schutzaktionen: ja/nein	Häufigkeiten für Bewertungsvariante		
	mit HM	ohne HM	ungünstig
1) Absperrung: nein Zwangsentlüftung: ja	5,3E-9/a H ₂ -HK: 1,7 % PZÜK	3,0E-8/a H ₂ -HK: 1,7 % PZÜK	-- PDFG=Ausfall Zwangsentlüf.
2) Absperrung: nein Zwangsentlüftung: nein Naturkonvektion: ja	1,3E-10/a H ₂ -ZÜK: 3,1-4,3 %	7,5E-10/a H ₂ -ZÜK: 3,1-4,3 %	5,0E-9/a H ₂ -ZÜK: 3,1-4,3 %

Legende:

ZÜK/PZÜK: Zündfähige/Partiell zündfähige Konzentration

HK: Hallenkonzentration;

HM: Handmaßnahmen (Notfallmaßnahmen)

PDFG: Partielle Deflagration

Ablaufbeschreibung des Ereignispfades 2 mit ungünstigem Verlauf:

Druckminderventil (150 - 7 bar) im Abzweig der Hochdruck-Speicherbehälter zur Brennstoffzelle versagt, Hochdruck schlägt auf den Niederdruckbereich der Wasserstoffleitung durch. Automatische Absperrung der Gasleitung wird angeregt (über zu hohen Durchsatz oder zu hohen Druck), mißlingt aber wegen Schließversagen der Absperrventile. Das ansprechende Sicherheitsventil (≥ 8 bar) begrenzt den Druckaufbau in der Leitung (wegen Abblaseleistung) anfänglich auf lediglich ca. 35 bar; ein Folgeversagen an einer Rohrverbindung der Gasleitung innerhalb der Halle wird daher angenommen. Die Beendigung der Leckage durch eine Handabspernung unterbleibt. Der austretende Wasserstoff wird von H₂-Meßköpfen detektiert, die den Start der drei nicht ex-geschützten Abluftventilatoren anregen, die aber durch eine im Deckenbereich unterstellte begrenzte Deflagration ausfallen.

Etwa 50 % des Inventars der Hochdruck-Speicher (3000 m³) gelangen über das Sicherheitsventil in die Umgebung; der andere Teil über das Leck in die Halle. Je nach Wirksamkeit der natürlichen Hallenentlüftung werden etwa 3 h nach Störfalleintritt H₂-Konzentrationen von max. 4,3 % global erreicht, die nach knapp 5 h 4 % wieder unterschreiten. Bei Zündung ist mit Zerstörung der Halle zu rechnen.

Tab. 7-4: Ereignispfad-Häufigkeiten und H₂-Konzentrationen bei großen H₂-Leckraten in die IEV-Halle

