



Education in Hydrogen Technologies Area

WASSERSTOFF-TANKSTELLEN



Co-funded by
the European Union

Project is supported
within the Erasmus+ programme
2021-1-CZ01-KA220-VET-000028073

INHALT

Inhalt.....	2
Einleitung.....	4
Einleitung – Geschichte	4
1 Vergleich eines Wasserstoffautos und eines Elektroautos	8
2 Rechtsvorschriften über den Betrieb und die Instandhaltung von Tankstellen	9
2.1 Grundnomenklatur nach Technischen Regeln TPG 304 03	11
2.2 Wasserstofftankstellen – EN 17127 - Wasserstoff-Zapfsäulen für den Außenbereich mit Füllprotokollen	15
2.3 Wasserstofftankstellen – ISO 19880-1:2020 - Wasserstoffgas – Tankstellen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen	15
2.4 Wasserstoffeigenschaften – EN 17124 - Wasserstoffkraftstoff - Produktspezifikation und Qualitätssicherung für Wasserstoffgastankstellen - Protonenaustauschmembran (PEM)- Brennstoffzellenanwendungen für Fahrzeuge	16
2.5 Befüllvorgang – EN 17127 (bezieht sich auf SAE J2601) - Befüllprotokolle für Wasserstoffgasfahrzeuge mit leichter Oberfläche.....	17
2.5.1 Befüllung von Anschlüssen – EN ISO 17268 - Anschlussvorrichtungen für die Befüllung von Landfahrzeugen mit Wasserstoffgas	19
3 Technische Gasabfüllanlagen	20
3.1 Transport von Wasserstoff	21
3.1.1 Transport von Wasserstoff per Pipeline	22
3.1.2 Transport von komprimiertem Wasserstoff für Straße oder Schiene.....	22
3.1.3 Transport von verflüssigtem Wasserstoff	23
3.1.4 Transport von Wasserstoff per Pipeline im Gemisch mit Erdgas	23
3.2 Sicherheitsregeln für den Umgang mit Industriegasen.....	24
4 Bauteile der Tankstelle	25
4.1 Die Hauptbestandteile einer Wasserstofftankstelle	25
5 Betrieb und Wartung der Tankstelle	31
5.1 Voraussetzungen für den sicheren Betrieb einer Wasserstofftankstelle.....	31
5.2 Betriebssteuerung der Wasserstofftankstelle.....	33
5.3 Unfälle an Wasserstofftankstellen	34
6 Arten von Tankstellen	35
6.1 Klassifizierung nach Wasserstoffart	36
6.2 Verteilung nach Standorten	36

6.3	Klassifizierung nach Wasserstoffquelle	37
7	Prognosen in Entwicklung	39
8	Zusammenfassung.....	43
9	Quellen	43
10	Liste der Bilder.....	45
11	Liste der Tabellen	46

Gefördert von der Europäischen Union. Die geäußerten Ansichten und Meinungen sind jedoch ausschließlich die der Autoren und spiegeln nicht unbedingt die der Europäischen Union oder der Europäischen Exekutivagentur für Bildung und Kultur (EACEA) wider. Weder die Europäische Union noch die EACEA können dafür verantwortlich gemacht werden.

EINLEITUNG

In diesem Modul geht es um Wasserstofftankstellen. Das Hauptziel des Moduls ist es, den Leser in die grundlegenden Fragen der Planung, des Baus und des Betriebs von Tankstellen einzuführen. Der einleitende Teil führt den Leser in die Geschichte und Entwicklung von Wasserstofftankstellen und deren Einsatz im Verkehr ein. Es wird über die ersten Wasserstofftankstellen und deren anschließende Entwicklung informiert. Grundlegende Informationen zu Wasserstoff werden auch in diesem Kapitel bereitgestellt, jedoch nur in Form eines grundlegenden Überblicks. In den folgenden Abschnitten werden diese Informationen durch einen grundsätzlichen Überblick über die gesetzlichen Anforderungen an die Auslegung und den Betrieb von Wasserstofftankstellen ergänzt. Dieser Abschnitt führt den Leser auch in einen grundlegenden Überblick über die Normen ein, die den Bau und Betrieb von Tankstellen betreffen. Das nächste Kapitel fasst Informationen zu Industriegastankstellen und nebenbei zur Herstellung von Wasserstoff und dessen Transport zur Tankstelle zusammen. Diese Themen werden in Modulen, die sich darauf konzentrieren, ausführlich behandelt. Weitere Kapitel befassen sich mit der Aufteilung von Tankstellen, deren Bau, einzelnen Bauwerken und der Betriebssicherheit. Daher werden auch Fälle von Unfällen, die sich während des Betriebs von Tankstellen ereignet haben, dargestellt. Die Betriebssicherheit nicht nur von Tankstellen, sondern der Wasserstofftechnologie im Allgemeinen ist entscheidend für ihre zukünftige Entwicklung und den praktischen Einsatz. Das letzte Kapitel widmet sich Prognosen für die zukünftige Entwicklung von Tankstellen und deren Einsatz im Verkehr.

