

Forschungsbericht 195

**Lagerung und Seetransport großer Mengen
flüssigen Wasserstoffs am Beispiel des
„Euro-Québec Hydro-Hydrogen Pilot Project“**

**Überblick über die in Deutschland anzuwendenden
Gesetze, Verordnungen und Technischen Regeln**

von Dr. Ulrich Schmidtchen, Bundesanstalt
für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin
Gerd Würsig, Germanischer Lloyd, Hamburg

64 Seiten, 8 Abbildungen, 8 Tabellen

Herausgegeben von der
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
Unter den Eichen 87, 12205 Berlin
Telefon (030) 8104-0 Telex 183 261 bamb d
Telefax (030) 811 20 29

Copyright © 1993 by Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven

Verlag und Vertrieb:
Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10, 27511 Bremerhaven 1
Telefon (0471) 460 93-95

Zusammenfassung

Der massive Verbrauch von fossilen Brennstoffen wie Kohle und Öl führt zu schweren Umweltproblemen. Es wäre von großem Nutzen, diese Brennstoffe zumindest zu einem Teil durch Wasserstoff zu ersetzen, besonders durch verflüssigten, tiefkalten Wasserstoff (LH₂). Dafür müssen rechtzeitig geeignete Verfahren und Techniken ausgewählt oder entwickelt werden. Das "Euro-Québec Hydro-Hydrogen Pilot Project" (EQHHPP) soll diese Entwicklung fördern, indem es Transport, Lagerung und Verteilung großer Mengen flüssigen Wasserstoffs demonstriert. Eine Anlage zur Lagerung und Verteilung von LH₂ soll im Hamburger Hafen entstehen.

Für eine solche Anlage gibt es zahlreiche Gesetze, Verordnungen und Regeln aller Art auf nationaler und internationaler Ebene. Der Bericht gibt einen Überblick über die hier anzuwendenden und zeigt somit, in welchem rechtlichen Rahmen sich Entwurf und Genehmigung abspielen. Eine erschöpfende juristische Expertise für einen speziellen Anwendungsfall kann dadurch naturgemäß nicht ersetzt werden.

Die Regelungen beschäftigen sich mit der technischen Sicherheit zum Zweck des Schutzes der Arbeitnehmer, der näheren Umgebung und der Umwelt. Trotz ihrer Zahl ist der materielle Umfang überschaubar, weil sie sich oft aufeinander beziehen oder zumindest parallele Forderungen enthalten.

Andererseits wird deutlich, daß es gerade auf dem Gebiet der LH₂-Technik Gebiete gibt, die in den Regeln in ihrem gegenwärtigen Zustand nicht hinreichend behandelt werden, denn bisher gab es fast keinen Bedarf für Regeln für Behälter oder Anlagen in diesem Maßstab. Für die hier diskutierte Anlage sind gewisse Regeln und Normen einfach nicht vorhanden. Eine Reihe dieser Lücken kann mit Hilfe von Analogien geschlossen werden, doch ist das kein befriedigender Zustand.

Summary

The massive use of fuels like oil or coal by man causes serious environmental problems. It would certainly be of much help to replace them at least to a certain extent by hydrogen, in particular cryogenic hydrogen (LH₂). This means that suitable technologies and handling procedures must be identified or developed in time. The idea of the "Euro-Québec Hydro-Hydrogen Pilot Project" (EQHHPP) is to promote this development and to demonstrate the feasibility of transport, storage, and distribution of large amounts of cryogenic hydrogen. A storage and distribution plant for LH₂ will be built in the harbour of Hamburg.

A variety of laws and rules exists both on national and international level which are applicable to a facility of this kind. The report reviews the relevant laws and rules and gives an overview of the framework in which design and approval of the plant will happen. It is therefore not an exhaustive legal expertise about applicable rules and regulations for the proposed project and can not be a substitute for the study of the individual rules.

The laws and rules deal with technical safety for the protection of the workers, the surroundings, and the environment. Despite of their great number, a second look soon shows that the situation is better than it may seem at first. They frequently refer even explicitly to each other or contain at least parallel requirements.

On the other hand, it becomes apparent that there are fields of LH₂ technology that are not sufficiently dealt with in the regulations as they are now, because there was almost no demand in the past for rules dealing with containers or plants in such a scale. For the application discussed here, suitable regulations and standards are sometimes simply not existing. A number of these voids can be filled with analogies from related fields, but this state of things is not satisfactory.

Inhaltsverzeichnis

	Seite	
1	Einführung	7
1.1	Hintergrund	7
1.2	Anlaß	8
1.3	Zweck dieser Veröffentlichung	9
2	Das Euro-Québec Hydro-Hydrogen Pilot Project (EQHHPP)	10
2.1	Geschichte	10
2.2	Allgemeines Konzept	10
2.3	Beschreibung des Tanklagers	12
2.4	Beschreibung des Gastankschiffes	15
3	Anwendbare Gesetze, Verordnungen, Vorschriften, Technische Regeln und Vereinbarungen	17
3.1	Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG)	17
3.2	Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG)	17
3.3	Gesetz über den Transport gefährlicher Güter	18
3.3.1	Allgemeines	18
3.3.2	Internationale Vereinbarungen über den Seetransport gefährlicher Güter	18
3.4	Chemikaliengesetz	19
3.5	Druckbehälter-Verordnung	19
3.6	Verordnung über elektrische Anlagen in explosionsgefährdeten Räumen	19
3.7	Arbeitsstättenverordnung	20
3.8	Unfallverhütungs-Vorschriften	20
3.9	AD-Merkblätter	20
4	Seetransport	21
4.1	Anzuwendende Gesetze und Vorschriften	21
4.2	Grundprinzipien für die Auslegung von Typ C-Tanks	21
4.2.1	Typ-C Tanks	21
4.2.2	Auslegungsbelastungen	22
4.2.3	Mindestwandstärken und Sicherheitsfaktoren der Ladetanks	22
4.2.4	Materialauswahl	23
4.2.5	Druckprobe für Ladetanks	24
4.2.6	Sicherheitsventile	24
4.2.7	Füllstand des Tanks	25
4.3	Lade- und Prozeßrohrleitungen	26
4.3.1	Bestimmungen im IGC-Code, bei denen eine wasserstoffspezifische Regelung erforderlich erscheint	26
4.3.2	Zusätzliche Anforderungen	27
4.4	Brandschutz- und Feuerlöschleinrichtungen	28
4.4.1	Hauptfeuerlöschleitung	28
4.4.2	Wassersprüheinrichtungen	28
4.4.3	Pulver-Feuerlöschleinrichtungen	30
5	Erfordernisse für die Anlage an Land	31
5.1	Geltungsbereich der relevanten Gesetze und Regeln	31
5.2	Zulassungsverfahren für die Anlage	32
5.3	Auswirkungen der Anlage auf die Umwelt	32
5.4	Störfallvermeidung	33
5.4.1	Störfälle mit Auswirkungen auf die ganze Anlage und ihre Umgebung	33
5.4.2	Sicherheitsabstände	35
5.4.3	Schutz der Arbeitnehmer vor Störfällen	36
5.5	Begrenzung von Schäden durch Störfälle	38
6	Behälter, Ausrüstung und Rohrleitungen	38
6.1	Behälter	38
6.1.1	Werkstoffe	38
6.1.2	Berechnung und Auslegung	38
6.1.3	Herstellung und Vorbereitung	39
6.1.4	Kennzeichnung	39
6.1.5	Prüffristen	39
6.2	Behälterausrüstung	39
6.3	Rohrleitungen	40

	Seite	
7	Füllstation	42
7.1	Anwendungsbereich der relevanten Gesetze und Regeln	42
7.2	Zulassungsverfahren	42
7.3	Auswirkungen der Füllstation auf die Umwelt	42
7.4	Anlage der Füllstation	43
7.4.1	Gelände	43
7.4.2	Schutzzonen	43
7.5	Einrichtungen	43
7.5.1	Rohrleitungen und andere Komponenten	43
7.5.2	Explosions- und Feuerschutz	44
7.6	Betrieb	45
7.6.1	Belegschaft	45
7.6.2	Bedingungen für das Füllen von Behältern	45
7.6.3	Füllvorgang	46
7.6.4	Dokumentation	46
7.7	Prüfung und Wartung	46
8	Sicherheitstechnischer Vergleich von Wasserstoff mit verflüssigtem Erdgas und Flüssiggas	47
8.1	Eigenschaften im Lagerungszustand	47
8.2	Zündfähigkeit	48
8.3	Heizwert	50
8.4	Vergleich der Anlagengröße	50
8.5	Unfallauswirkungen	51
8.5.1	BLEVE	51
8.5.2	Lachenbrand	52
8.5.3	Gaswolkenausbreitung	53
8.6	Schlußfolgerungen	54
9	Zusammenfassung und Ausblick	55
10	Quellenangaben	56

1 Einführung

1.1 Hintergrund

Es besteht allgemeine Übereinstimmung darüber, daß sich die Menschheit die gegenwärtige Art und Weise, wie sie Energie erzeugt und verbraucht, auf die Dauer nicht mehr leisten kann. Entscheidende Kursänderungen müssen sogar in recht kurzer Zeit vorgenommen werden, um die schon eingetretenen und die vorhersehbaren, unabwendbaren Schäden an unserer Welt auf das nicht mehr vermeidbare Maß zu beschränken. Durch sparsamen Umgang mit Energie alleine ist diese Aufgabe nicht zu bewältigen. Entscheidend wird sein, wie schnell und wie gründlich die fossilen Energieträger und allgemein solche auf der Basis von Kohlenstoffverbindungen (Kohle, Öl und Holz) durch andere ersetzt werden.

Der vielversprechendste Ersatz-Energieträger ist Wasserstoff. Er ist im Wasser in praktisch beliebiger Menge vorhanden, läßt sich ohne Bergbau und dgl. mit einem Minimum an landschaftszerstörenden Maßnahmen gewinnen und verbrennt wieder zu Wasser. An schädlichen Nebenprodukten fallen nur Stickoxide in nennenswerter Menge an, und auch dies nur bei Verbrennung mit normaler Luft. In der Kombination von Sonnenkraftwerken mit dem Speicher- und Transportmedium Wasserstoff bietet sich nach dem derzeitigen Stand des Wissens eine umweltschonende, bezahlbare, technisch mögliche und in überschaubarer Zeit durchführbare Entwicklungsrichtung an¹. Die Speicherung des Wasserstoffs ist auf verschiedene Weise möglich (komprimiertes Gas, tiefkalte Flüssigkeit, an Oberflächen adsorbiert, chemisch gebunden); die größte Rolle wird vermutlich der flüssige Wasserstoff (LH₂) spielen, weil die Energiedichte hier am größten ist.

Als Energieträger ist Wasserstoff natürlich brennbar und unter Umständen explosiv. Auch in verschiedenen anderen Eigenschaften unterscheidet er sich von Brennstoffen wie etwa Propan (s. Tab. 1²). Dies und seine gasförmige Natur erfordern für die allgemeine Einführung von flüssigem Wasserstoff als Energieträger, daß auf der technischen Seite sichere und einfache Möglichkeiten für Transport, Lagerung und Verteilung demonstriert werden. Die notwendigen Verfahren müssen definiert und ggf. entwickelt werden. Es handelt sich dabei aber auch um eine politische Herausforderung. Der klare Wille zu den notwendigen Änderungen der wirtschaftlichen und allgemeinen Rahmenbedingungen muß ausgedrückt werden und sich z. B. in konkreten Verschiebungen der Schwerpunkte der staatlichen Förderungsmaßnahmen niederschlagen.

Welcher Anteil an der Umstellung im einzelnen dem Markt oder dem Staat zugewiesen wird, mag auf der Grundlage der jeweils herrschenden wirtschaftspolitischen Lehrmeinung entschieden werden. Unstreitig eine politische Aufgabe ist aber die Schaffung der rechtlichen Rahmenbedingungen. So wie etwa für die Nutzung der Kernenergie die entsprechenden Vorschriften und Regeln auf den verschiedensten Gebieten geändert oder überhaupt erst geschaffen wurden, muß dies auch wieder geschehen, um die Wasserstoff-Wirtschaft auf eine feste Grundlage zu stellen.

1: s. z. B. [17], bes. Kap. 9.8; zu den Strukturen einer umfassenden Wasserstoffwirtschaft s. [18]

2: Quelle: Germanischer Lloyd

		Wasserstoff	Methan	Propan
Zündgrenzen in Luft	Vol.-%	4,0 - 75,0	5,3 - 15,0	2,1 - 9,5
Explosionsgrenzen in Luft	Vol.-%	18,3 - 59,0	6,3 - 13,5	-
stöchiometrisches Gemisch in Luft	Vol.-%	29,53	9,48	4,03
minimale Zündenergie in Luft	mJ	0,02	0,29	0,26
maximale Verbrennungsgeschwindigkeit (stöchiometrische Mischung)	m/s	3,46	0,43	0,47
Detonationsdruck*	bar (abs.)	14,7	16,8	18,25
Explosionsenergie**	kg TNT/m ³ NTP-Gas	2,02	7,03	20,5
Explosionsenergie***	kg TNT/kg NBP-Fikt.	24	11	10
Selbstentzündungstemperatur	K	858	813	760
adiabate Schallgeschw. in NTP-Gas**	m/s	1294	448	260
Flammentemperatur des stöchiometrischen Gemisches	K	2318	2148	2385
Dichte von NTP-Gas**	kg/m ³	0,0838	0,6512	1,8700
Dichte von NBP-Flüssigkeit***	kg/m ³	70,8	422,6	581
spez. Wärmekapazität von NTP-Gas**	J/gK	14,89	2,22	1,67
Verdampfungswärme	J/g	445	510	427

* theoretisches Maximum; praktische Werte liegen bei ca. 10 % des angegebenen Wertes

** NTP: Normaltemperatur und -druck (20 °C, 1 bar (abs.))

*** NBP: normaler Siedepunkt (20,3 K, 1 bar (abs.))

Tab. 1: Stoffwerte und sicherheitstechnische Kennwerte von Wasserstoff, Methan und Propan

1.2 Anlaß

Diese Veröffentlichung ist die leicht überarbeitete deutsche Übersetzung eines Berichts, der im Rahmen des "Euro-Québec Hydro-Hydrogen Pilot Project" (EQHHPP), Phase III.0-1, angefertigt wurde [13.3]. Dieses von der EG-Kommission und der Regierung der kanadischen Provinz Québec gemeinsam durchgeführte Vorhaben soll der Öffentlichkeit und der Fachwelt die Möglichkeiten für sicheren Transport, Lagerung und Vertrieb von tiefkaltem flüssigem Wasserstoff (LH₂) demonstrieren. Außerdem dient es der Definition und ggf. Entwicklung von Verfahren und Technologien, die zur Verfügung stehen müssen, wenn LH₂ fossile Energieträger wie Kohle oder Öl ersetzen soll.

Der Wasserstoff soll in Québec mit Hilfe von dort reichlich vorhandener elektrischer Energie aus Wasserkraft mittels Elektrolyse erzeugt, verflüssigt und dann mit einem speziellen Tankschiff zur europäischen Empfänger- und Verteilerstation gebracht werden, deren Bau im Hafen von Hamburg geplant ist. Von dort aus sollen verschiedene Abnehmer versorgt werden, die jeweils auf ihre Weise die Verwendung von Wasserstoff als Brennstoff oder Treibstoff oder für andere Zwecke demonstrieren wollen (s. u.).

1.3 Zweck dieser Veröffentlichung

Für eine Anlage wie das oben erwähnte Lager im Hamburger Hafen gibt es eine Vielzahl von Gesetzen und anderen Regeln, sowohl auf nationaler als auch auf supranationaler Ebene. Sie dienen auf verschiedene Weise der technischen Sicherheit zum Schutz der Belegschaft, der unmittelbaren Umgebung und der Umwelt im weiteren Sinne. Der unmittelbare Zweck dieser Veröffentlichung im Rahmen des EQHHPP-Projektes war, die wichtigsten Gesetze, Verordnungen, Normen, Vorschriften und Technischen Regeln vorzustellen und ihre Bedeutung für das Hamburger Wasserstoff-Lager zu klären. In allen Einzelheiten verbietet sich das schon allein durch den Umfang des Themas. Dieser Bericht zeigt zwar den gesetzlichen Rahmen, in dem sich Bau, Genehmigung und Betrieb der Anlage abspielen werden, aber dadurch wird er nicht zu einer umfassenden Studie aller Regelungen und kann auch deren individuelles Studium nicht ersetzen.

Analoge Fragestellungen treten natürlich für jede Art von industrieller Anlage auf, in der flüssiger Wasserstoff in größeren Mengen verarbeitet wird. Daher hat diese Studie recht bald auch über ihren eigentlichen Zweck hinaus Interesse gefunden, so daß wir uns entschlossen haben, sie in deutscher Sprache der Allgemeinheit zugänglich zu machen.

Um Zeit- und Arbeitsaufwand auf einem vertretbaren Niveau zu halten, haben wir davon abgesehen, das Thema in voller Allgemeinheit abzuhandeln. Wegen der auf eine bestimmte Anlage hin eingegrenzten Fragestellung treten einige Punkte in den Hintergrund; so wird etwa beim Verkehrsrecht fast nur der Seeverkehr behandelt. Außerdem können einige Angaben ortsspezifisch sein. Auf solche Besonderheiten wird an den entsprechenden Stellen jeweils aufmerksam gemacht werden. In der Regel wird es nicht schwer fallen, die analogen Schlüsse für andere Fälle zu ziehen.

Außerdem sei darauf hingewiesen, daß die hier dargestellte Rechtslage den Stand zu Anfang des Jahres 1992 widerspiegelt. Die ständige Fortschreibung der genannten Regelwerke aus gegebenen Anlässen und auch die Anpassung an das europäische Recht haben seitdem zu Veränderungen geführt. So sind z. B. die für die Störfallverordnung [1.5] wichtigen Mengengrenzen verändert worden, und speziell für Wasserstoff sind weitere Änderungen in Vorbereitung. Andere Anpassungen sind eher formaler Natur. So gründet sich etwa die Druckbehälterverordnung (DruckbehV [6.1]) inzwischen nicht mehr auf die Gewerbeordnung [6], sondern auf das Gerätesicherheitsgesetz, ohne daß sich ihr sachlicher Gehalt dadurch sehr verändert hat. Dies ist ein fortlaufender Prozeß. Es ist daher unumgänglich, bei der Beurteilung konkreter Fälle die jeweils aktuellen Fassungen der Vorschriften zu Rate zu ziehen.

2 Das Euro-Québec Hydro-Hydrogen Pilot Project (EQHHPP)

Wegen der zahlreichen projekt- und ortsspezifischen Bezüge in dieser Veröffentlichung ist es erforderlich, dem mit dem Euro-Québec Hydro-Hydrogen Pilot Project nicht vertrauten Leser einen Überblick darüber zu geben.

2.1 Geschichte

Im Jahre 1987 wurde von der DECHEMA eine Studie vorgelegt [11], in der die Durchführbarkeit einer auf dem Sekundärenergieträger Wasserstoff basierenden Energieversorgung untersucht wurde. Die "DECHEMA-Studie" wurde auf Anregung und im Auftrag der Kommission der Europäischen Gemeinschaften unter Federführung der DECHEMA von mehr als zwanzig am "Wasserstoff-Pilotprojekt Kanada" interessierten Unternehmen und Institutionen erarbeitet.

Dieser ersten Definitionsphase folgte 1989 bis 1991 die Phase II des nunmehr als "Euro-Québec Hydro-Hydrogen Pilot Project" (EQHHPP) bezeichneten Vorhabens, an der zahlreiche Unternehmen aus Europa und Kanada beteiligt waren. In dieser Phase wurde das technische Konzept erarbeitet und detailliert.

2.2 Allgemeines Konzept

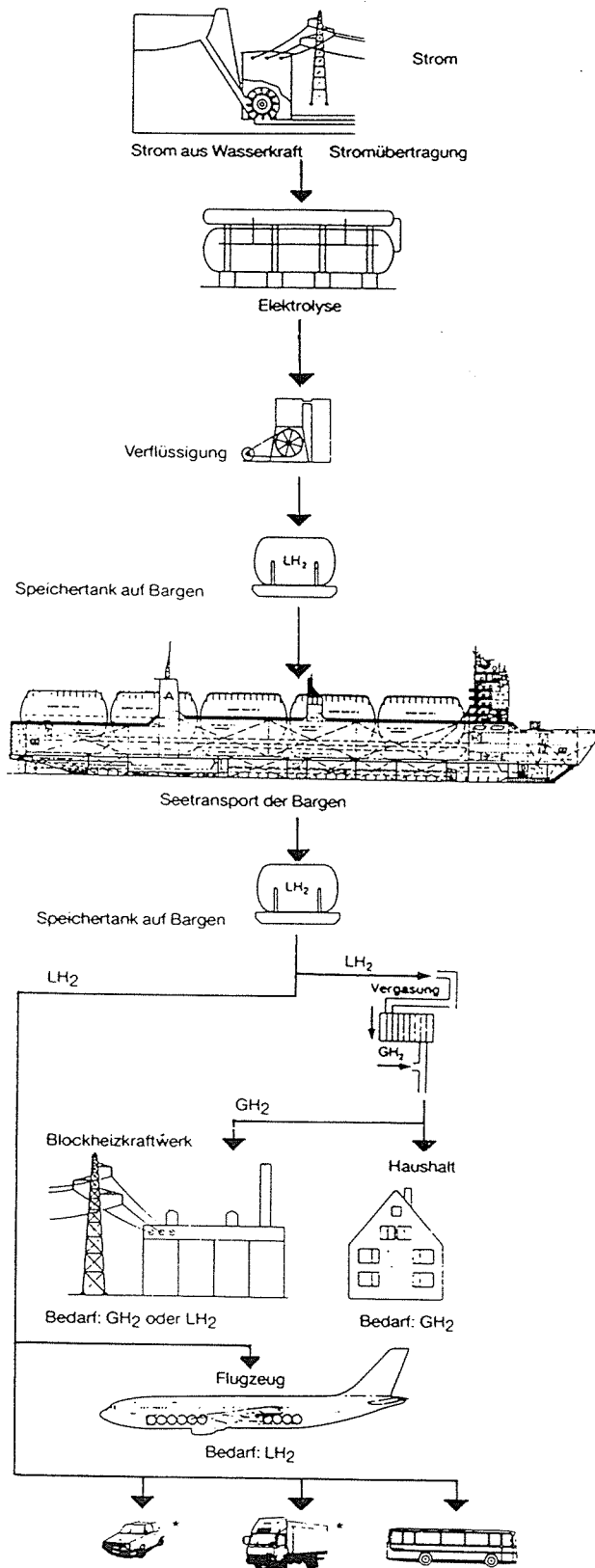
Die Idee des EQHHPP ist es, die gesamte Kette der Energieversorgung mit Wasserstoff im großtechnischen Maßstab zu demonstrieren. In Abb. 1 ist der Verfahrensablauf dargestellt.

Der Wasserstoff soll in Kanada mit aus Wasserkraft erzeugtem Strom durch Wasserelektrolyse gewonnen werden. Der Elektrolyseur soll eine Anschlußleistung von 100 MW besitzen. Nach der Elektrolyse erfolgt die Verflüssigung und Lagerung des tiefkalten³, nahezu drucklosen Wasserstoffs in zylindrischen, auf schwimmfähigen Pontons montierten Tanks (sog. Tank-Bargen) mit jeweils 3000 m³ Fassungsvermögen. Fünf dieser Tank-Bargen werden alle 22 Tage in ein Dockschiff eingeschwommen und auf dem Seeweg nach Hamburg transportiert. In Kanada verbleiben die fünf vom Dockschiff aus Hamburg mitgebrachten entleerten Tank-Bargen.

In Hamburg werden die Tank-Bargen ausgeschwommen und an Land gesetzt. Das Dockschiff wird mit fünf entleerten Tank-Bargen beladen. Von diesem Tanklager im Hamburger Hafen aus werden die Endverbraucher mit flüssigem Wasserstoff (LH₂) versorgt. Die Versorgung erfolgt mit Hilfe von Tanklastzügen. Lediglich ein Industriebetrieb, der eine Dampfkraftanlage betreibt, soll vom Tanklager aus über eine Pipeline mit gasförmigem Wasserstoff versorgt werden. Vorgesehene Endverbraucher von flüssigem Wasserstoff sind:

- die Hamburger Hochbahn AG, von der ca. 150 Linienbusse mit Wasserstoff betrieben werden sollen;

³: Temperatur des flüssigen Wasserstoffs unter Atmosphärendruck: 20 K = -253 °C



Die Versorgung mit dem Sekundärenergieträger Wasserstoff im EQHPP

Abb. 1: Ablaufschema für das EQHPP

- die Deutsche Aerospace, die einen mit Wasserstoff betriebenen Airbus A320 von Finkenwerder aus zu Demonstrationszwecken einsetzen will;
- die Hamburger Elektrizitätswerke AG, die ein Brennstoffzellenkraftwerk und ein Blockheizkraftwerk mit Gasturbine betreiben wollen;
- die Universität Hamburg-Harburg, die ein mit einem Motor betriebenes Blockheizkraftwerk betreiben will;
- die Ölmühle Hamburg, die ein Dampfkraftwerk betreiben will.

Für den Fall, daß ein Teil oder der gesamte angelandete Wasserstoff nicht verbraucht werden kann, ist die Einspeisung in das Erdgasnetz der Stadt Hamburg vorgesehen.

2.3 Beschreibung des Tanklagers

Das in Abb. 2 dargestellte Terminal soll im Hamburger Blumensandhafen errichtet werden. Abb. 3 zeigt eine dreidimensionale Ansicht des Terminals. Abb. 3 soll hier lediglich der Veranschaulichung der örtlichen Gegebenheiten dienen. Es ist daher zu beachten, daß nicht der letzte Stand der Planungen wiedergegeben ist. Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf die Darstellung gemäß Abb. 2.

Der Blumensandhafen hat den Status eines Ölhafens. Das Konzept des Lagers wird von den ortsbeweglichen Lagertanks und dem damit verbundenen Umschlagskonzept bestimmt. Es sind zwölf Tankstellplätze und vier Reservestellplätze vorgesehen.

Die Verbraucher sollen ohne Unterbrechung versorgt werden. Aus diesem Grunde sind sechs Lagertanks vorgesehen, von denen jeweils fünf in jedem Transportzyklus (22 Tage) ausgetauscht werden. Aus dem sechsten Tank erfolgt die Versorgung der Verbraucher während der Ent- und Beladung des Barge-Carriers.

