

Instandsetzung, Wartung und Prüfung:

# Grundlagen der Wasserstofftechnik bei Linienbussen

In Verkehrsunternehmen hält mit der Wasserstofftechnik eine neue Technologie Einzug. Den guten Ruf, den sich diese Technologie erworben hat, gilt es zu bewahren. Deshalb ist beim Betrieb und insbesondere bei Instandhaltungsarbeiten an Linienbussen ein sorgfältiger Umgang mit dem Energieträger Wasserstoff erforderlich.

Um dies zu unterstützen, ist diese Handlungshilfe an Werkstattleiter und sonstige technische Fachleute gerichtet. Sie dient der Planung und dem Betrieb von Werkstätten für die noch junge Wasserstoff-Technologie im ÖPNV.

## Eigenschaften von Wasserstoff

Wasserstoff ( $H_2$ ) ist ein unter Normalbedingungen farbloses, geruchloses und ungiftiges Gas. Bei  $-252,7^\circ C$  und Normaldruck kondensiert Wasserstoff zu einer farblosen Flüssigkeit, bei  $-259,2^\circ C$  kristallisiert er zu einem weißen Feststoff. Ein Liter flüssiger Wasserstoff ergibt ca. 750 l gasförmigen Wasserstoff bei Normaldruck und Normaltemperatur.

Wasserstoffgas hat eine sehr geringe Dichte von  $0,09 \text{ g/dm}^3$ . Es ist das leichteste Gas, etwa 14-mal leichter als Luft und somit leicht flüchtig. Bei geringen Wasserstoffmengen ist eine sehr schnelle Diffusion zu erwarten.

Bei Wasserstoff wird zur Geruchswahrnehmung bei Leckagen keine Odorierung vorgenommen, weil nicht ausgeschlossen werden kann, dass die zugesetzten Geruchsstoffe bei Metallbauteilen im Wasserstoffsystem Korrosionseffekte hervorrufen. Undichtigkeiten können daher nur mit speziellen Gassensoren aufgespürt werden.

Ein Wasserstoff-Luft-Gemisch lässt sich theoretisch bereits ab einem Anteil von 4 Vol.-% Luft im Gemisch entzünden (Untere Explosionsgrenze – UEG = 4 Vol.-%). In der Praxis sind mehr als 6 % erforderlich, um eine



nennenswerte Reaktion zu erhalten. Die obere Explosionsgrenze (OEG) liegt bei einem Anteil von 77 Vol.-%  $H_2$  und ermöglicht noch die Zündung eines sehr fetten Gemisches.

Innerhalb der Explosionsgrenzen ergibt sich ein Wasserstoff-Luft-Gemisch, das mit der sehr geringen Mindestzündenergie von  $0,02 \text{ mJ}$  zur Explosion gebracht werden kann. Im Vergleich zu Erdgas ist Wasserstoff reaktiver und wegen des größeren Explosionsbereichs sowie der geringeren Zündenergie als gefährlicher einzustufen.

## Gefährdungsbeurteilung – abgeleiteter Explosionsschutz

Aufgrund der Anforderungen der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) ist eine Gefährdungsbeurteilung der explosionsgefährdeten Bereiche, einschließlich der Fahrzeuge, erforderlich. Nach der Gefährdungsbeurteilung sind angemessene Schutzmaßnahmen zu treffen und anschließend im Explosionsschutzdokument festzuhalten. Das Explosionsschutzdokument ist stets auf dem aktuellen Stand zu halten. Die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sind regelmäßig zu

unterweisen, eine schriftliche Betriebsanweisung ist ebenfalls erforderlich.

Explosionsgefährdete Bereiche werden nach Häufigkeit und Dauer des Auftretens von gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre in Zonen unterteilt. Für Wasserstofffahrzeuge sind die Zonen 0,1 und 2 relevant:

- Zone 0 ist ein Bereich, in dem eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre als Gemisch aus Luft und brennbaren Gasen, Dämpfen oder Nebeln ständig, über lange Zeiträume oder häufig vorhanden ist. Die Zone 0 ist praktisch nur in den Wasserstoffkomponenten der Fahrzeuge sowie unmittelbar an deren Austrittsöffnungen vorhanden.
- Zone 1 ist ein Bereich, in dem sich bei Normalbetrieb gelegentlich eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre als Gemisch aus Luft und brennbaren Gasen, Dämpfen oder Nebeln bilden kann. Die Zone 1 ist z. B. bei den betriebsmäßig undichten  $LH_2$ -Fahrzeugen ohne Boil-off-System oberhalb der Öffnungen der Abblasleitung am Fahrzeug vorhanden, weil hier im Normalbetrieb Wasserstoff austritt.

