

SFK

**STÖRFALL-
KOMMISSION**

beim
Bundesminister für
Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

Bericht

**Anwendung der Wasserstoff-Technologie –
Eine Bestandsaufnahme**

des Arbeitskreises
Wasserstofftechnologie

SFK-GS-37

Bericht

Anwendung der Wasserstoff-Technologie – Eine Bestandsaufnahme

des Arbeitskreises Wasserstofftechnologie der SFK

SFK-GS-37

verabschiedet auf der 40. Sitzung der SFK am 22. Mai 2002

Die Störfall-Kommission (SFK) ist eine nach § 51a Bundes-Immissionsschutzgesetz beim Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit gebildete Kommission.

Ihre Geschäftsstelle ist bei der GFI Umwelt – Gesellschaft für Infrastruktur und Umwelt mbH eingerichtet.

Anmerkung:

Dieses Werk wurde mit großer Sorgfalt erstellt. Dennoch übernehmen der Verfasser und der Auftraggeber keine Haftung für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler. Aus etwaigen Folgen können daher keine Ansprüche gegenüber dem Verfasser und/oder dem Auftraggeber gemacht werden.

Dieses Werk darf für nicht-kommerzielle Zwecke vervielfältigt werden. Der Auftraggeber und der Verfasser übernehmen keine Haftung für Schäden im Zusammenhang mit der Vervielfältigung oder mit Reproduktionsexemplaren.

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	3
2	RECHTSGRUNDLAGEN	5
3	WASSERSTOFF - EIGENSCHAFTEN	8
3.1	Physikalische und chemische Eigenschaften von Wasserstoff.....	8
3.2	Verbrennungseigenschaften, Sicherheit und Emissionen	9
4	WASSERSTOFF - HERSTELLUNG	14
4.1	Zentrale Herstellung von Wasserstoff.....	14
4.1.1	Verflüssigungsanlagen	15
4.2	Dezentrale Herstellung von Wasserstoff.....	16
4.2.1	Dampfreformierung von Erdgas	16
4.2.2	Elektrolyseure	16
4.3	Sonstige Verfahren zur Wasserstofferzeugung.....	16
4.4	Sicherheitstechnische Bewertung.....	17
4.5	Ökologische und ökonomische Aspekte	18
5	WASSERSTOFF - SPEICHERUNG UND LAGERUNG	21
5.1	Druckspeicherung und Flüssigspeicherung von Wasserstoff im Vergleich	21
5.2	Aktueller Stand der Lagerungs- und Speichertechnik für Wasserstoff	23
5.3	Sicherheitstechnische Bewertung der Wasserstofflagerung	26

6	WASSERSTOFF - VERTEILUNG	27
6.1	Beförderung in ortsbeweglichen Umschließungen (Druckgefäßen und Tanks)...	27
6.1.1	Beförderung von tiefkalt verflüssigtem Wasserstoff	27
6.1.2	Beförderung von verdichtetem Wasserstoff	28
6.2	Rohrleitungstransport von Wasserstoff.....	28
6.3	Sicherheitstechnische Bewertung der Wasserstoffverteilung	29
6.3.1	Status der Regelwerke	29
6.3.2	Einfluss der Verteilungsstruktur auf die Sicherheitstechnik	30
7	WASSERSTOFF - LAGERUNG VOR NUTZUNG UND NUTZUNGSFORMEN	31
7.1	Anforderungen an Sicherheit, Qualität und Zuverlässigkeit von Brennstoffzellenanlagen	31
7.2	Stationäre Brennstoffzellenanlagen	32
7.2.1	Anforderungen des Regelwerks	32
7.2.2	Brennstoffzellen zur dezentralen Erzeugung von elektrischem Strom in Haushalten und kleineren Gebäudekomplexen unter Nutzung der anfallenden Wärme (bis 20 kW)	33
7.2.3	Hochtemperatur-Brennstoffzellen als Elemente/Module von kleinen Kraftwerken mit Kraft-Wärme-Kopplung (über 100 kW)	34
7.2.4	Technische Anforderungen, Aufstellungs- und Betriebsbedingungen	34
7.3	Nutzung zum Fahrzeug-Antrieb.....	36
7.3.1	Sicherheitstechnische Aspekte	36
7.3.2	Hochdruck-Wasserstoff	37
7.3.3	Flüssigwasserstoff	38
8	WASSERSTOFF - OPTIONEN UND AUSBLICK	39

Anhang:

- Glossar, Abkürzungsverzeichnis, verwendete Symbole und Einheiten
- Mitgliederverzeichnis

Geleitwort

„Was werden wir später einmal statt Kohle verbrennen?“, fragte der Seemann. „Wasser“, antwortete Smith. „Wasserstoff und Sauerstoff werden für sich oder zusammen zu einer unerschöpflichen Quelle von Wärme und Licht werden, von einer Intensität, die die Kohle überhaupt nicht haben könnte; das Wasser ist die Kohle der Zukunft.“

Jules VERNE: *Die geheimnisvolle Insel*, 1874

Im Jahre 2002 legt die Störfall-Kommission (SFK) – auch gerade in Reminiszenz dieser bereits 128 Jahre währenden prophetischen Gedanken Jules Vernes – einen aktualisierten Bericht zu *Nutzung und Optionen von Wasserstoff* vor. Dabei geht es vor allem um den Umriss einer Wasserstofftechnologie, eingebaut in den Kontext einer weltweiten Sicherheitskultur, die zweierlei leistet:

- Zum einen die Integration der Wasserstoff-Verwendung in herkömmliche technische und ökonomische Nutzungs- und Verteilungsstrukturen,
- zum anderen die besondere Möglichkeit, nicht nur, aber in Verbindung mit einer Wasserstofferzeugung aus den unterschiedlichsten Formen regenerativer Energien das Treibhausproblem klimaverträglich zu lösen.

Mithin werden durch eine generelle Nutzung von Wasserstoff als Energieträger ersichtlich keine zusätzlichen individuellen und industriellen Risiken implementiert, zumal fossile Energiequellen substituiert werden. Außerdem wird der Aspekt der Klimaverträglichkeit in den nächsten Jahrzehnten ohnehin zum wichtigsten Argument bei allen Technologieentscheidungen werden.

Dass heute die ökonomischen Voraussetzungen der großtechnischen Erzeugung von Solar-Wasserstoff im Vergleich mit anderen Energieformen noch prohibitiv anmuten, darf den ökonomischen Aspekt nicht derart aufwerten, dass Wasserstoff nur als ein additiver Energieträger anerkannt wird und insoweit Koexistenz zu den anderen eine Nebenrolle spielen soll.

Vielmehr sollten schon jetzt alle industriestaatlichen und technologischen Anstrengungen unternommen werden, damit die Erzeugung von umweltschonendem Wasserstoff kostengünstiger wird, bevor der Treibhauseffekt so manifest wird, dass alle ökonomisch und technologisch verfügbaren Mittel allein für die Umkehr der bis dahin eingetretenen Klimaänderungen eingesetzt werden müssen.

1 Einleitung

Die STÖRFALL-KOMMISSION (SFK) hat auf ihrer 10. Sitzung am 8. Februar 1994 u. a. über immissionsschutzrechtliche Anforderungen an Anlagen zur Lagerung von Wasserstoff beraten und für die Bearbeitung dieses Themas den Arbeitskreis Wasserstoff-Technologie (AK-WT) eingesetzt.

Konkretisiert wurde die Aufgabe des Arbeitskreises auf der 12. Sitzung am 26. September 1994: "Der Auftrag besteht in der Erstellung des Kriterienrahmens zur Entwicklung einer umfassenden Sicherheitsstrategie für die Wasserstoff-Großtechnologie industrieller und nichtindustrieller Art. Hierbei wird von herkömmlicher industrieller Wasserstofftechnologie und Forschung ausgehend die Sammlung und Bewertung von Informationen sicherheitstechnischer Art (Bau und Betrieb) zur Definition künftiger Regelungsbedürfnisse erforderlich".

Die SFK hat auf ihrer 27. Sitzung am 17./18. Juni 1998 den Bericht des AK-WT zur „Bewertung der Regelungsbedürftigkeit im Bereich Wasserstoff-Technologie“ (SFK-GS-15) verabschiedet. Weiterhin hat die SFK den AK-WT gebeten, die Arbeiten an dem o.g. Grundauftrag fortzuführen und, insbesondere im Hinblick auf die Sicherheitskultur beim Umgang mit Wasserstoff, dabei die einzelnen Phasen von der Herstellung bis zum Verbrauch des Wasserstoffs zu betrachten.

Der AK-WT hat von Mai 1999 bis April 2002 den vorliegenden Bericht „Anwendung der Wasserstoff-Technologie – Eine Bestandsaufnahme“ erstellt. Er versteht diesen Bericht als "living document", das periodisch aktualisiert werden sollte.

In diesem Bericht werden die Eigenschaften von Wasserstoff und die sicherheitstechnischen Folgerungen für seine Nutzung während der gesamten Handlungskette von der Herstellung bis zur Umsetzung zu Wasser dargestellt.

Als Primärenergiequellen zur Erzeugung von Wasserstoff kommen praktisch alle Energiequellen in Betracht, sowohl die regenerativen Energiequellen Sonne, Wind, Biomasse und Wasserkraft als auch die fossilen kohlenstoffhaltigen Energiequellen wie Kohle, Erdöl und Erdgas. Seine physikalischen und chemischen Eigenschaften machen ihn zu einem vielseitig einsetzbaren Energieträger, der schon heute sicher hergestellt, gespeichert und transportiert werden kann. Bei seiner Verbrennung in Heiz- und Kraftwerksanlagen entsteht, ebenso wie bei seiner direkten Umsetzung in elektrischen Strom in Brennstoffzellen, als Reaktionsprodukt im Wesentlichen Wasser.

Die Verwendung von Wasserstoff trägt - wenn er zukünftig aus regenerativen Energien erzeugt wird - wesentlich zur Vermeidung klimaschädlicher Emissionen von Kohlendioxid und anderer Verbrennungsprodukte fossiler Energiequellen bei.

Da die zunehmende Mobilität der Weltbevölkerung wegen des Antriebs der Verkehrsmittel mit Verbrennungsmotoren, die mit fossilen Brennstoffen (gasförmigen und flüssigen Kohlenwasserstoffen) betrieben werden, derzeit noch mit einer Zunahme des Ausstoßes von Kohlendioxid erkauft werden muss, wird eine wesentliche Anwendung des Wasserstoffs der Antrieb von Fahrzeugen – unter Einsatz von Brennstoffzellen, die den für Elektromotoren benötigten elektrischem Strom erzeugen, oder von für Wasserstoff optimierten Verbrennungsmotoren – sein.

Der breiten Nutzung von Wasserstoff als Energieträger stehen heute noch eine Reihe von wirtschaftlichen und technologischen Hürden im Weg. Die meisten Technologien, die Wasserstoff als Energieträger nutzen, befinden sich zur Zeit in der Entwicklungsphase und haben die Schwelle zur kommerziellen Nutzung noch nicht erreicht. Auf der anderen Seite wird Wasserstoff im industriellen Bereich schon seit langer Zeit in großem Umfang eingesetzt.

Damit die von der Öffentlichkeit geforderten, umweltverträglichen Wasserstofftechnologien tatsächlich die Schwelle der Wirtschaftlichkeit erreichen und auch von vornherein die notwendige globale Verbreitung erfahren können, ist neben einer intensiven technischen Weiterentwicklung auch die Spiegelung dieser Entwicklungen in den entsprechenden nationalen und internationalen sicherheitstechnischen Regelwerken erforderlich. Eine rechtzeitige Standardisierung der neuen Nutzungstechniken ist eine Voraussetzung für einen sicheren Umgang mit Wasserstoff und seine Akzeptanz durch die Öffentlichkeit.

2 Rechtsgrundlagen

Die Wasserstofftechnologie ist kein neues Fachgebiet im Industriegeschehen, sondern wird bereits seit Jahrzehnten angewendet und weiterentwickelt. Daher findet sich im nationalen Regelwerk eine Vielzahl von Gesetzen, Vorschriften und Normen, die bei der Anwendung – d.h. Erzeugung und Lagerung, Transport und Verbrauch - von Wasserstoff zu beachten sind.

Bei der Anwendung von Wasserstoff werden im wesentlichen die folgenden Rechtsbereiche berührt:

- Anlagensicherheit
- Arbeitsschutz
- Verbraucherschutz
- Baurecht
- Verkehrsrecht
- Umweltrecht
- Versicherungsrecht
- Energiewirtschaftsrecht

Die Störfall-Kommission (SFK) hat hierzu auf ihrer 27. Sitzung am 17. und 18. Juni 1998 den Bericht des Arbeitskreises Wasserstoff-Technologie (AK-WT): „Bewertung der Regelungsbedürftigkeit im Bereich der Wasserstoff-Technologie“ verabschiedet.¹ Folgende Normierungen wurden darin bewertet:

- Technische Regeln Druckbehälter, Druckgasbehälter und Rohrleitungen
- AD-Merkblätter
- Verordnung über Gashochdruckleitungen und Technische Regeln für Gashochdruckleitungen
- Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) mit der 4. Verordnung zur Durchführung des BImSchG (4. BImSchV)

¹ STÖRFALLKOMMISSION, AK-WT: Bewertung der Regelungsbedürftigkeit im Bereich der Wasserstofftechnologie, Bericht SFK-GS-15, 1998

- 12. Verordnung zur Durchführung des BImSchG (Störfall-Verordnung - StörfallV) sowie 1. bis 3. Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Störfall-Verordnung
- Gefahrstoff-Verordnung (GefStoffV)
- Unfallverhütungsvorschriften
- VdTÜV-Richtlinien
- Merkblätter der Berufsgenossenschaften (BG)
- Explosionsschutzrichtlinie – jetzt: Explosionsschutz-Regeln – der BG
- Verordnung über elektrische Anlagen in explosionsgefährdeten Räumen (ElexV)
- VDE-Vorschriften
- Sonstige Richtlinien (VDI) und Normen (DIN), beispielsweise zu Verfahrenstechniken im Zusammenhang mit der Errichtung elektrischer Anlagen
- weitergehende Vorschriften der EU und der Normung bei CEN und ISO.

Erste Aktivitäten zur internationalen Normung von Wasserstofftechnologien laufen im Rahmen der ISO und IEC (*ISO/TC 197 Hydrogen Technologies*, *IEC/TC 105 Fuel Cell Technologies*). Eine europäische Initiative zur Erarbeitung von Grundlagen für die Zulassung von Kraftfahrzeugen mit Wasserstoff-Antrieb stellt das von der Europäischen Union geförderte *European Integrated Hydrogen Project (EIHP)* dar.