EINLEITUNG – GESCHICHTE

SCHLÜSSELWÖRTER

Wasserstoff, Geschichte, Personen- und Güterverkehr, Tankstellen, Elektrofahrzeug, Infrastruktur, Betankung, Brennstoffzelle, Island, Emissionen, Umwelt, Ökologie

Wasserstoff ist das leichteste gasförmige chemische Element und das dritthäufigste Element auf der Erde. Aufgrund seiner hohen Reaktivität kommt es in der Natur fast ausschließlich als Verbindung vor. Ein Wasserstoffatom besteht aus einem Proton im Kern und einem Elektron in der Schale. Wasserstoff belastet die Umwelt nicht, wenn er entweicht, was ihn zu einem emissionsfreien Energieträger macht. Wasserstoff ist leicht entzündlich, unterstützt aber keine Verbrennung. Wasserstoff wurde 1766 von Henry Cavendish entdeckt, aber zum Zeitpunkt seiner Entdeckung hatte Wasserstoff noch keine große Verwendung gefunden. Eine der ersten Anwendungen von Wasserstoff im Transportwesen war die

Entwicklung von Ballonfahrten und Luftschiffen, bei denen Wasserstoff neben Helium als Trägergas verwendet wurde. Was den heutigen Einsatz des Wasserstoffantriebs betrifft, so müssen wir zwischen seiner Verwendung in Brennstoffzellen oder der Entdeckung der Brennstoffzelle selbst und in Verbrennungsmotoren unterscheiden.

Das Prinzip der Brennstoffzelle wurde 1838 von dem Schweizer Wissenschaftler Christian Friedrich Schönbein entdeckt, und der erste funktionierende Prototyp wurde von dem britischen Wissenschaftler Sir William Grove gebaut. Nach der Erfindung des Dynamos geriet die Brennstoffzelle teilweise in Vergessenheit. "Die Brennstoffzelle erlebte in den 1960er Jahren ihre eigentliche Renaissance. Das lag vor allem an der kosmischen Forschung, denn die Brennstoffzelle hat ein günstigeres Energie-Gewichts-Verhältnis. Zum Beispiel die Apollo-Raumschiffe waren damit ausgestattet, aber sie sind auch die Energiequelle für die heutigen Space Shuttles." [3]

Obwohl der Wasserstoff-Verbrennungsmotor der erste patentierte Verbrennungsmotor war, und bereits 1808, als dem pensionierten Major Issac de Rivaz ein französisches Patent erteilt wurde, geht seine praktische Verwendung auf eine viel spätere Zeit zurück. Der Wasserstoff im Motor von Rivaz wurde durch die Elektrolyse von Wasser gewonnen, und "das Design war ... verunsichert und praktisch undurchführbar" [4]. Der erste funktionierende Wasserstoff-Verbrennungsmotor wurde erst ein Jahrhundert nach dem ersten französischen Patent in den 1920er Jahren entwickelt. Sein Einsatz wurde erstmals in den Luftschiffmotoren von Ricardo und Maybach getestet.

Mit den Bemühungen, Emissionen im Verkehr zu reduzieren und emissionsfreie Energieträger im Verkehr zu entwickeln, entwickelt sich neben der Elektromobilität auch die Nutzung von Wasserstoff als Energieträger. Um Wasserstoff in Fahrzeuge zu pumpen, werden spezielle Tankstellen benötigt, um eine schnelle und sichere Befüllung der Tanks des Autos zu gewährleisten. Wasserstoff wird gasförmig gepumpt und auf hohen Druck verdichtet. Die erste Wasserstofftankstelle wurde 2002 in Reykjavik eröffnet. [2] Als Shell es 2003 eröffnete, waren in Island nur ein Brennstoffzellenauto, ein Mercedes-Benz Sprinter und drei Wasserstoffbusse des Typs Daimler Chrysler im Rahmen des ersten öffentlichen Verkehrsprogramms der Europäischen Union im Einsatz.

Island galt als idealer Standort für dieses Pilotprojekt, da es über eine Fülle von billiger und sauberer Wasser- und Geothermieenergie verfügt, die zur Herstellung von Kraftstoff durch Elektrolyse mit minimalen Kohlendioxidemissionen genutzt werden kann. Dies machte Island zu einem Vorreiter beim Übergang zu einer Wasserstoffwirtschaft, mit mehr als 40 Fahrzeugen auf den Straßen im Jahr 2007, hauptsächlich Toyota Prius Hybride, die nur von Kalifornien übertroffen werden.