EREIGNISPFADNAME/ HÄUFIGKEIT (1/a)	REICHWEITEN DER SCHÄDEN VOM TYP: I, II, III, IV	EREIGNISPFAD- SUMMENHÄUFIG- KEIT (1/a)
Gruppe 1, 12 kg TNT-Äquivalent:		2,26E-5
A4-Z 5,61E-8 A4-ZG 5,61E-6 A3-Z 1,68E-7 A3-ZG 1,68E-5	3, 8, 14, 48 m 4, 9, 16, 55	
Gruppe 2, 30-105 kg TNT-Äquivalent:		1,83E-5
A3-ZBE 5,10E-8 A4-ZBE 1,70E-8 ZBDE 2,55E-7 ZBDE 8,51E-8 ZBD 8,51E-8 ZBD 2,55E-8 A2-Z 1,28E-5 A2-ZBE 4,30E-7 ZG 1,42E-6 ZBDE 2,13E-6 ZBD 6,40E-7 A2-ZCF 4,30E-8 A3-ZCF 4,59E-9 ZCDF 2,10E-7 ZCDF 2,30E-8 ZCD 6,40E-8 ZCD 6,89E-9 A4-ZCF 1,52E-9 A4-ZCD 2,27E-9 ZCDF 7,58E-9 A1-Z 2,55E-6 A1-ZCD 1,28E-8 ZG 2,84E-7 ZBE 4,73E-8 ZCF 8,51E-9 ZBDE 4,25E-7 ZCDF 4,25E-8 ZBD 1,28E-7	6, 13, 23, 79 m 7, 14, 26, 82 8, 17, 29, 99 9, 20, 34, 116	
Gruppe 3, 360-900 kg TNT-Äquivalent:		1,645E-6
A1-ZBE 4,73E-8 A3-ZBE 2,84E-8 ZBD 1,58E-7 ZBD 9,45E-8 A2-ZBE 2,40E-7 A4-ZBE 9,45E-9 ZBD 7,90E-7 ZBD 3,15E-8 A1-ZCF 4,73E-9 A3-ZCF 2,55E-9 ZCD 1,58E-8 ZCD 8,51E-9 A2-ZCF 2,40E-8 A4-ZCF 8,42E-10 ZCD 7,90E-8 ZCD 2,81E-9 A1-ZB 1,58E-8 A3-ZB 9,45E-9 A2-ZB 7,90E-8 A4-ZB 3,15E-9	13, 29, 50, 171 m 16, 36, 62, 213 18, 39, 68, 232	
Gruppe 4, 1,7 t TNT-Äquivalent:		1,06E-8
A1-ZC 1,58E-9 A3-ZC 8,51E-10 A2-ZC 7,90E-9 A4-ZC 2,81E-10	22, 48, 84, 290 m	

SCHADENSTYP:

DRUCKGRENZWERT (bar):

- | | | |
|------|--|------|
| I) | Tödliche Verletzungen durch primäre Gesundheitsschäden | 2 |
| II) | Einsturz von Gebäuden; einige Todesfälle durch sekundäre Gesundheitsschäden | 0,4 |
| III) | Einsturz von Mauern, herabfallen von Objekten; begrenzte Tötungswahrscheinlichkeit | 0,17 |
| IV) | Fensterbruch; vereinzelt tödliche Verletzungen durch Scherbenwirkung | 0,03 |

Tab. 7-5: Ergebnisse der Ereignisablaufanalysen 'Behälterbersten'

Erläuterungen zu Tabelle 7-5

Die in den Ereignisfadnamen aufgeführten Buchstaben gelten für Ereignisse des Störfallablaufs. Sie haben folgende Bedeutung:

Ereignis	Beschreibung
Z	Der Buchstabe Z gilt für das störfallauslösende Ereignis: 'Bersten eines H ₂ -Speicherbehälters' mit Freisetzung der gespeicherten Druckenergie von ca. 8 kg TNT-Äquivalent.
A1	gilt für eine unmittelbar nach dem Behälterbersten erfolgende Zündung von 25 % der freigesetzten 15 kg H ₂ mit einem Energieausstoß von 105 kg TNT-Äquivalent.
A2	gilt für eine unmittelbar nach dem Behälterbersten erfolgende Zündung von 10 % der freigesetzten 15 kg H ₂ mit einem Energieausstoß von 40 kg TNT-Äquivalent.
A3	gilt für eine unmittelbar nach dem Behälterbersten erfolgende Zündung von 1 % der freigesetzten 15 kg H ₂ mit einem Energieausstoß von 12 kg TNT-Äquivalent.
A4	gilt für das Ausbleiben der unmittelbaren Zündung der freigesetzten 15 kg H ₂ .
B	gilt für Folgeschäden in der betroffenen Behälterbatterie (Abriß der Anschlußleitungen) mit Zündung von 25 % der freigesetzten 130 kg H ₂ bei begünstigender Inversions-Wetterlage (Energieausstoß: 900 kg TNT-Äquivalent)
C	gilt für Folgeschäden in beiden Behälterbatterien (Abriß der Anschlußleitungen) mit Zündung von 25 % der insgesamt aus beiden Batterien freigesetzten 250 kg H ₂ bei begünstigender Inversions Wetterlage (Energieausstoß: 1700 kg TNT-Äquivalent)
D	gilt für Wetterlagen, die die Bildung zündfähiger Gaswolken beeinflussen (austauscharm/austauschintensiv)
E	gilt für eine H ₂ -Explosion nach Auftreten von Ereignis B mit Zündung von 10 bzw. 1 % der freigesetzten 130 kg H ₂ in Abhängigkeit von Ereignis D (Energieausstoß: 360 bzw. 90 kg TNT Äquiv.)
F	gilt für eine H ₂ -Explosion nach Auftreten von Ereignis C mit Zündung von 10 bzw. 1 % der insgesamt aus beiden Behälterbatterien freigesetzten 250 kg H ₂ in Abhängigkeit von Ereignis D (Energieausstoß: 690 bzw. 170 kg TNT-Äquivalent)

