

Das Solar-Wasserstoff-Projekt in Neunburg vorm Wald

SWB
Ein Unternehmen der
Bayernwerk-Gruppe



Schriftenreihe Solarer Wasserstoff

Mobile Anwendung Nr. 6

Erschienen in ENERGIE, Jg. 44, Nr. 12, Dezember 1992

Flüssiger Wasserstoff fürs Automobil

In Neunburg vorm Wald wird die Betankung optimiert

A. Szyszka
J. Tachtler

Zusammenfassung

Im Rahmen der ersten Phase des Projektes der Solar-Wasserstoff-Bayern (SWB) im oberpfälzischen Neunburg vorm Wald wurde im industriellen Maßstab auch eine Tankstelle errichtet, die Automobile mit flüssigem Wasserstoff versorgen kann.

Die Autoren berichten über die beim Bau dieser Tankstelle gewonnenen Erfahrungen sowie die wichtigsten Versuchsergebnisse und stellen das Konzept für die zweite Projektphase vor.

Einleitung

Die zunehmende Sensibilität gegenüber verkehrsbedingten Immissionsbelastungen der Städte erfordert neue Lösungen für Fahrzeugantriebe. So schreibt die kalifornische Regierung vor, daß ab 1998 jeder Hersteller der dort Fahrzeuge verkauft auch solche "ohne Emission" anbieten muß. Von anfänglich zwei Prozent der in Kalifornien verkauften Fahrzeuge eines Herstellers müssen ab dem Jahr 2003 zehn Prozent "zero emission vehicles" sein. Derzeit werden ausschließlich Elektrofahrzeuge als schadstofffrei anerkannt ungeachtet der Erzeugungsart des benötigten Stroms.

Setzt man eine Energieerzeugung mittels nicht-fossiler Rohstoffe voraus, so sind neben den Elektrofahrzeugen auch Fahrzeuge mit Wasserstoffantrieb eine Option zur wirksamen Reduzierung der Schadstoffemission. Wird als Antriebsaggregat ein Verbrennungsmotor eingesetzt, so entstehen bei der Verbrennung von Wasserstoff zwar geringe Mengen an Stickoxiden, durch einen bewußten Verzicht auf hohe Motorleistung können diese aber im Magerbetrieb bei guten Fahrleistungen auf einen vernachlässigbaren Wert gesenkt werden (1). Weiterhin sind auch Brennstoffzellen in Zukunft als alternative Fahrzeugantriebe denkbar, sofern z. B. die Kosten und das Systemgewicht auf für das Serienprodukt Auto

akzeptable Werte gesenkt werden können.

Um möglichst große Reichweiten sicherzustellen, wird für wasserstoffangetriebene Fahrzeuge ein Kraftstoffspeicher angestrebt, der bezüglich Energieinhalt, Bauvolumen und Gewicht den heutigen Benzin- und Dieselmotorsystemen möglichst nahekommt. Von den drei denkbaren Wasserstoff-Speichersystemen

- Druckgasbehälter
- Metallhydrid-Speicher
- Flüssigwasserstoff (Liquid H₂-LH₂)-Tank

wird der LH₂-Tank diesen Anforderungen am ehesten gerecht. Allerdings ist die Handhabung von LH₂, insbesondere die Betankung im Vergleich zu den beiden anderen Speichersystemen zur Zeit noch am wenigsten entwickelt.

Im Rahmen der Phase 1 des Projekts der Solar-Wasserstoff-Bayern GmbH (SWB), an dem mit 60 % die Bayernwerk AG und zu je 10 % die BMW INTEC BeteiligungsGmbH, Linde AG, MBB GmbH und die Siemens AG beteiligt sind, wurde in Neunburg vorm Wald eine LH₂-Tankstelle installiert (2). Ziel der Versuche mit der im industriellen Maßstab gebauten Anlage war es, die LH₂-Betankung von Pkw gegenüber den bis dahin bekannten Verfahren im Hinblick auf Sicherheit, Betankungszeit und Betankungsverluste zu verbessern.

Ausgangssituation

Bereits Ende der siebziger Jahre wurden bei der Deutschen Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR) erste Wasserstoff-Versuchsfahrzeuge mit Tanksystemen für LH₂ ausgerüstet (3). Es zeigte sich, daß die für das Umfüllen von LH₂ aus dem chemischen Anlagenbau bekannten Verfahren nicht ohne weiteres auf die Pkw-Betankung übertragbar sind, und zwar wegen der geringen Wasserstoffmengen und der damit verbundenen höheren spezifischen Verluste. Besonders die niedrige Siedetemperatur und geringe Verdampfungswärme von LH₂ sowie der große Zündbereich von Wasserstoff in Luft (Abb. 1) stellen hohe Ansprüche an Material, Isolierung und Dichtheit des Leitungssystems, inklusive der lösbaren Verbindungen.

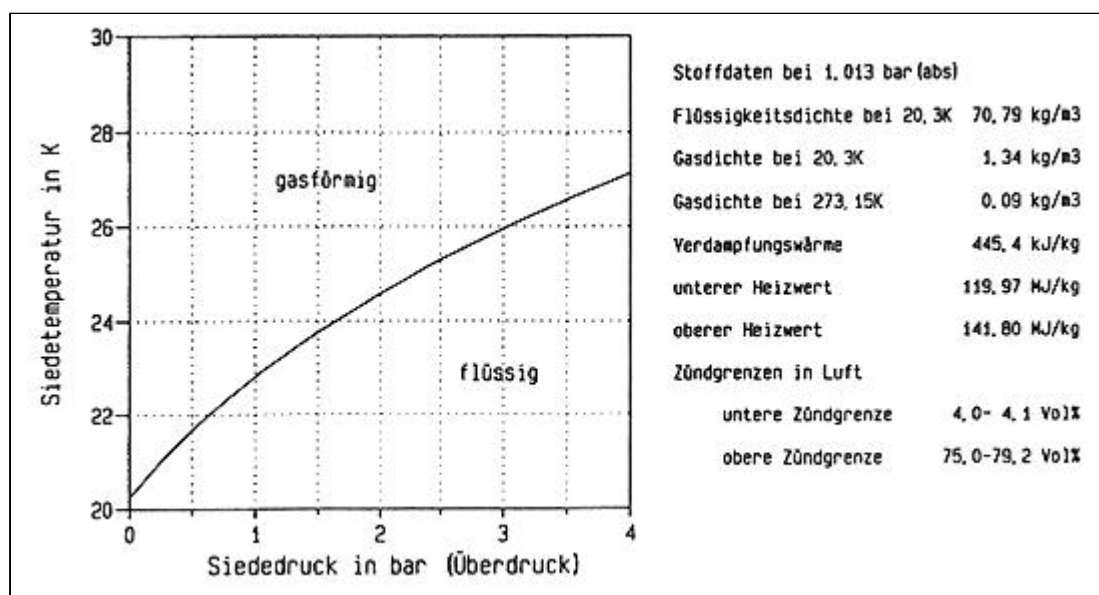


Abb. 1: LH₂-Siedekurve und Stoffdaten von Wasserstoff

Um die besonderen Anforderungen zu erfüllen, wurde bei der DLR für den Pkw-Einsatz u. a. eine kompakte vakuumisolierte Ventilbox entwickelt, in der die zur Betankung des LH₂-Fahrzeugtanks und zur Versorgung des Fahrzeugmotors benötigten Ventile untergebracht

sind (Abb. 2).