Japan hat derzeit die größte Anzahl an Wasserstofftankstellen aller Länder der Welt. Im September 2021 waren im Land 154 Wasserstofftankstellen in Betrieb. Japans Position als führender Anbieter von Wasserstoff-Kraftstoff ist nicht überraschend, wenn man bedenkt, dass die japanischen Autohersteller Toyota und Honda zu den nur drei Autoherstellern weltweit gehören, die Wasserstoffautos in Serie produzieren. [3]

In der Europäischen Union gibt es etwa 136 Wasserstofftankstellen. Die ersten Wasserstofftankstellen wurden 2016 eingeführt, aber ihr Ausbau geriet bis 2019 ins Stocken, als sich die Zahl in einem einzigen Jahr fast verdreifachte. Wasserstoff wird als wichtige Ressource für die Emissionsreduzierung angesehen, und seine Verwendung im Verkehr wird von vielen Regierungen unterstützt. Im Jahr 2020 verzeichnete die EU aufgrund des Austritts des Vereinigten Königreichs aus der EU einen Rückgang von 10 Tankstellen.

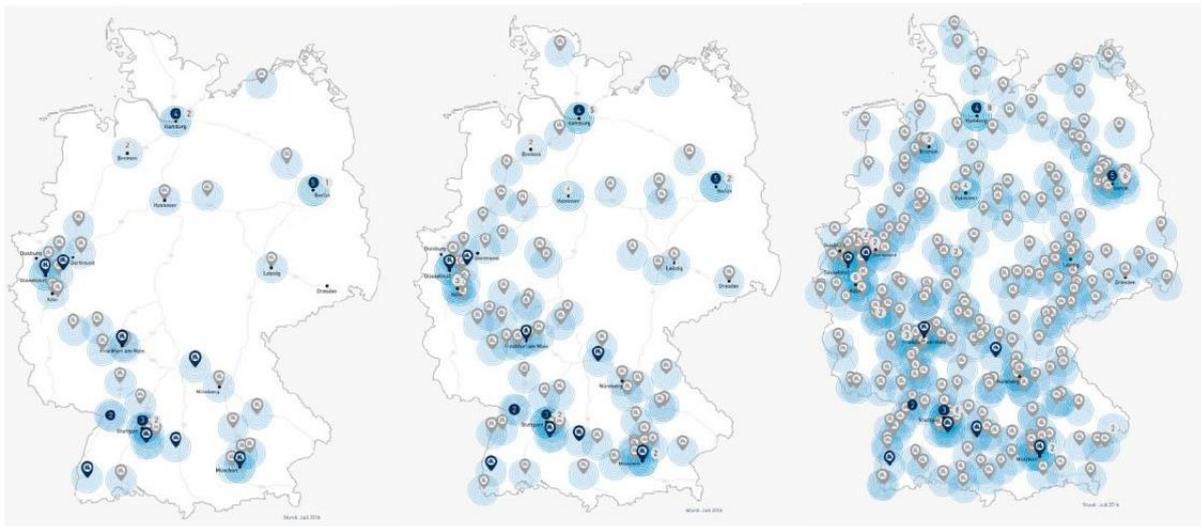


Bild1 Tankstellennetz in Deutschland in den Jahren 2016, 2018, 2023 [5]

Die erste nicht-öffentliche Tankstelle in der Tschechischen Republik wurde 1999 in Neratovice eröffnet, gefolgt von einer weiteren in ÚJV Řež im Jahr 2020. Im Jahr 2022 wurde in Ostrava die erste öffentliche Tankstelle in der Tschechischen Republik eröffnet.

Weltweite Nachfrage nach Wasserstoff Nach dem Pariser Abkommen und in jüngster Zeit nach der COP26 versucht die Welt, innovative Technologien zu finden, um fossile Brennstoffe zu ersetzen und die Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Wasserstoff hat sich als eine solche Alternative herauskristallisiert, insbesondere für den Verkehrssektor. Die weltweite Nachfrage nach Wasserstoff belief sich 2019 auf 71 Millionen Tonnen, wobei der Raffineriesektor der Hauptverbraucher war. Die

IEA prognostiziert, dass die Gesamtnachfrage bis 2070 mehr als 500 Millionen Tonnen erreichen könnte, wobei der Verkehrssektor voraussichtlich der größte Verbraucher von Wasserstoff sein wird. Wo die derzeitige Infrastruktur versagt, muss nicht nur die Technologie weiterentwickelt werden, sondern auch die notwendige Infrastruktur entwickelt werden, damit die Länder ihre Netto-Null-Ziele erreichen können. Nur drei Länder in Europa haben die EU-Anforderungen an eine nachhaltige Taxonomie für die Wasserstofferzeugung mit Strom aus nationalen Netzen erfüllt. Die meisten Länder würden Wasserstoff mit hoher Kohlenstoffintensität produzieren, wenn sie Netzstrom nutzen würden. Neben der Kohlenstoffintensität des Produkts waren die größten globalen Herausforderungen für die Wasserstofftechnologie laut der Umfrage von 2021 die komplexe Verteilung und die uneinheitlichen Versorgungs- und Speicherprobleme.