Für die Beförderung von Wasserstoff, einem Stoff der Gefahrklasse 2 – Gase – gelten die entsprechenden Vorschriften für die Beförderung gefährlicher Güter:

- Richtlinie 94/55/EG des Rates vom 21. November 1994 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten für den Gefahrguttransport auf der Straße an den technischen Fortschritt (ADR-Rahmenrichtlinie)
- Gesetz zu dem Europäischen Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR) vom 18. August 1969
- Anlagen A und B zum Europäischen Übereinkommen vom 30.09.1957 über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR)
- Verordnung über die innerstaatliche und grenzüberschreitende Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße und mit Eisenbahnen (Gefahrgut-Verordnung Straße und Eisenbahn - GGVSE) vom 11. Dezember 2001

- Richtlinie 96/49/EG des Rates vom 23. Juli 1996 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten für die Eisenbahnbeförderung gefährlicher Güter an den technischen Fortschritt (RID-Rahmenrichtlinie)
- Verordnung für die internationale Eisenbahnbeförderung gefährlicher Güter (RID-Regeln) - Anlage I zu Anhang B des Übereinkommens über den internationalen Eisenbahnverkehr vom 09.05.1980 (COTIF- Übereinkommen)
- Verordnung über die Beförderung gefährlicher Güter auf Binnengewässern (Gefahrgut-Verordnung Binnenschifffahrt – GGVBinSch) vom 21. Dezember 1994
- Verordnung zur Inkraftsetzung der Verordnung über die Beförderung gefährlicher Güter auf dem Rhein und der Verordnung über die Beförderung gefährlicher Güter auf der Mosel (ADNR-Verordnung) vom 21. Dezember 1994
- Verordnung über die Beförderung gefährlicher Güter mit Seeschiffen vom 4. März 1998 (Gefahrgutverordnung See – GGVSee)
- International Maritime Dangerous Goods Code (IMDG-Code) – Amdt. 30-00
- ICAO Technical Instructions for the Safe Transport of Dangerous Goods by Air, 2001-2002 Edition
- IATA - Dangerous Goods Regulations, 43th Edition 2002

Auf Grund seiner Analyse kam der AK-WT ² zur Schlussfolgerung, dass

„in der Beurteilung und Bewertung der geltenden technischen Regeln mit Stand 1996 nicht alle verfügbaren Regeln in die Auflistung einbezogen (wurden). Es wurde jedoch nachgewiesen, dass die Regeln selbst und ihre Entstehungsmechanismen eine befriedigende Weiterentwicklung sicherstellen und dem Stand der Technik entsprechen. Der AK-WT kam zu dem Ergebnis, dass somit nicht die Notwendigkeit besteht, ein gesondertes Regelwerk für die Wasserstofftechnik zu schaffen.

Durch die Verweise auf die internationalen technischen Regeln und die sich abzeichnende Umschichtung der nationalen Kompetenz in den internationalen Bereich, besonders bei den materiellen Anforderungen, kommt dem Anspruch, aus unserer Sicht eine umfassende Sicherheitsstrategie zu entwickeln, eine besondere Bedeutung zu.“

² wie vor

3 Wasserstoff - Eigenschaften

3.1 Physikalische und chemische Eigenschaften von Wasserstoff

Wasserstoff ist ein äußerst leichtes Gas, das unter Normalbedingungen eine Dichte von 0,084 g/l aufweist und somit um den Faktor 14,4 leichter ist als Luft. Ferner ist es farb- und geruchlos, wodurch eine Detektion nur mittels Messgeräten möglich wird. Die Detektionsgrenzen liegen bei 100 ppb(v) bei der Gaschromatographie; ab Konzentrationen > 1 Vol. % der unteren Explosionsgrenze kann Wasserstoff mit tragbaren Geräten nachgewiesen werden.³ Gasförmiger Wasserstoff ist physiologisch unbedenklich, abgesehen von der Tatsache, dass er die Atmung nicht unterstützt, also erstickend wirkt.

Das Wasserstoffmolekül (H₂) ist das kleinste Molekül aller Elemente. Damit ergibt sich eine - im Vergleich zu anderen technisch relevanten Gasen - hohe Diffusionsfähigkeit. Diese führt zum einen dazu, dass gasförmiger Wasserstoff auch Festkörper durchdringen kann. Gleichwohl sind die Diffusionsraten vernachlässigbar gering und führen somit kaum zu sicherheitsrelevanten Gefahrensituationen. Zum anderen vermischt sich freiwerdender Wasserstoff schnell mit Luft, wodurch sich in geschlossenen Räumen schnell mit dem in der Luft enthaltenen Sauerstoff ein explosionsfähiges Gemisch einstellt (vgl. Kapitel 3.2). In einer nach oben offenen Umgebung begünstigt die starke Auftriebswirkung von Wasserstoff eine schnelle Verflüchtigung und greift so meist einer Ausbildung von explosionsfähigen Gemischen vor. Des Weiteren weist Wasserstoff nur eine geringe Viskosität verglichen zu anderen gasförmigen Energieträgern auf; dies wiederum wirkt sich u.a. auf die Strömungseigenschaften von Wasserstoff aus (z. B. größeres Durchflussvolumen bei gleichem Querschnitt).

Zu Lagerungs- und Transportzwecken wird gasförmiger Wasserstoff entweder komprimiert oder verflüssigt. Bei Lagerung von Wasserstoff in metallischen Behältern tritt das Phänomen der Wasserstoffversprödung auf, wobei atomarer Wasserstoff (H) durch Dekohäsion den Zusammenhalt des Metallgitters von ferritischen Stählen schwächt und die Spannungsrisskorrosion (Wasserstoffversprödung) beschleunigt; austenitische Stähle hingegen – stabilisiert u.a. mit Niob oder Titan – werden nur vernachlässigbar angegriffen.⁴

³ Safety Standard for Hydrogen and Hydrogen Systems, NASA Guidelines for Hydrogen System Design, Materials Selection, Operations, Storage, and Transportation, NSS 1740.16, 1996.

⁴ Deshalb spielen die Gegebenheiten der Wasserchemie und ihre Überprüfung in Hochtemperatur-Dampfkreisläufen eine bedeutende Rolle, bspw. in Kernkraftwerken.

Wird komprimierter gasförmiger Wasserstoff bei einer Temperatur von über -63°C auf Umgebungsdruck entspannt, kommt es zu einer Erwärmung des Gases (negativer Joule-Thomson-Koeffizient). Diese liegt aber beispielsweise lediglich bei $+6^{\circ}\text{C}$, wenn auf 200 bar komprimierter Wasserstoff auf Umgebungsdruck entspannt wird.⁵

Die Verflüssigung von Wasserstoff unter Normaldruck erfolgt bei -253°C , der Tripelpunkt, in dem gleichzeitig die drei Phasen (fest, flüssig, gasförmig) nebeneinander im Gleichgewicht auftreten, liegt bei -260°C . Die Dichte von Flüssigwasserstoff am Siedepunkt liegt bei $70,8 \text{ kg/m}^3$ und ist somit bei gleichem Volumen um den Faktor 6 geringer als die von verflüssigtem Methan sowie um den Faktor 10 geringer als die von Benzin. Verdampft flüssiger Wasserstoff in der Luft (z. B. durch eine Leckage), so kondensiert der in der Luft enthaltene Wasserdampf und bildet eine weiße Gemischwolke, die in grober Näherung mit der Ausdehnung des entstandenen Wasserstoff/Luft-Gemisches übereinstimmt.

Tabelle 1: Physikalisch-chemische Eigenschaften von Wasserstoff und anderen Gasen unter Umgebungsbedingungen⁶

Eigenschaft (Normzustand)	Einheit	Helium He	Wasserstoff H ₂	Stickstoff N ₂	Methan CH ₄
Dichte	kg/m ³	0,178	0,084	1,250	0,718
Viskosität	10 ⁻⁶ Pa s	19,7	8,81	17,7	10,9
Diffusionskoeffizient in Luft	10 ⁻⁵ m ² /s	6,37	6,84	1,97	1,9
Spezif. Heizwert	MJ/kg	0	120,0	0	50,0

3.2 Verbrennungseigenschaften, Sicherheit und Emissionen

Aufgrund seiner geringen Dichte weist Flüssigwasserstoff die höchste massenbezogene Energiedichte auf (Vergleichswerte: 1 kg Wasserstoff enthält die gleiche Energiemenge wie 2,1 kg Erdgas oder 2,8 kg Benzin), die volumenbezogene Energiedichte hingegen beträgt nur 1/3 derjenigen von Erdgas. Wasserstoff bildet mit Luft bei Atmosphärendruck explosionsfähige Gemische mit Volumenanteilen zwischen 4 und 75 Vol. %. Aufgrund der hohen Diffusionsfähigkeit kann freigesetzter Wasserstoff daher schnell ein explosionsfähiges Gemisch bilden.

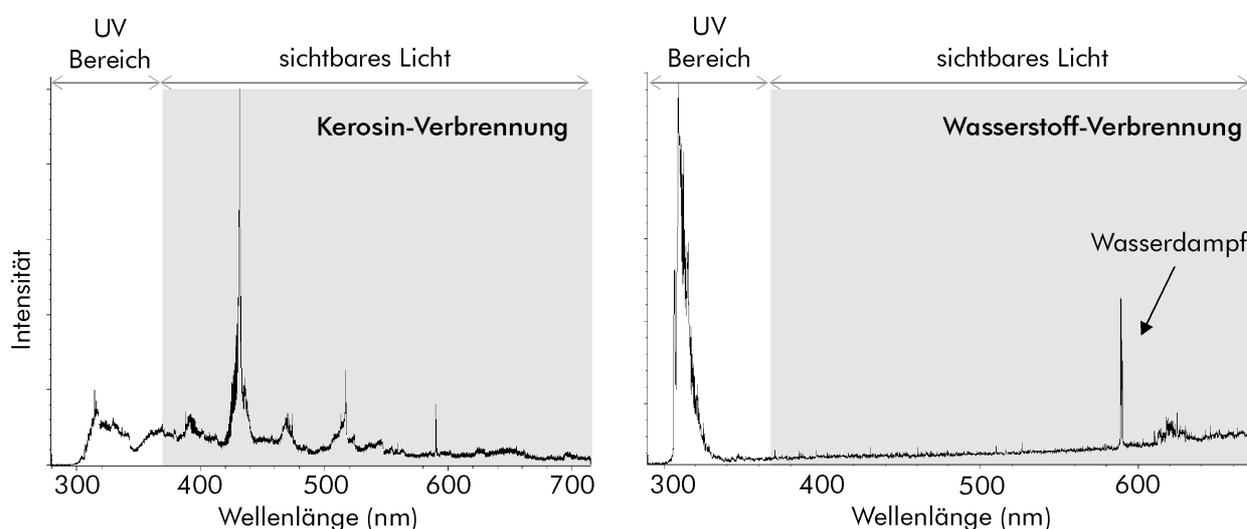
Demgegenüber ist der Explosionsbereich von Propan oder auch Methan deutlich kleiner.

⁵ *Basic Considerations for the safety of hydrogen systems*; ISO-Norm 197/SC IWG7 (Entwurf), 2000.

⁶ STÖRFALLKOMMISSION, AK-WT: *Bewertung der Regelungsbedürftigkeit im Bereich der Wasserstofftechnologie*, Bericht SFK-GS-15, 1998; DEUTSCHER WASSERSTOFF-VERBAND (DWV): *Wissen und Unwissen über Wasserstoff*, <http://www.dwv-info.de/wissen.htm>.

Die höchste Verbrennungstemperatur von Wasserstoff in Luft für ein stöchiometrisches Gemisch liegt für Umgebungsbedingungen bei 2050°C und ist somit mit Methan und Propan vergleichbar. Besonders zu beachten ist, dass die Wasserstoffflamme fast ausschließlich im UV-Bereich strahlt; damit ist sie bei Tageslicht nahezu unsichtbar. Zum anderen kann aufgrund des geringen Infrarotanteils keine Wärmentswicklung um die Flamme herum wahrgenommen werden.^{7, 8} Im Unterschied dazu entwickelt jeder kohlenstoff- und schwefelhaltige Brennstoff eine starke Hitzeabstrahlung infolge der Infrarotstrahlung der Reaktionspartner sowie der Festkörperstrahlung von Rußpartikeln. Abbildung 1 zeigt die Strahlungsbanden von Wasserstoff und Kerosin.

Abbildung 1: Emissionsstrahlungsbanden von Wasserstoff und Kerosin



Die Zündtemperatur für Wasserstoff in Luft liegt bei 560°C, gleicht insoweit der von Methan bzw. Erdgas, liegt aber höher als die anderer gebräuchlicher Brenngase und vieler flüssiger Kohlenwasserstoffe.

Wesentliche Unterschiede zu den etablierten Brennstoffen liegen außerdem in der geringen Mindest-Zündenergie und in einer höheren laminaren Brenngeschwindigkeit.

⁷ Dies erfordert beim Umgang mit Wasserstoffflammen besondere Aufmerksamkeit (Arbeitsschutz, Störfallbeherrschung).

⁸ So hat bspw. der Absturz des Zeppelins „Hindenburg“ in Lakehurst/New Jersey im Jahr 1937 zwar 35 Tote unter den 36 Passagieren und 61 Crewmitgliedern gefordert, gleichwohl kaum welche durch Brandverletzungen aus der Wärmestrahlung, sondern durch Absturz aus bis zu 60 m Höhe. Der Hauptteil des Wasserstoffs von 18 t (= ca. 200.000 m³) verbrannte innerhalb einer Minute; vgl. <http://www.tondernet.dk/zeppelin/D/german/aktuell/boetius/bortius.html>: BOETIUS: *Bericht des letzten noch lebenden Offiziers der Hindenburg*, Vortrag, Tondern/DK, 26.5.2001 dsgl. BAIN & SCHMIDTCHEN (Deutscher Wasserstoffverband e.V. – DWV, Berlin): *Ein Mythos verglüht – Warum und wie die Hindenburg verbrannte*; DWV-Info Nr. 4 vom 18.1.2000; <http://dvw-info.de/pm/hindbg/hbd.htm>.

Die Mindest-Zündenergie für stöchiometrische Wasserstoff/Luft-Gemische liegt um den Faktor 10 niedriger als bei Methan oder Benzin. Im Bereich der unteren Explosionsgrenze jedoch ist die Zündenergie, wie bei den anderen Brennstoff/Luft-Gemischen, höher und damit vergleichbar mit der anderer Brenngase; im Übrigen reicht die von den meisten Zündquellen erzeugte Energie zur Zündung nahezu aller relevanten Brenngas/Luft-Gemische aus.

Die Brenngeschwindigkeit einer in laminarer Strömung brennenden Wasserstoffflamme beträgt für ein stöchiometrisches Gemisch 2,4 m/s (Maximalwert: 3,6 m/s bei 40 Vol. % Wasserstoffanteil).⁹ Sie liegt somit bis zu einer Größenordnung über der Brenngeschwindigkeit von Kohlenwasserstoffen ($\approx 0,5$ m/s).¹⁰ In technischen Anwendungen liegt jedoch meist ein turbulentes Strömungsfeld (z. T. auch von der Flamme selbst induziert) vor, wodurch die Brenngeschwindigkeiten aller Brennstoff/Luft-Gemische durch den Turbulenzeintrag wesentlich höher liegen. Für Deflagrationen¹¹ (d.h. von Wärme- und Stofftransport zwischen verbranntem und unverbranntem Gas dominierten Verbrennungsprozessen) gilt als maximale Ausbreitungsgeschwindigkeit in einem vorgemischtem Brennstoff/Luft-Gemisch die isobare Schallgeschwindigkeit¹² des verbrannten Abgases: Wasserstoff: 975 m/s, Methan: 890 m/s für stöchiometrische Gemische in Luft.