Ereignisgruppe 1: 4 Ereignispfade, Summenhäufigkeit 2,3E-5/a

Häufigkeit des dominierenden Ereignispfades A3-ZG: 1,7E-5/a

Ablauf: Plötzliches Versagen (Bersten) eines der 18 Hochdruck-Speicherbehälter (aufgeteilt in 2 Batterien); 15 kg Wasserstoff werden freigesetzt, durch Trümmerstücke verursachte Funken führen unmittelbar zur Zündung von 1 % der freigesetzten Menge; insgesamt werden 12 kg TNT-Äquivalent freigesetzt (4 kg aus H₂-Explosion, 8 kg aus gespeicherter Druckenergie). Benachbarte Behälter und deren Anschlüsse bleiben intakt. Nur Personen in unmittelbarer Nähe des Explosionsortes sind direkt (letal) gefährdet (Druckwelle, Trümmerstücke); an umliegenden Gebäuden treten bis auf Fensterbrüche (bis in etwa 60 m Entfernung) keine Schäden auf (Tab. 7).

Ereignisgruppe 2: 28 Ereignispfade, Summenhäufigkeit 1,8E-5/a

Häufigkeit des dominierenden Ereignispfades A2-Z: 1,3E-5/a

Ablauf: Plötzliches Versagen eines Wasserstoffspeicherbehälters wie unter 1, mit unmittelbarer Zündung von 10 % der freigesetzten Wasserstoffmenge (15 kg) mit einem Energieausstoß von 40 kg TNT-Äquivalent. Relevante Folgeschäden an benachbarten Behältern und deren Anschlüsse bleiben aus. Unmittelbar gefährdet sind Personen in einem Umkreis von etwa 10 m. Die IEV-Halle liegt knapp außerhalb des Bereichs (ca. 20 m), in dem schwere Gebäudeschäden auftreten, aber innerhalb von 35 m bis zu dem Mauern umstürzen. Bis etwa 100 m besteht eine Gefährdung durch Fensterbrüche (Tab. 7).

Tab. 7-6: Ergebnisrelevante Ereignisabläufe nach Bersten eines Hochdruckspeichers für Wasserstoff

Ereignisgruppe 3: 20 Ereignispfade, Summenhäufigkeit 1,6E-6/a**Häufigkeit des dominierenden Ereignispfades A2-ZBD: 7,9E-7/a**

Ablauf: Plötzliches Versagen eines Wasserstoffspeicherbehälters wie unter 1, unmittelbare Zündung von 10 % der freigesetzten Wasserstoffmenge (15 kg), Explosionsenergie von 40 kg TNT-Äquivalent verursacht Folgeschäden. Verbindungsleitungen benachbarter Behälter versagen. Rückstoßkräfte an Leckstellen unterstützen Behälterverlagerungen. Weitere Leitungen in der betroffenen Batterie versagen. Innerhalb von 30 s entweichen an Leckstellen 130 kg Wasserstoff. Beteiligt an nachfolgender Explosion sind 10 % mit einer Energiefreisetzung von 360 kg TNT-Äquivalent. In benachbarter Behälterbatterie Folgeschäden (Abriß von Leitungen) und Ausbildung weiterer Wasserstoffwolke möglich. Auswirkungen durch vorausgegangene Explosion abgedeckt.

Schadensradien etwa doppelt so hoch wie bei Ereignisgruppe 2 (Tab. 7). Mit Einsturz der IEV-Halle ist zu rechnen. An Nachbargebäuden sind Mauereinstürze zu erwarten.