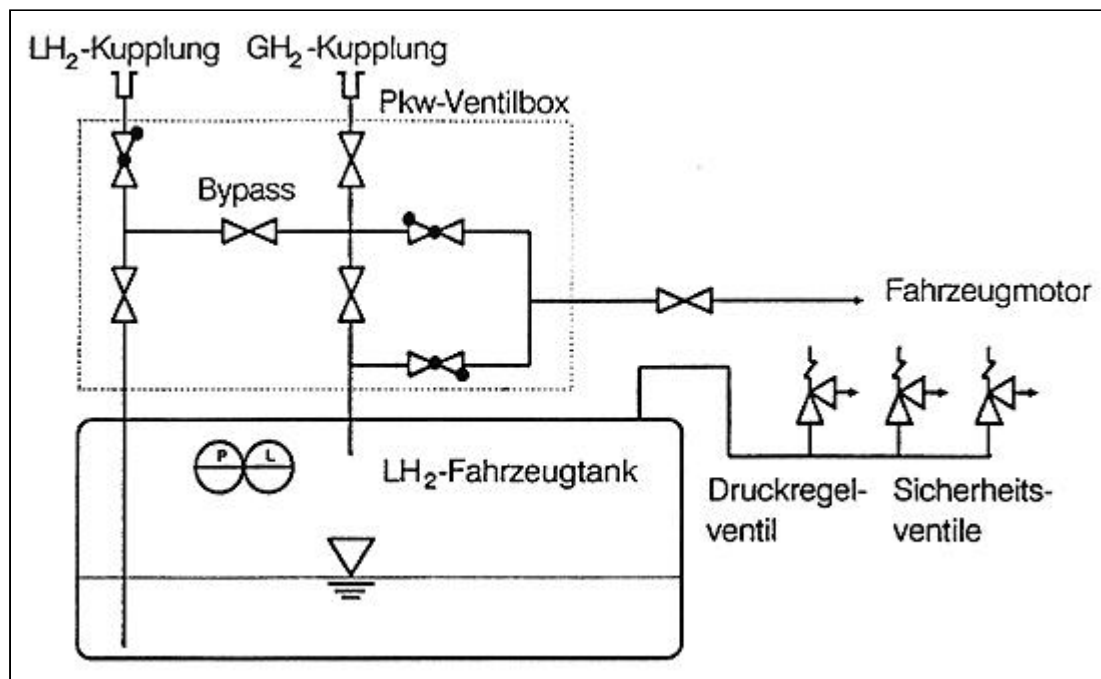


Abb. 2: Prinzipschema eines LH₂-Tanksystems für Pkw

Die geringen Querschnitte der Ventile erfordern größte Sorgfalt beim An- und Abkuppeln der zum Füllen von LH₂ und Ableiten des entstehenden gasförmigen Wasserstoffs (GH₂) notwendigen Anschlüsse, um das Eindringen und etwaiges Ausfrieren von Luftbestandteilen an den LH₂-Ventilen zu verhindern.

So müssen bereits beim Ankuppeln das LH₂-Leitungssystem sowie der Befüll- und der Abgasschlauch leicht mit Helium durchströmt werden, um die Gefahr des Eindringens von Luft zu minimieren. Anschließend wird das Leitungssystem über einen Bypass in der Pkw-Ventilbox mehrmals gründlich evakuiert und - wegen des großen Zündbereichs von H₂ - zuerst mit Helium, dann mit GH₂ gespült. Um einen zu hohen Wärmeeintrag in den LH₂-Fahrzeugtank zu vermeiden, erfolgt das Abkühlen des Befüllschlauchs auf LH₂-Temperatur ebenfalls über den Bypass.

Nach dem Befüllen des LH₂-Fahrzeugtanks werden das Leitungssystem und die Kupplung mit GH₂ aus Flaschenbündeln wieder auf Umgebungstemperatur angewärmt. Das sofortige Kondensieren und Ausfrieren von Luftfeuchtigkeit an den Kupplungsflächen nach dem Abkuppeln kann so verhindert werden. Mit der beschriebenen Vorgehensweise bei der LH₂-Betankung eines Pkw konnte bei BMW seit 1988 mit einem in ein Versuchsfahrzeug eingebauten LH₂-Tanksystem ein sicherer und störungsfreier Betrieb realisiert werden. Die zahlreichen Betankungszwischenschritte führten aber dazu, daß die Betankung bei hohen Verdampfungsverlusten jeweils länger als eine Stunde dauerte.

Da bei der SWB durch die Zusammenarbeit von Energieversorgungsunternehmen, Fahrzeughersteller und Anlagenbauer/Gaslieferant eine gute Basis für die praxisnahe Demonstration einer verkehrsorientierten LH₂-Infrastruktur gegeben ist, bot sich die Chance, durch den Bau einer Tankstelle auf der Solar-Wasserstoff-Anlage in Neunburg vorm Wald die Betankungstechnologie in einer breit angelegten Kooperation zu verbessern. Im November 1989 beschlossen deshalb die Gesellschafter der SWB den Bau einer LH₂-Tankstelle.

Projektentwicklung

Bei der Konzeptfestlegung der LH₂-Tankstelle der Projektphase 1 wurde auf eine Verflüssigung des in Neunburg vorm Wald produzierten Wasserstoffs verzichtet (derzeit maximal ca. 50 Nm³/h), da eine für die SWB passende Verflüssigungsanlage relativ klein und deshalb spezifisch teuer und energetisch weniger effizient gewesen wäre. Es wurde deshalb

beschlossen, LH₂ per Tankwagen auf die Solar-Wasserstoff-Anlage liefern zu lassen. Die bei Anlieferung und Lagerung von LH₂ einzuhaltenen Sicherheitsabstände zu den H₂- und O₂-Druckgas-Speicherbehältern, zur Werksstraße, zu benachbarten Gebäuden und zu den Photovoltaik-Feldern machten aber die Errichtung einer von den anderen Anlagenteilsystemen unabhängigen Tankstelle mit einer eigenen Bedienwarte notwendig.