Erreicht eine Flamme diese Ausbreitungsgeschwindigkeit, ist ein Übergang von der Deflagration in die Detonation, d.h. die durch einen der Flamme voranlaufenden Verdichtungsstoß erfolgende Zündung, möglich. Definierte Detonationsgrenzen existieren nur für begrenzte Geometrien und hängen von der Detonationszellweite ab, die gemisch- und konzentrationsabhängig ist. Diese beträgt für ein stöchiometrisches Wasserstoff-Luft-Gemisch bei Umgebungsbedingungen 15 mm (zum Vergleich Methan: 300 mm).¹³

⁹ KOROLL, KUMAR & BOWLES: *Burning velocities of hydrogen-air mixtures*; Combustion & Flame, 94:330-340, 1993

¹⁰ KUO: *Principles of Combustion*; Wiley & Sons, New York, 1986

¹¹ EDER: Brennverhalten schallnaher und überschall-schneller Wasserstoff-Luft Flammen; Dissertation Technische Universität München, 2001.

¹² EDER, GERLACH & MAYINGER: Bestimmung von Online-Kriterien für die Vorhersage des Übergangs von der Deflagration in die Detonation in H₂/H₂O/Luft Gemischen; Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben BMWi 150 1040, Technische Universität München, 2000

¹³ KANESHIGE & SHEPHERD: Detonation Database; Technical Report FM97-8, Graduate Aeronautical Laboratories, California Institute of Technology, 1997. Elektronisches Archiv: http://www.galcit.caltech.edu/detn_db/html/.

Detonationen in geschlossenen Behältern wurden bei Umgebungsbedingungen bis zu einer Gemischkonzentration von 11 Vol. % Wasserstoffanteil in Luft beobachtet.¹⁴ Ist das brennbare Gemisch nicht eingeschlossen, so ist eine detonative Verbrennung von Wasserstoff nur durch eine direkte Zündung, eine sehr starke Druckwelle oder einen Übergang aus einem Rohr oder Kanal heraus in ein unbegrenztes Gebiet möglich.

Tabelle 2: Verbrennungseigenschaften von Brennstoffen

Eigenschaften	Einheit	Wasserstoff H ₂	Methanol CH ₃ OH	Methan CH ₄	Propan C ₃ H ₈	Benzin C ₇ H ₁₆
Untere Explosionsgrenze *)	Vol. %	4,0	6,0	4,4	1,7	1,1
Obere Explosionsgrenze *)	Vol. %	77,0	50 (bei 100°C)	17,0	10,8	6,7
Anteil Brennstoff im stöchiometrischen Gemisch *)	Mol.-%	29,5	(12,2)	9,5	4,0	(1,9)
Mindest-Zündenergie *)	mJ	0,017	0,14	0,29	0,24	0,24
Zündtemperatur *) gemäß DIN 51794	°C	560	440	595	470	220
Maximale laminare Flammgeschwindigkeit	cm/s	360 (bei 40 Vol. %)	43	37	47	30
Flammentemperatur	°C	2050	1870	1950	1925	2030
Spezifischer Heizwert	MJ/kg	120	19,95	50	46,2	42 - 44

*) Werte lt. Datenbank CHEMSAFE, DECHEMA e.V.

Tabelle 3: Eigenschaften tiefkalt verflüssigter Gase am Siedepunkt

Eigenschaften	Einheit	Helium He	Wasserstoff H ₂	Stickstoff N ₂	Methan CH ₄
Siedetemperatur	°C	- 269	- 253	- 195,85	- 161,6
Dichte (flüssig)	kg/m ³	125,0	70,8	808,6	422,5
Dichte (gasförmig)	kg/m ³	16,89	1,34	4,53	1,82
Verdampfungsenthalpie	kJ/kg	20,6	454,6	198,6	510,4

Bei der Verbrennung von Wasserstoff in Luft (z. B. in Gasturbinen oder Verbrennungsmotoren) sind Emissionen von Kohlenmonoxid, Kohlendioxid sowie von Kohlenwasserstoffen nicht zu erwarten; sie entstehen in der praktischen Anwendung der Energienutzung ledig-

¹⁴ BREITUNG, CHAN, DOROFEEV, EDER, GELFAND, HEITSCH, KLEIN, MALLIAKOS, SHEPHERD, STUDER & THIBAUT: State-of-the-Art Report on Flame Acceleration and Deflagration-to-Detonation Transition in Nuclear Safety, OECD/NEA Group of Experts Report, 2000

lich durch Einwirkung kohlenstoffhaltiger Substanzen (z. B. Motorenöl) während des Verbrennungsablaufs. Wie bei allen Verbrennungen in Luft, entstehen aber bei Flammentemperaturen über 2000°C Stickoxide aufgrund der Reaktion von Stickstoff mit dem Luftsauerstoff („thermisches NO_x“). Aufgrund des großen Explosionsbereichs von Wasserstoff/Luft-Gemischen können technische Verbrennungsprozesse jedoch effektiv bei Sauerstoffüberschuss durchgeführt werden, um die Verbrennungstemperaturen zu senken. Dadurch wird allerdings die maximal erreichbare Leistung der eingesetzten Verbrennungskraftmaschine gemindert.

Brennstoffzellen sind elektrochemische Energiewandler, d. h. sie emittieren keine herkömmlichen Luftschadstoffe. Es entsteht lediglich Wasserdampf. Je nach Aufbereitungsverfahren zur Erzeugung des Wasserstoffs können weitere Emissionen entstehen. So kommt es z. B. bei der Reformierung von Methanol zu Kohlendioxidemissionen.¹⁵

Die Einführung der Wasserstofftechnologie bringt einen erhöhten Ausstoß an Wasserdampf mit sich. Untersuchungen haben indes gezeigt, dass die Emission von Wasserdampf wesentlich weniger klimarelevant ist als die vergleichbare Emission von Kohlendioxid, da die energiewirtschaftlich bedingten Wasserdampfemissionen im Verhältnis zu den Emissionen aus dem Wasserhaushalt allenfalls 0,005 % betragen.¹⁶

Im Vergleich dazu stören die anthropogenen Kohlendioxidemissionen in einer Größenordnung von derzeit ca. 4 % bereits den atmosphärischen Kohlenstoffkreislauf. Auch die Emission von Wasserdampf aus Kraftfahrzeugen führt lediglich zu einer Erhöhung der Wasserdampfemissionen um den Faktor 2, da das Abgas von bestehenden Verbrennungskraftmaschinen zur Hälfte aus Wasserdampf besteht.

¹⁵ ZITTEL, WURSTER & WEINDORF: *Wasserstoff in der Energiewirtschaft*, Online-Veröffentlichung <http://www.hydrogen.org/Wissen/w-i-energie.html>

¹⁶ ZITTEL & ALTMANN: Der Einfluß von Wasserdampf auf das Klima – Birgt eine Wasserstoffenergiewirtschaft höhere Klimarisiken als die Verbrennung fossiler Energieträger ? In *ENERGIE*, 4/1994. Der natürliche Treibhauseffekt wird ohnehin vom Wasserdampf dominiert, vgl. Enquete-Kommission Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre: Klimaänderung gefährdet globale Entwicklung: Zukunft sichern - Jetzt handeln, Deutscher Bundestag, *Economica* /C.F.Müller Bonn/Karlsruhe 1992, S. 34 ff. Bei den jährlichen Niederschlagsmengen von 525 Tt H₂O würde selbst unter der Annahme, dass der gesamte Weltjahresbedarf an Energie (= 8 Gt SKE) mit Wasserstoff gedeckt und das Verbrennungswasser stets als Dampf emittiert wird (= 18 Gt), nur der Anteil von 0,004 % am gesamten atmosphärischen Wasserdampf erreicht.

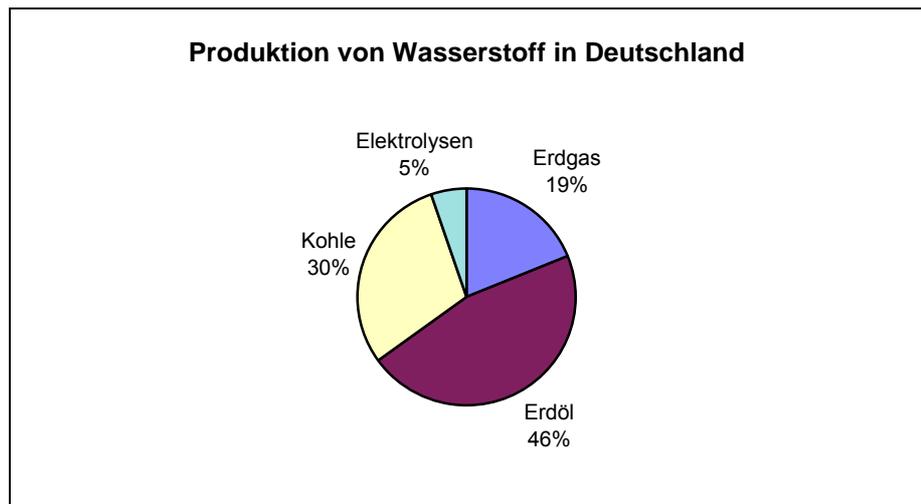
4 Wasserstoff - Herstellung

Die Verwendung von Wasserstoff – hergestellt in erster Linie aus fossilen Rohstoffen – in großtechnischem Maßstab ist etabliert. In Deutschland werden jährlich ca. 20 Mrd. m³ (= 1,68 Mt) Wasserstoff industriell genutzt. Je nach Nutzungsform und Energiequelle erfolgt die Herstellung zentral oder dezentral.

4.1 Zentrale Herstellung von Wasserstoff

Das folgende Diagramm zeigt die Produktion von Wasserstoff, aufgeschlüsselt nach Rohstoffquellen, wobei auch das bei der Koksherstellung anfallende Kokereigas, das ca. 50 - 60% H₂ enthält, mit berücksichtigt ist.

Abbildung 2:



Für die großtechnische Erzeugung von Wasserstoff auf der Basis fossiler Rohstoffe werden hauptsächlich zwei Verfahren eingesetzt:

- Katalytische Reformierungsprozesse mit Erdgas oder Benzin als Ausgangsstoffe.
- Partielle Oxidation (Vergasung) schwerer Kohlenwasserstoffe, z. B. Schweröle.

Bei den o. g. Verfahren fällt der gesamte Kohlenstoff der Rohstoffeinsätze als Kohlendioxid (CO₂) an, welches letztlich an die Umwelt abgegeben wird. Unter Umweltaspekten schneidet hierbei die Dampfreformierung von Methan am günstigsten ab.

Die elektrolytische Wasserstofferzeugung besitzt gegenüber den herkömmlichen Verfahren erhebliche Vorteile bei den Emissionen, wobei jedoch die Herkunft der benötigten elektrischen Energie wesentlich ist. Als Standardverfahren wird seit langem die alkalische Wasserelektrolyse verwendet, die auf der elektrochemischen Zersetzung des Wassers in seine elementaren Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff beruht. Aufgrund des aufwändigen Verfahrens und der damit verbundenen Kostennachteile spielt die Elektrolyse derzeit eine untergeordnete Rolle bei der Wasserstofferzeugung für großtechnische industrielle Prozesse.

4.1.1 Verflüssigungsanlagen

Mit der Verflüssigung wird eine bedeutsame Volumenreduzierung erreicht. Hierzu muss das zuvor entsprechend gereinigte Gas unter Wärmeentzug auf entsprechend niedrige Temperatur, d. h. auf den Siedepunkt von -253 °C , abgekühlt werden. Zur Verflüssigung von Wasserstoff wurde eine Reihe unterschiedlicher Verfahren entwickelt. Grundsätzlich wird der Wasserstoff nach der Reinigung mittels Kompressoren verdichtet, in mehreren Stufen vorgekühlt und schließlich entspannt. Durch die Entspannung wird das Gas aufgrund des Joule-Thomson-Effekts stark abgekühlt und der größte Teil des Wasserstoffs verflüssigt.

Für den großtechnischen Bereich der Wasserstoff-Verflüssigung, der durch die Erfordernisse der Raumfahrtindustrie beeinflusst wurde, haben sich unter Berücksichtigung möglichst niedriger Investitionskosten und hohem thermodynamischem Wirkungsgrad Variationen des zweistufigen Claude-Prozesses erwiesen, bei denen Expansionsturbinen verwendet werden.

Verflüssigungsanlagen kleiner und mittlerer Größenordnung unterscheiden sich durch den verwendeten thermodynamischen Prozess (Linde-, Claude-, magnetische Prozesse), die verwendeten Kühlverfahren und die Arbeitsmedien.

Bei der derzeit eingesetzten Prozess- und Anlagentechnik zur Verflüssigung von Wasserstoff bestehen erhebliche Verbesserungspotentiale, z. B. bei den Wasserstoffkompressoren, Turbinen und Wärmetauschern, so dass eine Erhöhung des Wirkungsgrades und eine Verringerung der Verflüssigungsarbeit möglich ist.

4.2 Dezentrale Herstellung von Wasserstoff

4.2.1 Dampfreformierung von Erdgas

Während die industrielle Herstellung von Wasserstoff mittels Dampfreformierung von Erdgas in Großanlagen als bewährte Technik anzusehen ist, ist der Markt für Reformer kleiner und mittlerer Bauart (Produktionskapazität bis ca. 1000 m³/h) derzeit ein Nischenmarkt. Entsprechend hoch ist das Potential an Optimierungsmaßnahmen zur Effizienzsteigerung, zur Reduzierung von CO₂-Emissionen und nicht zuletzt zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit derartiger Reformer.

Es ist davon auszugehen, dass mittelfristig effiziente Reformer kleiner Bauart im Zusammenhang mit dem Einsatz von Brennstoffzellen, z. B. für den Einsatz in Fahrzeugen, in Haushalten oder in Blockheizkraftwerken entwickelt werden.

4.2.2 Elektrolyseure

Um den Anforderungen hinsichtlich einer effizienten Energienutzung sowie der intermittierenden Betriebsweise, z. B. bei der solaren Energieerzeugung, gerecht zu werden, befinden sich neue Elektrolysetechniken in der Entwicklung. Ziel ist eine Erhöhung der Wirkungsgrade und der Leistungsdichten. Beispiele für Neuentwicklungen sind

- die fortgeschrittene alkalische Elektrolyse
- die Membran-Elektrolyse
- die Hochtemperatur-Wasserdampf-Elektrolyse

Neben den konventionellen Niederdruck-Elektrolyseuren (Betriebsdruck bis 8 bar) wurden in den letzten Jahren fortgeschrittene Hochdruckelektrolyseure mit Betriebsdrücken bis zu 30 bar und einer Wasserstoffproduktion von ca. 100 m³/h entwickelt, die derzeit in Demonstrationsprojekten eingesetzt werden.

Die Membran-Elektrolyse wird bisher in kleineren Einheiten im Technikum-Maßstab angewendet, die Hochtemperatur Elektrolyse befindet sich im Entwicklungsstadium.

4.3 Sonstige Verfahren zur Wasserstoffherzeugung

Vergasung von Biomasse: Die Vergasung von festen Brennstoffen zur industriellen Herstellung von Synthesegasen ist in der Vergangenheit mit einer Vielzahl von Verfahren

durchgeführt worden. In den letzten Jahren wurden verschiedene Vergasungsprozesse zur Herstellung eines wasserstoffreichen Gases unter Nutzung von Biomasse untersucht, darunter die Umwandlung von fester Biomasse durch die Reaktion mit Wasserdampf in einem allothermen Vergasungsreaktor. Die Verfahren befinden sich derzeit noch in der Phase der Erprobung in Pilotanlagen.