- Zone 2 ist ein Bereich, in dem bei Normalbetrieb eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre als Gemisch aus Luft und brennbaren Gasen, Dämpfen oder Nebeln normalerweise nicht oder nur kurzzeitig auftritt. Die Zone 2 umfasst z. B. den Bereich der Wasserstoffwerkstatt. Auch für diese Zone sind besondere Maßnahmen erforderlich. Diese werden im Weiteren bei der Werkstattausrüstung beschrieben.

Trotz der hohen Reaktionsfähigkeit des Wasserstoffes sollte die Gefährdung nicht überschätzt und die Einteilung der Zonen unter Berücksichtigung der geringen Dichte, der hohen Diffusion von Wasserstoff und den damit verbundenen Eigenschaften realistisch abgeschätzt werden.

### Fahrzeugtechnik

Für die Speicherung des Wasserstoffes auf den Fahrzeugen sind zwei Varianten entwickelt worden. In beiden Fällen wird der Wasserstoff in Druckbehältern auf dem Dach der Fahrzeuge gespeichert.



Dieses Serienfahrzeug ist mit moderner Brennstoffzellentechnik ausgestattet und wird im täglichen Fahrbetrieb erprobt.

### ■ Fahrzeuge mit flüssigem Wasserstoff (LH<sub>2</sub>-Fahrzeuge)

Für LH<sub>2</sub>-Fahrzeuge (LH<sub>2</sub> = Liquefied H<sub>2</sub>) ergeben sich aufgrund der Speicherung des Energieträgers in flüssiger tieftemperierter Form besondere sicherheitstechnische Anforderungen an die Fahrzeuge und die Werkstattgestaltung. Da sich die Druckbehälter thermisch nicht vollständig gegen die Umgebung isolieren lassen, steigt der Druck im System kontinuierlich an. Um den maximalen Betriebsdruck der Speicherflaschen nicht zu überschreiten, muss deshalb ständig Wasserstoff in geringen Mengen nach außen über das Boil-off-Ventil (Abblasventil) abge-

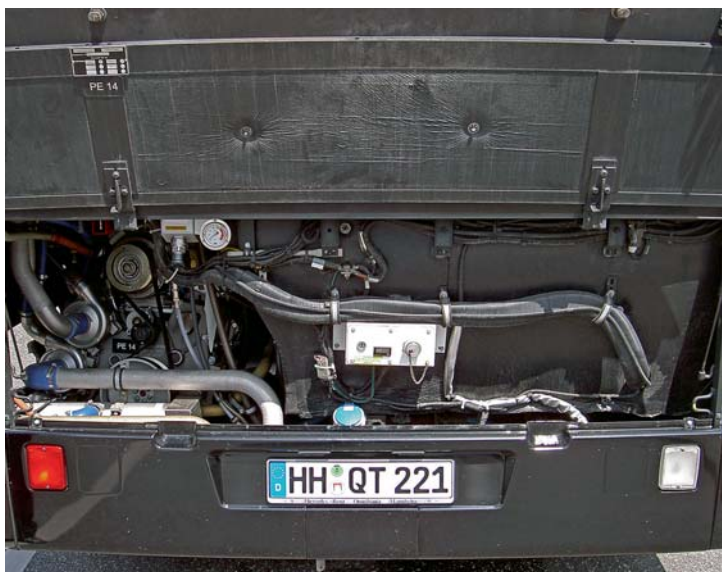
geben werden. Dabei dürfen Komponenten des Fahrzeugs den abgeführten Wasserstoff nicht zünden können. LH<sub>2</sub>-Fahrzeuge ohne Boil-off-Management sind aufgrund dieser Konstruktion als betriebsmäßig undicht zu betrachten. Da an den Austrittsöffnungen dieser Fahrzeuge immer ein zündfähiges Gemisch entsteht, sind besondere Sicherheitsmaßnahmen in Werkstätten, Wartungs- und Abstellhallen erforderlich. Darüber hinaus verfügen diese Fahrzeuge über eine Reihe von Sensoren, die austretenden Wasserstoff feststellen und die Wasserstoffzufuhr dann sofort unterbrechen.



Wasserstoff erwärmt sich beim Tankvorgang. Nach kurzer Abkühlphase hat der Tank mit 350 bar seinen maximalen Betriebszustand erreicht.



Aufgrund der auf dem Fahrzeugdach angeordneten technischen Ausrüstung ist bei einer Wagenwäsche die Dachbürste abzuschalten.



Nach Einfahrt in die Werkstatt und beim Tanken ist das Fahrzeug zu erden.