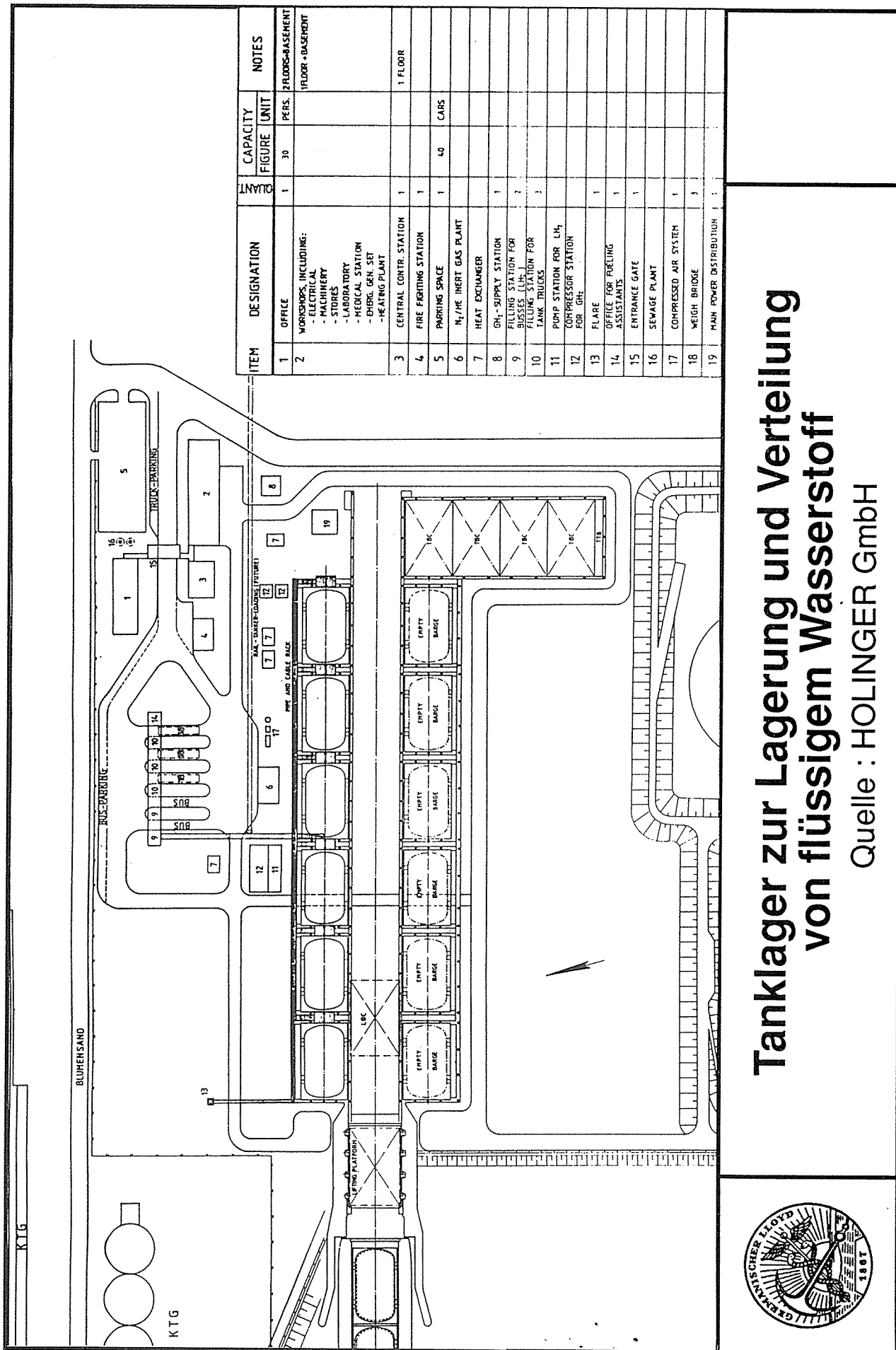
Alle Tankanschlüsse befinden sich an den nördlichen Stellplätzen. Die südlichen Stellplätze dienen der kurzzeitigen Zwischenlagerung während des Ent- und Beladens des Schiffes.

Bevor das Schiff eintrifft, werden die fünf entleerten Tanks über ein Schienensystem von den nördlichen auf die südlichen Stellplätze verfahren. Nach Eintreffen des Schiffes werden die Tank-Barge aus dem Schiff ausgeschwommen und mit der "Lifting Platform" aus dem Wasser auf das Niveau des 12 m über der Wasserlinie liegenden Schienensystems angehoben. Dort werden sie von einem auf Schienen fahrenden Transportwagen übernommen. Über das Schienensystem werden die Tanks auf die nördlichen Stellplätze befördert und anschließend die Verbindungen zum Entnahmesystem gesetzt.

Nunmehr können die auf den südlichen Stellplätzen stehenden entleerten Tank-Barge auf die oben beschriebene Weise in das Schiff verladen werden.

Der Barge-Carrier transportiert die Behälter in einer zehntägigen Seereise nach Kanada, wo sie erneut mit flüssigem Wasserstoff gefüllt werden.

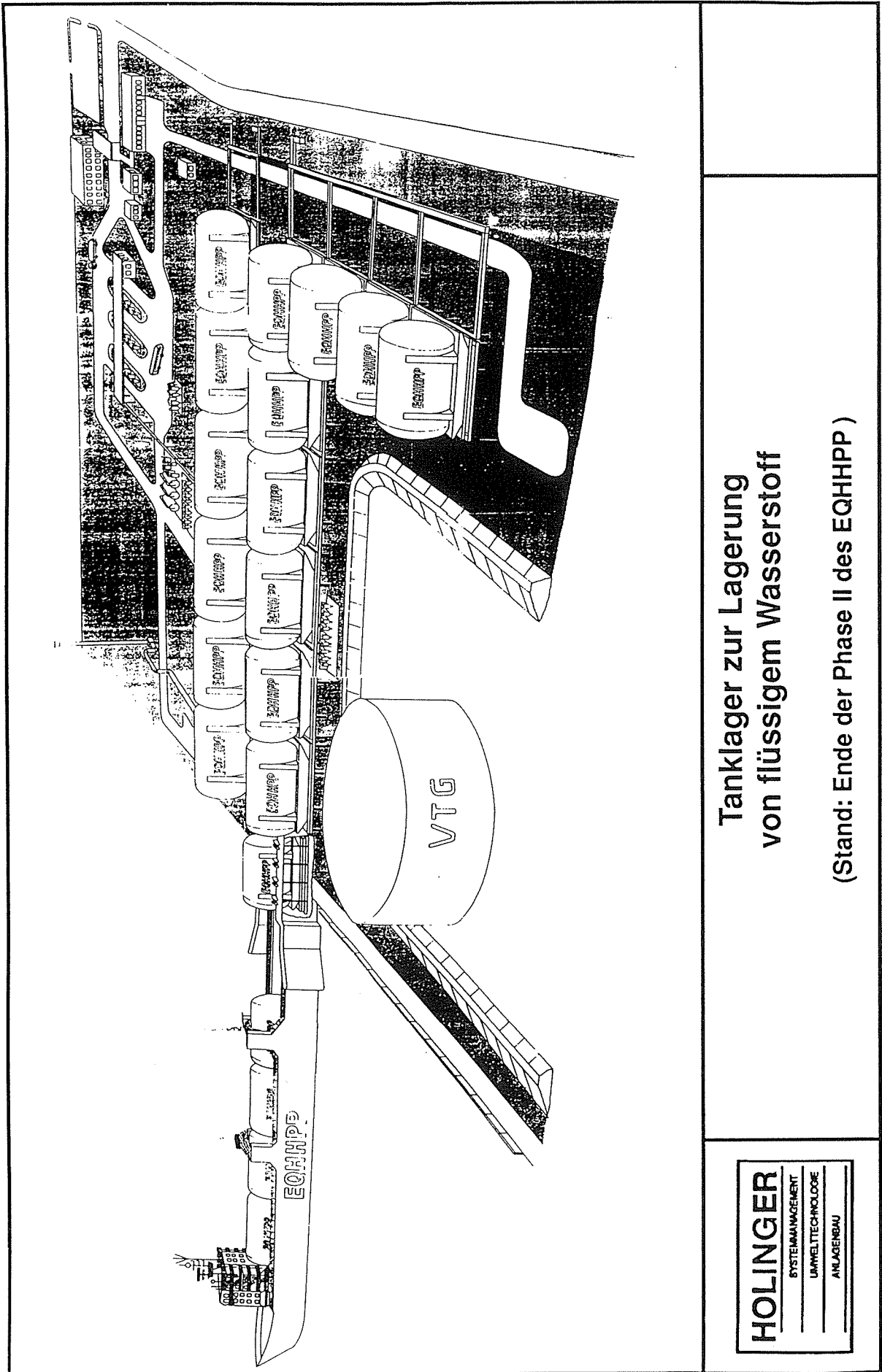
Der größte Teil des Wasserstoffs wird als Flüssig-Wasserstoff in Straßentankfahrzeuge verladen und mit diesen zu den Endverbrauchern befördert. In der ersten Projektphase ist



Tanklager zur Lagerung und Verteilung von flüssigem Wasserstoff

Quelle : HOLINGER GmbH

Abb. 2: Grundriß des Tanklagers



Tanklager zur Lagerung
 von flüssigem Wasserstoff
 (Stand: Ende der Phase II des EQHHP)

HOLINGER
SYSTEMMANAGEMENT
UMWELTECHNOLOGIE
ANLAGENBAU

Abb. 3: Perspektivische Ansicht des Tanklagers

auch die Betankung einer kleinen Anzahl von Stadtbussen der Hamburger Hochbahn (HHA) auf dem Gelände des Tanklagers vorgesehen. Im Endausbau ist von der HHA die Umrüstung eines Busbetriebshofes für den Wasserstoffbetrieb geplant. Die Busbetankung wird dann dort erfolgen.

Eine Dampfkraftanlage wird über eine ca. 1 km lange Gasleitung kontinuierlich mit Wasserstoff versorgt. Ferner ist der Anschluß an das Gasleitungsnetz der Hamburger Gaswerke (HGW) vorgesehen, um bei Minderverbrauch oder wenn Wasserstoff aus anderen Gründen nicht planmäßig abgegeben werden kann, den Überschuß in das Hamburger Gasnetz einspeisen zu können.

2.4 Beschreibung des Gastankschiffes

Das Transportschiff (Abb. 4) ist ein sog. "Bargen-Carrier" mit einer Länge zwischen den Loten von 180 m und einer Breite von 29 m. Es werden fünf Tank-Bargen mit einem Fassungsvermögen von jeweils 3000 m³ Flüssig-Wasserstoff transportiert. Die Tanks besitzen einen Außendurchmesser von 16 m bei einer Außenlänge von 28 m und sind für einen Betriebsdruck von 6 bar (abs) ausgelegt.

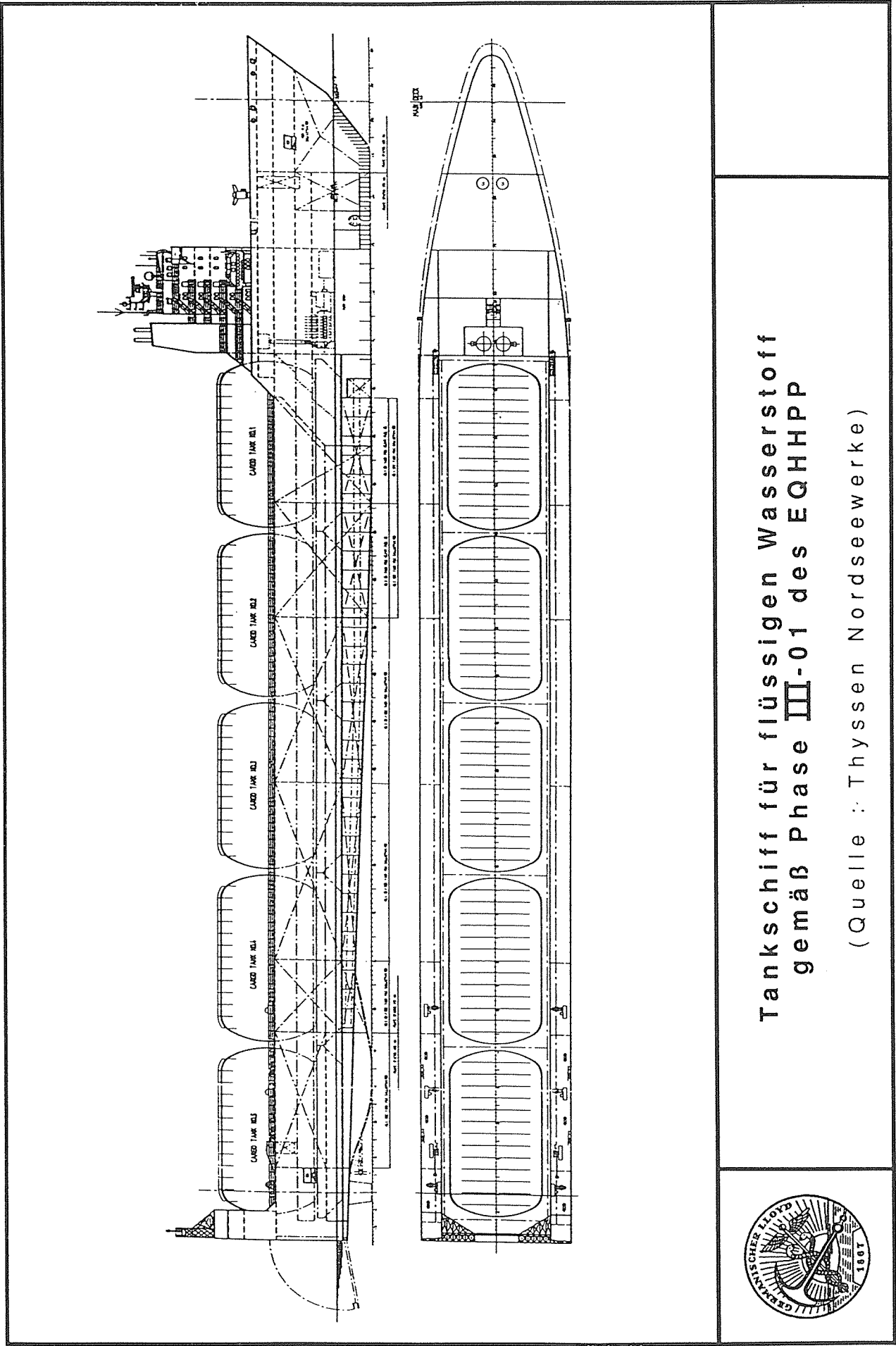
Der Antrieb des Schiffes erfolgt dieselelektrisch. Die Dieselgeneratoren sind im vorderen Bereich des Schiffes untergebracht und versorgen die zwei jeweils 4400 kW leistenden, im Heck angeordneten, elektrischen Fahrmotoren mit Strom.

Die Tanks sind während der Fahrt über separate Sicherheitsleitungen mit den Abblasmasten des Schiffes verbunden. Bordeigene Anschlüsse für Be- und Entladeleitungen sind nicht vorgesehen. Die Tanks werden verschlossen transportiert. Die über die Isolierung und die Tankaufhängung einströmende Wärme führt zu einer mit einem Druckanstieg verbundenen Temperaturerhöhung des flüssigen Wasserstoffs. Während der 10-tägigen Überfahrt wird mit einem Druckanstieg von 0,5 bar gerechnet. Damit beträgt der Tankinnendruck bei der Anlandung in Hamburg ca. 1,75 bar (abs).

Zum Be- und Entladen des Schiffes wird Ballastwasser in die in die seitlichen Ballasttanks gepumpt. Das Schiff wird dadurch soweit abgesenkt, daß die Bargen aufschwimmen und über die Heckklappe ausgeschwommen werden können.

Der grundsätzliche Unterschied zwischen dem oben beschriebenen und konventionellen Flüssiggas-Tankschiffen besteht in den vom Schiff trennbaren Tanks. Die Tanks konventioneller Gastankschiffe sind in den Schiffskörper eingebaut und können mit bordeigenen Mitteln entladen werden.

Bedingt durch das Konzept der vom Schiff trennbaren Ladetanks entspricht das vorgeschlagene Schiff nicht allen im IGC-Code [4.1.2] festgelegten Anforderungen. In den Punkten, in denen das Schiff von den Vorschriften abweicht, ist durch geeignete Maßnahmen ein gleichwertiger Sicherheitsstandard zu gewährleisten.



**Tankschiff für flüssigen Wasserstoff
gemäß Phase III-01 des EQHPP**

(Quelle : Thyssen Nordseewerke)



Abb. 4: Tankschiff für flüssigen Wasserstoff

3 Anwendbare Gesetze, Verordnungen, Vorschriften, Technische Regeln und Vereinbarungen

In diesem Teil sollen die wichtigsten der anwendbaren Vorschriften und Regeln grundsätzlich vorgestellt werden. Was sie speziell über eine Anlage wie die hier betrachtete zu sagen haben, wird an der jeweiligen Stelle weiter unten angeführt werden. Verordnungen und untergeordnete Gesetze sind in der Regel unter den Gesetzen aufgeführt, zu denen sie gehören.

In manchen Fällen kann mehr als eine Regelung anwendbar sein. So müssen etwa die Behälter die Bestimmungen für gewerbliche Einrichtungen (an Land) erfüllen, aber auch die für den Seetransport gefährlicher Güter. In einem solchen Fall ist die jeweils strengere Regel anzuwenden. Sich widersprechende Vorschriften sind in diesem Zusammenhang bisher nicht bekannt.

3.1 Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG)

Möglicherweise gefährliche Anlagen müssen nach den Bestimmungen des BImSchG [1] (Quellenverzeichnis beginnt auf S. 53) genehmigt werden. Es enthält außer Regeln für den normalen Betrieb auch solche für die Vermeidung von Unfällen und für die Schadensbegrenzung, falls doch einer geschieht.

Die Einzelheiten sind in einer Reihe von Verordnungen zu diesem Gesetz geregelt, besonders der sogenannten *Störfallverordnung* [1.5]. Die Genehmigungsbehörde kann im Laufe des Verfahrens eine vollständige "Störfallanalyse" verlangen, die darlegt, was passieren könnte und wie sich das innerhalb und außerhalb der Anlage auswirken könnte. Das dabei einzuhaltende Verfahren ist in Verwaltungsvorschriften geregelt [1.5.1, 1.5.2]. Andere Verordnungen regeln weitere Gesichtspunkte der Durchführung dieses Gesetzes¹.

Das BImSchG ist das wichtigste Gesetz zum Schutz der Umwelt. Alle anderen Verordnungen und Regeln aller Art (wie Bauvorschriften, Hafenregeln, Gemeinde- oder ortsspezifische Regeln, das Wasserhaushaltsgesetz [3] usw.) dürfen den aus dem BImSchG hergeleiteten Regeln und Verfahren nicht widersprechen.

3.2 Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG)

Eine Anlage, die genehmigungspflichtig nach dem BImSchG ist, muß auch nach dem UVPG [2] auf ihre Auswirkungen hin untersucht werden². Dies muß schon in der Planungsphase geschehen, denn im Unterschied zum BImSchG ist es das Ziel des UVPG, nicht nur regelrechte Schäden, sondern jegliche Einwirkung auf die Umwelt durch Errichtung und Betrieb der Anlage frühzeitig und vollständig zu erfassen und zu beurteilen; ggf. müssen Alternativen zu der vorgeschlagenen Maßnahme erarbeitet werden.

1: Verordnungen zum Vollzug des Bundesimmissionsschutzgesetzes (BImSchV); die hier relevanten stehen im Literaturverzeichnis unter [1.x]

2: UVPG [2], Anlage zu §3, Fall 1

Auswirkungen im Sinne des UVPG sind etwa Bodenversiegelungen, Grundwasserabsenkungen beim Bau, Veränderungen des lokalen Klimas, vermehrter Verkehr durch Kunden und Lieferanten, Bau von Zufahrtsstraßen usw.

3.3 Gesetz über den Transport gefährlicher Güter

3.3.1 Allgemeines

Der Transport gefährlicher Güter in der Bundesrepublik Deutschland und über ihre Grenzen hinweg ist in einer Reihe von Gesetzen, Verordnungen und internationalen Übereinkommen geregelt, wobei die letzteren ebenfalls Gesetzesrang erhalten haben. Das *Gesetz über den Transport gefährlicher Güter* [4] und seine Verordnungen gelten für den Transport zur See [4.1], auf Binnenwasserstraßen [4.2], der Straße [4.3] und mit der Eisenbahn [4.4].

3.3.2 Internationale Vereinbarungen über den Seetransport gefährlicher Güter

Der Seetransport gefährlicher Güter wird international durch die von der IMO³ erarbeiteten Vorschriften geregelt. Die IMO ist eine Unterorganisation der Vereinten Nationen, die Regeln für die Sicherheit von Schiffen erarbeitet. Ihre Regeln sind in bindenden internationalen Vereinbarungen festgehalten, die von den Mitgliedsstaaten in die nationale Gesetzgebung integriert werden. Die grundlegende Konvention für den Transport gefährlicher Güter ist die SOLAS 1974-Konvention⁴ [4.1.1].

Der IMO-IGC-Code⁵ [4.1.2] bildet einen Teil der SOLAS 1974-Konvention⁶. Er enthält die Vorschriften für die Konstruktion und Ausrüstung von Flüssiggastankschiffen, die Flüssiggas als Massengut⁷ transportieren, soweit sie ab dem 1. Juli 1986 gebaut worden sind. Er ist auch in die Gesetzgebung der Bundesrepublik Deutschland übernommen worden [4.1.2]. Außerdem ist der IGC-Code vollständig in die Regeln des Germanischen Lloyd für Flüssiggastanker übernommen worden [4.1.3].

Eine weitere IMO-Konvention ist der IMDG-Code [4.1.4], der allgemeingültige Transportvorschriften für den Transport gefährlicher Güter auf See enthält. Auch der IMDG-Code ist Bestandteil der SOLAS-Konvention. Er definiert sowohl die Anforderungen an die Konstruktion und Ausrüstung der Schiffe und Transportbehälter als auch spezifische Vorschriften für die Stauung und Handhabung der erfaßten Gefahrstoffe. Der IMDG-Code wurde für den Transport von Stückgütern konzipiert.

SOLAS, IGC-Code und IMDG-Code in ihren jeweiligen amtlichen Übersetzungen [4.1.1, 4.1.2, 4.1.4] haben in Deutschland Gesetzeskraft nicht nur für den internationalen, sondern auch für den Binnenverkehr.

3: IMO = *I*nternational *M*aritime *O*rganization

4: SOLAS = "*S*afety *o*f *L*ife *a*t *S*ea"

5: "International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk"

6: s. Kap. VII, Teil C, Regeln 11 - 13 von SOLAS 1974 [4.1.1]

7: sog. Bulk-Transport

3.4 Chemikaliengesetz

Der Zweck des ChemG [5] ist der Schutz von Mensch und Umwelt vor den schädlichen Auswirkungen gefährlicher Stoffe. Dies geschieht durch Prüfungen, Anmeldungen, Klassifikationen und Regeln für Kennzeichnung und Verpackung. Nach dem ChemG ist Wasserstoff "leicht entzündlich"⁸. ChemG und die Verordnungen und *Technischen Regeln* dazu gelten nicht für den Verkehr.

Das ChemG beschäftigt sich hauptsächlich mit neuentwickelten Stoffen, die von der chemischen Industrie hergestellt oder importiert und verteilt werden. Wasserstoff ist seit zwei Jahrhunderten bekannt und daher kein neuer Stoff. Außerdem ist er ein natürliches Element und keine menschliche Schöpfung. Daher spielt das ChemG hier nur eine untergeordnete Rolle.

Während sich das ChemG hauptsächlich um Prüfungen und Kennzeichnungen dreht, enthält die *Gefahrstoffverordnung* (GefStoffV) [5.2] Regeln für die Behandlung gefährlicher Stoffe durch die Arbeitnehmer. Da Wasserstoff weder Krebs erzeugt noch giftig ist, gelten dafür nur wenige davon. Die technischen Einzelheiten sind in *Technischen Regeln für Gefahrstoffe* (TRGS) [5.2.1] festgehalten.

3.5 Druckbehälter-Verordnung

Die *Verordnung über Druckbehälter, Druckgasbehälter und Füllstationen* (DruckbehV) [6.1] behandelt Errichtung und Betrieb von Druckbehältern usw. für gewerbliche Zwecke⁹. Sie gehört zur *Gewerbeordnung* (GewO) [6]. Die DruckbehV gilt nicht für Druckbehälter auf Schiffen¹⁰. Diese unterliegen dem Verkehrsrecht.

Technische Einzelheiten über Berechnung, Herstellung und Betrieb finden sich in *Technischen Regeln*. Von Bedeutung hier sind besonders die *Technischen Regeln für Druckgase* (TRG) [6.1.1], die *Technischen Regeln für Druckbehälter* (TRB) [6.1.2] und die *Technischen Regeln für Rohrleitungen* (TRR) [6.1.3].

3.6 Verordnung über elektrische Anlagen in explosionsgefährdeten Räumen

Diese Verordnung (ElexV) [6.2] gilt für elektrische Einrichtungen in Räumen, in denen zündfähige Gasgemische entstehen oder entstehen können, außer an Bord von Schiffen¹¹. Auch diese Verordnung gehört zur *Gewerbeordnung*. Die im Titel erwähnten "Räume" können auch Gebiete außerhalb von Gebäuden sein. Die Einzelheiten der Durchführung finden sich in *Technischen Regeln* und *Richtlinien*¹². Diese gelten nicht nur für elektrische Anlagen, sondern für alle funkenerzeugenden Vorrichtungen in zündfähigen Atmo-

8: ChemG [5] §3.3i, genauer definiert in ChemGefMerkV [5.1] §1.4d

9: DruckbehV [6.1] §1.2

10: DruckbehV [6.1] §2.1.1

11: ElexV [6.2] §1.5.2. Regeln für Schiffe finden sich z. B. in [4.1.3].

12: [6.2.1, 6.2.2], wobei sich [6.2.2] hauptsächlich mit statischer Elektrizität beschäftigt.

sphären, also auch für solche, bei denen mechanisch erzeugte Funken gebildet werden können.

3.7 Arbeitsstättenverordnung

Die ArbStättV [6.3] gilt für gewerbliche Arbeitsplätze und enthält Regeln für die Auslegung einzelner Arbeitsplätze und für den Bau ganzer Anlagen, um die Arbeitnehmer vor Unfällen und chronischen Schäden durch Arbeitsbedingungen, Produkte oder Arbeitsmittel zu schützen. Dies führt zu Regeln z. B. für Ventilation, Raumgröße, Beleuchtung, Verkehrswege und Aufzüge. Diese Verordnung stützt sich sowohl auf die *Gewerbeordnung* als auch auf das *Chemikaliengesetz*.

Technische Einzelheiten für zahlreiche Fälle finden sich in den dazugehörigen *Arbeitsstättenrichtlinien* (ASRL) [6.3.1].

3.8 Unfallverhütungs-Vorschriften

Die Berufsgenossenschaften haben einen Kodex von verbindlichen Vorschriften zur Unfallverhütung aufgestellt (UVV) [7]. Diese Regeln dienen zum einen dem Schutz der Arbeitnehmer durch eigenes verantwortungsvolles Verhalten, enthalten zum anderen aber auch Pflichten für den Arbeitgeber hinsichtlich sicherer Werksgestaltung und angemessener Ausrüstung.