Weitere Verfahren zur Produktion von Wasserstoff befinden sich noch im Stadium der Grundlagenforschung bzw. der Entwicklung, so dass eine Beurteilung der technischen Randbedingungen dieser Optionen derzeit kaum möglich ist. Zu den Verfahren zählen

- die **thermochemische** Wasserstofferzeugung (Einsatz solarthermischer Systeme beim Schwefel-Iod-Prozess oder zur Reduktion von Metalloxiden)
- die **photochemische** Umwandlung (Einsatz von Halbleitermaterialien zur Wasserspaltung)
- die **biologische** Wasserstoffproduktion (Biophotolyse, Photoproduktion aus Biomasse, Gärungsprozesse mit Biomasse)
- der **Kvaerner-Prozess** (Zerlegung z. B. von Methan in einem Reaktor unter Verwendung eines Plasmastrahls).

4.4 Sicherheitstechnische Bewertung

Anlagen zur großtechnischen Produktion von Wasserstoff fallen in den Bereich einschlägiger Rechtsvorschriften und Regelwerke wie z. B.

- Bundes-Immissionsschutzgesetz und seine Verordnungen (u. a. Störfall-Verordnung)
- Gerätesicherheitsgesetz und seine Verordnungen (u. a. Explosionsschutzverordnung)
- Druckbehälterverordnung
- Dampfkesselverordnung

Durch das eingeführte Technische Regelwerk und die mitgeltenden Verbandsvorschriften und Normen ist ein ausreichender sicherheitstechnischer Standard für die Errichtung und den Betrieb derartiger Anlagen gegeben.

Dezentrale Erzeugungsanlagen können je nach Leistung, Größe und Betriebsdruck erleichterten Bedingungen des Regelwerks unterliegen und sich somit unter Umständen außerhalb eingeführter Kontroll- und Prüfsysteme durch Überwachungsorganisationen befinden.

Aber derartige Anlagen beinhalten auch ein gewisses Gefährdungspotential, da sich aus verfahrenstechnischen Gründen bei bestimmten Betriebsweisen ein explosionsfähiges Wasserstoff/Sauerstoff-Gemisch (Knallgasgemisch) bilden kann. Schutzziele und Anforderungen an derartige Anlagen sollten daher vor einer breiten Einführung dezentraler Erzeugungstechniken normiert werden.

Begleitend zur Entwicklung neuartiger Erzeugungsverfahren sollten sicherheitstechnische Systemanalysen, z. B. eine Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) oder eine Analyse nach dem in der Chemieindustrie eingeführten PAAG-Verfahren¹⁷, durchgeführt und hieraus Empfehlungen zum sicherheitstechnischen Standard solcher Anlagen abgeleitet werden.

4.5 Ökologische und ökonomische Aspekte

Wie jede Herstellung eines Produkts oder jede Dienstleistung ist auch die Erzeugung und Nutzung von Wasserstoff mit Stoff- und Energieströmen verbunden.

In Tabelle 4 sind wesentliche Kennzahlen, wie Bereitstellungsnutzungsgrad (Verhältnis des Energieinhalts eines Energieträgers am Einsatzort zum kumulierten Energieaufwand für die Bereitstellung), CO₂-Emissionen und spezifische Erzeugungskosten für heute verwendete großtechnische Erzeugungstechniken aufgeführt. Die vorgelagerte Bereitstellung, z. B. von Erdgas, Öl etc., wurde berücksichtigt. Die Angaben wurden der Studie "Techniken und Systeme zur Wasserstoffbereitstellung"¹⁸ entnommen. Als technische Daten der Wasserstoff-Erzeugungsanlagen wurden unterstellt:

- Wasserstoffproduktion 100.000 m³/h
- Ausnutzungsdauer 8.000 h/a (soweit nicht anders angegeben)
- Lebensdauer 20 a

¹⁷ Prognose von Störungen, Auffinden der Ursachen, Abschätzen der Auswirkungen, Gegenmaßnahmen.

¹⁸ wiba – Koordinationsstelle der Wasserstoff-Initiative Bayern, Lehrstuhls für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik der TU München, Dezember 1999

Tabelle 4: Kennzahlen zum Vergleich von Anlagen zur großtechnischen Wasserstofferzeugung ¹⁹

	Dampfreformierung aus Erdgas	Partielle Oxidation von Schweröl	Partielle Oxidation von Steinkohle
Bereitstellungsnutzungsgrad (%)	66	60	51
CO ₂ -Emissionen (g/kWh _{H2})	290	435	614
spezifische Kosten (Pf/kWh _{H2})	4,6	4,4	7,7

Der günstigste fossile Erzeugungspfad ist aus ökologischen Aspekten derzeit die Dampfreformierung von Erdgas.

Wenn Wasserstoff als zukünftiger Energieträger fossile Energien ergänzen und mittelfristig ersetzen soll, so muss die Herstellung mit Hilfe erneuerbarer Energien erfolgen, z. B. aus Wasserkraft, Windkraft, Biomasse, Photovoltaik oder anderweitig aus Solarenergie.

Tabelle 5: Kennzahlen für den gegenwärtig verfügbaren Stand bei Wasserstoff-Erzeugungsanlagen mittlerer Größe ²⁰

	Dampfreformierung aus Erdgas (1000 m ³ /h)	Biomassevergasung (610 m ³ /h)	Hochdruckelektrolyse (485 m ³ /h, Ausnutzungsdauer 2825 h)
Bereitstellungsnutzungsgrad (%)	59	58	73
CO ₂ -Emissionen (g/kWh _{H2})	334	72	6 (aus Anlagenherstellung, ohne Strombezug)
spezifische Kosten (Pf/kWh _{H2})	6,4	14,9	11 (ohne Strombezug)

Bei der Dampfreformierung von Erdgas zeigt sich sowohl bei den Emissionen als auch bei den Kosten der Nachteil kleinerer Anlagen. Es ist aber auf die relativ junge Entwicklung von Komponenten hinzuweisen, so dass ein hohes Optimierungspotential unterstellt werden kann.

¹⁹ wie vor

Die dezentrale Reformierung von Kohlenwasserstoffen oder die Herstellung von Wasserstoff durch Wasserelektrolyse unter Einsatz von regenerativ erzeugtem Strom könnte dazu beitragen, den Aufwand für eine großflächige Wasserstoff-Infrastruktur zu reduzieren und stufenweise bedarfsgerecht aufzubauen. Mit welcher Technik Wasserstoff letztendlich erzeugt und in welcher Form dieser dann transportiert oder gespeichert wird, hängt von der Nutzung sowie den künftigen ökologischen und ökonomischen Rahmenbedingungen ab.

²⁰ wie vor

5 Wasserstoff - Speicherung und Lagerung

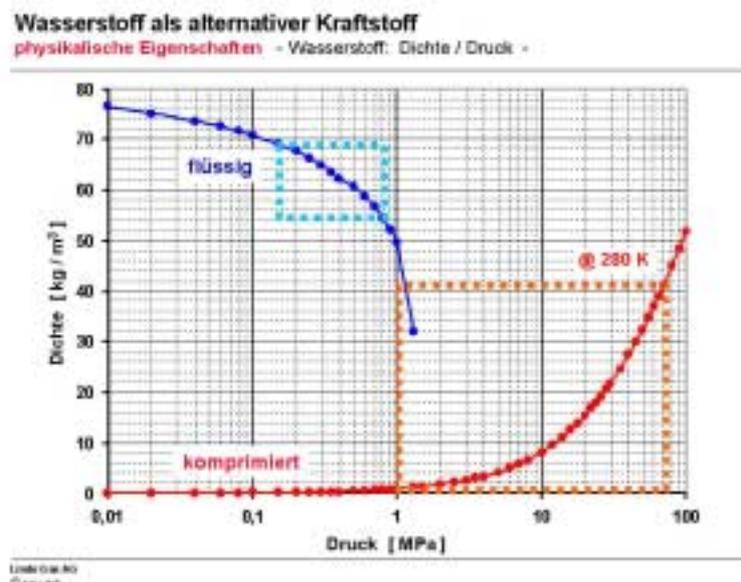
Im industriellen Bereich ist die Verwendung von Wasserstoff als Brennstoff oder Komponente für chemische Prozesse seit Jahrzehnten technisch etabliert. Wie bei allen Gasen werden bei der Speicherung und Lagerung aus Platzgründen Zustände mit hoher Dichte angestrebt, woraus die beiden wichtigsten Formen der konventionellen Speichertechnik resultieren: die Speicherung des tiefkalt verflüssigten Gases (Flüssigspeicherung) und die Speicherung von komprimiertem Gas bei Umgebungstemperatur (Druckspeicherung).

Die Anwendung von Hydridspeichern ist aufgrund des hohen Gewichts der Behälter auf Ausnahmefälle beschränkt. Zur Zeit sind auch andere Speicherprinzipien in der Entwicklung, wie Kryoadsorptions- und Graphitspeicher; jedoch sind hierfür der großtechnische Einsatz und Nutzen noch nicht absehbar.

5.1 Druckspeicherung und Flüssigspeicherung von Wasserstoff im Vergleich

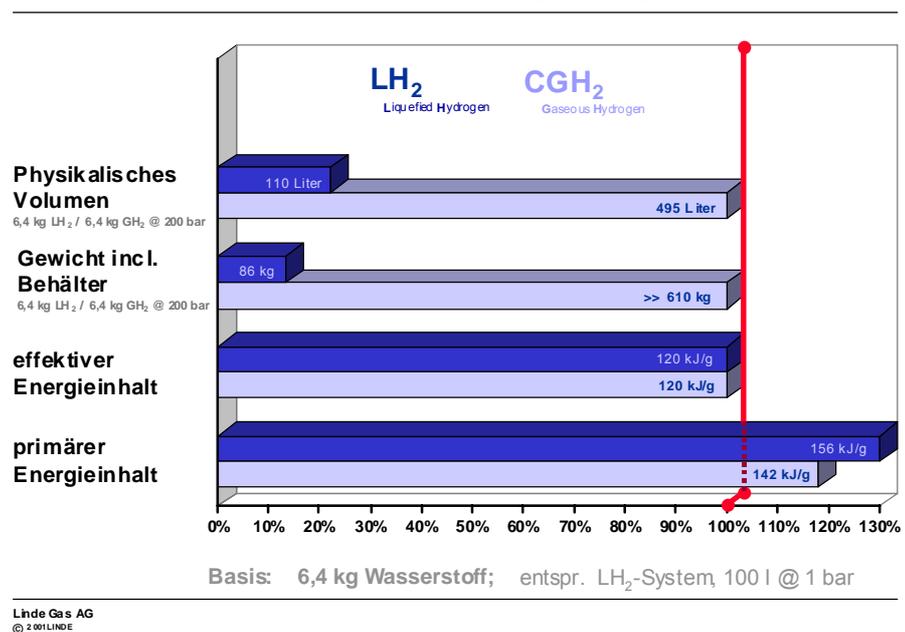
Beim Vergleich von Druck- und Flüssigspeicherung stellt sich die Frage nach dem relativen Aufwand für die Speicherung. Die Flüssigspeicherung erfordert neben dem Energieeinsatz zur Verflüssigung eine aufwändige Isolierung zur Minimierung der Verdampfungsverluste. Die Druckspeicherung bei Umgebungstemperatur bedingt eine druckfeste Auslegung der Behälter. Das nachfolgende Diagramm zeigt Dichte und Druck von flüssigem und gasförmig komprimiertem Wasserstoff. Die heute üblichen Betriebsbereiche sind als gepunktete Rechtecke dargestellt.

Abbildung 3:



Bei Komprimierung von gasförmigem Wasserstoff auf 700 bar wird eine Dichte von knapp über 40 kg/m³ erreicht. Die nutzbare Dichte im flüssigen Zustand beträgt zwischen 55 und 70 kg/m³. Was das in der Praxis bedeutet, geht aus dem nachfolgenden Diagramm "Wasserstoff als alternativer Energieträger" (Abbildung 4) hervor; darin bedeutet: LH₂ (liquified hydrogen = verflüssigter Wasserstoff) und CGH₂ (compressed gaseous hydrogen = verdichteter gasförmiger Wasserstoff).

Abbildung 4 Wasserstoff als alternativer Energieträger
 warum flüssigen Wasserstoff? - Vergleich von LH₂ und CGH₂ -



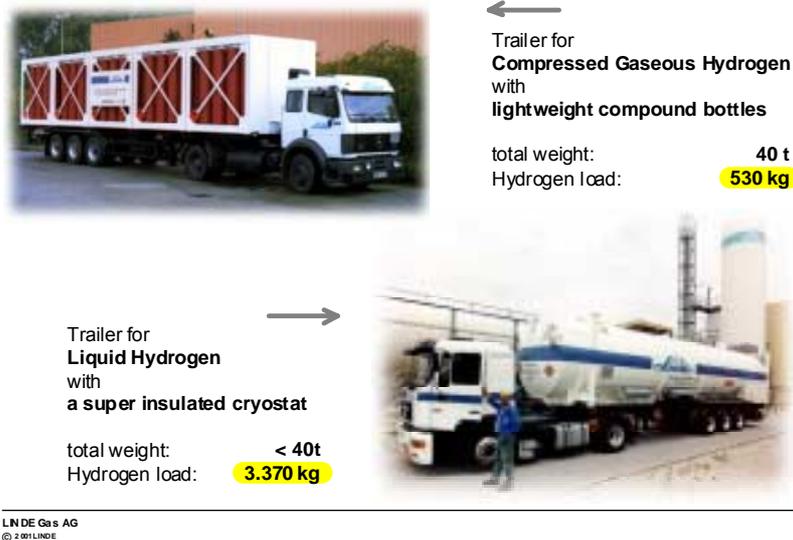
Gegenwärtig muss ca. 30 % des Energieinhaltes für die Verflüssigung aufgewendet werden. Eine Optimierung auf 25 % ist möglich. Für die Komprimierung von gasförmigem Wasserstoff auf 200 bar sind ca. 17 % des Energieinhaltes erforderlich²¹.

Als weiteres Beispiel für die Unterschiede zwischen der Flüssigspeicherung und der Druckspeicherung kann der Vergleich von Wasserstoff-Transportfahrzeugen dienen:

²¹ Der verbleibende „effektive Energieinhalt“ von 6,4 kg Wasserstoff erfordert ein Behältergewicht von 86 kg für Flüssig- und mehr als 610 kg für Drucklagerung/-speicherung (Basis: Gasflaschen, 200 bar). Das Volumen des Wasserstoffs beträgt flüssig 110 Liter und gasförmig 495 Liter.

Abbildung 5: Transportfahrzeuge

Wasserstoff als alternativer Energieträger



Ein 40 Tonnen Straßentankfahrzeug kann etwa 3,5 t Flüssigwasserstoff, aber nur etwa 0,5 t komprimierten Wasserstoff aufnehmen. Um die gleiche Energie beim Verbraucher abzuliefern, müsste das Fahrzeug mit dem komprimierten Wasserstoff theoretisch siebenmal sooft fahren wie das Straßentankfahrzeug mit tiefkalt verflüssigtem Wasserstoff (Stand 2001).