Da es für den Bau und den Betrieb von LH₂-Tankstellen noch keine speziellen Richtlinien gibt, wurden zur Planung der Anlage u. a. die "Druckbehälterverordnung", die "Technischen Regeln Druckgase" (TRG) und die "Unfallverhütungsvorschriften" (UVV) herangezogen. Anhand der darin enthaltenen Vorschriften für Flüssiggas-Tankstellen konnten die erforderlichen Schutzbereiche, Absperrmaßnahmen und Betriebsrichtlinien prinzipiell festgelegt werden. Wichtige Details waren aber wegen der besonderen Eigenschaften von LH₂ nicht anwendbar.

Im Sinne einer Optimierung der Planungsannahmen wurde deshalb in Zusammenarbeit mit dem TÜV Bayern e.V. ein Sicherheitskonzept für die Tankstelle in Neunburg vorm Wald erarbeitet. Dabei wurde auch berücksichtigt, daß sich diese Tankstelle auf einem eingezäunten Betriebsgelände befindet und nur von geschultem Personal bedient wird. Im Hinblick darauf konnte z. B. der Schutzabstand zwischen dem LH₂-Standtank und den Füllanschlüssen gegenüber den Richtlinien verkürzt werden. Durch die damit verbundene Verkleinerung des abzukühlenden Leitungssystems und dem daraus folgenden geringeren Wärmeeintrag konnte eine Verminderung der Wasserstoffverluste erreicht werden.

Um ein Eindringen von evtl. freiwerdendem Wasserstoff in die Bedienwarte zu verhindern, sorgt eine außerhalb der definierten Explosionsschutzzone ansaugende Lüftungsanlage im Innenraum ständig für einen geringen Überdruck gegen die Umgebung. Ferner wird der Raum mit einer Gaswarnanlage überwacht. Bei Überschreiten einer Alarmschwelle werden alle nicht explosionsgeschützten elektrischen Geräte abgeschaltet. Um das Versuchsfahrzeug während der Betankung ständig beobachten zu können, wurde die Bedienwarte im Bereich der Explosionsschutz-Zone zusätzlich mit einem gasdichten und druckfesten Fenster versehen (Abb. 3).



Abb. 3: Blick auf die LH₂-Tankstelle in Neunburg vorm Wald mit dem BMW-Versuchsfahrzeug

Auch das Gebäude wurde in diesem Bereich so ausgelegt, daß es einer Verpuffung durch möglicherweise freiwerdenden Wasserstoff standhält.

Nachdem die zuständigen Behörden die Genehmigung zum Bau der LH₂-Tankstelle erteilt hatten, wurde im Oktober 1990 mit den Bauarbeiten begonnen. Nach Lieferung und Montage der Tankstelle, inklusive des gemieteten LH₂-Standtanks durch die Linde AG Werksgruppe Technische Gase, konnte im April 1991 eine erste Fahrzeugbetankung erfolgreich vorgenommen werden. Der reguläre Versuchsbetrieb wurde nach der Erledigung kleinerer Restarbeiten und Übergabe der Anlage an die Betriebsmannschaft der SWB im August 1991 aufgenommen.

Beschreibung der LH₂-Tankstelle

Kernstück der Tankstelle ist der 3 000 l LH₂ fassende Standtank. Aus ihm kann neben LH₂ auch den Siedebedingungen entsprechender, kalter GH₂ entnommen werden, um die Betankungsleitungen bei Bedarf vorzukühlen (Abb. 4).

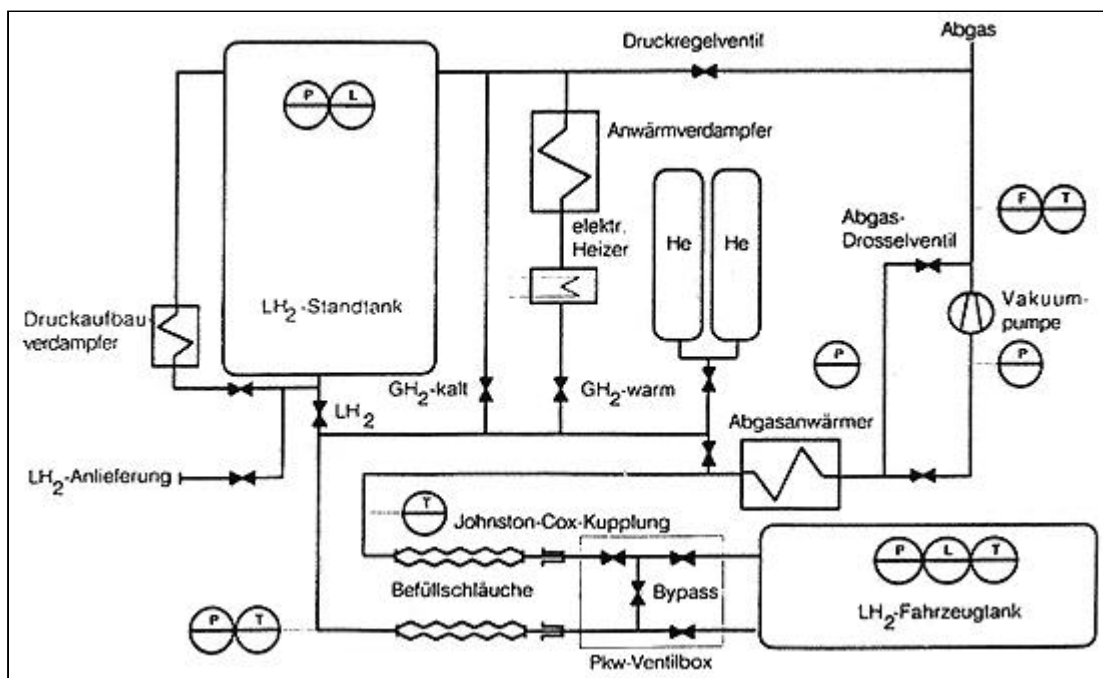


Abb. 4: Prinzipschema der LH₂-Tankstelle

Der Standtank ist so konstruiert, daß der darin enthaltene LH₂ über die gesamte Füllhöhe von ca. 3 m eine möglichst gleichmäßige Temperatur aufweist. Somit ist es durch eine einfache Regelung des Tankdrucks möglich, LH₂ auf der für den Versuchsbetrieb gewünschten Siedetemperatur zu halten.