■ **Fahrzeuge mit Druckwasserstoff (CGH<sub>2</sub>-Fahrzeuge)**

Bei CGH<sub>2</sub>-Fahrzeugen (CGH<sub>2</sub> = Compressed Gaseous H<sub>2</sub>) erfolgt die Speicherung des Wasserstoffs in Druckgasbehältern auf dem Fahrzeugdach. Bei Umgebungstemperatur und einem Druck von 350 bar werden ca. 40 kg Wasserstoff mitgeführt. Dieser Vorrat reicht für die durchschnittliche Tagesstrecke von 250 km. Neben den Druckbehältern und den Brennstoffzellen (Stacks) sind auch die benötigten Nebenaggregate wie Pumpen, Filter und Kühleinrichtungen auf dem Dach angeordnet.

Die Druckgasbehälter bestehen aus reinem Aluminium, die außen zur Gewährleistung der Festigkeit mit Kohlefaser verstärkt sind. Dadurch ergibt sich ein sehr geringes Gewicht bei hoher Speicherkapazität, eine geringe Verlustrate und eine hohe Festigkeit. Der Betriebsdruck beträgt bis zu 350 bar bei 15 °C, wobei hier ein Sicherheitsfaktor von 3,5 bis zum Bauteilversagen berücksichtigt ist. Derzeit werden Druckgasbehälter entwickelt, die einen Betriebsdruck bis zu 750 bar aufweisen können. Die Fahrzeuge sind betriebsmäßig als dicht anzusehen, weil die Druckgasflaschen auch dem höheren Druck bei Normalbedingungen standhalten.

■ **Sicherheitseinrichtungen bei CGH<sub>2</sub>-Fahrzeugen**

Durch die Anordnung der Druckgasflaschen auf dem Dach der Fahrzeuge gelangt bei einem Leck in den Tanks oder den Leitungen der austretende

Wasserstoff nicht in die Fahrgastkabine, sondern kann sofort in die Atmosphäre entweichen.

Die Drucktanks sind mit elektronischen Ventilen ausgestattet. Sobald das Fahrzeug stromlos geschaltet wird, verschließen sich die Behälter. Zusätzlich sind die Tanks mit Mengenerfassungssensoren und Abschaltventilen ausgestattet, durch die sofort alle Verbindungsleitungen geschlossen werden, wenn eine größere Menge Wasserstoff als vorgegeben ausströmt. Bei einem Druckanstieg auf mehr als 450 bar wird der gesamte Wasserstoffinhalt über ein zentrales Sicherheitsventil auf dem Dach abgelassen.

Bei einem Fahrzeugbrand wird nach Auslösung einer Schmelzsicherung der Wasserstoff aus den Druckgasflaschen gezielt abgelassen. Es kommt nicht zu einer Explosion, weil der freigesetzte Wasserstoff kontrolliert mit einer Diffusionsflamme abbrennt.

**Fahrzeug-Werkstätten**

Im Werkstattbereich darf im Normalbetrieb kein zündfähiges Gemisch entstehen. Deshalb sind alle Arbeitsabläufe so zu organisieren, dass bei Wartungs-, Prüfungs- und Instandsetzungsarbeiten kein Wasserstoff austreten kann. Tritt dennoch eine Leckage auf, ist der Wasserstoff abzuführen oder durch starke Lüftung zu verdünnen.

Tritt bei einem Fahrzeug im Betrieb aufgrund einer Störung oder eines

Schadens Wasserstoff aus, so wird dieses Fahrzeug nicht in die Werkstatt gefahren, sondern auf einem Serviceplatz im Freien versorgt. Ist keine einfache Fehlerbehebung möglich, so ist auf diesem Serviceplatz der im Fahrzeug vorhandene Wasserstoff bis auf eine technisch bedingte Restmenge abzulassen, bevor eine Instandsetzung in der Werkstatt erfolgt. Um die Leckagen zu prüfen, ist in jedem Fall ein mobiles Messgerät erforderlich.

■ **Sicherheitssysteme und -maßnahmen**

Zur Detektion von Wasserstoff sind Sensoren erforderlich. Diese Sensoren sind im Deckenbereich der Werkstatt anzuordnen und sollen bei Auftreten einer Gaskonzentration optisch und akustisch warnen. Die Wasserstoffsensoren sollen bei spätestens 20 % der UEG einen Voralarm und beim zweifachen dieses Wertes den Hauptalarm auslösen. Die Sensorik an der Hallendecke kann jedoch nur große Leckagen erfassen, weil der Wasserstoff bei kleineren Leckagen sofort diffundiert und nur zu einem kaum messbaren Anstieg der Konzentration führt.