5.2 Aktueller Stand der Lagerungs- und Speichertechnik für Wasserstoff

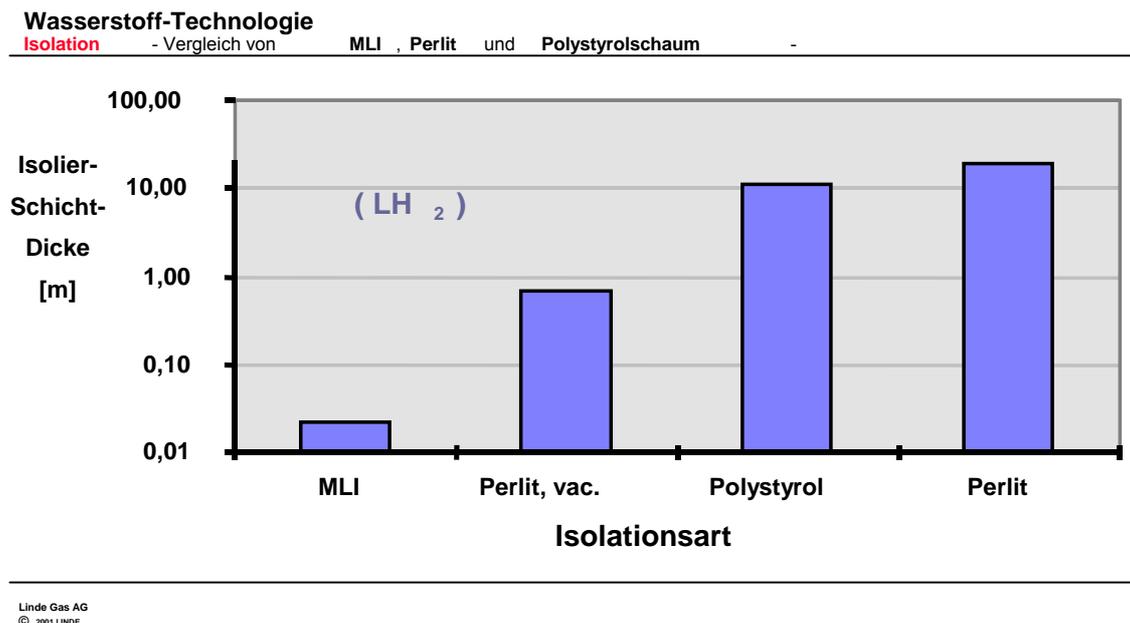
Für die Speicherung und Lagerung unter Druck wurden in der letzten Zeit durch die Konstruktion von Speichern aus hochfesten Werkstoffen Erfolge bei der Anhebung des maximalen Betriebsdrucks – Speicher- bzw. Lagerdrucks – erzielt. Ziel der gegenwärtigen Entwicklung für mobile Druckgasspeicher in Verbundbauweise ist ein Betriebsdruck von 700 bar.

Generell müssen die Behälter für Wasserstoffspeicherung unter Druck für Druckwechselbeanspruchung ausgelegt werden, weil die Produktentnahme mit einer Druckabsenkung verbunden ist.

Die Größen konfektionierter stehender oder liegender Druckbehälter mit 50 bar Druckauslegung für gasförmigen Wasserstoff in der industriellen Anwendung liegen zwischen 50 m³ und 100 m³. Kryo-Tanks für flüssigen Wasserstoff mit zur Zeit üblicher Vakuum/Perlite-Isolierung und einem Auslegungsdruck von 12 bar gibt es beispielsweise für Nutzvolumina von 5 m³ bis 75 m³.

Der Schwerpunkt der Entwicklung für die Speicherung und Lagerung von Wasserstoff in flüssiger Form lag und liegt bei der Minimierung der Verdampfungsverluste und damit bei der Verbesserung der Kälteisolierung. Ein Vergleich verschiedener gängiger Isolier-techniken ist aus dem folgenden Diagramm zu entnehmen:

Abbildung 6: Isolierungstechniken



MLI (=Multi Layer Insulation) wird häufig als „Super – Isolierung“ bezeichnet

Aus dem Diagramm kann entnommen werden, dass zum Erreichen der Isolierwirkung einer 3,5 cm dicken „Super-Isolierung“ mit Hilfe einer Perlit-Isolierung ohne Vakuum diese Isolation über 10 m dick ausgeführt werden müsste.

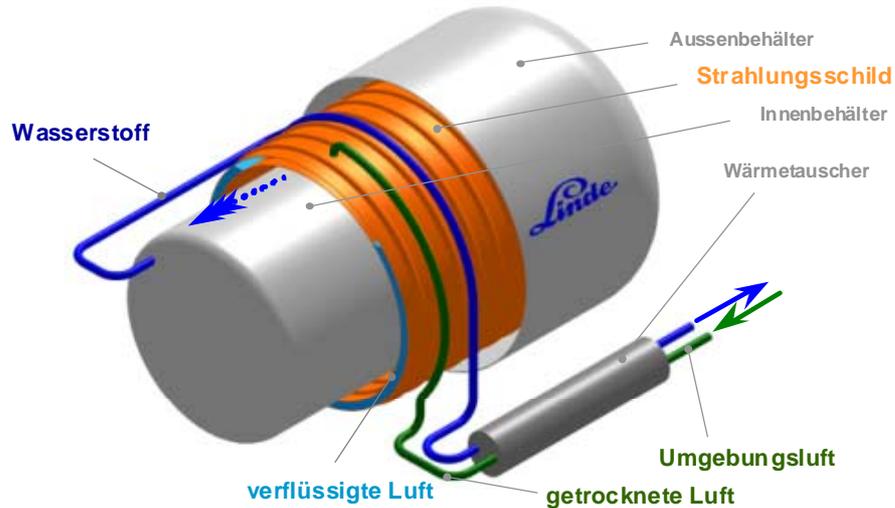
Mit der konventionellen „Super-Isolierung“ nach dem Prinzip des Dewar-Gefäßes (Vakuum mit Wärmestrahlungsreflektions-Schichten) steigt der Dampfdruck bei einem 100 Liter-Behälter in 3 Tagen um etwa 2 bar an. Diese Werte sind Anhaltswerte und abhängig von weiteren Größen wie z. B. Tankgröße, Güte des Isoliervakuums und Art und Ausführung der Rohrdurchführungen.

Eine deutliche Verbesserung dieser Lagerstandzeiten wurde erreicht, indem man die Kälte des Flüssigwasserstoffs bei der Entnahme aus dem Behälter dazu benutzt, Luft, Stickstoff oder ein anderes geeignetes Trägermedium für Kälte auf einem niedrigen Temperaturniveau zu verflüssigen und zwischen die Schichten der Superisolierung zu leiten. In Betriebsphasen ohne Wasserstoffentnahme verdampft dieser „Kälteträger“ und verbessert die Isoliereigenschaft.

Abbildungen 7 und 8: Speicher-Standzeit

Wasserstoff-Technologie

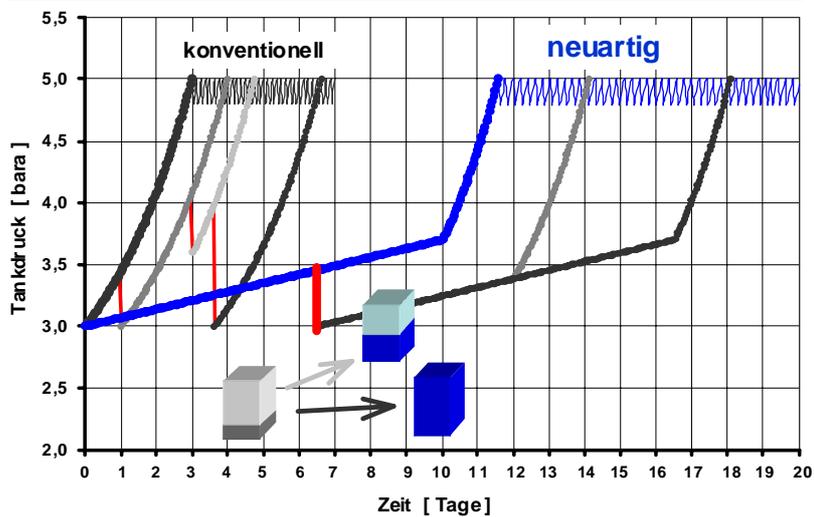
Standzeit - Ausführung der neuartigen Applikation -



Linde Gas AG
© 2011 LINDE

Wasserstoff-Technologie

Standzeit - neuartiges LH₂ Tank system, Entnahmezuklen -



Linde Gas AG
© 2011 LINDE

Die damit erzielbare Standzeit hängt von der Betriebsweise des Speichers ab. Durch neuerliche Entnahme von Wasserstoff füllt man den Vorrat an Kältemittel wieder auf und erreicht einen niedrigeren Tankdruck. Diese Technologie ermöglicht eine wesentliche Verlängerung der Standzeiten sowohl für mobile als auch für stationäre Speicherbehälter.

Der gegenwärtige Stand der Entwicklung liegt bei einer Druckanstiegsgeschwindigkeit eines Transporttanks (40-Fuß-Container mit 35.000 Liter Nennkapazität) von 2 bar in 28 Tagen.

5.3 Sicherheitstechnische Bewertung der Wasserstofflagerung

Die Lagerung von Wasserstoff ist über die Vorschriften und Normen für den Anlagenbau (Kapitel 2) hinreichend geregelt. Aus sicherheitstechnischer Sicht erfolgt die Lagerung von tiefgekühlt verflüssigtem Wasserstoff analog zu der von tiefkalt verflüssigtem Helium. Ein besonderes Augenmerk ist allerdings auf die wasserstoffspezifischen Anforderungen an die Werkstoffauswahl zu legen (Vermeidung von Wasserstoffversprödung oder wasserstoffinduzierter Spannungsrisskorrosion, Diffusionsproblematik).

Eine sicherheitstechnische Besonderheit von Tankanlagen für tiefkalt verflüssigten Wasserstoff besteht darin, dass bereits geringe, mit dem Füllstrom in den Tank eingebrachte Verunreinigungen in ungünstigen Fällen gefahrdrohende Zustände verursachen können. Die Gefahr besteht darin, dass die Verunreinigungen im flüssigen Wasserstoff auskristallisieren und sich aufgrund ihrer höheren Dichte in schlecht durchströmten Bereichen akkumulieren können (besonders Sauerstoff-Kristalle). Nach Zufuhr schon von geringen - der kleinen Zündenergie des Wasserstoffs entsprechenden - Energien kann diese Wasserstoff/Sauerstoff-Mischung explodieren. Zur Zündung genügt in Extremfällen das Schließen/Öffnen eines Ventils oder die Reibungsenergie von mitgerissenen Partikeln.

Für die Drucklagerung von Wasserstoff sind die Druckbehältervorschriften anwendbar und für den industriellen Anwendungsbereich ausreichend. Eine Besonderheit für die Fertigung der Drucklagerbehälter ist die Forderung, sogenannte Aufdachungen – das sind gerade oder ungenügend rundgewalzte Endstücke der Behälterwand im Bereich von Längsschweißnähten – unbedingt zu vermeiden. Die sonst auftretenden Spitzenspannungen in Kombination mit der Eigenschaft des Wasserstoffes, in das Werkstoffgefüge einzudringen, können zum Zerknall der Behälter führen.

Durch Beachten der bestehenden Vorschriften beim Behälterbau und bei der Handhabung von Flüssigwasserstoff in geschlossenen Behältern, sowie durch Vermeiden von Verunreinigungen während der Produktion und Lagerung lassen sich die zuvor beschriebenen Gefahren zuverlässig beherrschen.

6 Wasserstoff - Verteilung

Die Beförderung des Wasserstoffs vom Ort der Herstellung bzw. von der Zwischenlagerung in einem stationären Lager zum Verbraucher ist ein notwendiger Schritt bei seiner Verteilung. Die Beförderung kann in ortsbeweglichen Umschließungen oder in Rohrleitungen erfolgen. Dieser Beitrag konzentriert sich zunächst auf die Beförderung im Landverkehr.

6.1 Beförderung in ortsbeweglichen Umschließungen (Druckgefäßen und Tanks)

Die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Beförderungstechnik und die sichere Umschließung sind niedergelegt in den Europäischen Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR) bzw. mit der Eisenbahn (RID), die auch für die Beförderungen im innerstaatlichen Straßen- und Eisenbahnverkehr (GGVSE) gelten (siehe Kapitel 2).

6.1.1 Beförderung von tiefkalt verflüssigtem Wasserstoff

Nach den vorgenannten Vorschriften ist der tiefkalt verflüssigte Wasserstoff als Gefahrgut mit der Stoffbezeichnung "1966 Wasserstoff tiefgekühlt, flüssig" in der Klasse 2, Ziffer 3F (entzündbare tiefgekühlt verflüssigte Gase) eingestuft.

Für den Straßenverkehr sind die Anforderungen an Bau, Ausrüstung, Prüfung, Zulassung, Kennzeichnung und Betrieb für festverbundene Tanks (Tankfahrzeuge), Aufsetztanks, Tankcontainer und Batterie-Fahrzeuge im Kapitel 6.8 des ADR enthalten. Unterhalb der für die vorstehend genannten Behälter festgelegten Mindestvolumina - bei Tankcontainern derzeit 450 Liter, bei Tanks 1000 Liter - erfolgt die Beförderung in als "Kryo-Behälter" bezeichneten Gefäßen (Druckgefäßen), deren Mindestanforderungen im Kapitel 6.2 des ADR festgelegt sind. Für den Eisenbahnverkehr sind sicherheitstechnisch gleichwertige Anforderungen im RID für Kesselwagen, für Tankcontainer und für Gefäße in den entsprechenden Kapiteln aufgeführt.

In den o. g. Kapiteln sind die technischen Anforderungen lediglich mit wenigen Grundanforderungen spezifiziert. Es werden daher von den entsprechenden Normungsgremien bei CEN und ISO detaillierte Europäische Normen (EN) und internationale Normen (ISO) zur Konkretisierung der Anforderungen und Prüfvorschriften für solche Gefäße und Tanks erarbeitet.

6.1.2 *Beförderung von verdichtetem Wasserstoff*

Nach den vorgenannten Vorschriften ist der verdichtete Wasserstoff als Gefahrgut mit der Stoffbezeichnung "1049 Wasserstoff verdichtet" in der Klasse 2, Ziffer 1F (entzündbare verdichtete Gase) eingestuft. In den im vorstehenden Abschnitt genannten Kapiteln von ADR und RID sind auch für verdichteten Wasserstoff die sicherheitstechnischen Grundanforderungen an die Transportbehälter aufgeführt.

Aus dem Bereich Normung sei noch verwiesen auf die ISO CD 15869 (2000-03) "Gaseous hydrogen and hydrogen blends – Land vehicle fuel tanks", in der detaillierte Anforderungen für die Drucktanks für verdichteten Wasserstoff als Energiequelle für Fahrzeuge genormt werden.