Das Umfüllen von LH₂ in den Fahrzeugtank erfolgt durch Überdruck im Standtank gegenüber dem LH₂-Fahrzeugtank. Mittels eines am Standtank montierten Druckaufbau-Verdampfers können vor der Betankung des Versuchsfahrzeugs im Standtank maximal 4 bar Überdruck eingestellt werden. Hinter dem Absperrventil am Standtank wird der benötigte LH₂ über ein vakuumisoliertes Leitungssystem und einen ebenfalls vakuumisolierten flexiblen Metall-Wellschlauch zum Fahrzeugtank geleitet. Die Schnittstelle zum Fahrzeug-Tanksystem ist eine Johnstons-Cox-LH₂-Kupplung (3) - ein vakuumisoliertes Rohrstück, das in ein konzentrisches, ebenfalls vakuumisoliertes Gegenstück eingeführt und mit diesem verschraubt wird.

Da beim Abkühlen des Leitungssystems auf LH₂-Temperatur und Füllen des Fahrzeugtanks LH₂ verdampft, muß eine weitere Schlauchverbindung zum Ableiten dieses GH₂-Abgases vorgesehen werden. Da das GH₂-Abgas aber annähernd LH₂-Temperatur erreicht, ist die Abgasleitung bis zu einem nachgeschalteten Abgasanwärmer (Umgebungsluft-Wärmetauscher, Verdampferleistung im Falle von Flüssigkeitseintrag 100 Nm³/h) ebenfalls

vakuumisoliert ausgeführt, um die an den kalten Leitungsoberflächen ansonsten stattfindende Luftkondensation und die damit verbundene Verletzungsgefahr zu vermeiden.

Hinter dem Abgaswärmer wird der auf annähernd Umgebungstemperatur angewärmte GH₂-Abgasvolumenstrom durch ein Drosselventil geregelt. Dadurch kann die LH₂-Betankung von Versuchsfahrzeugen bei unterschiedlichen Druckdifferenzen zwischen Standtank und Abgasleitung bzw. Fahrzeugtank untersucht werden. Der entspannte GH₂ wird anschließend über den Abgaskamin in die Atmosphäre abgegeben. Auf eine Weiterverwendung des GH₂-Abgases wurde verzichtet.

Die auf der Solar-Wasserstoff-Anlage eingesetzte, hierfür prinzipiell auch geeignete H₂-Gasaufbereitung wurde bewußt nur für die vorhandenen und noch geplanten Wasserelektrolyseure dimensioniert. Eine Erweiterung der H₂-Gasaufbereitung erschien wegen der nur in unregelmäßigen Abständen stattfindenden LH₂-Betankungsversuche nicht sinnvoll.

Über das eigentliche Befüllen des Fahrzeugtanks hinausgehend, werden in der LH₂-Tankstelle noch Komponenten benötigt, die einen sicheren und störungsfreien Betrieb gewährleisten. So müssen, wie bereits erwähnt, sämtliche Leitungssysteme, die während der Betankung auf die Temperatur des LH₂ abkühlen, vor dem Ankuppeln des Fahrzeugs durch Evakuieren und Spülen gründlich von Luft und evtl. eingedrungener Luftfeuchtigkeit befreit werden. Zum Evakuieren wird eine auf das Leitungssystem abgestimmte Vakuumpumpe eingesetzt. Das neben GH₂ zum Spülen des Leitungssystems benötigte Helium wird über Gasflaschen zur Verfügung gestellt.

Um auch im Winter einen störungsfreien Betrieb zu gewährleisten, wird die Vakuumpumpe thermostatgeregelt beheizt. Außerdem wird - nachdem der Fahrzeugtank befüllt ist - das zum Anwärmen der LH₂-Kupplung notwendige GH₂ bei Bedarf in einem elektrischen Heizer erwärmt. Das angewärmte Gas kann auch dazu verwendet werden, die während längerer Stillstandszeiten evtl. in das Leitungssystem eingedrungene Luftfeuchtigkeit schneller zu entfernen.

Nachdem die mechanischen und elektrischen Verbindungen hergestellt sind, wird der Betankungsablauf vom Steuerpult der Bedienwarte aus gestartet. Die einzelnen Betankungsschritte können sowohl durch manuelles Schalten von Ventilen als auch automatisch über eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) durchgeführt werden.

Die in den jeweiligen Systemabschnitten herrschenden Drücke und Temperaturen, ferner Füllstand und Druck des LH₂ im Fahrzeug- und Standtank sowie die aktuellen Ventilstellungen werden am Steuerpult angezeigt und mit einer separaten Meßwerterfassung aufgezeichnet. Beim Überschreiten von Grenzwerten oder Ansprechen der Gaswarnanlage wird die Betankung - auch bei manueller Bedienung - unterbrochen, und alle Ventile werden geschlossen. Darüber hinaus ist die LH₂-Tankstelle in die Sicherheitsleittechnik der Solar-Wasserstoff-Anlage eingebunden, so daß bei einem übergeordneten Gesamtanlagen-Not-Aus die Betankung ebenfalls gesichert gestoppt wird.

Versuchsergebnisse

Seit August 1991 wurden in mehr als 50 Versuchen das Abkühlen des Leitungssystems, das Füllen des LH₂-Fahrzeugtanks und das Anwärmen der Kupplung untersucht. Die Versuche wurden an einem für Flüssigwasserstoff-Antrieb umgebauten Versuchsfahrzeug der BMW AG (Typ 735i) durchgeführt, das mit einem vakuumsuperisolierten LH₂-Tank der Linde AG Werksgruppe Verfahrenstechnik und Anlagenbau (4) ausgerüstet ist. Vakuumsuperisolation bedeutet Vakuumisolation mit zusätzlicher Umwicklung des Innentanks mit Aluminiumfolie und Trägervlies.

Der 120 l LH₂ (der Energieinhalt entspricht ca. 35 l Benzin) fassende Fahrzeugtank ist zusammen mit der vakuumisolierten Ventilbox hinter der Rücksitzbank untergebracht. Der für den Betrieb des Fahrzeugs notwendige Wasserstoff wird durch Überdruck im LH₂-Fahrzeugtank zum Motor gefördert. Da der Motor GH₂ benötigt, muß der getankte LH₂ vor der Gemischbildungsanlage des Motors in einem kühlwasserbeheizten Wärmetauscher verdampft werden. Außer mit Wasserstoff kann das Versuchsfahrzeug durch Umschalten während der Fahrt auch mit Normalbenzin betrieben werden.

Abbildung 5 zeigt den LH₂-Fahrzeigtank mit Ventilbox nach Anschluß der Johnston-Cox-Kupplungen. Aus Sicherheitsgründen wird das System auf mögliche Undichtigkeiten mittels eines Helium-Lecktests überprüft.