Obwohl diese Regeln keinen Gesetzesrang haben, sind sie nicht weniger verbindlich. Der praktische Inhalt der UVVs deckt sich weitgehend mit dem der oben erwähnten Gesetze und Verordnungen.

3.9 AD-Merkblätter

Die *AD-Merkblätter* [9] für Druckbehälter werden von der Vereinigung der Technischen Überwachungsvereine (VdTÜV) herausgegeben und gelten in Deutschland als anerkanntes technisches Regelwerk für Druckbehälter, die der DruckbehV genügen sollen. Nach diesen Regeln gebaute, ausgerüstete und geprüfte Behälter werden als sicher betrachtet. Auch wenn die *AD-Merkblätter* keinen Gesetzesrang haben, stellen sie den Stand der Technik dar. Sie gelten nur so weit, als es keine speziellen oder abweichenden Regeln in der DruckbehV oder ihren *Technischen Regeln* gibt. Oft jedoch werden die *AD-Merkblätter* in den *Technischen Regeln* ausdrücklich zitiert¹³. Obwohl die *AD-Merkblätter* eigentlich nur für Druckbehälter gelten, können sie oft analog auch auf Druckgasbehälter angewendet werden.

Die *AD-Merkblätter* können daher als Richtschnur für die Technik angesehen werden und sollten so weit wie möglich befolgt werden, denn sie enthalten das in Deutschland allgemein anerkannte technische Wissen. Abweichungen davon mögen sinnvoll sein, wenn die Eigenschaften des flüssigen Wasserstoffs oder besondere Gesetze oder Regeln dies erfordern. Das Gegenstück in den USA und Kanada ist der ASME-Code [10].

13: s. z. B. TRB [6.1.2] 010 Abs. 1 oder TRG [6.1.1] 002 Abs. 2

4 Seetransport

4.1 Anzuwendende Gesetze und Vorschriften

Die Wasserstraßen in Deutschland sind in Binnenschiffahrtsstraßen und Seeschiffahrtsstraßen eingeteilt. Entsprechend gilt auf den Binnenschiffahrtsstraßen die Gefahrgutverordnung Binnenschiffahrt [4.2] und auf den Seeverkehrsstraßen die Gefahrgutverordnung See [4.1].

Die Elbe ist bis zum Hamburger Hafen als Seeschiffahrtsstraße eingeordnet. Für einen Transport von flüssigem Wasserstoff nach Hamburg, wie er im EQHHPP vorgesehen ist, ist daher die GGVSee anzuwenden. Die GGVSee schließt die SOLAS-Konvention [4.1.1] und damit auch den IGC- [4.1.2] und IMDG-Code [4.1.4] ein.

Ein Tankschiff, wie es im EQHHPP vorgeschlagen wird [12.1] (s. Abb. 4), ist als Massengutschiff anzusehen und unterliegt daher den Bestimmungen des IGC-Codes bzw. Kapitel 6 der Vorschriften des Germanischen Lloyd [4.1.3]. Die Ladetanks des Schiffsentwurfes nach Abb. 4 sind vom Schiff trennbar und dienen an Land als Lagertanks. Sie müssen daher den Anforderungen der Schiffs- und der Landseite entsprechen.

Die vom IGC-Code erfaßten Stoffe sind in Abschnitt 19 des Codes festgelegt. Da bislang kein Bedarf für den Transport von sehr großen Mengen an flüssigem Wasserstoff bestand, wurde Wasserstoff nicht in die Stoffliste aufgenommen und wird damit nicht vom Code erfaßt. Die im IGC-Code enthaltenen Sicherheitsgrundsätze sind jedoch auch auf den Transport von flüssigem Wasserstoff als Massengut anzuwenden. Ergänzende Sicherheitsvorkehrungen sind unter Berücksichtigung der besonderen Stoffeigenschaften des Wasserstoffs notwendig.

Flüssiger Wasserstoff unterscheidet sich von den im IGC-Code erfaßten Stoffen insbesondere durch seine niedrige Dichte, seine tiefe Siedetemperatur¹, die geringe volumetrische Verdampfungswärme, den weiten Zündbereich, die hohe Diffusionsneigung und die geringe minimale Zündenergie (vgl. Tab. 1 S. 2 sowie die Ausführungen in Teil 8 ab S. 44).

Die sich aus dem Massengut-Transport des Flüssig-Wasserstoffs ergebenden Besonderheiten für Konstruktion und Ausrüstung des Schiffes werden im Folgenden anhand der jeweiligen Abschnitte des IGC-Codes erläutert. Die Ausführungen beziehen sich auf die in Deutschland gültige Fassung des IGC-Codes; diese ist identisch mit dem Kapitel 6 der Vorschriften des Germanischen Lloyd für Klassifikation und Bau von Seeschiffen.

4.2 Grundprinzipien für die Auslegung von Typ C-Tanks

4.2.1 Typ-C Tanks

Unabhängige Typ-C-Tanks gemäß IGC-Code [4.1.2] sind Tanks, deren Entwurfsdampfdruck größer als 1,7 bar (abs) ist und deren minimaler Entwurfsdampfdruck p_0 sicherstellt, daß die maximale doppelte Amplitude der Membranspannungen geringer ist als die doppelte Amplitude $\Delta\sigma_A$, die aus Gründen der Rißfortschrittssicherheit zulässig ist. Dieses

¹: mit 20 K bei 1 bar liegt sie nahe am absoluten Nullpunkt

Kriterium stellt sicher, daß sich ein durch die gesamte Wandstärke gehender Riß auch unter den ungünstigsten dynamischen Belastungen nicht entwickeln kann. Aus diesem Grund ist für Typ-C-Tanks keine zweite Barriere² erforderlich. Diese Tanks werden auch als Drucktanks bezeichnet. Unabhängig bedeutet, daß sie kein integraler Bestandteil der Schiffshlle sind.

4.2.2 Auslegungsbelastungen

Die Typ-C-Tanks müssen für die maximalen kombinierten statischen und dynamischen Flssigkeitsdrcke plus dem Dampfdruck ausgelegt werden. Bei der Ermittlung des dynamischen Flüssigkeitsdruckes werden die mit einer Wahrscheinlichkeit von $Q = 10^{-8}$ im Seegang auftretenden maximalen Beschleunigungen zugrunde gelegt. Die Wahrscheinlichkeit von $Q = 10^{-8}$ bedeutet, daß eine derartige Belastung etwa einmal in zwanzig Jahren auftritt. Aufgrund des stochastischen Charakters der vom Seegang verursachten dynamischen Belastungen wird der maximale Gesamtflssigkeitsdruck³ unter Verwendung einer Beschleunigungsellipse und der Annahme eines zu 100 % gefllten Tanks ermittelt.

Die Auslegungsdichte ist die größte Ladungsdichte unter Ladungsbedingungen. Dies ist im allgemeinen die Dichte der Ladung am Siedepunkt und unter atmosphärischem Druck.

Der bei der Tankauslegung zu verwendende Dampfdruck ist der größere der beiden folgenden Drücke:

- Entwurfsdampfdruck p_0 gemäß den GL-Vorschriften⁴;
- Maximaler Ansprechdruck der Sicherheitsventile (MARVS⁵).

Vergleicht man die dargestellten Belastungsannahmen mit denen, die bei sonstigen Druckbehältern üblich sind, so kann gesagt werden, daß die dargestellten Belastungsannahmen sehr konservative Annahmen sind. Die Belastungsannahmen, auf denen die Dimensionierung der Aufhängungen basiert, sind ebenfalls als sehr konservativ zu bezeichnen.

4.2.3 Mindestwandstrken und Sicherheitsfaktoren der Ladetanks

Die Mindestwandstrken der Ladetanks wie Behlterwandstrke, Wandstärke der Tankdome etc. werden auf der Basis anerkannter technischer Standards ermittelt. In Deutschland sind dies für Ladetanks auf Seeschiffen die entsprechenden Vorschriften des Germanischen Lloyd [4.1.3]. In den USA und Kanada erfolgt die Auslegung gemäß ASME-Code⁶.

2: zweite Barriere: zusätzliche Auffangwanne zum Aufnehmen von aus einem Riß austretender Ladung

3: statischer plus dynamischer Druck

4: [4.1.3] Kapitel 6, §4.2.4.4

5: MARVS = "**M**aximum **R**elief **V**alve **S**et Pressure"

6: [10], Division 1

Hinsichtlich der Sicherheitsfaktoren bzw. zulässigen Spannungen gemäß den Vorschriften des Germanischen

$$\sigma_m = \frac{R_m}{A}, \quad \sigma_m = \frac{R_{eH}}{B} \quad (1)$$

Lloyd [4.1.3] gilt, daß für die zulässige Membranspannung der Behälterwand der niedrigere der beiden Werte aus (1) anzusetzen ist, wobei:

R_m : Materialspezifische Mindestnennbruchfestigkeit bei Raumtemperatur,

R_{eH} : Mindestnennstreckgrenze bei Raumtemperatur,

A, B: Sicherheitsfaktoren gemäß Tab. 2.

	Ni, C-Mn-Stähle	Austenitische Stähle	Al-Legierungen
A	3,0	3,5	4,0
B	2,0	1,6	1,5

Tab. 2: Sicherheitsfaktoren A und B gemäß Kapitel 6 der GL-Vorschriften

Trotz der konservativen Lastannahmen sind die in Tab. 2 angegebenen Sicherheitsfaktoren relativ groß. Bei einer Auslegung gemäß ASME-Code⁷ gilt für Material, das nicht vom ASME-Code erfaßt ist, für den Sicherheitsfaktor A der Wert 4,0.

Für die Auflager der Tanks ist als zulässige Spannung der kleinere der beiden Werte⁸

$$0,8 R_{eH}, \quad 0,57 R_m \quad (2)$$

aus (2) anzusetzen. Die Auflager sind so zu dimensionieren, daß eine am Tank in Längsrichtung angreifende Kollisionskraft von 0,5 G nach vorn bzw. 0,25 G nach hinten wirkend aufgenommen werden kann. G ist hierbei die Gewichtskraft des Tanks einschließlich Ladung⁹.

4.2.4 Materialauswahl

Die Auswahl des Tankmaterials erfolgt gemäß den GL-Vorschriften¹⁰. Wesentlich für die Auswahl des Tankmaterials ist die niedrigste Temperatur, der der Tank ausgesetzt werden darf. Bei dieser "Niedrigsten Entwurfstemperatur" müssen ausreichende Festigkeitswerte des Tankmaterials nachgewiesen werden.

Die Temperatur, bei der die in Abschnitt 6 festgelegten Tests zum Nachweis der Festigkeitswerte durchgeführt werden müssen, liegt mindestens 5 °C unter der Niedrigsten Entwurfstemperatur. Die niedrigste vorgesehene Testtemperatur beträgt -196 °C¹¹.

7: [10] Division 1

8: van Mises Vergleichsspannung

9: [4.1.3] Abschn. 4.6.4

10: [4.1.3] Abschnitt 6

11: d. i. der Siedepunkt von Stickstoff unter Atmosphärendruck

Das Material für einen Tank für flüssigen Wasserstoff sollte bei -269 °C ¹² getestet werden, da die Temperatur des flüssigen Wasserstoffs -253 °C beträgt.

Die Probleme, die mit der Wasserstoffversprödung der Werkstoffe verbunden sind, werden im IGC-Code nicht gesondert berücksichtigt.

4.2.5 Druckprobe für Ladetanks

Jeder Typ-C-Tank ist nach der Fertigstellung einer Wasser-Druckprobe zu unterziehen¹³. Der Druck an der Oberkante des Tanks darf dabei nicht kleiner als der 1,5-fache Entwurfsdampfdruck sein. Während der Druckprüfung darf in keinem Falle an irgendeiner Stelle die rechnerische primäre Membranspannung 90 % der Streckgrenze des Werkstoffs überschreiten.

Die Druckprobe ist bei jeder zweiten Klassenerneuerung zu wiederholen. Dies bedeutet, daß i. A. alle 10 Jahre eine Druckprobe durchgeführt wird.

4.2.6 Sicherheitsventile

Sicherheitsventile werden gemäß IGC-Code für den Brandfall ausgelegt. Sie müssen so bemessen sein, daß im Brandfall der Druck im Tank nicht über einen Wert von 120 % des maximal zulässigen Einstelldruckes der Sicherheitsventile ansteigt. Dabei wird angenommen, daß nicht die gesamte Tankoberfläche A der Wärmebelastung ausgesetzt ist. Der Berechnung liegt ein Wärmestrom von 108 kW m^{-2} bei einer Außentemperatur von 650 °C zugrunde.

Die aus diesen Grundannahmen abgeleitete Berechnungsformel für die mindestens erforderliche Abblaseleistung der Ventile ist in (3) angegeben.

$$Q = F \cdot G \cdot A^{0,82} \quad (3)$$

Hierbei ist Q die äquivalente Abblaseleistung für Luft unter Normbedingungen von 273 K und $1,013\text{ bar}$ in $\text{m}^3\text{ s}^{-1}$.

Der Gasfaktor G berücksichtigt die Stoffeigenschaften des Flüssiggases im Tank¹⁴.

Unterschiedliche Tankisolierungen und Aufstellungsorte der Tanks werden durch den Feuerfaktor F erfaßt. Der Feuerfaktor F hat einen minimalen Wert von $F = 0,1$ für isolierte, unabhängige Tanks in inertisierten Laderäumen und einen maximalen Wert von $F = 1,0$ für nicht isolierte, an Deck angeordnete Tanks. Die Stärke der Isolierung wird in der Berechnung gemäß IGC-Code nicht gesondert berücksichtigt.

Untersuchungen der kanadischen Universität New Brunswick (UNB) sowie in Großbritannien durchgeführte Versuche haben ergeben, daß die Sicherheitsventile auch für den

12: d. i. die Siedetemperatur von Helium 4 unter Atmosphärendruck

13: [4.1.3] Abschnitt 4.10.10.3

14: er erfaßt: Verdampfungswärme, Isentropenexponent, Molmasse, Gaskonstante

Brandfall und das Auftreten einer Zweiphasenströmung in den Ventilen ausreichend dimensioniert sind [22].

4.2.7 Füllstand des Tanks

Die Füllgrenzen für die Ladetanks sind in Abschnitt 15 des IGC-Codes festgelegt. Danach darf "...zu keinem Zeitpunkt während des Beladens, des Transportes der Ladung einschließlich im Brandfall, ... der Tank zu mehr als 98 % mit Flüssigkeit gefüllt sein"¹⁵. Der Füllgrad wird mit Hilfe der Formel (4) ermittelt.

Bei der Berechnung des zulässigen maximalen Füllgrades gemäß (4) wird davon ausgegangen, daß sich die Flüssigkeit im Tank immer in

$$V_L = 0,98 V \frac{\rho_R}{\rho_L} \quad (4)$$

einem homogenen Gleichgewichtszustand befindet. Aus diesem Grunde ergibt sich das maximale Volumen der Ladung (V_L) aus dem Volumen des Tanks (V) und dem Quotienten der Dichte der Flüssigkeit beim Ansprechen der Sicherheitsventile (ρ_R) und der Dichte bei der Beladung (ρ_L)¹⁶.

Im Herbst 1992 wurde von der IMO eine Änderung der Vorschriften für den maximalen Füllgrad von Typ-C-Tanks¹⁷ beschlossen. Gemäß dieser Änderung wird nunmehr die maximale, im normalen Betrieb auftretende Temperatur als Referenzwert für die Festlegung der Dichte ρ_R herangezogen. Dies hat zur Folge, daß Typ-C-Tanks einen höheren Füllgrad aufweisen dürfen als bisher.

Für einen Flüssig-Wasserstofftank mit einem geometrischen Volumen von $V = 3550 \text{ m}^3$, einem Druck

$$\frac{V_L}{V} = 0,98 \frac{65,16}{69,13} = 0,92 \quad (5)$$

bei der Beladung von $p_L = 1,5 \text{ bar (abs)}$ ¹⁸ sowie einem maximal im Normalbetrieb auftretenden Druck von $3,0 \text{ bar (abs)}$ ¹⁹ bedeutet dies einen Füllgrad wie in (5) angegeben. Dies entspricht einer Füllung mit 3279 m^3 flüssigem Wasserstoff.

Demgegenüber ist bei Verwendung der bislang geltenden Vorschrift die Dichte ρ_R beim Ansprechdruck der Si-

$$\frac{V_L}{V} = 0,98 \frac{59,70}{69,13} = 0,85 \quad (6)$$

cherheitsventile von $p_{\text{MARVS}} = 6 \text{ bar (abs)}$ einzusetzen. Daraus ergibt sich ein Füllgrad nach (6) und damit eine Füllung mit 3018 m^3 flüssigem Wasserstoff.

15: [4.1.2] Abschnitt 15.1-0.1

16: das gilt, wenn keine Druck- u. Temperaturregelung gemäß [4.1.2] Abschnitt 7 vorgesehen ist

17: Drucktanks

18: entspr. einer Siedetemperatur $T_s = 21,7 \text{ K}$

19: entspr. einer Siedetemperatur $T_s = 24,6 \text{ K}$

4.3 Lade- und Prozeßrohrleitungen

Die Anforderungen an das Rohrleitungssystem an Bord von Schiffen, die verflüssigte Gase als Massengut transportieren, sind in Abschnitt 5 des IGC-Codes festgelegt. Der Code legt Mindestanforderungen hinsichtlich Konstruktion, Auslegung und Fertigung der Komponenten des Rohrleitungssystems fest. Die Art der Ladung wird nicht spezifiziert.

4.3.1 Bestimmungen im IGC-Code, bei denen eine wasserstoffspezifische Regelung erforderlich erscheint

Alle in diesem Teil genannten Abschnittsnummern beziehen sich auf den IGC-Code [4.1.2], soweit nicht ausdrücklich anders erwähnt.

Einwandige Rohrleitungen²⁰ sind gemäß Abschnitt 5.2.2, 5.2.3 und 5.2.4²¹ auszulegen. Der minimale Entwurfsdampfdruck für diese Leitungen beträgt 10 bar²². Vakuumisolierte Rohrleitungen, wie sie für flüssigen Wasserstoff erforderlich sind, werden vom IGC-Code nicht erfaßt.

Die Außenrohre von vakuumisolierten Rohrleitungen sollten mit Sicherheitseinrichtungen²³ abgesichert sein, um einen unzulässigen Druckanstieg bei einer Leckage des Innenrohres zu verhindern.

Für Rohrleitungen, die eine Entwurfstemperatur unter -110 °C besitzen, ist ein Spannungsnachweis gemäß 5.2.5 erforderlich. Die Methode, nach der dieser Spannungsnachweis erfolgt, wird von der Klassifikationsgesellschaft festgelegt und geprüft.

Rohrleitungsverbindungen sollten vorzugsweise geschweißt werden. In 5.4.6 sind die Methoden für Schweißung, Wärmebehandlung nach dem Schweißen sowie die zerstörungsfreie Prüfung festgelegt. Ob diese Festlegungen für Wasserstoff ausreichen oder ergänzende zerstörungsfreie Prüfungen erforderlich sind, ist noch zu prüfen.

Die Prüfung der Rohrleitungen ist in Paragraph 5.5 definiert. Welche weiteren Prüfverfahren bei wasserstoffführenden Rohrleitungen anzuwenden sind, ist noch festzulegen.

Die Anforderungen an die Absperrarmaturen des Ladungssystems sind in 5.6 festgelegt. Es wird in 5.6.1 zwischen einem Überdruck unter 0,7 und über 0,7 bar unterschieden. Diese Festlegungen gehen von einem mit Umgebungsdruck beaufschlagten Ladetank aus. Die Außenhülle des Ladetanks für flüssigen Wasserstoff ist bei Verwendung einer Vakuumisolierung²⁴ mit 1 bar (abs) Außendruck beaufschlagt. Der Fall eines vakuumisolierten Tanks sollte in Abschnitt 5.6 aufgenommen werden.

20: i. A. alle nicht vakuumisolierten Rohrleitungen

21: 5.2.2: "Abmessungen die durch den Innendruck bestimmt werden"; 5.2.3: "Entwurfdruck"; 5.2.4: "Zulässige Spannungen"

22: §5.2.3.3

23: z. B. Sicherheitsventile, Berstscheiben

24: Andere Isolierungen für Flüssig-Wasserstoff-Tanks sind uns nicht bekannt

Die Verwendung von Rohrbruchventilen anstelle von fernbetätigten Schnellschlußventilen sollte bei Wasserstoff nicht zugelassen werden.

Der IGC-Code geht von im Schiff eingebauten Tanks aus, die ein bordeigenes Ladungs-umschlagssystem voraussetzen. In Paragraph 5.8 sind die Ladungsumschlagmethoden festgelegt. Es werden zwei unabhängig voneinander arbeitende Systeme vorgeschrieben. Das im EQHPP vorgeschlagene Umschlagssystem setzt dagegen Tanks voraus, die vom Schiff getrennt werden, um an Land als Lagertanks zu dienen. Aus diesem Grunde ist auf dem Schiff kein bordeigenes System zum Entladen der Tanks vorgesehen. Das im EQHPP vorgeschlagene System wird somit vom IGC-Code nicht erfaßt.

4.3.2 Zusätzliche Anforderungen

Aufgrund der niedrigen Viskosität und der guten Diffusionseigenschaften von Wasserstoff besteht eine im Vergleich zu anderen verflüssigten Gasen erhöhte Gefahr der Bildung von Leckagen. Aus diesem Grund ist eine Minimierung möglicher Leckstellen in wasserstoffführenden Anlagenteilen besonders wichtig. Besondere Aufmerksamkeit ist der Auswahl der Werkstoffe und Schweißzusätze sowie deren Prüfung zu widmen.

Verbindungen von Leitungen und Komponenten sollten grundsätzlich geschweißt sein. Flansche und andere lösbare Verbindungen sind auf Entladeleitungen zu begrenzen. Wo der Einbau von lösbaren Verbindungen notwendig ist, sind diese im Einzelfall zu begutachten und zu genehmigen.

Der Auslegung und Konstruktion von Ventilen, Pumpen und Kompressoren - insbesondere den Wellen und Dichtungen - kommt ebenfalls eine besondere Bedeutung zu.

- Ventilspindeln und Wellen sollten mit Faltenbälgen oder Membranen abgedichtet werden. Die Verwendung von konventionellen Dichtungen oder Dichtungsmaterialien ist zu vermeiden. Insbesondere im Bereich sehr tiefer Temperaturen ist zudem der Einsatz von konventionellen Dichtungsmaterialien häufig nicht möglich.
- Wellen von Pumpen und Kompressoren sollten mit doppelten mechanischen Dichtungen versehen werden. Der Raum zwischen diesen Dichtungen ist mit einem geeigneten Dichtmedium zu füllen. Konventionelle Wellendichtungen oder Stopfbuchsen sollten nicht eingesetzt werden.

Offene Leitungsenden wie z.B. an den Verbindungen der Befüll- und Entladeleitungen sind mit Blindflanschen zu versehen, wenn sie nicht in Betrieb sind. Anschlüsse zum Inertisieren und Spülen sind vorzusehen.

Die offenen Enden der Abblaseleitungen von Sicherheitsventilen können mit Berstscheiben oder Membranen verschlossen werden, um das Eindringen von Luft und ggf. die Entstehung eines zündfähigen Gemisches im Normalbetrieb zu verhindern. Die Leitungen sollen Inertisier- und Spülanschlüsse besitzen, mit einem inerten Gas gefüllt sein und unter leichtem Überdruck gehalten werden.

4.4 Brandschutz- und Feuerlöscheinrichtungen

Aufgrund der Konzeption des im EQHHPP vorgeschlagenen, vom Schiff trennbaren Tanksystems sind die Feuerlöscheinrichtungen auf dem Schiff teilweise identisch mit den Einrichtungen an Land²⁵. Daher werden im Folgenden die in Abschnitt 11 des IGC-Codes festgelegten Vorschriften zu Brandschutz- und Feuerlöscheinrichtungen dargestellt und diskutiert.

4.4.1 Hauptfeuerlöschleitung

SOLAS verlangt für alle Schiffe, unabhängig von Typ und Verwendungszweck, ein Wasser-Löschsystem mit Hydranten und Schläuchen. Dieses System muß so ausgelegt sein, daß jeder Teil des Schiffes, der im Normalfall während einer Reise zugänglich ist, mit zwei Löschwasserstrahlen erreicht werden kann.

Die Vorschriften des IGC-Codes²⁶ gehen über die SOLAS-Bestimmungen hinaus und gelten für alle Gastankschiffe, unabhängig von den Stoffeigenschaften der Gase, für deren Transport das Schiff konstruiert wurde.

In Abschnitt 11.2 des IGC-Codes wird gefordert, daß die Hauptfeuerlöschleitung mit ihren Hydranten so angeordnet sein muß "..., daß jeder Teil des Decks im Ladungsbereich und die über Deck befindlichen Teile des Ladungsbehältersystems und Tankabdeckungen mindestens mit 2 Wasserstrahlen erreicht werden können"²⁷. Die Hydranten sind so anzuordnen, daß die o. g. Forderung mit Schläuchen von maximal 33 m Länge erfüllt werden kann. Absperrarmaturen für die Feuerlöschleitungen sind am Poopfrontschott²⁸ und in Abständen von maximal 40 m vorzusehen.

4.4.2 Wassersprüheinrichtungen

Die Wassersprüheinrichtung dient im Brandfall der Kühlung der besprühten Oberflächen.

Gemäß IGC-Code²⁹ ist auf Schiffen, die entzündbare Gase befördern, eine fest installierte, manuell bedienbare Wassersprüheinrichtung vorzusehen. Dieses System muß alle freiliegenden Teile der Ladetanks, die Be- und Entladeleitungen für Gase und Flüssigkeiten und alle weiteren Bereiche, in denen wichtige Bedienarmaturen liegen, abdecken. Des weiteren müssen dem Ladungsbereich zugewandte Teile von Aufbauten, normalerweise bemannte Deckshäuser und Ladekontrollräume ebenfalls durch eine Wassersprüheinrichtung geschützt werden.

Das System muß in der Lage sein, die zu schützenden Oberflächen mit einer gleichmäßig verteilten Wassermenge von

25: Dies gilt insbesondere für das Wasserberieselungssystem (siehe unten)

26: [4.1.2] Abschnitt 11.2

27: zitiert nach [4.1.3] Kapitel 6, 11.2.2

28: Schott an den Aufbauten des Hinterschiffes

29: [4.1.2] Abschnitt 11.3

- 10 l m⁻² min⁻¹ für horizontale Flächen und
- 4 l m⁻² min⁻¹ für vertikale Flächen

zu besprühen.

Bei Strukturen, die keine klar definierten horizontalen bzw. vertikalen Oberflächen besitzen, wie z.B. zylindrische Tanks, muß die Wassermenge größer als der größte der folgenden Werte sein:

- 10 l m⁻² min⁻¹ bezogen auf die projektierte horizontale Oberfläche,
- 4 l m⁻² min⁻¹ bezogen auf die wirkliche Oberfläche.