Die europäische "Richtlinie 1999/36/EG des Rates vom 29. April 1999 über ortsbewegliche Druckgeräte" bezweckt, "die Sicherheit von ortsbeweglichen Druckgeräten, die für die Straßen- und Eisenbahnbeförderung gefährlicher Güter im Inland zugelassen sind, zu verbessern und den freien Verkehr dieser Geräte in der Gemeinschaft, einschließlich des Inverkehrbringens sowie der wiederholten Inbetriebnahme und Verwendung zu gewährleisten" (Originalzitat Art. 1(1)). Im Sinne der Richtlinie umfasst der Ausdruck "ortsbewegliche Druckgeräte" alle vorgenannten Umschließungen für Wasserstoff und andere Gase.

Trotz des angestrebten Ziels, die Sicherheit zu verbessern, enthält die Richtlinie keinerlei sicherheitstechnische Anforderungen, sondern ausschließlich die Maßgaben zur Umsetzung des EG-Konformitätsbewertungssystems für das Inverkehrbringen der Druckgeräte. Die sich entwickelnden Europäischen Normen über die diversen Druckbehälterarten werden zukünftig verstärkt von den vorgenannten internationalen Vereinbarungen (ADR, RID) in Bezug genommen und bilden dann die technisch weiter konkretisierte Grundlage der ortsbeweglichen Umschließungen.

6.2 Rohrleitungstransport von Wasserstoff

Schon derzeit existieren zur Verbindung von Wasserstoffproduzenten mit industriellen Wasserstoffverbrauchern Gashochdruck-Rohrleitungsnetze. Pipelines für gasförmigen Wasserstoff werden seit Jahrzehnten in den USA, in Europa und in Deutschland von der chemischen Industrie betrieben. In Nordrhein-Westfalen existiert im rheinisch-westfälischen Industriegebiet ein von der Firma Air Liquide betriebenes Wasserstoff-Pipelinennetz mit einer

Länge von 240 km und einem jährlichen Wasserstoffördervolumen von über 250 Mio m³.²² Über die leitungsgebundene Verteilung von Erdgas, die längst Stand der Technik ist, sind beste Voraussetzungen für einen Übergang zu Wasserstoff als Energieträger gegeben.

Die Anforderungen an Sicherheit und Leistungsfähigkeit zukünftiger Wasserstoff-Pipelines sind technisch erfüllbar. Die sicherheitstechnischen Anforderungen sind jedoch – insbesondere vor dem Hintergrund des werkstoffseitigen Wasserstoffeinflusses und wegen der Gewährleistung der Gasdichtheit – vor einer deutlichen Ausweitung des Pipelinenetzes einer vorherigen Bewertung zu unterziehen.

6.3 Sicherheitstechnische Bewertung der Wasserstoffverteilung

6.3.1 Status der Regelwerke

Die Regelwerke auf dem Gebiet der Beförderung von Wasserstoff in ortsbeweglichen Druckbehältern sind seit vielen Jahren komplett eingebettet in das Gefahrgut-Regelwerk und sehr weit entwickelt. Auch der entsprechende Stand der Umschließungstechnik ist vorhanden, da dieser für Wasserstoff analog zu anderen Gasen vergleichbarer Eigenschaften ist (tiefkalt kann Wasserstoff z. B. mit der gleichen Behältertechnik wie tiefkalt verflüssigtes Helium befördert werden). Für Rohrleitungen kann eine ähnliche Aussage noch nicht gemacht werden. Hier ist das Regelwerk, das nicht wie die vorgenannten internationalen Vorschriften in regelmäßigen Abständen überarbeitet wird, dem Stand der Technik sowie bei einer Ausweitung des Pipelinenetzes den geänderten Gegebenheiten anzupassen.

An die Werkstoffe der Umschließungen für Wasserstoff sind einige spezifische Anforderungen zur Vermeidung wasserstoffindizierter Schädigungen zu stellen.

Wasserstoff kann aufgrund der kleinen Molekülgröße mit hohen Diffusions- bzw. Permeationsgeschwindigkeiten Werkstoffe durchdringen. Bei Kunststoffdichtungen ist dann die durch die Permeation bedingte Wasserstoffleckagerate an Konstruktionen zu beachten bzw. so zu begrenzen, dass kein explosionsfähiges Wasserstoff/Luft-Gemisch entstehen kann. Bei metallischen Werkstoffen können durch die Wasserstoffdiffusion Veränderungen der Werkstoffeigenschaften hervorgerufen werden (z. B. bei Stählen Wasserstoffversprödung oder wasserstoffinduzierte Spannungsrisskorrosion). Daher ist bei allen Wasserstoffumschließungen dem Einsatz geeigneter Werkstoffe, z. B. druckwasserstoffbeständiger Stähle, besondere Beachtung zu schenken.

²² Landesinitiative Zukunftsenergien NRW : Wasserstoff – Nachhaltige Energie – stationär, mobil, Düsseldorf 2001

Die sicherheitstechnische Bewertung hat dabei auch konstruktions-, betriebs- und fertigungsbedingte Einflüsse auf das durch Wasserstoff beeinflusste Werkstoffverhalten zu berücksichtigen.

6.3.2 Einfluss der Verteilungsstruktur auf die Sicherheitstechnik

Derzeit ist die Verteilung von Wasserstoff in ortsbeweglichen Umschließungen aufgrund der Bedarfslage eher beschränkt auf kleinvolumige Behälter (Flaschen bis 150 Liter, Flaschenbündel und Batteriefahrzeuge mit Flaschen oder Großflaschen - sog. "Wasserstoff-Trailer" - bei verdichtetem Wasserstoff).

Mit steigender Wasserstoffnutzung würde hier eine Änderung eintreten, deren Auswirkungen mittels einer risikoorientierten Untersuchung zu bewerten sind. Dominant wäre sicherlich die Beförderung von tiefkaltem Wasserstoff. Die Beförderung von tiefgekühlt flüssigem Wasserstoff vom Ort der Herstellung zum Verbrauchsort müsste in Umschließungen und mit einer Infrastruktur geschehen, die schon verhältnismäßig weit gehend entwickelt worden ist, aber noch optimiert werden und in der Praxis erprobt werden muss.

Die bisherigen Entwicklungen lassen erkennen, dass z. B. aus Gründen einer sehr guten (effektiven) Isolierung die Tanks deutlich größer sein werden²³ als die bisher gebräuchlichen Gefahrguttanks, um die spezifische Oberfläche so gering wie möglich zu halten. Bei einer Leckage oder einem Bruch der Vakuumisolierung ist also mit einer störfallbedingten Freisetzung entsprechend großer Gasmengen zu rechnen.

Aber auch das ständige Verdampfen von Wasserstoff infolge der nicht zu vermeidenden Kälteverluste in den isolierten Tanks ist bei der Beschreibung der sicherheitstechnischen Anforderungen zu berücksichtigen. Ziel der Sicherheitsvorkehrungen muss es also sein, Freisetzungen zu verhindern oder so zu verzögern, dass der austretende Wasserstoff gefahrlos abgeführt werden kann. Die Umschließungen (Tanks) sollten also besser als andere für Unfallbelastungen – mechanische und thermische Belastungen – ausgelegt sein, z. B. durch dickere Wandungen, zähere Werkstoffe bzw. Auslegung für nennenswerte Betriebsdrücke, was bisher bei Kryo-Behältern und Tanks für tiefkalte Gase nicht üblich ist.

²³ Eine gute Referenz für eine Machbarkeitsstudie zur Ausweitung der Transportkapazität von Wasserstoff ist ein vom Germanischen Lloyd, der BAM und der Holinger Umwelttechnik GmbH erstellter Bericht (EQHHPP-Phase III.0-4, "Container Project"), in dem der Wasserstoffabtransport aus Häfen, mit Hilfe von 40-Fuß-Tankcontainern betrachtet wurde. Generell dürfte die nennenswerte Ausweitung der Wasserstofftransportkapazitäten mit der verstärkten Nutzung von multimodalen Tankcontainern verbunden sein, da diese Behälter den "gebrochenen" Verkehr ohne Umfüllvorgang auf Schiff, Schiene und Straße zulassen.

7 Wasserstoff - Lagerung vor Nutzung und Nutzungsformen

Da Wasserstoff an Orten, wo Primärenergie preiswert zur Verfügung steht, erzeugt wird, um nach aufwändigem Transport an anderen Orten, die mit Energie versorgt werden sollen, verwendet zu werden, wird er im wesentlichen als hochwertiger Energieträger zum Betrieb von Brennstoffzellen zur Erzeugung von elektrischem Strom und weniger durch Verbrennen mit Sauerstoff bzw. Luft zur Erzeugung von Wärme eingesetzt; das wird sich voraussichtlich auch zukünftig nicht ändern. Wasserstoff wird sowohl in ortsfesten Anlagen (zur Erzeugung von elektrischem Strom und Wärme) als auch in mobilen Anlagen (zum Antrieb von Fahrzeugen) genutzt. Die Lagerung – Bereitstellung – vor der Nutzung geschieht daher auf unterschiedliche Weise.

7.1 Anforderungen an Sicherheit, Qualität und Zuverlässigkeit von Brennstoffzellenanlagen

Brennstoffzellen sind elektrochemische Energiewandler, die die im Brenngas enthaltene Energie direkt in Strom und Wärme umwandeln. Als Brenngas für Brennstoffzellen wird idealerweise Wasserstoff verwendet, der nach den im Kapitel 3 beschriebenen Verfahren hergestellt werden kann

Heute sind fünf verschiedene Typen von Brennstoffzellen auf dem Markt, die nach ihrer Betriebstemperatur und nach der Art ihres Elektrolyten unterteilt werden können.

Tabelle 6: Typen von Brennstoffzellen

Brennstoffzellen- (BZ-) Typ	Betriebs-temperatur	Elektrolyt
AFC Alkalische BZ	60-90 °C	Kalilauge
PEMFC Polymerelektrolytmembran BZ	60-100 °C	Ionenaustauschermembran
PAFC Phosphorsäure BZ	160-220 °C	Phosphorsäure
MCFC Schmelzcarbonat BZ	ca. 650 °C	Carbonatschmelze
SOFC BZ mit Festelektrolyt	750-1000 °C	Keramischer Ionenleiter

Gemessen an etablierten Energieversorgungstechniken befinden sich Brennstoffzellensysteme noch in der Phase der Entwicklung und Pilotfertigung. Allgemeingültige Lösungen

für den Systemaufbau existieren mit Ausnahme der kommerziell verfügbaren PAFC-Brennstoffzellensysteme derzeit kaum.

7.2 Stationäre Brennstoffzellenanlagen

Für die ortsgebundene Stromerzeugung mit Hilfe von Brennstoffzellen muss der Wasserstoff zum Verwendungsort transportiert werden oder vor Ort, d. h. in Reformern, die den Brennstoffzellen vorgeschaltet sind, aus wasserstoffhaltigen Rohstoffen – Erdgas, Biogas/Klärgas, Flüssiggas oder auch flüssigen Kohlenwasserstoffen – durch Umwandlung bereitgestellt werden.

Es ist davon auszugehen, dass in der Zukunft die Versorgung mit Wasserstoff durch Gasleitungen analog der heutigen Erdgasversorgung geschehen wird. Das bedeutet, dass eine Lagerung vor der Nutzung beim Verbraucher nicht stattfindet, sondern der Verbraucher sich über die Lieferung seiner "Energiequelle" keine Gedanken machen muss und auch keine sicherheitstechnischen Vorkehrungen im Zusammenhang mit der Lagerung treffen muss. Zur Zeit wird in der Regel in diesen Fällen Erdgas benutzt, das fast flächendeckend durch Rohrleitungen in Deutschland verfügbar ist.

Bei der sicherheitstechnischen Bewertung von stationären Brennstoffzellenanlagen sind folgende Systeme und Komponenten zu berücksichtigen:

- periphere Systeme zur Brenngas- und Verbrennungsluftversorgung sowie zur Brenngasaufbereitung, ggfs. Brennstofflagerung
- Brennstoffzellenstapel
- Systeme zur Wärmeauskopplung und Abgas
- Elektrotechnik, Mess-, Steuer- und Regeltechnik

7.2.1 Anforderungen des Regelwerks

Die für die Versorgung einer Brennstoffzelle derzeit diskutierten Energieträger, wie z. B. Erdgas, Biomasse, Biogas und Wasserstoff, werden zur Energieerzeugung und als Rohstoffe für verschiedene industrielle Prozesse seit Jahrzehnten genutzt. Daher finden sich im nationalen und internationalen Regelwerk eine Vielzahl von Gesetzen, Vorschriften und Regelwerken, die bei der Lagerung und der Nutzung derartiger Energieträger aus Sicherheits- und Umweltschutzgesichtspunkten zu beachten sind.

International (ISO, IEC) und national (VdTÜV, DVGW, DIN) sind Bestrebungen im Gange, Standards und Richtlinien für den Aufbau und den Betrieb von Brennstoffzellensystemen zu definieren. Bis zu deren Verabschiedung sind als Grundlagen und Mindestanforderungen für das Komponenten- und Systemdesign sowie für die Qualifizierung von Brennstoffzellensystemen das in der Bundesrepublik Deutschland geltende technische Regelwerk und die technischen Standards zu berücksichtigen, u. a.

- das Gerätesicherheitsgesetz und die damit verbundenen Verordnungen und Technischen Regeln, die den Stand der Technik wiedergeben,
- Normen und Vorschriften wie z. B. vom DIN, DVGW, VDI, VDE, VdTÜV sowie Unfallverhütungsvorschriften

Für Brennstoffzellen-Gasgeräte der Typen SOFC und PEMFC mit einer maximalen Wärmebelastung bis 70 kW legt die vorläufige Prüfgrundlage DVGW VP 119 die grundsätzlichen Anforderungen fest.

7.2.2 Brennstoffzellen zur dezentralen Erzeugung von elektrischem Strom in Haushalten und kleineren Gebäudekomplexen unter Nutzung der anfallenden Wärme (bis 20 kW)

Brennstoffzellen-Heizgeräte bieten sich an zur Versorgung der Haushalte mit Heizwärme, Warmwasser und elektrischem Strom. Denn um die Energieverluste niedrig zu halten, wird die benötigte Energie dort erzeugt, wo sie gebraucht wird; das bedeutet dezentrale Stromerzeugung und gleichzeitige Nutzung der anfallenden Wärme: Kraft-Wärme-Kopplung. Brennstoffzellen lassen sich so betreiben, dass gleichzeitig Strom und Wärme in häuslichen Heizsystemen produziert wird. Erdgas wird in einer dem Brennstoffzellen-Heizgerät vorgeschalteten Einrichtung zu einem wasserstoffreichen Brenngas umgewandelt und in der Brennstoffzelle mit dem Sauerstoff der Luft direkt unter Abgabe von elektrischem Strom zu Wasser umgesetzt. Die bei diesem Prozess freiwerdende Wärme wird unmittelbar dem Heizkreislauf und einem Warmwasserspeicher zugeführt. Da der Strom- und Wärmebedarf in Haushalten nicht gleichmäßig über die Tageszeit bzw. die Jahreszeiten verteilt ist, müssen die Bedarfsspitzen und Lasttäler gegebenenfalls über den wärmegeführten Betrieb von Brennstoffzellen-Heizgeräten ausgeglichen werden. Dazu wird der Wärmebedarf als Führungsgröße benutzt, und die Stromerzeugung dem Wärmeverbrauch nachgeführt; unter Umständen muss zusätzlicher Heizbedarf im Winter durch Zusatzheizgeräte gedeckt werden.