Abb. 5: Helium-Lecktest nach Anschluß der Johnston-Cox-Kupplung

Das Versuchsfahrzeug steht der SWB leihweise zur Verfügung und wird zu den jeweiligen Versuchen gemäß der behördlichen Auflagen von speziell ausgewiesenen Personal von München nach Neunburg vorm Wald überführt. Um durch realistische und vergleichbare Ausgangsbedingungen reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, wird der LH₂-Fahrzeug-Tank jeweils nur so weit leergefahren, daß zu Beginn der Versuche in Neunburg vorm Wald immer noch eine geringe Menge LH₂ darin enthalten ist. Dadurch ist sichergestellt, daß der Fahrzeigtank bei jeder Betankung die gleiche Versuchsausgangstemperatur hat. Unabhängig davon dürfte dieser Zustand auch die normale praxisorientierte Betriebsbedingung für ein LH₂-Fahrzeug wiedergeben.

Da zu Beginn der Projektierung der LH₂-Tankstelle im November 1989 keine geeignete Kupplung auf dem Markt erhältlich war, mit der die komplette Betankungszeit gegenüber herkömmlichen Verfahren hätte deutlich reduziert werden können, konzentrierte sich die SWB bei den Versuchen in Neunburg vorm Wald zunächst hauptsächlich darauf, die einzelnen Betankungsschritte zu optimieren und die GH₂-Abgasverluste zu reduzieren. Aus diesen Gründen wurden die wesentlichen Parameter variiert, nämlich LH₂-Siedetemperatur sowie Druckdifferenz zwischen Standtank und Abgasleitung bzw. LH₂-Fahrzeigtank. Zu berücksichtigen waren dabei u. a. vorgegebene Materialeigenschaften und die Auslegungsdaten des Fahrzeigtanks.

Beim Abkühlen der Betankungsleitungen zeigte sich, daß ein Vorkühlen des Leitungssystems mit kaltem GH₂ hinsichtlich einer Reduzierung der Abgasverluste keine Vorteile bringt. Vielmehr erhöht sich dadurch beim Abkühlvorgang, der möglichst schnell erfolgen sollte, das Abgasvolumen sogar noch, da im Gegensatz zum Abkühlen mit LH₂ die Verdampfungswärme nicht ausgenutzt werden kann. Dagegen ist mit LH₂ bei einem Druckgefälle größer 1 bar das ca. 4 m lange Leitungssystem zwischen Standtank und LH₂-Fahrzeigtank bereits in einer Minute so weit abgekühlt, daß der LH₂-Fahrzeigtank befüllt werden kann.

Als Kriterium für das Umschalten von "Abkühlen über Bypassventil" auf "Befüllen" wurde die Abgastemperatur hinter dem Befüllschlauch herangezogen (Abb. 4). Erst wenn diese ausreichend niedrig ist, kann ein zu starkes Verdampfen von Rest-LH₂ im Fahrzeugtank, das durch Wärmeeintrag aus dem abzukühlenden Leitungssystem verursacht wird, vermieden werden.

Um das vor dem Abkuppeln notwendige Anwärmen der Kupplung zu beschleunigen, wurde der hierzu notwendige GH₂ in dem ursprünglich für den Winterbetrieb konzipierten elektrischen Heizer auf ca. 50°C gebracht. Bei entsprechendem Gasvolumenstrom konnten damit die beiden Kupplungsteile bereits in etwa 3 Minuten so weit angewärmt werden, daß nach dem Abkuppeln keine Luftfeuchtigkeit mehr an den Oberflächen kondensiert.

Abbildung 6 zeigt einen typischen zeitlichen Verlauf wichtiger Kenngrößen während einer kompletten LH₂-Betankung des Versuchsfahrzeugs. Wie der Darstellung u. a. zu entnehmen ist, werden für das eigentliche Füllen des Tanks nur ca. 5 Minuten benötigt. Evakuieren und Spülen des Leitungssystems mit Helium und GH₂, Abkühlen der Füllschläuche und Kupplung mit LH₂ sowie das spätere Anwärmen der Kupplung erfordern dagegen mehr als die Hälfte der kompletten Betankungszeit. Der nach dem Umschalten "Abkühlen über Bypassventil" auf "Befüllen" des LH₂-Fahrzeugtanks kurzzeitige Anstieg der Abgastemperatur wird durch die relativ warme Temperatur der Abgasschlauchverbindung zwischen Fahrzeugtank und Ventilbox hervorgerufen. Nach Erreichen des zulässigen Füllstandes, der durch ein entsprechendes Schaltsignal vom Fahrzeug aus vorgegeben wird, kann das Leitungssystem sofort erwärmt werden.

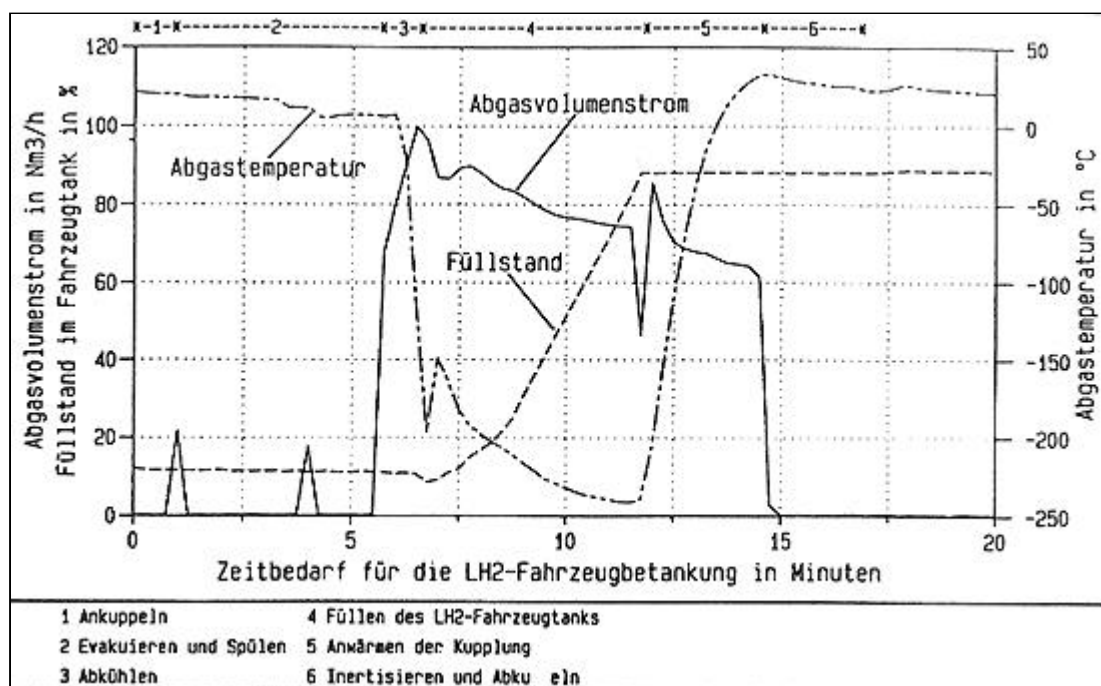


Abb. 6: Füllstand im Fahrzeugtank, Abgasvolumenstrom und Abgastemperatur während einer LH₂-Betankung des Versuchsfahrzeugs