Bei nicht horizontalen Oberflächen kann bei der Festlegung des Abstandes der Düsen das von höheren Bereichen ablaufende Wasser berücksichtigt werden.

Bei Landanlagen sind Wassersprüheinrichtungen für stationäre Tanks gemäß TRB 610 [6.1.2] für eine auf die wirkliche Oberfläche bezogene Wassermenge von 1,67 l m⁻² min⁻¹ auszulegen. Der IGC-Code stellt daher in dieser Hinsicht die strengeren Anforderungen.

Ein automatisches Auslösen der Wassersprüheinrichtung wird im IGC-Code nicht verlangt. Die Begründung hierfür ist darin zu sehen, daß bei den vom Code erfaßten Schiffen von einem hinter dem Ladungsbereich angeordneten Deckshaus ausgegangen wird. Der Ladungsbereich kann daher auf See ständig von der Brücke aus eingesehen werden. Im Hafen kann der Ladungsbereich vom Ladekontrollraum aus oder vom Deckspersonal überwacht werden.

Beim Transport von Wasserstoff ist zu berücksichtigen, daß bei einer Entzündung der Wasserstoff mit einer nicht sichtbaren Flamme verbrennt. Bei dem im EQHHPP vorgeschlagenen Schiff ist zudem das Deckshaus vor der Ladung angeordnet und dementsprechend der Ladungsbereich nicht einsehbar. Eine automatische Auslösung der Wassersprüheinrichtung erscheint daher sinnvoll.

Es sei darauf hingewiesen, daß die USCG³⁰ bei Schiffen, die Propylenoxid³¹ transportieren, ein automatisches Auslösen der Wassersprüheinrichtung verlangt.

Die im EQHHPP vorgeschlagenen, auf Barge montierten zylindrischen Tanks stehen frei im Dockraum des Barge-Carriers und besitzen untenliegende Ventilgruppen. Bei diesen Tanks ist daher auch eine Unterfeuerung denkbar. Insofern weichen sie von den i. A. üblichen fest eingebauten Tanks auf Flüssiggastankschiffen ab, bei denen allenfalls der obere Teil des Tanks oberhalb des Decks liegt. Bei Tanks, wie sie im EQHHPP vorgeschlagen werden, ist daher insbesondere die Wirksamkeit der Berieselung im unteren Tankbereich zu prüfen. Ein gewisser Schutz des Tanks kann auch von der Isolierung ausgehen. Tanks zum Transport von flüssigem Wasserstoff sind immer als Zweihüllentanks mit einer i. A. nicht brennbaren Isolierung zwischen den Hüllen ausgeführt³². Dies ist bei der Auslegung der Wasserberieselung zu berücksichtigen. In diesem Zusammen-

30: United States Coast Guard

31: UN-Nummer 1280

32: Der äußere Tank ist jedoch aus nicht tieftemperaturbeständigem Stahl und bildet die Begrenzung der Isolierung

hang sei auf die Untersuchungen der BAM zur Wirksamkeit von Wasserberieselungseinrichtungen bzw. Brandschutzisolierungen hingewiesen [23, 24, 25].

4.4.3 Pulver-Feuerlöscheinrichtungen

Auf Flüssiggas-Tankschiffen ist ein Pulver-Feuerlöschsystem vorgeschrieben. "Die Einrichtung muß so beschaffen sein, daß Pulver von mindestens zwei Handschläuchen oder von einer Kombination Monitor/Handschlauch zu jedem Teil des über dem Wetterdeck befindlichen Ladungsbereiches einschließlich über Deck befindlicher Ladungsrohrleitungen befördert werden kann."³³ Die Kapazität von Schläuchen soll mindestens $3,5 \text{ kg s}^{-1}$ und die von Monitoren mindestens 10 kg s^{-1} betragen. Die maximal zulässige Länge der Schläuche beträgt 33 m. Die Reichweite der Monitore ist nach Tab. 3 von ihrer Kapazität abhängig.

Kapazität kg s^{-1}	Reichweite m
10	10
25	30
45	40

Tab. 3: Reichweite von Pulver-Monitoren

Eine Pulver-Feuerlöscheinheit muß so ausgelegt sein, daß alle angeschlossenen Monitore und Schläuche mindestens 45 s lang mit voller Leistung betrieben werden können.

Grundsätzlich ist davon auszugehen, daß selbst kleine Wasserstoffbrände nur schwer zu ersticken sind [15]. Wenn das Feuer erstickt wird, besteht die Gefahr, daß sich der Wasserstoff an vorhandenen Zündquellen bzw. an durch das Feuer erhitzten Anlagenteilen wieder entzündet. Zudem bildet ausströmender Wasserstoff sehr schnell ein zündfähiges Gemisch. Bei einer Zündung treten heftige Deflagrationen auf. In geschlossenen Räumen, engen Gassen oder wenn beschleunigende Strukturen vorhanden sind können u. U. Detonationen auftreten [26]. Wenn die Wasserstoffzufuhr nicht unterbrochen werden kann, ist es also unter Umständen vorteilhaft, einen Brand nicht zu ersticken, sondern brennen zu lassen [14, 15].

33: [4.1.2] Abschnitt 11.4

5 Erfordernisse für die Anlage an Land

Dieser Teil behandelt die Anforderungen, die an die Anlage als Ganzes gestellt werden, besonders vom Standpunkt des Umweltschutzes aus. Die Vorschriften für die einzelnen Behälter und die Anlage als Füllstation werden in den folgenden Teilen behandelt werden.

5.1 Geltungsbereich der relevanten Gesetze und Regeln

Errichtung und Betrieb der Anlage fallen in den Rahmen des *Bundes-Immissionsschutzgesetzes*¹ und des *Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetzes*². Ebenfalls anwendbar sind eine Reihe von Verordnungen zur Durchführung des BImSchG, besonders die *Störfallverordnung* [1.5] mit ihren Verwaltungsvorschriften [1.5.1, 1.5.2].

Das *Gesetz über den Transport gefährlicher Güter* gilt auf Straßen, Flüssen oder anderen öffentlichen Verkehrswegen, nicht auf dem Gelände der Anlage³. Daher werden in diesem Teil weder dieses Gesetz noch seine Verordnungen behandelt werden.

Die *Druckbehälter-Verordnung* gilt nicht für Behälter, die nur zeitweilig in ihren Geltungsbereich eingeführt werden. Solche Behälter müssen stattdessen dem Verkehrsrecht genügen⁴, also dem Gesetz über den Transport gefährlicher Güter [4] und den dazugehörigen Verordnungen [4.1]. Andererseits gilt für Behälter, die dem Verkehrsrecht genügen, generell nicht die DruckbehV⁵. Für die Behälter des EQHHPP-Projekts ist diese Bestimmung anwendbar, weil sie für den Seetransport zugelassen werden müssen, bevor sie erstmals nach Hamburg kommen. Soweit die Tanks reine Transport- und Lagerbehälter sind, fallen sie also nicht unter die DruckbehV.

Außerdem ist die DruckbehV im speziellen Fall des EQHHPP-Projekts auch deshalb nicht anwendbar, weil die Tanks feste Bestandteile eines Wasserfahrzeugs (der Barge) sind⁶. Daran ändert sich auch dadurch nichts, daß dieses Wasserfahrzeug zeitweise auf dem Land abgestellt wird und die Tanks an eine auf dem Land befindliche Anlage zur Entnahme angeschlossen werden.

Die Füllstation jedoch, die weiter unten behandelt wird, unterliegt in jedem Fall der DruckbehV. So weit die Behälter also Teil davon sind, ist die Verordnung doch auf sie anwendbar (s. Teil 7, S. 39).

Die Druckbehälter-Verordnung unterscheidet zwischen "Druckbehältern" und "Druckgasbehältern" wie folgt: "Druckgasbehälter im Sinne dieser Verordnung sind ortsbewegliche Behälter, die mit Druckgasen gefüllt und nach dem Füllen zur Entnahme der Druckgase

1: BImSchG [1] §2.1.1

2: UVPG [2] §3, Anlage Abs. 1

3: [4.3] §1.1; s. [13.2] für Straßentransport von flüssigem Wasserstoff.

4: DruckbehV [6.1] §§20.1.3 und 20.2

5: DruckbehV [6.1] §4.3

6: DruckbehV [6.1] §§2.1.1, 2.1.3, 2.2.1

an einen anderen Ort verbracht werden"⁷. Die hier behandelten Wasserstofftanks sind demnach Druckgasbehälter. Dieser Unterschied wirkt sich bei der Anwendbarkeit der Technischen Regeln zur Verordnung aus. Die *Technischen Regeln für Druckgase* (TRG) gelten, die *Technischen Regeln für Druckbehälter* (TRB) dagegen nicht, da sie nicht für Druckgasbehälter gelten. Die *Technischen Regeln für Rohrleitungen* gelten unabhängig davon für die Rohrleitungen und deren Ausrüstungsteile⁸.

Die UVVs müssen bei Planung und Betrieb der Anlage befolgt werden. Besonders wichtig in diesem Zusammenhang sind VBG 1 und VBG 61⁹.

5.2 Zulassungsverfahren für die Anlage

Gewerbliche Anlagen, deren Betrieb besondere Nachteile für die Umwelt bewirken kann, müssen nach dem BImSchG genehmigt werden¹⁰. Zwar ist die Beeinträchtigung der Umwelt durch die hier geplante Anlage im Normalbetrieb vernachlässigbar, aber die Folgen eines Störfalles können schwerwiegend sein.

Genehmigungsbedürftige Anlagen müssen den Unfallverhütungsvorschriften der Störfallverordnung genügen. Anlagen wie die hier geplante sind in Anhang I behandelt. Wasserstoff ist unter den Chemikalien in Anhang II aufgeführt¹¹.

In Verwaltungsvorschriften sind die einzelnen Schritte des Bewertungsvorgangs durch die Genehmigungsbehörden festgelegt [1.5.1, 1.5.2]. Soweit die Menge von in der Anlage vorhandenen Chemikalien eine gewisse Schwelle ("Menge A") nicht überschreitet, wird in der Regel angenommen, daß von der Anlage keine Gemeingefahr ausgeht. Wird dagegen eine andere Schwelle ("Menge C") überschritten, wird dies automatisch angenommen, was bedeutet, daß der Antragsteller unbedingt eine "Störfallanalyse" vorlegen muß. Für Wasserstoff beträgt die Menge A 5.000 kg oder 71 m³, die Menge C 50.000 kg oder 714 m³ Flüssigkeit¹². Dazwischen liegt ein Ermessensspielraum der Genehmigungsbehörde. Die hier geplanten Mengen (15.000 m³ oder 1.050.000 kg) liegen weit über diesen Grenzen, was bedeutet, daß die Analyse in jedem Fall vorgelegt werden muß.

5.3 Auswirkungen der Anlage auf die Umwelt

Während des normalen Betriebs der Anlage werden Umweltschäden¹³ nicht auftreten. Sorgfalt erfordert jedoch die Möglichkeit eines Störfalles. Die Pflichten der Eigentümer und

7: DruckbehV [6.1] §3.3

8: DruckbehV [6.1] §4.1; TRB [6.1.2] 001 Abs. 1.1f; TRG [6.1.1] 001 Abs. 1.1f; TRR [6.1.3] 1 Abs. 1.1

9: UVV "Allgemeine Vorschriften" (VBG 1) [7.1], UVV "Gase" (VBG 61) [7.4]

10: [1] §4.1; s. auch [1.1, 1.3]

11: [1.5] Anhang I Abs. 16 (Lagerung brennbarer Gase in Behältern mit einem Fassungsvermögen von mindestens 300.000 kg, entsprechend 4.225 m³ flüssigen Wasserstoffs). Anhang II Nr. 317

12: [1.5.1] Anhang, Nr. 317; Menge A ist definiert in Abs. 2.2.2, Menge B in 3.2.3.1, Menge C in 3.2.1.3. B=C für Wasserstoff.

13: im Sinne von BImSchG [1] §3.1-4

Betreiber in den verschiedenen Vorschriften sind im Hinblick auf Anlagen wie etwa Chemiefabriken oder Raffinerien festgelegt worden, und es sollte nicht zu schwer fallen, ihnen zu genügen.

Emissionen während des Normalbetriebes müssen überwacht werden, wenn sie gefährlich sein könnten¹⁴. Gefährlich im vorliegenden Fall ist nur der Störfall, den man aber nicht durch ständige Messung der Wasserstoffkonzentration in der umgebenden Luft während des Normalbetriebes verhindern kann. Eventuelle Emissionen während des Normalbetriebes sind harmlos, so daß man sie nicht zu überwachen braucht.

Ebensowenig erforderlich ist eine "Emissionserklärung"¹⁵, weil die von der Anlage ausgehende mögliche Luftverschmutzung vernachlässigbar ist.

Die Anlage braucht keinen "Immissionsschutzbeauftragten"¹⁶, weil der normale Betrieb der Anlage keine solchen Probleme aufwirft und der normale Gebrauch von Wasserstoff auch nicht zu Umweltproblemen führt.

Wegen der möglichen Schwere eines Störfalls ist jedoch ein "Störfallbeauftragter"¹⁷ erforderlich.

5.4 Störfallvermeidung

5.4.1 Störfälle mit Auswirkungen auf die ganze Anlage und ihre Umgebung

Ein "Störfall" im Sinne des BImSchG und der Störfallverordnung ist jedes Austreten von Wasserstoff außer im Rahmen des normalen Betriebes. Es kommt nicht darauf an, ob das Gas sich entzündet. Eine Gemeingefahr geht von einem Störfall aus, wenn er innerhalb oder außerhalb der Anlage zu Personen- oder Sachschäden führen kann¹⁸.

Mögliche Ursachen eines Störfalls¹⁹ sind:

1. Gefahren, die von der Anlage selbst ausgehen; dies wäre hauptsächlich Austritt und Zündung von Wasserstoff.
2. Gefahren, die von außerhalb der Anlage ausgehen; dazu gehören Hochwasser, Stürme und andere hafentypische Ereignisse oder Störfälle in Nachbaranlagen.
3. Eingriffe Unbefugter.

Um einen Störfall zu vermeiden, muß die Anlage²⁰

1. auch den während eines Störfalls auftretenden Belastungen gewachsen sein;
2. über Mittel verfügen

14: BImSchG [1] §26

15: BImSchG [1] §27; s. auch [1.4]

16: BImSchG [1] §§53-58; s. auch [1.2]

17: gemäß BImSchG [1] §58a-d.

18: [1.5] §2.1,2

19: nach [1.5] §3.2

20: gefordert in [1.5] §4

- a) zur Vermeidung von Feuer und Explosionen in der Anlage und
- b) zum Schutz vor solchen außerhalb der Anlage;
- 3. angemessen mit Warn- und Sicherheitseinrichtungen ausgestattet sein;
- 4. zuverlässige und ggf. unterschiedliche und redundante Meß- und Steuereinrichtungen haben;
- 5. zumindest in den sicherheitsrelevanten Bereichen gegen Übergriffe Unbefugter geschützt sein.

Die *Störfallverordnung* nennt noch andere Erfordernisse, doch unterscheiden sich diese kaum von denen aus der DruckbehV oder den UVV.

Der Verantwortliche für die Anlage muß eine Störfallanalyse vorlegen, aus der die Vorbeugungsmaßnahmen gegen Störfälle hervorgehen und die Schutzmaßnahmen für den Fall ihres Eintretens²¹. Die Analyse muß die Anlage und die darin ablaufenden Prozesse beschreiben, die Stellen angeben, an denen ein Störfall eintreten könnte, mögliche Ursachen und Bedingungen für seinen Eintritt, welche Substanzen und wieviel davon darin verwickelt sein können, Vorkehrungen gegen einen solchen Fall und Maßnahmen, falls er doch eintritt.

Druckgasbehälter, die von einem Fahrzeug gerammt werden könnten, müssen durch irgendeine Art von Barriere geschützt werden²². Druckgasbehälter müssen vor gefährlicher Erhitzung geschützt werden. Ein Sonnenschutz ist nicht erforderlich.

Sicherheitsrelevante Teile der Anlage, die von äußerer Stromzufuhr abhängen, müssen mit einer Notstromversorgung verbunden sein, falls sie nicht bei Energieausfall ohnehin in einen sicheren Zustand fallen²³. Eine Anzeige der Windrichtung ist erforderlich²⁴, ebenso Blitzschutz²⁵. Es wird empfohlen, Gasdetektoren zu installieren, um die Entdeckung von Lecks und die Einleitung geeigneter Maßnahmen zu erleichtern²⁶.

Gebäude in Anlagen für brennbare Gase müssen aus für diesen Zweck angemessenen Baustoffen erstellt sein²⁷.

In größeren Anlagen für brennbare Gase, die aus mehreren mehr oder weniger unabhängigen Blöcken bestehen, muß es möglich sein, diese zur Begrenzung eines Störfalls voneinander gasdicht zu trennen. Dies muß durch ferngesteuerte Ventile oder andere Vorkehrungen geschehen, die den Temperaturen und sonstigen Belastungen im Brandfall widerstehen können²⁸. Dieses Erfordernis gilt nur, so weit es der Sicherheit förderlich ist.

21: im Einzelnen beschrieben in [1.5] §7

22: TRG [6.1.1] 280 "Betreiben von Druckgasbehältern" Abs. 3.15.1, 3.17ff

23: UVV "Gase" (VBG 61) [7.4] §21

24: UVV "Gase" (VBG 61) [7.4] §22

25: UVV "Gase" (VBG 61) [7.4] § 23; DIN VDE 0185 [8.8]

26: UVV "Gase" (VBG 61) [7.4] §7

27: UVV "Gase" (VBG 61) [7.4] §12; DIN 4102 [8.3]

28: UVV "Gase" (VBG 61) [7.4] §16

5.4.2 Sicherheitsabstände

Die TRG unterscheidet zwei verschiedene Arten von Zwischenräumen²⁹. Einer davon ("Sicherheitsabstand") dient zum Schutz des Behälters, der andere ("Schutzzone") dem Schutz seiner Umgebung vor unerwünschten Wirkungen, deren Ursache er sein könnte. Die Definitionen sind:

- *Sicherheitsabstand*: Abstand zwischen Druckgasbehälter und angrenzenden Anlagen, Einrichtungen oder Gebäuden. Dadurch sollen gefährliche Wirkungen auf den Behälter, vor allem Erhitzung, vermieden werden. Mögliche Gefahrenquellen sind z. B. Lager für brennbare Stoffe oder Brennstoffe. Der Sicherheitsabstand gilt nur für die Lagerung im Freien und beträgt 5 m rund um den Behälter³⁰.
- *Schutzzone*: Gebiet rund um einen Behälter für brennbare Gase, in dem dieses Gas auftreten und sich mit Luft vermischen könnte. Für Gase leichter als Luft ist dieser Raum ein Zylinder rund um den Behälter mit einer Kuppel darauf. Wenn Behälter nahe beieinander stehen, können sich ihre Schutzzonen überlappen.

Die Zahlenwerte hängen davon ab, ob die Behälter gelagert, gebraucht oder in Bereitschaft gehalten werden. Nach TRG hat die Schutzzone um einen gelagerten Behälter eine Breite von 1 m³¹. Ein an die Entnahmeeinrichtung angeschlossener Behälter wird nicht gelagert, sondern in Bereitschaft gehalten. Die Schutzzone um ihn beträgt 2 m. Die Schutzzonen sind in beiden Fällen identisch mit der "Zone 2" aus der ElexV³². Der Standort von Bäumen muß bei der Berechnung der Abstände berücksichtigt werden, weil sie brennbar sind und umfallen können³³.

Dieses Beispiel zeigt, wie eine Vorschrift, obwohl formal anwendbar, für die technischen Probleme eines solchen Projekts unangemessen sein kann. Die Regeln der TRG beziehen sich offenbar auf Behälter wie etwa gewöhnliche Gasflaschen. Die Regeln der TRB³⁴ sind besser geeignet, da sie Behälter jeder Größe umfassen. Obwohl die TRB hier strenggenommen nicht anwendbar ist, kann sie auf der Basis einer Analogie in Betracht gezogen werden.

Die TRB legt verschiedene Sicherheitsabstände und Schutzzonen fest. Oberirdische Behälter für brennbare Gase ohne besondere Schutzvorkehrungen haben eine Schutzzone von 200 m (für Volumen bis 3000 m³) oder 300 m (darüber)³⁵. Eine besondere Schutzmaßnahme bestünde darin, den Behälter mit Erde zu bedecken. Dies ist zwar hier unmöglich, aber unter bestimmten Bedingungen werden Behälter für tiefkalte Gase als

29: TRG [6.1.1] 280 "Betreiben von Druckgasbehältern" Abs. 2.8ff, 3.20

30: TRG [6.1.1] 280 "Betreiben von Druckgasbehältern" Abs. 5.3.4

31: TRG [6.1.1] 280 "Betreiben von Druckgasbehältern" Abs. 5.3.2

32: ElexV [6.2] §2.4.1c

33: UVV "Gase" (VBG 61) [7.4] §7.4

34: [6.1.2]; bes. TRB 600 "Aufstellung der Druckbehälter" und TRB 610 "Aufstellung von Druckbehältern zum Lagern von Gasen"

35: TRB [6.1.2] 610 Abs. 6.1.2

einem erdgedeckten gleichwertig betrachtet³⁶. Solch ein Behälter hat eine Schutzzone von nur 10 m³⁷. Selbst wenn im Falle der EQHHPP-Behälter diese Bedingung nicht erfüllt ist, die auch kaum für einen solchen Fall gemacht ist; kann angenommen werden, daß diese Behälter einem erdgedeckten sicherheitstechnisch gleichwertig sind, weil sie doppelwandig und wärmeisoliert sind und weil sie für den Seetransport zugelassen sind.

Die Anforderungen nach BImSchG und Störfallverordnung wären in jedem Fall strenger. Das bedeutet, daß unabhängig von der Anwendbarkeit der TRB der Unterschied zu den bereits erwähnten Erfordernissen vernachlässigbar wäre.

5.4.3 Schutz der Arbeitnehmer vor Störfällen

Nur geübtes und zuverlässiges Personal darf die Behälter bedienen. Minderjährige sind nur für Ausbildungszwecke zugelassen und nur unter Aufsicht³⁸. Vor Aufnahme der Arbeit und in angemessenen Abständen müssen sie über die richtige Bedienung der Behälter, mögliche Gefahren und Maßnahmen im Störfall unterrichtet werden. Ein Betriebshandbuch über normalen Betrieb und außergewöhnliche Situationen muß vorhanden und zugänglich sein. Für Arbeitnehmer an Stellen, an denen brennbare Gase austreten können, muß geeignete Schutzkleidung vorhanden sein³⁹.

Arbeitsplätze und andere der Belegschaft zugängliche Orte müssen nach den Arbeitsschutzregeln gestaltet sein. Besonders wichtig in diesem Zusammenhang sind Belüftung, Feuerlöscheinrichtungen, Verkehrswege und Erste Hilfe⁴⁰. Diese Aufzählung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

5.5 Begrenzung von Schäden durch Störfälle

Sollte ein Störfall eintreten⁴¹,

1. müssen Fundamente und tragende Bauteile so ausgelegt sein, daß sie die Gefahr nicht noch erhöhen;
2. muß die Anlage mit den notwendigen technischen und organisatorischen Sicherheitseinrichtungen ausgestattet sein;
3. muß der Betreiber gemeinsam mit den Behörden einen Alarm- und Maßnahmenplan aufgestellt haben;
4. muß auf Verlangen der Behörden ein sicherer und zuverlässiger Informationsweg zur Verfügung stehen.

36: TRB [6.1.2] 610 Abs. 6.2; Bedingungen in Abs. 4.2.2. Es handelt sich um Sonderfälle von Abs. 4.2.

37: TRB [6.1.2] 610 Abs. 5.2 Fall 6

38: TRG [6.1.1] 280 Abs. 3.1; UVV "Gase" (VBG 61) [7.4] § 41, 47

39: TRG [6.1.1] 280 Abs. 3.2, 3.9, 3.12; UVV "Gase" (VBG 61) [7.4] §42f; Richtlinien und Beispiele für solche Unterweisungen in TRGS [5.2.1] 555 "Betriebsanweisung und Unterweisung nach §20 GefStoffV"

40: ArbStättV [6.3], ASR [6.3.1] 5 "Lüftung", 13/1,2 "Feuerlöscheinrichtungen", 17/1,2 "Verkehrswege" und 39/1,3 "Mittel und Einrichtungen zur Ersten Hilfe"

41: gemäß [1.5] §5.1

Im Brandfall müssen unbewegliche Behälter mit einem angemessenen Schutz gegen Überhitzung ausgestattet sein (Wasserberieselung oder entsprechend). Die Feuerwehr muß ggf. auf solche Behälter hingewiesen werden. Behälter, die der Brandhitze ausgesetzt waren, müssen markiert und vor der weiteren Benutzung geprüft werden⁴².

42: TRG [6.1.1] 280 "Betreiben von Druckgasbehältern" Abs. 3.15.1, 3.17ff

6 Behälter, Ausrüstung und Rohrleitungen

Dieser Teil enthält nur Anforderungen für Anlagen an Land. Die Behälter müssen auch die Erfordernisse für den Seetransport erfüllen, aber diese sind bereits oben behandelt worden. Einige Regeln aus dem Verkehrsrecht sind strenger als die hier erwähnten, und das selbe kann umgekehrt geschehen. In einem solchen Fall muß das jeweils höhere Sicherheitsniveau garantiert werden.

Es gibt in den TRG besondere Regeln für Behälter für tiefkalte verflüssigte Gase, aber diese gelten nur für Behälter mit einem Fassungsvermögen kleiner oder gleich 1 m^3 und sind daher nicht anwendbar¹. Die hier aufgeführten Regeln gelten allgemein für Behälter jeden Volumens, besonders solche für tiefkalten Inhalt, und für ihre Ausrüstungsteile.

6.1 Behälter

Die Anforderungen an Behälter finden sich hauptsächlich in den TRG und in den AD-Merkblättern. Diese Regelwerke sind größtenteils von parallelem Inhalt oder ergänzen sich. Während die Anforderungen der TRG allgemeiner gehalten sind, sind die Aussagen in den AD-Merkblättern recht spezifisch, was aber bedeuten kann, daß einige davon auf die eher ungewöhnlichen Behälter in diesem Fall nicht anwendbar sind.

6.1.1 Werkstoffe

Werkstoffe werden hauptsächlich in den TRG [6.1.1] der Serie 200 und in den AD-Merkblättern [9] der Reihe W [9.4] behandelt. Spezielle Regeln für Behälter für tiefkalte, verflüssigte Gase finden sich in TRG 203 und AD-Merkblatt W10 [9.4.1].