Bei einem Druckanstieg über 450 bar im System wird der Wasserstoff aus dem Fahrzeug über die Release-Leitung abgelassen.

Das Warnsystem ist mit der elektrischen Anlage und dem Lüftungssystem funktional zu koppeln. Im Alarmfall sollen die Lüftungen auf maximaler Leistungsstufe eingeschaltet sein und, sofern die Konstruktion des Hallendaches diese Möglichkeit bietet, zusätzliche Entlüftungsöffnungen freigegeben werden. Zur Vermeidung eines möglichen Zündfunken wird bei einer Alarmierung, mit Ausnahme der explosionsgeschützten Komponenten, die gesamte elektrische Anlage einschließlich eines innenliegenden Torantriebs bis auf eine explosionsgeschützte Notbeleuchtung abgeschaltet. Im Alarmfall sind die Arbeiten zu unterbrechen und alle Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter haben die Werkstatt und die unmittelbare Umgebung zu verlassen.

Das Lüftungssystem und die Entlüftungsöffnungen sollen an den höchsten Punkten im Deckenbereich angeordnet sein. Für den Alarmfall ist die Lüftung so ausreichend zu dimensionieren, dass der Wasserstoff aus dem Deckenbereich schnell abgeführt werden kann. Wenn sich der Antrieb innerhalb der Halle befindet, muss der Lüfter explosionsgeschützt ausgelegt sein. Dies ist nicht erforderlich, wenn die Möglichkeit besteht, den Lüfterantrieb auf dem Dach außerhalb des explosionsgefährdeten Bereiches anzuhängen. Dies verringert den finanziellen Aufwand deutlich.

Als weitere Maßnahme in der Werkstatt wird die Installation einer Abblasdruckleitung empfohlen, an die die Behälterringleitung der Fahrzeuge angeschlossen wird, die ggfs. auch zum Abblasen von Wasserstoff genutzt werden kann.

Für eine Instandsetzung von Wasserstoffkomponenten muss kein abgetrennter Raum zur Verfügung stehen, weil von dem Restwasserstoff, z. B. aus den Stacks, keine Gefahr mehr ausgeht. Es ist ausreichend, einen gut beleuchteten Arbeitsbereich einzu-



richten, in dem die Instandsetzung der Komponenten erfolgen kann. Für kleinere Busse und Pkw haben sich für abgetrennte Werkstattbereiche durchsichtige Kunststoff-Lamellen-Vorhänge bewährt, die auch die erforderliche Leistung der Lüftung reduzieren, was sich positiv bei den Kosten auswirkt.

Die Infrastruktur der Werkstatt ist an die besonderen Gegebenheiten der wasserstoffbetriebenen Busse anzupassen. So ist beispielsweise für die Einfahrt die Höhe der Fahrzeuge von 3,70 m zu berücksichtigen. Für Arbeiten auf dem Fahrzeugdach sind entsprechend hohe Arbeitsbühnen mit Geländer bereitzustellen. Um sicher auf das Dach zu gelangen und dort zu arbeiten, sind Seitengerüste gegen Absturz notwendig. Zusätzlich zur werkstattüblichen Standardausrüstung wird ein Kran mit 500 kg Traglast zum Abheben der Dachkomponenten benötigt.

Für die Instandsetzung von LH<sub>2</sub>-Fahrzeugen sind zusätzliche Schutzmaßnahmen zu beachten. Neben dem Anschluss an die Entlüftung sind die Besonderheiten der Gasanlage zu beachten. Hier sind abhängig vom Fahrzeugtyp Sicherheitsmaßnahmen festzulegen.

Da auf dem Fahrzeugdach viele Aggregate angeordnet sind, ist bei Instandhaltungsarbeiten mindestens durch Gerüste der Schutz gegen Absturz zu gewährleisten. Für die Montage dieser Aggregate ist ein Kran erforderlich.

## Durchführung von Instandhaltungsarbeiten

Alle Arbeiten, bei denen die Gasleitung geöffnet wird, werden als »Arbeiten an Gasleitungen« – im Sinne der BG-Regel »Betreiben von Arbeitsmitteln« (BGR 500) Kap 2.31 bezeichnet. Im Freien können solche Arbeiten ohne weitere Lüftung durchgeführt werden, in Werkstätten ist nach der BG-Regel »Fahrzeuginstandhaltung« (BGR 157) eine technische Lüftung mit mindestens einem dreifachen Luftwechsel pro Stunde erforderlich.