Ereignisgruppe 4: 4 Ereignispfade, Summenhäufigkeit 1,1E-8/a**Häufigkeit des dominierenden Ereignispfades A2-ZC: 7,9E-9/a**

Ablauf: Plötzliches Versagen eines Wasserstoffspeicherbehälters wie unter 1, unmittelbare Zündung von 10 % der freigesetzten Wasserstoffmenge (15 kg), Explosionsenergie von 40 kg TNT-Äquivalent verursacht Folgeschäden an Verbindungsleitungen in beiden Behälterbatterien. Innerhalb von 30 s entweichen 250 kg Wasserstoff, an der folgenden Explosion beteiligt sind 25 % mit einer Energiefreisetzung von 1,7 t TNT-Äquivalent. Gebäude im Umkreis von knapp 100 m stürzen ein, eine Personengefährdung durch Scherbenwirkung bei Fensterbrüchen besteht bis zu 300 m.

Fortsetzung Tab. 7-6

Literatur

- /Alyzer/ Alyzer SA, Industrial Electrochemistry, Pressurized Hydrogen Generator by Water Electrolysis to be Powered by Solar Energy, Instruction Manual 214-LP-R1/92, METKON S.A., Alyzer Division, Mendrisio, Switzerland.
- /Barthels/ Barthels H.:
Bau und Betrieb einer Photovoltaik-Wasserstoff-Brennstoffzellen-Demonstrationsanlage; Die Beschreibung des Vorhabens, die Erläuterung der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, die Darstellung der Anlage;
KFA-IEV-IB-1/93.
- /Behrend1/ Behrend E., Jaenicke B., Krafka H., Schmidtchen U.:
Folgenschwere Explosion, Bericht über Ursachen und Hergang des Berstens eines Wasserstofftanks in Hanau, Teil 1, Sicherheitstechnik, TÜ Bd.34 (1993) Nr.4-April.
- /Behrend2/ Behrend E., Jaenicke B., Krafka H., Schmidtchen U.:
Folgenschwere Explosion, Bericht über Ursachen und Hergang des Berstens eines Wasserstofftanks in Hanau, Teil 2, Sicherheitstechnik, TÜ Bd.34 (1993) Nr.5-Mai.
- /Dechema/ Wasserstofftechnologie, Perspektiven für Forschung und Entwicklung, Deutsche Gesellschaft für Chemisches Apparatewesen, Chemische Technik und Biotechnologie, 29. April 1986.
- /Enquete/ Deutscher Bundestag, Referat Öffentlichkeitsarbeit 1990: Bedingungen und Folgen von Aufbaustrategien für eine solare Wasserstoffwirtschaft; Bericht der Enquete-Kommission 'Gestaltung der technischen Entwicklung, Technikfolgen-Abschätzung und -Bewertung des Deutschen Bundestages', ISBN 3-924521-68-9.

- /ENVITEC/ W.H.Bloss:
Sonnenenergie - Systemtechnik, Umwandlung, Speicherung und Transport, S. 110 - 116 aus Ressourcenschonende Techniken; Chancen einer umweltfreundlichen Entwicklung; 25. - 29.5.1992, Düsseldorf; Vulkan-Verlag Essen; ISBN 3-8027-2818-1.
- /Fuchs/ Fuchs M.:
Das Solar-Wasserstoff-Projekt in Neunburg vorm Wald - Rückblick Phase 1, Ausblick Phase 2; VDI Berichte Nr. 912, Wasserstoff-Energietechnik III, Tagung Nürnberg, 18. und 19. Februar 1992, VDI-Verlag, ISBN 3-18-090912-9.
- /Goeres/ Goeres W.:
Sicherheitskonzept und Abschätzung des Gefährdungspotentials im Bereich der Solarwasserstoffanlage, KFA-IEV, 12.1.1993.
- /GRS2/ Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Zuverlässigkeitskenngrößenermittlung im Kernkraftwerk Biblis, GRS-A-1030 (Dezember 1984).
- /GRS3/ Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH:
Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke, Phase B. Verlag TÜV Rheinland, Köln 1990.
- /GRS4/ Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH:
Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke, Fachband 3: Zuverlässigkeitskenngrößen und Betriebserfahrungen. Verlag TÜV Rheinland, Köln 1980.
- /GRS59/ Hauptmanns U., Hömke P., Huber J., Reichardt G., Riote H.G.: Ermittlung der Kriterien für die Anwendung systemanalytischer Methoden zur Durchführung von Sicherheitsanalysen für Chemieanlagen.
GRS-59, Gesellschaft für Reaktorsicherheit mbH, Köln, 1985
- /Handbuch/ Handbuch Störfälle I, Dokumentation über Störfälle in industriellen Anlagen oder mit gefährlichen Stoffen bis 1980, Umweltbundesamt, UBA-FB 83-023, ISBN 3-503-03360-2.