Die besonderen Eigenschaften des Wasserstoffs und seine Wechselwirkungen mit metallischen Werkstoffen (Wasserstoff-Versprödung) müssen bei der Werkstoffauswahl sorgfältig bedacht werden. Die Rolle der Diffusion ist bei 20 K vernachlässigbar, aber es gibt immer viele warme Stellen am Tank und seiner Ausrüstung. Nur geeignete Werkstoffe dürfen ausgewählt werden, z. B. Stähle mit einer kubisch-flächenzentrierten Kristallstruktur², weil sie auch bei Umgebungstemperatur widerstandsfähig gegen wasserstoffinduzierte Versprödung sind.

6.1.2 Berechnung und Auslegung

In der TRG 220 finden sich allgemeine Regeln für die Berechnung von Behältern. Insbesondere wird gefordert, daß bei einem vakuumisolierten Behälter mit einem Außendurchmesser $D > 800 \text{ mm}$ die äußere Hülle eine Wandstärke von mindestens $1 \text{ mm} + D/400$, die innere Hülle von mindestens 3 mm haben muß³.

1: TRG [6.1.1] 360 "Druckgasbehälter für flüssige, tiefkalte Gase" Abs. 1.1

2: d. h. austenitische Cr-Ni-Stähle; s. AD-Merkblatt W10 [9.4.1] und DIN 17280 "Kaltzähle Stähle" [8.5]

3: TRG [6.1.1] 200 Abs. 2.4

Einzelheiten für Berechnung und Gestaltung verschiedener Behälterteile und für unterschiedliche Behälterformen werden in den TRG 221-226 festgelegt.

6.1.3 Herstellung und Vorbereitung

Die TRG 240 enthält Regeln für die fachgerechte Herstellung und Vorbereitung. Das Herstellerwerk muß die allgemein anerkannten technischen Regeln einhalten und über die nötigen Prüfeinrichtungen verfügen. Die Dokumentation muß TRG 240 Anhang 1 entsprechen. Einzelheiten über Schweißen und Wärmebehandlung finden sich in den TRG 241 und 242.

6.1.4 Kennzeichnung

Die TRG legen fest, welche Angaben auf dem Behälter vorhanden sein müssen, welche außerdem erlaubt sind und wie die Kennzeichnung erfolgen muß. Für die hier besprochenen Wasserstoffbehälter sind die in Tab. 4 aufgeführten Markierungen zwingend⁴. Auch andere Markierungen, z. B. Herstellerzeichen usw., sind zugelassen. Die Markierungen müssen so angebracht werden, daß sie durch Wetter, Licht usw. nicht unleserlich werden können.

6.1.5 Prüffristen

Nach DruckbehV beträgt die Frist zwischen zwei wiederkehrenden Prüfungen der Behälter höchstens sechs Jahre. Dies stimmt mit der Forderung der TRG für Behälter für tiefkalte Gase mit einem Volumen von mehr als 150 l überein⁵.

6.2 Behälterausrüstung

Zur Ausrüstung gehören Deckel, Anschlüsse, Ventile, Sicherheits- und Meßeinrichtungen und andere Teile, die fest mit dem Behälter verbunden sind und seine Sicherheit beeinflussen können. Allgemeine Regeln dafür sind in den TRG der Reihe 250⁶ enthalten; Werkstoffangelegenheiten werden dort und auch in anderen Regeln behandelt⁷.

Die Werkstoffauswahl für Rohrleitungen und Ausrüstungsteile unterliegt den gleichen Grundsätzen wie für den Behälter selbst. Die Teile müssen nach einem anerkannten technischen Regelwerk oder einer Norm gefertigt werden⁸.

Erfahrungsgemäß gehen Unfälle viel öfter von Ventilen oder anderen Ausrüstungsteilen aus als vom Behälter selbst. Besonders Ventile sind Problemstellen, weil sie bewegliche

4: TRG [6.1.1] 270 Abs. 2.2 und Anhang 1

5: DruckbehV [6.1] §23.1.3; auch TRG [6.1.1] 103 Anhang 2

6: TRG [6.1.1] 250 und 251-256

7: UVV "Gase" (VBG 61) [7.4] §29; AD-Merkblatt A4 "Gehäuse von Armaturen" [9.1];
DIN 3339 "Armaturen, Werkstoffe für Gehäuseteile" [8.2]

8: s. DIN 17440 [8.6] und DIN 17102 [8.4]

Markierung	Einheit
Zugfestigkeit	N mm ⁻²
Kennbuchstabe für die Wärmebehandlung	
Volumen	l
Prüfdruck	bar
Leergewicht	kg
Seriennummer	
Zeichen des Sachverst., der die 1. Prüfung nach Inbetriebnahme vorgenommen hat	
Inhalt: "Wasserstoff tiefkalt"	
Höchstdruck der Füllung bei 15 °C	bar
Datum der ersten Prüfung in betriebsfertigem Zustand	Monat, Jahr
Zeichen des Sachverständigen, der sie vornahm	
Datum der ersten wiederkehrenden Prüfung	Monat, Jahr
Zeichen des Sachverständigen, der sie vornahm	
Datum der nächsten wiederkehrenden Prüfung	Monat, Jahr

Tab. 4: Vorgeschriebene Kennzeichen auf Druckgasbehältern

Teile enthalten. Sie müssen mit viel Sorgfalt ausgewählt und dimensioniert werden. Besonders wichtig sind sicherheitsrelevante Ausrüstungsteile, die dazu dienen, den Zustand des Behälters zu überwachen und Störfälle zu erkennen oder zu verhindern.

Pumpen und Kompressoren erfordern ebenfalls besondere Aufmerksamkeit bei Auswahl und Betrieb, weil sie leck werden und elektrische oder mechanische Funken erzeugen können⁹.

6.3 Rohrleitungen

Die *Technischen Regeln für Rohrleitungen* (TRR) [6.1.3] beschäftigen sich mit Werkstoffen, Abmessungen und Prüfungen im Zusammenhang mit Rohrleitungen vor dem und während des Betriebes oder nach Betriebsunterbrechungen¹⁰. Die Eigenschaften des Wasserstoffs und die niedrigen Temperaturen müssen besonders in Betracht gezogen

⁹: UVV "Gase" (VBG 61) [7.4] §34

¹⁰: s. auch UVV "Arbeiten an Gasleitungen" [7.3]

werden. Die entsprechenden Ausführungen und Quellen für die Werkstoffauswahl bei Ausrüstungsteilen sind hier sinngemäß anwendbar.

Das in den Rohren fließende Medium muß farblich oder anderswie kenntlich gemacht werden. Auch Anschlüsse und Verbindungen müssen entsprechend gekennzeichnet sein¹¹. Abblase- und Entlastungsöffnungen müssen den Kräften standhalten können, die während ihres Betriebes zu erwarten sind. Sie müssen gegen das Eindringen von Regen, Staub usw. geschützt sein.

Förderleitungen müssen so gelegt werden, daß sie vor gefährlichen Lasten oder Gegenständen geschützt sind (Vibrationen, Verlegung, Korrosion, Erwärmung, Hochspannungsleitungen usw.)¹².

11: UVV "Gase" (VBG 61) [7.4]; UVV "Sicherheitskennzeichnung am Arbeitsplatz" (VBG 125) [7.6]; DIN 2403 [8.1]

12: UVV "Gase" (VBG 61) [7.4] §30

7 Füllstation

In der geplanten Anlage soll Wasserstoff nicht nur gespeichert, sondern auch verteilt werden. Neben anderen Verbrauchern sollen z. B. Experimentalbusse mit Wasserstoffantrieb hier mit Treibstoff versorgt werden.

7.1 Anwendungsbereich der relevanten Gesetze und Regeln

Die Füllstation ist Teil der ganzen Anlage. Daher treffen die meisten der für diese erwähnten Regeln auch hier zu. Die Genehmigung nach BImSchG erstreckt sich auch auf die Füllstation.

Das BImSchG gilt auch für die zu betankenden Kraftfahrzeuge¹, aber für seine Einhaltung ist in diesem Punkt der Halter des Fahrzeugs verantwortlich. Der Fahrzeughalter ist außerdem verantwortlich für die Einhaltung der für Fahrzeuge geltenden Regeln der DruckbehV, des Verkehrsrechts und der allgemeinen Verkehrs- und Zulassungsregeln².

Die Tanks der Fahrzeuge sind Druckgasbehälter im Sinne der Druckbehälterverordnung, weil sie beweglich sind und die Entnahme an einem anderen Ort erfolgt. Eine solche Anlage zum Füllen von Druckgasbehältern ist eine Füllstation im Sinne der DruckbehV³. Für Bau und Betrieb der Füllstation gibt es eine Reihe von Anforderungen, die mehr oder auch weniger streng sein können als die nach dem BImSchG für die ganze Anlage. Einzelheiten über Füllstationen finden sich in den TRG der Reihe 400.

Ebenfalls zumindest teilweise anwendbar sind die UVV⁴.

7.2 Zulassungsverfahren

Die ganze Anlage muß nach dem BImSchG zugelassen werden, aber die Füllstation benötigt noch eine besondere Zulassung nach der DruckbehV⁵, wie oben beschrieben. Dies ist eher eine Formalität, da die Zulassung der ganzen Anlage nach BImSchG und der Betrieb nach den anerkannten Sicherheitsregeln so gut wie alle Erfordernisse für die Füllstation abdecken werden. Die Zulassungsbehörde ist außerdem die gleiche, die die Zulassung nach BImSchG ausspricht.

7.3 Auswirkungen der Füllstation auf die Umwelt

Wasserstoff wird als Treibstoff importiert, gelagert und verteilt. Dafür gibt es im BImSchG besondere Vorschriften⁶ zur Verhinderung von Luftverschmutzung durch Verbrennung

1: BImSchG [1] §2.1.3

2: Sicherheitsprobleme in Verbindung mit dem Straßenverkehr werden in [13.2] diskutiert.

3: DruckbehV [6.1] §3.6.1, §§26-30

4: bes. UVV "Gase" (VBG 61) [7.4]

5: DruckbehV [6.1] §26.1

6: BImSchG [1] §34

oder von Wasser- oder Bodenverschmutzung durch unbeabsichtigtes Auslaufen. Diese sollten leicht zu erfüllen sein, weil die Verbrennung von Wasserstoff die Luft nicht verschmutzt und weil ausfließender Wasserstoff weder Boden noch Wasser verunreinigen kann. Die Regeln sind im Hinblick auf Belastungen durch Brennstoffe auf Mineralölbasis entworfen worden. Sorgfalt erfordert aber die Handhabung von Treib- und Schmierstoffen für Hilfseinrichtungen wie etwa Pumpen oder für die in der Anlage abgefertigten Fahrzeuge.

7.4 Anlage der Füllstation

Neben den Regeln für die ganze Anlage gibt es noch einige besondere für die Füllstation. Sie finden sich hauptsächlich in den *Technischen Regeln Druckgase (TRG)*⁷.

7.4.1 Gelände

Der Boden muß hart und eben sein. Das maximale Gefälle ist 1:400 für Eisenbahnfüllstationen und 1:50 für Straßenfahrzeuge, wenn die Fahrzeuge nicht durch andere geeignete Maßnahmen am Abrollen gehindert werden⁸.

7.4.2 Schutzzonen

Wie oben ausgeführt, ist die *Schutzzone* das Gebiet, in dem brennbare Gasgemische auftreten können. Sie zählen von den möglichen Austrittsstellen an und haben eine Ausdehnung von 5 m um diese Stelle und 2 m darüber. Wenn nicht genug Platz vorhanden ist, kann der Schutz auf höchstens zwei Seiten auch durch geeignete Schutzwände gewährleistet werden. Die Schutzzone muß als solche gekennzeichnet sein.

Keine Gebäude oder Einrichtungen, die nicht zur Füllstation gehören, sind in der Schutzzone erlaubt. Straßen und Wege, die nicht dem Betrieb dienen, sind ebenfalls nicht zugelassen⁹.

7.5 Einrichtungen

7.5.1 Rohrleitungen und andere Komponenten

Werkstoffe, Bemessung, Berechnung und Betrieb der Einrichtungen müssen so gewählt sein, daß sie unter den zu erwartenden mechanischen und thermischen Lasten den sicheren Betrieb der Anlage gewährleisten. Pumpen, Ventile usw. gelten als sicher, wenn

7: TRG [6.1.1] 401 "Errichten von Füllanlagen"

8: TRG [6.1.1] 401 "Errichten von Füllanlagen" Abs. 4.1

9: TRG [6.1.1] 401 "Errichten von Füllanlagen" Abs. 4.2; UVV "Gase" (VBG 61) [7.4] §§9f, 47f

sie den jeweiligen UVVs entsprechen¹⁰. Die Rohrleitungen, besonders bei niedrigen Temperaturen, werden in den TRR¹¹ gesondert behandelt.

Rohre, Verdampfer usw. müssen bis zu ihrem maximalen Betriebsdruck dicht sein, bewegliche Schläuche und andere bewegliche Leitungen bis zu 150 % davon¹².

Rohre und Leitungen müssen unverwechselbar für den Gebrauch mit Wasserstoff gekennzeichnet sein¹³. Füllschläuche müssen sicher entspannbar sein. Entlastungsöffnungen dürfen nicht in geschlossenen Räumen enden, sondern die austretenden Gase müssen gefahrlos weggeleitet werden. Die Abblaseleitungen müssen für ihren höchsten Betriebsdruck, mindestens aber für die Druckstufe PN 10 ausgelegt sein¹⁴.

Für den Fall eines Schadens an einer beweglichen Leitung muß es möglich sein, den Gasstrom schnell zu unterbrechen. Dies muß mittels automatischer oder aus sicherer Entfernung fernbetätigter Vorrichtungen geschehen¹⁵.

7.5.2 Explosions- und Feuerschutz

Zündungen durch elektrische oder andere Funken müssen durch Anwendung der ElexV [6.2] und der dazugehörigen Regeln [6.2.1, 6.2.2] verhindert werden. Straßentanks müssen geerdet werden können. Besonders müssen Kollisionen zwischen Fahrzeugen, die gerade gefüllt werden, und anderen Fahrzeugen verhindert werden.

Feuerlöscher und andere geeignete Feuerlöschmittel müssen vorhanden sein¹⁶. Eine Alarmeinrichtung oder zumindest ein Telefon muß ebenso vorhanden sein wie geeignete Mittel zur Brandbekämpfung. Es muß ein mit der Feuerwehr abgestimmter Alarmplan existieren¹⁷. (Dies und vieles anderes ist natürlich ohnehin im Rahmen der BImSchG-Zulassung der ganzen Anlage notwendig.) Schutz- oder Notfallausrüstung muß außerhalb der möglichen Gefahrenzonen, aber leicht erreichbar gelagert werden¹⁸. Geeignete Vorkehrungen für Erste Hilfe sind vorzusehen¹⁹.

10: bes. UVV "Gase" (VBG 61) [7.4] §§25-35

11: TRR [6.1.3] 1, Abs. 5.1

12: TRG [6.1.1] 401 "Errichten von Füllanlagen" Abs. 5.1.2

13: TRG [6.1.1] 401 Abs. 5.2.2, 5.2.6; UVV "Gase" (VBG 61) [7.4] §24; UVV "Sicherheitskennzeichnung am Arbeitsplatz" (VBG 125) [7.6]; DIN 2403 "Kennzeichnung von Rohrleitungen nach dem Durchflußstoff" [8.1]

14: TRG [6.1.1] 401 Abs. 5.2

15: TRG [6.1.1] 401 Abs. 5.5.2

16: Einzelheiten in ASR [6.3.1] 13/1,2 "Feuerlöscheinrichtungen"

17: UVV "Gase" (VBG 61) [7.4] §54

18: TRG [6.1.1] 401 "Errichten von Füllanlagen" Abs. 5.7ff

19: Einzelheiten in ASR [6.3.1] 39/1,3 "Mittel und Einrichtungen zur Ersten Hilfe"

7.6 Betrieb

Fahrzeuge, deren Motoren nicht besonders explosionsgeschützt sind, dürfen in die Schutzzone nur einfahren, wenn die Anreicherung brennbarer Gase in gefährlichen Konzentrationen im Verkehrsbereich durch geeignete Maßnahmen ausgeschlossen ist. Die Gaskonzentration muß überwacht werden. Bei einem Leck müssen die Motoren aller Fahrzeuge sofort abgeschaltet werden²⁰.

Falls die Wasserstoffbehälter mit einem anderen Gas unter Druck gesetzt werden, um den Wasserstoff zu entnehmen, darf dieses mit dem Wasserstoff nicht gefährlich reagieren können oder den Druck gefährlich erhöhen²¹. Fluchtwege dürfen nie durch Behälter oder andere Hindernisse verstellt sein.

7.6.1 Belegschaft

Das Betriebspersonal der Füllstation muß volljährig und zuverlässig und mit seinen Aufgaben vertraut sein. Vor Aufnahme der Arbeit und in regelmäßigen Abständen (mindestens einmal im Jahr) muß eine Schulung über sicheren Betrieb der Anlage und Verhalten in Notfällen stattfinden. Arbeitnehmer dürfen nicht länger als notwendig in der Schutzzone bleiben, und sie müssen dabei die erforderliche Schutzkleidung tragen.

Alle sicherheitsrelevanten Informationen müssen in einem der Belegschaft zugänglichen Handbuch enthalten sein. In geschlossenen Räumen oder in der Schutzzone herrscht Rauchverbot. Bei der Füllung eines Fahrzeugs mit flüssigem Wasserstoff muß mindestens ein Mitglied der Belegschaft anwesend sein²².

7.6.2 Bedingungen für das Füllen von Behältern

Behälter dürfen nicht gefüllt werden, wenn sie nicht für die Füllung mit flüssigem Wasserstoff zugelassen sind, nicht mit dem Datum der nächsten wiederkehrenden Prüfung gekennzeichnet sind, dieses Datum verstrichen ist oder sie aus anderen Gründen unsicher sind. Behälterausrüstung muß von einem Sachverständigen geprüft oder der Bauart nach zugelassen sein. Reste, die sich vor dem Füllen in den Behältern finden, dürfen mit dem Wasserstoff keine gefährlichen Reaktionen eingehen können²³.

20: TRG [6.1.1] 402 "Betreiben von Füllanlagen" Abs. 3.4; UVV "Gase" (VBG 61) [7.4] §48

21: TRG [6.1.1] 402 "Betreiben von Füllanlagen" Abs. 3.9; UVV "Gase" (VBG 61) [7.4] §49

22: TRG [6.1.1] 402 Abs. 2f; UVV "Gase" (VBG 61) [7.4] §41ff

23: TRG [6.1.1] 402 Abs. 4

7.6.3 Füllvorgang

Sofern die Anlage entsprechend ausgerüstet ist, können Behälter für tiefkalte, verflüssigte Gase volumetrisch gefüllt werden. Die Füllmenge muß mit unabhängigen Methoden und von anderen Personen überprüft werden²⁴.

Vor dem Füllen müssen Fahrzeuge die Handbremse anziehen. Sie müssen gegen Anfahrenwerden geschützt sein und einen Sicherheitsabstand von mindestens 3 m zu anderen Fahrzeugen usw. halten, wenn es nicht eine geeignete Schutzmauer gibt. Ihre Tanks müssen vor der Verbindung mit dem Füllstutzen geerdet werden. Besondere Sorgfalt ist beim Spülen, Abkühlen bzw. Erwärmen usw. der Füllschläuche zu beachten.

Die Einzelheiten des Füllvorgangs sollen hier nicht betrachtet werden. Dies ist Aufgabe des Handbuchs. Außer aus den *Technischen Regeln* folgen viele praktische Erfordernisse für den Füllvorgang aus den Vorschriften zum Explosionsschutz [6.2.1].

7.6.4 Dokumentation

Für jeden Füllvorgang müssen die folgenden Daten schriftlich festgehalten werden:

- Datum;
- Kennzeichnung des Fahrzeugs (Nummernschild);
- höchstzulässige Füllmenge;
- Methode für die Bestimmung der tatsächlichen Füllmenge;
- tatsächliche Füllmenge gemäß Füll- und Kontrollmessung, auch die Rohdaten für Kontrollzwecke;
- andere Beobachtungen, besonders Unregelmäßigkeiten und Maßnahmen dagegen.

Die Dokumentation muß mindestens ein Jahr lang aufbewahrt und der Überwachungsbehörde auf Verlangen vorgelegt werden²⁵.

7.7 Prüfung und Wartung

Vor Betriebsaufnahme, nach wichtigen Änderungen oder Reparaturen und in regelmäßigen Abständen muß die Füllstation von einem Sachverständigen geprüft werden. Die Prüfung muß dokumentiert und der Bericht zur späteren Kontrolle aufbewahrt werden. Auch die Füll-Leitungen gehören zum Prüfumfang. Bewegliche Schläuche müssen in regelmäßigen Abständen von höchstens einem Jahr geprüft werden. Die Erdung muß mindestens alle drei Jahre geprüft werden. Ihr Zustand muß regelmäßig kontrolliert werden²⁶.

24: TRG [6.1.1] 402 "Betreiben von Füllanlagen" Abs. 5.6f

25: TRG [6.1.1] 402 "Betreiben von Füllanlagen" Abs. 7.3

26: TRG [6.1.1] 402 Abs. 9; UVV "Gase" (VBG 61) [7.4] §§55ff

8 Sicherheitstechnischer Vergleich von Wasserstoff mit verflüssigtem Erdgas und Flüssiggas

In der Öffentlichkeit herrscht eine gewisse Angst vor Wasserstoff. Dabei wirken Erinnerungen an spektakuläre Unglücke wie etwa der Brand des Luftschiffs LZ 129 "Hindenburg" 1937 in Lakehurst mit. Besonders in Deutschland verbindet sich dieses Unglück immer noch in vielen Köpfen mit der Anwendung von Wasserstoff im großen Maßstab¹. Andererseits ist jedermann daran gewöhnt, daß in seiner unmittelbaren Nachbarschaft flüssige und gasförmige Brennstoffe in großen Mengen gelagert werden. Da sich niemand über die Tankstelle an der Ecke aufregt, scheint die Wasserstoffangst eher ein psychologisches Problem und ein Mangel an Gewohnheit zu sein. Die Gefahren im Zusammenhang mit Wasserstoff dürfen nicht unterschätzt werden, aber man muß die Risiken und notwendigen Sicherheitsmaßnahmen auch mit denen bei anderen für diesen Zweck geeigneten Stoffen vergleichen.

Der LH₂ ähnlichste Brennstoff ist verflüssigtes Erdgas (**L**iquefied **N**atural **G**as, LNG). Transport, Lagerung und Verteilung von LNG in großen Mengen sind bewährte Techniken. Ein anderer gängiger verflüssigter Brennstoff ist "Flüssiggas" (**L**iquefied **P**etroleum **G**as, LPG), das hauptsächlich aus Propan und Butan sowie anderen C₃- oder C₄-Kohlenwasserstoffen besteht. Sowohl für LNG als auch für LPG gibt es umfangreiches Material zu den davon ausgehenden Risiken. Auch ihr Transport mit Schiffen ist schon Gegenstand eingehender sicherheitstechnischer Betrachtungen gewesen [19].

LNG und LPG sind beides nicht reine Stoffe, sondern Gemische von nicht wohldefinierter Zusammensetzung². Der Einfachheit halber soll hier Methan (CH₄) an Stelle von LNG behandelt werden und Propan (C₃H₈) an Stelle von LPG. Dies sind die jeweiligen Hauptkomponenten der Brennstoffe. Ihre sicherheitsrelevanten Eigenschaften sollen in den folgenden Abbildungen und Tabellen verglichen werden. Ein tabellarischer Vergleich ist bereits in Tab. 1 gegeben worden. Hier soll näher auf die sicherheitstechnische Bedeutung dieser Daten eingegangen werden.

8.1 Eigenschaften im Lagerungszustand

Der Hauptunterschied zwischen LNG und LPG besteht darin, daß LNG wie LH₂ unter Atmosphärendruck und bei tiefer Temperatur gelagert wird, LPG dagegen gewöhnlich bei Umgebungstemperatur und unter erhöhtem Druck, wie Tab. 5 zeigt.

Größe		H ₂	CH ₄	C ₃ H ₈
Druck (abs)	bar	1,01	1,01	8,39
Temperatur	°C	-253	-162	+20
Verdampfungswärme	J/g	447	510	427
	kJ/l	31,7	296	218

Tab. 5: Lagerbedingungen für Wasserstoff, Methan und Propan

1: Neuere Auswertungen der damaligen Unfallberichte [27] scheinen anzudeuten, daß das Unglück auf eine schlecht gewählte Oberflächenbeschichtung zurückzuführen war und somit heute leicht abwendbar wäre.

2: s. [8.7] zur Definition von Flüssiggas in Deutschland

Kein verflüssigtes Gas außer Helium (bei $-269\text{ °C} = 4\text{ K}$) wird bei so tiefen Temperaturen wie Wasserstoff gelagert und hat zudem eine so geringe volumetrische Verdampfungswärme. Das bedeutet, daß die thermische Isolierung für Behälter für flüssigen Wasserstoff besonders wichtig ist.