### ■ Arbeiten an der Gasanlage

Vor Beginn von Arbeiten an Leitungen unter Gasdruck sind die im Arbeitsbereich befindlichen Gasleitungen auf ausströmendes Gas zu überprüfen. Wird eine Gasleitung geöffnet, muss besonders sorgfältig vorgegangen werden. So dürfen unter Druck stehende Gasleitungen nur geöffnet werden, wenn das Fahrzeug vorher nicht entleert werden konnte und mechanische Gefahren durch das expandierende Gas nicht entstehen können. Grundsätzlich ist das abzulassende Gas dabei gefahrlos abzuführen, weiter ist darauf zu achten, dass die erforderliche persönliche Schutzausrüstung, z. B. Handschuhe, getragen wird.

Üblicherweise wird ein Teil der Spannungsversorgung über das Zündschloss am Fahrerarbeitsplatz unterbrochen. Damit wird auch die Gaszufuhr aus den Behältern gestoppt, aber die Leitungen stehen noch unter Druck.

Um dennoch Arbeiten an der Gasleitung sicher durchführen zu können, muss der Druck abgebaut werden. Für Arbeiten an der Gasanlage in drucklosem Zustand der Leitungen ist die Gaszufuhr der Fahrzeuge grundsätzlich auf der Hochdruckseite im Bereich der Druckbehälter zu unterbrechen. Danach sollen die am Fahrzeug vorhandenen Ventile geöffnet werden, sodass beim Öffnen der Gasleitungen

Zeichen für explosionsgefährdete Bereiche:



Verbotsschild P 02



Warnschild W 21

nur noch Restwasserstoff in der Leitung vorhanden ist. Dieser kann aufgrund der niedrigen UEG noch zu einer Detonation führen. Daher muss auch hier mit mobilen Geräten überprüft werden, ob Leckagen am Fahrzeug vorhanden sind.

Wegen der hohen Systemdrücke ist davon auszugehen, dass sich im Fall einer Leckage eine verdünnte Wasserstoffwolke um eine Austrittsstelle verteilt. Versuche haben ergeben, dass bis zu einem Umkreis von 1 m um eine Austrittsstelle mit einer explosionsfähigen Atmosphäre zu rechnen ist, die allerdings aufgrund der schnellen Diffusion max. 1 sek. besteht.

Zündquellen dürfen hier nicht in der näheren Umgebung vorhanden sein. Dieses gilt sowohl für die technische Ausstattung der Werkstatt im Hinblick auf den Explosionsschutz als auch für verhaltensbedingte Gefahren, z. B. das Rauchen am Arbeitsplatz, Schweißarbeiten, die Benutzung nicht explosionsgeschützter Elektrogeräte. Bei entsprechenden Arbeiten ist der explosionsgefährdete Bereich mit dem Warnschild W 21 und dem Verbotsschild P 02 zu kennzeichnen. Dieses gilt auch für abgesperrte Bereiche in einer Werkstatt, wenn keine separate Wasserstoffwerkstatt zur Verfügung steht.

Grundsätzlich ist nach jeder Reparatur oder dem Tausch von Komponenten eine Dichtigkeitsprüfung der Anlage vorzunehmen.

Zeigen die Wasserstofffahrzeuge über ihre eigenen Sensoren ein Leck an, so ist zunächst im Freien mit portablen Lecksuchgeräten das Fahrzeug zu untersuchen. Hilfreich ist es, wenn für

die Arbeiten Checklisten zur Verfügung stehen, insbesondere für selten durchgeführte Tätigkeiten. Wenn eine gefährliche Wasserstoffkonzentration entstehen könnte, ist die Gasanlage im Freien zu entleeren.

■ **Besondere Ausbildung der Beschäftigten**

Für Arbeiten an der Gasanlage ist eine besondere Ausbildung der Mitarbeiter erforderlich, die sich an den angeführten Regeln orientiert. Diese soll die Prüfung des Fahrzeuges, das Erkennen von Leckagen und die Suche nach einem Leck mit Hilfe von Leckspray beinhalten. Weiter ist es erforderlich, dass die Mitarbeiter in die Nutzung von mobilen Gasdetektoren eingewiesen sind und diese Detektoren sicher handhaben können. Zudem ist die Kenntnis vom Wechsel

der Gasflaschen, von Ventilen, Druckminderern, defekten Gasleitungen inklusive Fittings sowie ggf. des Wechsels der Brennstoffzelle, die als komplette Einheit ausgebaut wird, von besonderer Wichtigkeit. Auch ist es erforderlich, dass das Personal vor Beginn der Arbeiten die Gasanlage des Fahrzeuges sicher entleeren, anschließend spülen, nach der Reparatur auf Lecks prüfen sowie inertisieren und neu füllen kann.