7.2.3 Hochtemperatur-Brennstoffzellen als Elemente/Module von kleinen Kraftwerken mit Kraft-Wärme-Kopplung (über 100 kW)

Hochtemperatur-Brennstoffzellen wie die Schmelz-Carbonat-Brennstoffzellen (MCFC) haben den Vorteil, dass bei der Betriebstemperatur von 650 °C die elektrochemischen Reaktionen in der Brennstoffzelle auch ohne Edelmetallkatalysatoren ablaufen. Ein weiterer Vorteil liegt in der Möglichkeit, Erdgas - aber auch flüssige Kohlenwasserstoffe - durch die anfallende Abwärme der Brennstoffzelle günstig zu Wasserstoff bzw. wasserstoffreichen Gasmischungen umzusetzen. Die dafür nicht genutzte restliche Abwärme kann zur Erzeugung von Dampf verwendet werden, der in das Fernwärmenetz eingespeist werden kann. Es sind mit diesem Typ Nettowirkungsgrade der Stromerzeugung von fast 50 % und unter Berücksichtigung der abgegebenen Fernwärme energetische Gesamtnutzungsgrade von über 70 % erreicht worden. Die Möglichkeiten der Versorgung mit den zur Herstellung von Wasserstoff eingesetzten gasförmigen oder flüssigen Kohlenwasserstoffen wurden eingangs bereits kurz erläutert.

Erdgas kann ohne Zwischenlagerung beim Verbraucher der öffentlichen Gasversorgung entnommen werden. Flüssiggas und flüssige Kohlenwasserstoffe werden in geeigneten Tanks, deren Betrieb den Bestimmungen des Immissionsschutzrechts unterliegt, in der Nähe der Brennstoffzellenanlage gelagert. Die Wasserstoff-Vorprodukte werden mit Tankfahrzeugen, die den Vorschriften über die Beförderung gefährlicher Güter unterliegen, aus Großlagern angeliefert. Abhängig von der Anbindung der kleinen Kraftwerke an die verschiedenen Verkehrsträger kann die Belieferung auf der Straße, der Schiene oder mit Binnenschiffen erfolgen.

7.2.4 Technische Anforderungen, Aufstellungs- und Betriebsbedingungen

Bei den vielfältigen Einsatzmöglichkeiten von Brennstoffzellen, von der Hausenergieversorgung über Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerke zur kombinierten Versorgung größerer Versorgungsgebiete mit Kraft und Wärme bis hin zu größeren Kraftwerken, stellen sich die folgenden grundsätzlichen Fragen:

- Welche umgebungsbedingten, anlagenspezifischen und sonstigen Gefahrenquellen sind für die Anwendung relevant?
- Mit welchen sicherheitstechnischen Maßnahmen können unzulässige Zustände im Brennstoffzellensystem (Reformer, Gasaufbereitung, Stack etc.) erkannt werden? Wie kann eine kritische Ansammlung von Gasen im System vermieden werden?
- Welche Auswirkungen sind im Falle eines Gasaustritts zu erwarten?

Eine Brennstoffzellenanlage ist so auszuführen, dass eine Gefährdung von Bedienungspersonal oder Dritten nicht zu unterstellen ist. Bei einer Störung des Brennstoffzellensystems muss sichergestellt sein, dass die Anlage in einen definierten ungefährlichen Betriebszustand überführt wird. Gefährdungen können sich z. B. ergeben durch

- unzulässigen Druckanstieg in der Anlage,
- unzulässigen Temperaturanstieg in der Anlage,
- Bildung explosiver Gasgemische in der Anlage (innere Explosionsgefahr),
- Bildung explosiver Gasgemische in der Umgebung der Anlage.
(äußere Explosionsgefahr).

Um Fehler, Störungen und mögliche Schadensauswirkungen zu analysieren, stehen geeignete Analyseverfahren zur Verfügung, so dass bereits bei der Entwicklung durch entsprechende Konstruktionen, Werkstoffwahl und übergeordnete Sicherheitssysteme gezielte Maßnahmen zur Gefahrenabwehr und -begrenzung ergriffen werden können.

Eine besondere Bedeutung zur Erkennung und Begrenzung von Systemstörungen kommt bei Brennstoffzellensystemen der Leittechnik und den Mess-, Steuer- und Regeleinrichtungen zu. Als sicherheitsrelevante MSR-Schutzeinrichtungen, die verhindern, dass die Brennstoffzellenanlage in einen gefährlichen Zustand kommen kann, sind u. a. einzustufen:

- die Reaktionsüberwachung, z. B. thermische und druckmäßige Überwachung
- Verbrennungsluftversorgung/Kühlluftversorgung/Kühlsystem
- Heizkreis
- Abgasweg
- Stromüberwachung

Für jede dieser Schutzeinrichtungen ist im Regelfall eine Risiko-Beurteilung durchzuführen, auf deren Grundlage die Qualitätsanforderungen an die Funktion festgelegt werden können. Dieses Vorgehen ist auch auf anderen sicherheitsrelevanten Gebieten der Technik, u. a. in der Heizungstechnik, gebräuchliche Praxis.

Bei der Aufstellung einer Brennstoffzellenanlage in Gebäuden oder in einem Container ist zur Vermeidung von Gasansammlungen das Hauptaugenmerk auf eine ausreichende Belüftung zu richten. Weitere Anforderungen an die Sicherheitstechnik, z. B. an den Brandschutz, an die explosionsgeschützte Ausführung von elektrischen Betriebsmitteln oder an eine Gaskonzentrationsüberwachung, hängen von den jeweiligen baulichen Gegebenheiten und den Betriebsabläufen ab.

Um die Sicherheit und die Qualität einer stationären Brennstoffzellenanlage über deren vorgesehenen Betriebszeitraum zu gewährleisten, kommt der Erstellung von Betriebsanweisungen sowie Inspektions- und Wartungskonzepten eine große Rolle zu.

7.3 Nutzung zum Fahrzeug-Antrieb

Neben dem hohen Wirkungsgrad bei der Energieumwandlung zeichnet die Brennstoffzellen das fast vollständige Fehlen von Emissionen aus; wobei festzustellen ist, dass auch die direkte Verbrennung von Wasserstoff mit Sauerstoff zu Wasser nicht zu umweltschädlichen Emissionen führt, wenn die bei höheren Verbrennungstemperaturen möglicherweise entstehenden Stickoxide vermieden oder durch geeignete Maßnahmen vermindert werden.

Da die zunehmende Mobilität der Weltbevölkerung wegen des Antriebs der Verkehrsmittel mit Verbrennungsmotoren, die mit fossilen Brennstoffen (gasförmigen und flüssigen Kohlenwasserstoffen) betrieben werden, derzeit noch mit einer Zunahme des Ausstoßes von Kohlendioxid erkaufte werden muss, wird eine weitere wesentliche Nutzung des Wasserstoffs der Antrieb von Fahrzeugen – in Brennstoffzellen, die den für Elektromotoren benötigten elektrischen Strom erzeugen, oder in für Wasserstoff optimierten Verbrennungsmotoren – sein. Obwohl nachfolgend ausschließlich die Verhältnisse bei den Straßenfahrzeugen betrachtet werden, sei darauf hingewiesen, dass künftig auch der Betrieb von Schienenfahrzeugen mit Wasserstoffantrieb sowie der Antrieb von Flugzeugen mit flüssigem Wasserstoff Bedeutung annehmen kann. .

7.3.1 Sicherheitstechnische Aspekte

Die Sicherheit von Fahrzeugen mit Brennstoffzellenantrieb betrifft zum einen das Fahrzeug selbst, zum anderen aber auch die notwendigen Infrastruktureinrichtungen, wie z. B. Tankstellen, Servicestationen, Abstell- und Garagenplätze.

Der Auslegung der Speichersysteme (z. B. für Wasserstoff, Erdgas oder Methanol) sowie deren sicherer Integration in das Fahrzeug kommt eine besondere Bedeutung zu. Potentielle Gefahrenquellen, die bei der Auslegung von Speichersystemen für Brennstoffzellenfahrzeuge berücksichtigt werden müssen, sind u. a.

- äußere Einwirkungen aus dem Verkehrsgeschehen, z. B. mechanische Beschädigungen, externer Brand,
- interne Systemfehler, z. B. Ausfall und Versagen von Sicherheitseinrichtungen, Fehlfunktion von Komponenten sowie
- menschliches Fehlverhalten, z. B. Montage- und Bedienungsfehler, Nichteinhaltung von Wartungs- und Reparaturvorschriften.

Zur Qualifizierung von Gas-Speichersystemen in Fahrzeugen liegt ein nationales Regelwerk vor; international geltende Vorschriften (ECE-Regelungen) für Erdgas- und Wasserstoff-Fahrzeuge sind in der Verabschiedung.

Auch bestehen mit Gasfahrzeugen und mit der entsprechenden Infrastruktur umfangreiche sicherheitstechnische Erfahrungen, so dass der Betreiber eines Brennstoffzellenfahrzeugs davon ausgehen kann, dass sein Fahrzeug vergleichbar ist mit denjenigen, die mit herkömmlichen Treibstoffen betrieben werden.

Der ordnungsgemäße Zustand der Gasanlage und des Brennstoffzellen-Systems sollte allerdings während der Betriebszeit durch geeignete qualitätssichernde Maßnahmen gewährleistet werden. Auch muss das Betriebs- und Wartungspersonal für den Umgang mit der Gas- und Brennstoffzellentechnik entsprechend geschult sein.

7.3.2 Hochdruck-Wasserstoff

Die Entwicklung von leichten Druckgasbehältern für hohe Betriebsdrücke hat in den vergangenen Jahren große Fortschritte gemacht; so dass das Ziel, Wasserstoff-Druckgasbehälter mit einem Betriebsdruck von 700 bar herzustellen, bald erreicht sein wird. Damit ist es möglich, auch ohne vorherige energieaufwändige Verflüssigung Wasserstoff mit einer Dichte zu speichern, die der des verflüssigten Wasserstoffs nahe kommt. Um eine der heutigen – bei Verwendung von flüssigen Kohlenwasserstoffen – vergleichbare Nutzung zu erzielen, war es bisher nur für Busse oder andere überwiegend im Stadtverkehr betriebene Fahrzeuge möglich, die bei Betriebsdrücken von 300 bar notwendige Anzahl von Druckgasbehältern an Bord – meist auf dem Dach – mitzuführen.

Das kann sich ändern, wenn die für Betriebsdrücke von 700 bar ausgelegten Druckgasbehälter realisiert sind und entsprechend geringe Ausmaße haben, so dass sie auch in Personenkraftwagen eingebaut werden können und eine zufriedenstellende Reichweite beim Betrieb mit Wasserstoff ermöglichen.

Der für den Betrieb von Fahrzeugen benötigte Wasserstoff wird an Tankstellen abgegeben, die ihn entweder durch Elektrolyse herstellen und auf über 300 bar komprimiert in stationären Druckbehältern lagern oder über geeignete Puffergefäße einer Hochdruck-Rohrleitung mit Wasserstoff entnehmen. Denkbar ist auch die Entnahme von Wasserstoff aus einer Nieder- oder Mitteldruck-Rohrleitung, Komprimierung auf den für die Fahrzeugtanks geeigneten Druck und Lagerung in stationären Druckbehältern bis zur Abgabe an die Verbraucher.

7.3.3 Flüssigwasserstoff

Auch die Entwicklung von isolierten Tanks für die Aufnahme von verflüssigtem Wasserstoff (Siedetemperatur bei Normaldruck: -253 °C) hat in den vergangenen Jahren große Fortschritte gemacht, so dass einerseits das Volumen der Isolierung geringer wurde und andererseits ihre Effizienz verbessert und die Abdampftrate deutlich verringert wurde (siehe 5.2). Damit ist man dem Ziel, Fahrzeuge zu bauen und betreiben zu können, die keine umweltschädlichen Emissionen abgeben, deutlich näher gekommen.

Der für den Betrieb von Fahrzeugen benötigte Wasserstoff wird an Tankstellen abgegeben, die ihn tiefkalt verflüssigt in geeigneten Vorrattanks lagern, deren Verdampfungsverluste sinnvoll reduziert bzw. genutzt werden. Der flüssige Wasserstoff wird in sehr gut isolierten Abgabeeinrichtungen im wesentlichen automatisiert abgegeben. Verschiedene Pilotprojekte in Deutschland haben gezeigt, dass auch das Betanken von Fahrzeugen mit tiefkalt verflüssigtem Wasserstoff durch eine intelligente Technik mindestens so sicher durchgeführt werden kann, wie man es heute beim Umgang mit den brennbaren Flüssigkeiten gewöhnt ist.

Der tiefkalt verflüssigte Wasserstoff wird mit Tankfahrzeugen, die den Vorschriften über die Beförderung gefährlicher Güter unterliegen, aus Großlagern angeliefert. Abhängig von der Anbindung der Tankstellen an die verschiedenen Verkehrsträger kann die Belieferung auf der Straße oder auch mit der Eisenbahn erfolgen.

8 Wasserstoff - Optionen und Ausblick

Wasserstoff stellt keine frei verfügbare Primärenergie dar, sondern einen Energieträger, dessen Herstellung Energieaufwand erforderlich macht.

Die Nutzung von Wasserstoff als einen vergleichsweise emissionsarmen Energieträger wird in großem Umfang nur möglich sein, wenn vorrangig erneuerbare Energien für die Erzeugung genutzt werden. Demgegenüber führt der Einsatz von kohlenstoffhaltigen Energiequellen, wie Kohle, Erdöl und Erdgas, zur Wasserstofferzeugung nicht zu einer Entlastung der Umwelt. Deren direkte Nutzung durch den Endverbraucher erweist sich in der Regel als effizienter. Folglich müssen frühzeitig alternative Wege zur Herstellung beschränkt werden. Für die Erzeugung von Wasserstoff stehen somit nicht die Verfahren im Vordergrund des Interesses, sondern die Bereitstellung preiswerter, umweltschonender Energien.

Mit dem vorliegenden Bericht beschreibt die SFK den Status der Wasserstofftechnologie. Es wird aufgezeigt, dass bereits eine breite Wissensbasis und langjährige Erfahrungen im industriellen Bereich vorliegen. Auch ist eine sachbezogene regulatorische Grundlage vorhanden. Im nationalen Regelwerk findet sich eine Vielzahl von Gesetzen, Vorschriften und Normen, die bei der Wasserstoffnutzung – d. h. der Erzeugung und Lagerung sowie dem Transport und Verbrauch – zu beachten sind. Hinzu kommen künftig die Optionen für die individuellen Verbrauchsstrukturen (Haushalte, Verkehr). Hierzu bedarf es allerdings weiterer Regelungen.

Diese Regelsetzung und ihre internationale Harmonisierung müssen die Fortentwicklung der Wasserstofftechnologie eng begleiten, um die Sicherheitskultur fortzuentwickeln. Regelungslücken im Hinblick auf die Sicherstellung einer gefahrlosen Nutzung von Wasserstoff bestehen vorrangig noch im Bereich des Handels mit dem Energieträger Wasserstoff (Zwischenlagerung, Verteilungsnetzwerke, Betankungsanlagen) sowie im Zusammenhang mit dem Betreiben von Einrichtungen, Anlagen und Geräten durch den Endverbraucher.