Wie Abbildung 6 weiter zu entnehmen ist, entstehen die größten GH₂-Verluste während des Abkühlens der Füllschläuche bzw. Kupplung und beim Füllen des Fahrzeugtanks. Beim Evakuieren und Spülen des Leitungssystems wird lediglich zweimal der Inhalt des betroffenen Leitungssystems an die Atmosphäre abgegeben. Für das Anwärmen der Kupplung werden ca. 3 Nm³ GH₂ benötigt. Im Gegensatz zum Abkühlen der Füllschläuche bzw. Kupplung hat beim Füllen des Fahrzeugtanks außer der Druckdifferenz zwischen Standtank und Abgasleitung auch die LH₂-Siedetemperatur im Standtank einen entscheidenden Einfluß auf Verdampfungsverluste und Befüllgeschwindigkeit.

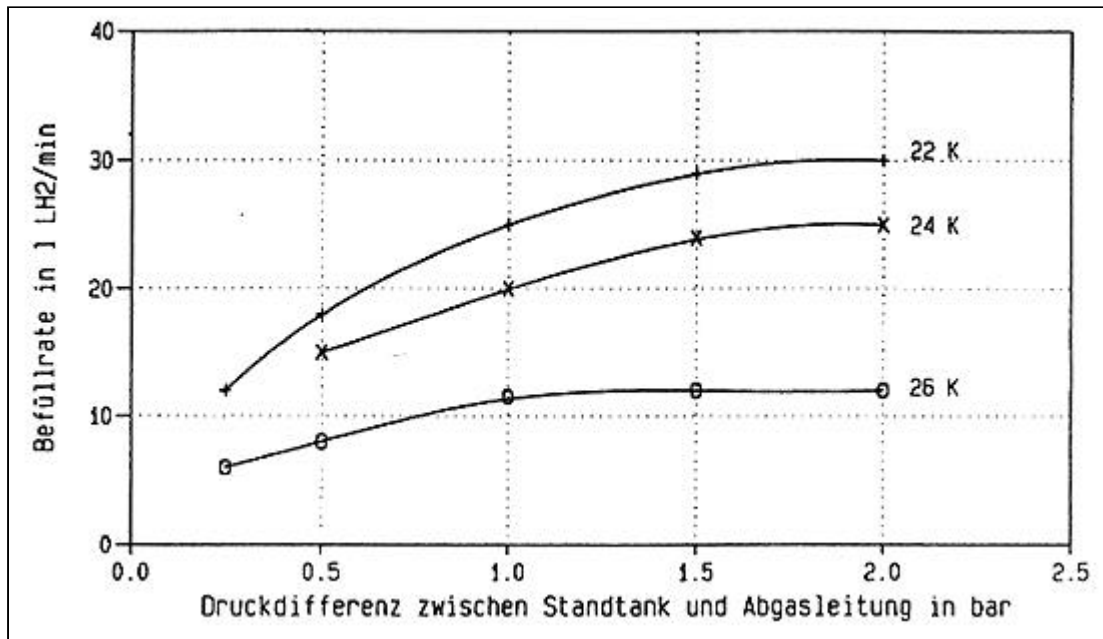


Abb. 7: Befüllrate des LH₂-Fahrzeugtanks in Abhängigkeit von der eingestellten Druckdifferenz zwischen Standtank und Abgasleitung sowie der LH₂-Siedetemperatur im Standtank

Wie in Abbildung 7 zu sehen ist, nimmt die Befüllrate mit abnehmender LH₂-Siedetemperatur deutlich zu. So kann der Fahrzeugtank bereits bei einer Verringerung der Siedetemperatur im Standtank von 26 auf 24 K in weniger als der halben Zeit befüllt werden. Charakteristisch ist auch der asymptotische Verlauf der Kurven mit zunehmender Druckdifferenz. Wenn am abgasseitigen Drosselventil eine zu große Druckdifferenz (z. B. größer als ca. 1,5 bar) zwischen Standtank und Abgasleitung eingestellt wird, sinkt der Druck im LH₂-Fahrzeugtank unter den Siededruck, der zur Temperatur des im Fahrzeugtank befindlichen LH₂ gehört (siehe auch Abb. 1). Dadurch verdampft im Fahrzeugtank enthaltener LH₂ so lange, bis der Gleichgewichtszustand wieder erreicht wird. Die Befüllrate kann aus diesem Grund bei Erreichen des Gleichgewichtssiededrucks nicht weiter erhöht werden. Vielmehr nehmen mit steigender Druckdifferenz zwischen Standtank und Abgasleitung die Verdampfungsverluste zu.