■ **Wartungsarbeiten**

Bevor Wartungsarbeiten in der Werkstatt begonnen werden können, sind folgende Maßnahmen erforderlich:

- nach Einfahrt in die Werkstatt ist der Bus zu erden,
- direkt danach ist die Abblasteitung an das Fahrzeug anzuschließen.

Dieses kann z. B. durch eine Lichtschranke unterstützt werden, die der Bus bei der Einfahrt durchfährt. Sind die beiden Sicherheitsmaßnahmen nicht innerhalb einer bestimmten Zeit durchgeführt, so werden alle nicht explosionsgeschützten Geräte abgeschaltet und es ertönt ein akustischer Alarm.

Abgase treten nicht auf, lediglich Wasserdampf wird ausgestoßen. Die Einfahrt in Werkstätten ist also ohne gesundheitliche Belastungen durch Abgase möglich.



Für kurze Wartungsarbeiten an  $\text{CGH}_2$ -Fahrzeugen – mit Ausnahme der Gasanlage – sind keine speziellen Werkstätten erforderlich, weil diese im Normalbetrieb als dicht angesehen werden. Für  $\text{LH}_2$ -Fahrzeuge sind dagegen die zuvor beschriebenen technischen Maßnahmen erforderlich. Zu beachten ist auch, dass nur Fahrzeuge mit Boil-off-Management oder bei ausreichender Belüftung in die Werkstatt einfahren dürfen.

Ist beispielsweise kurzfristig ein Radwechsel erforderlich, kann dieser in der konventionellen Werkstatt durchgeführt werden. In den Wartungsbereichen dürfen jedoch in der Nähe der Baugruppen der Gasanlage keine Schweißarbeiten ausgeführt werden. Sind Schweißarbeiten erforderlich, so ist das bereits gasentleerte Fahrzeug zu inertisieren.

In den Verkehrsbetrieben stehen für Linienbusse Fahrzeugwaschanlagen zu Verfügung. Diese Anlagen können genutzt werden, sofern sie über die notwendige Höhe verfügen und vorhandenen Dachbürsten deaktiviert werden können.

### ■ Arbeiten an elektrischen Anlagen und Komponenten

Gegenüber der herkömmlichen Bordnetz-Spannung von 24 V bei Omnibussen mit Dieselantrieb beträgt die Speisespannung der Antriebsmotoren bis zu 600 V DC. Deshalb sind bei der Beschaffung von Linienbussen mit Elektroantrieb auch Planungen für deren Instandhaltung erforderlich. Die Instandhaltungsarbeiten sind unter Berücksichtigung der elektrischen Gefährdung sorgfältig zu organisieren und von fachlich qualifiziertem Personal auszuführen. Die 5 Sicherheitsregeln für das Arbeiten an elektrischen Anlagen sind einzuhalten.

Instandhaltungsarbeiten an den elektrischen Antrieben müssen vielfach zeitgleich mit anderen Arbeiten an mechanischen Komponenten durch-



Diese Produktionsanlage für Druckwasserstoff steht auf dem Betriebshof Hummelsbüttel der Hamburger Hochbahn AG. Der Elektrolyseur produziert in 24 Stunden ca. den Tagesbedarf von drei Wasserstoffbussen.

geführt werden. Deshalb besteht hier Bedarf für eine Koordinierung dieser Arbeiten. Arbeiten am Motor zusammen mit Arbeiten an den elektrischen Komponenten sind in der Regel nicht möglich. Sie können sogar lebensgefährlich sein, wenn durch den laufenden Motor eine Speisung mit elektrischer Energie erfolgt und somit die elektrischen Komponenten mit Spannung versorgt werden.

Mit Arbeiten an elektrischen Komponenten dürfen nur Beschäftigte beauftragt werden, die über die erforderliche Qualifikation und ausreichende praktische Erfahrung verfügen. Diese Arbeiten sind daher von einer Elektrofachkraft oder unter deren Leitung auszuführen. Elektrofachkräfte für Arbeiten an Komponenten eines elektrischen Antriebes sind Beschäftigte mit einer abgeschlossenen elektrotechnischen Ausbildung, z. B. aus der Energieanlagen- oder Elektroinstallation. Auch Beschäftigte, die elektrische Komponenten von Schienenbahnen instand setzen, können bei hinreichender praktischer Erfahrung qualifiziert sein.