Hier geht es nicht nur um administrative Vorschriften, sondern auch um qualitätserhaltende Maßnahmen durch den Betreiber (Handelsorganisation, Privatpersonen) und Ausbildung von Fachpersonal für Wartung und Reparaturen, Zertifizierung von Fachbetrieben und Werkstätten.

Die qualitätserhaltenden Maßnahmen sind wesentliche Bausteine für den Aufbau einer Sicherheitskultur, deren Gültigkeit sich von der industriellen Nutzung bis hin zur individuellen Nutzung erstreckt.

Das Wissen um das Gefahrenpotential von Wasserstoff ist – wie bei allen anderen Energieträgern auch – eine unabdingbare Voraussetzung für einen sicheren Betrieb. Negative Vorbelastungen liegen insbesondere für die Nutzung von Gasen bereits vielfältig vor. Hier sei u. a. an die nicht zu ignorierende Zahl von Gasexplosionen in Wohngebäuden mit ihrem enormen Zerstörungspotential erinnert. Für eine erfolgreiche Marktdurchdringung und Akzeptanz beim zukünftigen Kunden ist es daher von vorrangiger Bedeutung, dass eine Vertrauensbasis hinsichtlich der Sicherheit der Nutzung dieser innovativen Versorgungstechniken, wie Brennstoffzelle und alternativer Kraftstoff, geschaffen werden kann.

Mit dem vorliegenden Bericht wird aufgezeigt, dass ein mit herkömmlichen Energieträgern mindestens vergleichbarer Sicherheitsstandard geschaffen werden kann. Um dieses Ziel zu erreichen, sind vergleichende Risikostudien für verschiedenartige Energieträger durchzuführen und darauf aufbauend präventive und/oder schadensbegrenzende Maßnahmen zu erarbeiten. Neben den sicherheitstechnischen Aspekten wird aber auch Faktoren wie Qualität, Zuverlässigkeit, Einfachheit der Nutzung und nicht zuletzt Wirtschaftlichkeit eine maßgebliche Rolle hinsichtlich der Akzeptanz der Wasserstofftechnologie zukommen.

Nach alledem zeigt dieser Bericht auf, dass bereits vielfältige Nutzungen von Wasserstoff verfügbar und sicherheitstechnisch beherrschbar sind. Gleichwohl ist die Erzeugung von Wasserstoff, insbesondere auf Basis erneuerbarer Energien, heute noch nicht wettbewerbsfähig. Die SFK schlägt vor, mit einer Initialförderung von Komponentenentwicklung, Infrastruktur und Demonstrationsvorhaben die erforderlichen Maßnahmen zu implementieren, um die flächendeckende Nutzung von Wasserstoff für den Standort Deutschland zu ermöglichen.

Nachwort

Wasserstoff ist der Energieträger der Zukunft.

Er kann unter den Energieträgern bei Erzeugung mit Solarenergie die Schlüsselposition einer zukünftigen, erneuerbaren und nachhaltigen Energiewirtschaft einnehmen. Als Primärenergiequellen zur Erzeugung von Wasserstoff kommen praktisch alle Energiequellen in Betracht, sowohl die erneuerbaren Energien Sonne, Wind, Biomasse und Wasserkraft als auch die fossilen und absehbar endlichen Kohlenwasserstoffreserven wie Kohle, Erdöl und Erdgas sowie schließlich auch im weltweiten Kontext: Kernenergie. Die Wasserstoffherzeugung und –verwendung wird sich zukünftig anhand der Voraussetzungen einer nachhaltigen Entwicklung rechtfertigen müssen.

Wasserstoff ist vielseitig.

Seine physikalischen und chemischen Eigenschaften machen ihn zu einem vielseitig einsetzbaren Energieträger und Kraftstoff, der schon heute sicher hergestellt, gespeichert und transportiert werden kann. Bei seiner Verbrennung in Heiz- und Kraftanlagen entsteht ebenso, wie bei seiner direkten Umsetzung in elektrischen Strom mit Hilfe von Brennstoffzellen, als Reaktionsprodukt im wesentlichen Wasser.

Hinzu kommt der für den Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur wichtige Vorteil, den Wasserstoff sowohl zentral als auch dezentral erzeugen zu können.

Wasserstoff ermöglicht Klimaschutz.

Die Verwendung von Wasserstoff - wenn er u.a. zukünftig aus Solarenergie erzeugt wird - trägt wesentlich zur Vermeidung klimaschädlicher Emissionen von Kohlendioxid und anderer Verbrennungsprodukte fossiler Energiequellen bei.

Wasserstoff eröffnet Zukunftstechnologien.

Der breiten Nutzung eines auf Wasserstoff basierenden Energiesystems stehen heute zwar noch eine Reihe von wirtschaftlichen und technologischen Hürden im Weg. Die meisten Technologien, die Wasserstoff als Energieträger nutzen, befinden sich zur Zeit in der Entwicklungs- oder Demonstrationsphase und haben die Schwelle zur kommerziellen Nutzung noch nicht erreicht. Auf der anderen Seite wird Wasserstoff im industriellen Bereich schon seit langer Zeit in großem Umfang eingesetzt. Heute findet Wasserstoff hauptsächlich Anwendung in der petrochemischen und chemischen Industrie. Dort wird Wasserstoff in Raffinerien und Großanlagen überwiegend aus Erdgas erzeugt und zur Aufbereitung der konventionellen Kraftstoffe und zur Erzeugung chemischer Grundstoffe

wie Ammoniak, Ethylen und Methanol wieder verbraucht. Von den ca. 45 Megatonnen Wasserstoff, die weltweit jährlich stofflich umgesetzt werden²⁴, entfallen mehr als 70 % auf diesen Bereich. In geringerem Umfang wird Wasserstoff heute auch in der Elektronik-Industrie, in vielen Bereichen der Metallurgie, zur Glasherstellung und zur Fetthärtung eingesetzt.

In bezug auf energetische Anwendungen wird Wasserstoff eine erste, bedeutende Rolle als Speichermedium für den aus allen erneuerbaren Energiequellen erzeugten elektrischen Strom spielen.

Wasserstoff als Kraftstoff.

Besonders vielversprechend ist die Einführung von Wasserstoff als Kraftstoff im Verkehrssektor, zumal bei den Erfolgen bei der Einsparung von Heizenergie in den Industriestaaten und angesichts der erwarteten Zuwachsraten in den Entwicklungsländern die Verkehrsemissionen dominant werden. Weltweit unternehmen alle größeren Automobilfirmen erhebliche Anstrengungen zur Entwicklung von Wasserstoffantrieben. Einerseits konzentriert sich die Automobilindustrie auf die Anwendung der Brennstoffzellentechnik. Dabei wird Wasserstoff zusammen mit dem Sauerstoff der Luft auf elektrochemischem Weg direkt und mit hohem Wirkungsgrad in Strom umgewandelt. Brennstoffzellen-Fahrzeuge sind damit batterieunabhängige Elektrofahrzeuge, die selbst außer Wasserdampf und Wärme keine Emissionen mehr erzeugen. Andererseits kann Wasserstoff auch in Verbrennungsmotoren umgesetzt werden. Erste Flotten kommerziell erhältlicher Fahrzeuge mit Wasserstoffantrieb werden von der Automobilindustrie bereits für 2010 angekündigt. Mittelfristig wird Wasserstoff auch zum Antrieb von Flugzeugen Verwendung finden. Bezogen auf sein Gewicht besitzt Wasserstoff den höchsten Energieinhalt aller Kraftstoffe und ist deswegen besonders attraktiv für Flugzeuge, die auf diese Weise ihr Startgewicht reduzieren könnten.

Wasserstoff ist sicherheitstechnisch beherrschbar.

Damit die von der Öffentlichkeit geforderten, umweltverträglichen Wasserstofftechnologien tatsächlich die Schwelle der Wirtschaftlichkeit erreichen und auch von vornherein die notwendige globale Verbreitung erfahren können, ist neben einer intensiven technischen Weiterentwicklung auch die Spiegelung dieser Entwicklungen in den entsprechenden nationalen und internationalen sicherheitstechnischen Regelwerken erforderlich. Eine

²⁴ Dies entspricht einem Energieinhalt von etwa 1.500 TWh oder 185 Mio t SKE. Zum Vergleich: Deutschland hatte im Jahr 1999 einen Energiebedarf von 484 Mio t SKE.

rechtzeitige Standardisierung der neuen Nutzungstechniken fördert die Entwicklung neuer Märkte und beseitigt Handelshemmnisse. Außerdem ist sie eine Voraussetzung für einen sicheren Umgang mit Wasserstoff und seine Akzeptanz durch die Öffentlichkeit.

Wasserstoff jetzt fördern und aufbauen.

Eine entscheidende Voraussetzung für die Einführung von Wasserstoff als Energieträger ist der Aufbau einer funktionierenden und sicheren Versorgungsinfrastruktur. Die Basis dafür liefern die bereits heute im industriellen Bereich praktizierten und sicherheitstechnisch beherrschten Techniken. Für den Umgang mit Wasserstoff in verdichteter wie in verflüssigter Form existieren nationale Regelwerke, die zu einem hohen Sicherheitsstandard geführt haben. Eine zukünftige Verwendung von Wasserstoff als Energieträger bringt hier allerdings neue Herausforderungen mit sich, die sich zum einen aus den großen Mengen ableiten, mit denen in Zukunft umgegangen werden wird, und die zum anderen in der Tatsache begründet sind, dass die neuen Formen der Wasserstoffnutzung in starkem Maße den privaten Nutzer unmittelbar tangieren und den Wasserstoffmarkt entscheidend verändern werden. So reicht beispielsweise die gegenwärtig in Europa vorhandene Produktionskapazität für flüssigen Wasserstoff von ca. 7 Megatonnen im Jahr nur zur Versorgung von lediglich 10 Millionen Fahrzeugen mit Wasserstoffantrieb.²⁵

²⁵ In Deutschland sind 42 Mio. PKW und 3,3 Mio. LKW, in der EU etwa 170 Mio. PKW und 23 Mio. LKW, zugelassen, vgl. Verkehrstaschenbuch ARAL 2000/2001

ANHANG

Glossar, Abkürzungsverzeichnis, verwendete Symbole und Einheiten

Ausgewählte Abkürzungen von Fachbegriffen, Normen und Institutionen

AD	Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter
ADNR	Europäisches Übereinkommen über die Beförderung gefährlicher Güter auf dem Rhein
ADR	Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße
AFC	Alkaline Fuel Cell - Alkalische Brennstoffzelle
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin
BG	Berufsgenossenschaft
BImSchG	Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz)
CEN	Comité Européen de Normalisation, European Committee for Standardization
CGH ₂	Komprimierter Wasserstoff
CO ₂	Kohlendioxid
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DVGW	Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches
ECE	Economic Commission of Europe
EIHP	European Integrated Hydrogen Project
FMEA	Failure Mode and Effect Analysis, Ausfalleffektanalyse (DIN 25448)
GGVBinSch	Gefahrgutverordnung Binnenschifffahrt
GGVE	Gefahrgutverordnung Eisenbahn
GGVS	Gefahrgutverordnung Straße
GGVSee	Gefahrgutverordnung See
IATA	International Air Transport Association, Internationaler Luftverkehrsverband
ICAO	International Civil Aviation Organization, Internationale Zivilluftfahrt-Organisation
IMDG-Code	International Maritime Dangerous Goods Code, Internationaler Code für die Beförderung von gefährlichen Gütern auf Seeschiffen

ISO	International Standardization Organization
LH ₂	Verflüssigter Wasserstoff
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell - Karbonatschmelz-Brennstoffzelle
MSR	Mess-, Steuer- und Regeltechnik
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell - Phosphorsäure-Brennstoffzelle
PEMFC	Polymer Electrolyte Fuel Cell - Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle (Protonenleitende Membran)
RID	Internationale Ordnung für die Beförderung gefährlicher Güter mit der Eisenbahn
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell - Brennstoffzelle mit Festelektrolyt (Keramischer Ionenleiter)
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
VdTÜV	Verband der Technischen Überwachungsvereine e.V.

Textliche Abkürzungen

Bspw.	Beispielsweise
d. h.	das heißt
i. Ü.	im Übrigen
i. W.	im Wesentlichen
u. a.	Unter anderem
v. a.	vor allem
vgl.	Vergleiche
vglw.	Vergleichsweise
zit. n.	Zitiert nach
z. T.	zum Teil
zz.	Zurzeit

Skalierungsfaktoren

p	Pico	10^{-12}	billionstel		
n	Nano	10^{-9}	milliardstel		
μ	Mikro	10^{-6}	millionstel		
m	Milli	10^{-3}	tausendstel		
--	---	1	---		
k	Kilo	10^3	Tausend		
M	Mega	10^6	Million	Mio	Million(en)
G	Giga	10^9	Milliarde	Mrd	Milliarde(n)
T	Tera	10^{12}	Billion	Bill	Billion(en)
P	Peta	10^{15}	Billiarde		
E	Exa	10^{18}	Trillion		

Sonderzeichen

>	größer (mehr) als	\pm	plus/minus
<	kleiner (weniger) als	∞	Unendlich
\leq	kleiner, gleich	\Rightarrow	daraus folgt
\geq	größer, gleich	\emptyset	Durchmesser
=	Gleich		
\approx	etwa gleich, ungefähr		

Umrechnungsfaktoren

ppm(v)	parts per million (in volume)	1 ppmv	=	1 von 10^6 (Volums)Teilen
ppb(v)	parts per billion (in volume)	1 ppbv	=	1 von 10^9 (Volums)Zeilen
t	Tonne	1 t	=	1.000 kg
J	Joule	1 J	=	$2,778 \cdot 10^{-7}$ kWh
SKE	Steinkohleneinheit	1 kg SKE	=	7.000 kcal = 8,14 kWh
TWh	Tera-Watt-Stunde	1 TWh	=	1 Mrd kWh
bar	Bar	1 bar	=	10^5 Pascal (Pa) \approx 1 kp/cm ²
Vol. %	Volumenprozent	1 Vol. %	=	0,01
kcal	Kilokalorie	1 kcal	=	$1,163 \times 10^{-3}$ kWh
TNT(Ä)	Trinitrotoluol (Äquivalent)	1 kg TNT	=	1.036 kcal = 1,2 kWh

An der Erstellung dieses Berichtes waren die folgenden Personen beteiligt:

Mitglieder des Arbeitskreises:

Prof. Dr. Bernhard Droste	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
Dr.-Ing. Andreas Eder	BMW AG
Prof. Dr. Winfried Karl	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
Dr. Martin Kesten	Messer-Griesheim GmbH
Dr. Frank Musiol	NABU-Bundesgeschäftsstelle
Dipl.-Ing. Jürgen Rohde	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
MinDirig. Dr. Gustav Sauer	Ministerium für Umwelt, Natur und Forsten des Landes Schleswig Holstein
Dipl.-Ing. Ralf Szamer	TÜV Süddeutschland Bau und Betrieb
Dipl.-Ing. Hans-Peter Ziegler	Linde Engineering

Geschäftsstelle des TAA:

Dipl.-Ing. Michael Eifländer	GFI Umwelt
------------------------------	------------