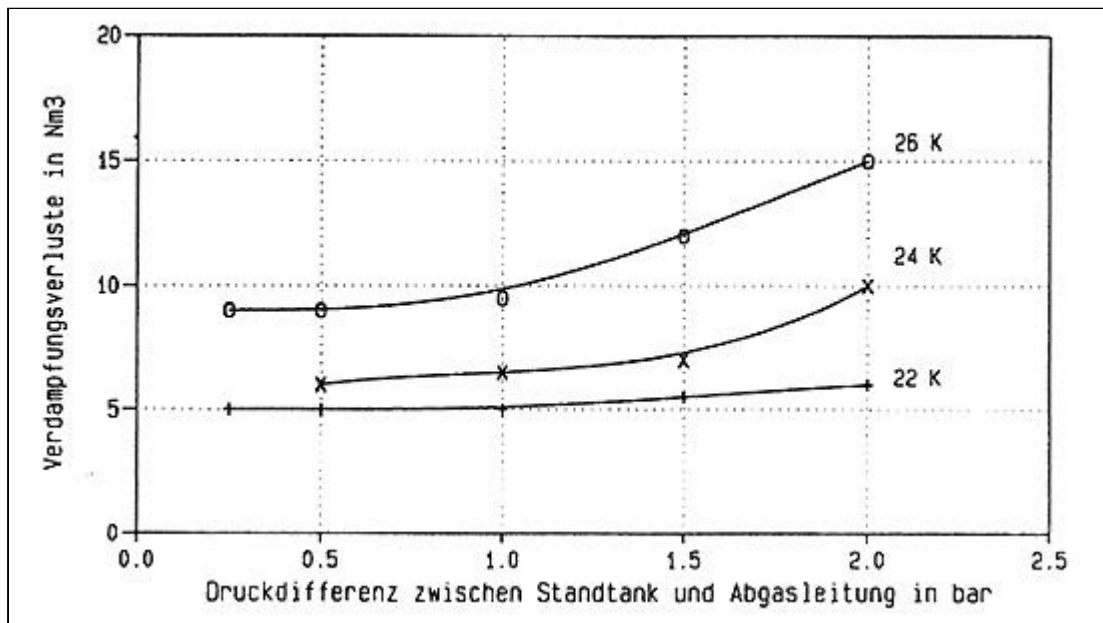


Abb. 8: Verdampfungsverluste beim Füllen des LH₂-Fahrzeugtanks in Abhängigkeit von der eingestellten Druckdifferenz zwischen Standtank und Abgasleitung sowie der LH₂-Siedetemperatur im Standtank

Wie der *Abbildung 8* entnommen werden kann, können die Verdampfungsverluste beim Befüllen des Fahrzeugtanks reduziert werden, wenn unterkühlter LH₂ aus dem Standtank verwendet wird. Überdies bietet unterkühlter LH₂ den Vorteil, daß LH₂ durch den Druckabfall im Leitungssystem nicht sofort verdampft sondern erst der Gleichgewichtszustand angestrebt wird. Außerdem kann zu Beginn des Füllvorgangs die von den Wänden des durchströmten Leitungssystems abgegebene Restwärme zunächst noch von der Flüssigkeit aufgenommen werden, bevor die LH₂-Siedetemperatur erreicht wird.

Während der Betankung sinkt mit steigendem Füllstand die Temperatur im Fahrzeugtank, da sich der einströmende unterkühlte LH₂ mit der bereits im Tank befindlichen Flüssigkeit vermischt. Eine bezüglich Füllgeschwindigkeit und GH₂-Abgasverluste optimale Betankung des verwendeten LH₂-Fahrzeugtanksystems könnte daher durch eine Regelung des Fahrzeugtankdrucks in Abhängigkeit von der Tanktemperatur möglichst nahe dem LH₂-Siedekurvenverlauf (*Abb. 1*) erreicht werden.

Da bei der LH₂-Tankstelle in Neunburg vorm Wald zur Zeit keine derartige Regelung möglich ist, wurde versucht, durch eine stufenweise Erhöhung der Druckdifferenz zwischen Standtank und Abgasleitung während des Befüllens des Fahrzeugtanks diese optimale Betankung zu simulieren. Hierbei bestätigte sich, daß nach dem Abkühlen des Leitungssystems so gut wie kein LH₂ mehr verdampft. Lediglich das beim Einfüllen der Flüssigkeit verdrängte Gaspolster im Fahrzeugtank, das im Normzustand je nach Ausgangsdruck und -temperatur bis zu 4 Nm³ GH₂ entspricht, wurde über den Abgaskamin in die Atmosphäre abgegeben.

Eine Möglichkeit, den hohen Abgasverlust, der durch das Verdrängen des Gaspolsters im LH₂-Fahrzeugtank beim Betanken hervorgerufen wird, zu reduzieren, besteht darin, den Druck im Fahrzeugtank bereits im Fahrbetrieb möglichst weit abzusenken. Bei Verwendung einer kleinen LH₂-Förderpumpe im Fahrzeug zur Versorgung des Fahrzeugmotors, mit der praktisch kein Vordruck im Fahrzeugtank notwendig wäre, könnte die verdrängte Gasmenge auf einen vernachlässigbaren Wert gesenkt werden. Allerdings ist anzumerken, daß derartige Pumpen noch nicht Stand der Technik sind und zusätzliche Verdampfungsverluste beim Einsatz von LH₂ im Fahrzeug verursachen würden.

Mit den gewonnenen Ergebnissen konnte bei der SWB die LH₂-Fahrzeugbetankung gegenüber der Ausgangssituation im April 1991 so weit optimiert werden, daß die Zeit für einen kompletten Betankungsvorgang statt anfangs mehr als 60 Minuten jetzt nur noch ca. 20 Minuten beträgt (*Tab. 1*). Außerdem konnten beim Abkühlen des Leitungssystems, Füllen des LH₂-Fahrzeugtanks und Anwärmen der Kupplung die Verluste, bezogen auf das Tankvolumen des Fahrzeugs, von ursprünglich mehr als 30 % auf weniger als 10 % reduziert werden. Energieoptimierend betrachtet würde bei einer möglichen Weiterverwendung des GH₂-Abgases nur ein Energieverlust entstehen welcher der Verflüssigungsenergie des wiederverwendeten Abgasstroms entspräche.

| | Zeitbedarf in Minuten | |
|--|-----------------------|-----------------|
| | SWB Phase 1 | |
| | Stand April 1991 | Stand Juli 1992 |
| Ankuppeln und Dichtheitsprüfung | 5 | 1 |
| Evakuieren und Spülen des Leitungssystems | 10 | 5 |
| Abkühlen der Füllschläuche und Kupplung | 5 | 2 |
| Befüllen des LH ₂ -Fahrzeugtanks | 10 | 5 |
| Einstellen des Betriebsdrucks im LH ₂ -Fahrzeugtank | 5 | 1 |
| Anwärmen der Kupplung | 20 | 3 |
| Inertisieren und Abkuppeln | 5 | 2 |
| | 60 | < 20 |

Tab. 1: Übersicht Betankungsablauf/Zeitbedarf SWB-Projektphase 1

Neben den genannten Verbesserungen bezüglich Betankungszeit und Verdampfungsverluste haben die Versuche auch dazu beigetragen, die Sicherheit bei der Betankung von

Fahrzeugen mit Flüssigwasserstoffantrieb weiter zu erhöhen. Die für einen geplanten automatischen Betrieb der LH₂-Tankstelle erforderlichen Parameter wurden ausreichend untersucht, so daß nach dem Anschließen der Betankungskupplung an das Versuchsfahrzeug der Tankvorgang per Knopfdruck gestartet werden könnte. Allerdings ist den Vorschriften entsprechend weiterhin eingewiesenes Betriebspersonal notwendig, das den Tankvorgang überwacht und ggf. jederzeit sicher unterbrechen kann.