- /HDR/ 13., 14. und 15. Statusbericht des Projektes HDR-Sicherheitsprogramm des Kernforschungszentrum Karlsruhe, Dezember 1989, 1990, 1991.
- /Husmann/ Husmann G.:
Untersuchungen des Druckwelleneinflusses bei Explosionsvorgängen auf die Umgebung und dessen Relevanz beim hypothetischen Druckbehälterversagen des HTR-Modul, KFA-ISR-IB-12/92, September 1992.
- /Jahn/ Jahn H., Weber G., Pham T.V.:
Description of the MOD2/85 Version of the RALOC/FIPLOC Family, Part 1: Code System including, BMU-1989-213, Jahn H., Hofer E.: Part 2: Physical Modelling of the Thermal Hydraulics and Integration Methods, BMU-1988-199.
- /Jül-222/ Altes J., Graffi Hh., Koschmieder D.:
Untersuchung des Erdbebenverhaltens des Forschungsreaktors FRJ-2 (DIDO) Jül-Spez-222, Oktober 1983.
- /Jül-422/ Bongartz R., Hennings W., Meeßen H.:
Nutzung ausländischer Betriebserfahrungen zur Ableitung von Zuverlässigkeitskenngrößen - insbesondere für abhängige Ausfälle, Jül-Spez-422, November 1987.
- /Jül-514/ Meyna A., Mock R., Tietze A.:
Statistische Untersuchungen zum Ausfallverhalten von Komponenten des Versuchskernkraftwerks der AVR, Jül-Spez-514 Bd.II, August 1989.
- /LBST/ Chancen und Risiken bei einem verstärkten Wasserstoff-einsatz, Untersuchung im Auftrag des Büros für Technikfolgenabschätzung des Deutschen Bundestages, Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, LBST-Report Nr. 4/92.
- /Lenoir/ Lenoir E. M.; Davenport J. A.:
A Survey of Vapor Explosions: Second Update; Industrial Risk Insurers, Hartford, CT 06102; Process Safety Progress (Vol. 12, No. 1) S. 12 - 33; January, 1993.

- /Nitsch/ Nitsch J.:
 Ausbaustrategien für eine solare Wasserstoffwirtschaft. VDI Berichte Nr. 912, Wasserstoff-Energietechnik III, Tagung Nürnberg, 18. und 19. Februar 1992, VDI-Verlag, ISBN 3-18-090912-9.
- /Pham/ Pham, T. V.:
 COMB - Ein phänomenologisches Rechenmodell für vollständige H_2 -Verbrennung innerhalb eines Reaktorcontainments, GRS-A-1070, März 1985.
- /Reer/ Reer B.:
 Entscheidungsfehler des Betriebspersonals von Kernkraftwerken als Objekt probabilistischer Risikoanalysen, Jül-2811, September 1993.
- /Reer2/ Reer B.:
 Deutsche Übersetzung und Erläuterungen zu den Daten aus dem SWAIN-Handbuch über menschliche Zuverlässigkeit in Kernkraftwerken, KFA-ISF-IB-6/88, August 1988.
- /Rehm/ Rehm, W.:
 Effects of Deflagration-to-Detonation Transition on Hydrogen Explosion Loads in Large-Scale Enclosures, CEC RCA Programme on Reactor Safety - Hydrogen Project, Semi-Annual Progress Report 1st June - 31th December 1994, KFA Jülich, Germany, January 15, 1995.
- /Rehm2/ Rehm, W., Hicken, E.F.:
 Joint Research Project on Deflagration-to-Detonation Transition in Hydrogen-Air Mixtures, International Workshop on Hydrogen Research for Reactor Safety, 19-21 September 1994, Munich, Germany.
- /Rehm3/ Rehm, W., Jahn, W.:
 Beitrag zur Auswertung von Ballon-Experimenten zu den Ausbreitungsfunktionen von detonierenden Wasserstoff-Luft-Gemischen mit Anwendungsfällen, Jül-2854, Dezember 1993.