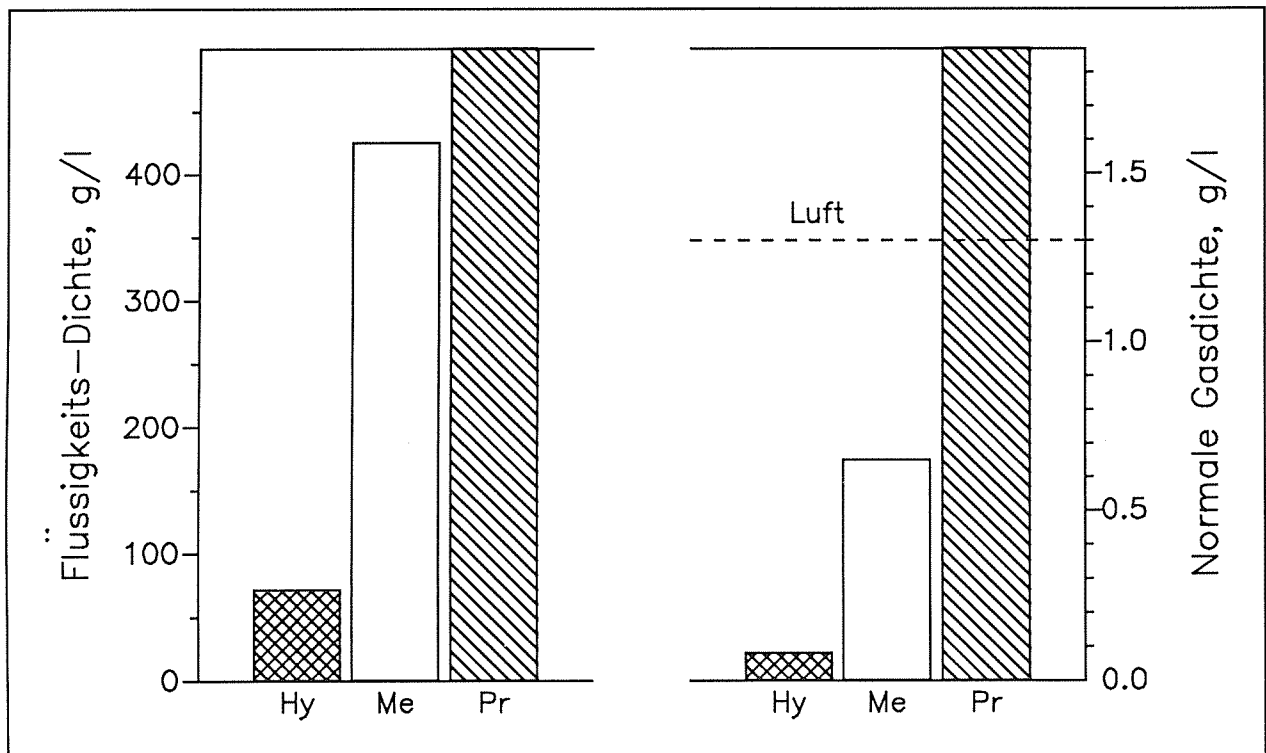


Abb. 5: Dichten von flüssigem und gasförmigem Wasserstoff, Methan und Propan sowie von Luft

In Abb. 5 werden die Dichten von Wasserstoff, Methan und Propan miteinander verglichen³. Das linke Teilbild zeigt die Dichten der Flüssigkeiten im Lagerzustand, das rechte die Gasdichten unter Normalbedingungen. Die Dichte von Wasserstoff ist im Vergleich mit den anderen Brenngasen außergewöhnlich niedrig, und zwar in beiden Zuständen. Auch ist gasförmiger Wasserstoff wesentlich leichter als Luft. Dies ist von großer Bedeutung für die sicherheitstechnische Beurteilung einer solchen Anlage. Wegen seiner geringen Dichte im Gaszustand wird austretender und verdampfter Wasserstoff, im Gegensatz z. B. zu Propan, weniger dazu neigen, eine am Boden entlangkriechende Wolke zu bilden, sondern relativ schnell nach oben verschwinden. Die geringe Dichte der Flüssigkeit bedeutet dagegen, daß die Lagereinrichtung ein größeres geometrisches Volumen haben muß. Der Einfluß beider Größen wird in den folgenden Teilen noch genauer diskutiert werden.

8.2 Zündfähigkeit

Jedes brennbare Gas kann mit Luft oder anderen Sauerstoffträgern zündfähige Mischungen bilden. Es gibt sowohl eine obere als auch eine untere Zündgrenze und für die meisten Gase auch eine Detonationsgrenze, wenn die Mischung detonationsfähig ist. Liegt

³: Hier sowie in Abb. 6 und Abb. 7 steht "Hy" für Wasserstoff, "Me" für Methan und "Pr" für Propan

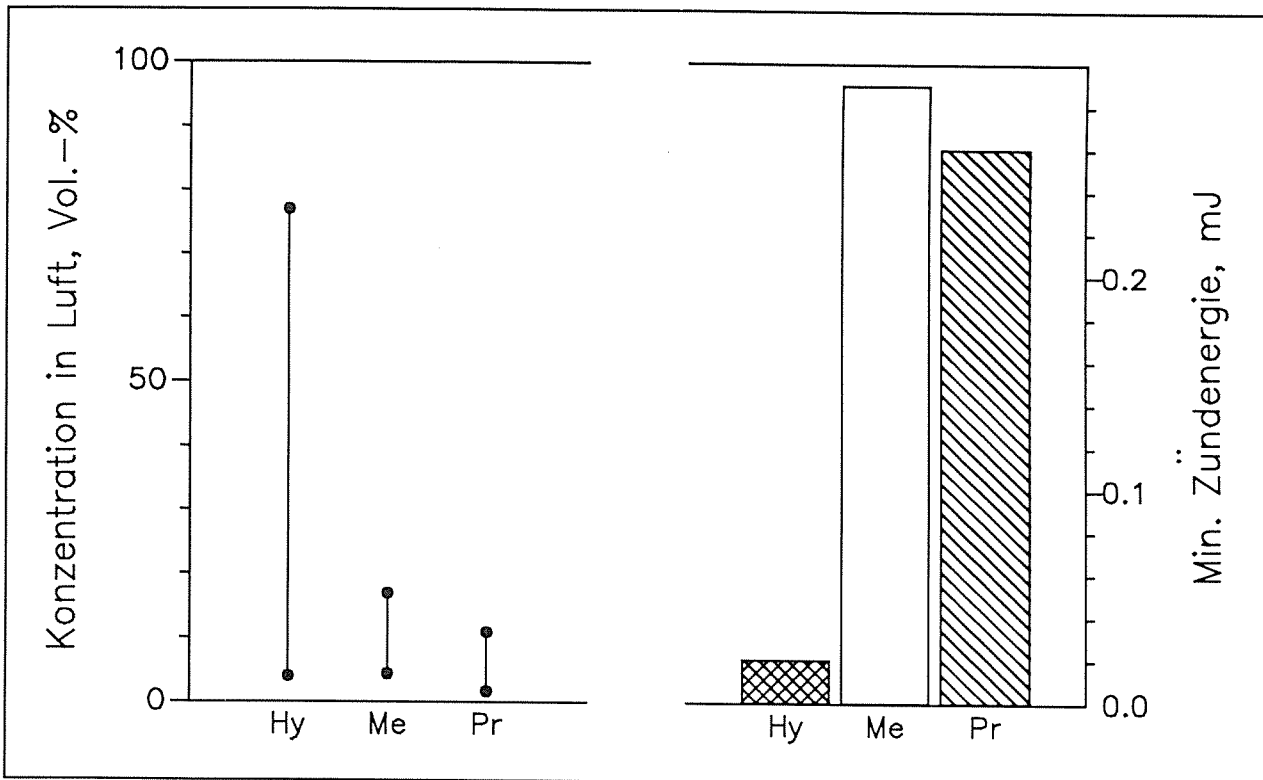


Abb. 6: Zündgrenzen und Mindestzündenergien von Wasserstoff, Methan und Propan

sten Gase auch eine Detonationsgrenze, wenn die Mischung detonationsfähig ist. Liegt die Brenngaskonzentration außerhalb dieser Werte, ist eine Zündung bzw. Detonation unmöglich. Abb. 6 vergleicht im linken Teil die Zündgrenzen der drei Gase, angegeben als Volumenkonzentration in der Mischung mit Luft.

Eine Zündung tritt aber nur ein, wenn das Gemisch nicht nur eine zündfähige Konzentration hat, sondern auch die Zündenergie einen bestimmten Wert überschreitet. Dieser hängt vom Gas und von der Konzentration ab. Die absoluten Minimalwerte für die drei Gase werden ebenfalls in Abb. 6 (rechts) angegeben.

Die besonderen Eigenschaften von Wasserstoff treten in Abb. 6 deutlich hervor. Nicht nur ist der Bereich zwischen den Zündgrenzen ungewöhnlich weit, sondern auch die Mindestzündenergie ist eine Größenordnung kleiner als der entsprechende Wert der anderen Brennstoffe. Daher muß mit allen Mitteln verhindert werden, daß Wasserstoff austritt und sich mit Luft vermischt.

Die von den meisten Zündquellen freigesetzten Energien liegen allerdings auch weit über den anderen Zündgrenzen, so daß dieser Unterschied nicht sehr ins Gewicht fällt. Abb. 6 zeigt außerdem, daß die unteren Zündgrenzen, die für die Sicherheit wichtiger sind als die oberen, sich nicht sehr unterscheiden. Der Wert für Propan ist sogar nur halb so hoch wie der für Wasserstoff. Für Konzentrationen in der Nähe der unteren Zündgrenzen sind die Mindestzündenergien der drei Gase nicht sehr verschieden voneinander. Für praktische Zwecke sind daher die mit Wasserstoff verbundenen Risiken nicht sehr viel anders als die von anderen Brennstoffen ausgehenden.

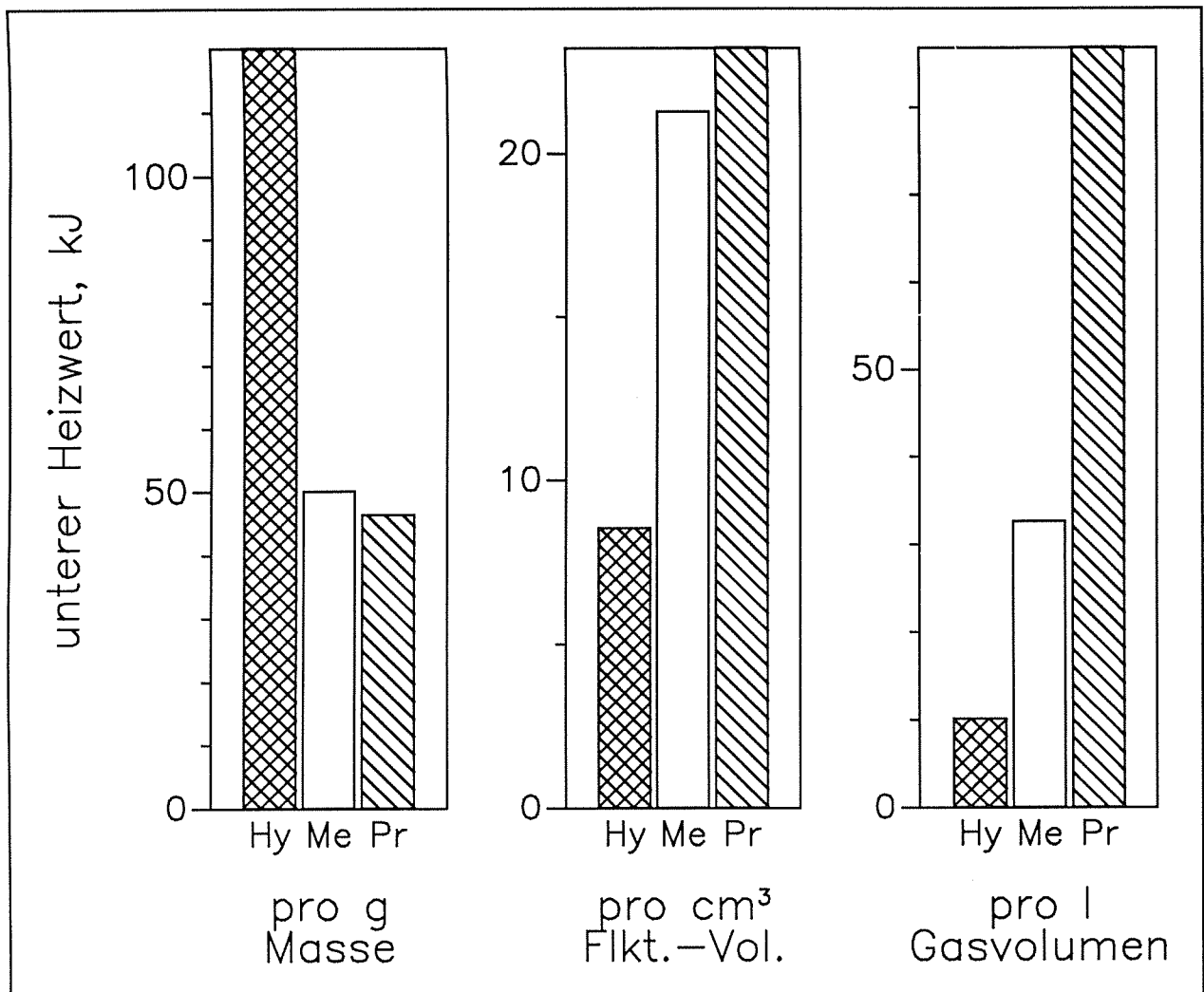


Abb. 7: Unterer Heizwert von Wasserstoff, Methan und Propan

8.3 Heizwert

Brennstoffe werden wegen ihres Wärmehaltes oder Heizwertes gespeichert. Diese Eigenschaft ist natürlich auch die Ursache der von den Stoffen ausgehenden Risiken. Abb. 7 vergleicht die Zahlen für alle drei Brenngase bezogen auf die Einheit der Masse, des Flüssigkeitsvolumens und des Gasvolumens. Der Vergleich von Lagern für verschiedene Brennstoffe muß auf der Basis des gleichen gespeicherten Heizwertes erfolgen.

Wie die Tabelle zeigt, ist die bei der Verbrennung von Wasserstoff pro Masseneinheit freiwerdende Wärme um etwa 150 % höher als bei den anderen Brennstoffen, aber der Heizwert pro Volumeneinheit ist geringer. Dies liegt daran, daß die Dichte von Wasserstoff sowohl in der flüssigen als auch in der Gasphase sehr niedrig ist (s. Abb. 5). Was das für Folgen für die Vorratsanlage hat, wird nun besprochen werden (s. Tab. 6).

8.4 Vergleich der Anlagengröße

Zum Vergleich des für Hamburg geplanten Wasserstofflagers mit Lagern für andere Brennstoffe muß betrachtet werden, wie die Verbrennungswärme von 15.000 m³ flüssigen Wasserstoffs ansonsten gespeichert werden würde. Dies ist für die hier verglichenen Brennstoffe in Tab. 6 getan worden. Die Vorratsanlagen für die anderen Stoffe hätten

offensichtlich ein kleineres geometrisches Volumen. Sie müßten aber mehr Masse enthalten, entsprechend dem umgekehrten Verhältnis der Verbrennungswärmen. Dadurch gleicht sich der Nachteil des größeren Volumens bis zu einem gewissen Grade aus, denn Ausbreitungsstudien und andere Bestandteile des Umweltverträglichkeitsgutachtens und der Störfallanalyse gehen immer von der Masse aus, die bei einem möglichen Unfall in die Umgebung entlassen werden könnte.

Stoff	Volumen m ³	Masse t
H ₂	15000	1065
CH ₄	6024	2560
C ₃ H ₈	5515	2756

Tab. 6: Vergleich der Lager gleichen Heizwerts

Die sicherheitstechnischen Erfordernisse für ein Methanlager würden sich nicht sehr von denen für ein Wasserstofflager unterscheiden. Bei Propan müßte wegen seiner Dichte, die in der Gasphase größer ist als die von Luft, die Schutzzone erheblich größer sein. Außerdem müßten alle Öffnungen am oder im Boden (Kanalisation, Schachtdeckel, Kellerfenster usw.) gasdicht sein⁴. Sogar flüssiges Erdgas kann in solche Öffnungen fließen, falls nicht genug Wärme für seine schnelle Verdampfung zur Verfügung steht. Behälter für tiefkalte, verflüssigte Gase haben einen natürlichen Sicherheitsvorteil gegenüber solchen für Flüssiggas, weil sie wegen ihrer Bauweise widerstandsfähiger gegen Erhitzung, Stöße oder andere äußere Einflüsse sind. Das schlägt sich auch in verschiedenen Regeln nieder⁵.

8.5 Unfallauswirkungen

Gefährliche Situationen können entstehen, wenn das verflüssigte Gas durch einen Störfall aus dem Tank austritt, verdampft und ein zündfähiges Gemisch mit Luft bildet. Vorratslager und Füllstation müssen aus diesem Grund mit Schnellschlußventilen und zahlreichen anderen Vorkehrungen für den Fall eines Gasaustritts ausgestattet sein. Daher ist es wirklichkeitsfremd, die Auswirkungen der Entstehung einer Gaswolke aus dem gesamten Lagerinhalt zu betrachten. Viel realistischer ist der Austritt und die Verdampfung einer begrenzten Menge, zum Beispiel 3 m³ (213 kg) LH₂. Dieses Volumen an Flüssigkeit würde 1275 kg Methan oder 1499 kg Propan entsprechen. Daß die Menge willkürlich gewählt ist, ist kein Nachteil, denn es geht hier um einen Vergleich der Unfallrisiken für das Brennstofflager, nicht um absolute Vorhersagen der Schadenshöhe. Die Zahlen in den folgenden Ausführungen wurden mit Hilfe des Programms WHAZAN [21] ermittelt.

8.5.1 BLEVE

Wenn die siedende Flüssigkeit in einem Tank eingeschlossen ist, der von einem Feuer erhitzt wird und birst, kann die austretende und verdampfende Flüssigkeit in einem

4: Einzelheiten der Propanlagerung in TRB [6.1.2] 801 Anhang 25

5: z. B. TRB [6.1.2] 610 "Aufstellung von Druckbehältern zum Lagern von Gasen", wenn hier auch nicht streng anwendbar. Vgl. Abs. 6.2 mit 6.1.3: eine Bedingung, der die Behälter der Anlage im Grunde gleichwertig sind, die aber für einen Flüssiggasbehälter einen erheblichen Aufwand erfordern würde.

Feuerball explodieren (sog. BLEVE⁶). Wenn die Flüssigkeit sich nach dem Austritt in einer Lache sammelt und erst später entzündet, ist ein sog. Lachenbrand (Pool Fire) die wahrscheinliche Folge.

Die Auswirkungen eines BLEVE sind in Tab. 7 abgeschätzt worden. Die meisten Behälter werden entweder sehr viel größer (Vorrattanks) oder kleiner (Fahrzeugtanks) als 3 m³ sein, aber die Zahl ist für Vergleichszwecke geeignet und von oben übernommen worden.

		H ₂	CH ₄	C ₃ H ₈
Max. BLEVE-Radius	m	15	28	31
Max. BLEVE-Dauer	s	6	11	13
Abstand für 4 kW m⁻²	m	180	212	165

Tab. 7: BLEVE-Auswirkungen für 3 m³ Flüssigkeit

Sowohl die Feuerballausdehnung als auch die BLEVE-Dauer sind für Wasserstoff geringer als für die anderen Stoffe. Wegen der hohen Verbrennungswärme von Wasserstoff ist allerdings der Einfluß der Wärmestrahlung auf entfernte Gegenstände bei Wasserstoff und Methan oder Propan nicht sehr verschieden.

Selbst in diesem Fall, der einer der schlimmsten vorstellbaren ist, gibt es also keinen klaren sicherheitstechnischen Nachteil für Wasserstoff im Vergleich mit eingeführten und akzeptierten Brennstoffen wie Methan oder Propan.

8.5.2 Lachenbrand

Die Ergebnisse der Berechnungen der Auswirkungen eines Lachenbrandes sind in Tab. 8 wiedergegeben. Es wurde die Ausbreitung der Flüssigkeit auf einer Fläche von 10 m² angenommen. Ausdehnung und Dauer des eigentlichen Feuers haben für Wasserstoff den geringsten Wert; ein Vergleich von Tab. 8 und Tab. 7 zeigt, daß die Zahlen dem gleichen Muster folgen wie bei einem BLEVE. Die Strahlungswärme in der Entfernung unterscheidet sich nicht wesentlich für die drei Stoffe. Der Wert für Wasserstoff ist zwar der höchste von allen, doch sind die Unterschiede nicht groß genug, um eine grundsätzlich andere Beurteilung zu rechtfertigen. Das gilt auch für die Abstände für andere Werte der Strahlungswärme.

		H ₂	CH ₄	C ₃ H ₈
Max. Radius	m	8	17	17
Max. Dauer	s	8	31	35
Abstand für 4 kW m⁻²	m	147	106	113

Tab. 8: Lachenbrand von 3 m³ Flüssigkeit

Flüssiger Wasserstoff, der mit Umgebungsluft in Berührung kommt, wird schnell verdampfen, weil die Temperaturdifferenz so groß und die Verdampfungswärme pro Masseneinheit so klein ist. Die Bildung großer Wasserstofflachen für lange Zeit ist daher unwahrscheinlich.

6: BLEVE = "**B**oiling **L**iquid **E**xpanding **V**apour **E**xplosion"

8.5.3 Gaswolkenausbreitung

Es gibt eine Reihe von mathematischen Modellen für die Abschätzung einer Gaswolkenausbreitung, darunter die vom VDI für Störfallanalysen empfohlene Methode [20], doch ist diese Methode für Entfernungen von weniger als 100 m vom Freisetzungspunkt nicht anwendbar⁷. Daher wurden auch die Zahlen für die Ausbreitung mit Hilfe von WHAZAN [21] ermittelt.

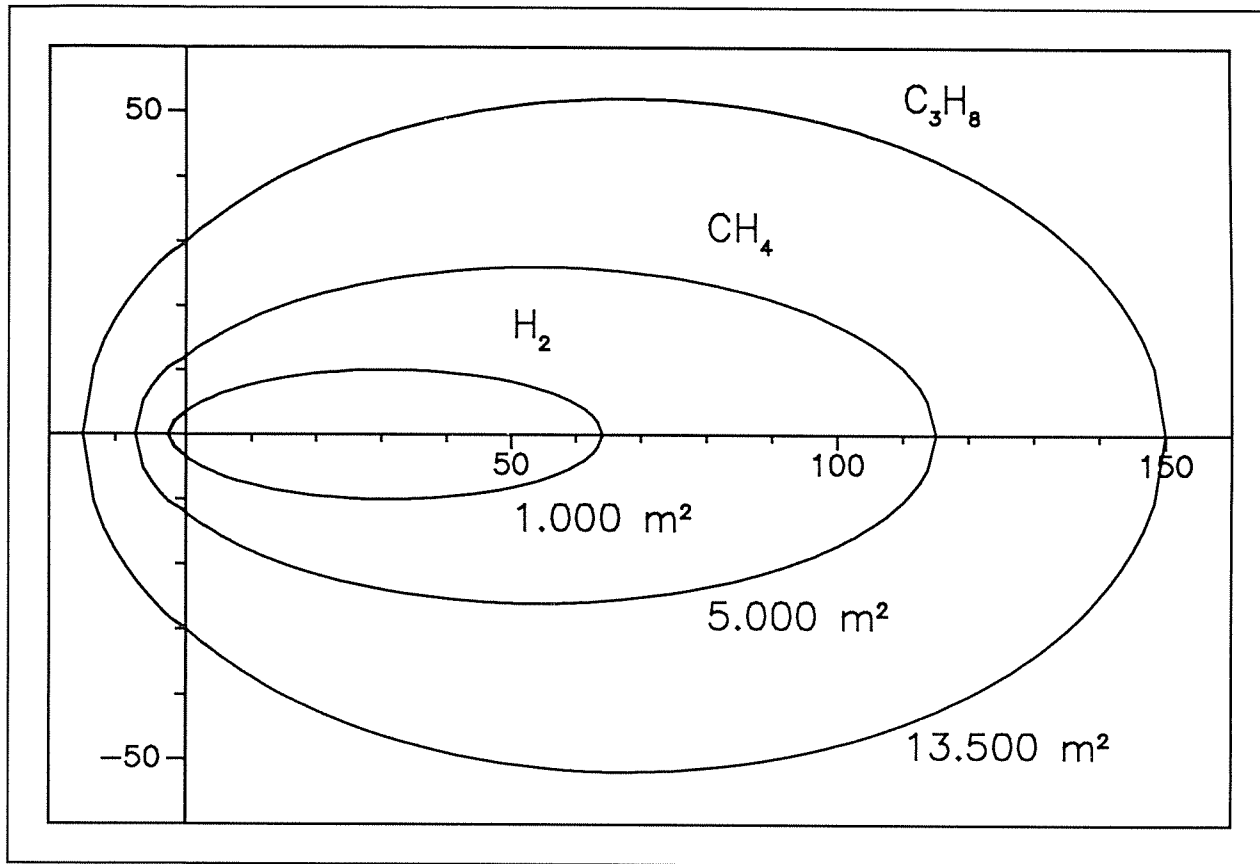


Abb. 8: Gebiet der Zündgefahr bei Freisetzung von 3 m³ Wasserstoff, Methan oder Propan bei 4 m/s Windgeschwindigkeit

Die Flüssigkeit verdampfe in Bodenhöhe bei einem Wind mit einer Geschwindigkeit von 4 m/s (ein typischer Wert für Hamburg). Für alle drei Brennstoffe wurde die Zone um den Freisetzungspunkt herum ermittelt, in der zu irgendeinem Zeitpunkt ein zündfähiges Gemisch auftreten kann.

Abb. 8 zeigt die Ergebnisse. Wasserstoff hat eine geringe Dichte und verschwindet am schnellsten. Das gefährdete Gebiet am Boden ist daher das kleinste von allen. Die Zone der Zündgefahr für das schwerste Gas (Propan) würde ein viel größeres Gebiet bedecken.

⁷: VDI übernimmt keine Gewähr für die Zuverlässigkeit der Werte bei Abständen von weniger als 100 m, aber nach Angabe der Programmierer kann man auch diese Ergebnisse immer noch zumindest als gute Näherung betrachten.

Wegen der geringen Dichte erstreckt sich die Wasserstoffwolke allerdings weiter nach oben. Die Höhen der gefährdeten Gebiete sind 10, 7 und 4 m für Wasserstoff, Methan bzw. Propan. Da jedoch Zündquellen gewöhnlich in Bodennähe sind, stellt dies keine große Gefahr dar.

8.6 Schlußfolgerungen

Der Vorteil des Wasserstoffs wegen seiner physikalischen Eigenschaften (geringe Dichte, geringe Masse pro Einheit der Verdampfungswärme usw.) ist aus den angeführten Zahlen leicht ersichtlich. Da durch einen Austritt von Methan oder gar Propan bei einem Störfall ein viel größeres Gebiet gefährdet werden würde, wären die Bestimmungen des BImSchG, besonders die der Störfallverordnung, für Flüssiggas sogar viel schwieriger zu erfüllen sein als für Wasserstoff.

Derartige Abschätzungen müssen z. B. bei der Bestimmung der Schutzzonen gemacht werden, wenn die Zulassung nach BImSchG beantragt wird. Die Vergleiche zeigen, daß die Lagerung von Wasserstoff trotz seiner Zündfreudigkeit nicht gefährlicher ist als die von gewöhnlichen anderen Brennstoffen oder brennbaren Stoffen, die in jedem Hafen oder Industriegebiet in häufig noch viel größeren Mengen vorhanden sind. Selbst im Falle eines Unfalls ist Wasserstoff weniger gefährlich als eingeführte Stoffe wie Flüssiggas, weil er rasch verschwindet und weder Luft noch Wasser noch den Boden verschmutzt.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Wenn auch die große Zahl und Komplexität der anwendbaren Gesetze und Regeln auf den ersten Blick verwirren mag, so stellt sich die Lage doch auf den zweiten Blick wesentlich positiver dar. Die Zahl der Regelungen kommt daher, daß man die Behälter oder die ganze Anlage von verschiedenen Standpunkten her beurteilen kann:

- als gewerbliche Einrichtung;
- als mögliche Quelle von Umweltgefahren;
- als gefährliche Ladung;
- als Gefahrenquelle für die Arbeitnehmer;
- als Hafeneinrichtung (ggf.);
- als Füllstation.

Was den materiellen Inhalt der verschiedenen Regeln betrifft, so beziehen sie sich häufig (zum Teil ausdrücklich) aufeinander, oder die Anforderungen sind zumindest parallel.