Ausblick

Eine weitere Verkürzung der Betankungszeit auf einen Wert, der deutlich unter den bisher erreichten ca. 20 Minuten liegt, wird mit der vorgestellten LH₂-Tankstelle in Neunburg vorm Wald, einen störungsfreien und sicheren Betrieb vorausgesetzt, nicht möglich sein. Um LH₂-Fahrzeugtanks der untersuchten Größe in einer akzeptablen Gesamtzeit von maximal 10 Minuten betanken zu können, müssen Modifikationen am Leitungssystem und an der Betankungskupplung vorgenommen werden. Für die jetzige Phase 2 des SWB-Projekts ist daher u. a. vorgesehen, die vorhandene LH₂-Tankstelle und das BMW-Versuchsfahrzeug mit einer neu entwickelten LH₂-Kupplung auszurüsten. Entsprechende Angebote der Linde AG und Messer Griesheim GmbH, die an derartigen Konzepten arbeiten, liegen der SWB vor.

Wie in *Tabelle 2* zu sehen ist, strebt die SWB in der Projektphase 2 an, mit der zu modifizierenden LH₂-Tankstelle neben Pkw auch Busse und Lkw betanken zu können. Neben BMW zeigt als weiterer Fahrzeughersteller auch die MAN Nutzfahrzeuge AG Interesse an einer gemeinsamen Weiterentwicklung der LH₂-Betankungstechnologie bei der SWB.

| |
|---|
| <p>fehlersichere Bedienung der LH₂-Betankungskupplung</p> <p>An- und Abkuppeln möglichst ohne Lufteinschluß</p> <p>automatischer Betankungsablauf nach dem Ankuppeln</p> <p>ständige Überwachung von Sicherheitsfunktionen</p> <p>kontaktlose Signalübertragung zwischen LH₂-Tankstelle und Fahrzeug</p> <p>Unterbrechung des Fahrzeug-Zündkreises während der Betankung</p> <p>Minimierung der GH₂-Abgasverluste</p> <p>LH₂-Betankungskupplung kalt lösbar</p> <p>sofortige Verfügbarkeit der LH₂-Tankstelle für weitere Betankungen</p> <p>Betankung von Pkw, Bus und Lkw</p> <p>Möglichkeit zur Bedienung der LH₂-Betankungskupplung mit Tankroboter</p> <p>Mitarbeit an der Erstellung von Richtlinien für LH₂-Tankstellen</p> |
|---|

Tab. 2: Entwicklungsziele für die automatisch arbeitende LH₂-Tankstelle der SWB-Projektphase 2

Da die LH₂-Füllmenge im Vergleich zu Pkw bei Bussen um etwa den Faktor 5 größer ist, sollte LH₂ - auch im Hinblick auf zukünftige LH₂-Großtankstellen mit mehreren Entnahmestellen - aus energetischen Gründen statt durch Überdruck im Standtank mittels Pumpen zu den Fahrzeugtanks gefördert werden.

Die Versuche bei der SWB haben gezeigt, daß für eine verlustarme und schnelle Befüllung des LH₂-Fahrzeugtanks mit Überdruck unterkühlter LH₂ notwendig ist, der bereits bei der angelieferten Befüllung des Standtanks durch LH₂-Tankfahrzeuge eine möglichst niedrige Temperatur (ca. 20 K) aufweisen sollte. Da der für die Betankung notwendige Überdruck im Standtank durch Kondensation des Gas-Druckpolsters an der kälteren Flüssigkeits-Grenzschicht und den Behälterwänden mit der Zeit sinken würde, muß dem Standtank ständig etwas GH₂ zugeführt werden, um den Druck aufrechtzuerhalten. Dies bedeutet aber neben der normalen Wärmeübertragung durch die Behälterwände eine zusätzliche

unerwünschte Wärmezufuhr in den Standtank, so daß in Folge die Temperatur des LH₂ im Standtank ansteigt und die Wasserstoffverluste zunehmen.

Bei der Verwendung einer LH₂-Förderpumpe ist dagegen auf der Saugseite nur ein geringer Vordruck und somit wenig GH₂ zum Druckaufbau notwendig. Allerdings sollte die Pumpe möglichst ständig auf LH₂-Temperatur gehalten werden, um Abkühlverluste zu vermeiden. Das wäre z.B. durch eine Unterbringung der Pumpe im Standtank ideal gelöst.

Erwähnenswert scheint, daß im Hinblick auf eine möglichst effiziente Nutzung von LH₂ die durch Arbeiten bei der SWB gewonnenen Erkenntnisse auch für das Umfüllen größerer Mengen LH₂ einen Beitrag leisten können. Wichtig ist, daß LH₂ auf dem Weg von der Herstellung zum Verbraucher auf einer möglichst niedrigen Siedetemperatur gehalten wird. Da dies jedoch bei der Lagerung relativ hohe Abdampfverluste zur Folge hätte, sollten z. B. während des Transports der Siededruck und somit die zugehörige LH₂-Temperatur gesenkt werden. Der dabei entstehende GH₂ sollte in diesem Fall als Treibstoff für das LH₂-Tankfahrzeug genutzt werden können.

Trotz der bisherigen, vielversprechenden technischen Erfolge ist der Weg zum Ausbau einer bedarfsgerechten Infrastruktur noch weit.

Demonstrationsprojekte, wie die Solar-Wasserstoff-Anlage in Neunburg vorm Wald, können neben dem für Fachleute interessanten Versuchsbetrieb sowie den daraus abzuleitenden Entwicklungsanforderungen sicherlich auch die Akzeptanz der Bevölkerung gegenüber Wasserstoff als speicherbarem Energieträger erhöhen. Das Interesse an der Solar-Wasserstoff-Technik wird durch die zahlreichen Besuchergruppen in Neunburg vorm Wald bestätigt. In dem eigens für die Öffentlichkeitsarbeit errichteten Mehrzweckgebäude werden von zwei SWB-Mitarbeitern sachdienliche Details vermittelt, wobei auch Wert auf die Verbesserung des Verständnisses energiewirtschaftlicher Zusammenhänge gelegt wird.

Literatur

- [1] *Dr. Reister W. Strobl*: Entwicklungsstand und Perspektiven des Wasserstoffautos VDI-Berichte Nr. 912,1992, VDI-Verlag Düsseldorf
- [2] *A. Szyszka*: Erprobung von Solar-Wasserstoff-Techniken Energie, Jahrg 44, Nr. 3, März 1 992
- [3] *W. Peschka*: Flüssiger Wasserstoff als Energieträger 1984 Springer Verlag Wien New York
- [4] *H. Rüdiger*: Design characteristics and performance of a liquid hydrogen tank system for motor cars Cryogenics 1992 Vol 32, No 3

Autoren

Dipl. -Ing Axel Szyszka ist Geschäftsführer und Projektleiter, *Dipl. -Ing Joachim Tachtler* stellvertretender Leiter Meßprogramm der Solar-Wasserstoff-Bayern GmbH