Kfz-Elektriker oder Kfz-Schlosser können durch eine Zusatzqualifikation die erforderlichen Kenntnisse und praktischen Erfahrungen erlangen und danach als Elektrofachkraft für diese Arbeiten eingesetzt werden. Für den Umfang der Ausbildung gibt es Hin-

weise in den BG-Grundsätzen »Ausbildungskriterien für festgelegte Tätigkeiten im Sinne der Durchführungsanweisungen zur UVV »Elektrische Anlagen und Betriebsmittel (BGV A 3)« (BGG 944).

### ■ Unterweisungsinhalte

Die Beschäftigten sind über mögliche Gefährdungen zu unterweisen.

Relevante Unterweisungsthemen sind:

- Explosionsgrenzen, Wasserstoffgemische,
- Ausbreitung von brennbaren Gemischwolken,
- Flammenbildung, Wasserstoffbrand,
- Wasserstoffexplosion und -deflagration,
- starke Druckerhöhungen,
- Beherrschbares bzw. nicht beherrschbares Leck am wasserstoffführenden System,
- Bersten von druckführenden Leitungen,
- Verunreinigungen von Wasserstoff, beispielsweise mit Oxidationsmittel oder Inertgas,
- Fehler beim Spülen des Systems,
- Flüssigwasserstofflachen,
- typische Fehler in der Instandsetzung,
- frühere Unfälle/kritische Situationen,
- Verhalten der Mitarbeiter (Rauchverbot, Schweißarbeiten),
- Notfallszenarien,
- Erste Hilfe, Kaltverbrennungen.



In den acht Speicherrohren wird das verdichtete Gas bei 430 bar vorgehalten. Wichtig ist hier ein Anfahrerschutz für Fahrzeuge.

Das Tragen von persönlicher Schutzausrüstung (PSA) mindert wirksam die Folgen von Unfallereignissen. Abhängig von der jeweiligen Werkstattsituation ist folgende PSA erforderlich:

- Schutzbrille,
- ggf. vollständiger Gesichtsschutz bei der Montage/Demontage von unter Druck stehenden Leitungen und Bauteilen,
- Schutzhandschuhe für Arbeiten an Flüssigwasserstoffanlagen.

Darüber hinaus ist erforderlich:

- leitfähige Kleidung aus nicht synthetischem Material,
- leitfähige geschlossene Schuhe,
- portable Wasserstoffsensoren.

Auf die spezifischen Gefährdungen muss im Einzelnen eingegangen werden: So dürfen bei LH<sub>2</sub>-Fahrzeugen nicht-isolierte Bauteile der Gasanlage nur mit Handschuhen berührt werden. Erfahrungsgemäß entstehen häufig Probleme durch Nachlässigkeiten im Umgang mit offenen Flammen, insbesondere durch Rauchen und bei Schweißarbeiten. Deshalb ist hier eine besonders konsequente Personalführung notwendig.

### Abstellen und Betanken

Das Abstellen der Fahrzeuge ist im Hinblick auf Brand- und Explosionsgefahren weniger problematisch. Das Brandrisiko ist ähnlich dem von Dieselfahrzeugen einzuschätzen.

#### ■ Abstellen im Freien

Wasserstofffahrzeuge können ohne Bedenken im Freien abgestellt werden. Allerdings sind jahreszeitliche Besonderheiten zu bedenken. Insbesondere im Winter muss berücksichtigt werden, dass die Brennstoffzellen einfrieren können, was aber durch eine Beheizung der Brennstoffzellen vermieden wird. Die Gasanlage ist so ausgelegt, dass sie auch im Sommer bei längerer Sonneneinstrahlung dicht bleibt.

#### ■ Garage

Fahrzeuge mit Druckwasserstoff (CGH<sub>2</sub>) können grundsätzlich in geschlossenen Räumen abgestellt werden, weil sie über ein betriebsmäßig dichtes Gasystem verfügen. Das früher übliche Einstellverbot für Druckgasfahrzeuge ist nicht mehr in den Garagenverordnungen der Bundesländer enthalten und somit ist ein Abstellen in geschlossenen Räumen ohne baurechtliche Genehmigung und Ausnahmegenehmigung möglich.

Eine besondere Lüftung für CGH<sub>2</sub>-Fahrzeuge kann abhängig von der Konstruktion des Garagendaches, z. B. bei Flachdächern, erforderlich sein. Entlüftungsöffnungen können mit den erforderlichen Rauchabzugsklappen kombiniert werden. Ähnlich wie für die Werkstatt beschrieben, soll auch hier ab 20 % der UEG ein akustisches und optisches Warnsignal ertönen, welches zum Verlassen der Garage auffordert und automatisch die Zwangsbelüftung

aktiviert. LH<sub>2</sub>-Fahrzeuge ohne Boil-off-Management sind betriebsmäßig undicht. Sollen diese Fahrzeuge in einer Garage abgestellt werden, so sind besondere Maßnahmen des Explosionsschutzes erforderlich. Dieses können beispielsweise an den Abstellplätzen installierte Entlüftungskamine für die Abblasleitung sein.