Bisher gab es fast keinen Bedarf für Regelungen für Anlagen, Behälter oder Schiffe für tiefkalten Wasserstoff in diesem Umfang. Die meisten der hier zitierten Regeln wurden im Hinblick auf Schiffe wie Rohöl- oder Erdgastanker, Anlagen wie Flüssiggaslager, Raffinerien oder Chemiewerke und Behälter wie einfache Gasflaschen gestaltet. Für Probleme wie die hier diskutierten sind die angemessenen Regeln und Normen teilweise einfach nicht da. Einige dieser Lücken lassen sich durch Analogien überbrücken, aber dies ist meist nicht befriedigend und auf keinen Fall rechtswirksam.

Andererseits bietet dieser Zustand die Möglichkeit, die mit Sicherheit bevorstehende Arbeit an gesetzlichen Regelungen, technischen Regeln und Normen in die richtige Richtung zu lenken. Pilotprojekte wie das, in dessen Rahmen dieser Bericht ursprünglich entstand, können durch die Demonstration existierender und zuverlässiger Technologien dabei wertvolle Hilfe leisten.

Das Hauptproblem in der Öffentlichkeit in Verbindung mit dem Einsatz von flüssigem Wasserstoff im großen Maßstab scheint nicht so sehr ein technisches als vielmehr ein psychologisches zu sein, wie oben erwähnt. Durch überzeugende Sicherheit und Zuverlässigkeit in der Funktion großer Anlagen und Anwendungen kann sicherlich ein wichtiger Beitrag dazu geleistet werden, in der Allgemeinheit die unbestreitbaren Vorteile dieses neuen Brennstoffs in den Vordergrund zu rücken.

10 Quellenangaben

- [1] *Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge* (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG) i. d. F. vom 11. Mai 1990 (BGBl. I S. 870)
- [1.1] *Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes* (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen - 4. BImSchV) i. d. F. vom 19. Mai 1988 (BGBl. I Nr. 20/88 S. 1586)
- [1.2] *Fünfte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes* (Verordnung über Immissionsschutzbeauftragte - 5. BImSchV) i. d. F. vom 19. Mai 1988 (BGBl. I Nr. 20/88 S. 608)
- [1.3] *Neunte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes* (Grundzüge des Genehmigungsverfahrens - 9. BImSchV) i. d. F. vom 19. Mai 1988 (BGBl. I 20/88 S. 608)
- [1.4] *Elfte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes* (Emissionserklärungsverordnung - 11. BImSchV) i. d. F. vom 24. Juli 1985 (BGBl. I 41/85 S. 1586)
- [1.5] *Zwölfte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes* (Störfallverordnung - 12. BImSchV) i. d. F. vom 19. Mai 1988 (BGBl. I S. 608)
- [1.5.1] *Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Störfallverordnung* (1. StörfallVwV) i. d. F. vom 26. August 1988 (GMBI. S. 398)
- [1.5.2] *Zweite Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Störfallverordnung* (2. Störfall-VwV) i. d. F. vom 27. April 1982 (GMBI. S. 205)

- [2] *RICHTLINIE DES RATES vom 27. Juni 1985 über die Umweltverträglichkeitsprüfung bei bestimmten öffentlichen und privaten Projekten (85/337/EWG)* (ABI EG Nr. L 175/40); *Gesetz zur Umsetzung der Richtlinie des Rates vom 27. Juni 1985 über die Umweltverträglichkeitsprüfung bei bestimmten öffentlichen und privaten Projekten (85/337/EWG)* vom 12. Februar 1990 (BGBl. I S. 205); *Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG)* i. d. F. vom 20. Juni 1990 (BGBl. I. S. 1080)

- [3] *Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts* (Wasserhaushaltsgesetz - WHG) i. d. F. vom 12. Februar 1990 (BGBl. I S. 205)

- [4] *Gesetz über die Beförderung gefährlicher Güter* i. d. F. vom 25. September 1990 (BGBl. I Nr. 95/75 S. 2121)
- [4.1] *Verordnung über die Beförderung gefährlicher Güter mit Seeschiffen* (Gefahrgutverordnung See - GGVSSee) i. d. F. vom 30. Juni 1989 (BGBl. I S. 1278)
- [4.1.1] *Internationales Übereinkommen zum Schutz des menschlichen Lebens auf See* (SOLAS-Konvention), 1974 (BGBl. 1979 II S. 141)
- [4.1.2] *Internationaler Code für den Bau und die Ausrüstung von Schiffen zur Beförderung verflüssigter Gase als Massengut* (IGC-Code) i. d. F. vom 20. Juli 1986 (BANz. Nr. 125, 12. Juli 1986); *Dritte Verordnung zur Änderung der Gefahrgutverordnung See*, 21. Dezember 1987 (BGBl. I Z 5702A, Nr. 62 vom 30. Dezember 1987)
- [4.1.3] *Vorschriften für Klassifikation und Bau von stählernen Seeschiffen*; I-Schiffstechnik; Teil 1-Seeschiffe; Kapitel 6-Flüssiggastankschiffe, Germanischer Lloyd, Hamburg, 1992
- [4.1.4] *International Maritime Dangerous Goods Code* (IMDG-Code), (BANz. Nr. 72a, 15. April 1989)

- [4.1.5] *Technische Richtlinien Tankcontainer (TRTC)*
- [4.2] *Verordnung zur Einführung der Verordnung über die Beförderung gefährlicher Güter auf dem Rhein (ADNR) und über die Ausdehnung dieser Verordnung auf die übrigen Bundeswasserstraßen (Gefahrgutverordnung Binnenschifffahrt - GGVBinSch) i. d. F. vom 16. März 1989 (BGBl. I Nr. 14/89 S. 489)*
- [4.3] *Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR); Gesetz zu dem Europäischen Übereinkommen vom 30. September 1957 über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR), 18. August 1969 (BGBl. 1969 II S. 1489); Verordnung über die innerstaatliche und grenzüberschreitende Beförderung gefährlicher Güter auf Straßen (Gefahrgutverordnung Straße - GGVS) i. d. F. vom 17. November 1990 (BGBl. I Nr. 62 S. 2453)*
- [4.4] *Verordnung über die innerstaatliche und grenzüberschreitende Beförderung gefährlicher Güter mit Eisenbahnen (Gefahrgutverordnung Eisenbahn - GGVE) i. d. F. vom 6. Juni 1990 (BGBl. I Nr. 26/90 S. 1001)*

- [5] *Gesetz zum Schutz vor gefährlichen Stoffen (Chemikaliengesetz - ChemG) i. d. F. vom 16. September 1980*
- [5.1] *Verordnung über die Gefährlichkeitsmerkmale von Stoffen und Zubereitungen nach dem Chemikaliengesetz (Gefährlichkeitsmerkmaleverordnung - Chem-GefMerkV) i. d. F. vom 17. Juli 1990*
- [5.2] *Verordnung über gefährliche Stoffe (Gefahrstoffverordnung - GefStoffV) i. d. F. vom 23. April 1990*
- [5.2.1] *Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS)*

- [6] *Gewerbeordnung (GewO) i. d. F. vom 17. Dezember 1990 (BGBl. I S. 2840)*
- [6.1] *Verordnung über Druckbehälter, Druckgasbehälter und Füllanlagen (Druckbehälter-Verordnung - DruckbehV) i. d. F. vom 21. April 1989 (BGBl. I S. 830)*
 - [6.1.1] *Technische Regeln für Druckgase (TRG)*
 - [6.1.2] *Technische Regeln für Druckbehälter (TRB)*
 - [6.1.3] *Technische Regeln für Rohrleitungen (TRR)*
- [6.2] *Verordnung über elektrische Anlagen in explosionsgefährdeten Räumen (ElexV)*
 - [6.2.1] *Richtlinien für die Vermeidung der Gefahren durch explosionsfähige Atmosphäre mit Beispielsammlung (Explosionsschutz-Richtlinien - EX-RL)*
 - [6.2.2] *Richtlinien für die Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen (Richtlinien "Statische Elektrizität")*
- [6.3] *Verordnung über Arbeitsstätten (Arbeitsstättenverordnung - ArbStättV) i. d. F. vom 1. August 1983*
 - [6.3.1] *Arbeitsstätten-Richtlinien (ASR)*

- [7] *Unfallverhütungsvorschriften (UVV)*
 - [7.1] *UVV Allgemeine Vorschriften (VBG 1)*
 - [7.2] *UVV Bauarbeiten (VBG 37)*
 - [7.3] *UVV Arbeiten an Gasleitungen (VBG 50)*
 - [7.4] *UVV Gase (VBG 61) (Entwurf vom August 1990)*
 - [7.5] *UVV Be- und Entladen von Wasserfahrzeugen (VBG 75)*
 - [7.6] *UVV Sicherheitskennzeichnung am Arbeitsplatz (VBG 125)*

- [8] DIN-Normen
- [8.1] DIN 2403: *Kennzeichnung von Rohrleitungen nach dem Durchflußstoff*
- [8.2] DIN 3339: *Armaturen, Werkstoffe für Gehäuseteile*
- [8.3] DIN 4102: *Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen*
- [8.4] DIN 17102: *Schweißgeeignete Feinkornbaustähle, normalgeglüht; Technische Lieferbedingungen für Blech, Band, Breitflach-, Form- und Stabstahl*
- [8.5] DIN 17280: *Kaltzähe Stähle; Technische Lieferbedingungen für Blech, Band-, Breitflachstahl, Formstahl, Stabstahl und Schmiedestücke*
- [8.6] DIN 17440: *Nichtrostende Stähle; Technische Lieferbedingungen für Blech, Warmband, Walzdraht, gezogenen Draht, Stabstahl, Schmiedestücke und Halbzeug*
- [8.7] DIN 51622: *Propan, Propen, Butan, Buten und deren Gemische; Anforderungen*
- [8.8] DIN VDE 0185: *Blitzschutzanlagen*

- [9] AD-Merkblätter
- [9.1] Serie A: *Ausrüstung*
- [9.2] Serie HP: *Herstellung und Prüfung*
- [9.3] Serie BP: *Betrieb und Prüfung*
- [9.4] Serie W: *Werkstoffe*
- [9.4.1] Nr. W10: *Werkstoffe für tiefe Temperaturen, Eisenwerkstoffe*

- [10] *ASME Boiler and Pressure Vessel Code (ASME-Code), besonders Teil VIII: "Rules for Construction of Pressure Vessels", The American Society of Mechanical Engineers, New York (USA)*

- [11] *Untersuchung zur Erzeugung, zum interkontinentalen Transport und zur Verwendung des sauberen Energieträgers Wasserstoff auf der Basis großer und billiger Wasserkraftpotentiale (Wasserstoffpilotprojekt Kanada), DECHEMA, Frankfurt a. M. 1987*

- [12] *Euro-Québec Hydro-Hydrogen Pilot Project, Phase II: Feasibility Study - Final Report, Hydro-Québec, Montréal, und Ludwig-Bölkow-Stiftung, Ottobrunn, März 1991*

- [12.1] "Intercontinental Maritime Transport of Hydrogen", Bericht des Germanischen Lloyd, Hamburg für das Projekt EQHHPP, Phase II, WP 080; erschienen in [12], Bd. II, Teil III

- [13] *Euro-Québec Hydro-Hydrogen Pilot Projekt, Phase III.0-1, Final Report, Ludwig-Bölkow-Stiftung, Ottobrunn, Februar 1992*

- [13.1] "Evidence Study of Environmental Compatibility (Umweltverträglichkeitsstudie)", Bericht der Fa. Holinger GmbH, Hamburg, für das Projekt EQHHPP, Phase III.0-1, WP 600; gekürzt erschienen in [13], S. 5

- [13.2] "Investigation into Safety Aspects for the Transport of Liquefied Hydrogen in Hamburg", Bericht des Germanischen Lloyd, Hamburg, für das Projekt EQHHPP, Phase III.0.1, WP 610; gekürzt erschienen in [13], S. 20

- [13.3] "Short Review of National and Supranational Laws and Rules Applicable to the Liquid Hydrogen Storage Plant in the Harbour of Hamburg", Bericht der

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin, und des Germanischen Lloyd, Hamburg, für das Projekt EQHHPP, Phase III.0-1, WP 630; gekürzt erschienen in [13], S. 33

- [14] *Handbook of Compressed Gases*, Hrsgb.: Compressed Gas Association, USA-Arlington, 3. Ausgabe, Van Nostrand Reinhold, New York 1990
- [15] *Cryogenics Safety Manual*, Hrsgb.: British Cryogenics Council, Mechanical Engineering Publications Ltd., London 1982
- [16] *Merkblatt M 055 - Wasserstoff*, Berufsgenossenschaft der Chemischen Industrie, Juli 1991
- [17] *Solar Power Plants*, Hrsgb.: C.-J. Winter, R. L. Sizmann und L. L. Vant-Hull, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg 1991
- [18] *Bedingungen und Folgen von Aufbaustrategien für eine solare Wasserstoffwirtschaft*, Bericht der Enquete-Kommission "Gestaltung der technischen Entwicklung, Technikfolgen-Abschätzung und -Bewertung", Hrsgb.: Deutscher Bundestag, Ref. Öffentlichkeitsarbeit, Bonn 1990; Bundestags-Drucksache 11/7993
- [19] *Transport und Umschlag von tiefgekühlt verflüssigtem Erdgas (LNG) und unter Druck sowie tiefgekühlt verflüssigten Kohlenwasserstoffen (LPG) mit Seeschiffen auf deutschen See-Schiffahrtstraßen - Risikoabschätzung*, Bundesministerium für Verkehr, Arbeitsgruppe des Beirates für die Beförderung gefährlicher Güter; Bonn, Dezember 1984
- [20] Methode nach VDI 3783 Teil 1 *Ausbreitung von Luftverunreinigungen in der Atmosphäre; Ausbreitung von störfallbedingten Freisetzungen - Sicherheitsanalyse*. Programm "STOER" erstellt und vertrieben von G. Manier und R. Röckle, TH Darmstadt
- [21] *WHAZAN (World Bank Hazard Analysis)*, Vertrieb durch Fa. Technica Ltd., London
- [22] W. S. Wayne, M. Böckenhauer, R. C. Gray: "Filling Limits for Gas Cargo Tanks", vorgetragen auf der GASTECH 90, Amsterdam, 4.-7.12.90
- [23] W. Schön, M. Mallon: *Untersuchungen zur Wirksamkeit von Wasserberieselungseinrichtungen als Brandschutzmaßnahme für Flüssiggas-Lagertanks*, BAM-Forschungsbericht 146, Berlin 1987
- [24] B. Droste, U. Probst: *Untersuchungen zur Wirksamkeit von Brandschutzisolierungen von Flüssiggas-Lagertanks*, BAM-Forschungsbericht 125, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven 1986
- [25] B. Droste: "Die Bewertung der Sicherheit von Umschließungen zur Lagerung von Flüssiggas", 5. *Kolloquium über Fragen der Chemischen Sicherheitstechnik*, BAM, Berlin 1990

- [26] *Statusbericht zum Kenntnisstand des Überganges Deflagration-Detonation unter besonderer Berücksichtigung der Zielsetzung des PNP-Gaswolkenprogramms*, Battelle-Institut, Frankfurt a. M. 1987
- [27] J. Gordon Vaeth: "What happened to the Hindenburg?", *Weatherwise*, Dezember 1991, S. 315-22; referiert in "Funke am Lack", *DER SPIEGEL* 15/1991 S. 246ff

Bisher erschienene Forschungsberichte der BAM

Nr. 1/1968

Forschung und Entwicklung in der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)
Rechenschaftsbericht für den Bundesminister für Bildung und Wissenschaft

Nr. 2/1970 (vergriffen)

G. Andrae
Zum Problem des Feuchtigkeitsschutzes von Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergebern

Nr. 3/1970

J. Ziebs
Über das mechanische Verhalten von Aluminium-Stahl-Freileitungseilen als Beispiel für Verbundbauteile

Nr. 4/1970 (vergriffen)

A. Burmester
Formbeständigkeit von Holz gegenüber Feuchtigkeit – Grundlagen und Vergütungsverfahren

Nr. 5/1971

N. Steiner
Die Bedeutung der Netzstellenart und der Netzwerkkettendichte für die Beschreibung der elastischen Eigenschaften und des Abbaus von elastomeren Netzwerken

Nr. 6/1971

P. Schneider
Zur Problematik der Prüfung und Beurteilung des Luftschallschutzes von Bauelementen bei unterschiedlichen Einbaubedingungen

Nr. 7/1971

H.-J. Petrowitz
Chromatographie und chemische Konstitution – Untersuchungen über den Einfluß der Struktur organischer Verbindungen auf das Verhalten bei der Dünnschicht-Chromatographie

Nr. 8/1971

H. Veith
Zum Spannungs-Drehungs-Verhalten von Baustählen bei Wechselbeanspruchung

Nr. 9/1971

K.-H. Möller
Untersuchung über die sichernde Wirkung poröser Massen in Acetylenflaschen

Nr. 10/1972

D. Aurich, E. Martin
Untersuchungen über die Korngrößenbestimmung mit Ultraschall zur Entwicklung einer für die Praxis geeigneten zerstörungsfreien Meßmethode

Nr. 11/1972

H.-J. Krause
Beitrag zur Kenntnis der Schnittriefenbildung und Schnittgütwerte beim Brennschneiden

Nr. 12/1972

H. Feuerberg
Über Veränderungen von Nylon-6-Fasern beim Texturieren

Nr. 13/1972

K.-H. Habig, K. Kirschke, W.-W. Maennig, H. Tischer
Festkörpergleitreibung und Verschleiß von Eisen, Kobalt, Kupfer, Silber, Magnesium und Aluminium in einem Sauerstoff-Stickstoff-Gemisch zwischen 760 und $2 \cdot 10^{-7}$ Torr

Nr. 14/1972

E. Fischer
Untersuchungen zur Amplitudenabhängigkeit der Ultraschalldämpfung in Metallen bei 20 kHz

Nr. 15/1972

H. Pohl
Studie und Probleme der chemischen Edelmetall-Analyse

Nr. 16/1972

E. Knublauch
Über Ausführung und Assagfähigkeit des Normbrandversuches nach DIN 4102, Blatt 2, im Hinblick auf die Nachbildung natürlicher Schadensfeuer

Nr. 17/1972

P. Reimers
Aktivierungsanalyse mit schnellen Neutronen, Photonen und geladenen Teilchen

Nr. 18/1973

W. Struck
Das Sprödebruchverhalten des Baustahles R St 37-2 N in geschweißten Konstruktionen, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches

Nr. 19/1973

K. Kaffanke, H. Czichos

Die Bestimmung von Grenzflächentemperaturen bei tribologischen Vorgängen

Nr. 20/1973

R. Rudolphi
Brandrisiko elektrischer Leitungen und Installationen in Wänden

Nr. 21/1973

D. Klaffke, W. Maennig
Die kontinuumsmechanische Erfassung des zeitlichen Ablaufs der elastisch-plastischen Dehnungen bei der Zerrüttung

Nr. 22/1973

R. Rudolphi, E. Knublauch
Untersuchungen für ein Prüfverfahren zur Bemessung der Brandschutzbekleidung von Stahlstützen

Nr. 23/1973

W. Ruske
Reichs- und preußische Landesanstalten in Berlin Ihre Entstehung und Entwicklung als außeruniversitäre Forschungsanstalten und Beratungsorgane der politischen Instanzen

Nr. 24/1973

J. Stanke, E. Klement, R. Rudolphi
Das Brandverhalten von Holzstützen unter Druckbeanspruchung

Nr. 25/1973

E. Knublauch
Über das Brandgeschehen vor der Fassade eines brennenden Gebäudes unter besonderer Berücksichtigung der Feuerbeanspruchung von Außenstützen

Nr. 26/1974

P. Jost, P. Reimers, P. Weise
Der Elektronen-Linearbeschleuniger der BAM – Eigenschaften und erste Anwendungen

Nr. 27/1974

H. Wüstenberg
Untersuchungen zum Schallfeld von Winkelprüfköpfen für die Materialprüfung mit Ultraschall

Nr. 28/1974

H. Heinrich
Zum Ablauf von Gasexplosionen in mit Rohrleitungen verbundenen Behältern

Nr. 29/1974

P. Schneider
Theorie der dissipativen Luftschalldämmung bei einem idealisotropen porösen Material mit starrem Skelet für senkrechten, schrägen und allseitigen Schallenfall

Nr. 30/1974 (vergriffen)

H. Czichos, G. Salomon
The Application of Systems Thinking and Systems Analysis to Tribology

Nr. 31/1975

G. Fuhrmann
Untersuchungen zur Klärung des Verhaltens thermoplastischer Kunststoffe bei Wechseldehnungsbeanspruchung

Nr. 32/1975

R. Rudolphi, B. Böttcher
Ein thermo-elektrisches Netzwerkverfahren zur Berechnung stationärer Temperatur- und Wärmestromverteilungen mit Anwendungsbeispielen

Nr. 33/1975

A. Wagner, G. Kieper, R. Rudolphi
Die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit von Baustoffen mit Hilfe eines nichtstationären Meßverfahrens

Nr. 34/1976 (vergriffen)

H.-J. Deppe
Untersuchungen zur Vergütung von Holzwerkstoff Nr. 35/1976

E. Limberger

Der Widerstand von Platten, die als Beplankungsmaterial leichter Wände verwendet werden, gegenüber dem Aufprall harter Körper – Vorschlag für ein Prüfverfahren –

Nr. 36/1976 (vergriffen)

J. Hundt
Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton unter Einwirkung eines Temperaturgefälles

Nr. 37/1976

W. Struck
Die stoßartige Beanspruchung leichter, nichttragender Bauteile durch einen mit der Schulter gegenprallenden Menschen – Vorschlag für ein Prüfverfahren –

Nr. 38/1976

K.-H. Habig
Verschleißuntersuchungen an gas-, bad- und ionisiertem Stahl 42 CrMo 4

Nr. 39/1976

K. Kirschke, G. Kempf
Untersuchung der viskoelastischen Eigenschaften von Flüssigkeiten (mit nicht-Newton'schem Fließverhalten) insbesondere bei höherer Scherbeanspruchung

Nr. 40/1976

H. Hantsche
Zum Untergrundabzug bei energiedispersiven Spektren nach verschiedenen Verfahren

Nr. 41/1976

B. Böttcher
Optische Eigenschaften cholesterinischer Flüssigkeiten

Nr. 42/1976

S. Dietlen
Ermittlung der Mindestzündenergie brennbarer Gase in Mischung mit Luft

Nr. 43/1976

W. Struck
Das Sprödebruchverhalten geschweißter Bauteile aus Stahl mit zäh-sprödem Übergang im Bruchverhalten, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches

Nr. 44/1976

W. Matthees
Berechnung von räumlichen, linear elastischen Systemen, die aus finiten Stab- und Balkenelementen zusammengesetzt sind, unter Verwendung des Programms „Stab-Werk“

Nr. 45/1976

W. Paatsch
Untersuchung des Elektrodenverhaltens im Vakuum aufgedampfter Metallschichten

Nr. 46/1977 (vergriffen)

G. Schickert, H. Winkler
Versuchsergebnisse zur Festigkeit und Verformung von Beton bei mehraxialer Druckbeanspruchung
Results of Test Concerning Strength and Strain of Concrete Subjected to Multiaxial Compressive Stresses

Nr. 47/1977

A. Plank
Bautechnische Einflüsse auf die Tragfähigkeit von Kunststoffdübeln für Fassadenbekleidungen

Nr. 48/1977

U. Holzjöhner
Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last, angewendet auf die Fundamente einer geplanten Schnellbahn

Nr. 49/1977

G. Wittig
Untersuchungen zur Anwendung von Mikrowellen in der zerstörungsfreien Prüfung

Nr. 50/1978 (vergriffen)

N. Czaika, N. Mayer, C. Amberg, G. Magiera, G. Andrae, W. Markowski
Zur Meßtechnik für die Sicherheitsbeurteilung und -überwachung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern

Nr. 51/1978

J. Sickfeld
Auswirkung von chemischen und physikalisch-technologischen Einflußfaktoren auf das Beständigkeitsverhalten von Oberflächenbeschichtungen auf der Basis von Reaktionsbeschichtungsstoffen

Nr. 52/1978

A. Tomov
Zum Einfluß der Gleitgeschwindigkeit auf das tribologische Verhalten von Werkstoffen hoher Härte bei reiner Festkörperreibung

Nr. 53/1978

R.-G. Rohrmann, R. Rudolphi
Bemessung und Optimierung beheizbarer Straßen- und Brückenbeläge

Nr. 54/1978

H. Sander
Magnetisches Verhalten dünner Eisenschichten bei mechanischer Wechselbeanspruchung

Nr. 55/1978

D. Klaffke
Beobachtung und Orientierungsbestimmung der Oberflächenkristallite polykristalliner 99,999 %-Al-Proben bei Biegewechselbeanspruchung

Nr. 56/1979

W. Brünner, C. Langlie
Stabilität von Sandwichbauteilen

Nr. 57/1979

M. Stadthaus
Untersuchungen an Prüfmitteln für die Magnetpulverprüfung

Investigations on Inspection-Media for Magnetic-Particle-Testing

Nr. 58/1979
W. Struck
Ermittlung des Bauteilwiderstandes aus Versuchsergebnissen bei vereinbartem Sicherheitsniveau

Nr. 59/1979
G. Plauk
Ermittlung der Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken mit der Methode der Finiten Elemente unter besonderer Berücksichtigung des Verbundes zwischen Beton und Stahl

Nr. 60/1979
H. Spreckelmeyer, R. Helms, J. Ziebs
Untersuchungen zur Erfassung der Kaltformbarkeit von Feinblechen beim Strecken

Nr. 61/1979
K. Richter
Beschreibung von Problemen der höheren Farbmetrik mit Hilfe des Gegenfarbensystems

Nr. 62/1979
W. Gerisch, G. Becker
Geomagnetobiologisch bedingter Zusammenhang zwischen der Fraßaktivität von Termiten und der Zahl der Sterbefälle

Nr. 63/1979
E. Behrend, J. Ludwig
Untersuchungen an Stopfbuchsen von Ventilen und Schiebern für Gase

Nr. 64/1980
W. Rücker
Ermittlung der Schwingungserregung beim Betrieb schlenengebundener Fahrzeuge in Tunneln sowie Untersuchung des Einflusses einzelner Parameter auf die Ausbreitung von Erschütterungen im Tunnel und dessen Umgebung

Nr. 65/1980
P. Schmidt, D. Aurich, R. Helms, H. Veith, J. Ziebs
Untersuchungen über den Einfluß des Spannungszustandes auf bruchmechanische Kennwerte

Nr. 66/1980
M. Hattwig
Auswirkung von Druckentlastungsvorgängen auf die Umgebung

Nr. 67/1980
W. Matthees
Beitrag zur dynamischen Analyse von vorgespannten und vorbelasteten Feder-Masse-Systemen mit veränderlicher Gliederung unter stoßartiger Beanspruchung

Nr. 68/1980
D. Petersohn
Oberflächenmeßverfahren unter besonderer Berücksichtigung der Stereometrie. Entwicklung eines vollzentrischen Präzisions-Gonlometers