- /Römer/ Römer N., Hoelzner K., Schüle H.:
Erfahrungen mit einem SPE-Elektrolyseur und einem fortgeschrittenen alkalischen Elektrolyseur der 100 kW Klasse im SWB-Projekt, VDI Berichte Nr. 912, Wasserstoff-Energietechnik III, Tagung Nürnberg, 18. und 19. Februar 1992, VDI-Verlag, ISBN 3-18-090912-9.
- /Sicherh/ Photovoltaik-Wasserstoff-Brennstoffzellen Anlage PHOEBUS Jülich; Der Betrieb der Anlage auf dem H₂/O₂-Speicherpfad, Sicherheitseinrichtungen und Störfallmaßnahmen; KFA-IEV-IB-6/95.
- /SOLAR/ Bericht '93 der Arbeitsgemeinschaft SOLAR Nordrhein-Westfalen. Herausgeber: Geschäftsstelle Arbeitsgemeinschaft Solar NRW, i.A. des Ministeriums für Wissenschaft und Forschung des Landes NRW. Forschungszentrum Jülich, Oktober 1993, ISSN 0945-1161.
- /TÜV/ Sicherheitstechnische Begutachtung zur Aufstellung und zum Betrieb einer Photovoltaik-Wasserstoff-Brennstoffzelle, Aachen, 07.09.1992, 111/Mu-007.Go2.
- /TÜV78/ Schadensstatistische Auswertungen zum Versagen mechanisch beanspruchter Bauteile konventioneller Druckbehälter, TÜV Kerntechnik West, 010/78/001, Juni 1978.
- /Umbau/ Umbau des AVR-Reaktors zu einer Prozeßwärmanlage, Ergebnisse der Vorplanungsphase, Kernforschungsanlage Jülich, HTA-Projekt, Juni 1985.
- /Verfondern/ Verfondern, K.:
Stand der Modellierung zur Dispersion und Explosion freier Wasserstoff-Gaswolken, KFA-ISR-IB-13/94, Oktober 1994.
- /VGB/ Reichhardt G.:
Wasserstoffexplosion im Werk der Firma Heraeus Quarzglas GmbH, Hanau, VGB Kraftwerkstechnik 73 (1993), Heft 8.
- /Weber/ Weber R.:
Der sauberste Brennstoff: Der Weg zur Wasserstoffwirtschaft, Olynthus Verlag, 1991, ISBN 3-907175-13-1.

- /Weber2/ Weber R.:
Wasserstoffwirtschaft in Bewegung, Wasserstoffwirtschaft, Bulletin SEV/VSE 83 (1992).
- /Winter/ Winter C.-J., Nitsch J., Klaiss H.:
Energieträger Wasserstoff: Was wissen wir? Was bleibt zu lernen? -Eine Parameterabwägung, VDI Berichte Nr. 725, Wasserstoff-Energietechnik II, Tagung Stuttgart, 15. und 16. März 1989, VDI-Verlag, ISBN 3-18-090725-8.
- /Winter2/ Winter C.-J., Nitsch J.:
Wasserstoff als Energieträger. Technik, Systeme, Wirtschaft, Springer Verlag (1989).
- /Wolters/ Wolters J.:
Sicherheitstechnik bei der Energieumwandlung, Manuskript der gleichnamigen Vorlesung an der Fachhochschule Aachen, Abteilung Jülich, April 1992.