#### ■ Tankstellen

Wasserstoffbusse werden derzeit an Tankstellen mit einem Druck von 430 bar betankt. Unmittelbar nach der Betankung liegt der Druck fahrzeugseitig bei bis zu 380 bar. Nachdem der Tank etwa das Temperaturniveau der Umgebung erreicht hat, liegt der fahrzeugseitige Druck bei 350 bar.



Diese Wasserstoff-Tankstelle für Pkw und Busse ist mit einem zentral angebrachtem NOT-AUS-Schalter ausgerüstet.



Wasserstoffbusse sind in Hamburg und Berlin schon Teil des Straßenbildes geworden. Die Fahrerinnen und Fahrer dieser Fahrzeuge sind besonders zu schulen.

## Betrieb von Wasserstofffahrzeugen

Beim Betrieb der Fahrzeuge in Hamburg hat sich ein fester Kreis von eingewiesenen Fahrern bewährt, da diese Fahrzeuge ein deutlich anderes Fahrverhalten aufweisen. Die Fahrer können der Werkstatt qualifizierte Angaben bei Störungen und Fehlern machen, aber auch interessierten Fahrgästen Auskünfte zum Fahrzeug geben. Gerade bei Störungen können diese Fahrer wertvolle Hinweise für eine Störungsbeseitigung oder eine Instandsetzung vor Ort geben. In vielen Fällen kann so ein aufwändiges Abschleppen vermieden werden. Auch in anderen Störungsfällen oder bei Unfällen kann wirksam unterstützt werden, da die Fahrzeugtechnik z. B. bei Polizei und Feuerwehr noch weitgehend unbekannt ist.

## Fazit und Ausblick

Die bisherigen Erfahrungen mit den realisierten Sicherheitskonzepten sind positiv. Ernsthafte Unfälle sind bisher nicht bekannt geworden.

Zukünftig werden diese Fahrzeuge nicht mehr unter Versuchsbedingungen betrieben, sondern müssen wirtschaftlichen Anforderungen genügen. Dafür wird beispielsweise zusätzlicher Platz auf einem Betriebshof benötigt. Betrachtet man eine kleine Flotte von 30 Fahrzeugen und geht von der

üblichen Zeit von 15 min für den Betankungsvorgang aus, so ist eine reine Tankzeit von 7,5 h erforderlich. Um einen wirtschaftlichen Betriebsablauf sicherzustellen, ist pro 20 Fahrzeuge jeweils eine Tankspur erforderlich. Im Gegensatz dazu kann für einen Dieselbus die Durchlaufwartung mit Fahrzeugwäsche, Betankung, Tachoscheibentausch und Fahrzeuggrobreinigung innerhalb von 10 min auf einer Spur abgeschlossen werden. Damit reicht eine Spur in der Durchlaufwartung für mehr als 30 Diesel-Fahrzeuge aus.

Auf dem Betriebshof muss ein großer Wasserstoffvorrat vorgehalten werden, der einen erheblichen Platzbedarf erfordert. Für 30 Fahrzeuge ist eine Menge von ca. 1.200 kg Wasserstoff täglich vor Ort notwendig. Dieses erfordert eine Wasserstoff-Tankstelle mit mehreren Zapfsäulen, weil die Anlieferung von komprimiertem Wasserstoff mittels Straßen-Trailer auf einen im Stadtgebiet befindlichen Betriebshof nicht sinnvoll und wirtschaftlich ist. Insbesondere ist es von Nachteil, dass die Trailer beim direkten Betanken den notwendigen Druck nicht erreichen.

Bei den bereits durchgeführten und noch laufenden Projekten mit Wasserstofffahrzeugen hat sich gezeigt, dass diese Technologie auch im Linienbetrieb in Verkehrsunternehmen eingesetzt werden kann. Ein besonderes Augenmerk ist auf das Verhalten der Mitarbeiter zu richten, damit durch sicheren Umgang mit dieser Technologie schwere Schäden vermieden werden. Die Sicherheit beim Betrieb der Fahrzeuge und vor allem in der Instandhaltung ist ein wichtiger Faktor, um den positiven Ruf dieser Technologie auf Dauer zu gewährleisten.



Auch mit Brennstoffzellen ausgestattete Pkw werden in Verkehrsunternehmen eingesetzt. Dies ist Chance und Herausforderung zugleich.