Nr. 69/1980
F. Buchhardt, P. Brandl
Untersuchungen zur Integrität des Liners von Reaktorsicherheitsbehältern (Containments) in Stahlbeton- und Spannbetonbauweise

Nr. 70/1980 (vergriffen)
G. Schickert
Schwellenwerte beim Betondruckversuch

Nr. 71/1980
W. Matthees, G. Magiera
Untersuchungen über durch den Boden gekoppelte dynamische Wechselwirkungen benachbarter Kernkraftwerksbauten großer Masse unter seismischen Einwirkungen

Nr. 72/1980
R. Rudolphi
Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen am Beispiel von Stahl- und Holzstützen

Nr. 73/1980
P. Wegener
Vergleichende Untersuchungen zum Tragverhalten von Klemmkupplungen für Stahlrohrgerüste nach bestehenden deutschen Prüfvorschriften und geplanten europäischen bzw. internationalen Prüfnormen

Nr. 74/1980
R. Rudolphi, R. Müller
ALGOL-Computerprogramm zur Berechnung zweidimensionaler instationärer Temperaturverteilungen mit Anwendungen aus dem Brand- und Wärmeschutz

Nr. 75/1980
H.-J. Heinrich
Beitrag zur Kenntnis des zeitlichen und örtlichen Druckverlaufs bei der plötzlichen Entlastung unter Druck stehender Behälter und Behälterkombinationen

Nr. 76/1980
D. Klaffke, W.-W. Maennig
Deformationsverhalten von Rein- und Reinstaluminium sowie Cu 99,9 und St 37 bei Biegebeanspruchung im Rasterelektronenmikroskop

Nr. 77/1981
M. Gierloff, M. Maulzsch
Untersuchung des Verhaltens von Lagerzementen

Nr. 78/1981
W. Rücker
Dynamische Wechselwirkung eines Schienen-Schwellensystems mit dem Untergrund

Nr. 79/1981
V. Neumann
Ein Beitrag zur Untersuchung der wasserstoffbeeinflussten Kaltbiegung höherfester niedriglegierter Feinkornbaustähle mit dem Implantversuch

Nr. 80/1981
A. Plank, W. Struck, M. Tzschätzsch
Ursachen des Teileinsturzes der Kongreßhalle in Berlin-Tiergarten

Nr. 81/1981
J. Schmidt
Graphisch-rechnerisches Verfahren zum Erfassen der Zündhäufigkeit zündbarer Stoffe; Anwendung auf Datenmaterial aus dem Bereich der Statistik

Nr. 82/1982
R. Helms, H.-J. Kühn, S. Ledworski
Zur werkstoffmechanischen Beurteilung des Kerbschlagbiegeversuches
Assessment of the mechanical behaviour of materials in the notched bar impact test

Nr. 83/1982
H. Czichos, P. Feinle
Tribologisches Verhalten von thermoplastischen Kunststoffen
- Kontaktdeformation, Reibung und Verschleiß, Oberflächenuntersuchungen -

Nr. 84/1982
R. Müller, R. Rudolphi
Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen im Kleinprüfstand (Vergleichsversuche)

Nr. 85/ISBN 3-88314-231-X/1982
H. Czichos
Technische Materialforschung und -prüfung
- Entwicklungstendenzen und Rahmenvorschläge für ein EG-Programm „Basic Technological Research“ -
Materials Research and Testing
- Development Trends and Outline Proposals for a Community Programme “Basic Technological Research” -

Nr. 86/ISBN 3-88314-232-8/1982
K. Niesel, P. Schimelwitz
Zur quantitativen Kennzeichnung des Verwitterungsverhaltens von Naturwerksteinen anhand ihrer Gefügekennmerkmale

Nr. 87/ISBN 3-88314-240-9/1982
B. Isecke, W. Stichel
Einfluß baupraktischer Umgebungsbedingungen auf das Korrosionsverhalten von Spannstählen vor dem Injizieren

Nr. 88/ISBN 3-88314-254-9/1983
A. Erhard
Untersuchungen zur Ausbreitung von Longitudinalwellen an Oberflächen bei der Materialprüfung mit Ultraschall

Nr. 89/ISBN 3-88314-263-8/1983
D. Conrad, S. Dieltjen
Untersuchungen zur Zerfallfähigkeit von Distickstoffoxid

Nr. 90/ISBN 3-88314-264-6/1983
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members

Nr. 91/ISBN 3-88314-265-4/1983
M. Weber
Dreidimensionale Analyse von unbewehrtem Beton mit nichtlinear-elastischem Materialgesetz

Nr. 92/ISBN 3-88314-266-2/1983
L. Auersch
Ausbreitung von Erschütterungen durch den Boden

Nr. 93/ISBN 3-88314-283-2/1983
P. Studt
Unterdrückung stickstoff-induzierter Kurvengeräusche schienengebundener Fahrzeuge durch eine physikalisch-chemische Oberflächenbehandlung der Schienen

Nr. 94/ISBN 3-88314-284-0/1983
Xian-Quan Dong
Untersuchungen der Störerschwingungen beim Kerbschlagbiegeversuch und deren Abschwächungen

Nr. 95/ISBN 3-88314-289-1/1983
M. Römer
Über die Fokussierung des Schallfeldes von Ultraschall-Prüfköpfen mit Fresnelischen Zonenplatten

Nr. 96/ISBN 3-88314-296-4/1983
H. Eifler
Verbundverhalten zwischen Beton und geripptem Betonstahl sowie sein Einfluß auf inelastische Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken

Nr. 97/ISBN 3-88314-297-2/1983
G. Fuhrmann, W. Schwarz
Typische Bruchflächenbildung thermoplastischer Kunststoffe nach wechselnder mechanischer Beanspruchung

Nr. 98/ISBN 3-88314-312-X/1983
E. Schnabel
Bestimmung des elastischen Verhaltens von Maschinenwaren
- Stretch- und Erholungsvermögen -

Nr. 99/ISBN 3-88314-317-0/1983
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members

Nr. 100/ISBN 3-88314-298-0/1984
G. Klamrowski, P. Neustupny
Untersuchungen zur Prüfung von Beton auf Frostwiderstand

Nr. 101/ISBN 3-88314-327-8/1984
P. Reimers, J. Goebels, H. Heidt, P. Weise, K. Wilding
Röntgen- und Gammastrahlen Computer-Tomographie

Nr. 102/ISBN 3-88314-335-9/1984
G. Magiera
Weiterentwicklung des hydraulischen Kompensationsverfahrens zur Druckspannungsmessung in Beton

Nr. 103/ISBN 3-88314-328-6/1984
D. Schnitger
Radiographie mit Elektronen aus Metallverstärkerfolien

Nr. 104/ISBN 3-88314-339-1/1984
M. Gierloff
Beeinflussung von Betoneigenschaften durch Zusatz von Kunststoffdispersionen

Nr. 105/ISBN 3-88314-345-6/1984
B. Schulz-Förberg
Beitrag zum Bremsverhalten energieumwandelnder Aufsetzpuffer in Aufzugsanlagen

Nr. 106/ISBN 3-88314-360-X/1984
J. Lehnert
Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last

Nr. 107/ISBN 3-88314-361-8/1984
W. Stichel, J. Ehreke
Korrosion von Stahlradiatoren

Nr. 108/ISBN 3-88314-363-4/1984
L. Auersch
Durch Bodenerschütterungen angeregte Gebäude-schwingungen - Ergebnisse von Modellrechnungen

Nr. 109/ISBN 3-88314-381-2/1985
M. Omar
Zur Wirkung der Schrumpfbehinderung auf den Schweißspannungszustand und das Sprödbruchverhalten von unterpulvergeschweißten Blechen aus St E 460 N

Nr. 110/ISBN 3-88314-382-0/1985
H. Walde, B. Kropp
Wasserstoff als Energieträger

Nr. 111/ISBN 3-88314-383-9/1985
K. Ziegler
Über den Einfluß der Initiierung auf die detonative Umsetzung von Analex-Sprengstoffen unter Berücksichtigung sicherheitstechnischer Gesichtspunkte

Nr. 112/ISBN 3-88314-409-6/1985
W. Lützwow
Zeitstandverhalten und strukturelle Veränderungen von vielfach wiederverarbeiteten Polyethylenen

Nr. 113/ISBN 3-88314-410-X/1985
R. Helms, H. Henke, G. Oelrich, T. Saito
Untersuchungen zum Frequenzeinfluß auf die Schwingungskorrosion von Offshore-Konstruktionen

- Nr. 114/ISBN 3-88314-419-3/1985
P. Rose, P. Raabe, W. Daum, A. Szameit
Neue Verfahren für die Prüfung von Reaktorkomponenten mittels Röntgen- und Gammastrahlen
- Nr. 115/ISBN 3-88314-420-7/1985
K. Richter
Farbempfindungsmerkmal Elementarblau und Buntheit abstände als Funktion von Farbart und Leuchtdichte von in- und Umfeld
- Nr. 116/ISBN 3-88314-460-6/1985
F.-J. Kasper, R. Müller, R. Rudolph, A. Wagner
Theoretische Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten von Fensterkonstruktionen unter besonderer Berücksichtigung der Rahmenproblematik
- Nr. 117/ISBN 3-88314-468-1/1985
H. Czichos, G. Sievers
**Materials Technologies and Techno-Economic Development
A Study for the German Foundation for International Development (Deutsche Stiftung für Internationale Entwicklung)**
- Nr. 118/ISBN 3-88314-469-X/1985
H. Treumann, H. Andre, E. Blossfeld, N. Pfeil, M.-M. Zindler
Brand- und Explosionsgefahren explosionsgefährlicher Stoffe bei Herstellung und Lagerung. Modellversuche mit pyrotechnischen Sätzen und Gegenständen
- Nr. 119/ISBN 3-88314-472-X/1985
J. Herter, K. Brandes, E. Limberger
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Versuche an Stahlbetonplatten, Teil I
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
Tests on Reinforced Concrete Slabs, Part I**
- Nr. 120/ISBN 3-88314-514-9/1986
A. Hecht
Zerstörungsfreie Korngrößenbestimmung an austenitischen Feinblechen mit Hilfe der Ultraschallrückstreuung
- Nr. 121/ISBN 3-88314-530-0/1986
P. Feinle, K.-H. Habig
Versagenskriterien von Stahlgleitpaarungen unter Mischreibungsbedingungen: Einflüsse von Stahlsammensetzung und Wärmebehandlung
- Nr. 122/ISBN 3-88314-521-1/1986
J. Mischke
**Entsorgung kerntechnischer Anlagen
Sonderkolloquium der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) am 10. 12. 1985 mit Beiträgen von B. Schulz-Förberg, K.E. Wieser und B. Droste**
- Nr. 123/ISBN 3-88314-531-9/1986
D. Rennoch
Physikalisch-chemische Analyse sowie toxische Beurteilung der beim thermischen Zerfall organisch-chemischer Baustoffe entstehenden Brandgase
- Nr. 124/ISBN 3-88314-538-6/1986
H.-M. Thomas
Zur Anwendung des Impuls-Wirbelstromverfahrens in der zerstörungsfreien Materialprüfung
- Nr. 125/ISBN 3-88314-540-8/1986 (vergriffen)
B. Droste, U. Probst
Untersuchungen zur Wirksamkeit der Brandschutzisolation von Flüssiggas-Lagertanks
- Nr. 126/ISBN 3-88314-547-5/1986
W. Stichel
Korrosion und Korrosionsschutz von Metallen in Schwimmhallen
- Nr. 127/ISBN 3-88314-564-5/1986 (vergriffen)
E. Limberger, K. Brandes, J. Herter, K. Berner
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
Versuche an Stahlbetonbalken, Teil I
Tests on Reinforced Concrete Beams, Part I**
- Nr. 128/ISBN 3-88314-568-8/1986 (vergriffen)
E. Limberger, K. Brandes, J. Herter, K. Berner
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
Versuche an Stahlbetonbalken, Teil II
Tests on Reinforced Concrete Beams, Part II**
- Nr. 129/ISBN 3-88314-569-6/1980 (vergriffen)
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter, K. Berner
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load**
- Zugversuche an Betonstahl mit erhöhter Dehngeschwindigkeit
Reinforcing Steel Tension Tests with high strain rates**
- Nr. 130/ISBN 3-88314-570-X/1986
W. Struck
Einfache Abschätzung der Durchbiegung und der Energieaufnahme von Trägern aus duktilem Material bei Belastung durch eine Einzelkraft
- Nr. 131/ISBN 3-88314-585-8/1986
E. Limberger, K. Brandes, J. Herter
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load
Versuche an Stahlbetonplatten, Teil II
Tests on Reinforced Concrete Slabs, Part II**
- Nr. 132/ISBN 3-88314-595-5/1987
Chr. Herold, F.-U. Vogdt
Ermittlung der Ursachen von Schäden an bituminösen Dachabdichtungen unter besonderer Berücksichtigung klimatischer Beanspruchungen
- Nr. 133/ISBN 3-88314-609-9/1987 (vergriffen)
M. Woydt, K.-H. Habig
Technisch-physikalische Grundlagen zum tribologischen Verhalten keramischer Werkstoffe
- Nr. 134/ISBN 3-88314-615-3/1987
G. Andreae, G. Niessen
Über den Kernstrahlungseinfluß auf Dehnungsmeßstreifen
- Nr. 135/ISBN 3-88314-618-8/1987
J. Ludwig, W.-D. Mischke, A. Ulrich
Untersuchungen über das Verhalten von Tankcontainern für unter Druck verflüssigte Gase bei Fallbeanspruchungen
- Nr. 136/ISBN 3-88314-636-6/1987
H.-J. Deppe, K. Schmidt
Untersuchung zur Beurteilung von Brettschichtverleimungen für den Holzbau
- Nr. 137/ISBN 3-88314-637-4/1987
D. Aurich
Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer Versagenskonzepte auf der Grundlage von Forschungsergebnissen auf dem Gebiete der Komponentensicherheit
- Nr. 138/ISBN 3-88314-635-8/1987
M. Dogunke, F. Buchhardt
Zur geowissenschaftlichen Einordnung des Gebietes der Bundesrepublik Deutschland und einer sicheren Auslegung technischer Systeme gegen den Lastfall Erdbeben.
- Nr. 139/ISBN 3-88314-658-7/1987
J. Olschewski, S.-P. Scholz
Numerische Untersuchung zum Verhalten des Hochtemperaturwerkstoffes Nimonic PE 16 unter monotoner und zyklischer Belastung bei Verwendung verschiedener plastischer und viskoplastischer Materialmodelle
- Nr. 140/ISBN 3-88314-643-9/1987
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members**
- Nr. 141/ISBN 3-88314-694-3/1987
F. Buchhardt, W. Matthees, G. Magiera, F. Mathiak
Zum Einfluß des Sicherheits- und Auslegungserdbebens auf die Bemessung von Kernkraftwerken
- Nr. 142/ISBN 3-88314-695-1/1987
H. Treumann, G. Krüger, N. Pfeil, S. von Zahn-Ullmann
Sicherheitstechnische Kenndaten und Gefahrzahlen binärer Mischungen aus oxidierenden und verbrennlichen Substanzen
- Nr. 143/ISBN 3-88314-701-X/1987
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonbauteilen bei Stoßbelastung
Experimental and numerical investigations concerning Load Bearing Behaviour of Reinforced Concrete Members under Impact Load**
- Nr. 144/ISBN 3-88314-702-8/1987
F. Buchhardt, G. Magiera, W. Matthees, M. Weber, J. Altes
Nichtlineare dynamische Berechnungen zum Penetrationsverhalten des AVR-Reaktorgebäudes
- Nr. 145/ISBN 3-88314-711-7/1987
U. Holzjöhner
Untersuchung selbstähnlicher Systeme zur Bestimmung von Materialeigenschaften von Reibungsböden
- Nr. 146/ISBN 3-88314-714-1/1987
W. Schön, M. Mallon
Untersuchungen zur Wirksamkeit von Wasserberieselungseinrichtungen als Brandschutzmaßnahme für Flüssiggas-Lagertanks
- Nr. 147/ISBN 3-88314-720-6/1987
H.-D. Kleinschrodt
Lösung dynamischer Biege- und Torsionsprobleme von Stabsystemen aus dünnwandigen elastischen Stäben mit offenem Querschnitt mittels frequenzabhängiger Ansatzfunktionen
- Nr. 148/ISBN 3-88314-774-5/1988
W. Müller
Theoretische Untersuchung von Variationsprinzipien für elastoplastisches Materialverhalten sowie Entwicklung und numerische Erprobung von Finite-Element-Verfahren für den ebenen Spannungszustand
- Nr. 149/ISBN 3-88314-775-3/1988
U. Holzjöhner
Bestimmung baugrunderdynamischer Kenngrößen aus der Untersuchung von Bodenproben
- Nr. 150/ISBN 3-88314-776-1/1988
M. Weber
VG3D Zeichenprogramm für Vektorgraphische Darstellung dreidimensionaler Strukturen
- Nr. 151/ISBN 3-88314-785-0/1988
L. Auersch-Saworski
Wechselwirkung starrer und flexibler Strukturen mit dem Baugrund insbesondere bei Anregung durch Bodenerschütterungen
- Nr. 152/ISBN 3-88314-796-6/1988
G. Plauk, G. Kretschmann, R.-G. Rohrmann
Untersuchung des baulichen Zustandes und der Tragfähigkeit vorgespannter Riegel von Verkehrszeichenbrücken der Berliner Stadtautobahn
- Nr. 153/ISBN 3-88314-797-4/1988
H. Sander, W.-W. Maennig
Magnetisches Verhalten von Eisenproben bei mechanischer Wechselbeanspruchung
- Nr. 154/ISBN 3-88314-822-9/1988
K. Breikreutz, R. Uttech, K. Haedecke
Druckgesinterte Stähle als zertifiziertes Referenzmaterial für die Spektrometrie
- Nr. 155/ISBN 3-88314-825-3/1988
L. Auersch
Zur Entstehung und Ausbreitung von Schienenverkehrrschütterungen: Theoretische Untersuchungen und Messung am Hochgeschwindigkeitszug Intercity Experimental
- Nr. 156/ISBN 3-88314-887-3/1989
G. Klamrowski, P. Neustupny, H.-J. Deppe, K. Schmidt, J. Hundt
Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von Faserzementen
- Nr. 157/ISBN 3-88314-888-1/1989
E. Limberger, K. Brandes
Versuche zum Verhalten von Stahlbetonbalken mit Übergreifungsstößen der Zugbewehrung unter stoßartiger Belastung
- Nr. 158/ISBN 3-88314-889-X/1989
R. Wäsche, K.-H. Habig
Physikalisch-chemische Grundlagen der Feststoffschmierung - Literaturübersicht -
- Nr. 159/ISBN 3-88314-890-3/1989
R. Müller, R. Rudolph
Berechnung des Wärmedurchlaßwiderstandes und der Temperaturverteilung im Querschnitt von Hauschornsteinen nach DIN 18160 Teil 6
- Nr. 160/ISBN 3-88314-917-9/1989
W. Matthees
Entwicklung eines Makroelementes durch Kondensation am Beispiel der Lastfälle Flugzeugabsturz und Erdbeben bei Boden-Bauwerk-Wechselwirkung mit biegeweichen Fundamenten
- Nr. 161/ISBN 3-88314-920-9/1989
G. Mellmann, M. Maultzsch
Untersuchung zur Ermittlung der Biegefestigkeit von Flachglas für bauliche Anlagen
- Nr. 162/ISBN 3-88314-921-7/1989
W. Brünner
Untersuchungen zur Tragfähigkeit großer Glasscheiben
- Nr. 163/ISBN 3-88314-922-5/1989
W. Brünner, G. Mellmann, W. Struck
Biegefestigkeit und Tragfähigkeit von Scheiben aus Flachglas für bauliche Anlagen
- Nr. 164/ISBN 3-88314-934-9/1989
R. Helms, B. Jaenicke, H. Wolter, C.-P. Bork
Zur Schwingfestigkeit großer geschweißter Stahlträger

Nr. 165/ISBN 3-88314-935-7/1989
P. Gobel, L. Meckel, W. Schiller
**Untersuchung zur Erarbeitung von Kennwerten bei
Einrichtungsmaterialien (Holzwerkstoffen, Möbeln
und Textilien) hinsichtlich der Formaldehyd-
Emission.**
Teil B: Textilien

Nr. 166/ISBN 3-88314-936-5/1989
K. Breikreutz
Modelle für Stereologische Analysen

Nr. 167/ISBN 3-88314-937-3/1989
A. Mitakidis, W. Rücker
**Erschütterungsausbrütung im elastischen Halbraum
bei transienten Belastungsvorgängen**

Nr. 168/ISBN 3-88314-958-6/1990
F.-J. Kasper, R. Müller, R. Rudolphi
**Numerische Untersuchung geometriebedingter Wär-
mebrücken (Winkel und Ecken) unter Einsatz hoch-
auflösender Farbgraphik bei Berücksichtigung der
Tauwasserproblematik und des Mindestluftwechsels**

Nr. 169/ISBN 3-88314-959-4/1990
Chr. Kohl, W. Rücker
**Integration der Untergrunddynamik in das Programm-
system MEDYNA, dargestellt am Beispiel des Intercity
Experimental (ICE)**

Nr. 170/ISBN 3-88314-960-8/1990
P. Studt, W. Kerner, Tin Win
**Untersuchung der mikrobiologischen Schädigung
wassergemischter Kühlschmierstoffe mit dem Ziel
der Verbesserung der Arbeitshygiene, der Minderung
der Geruchsbelastung und der Menge zu entsorgen-
der Emulsionen**

Nr. 171/ISBN 3-88314-997-7/1990
F. Buchhardt
**Ein Operator zur Koppelung beliebig benachbarter dy-
namischer Systeme am Beispiel der Boden-Bauwerk-
Wechselwirkung**

Nr. 172/ISBN 3-88314-998-5/1990
J. Vielhaber, G. Plauk
Grenztragfähigkeit großer Verbundprofilstützen

Nr. 173/ISBN 3-88314-999-3/1990
B. Droste, J. Ludwig, B. Schulz-Forberg
**Höherwertige Transporttechnik und ihre Konsequen-
zen für die Beförderung gefährlicher Güter**

Nr. 174/ISBN 3-88429-021-8/1990
D. Aurich
**Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer
Versagenskonzepte**

Nr. 175/ISBN 3-88429-022-6/1990
W. Brocks, D. Klingbeil, J. Olschewski
**Lösung der HRR-Feld-Gleichungen der elastisch-pla-
stischen Bruchmechanik**

Nr. 176/ISBN 3-88429-035-6/1990
W. Matthees, G. Magiera
**Iterative Dekonvolution der seismischen Basiser-
regung für den Zeitraum**

Nr. 177/ISBN 3-89429-090-0/1991
G. Schickert, M. Krause, H. Wiggenhauser
**Studie zur Anwendung zerstörungsfreier Prüfver-
fahren bei Ingenieurbauwerken**

Nr. 178/ISBN 3-89429-429-9/1991
G. Andrae, J. Knapp, G. Niessen
**Entwicklung und Untersuchung eines kapazitiven
Hochtemperatur-Dehnungsaufnehmers für Einsatz-
temperaturen bis ca. 1000 °C**

Nr. 179/ISBN 3-89429-100-1/1991
H. Eifler
**Die Drehfähigkeit plastischer Gelenke in Stahlbeton-
Plattenbalken, bewehrt mit naturhartem Betonstahl
BSt 500 S im Bereich negativer Biegemomente**

Nr. 180/ISBN 3-89429-101-X/1991
E. Klement, G. Wieser
**Zur numerischen Übertragbarkeit von Prüfungser-
gebnissen an Hausschornsteinen auf Schornsteine
mit anderen lichten Querschnitten**

Nr. 181/ISBN 3-89429-105-2/1991
H. Czichos, R. Helms, J. Lexow
**Industrial and Materials Technologies: Research and
Development Trends and Needs**

Nr. 182/ISBN 3-89429-145-1/1992
M. Weber
**Bestimmung von Wärmeübergangskoeffizienten im
Bereich geometriebedingter Wärmebrücken**

Nr. 183/ISBN 3-89429-163-x/1992
F. Buchhardt
Zur Dekonvolution im Zeitbereich

Nr. 184/ISBN 3-89429-164-8/1992
M. Maultzsch, W. Stichel, E.-J. Vater
Feldversuche zur Einwirkung von Aufbaumitteln auf

**Verkehrsbauwerke (im Rahmen des Großversuchs
„Umweltfreundlicheres Streusalz“)**

Nr. 185/ISBN 3-89429-165-6/1992
Renate Müller
**Ein numerisches Verfahren zur simultanen Bestim-
mung thermischer Stoffeigenschaften oder Größen
aus Versuchen**
– Anwendung auf das Heißdraht-Parallelverfahren
und auf Versuche an Hausschornsteinen

Nr. 186/ISBN 3-89429-211-3/1992
B. Löffelbein, M. Woydt, K.-H. Habig
**Reibungs- und Verschleißuntersuchungen an Glei-
tpaarungen aus ingenieurkeramischen Werkstoffen in
wässrigen Lösungen**

Nr. 187/ISBN 3-89429-216-4/1992
Th. Schneider, E. Santner
**Mikrotribologie: Stand der Forschung und Anwen-
dungsmöglichkeiten. Literaturübersicht**

Nr. 188/ISBN 3-84929-243-1/1992
K. Mallwitz
**Verfahren zur Vorausermittlung der Setzung von Fun-
damenten aufgeständerten Strecken infolge zykli-
scher Beanspruchung**

Nr. 189/ISBN 3-84929-244-X/1992
W. Matthees, G. Magiera
**Impedanzelgenschaften von Finiten Elemente Model-
len bei Integration im Zeitraum**

Nr. 190/ISBN 3-84929-245-8/1992
G. Zachariev
**Untersuchung des Versagens thermoplastischer
Kunststoffe im Kurzzeit-Zugversuch und Retarda-
tions-Zugversuch**

Nr. 191/ISBN 3-84929-246-6/1992
H. M. Bock, S. Erbay, J. With
**Kritische Stahltemperatur als charakteristischer
Kennwert für die Feuerwiderstandsdauer von Bau-
werksystemen aus Stahl**

Nr. 192/ISBN 3-89429-329-2/1993
D. Aurich
**Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer
Versagenskonzepte**

Nr. 193/ISBN 3-89429-291-1/1993
W. Gerisch, Th. Fritz, S. Steinborn
Statistical Consulting in the Frame of VAMAS

Nr. 194/ISBN 3-89429-330-6/1993
U. Krause
**Ein Beitrag zur mathematischen Modellierung des
Ablaufs von Explosionen**

Nr. 195/ISBN 3-89429-331-4/1993
U. Schmidtchen, G. Würsig
**Lagerung und Seetransport großer Mengen flüssigen
Wasserstoffs am Beispiel des „Euro-Québec Hydro-
Hydrogen Pilot Project“**