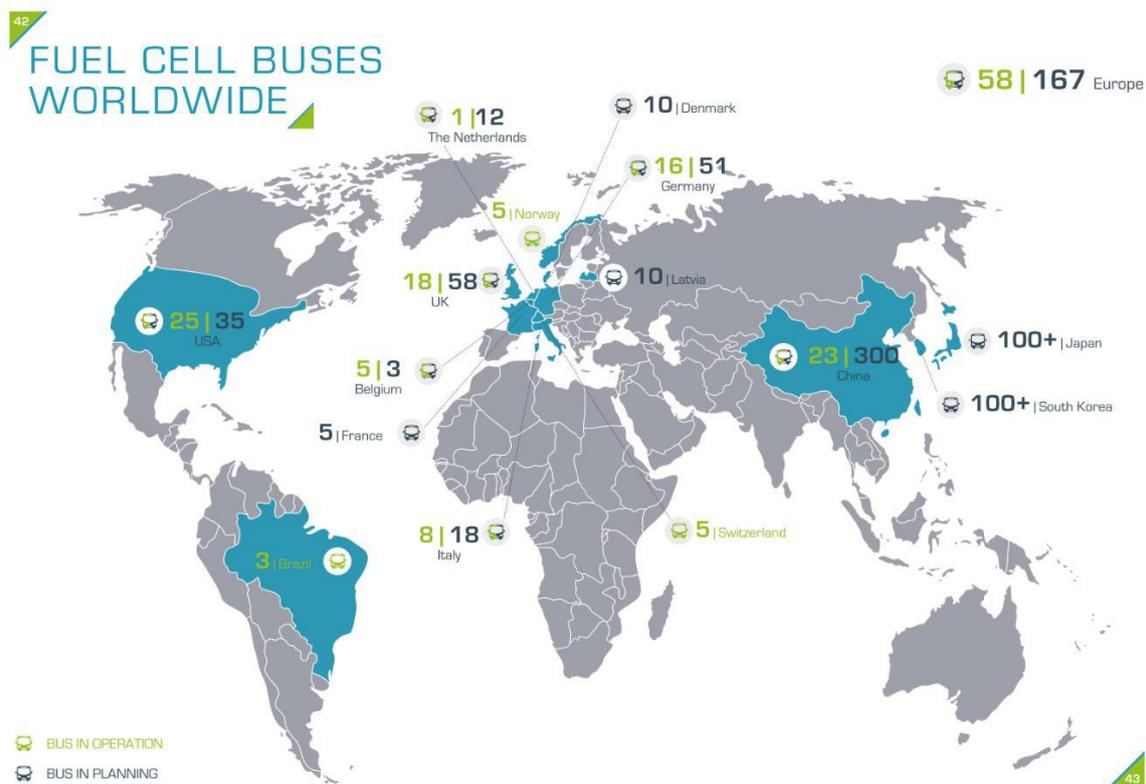


Bild2: Aktueller Stand und Ausblick für den Ausbau von wasserstoffbetriebenen Bussen. [4]

Die Betankung erfolgt an Tankstellen. Der gesamte Prozess ist dem Betanken herkömmlicher fossiler Brennstoffe sehr ähnlich. Nachdem Sie die Füllpistole an das Tankventil angeschlossen haben, legen Sie einen Hebel um und das System erledigt den Rest. Das Befüllen der Tanks dauert 5 Minuten und gibt dem Auto volle Kapazität. Das Tanken ähnelt also CNG/LPG-Fahrzeugen, mit dem Unterschied,

dass es sich bei Wasserstoff um komprimiertes und nicht um verflüssigtes Gas handelt. Dieser Unterschied ist darauf zurückzuführen, dass für die Verflüssigung von Wasserstoff eine Temperatur von -253 °C erforderlich ist. Das Erreichen einer derart niedrigen Temperatur wäre wirtschaftlich und technisch sehr anspruchsvoll.

1 VERGLEICH EINES WASSERSTOFFAUTOS UND EINES ELEKTROAUTOS

Angesichts der rasanten Entwicklung von Elektrofahrzeugen und der dazugehörigen Infrastruktur wird ein Vergleich zwischen dieser Antriebsart und dem Wasserstoffantrieb vorgeschlagen. Obwohl diesem Thema spezielle Module gewidmet sind, lohnt es sich, hier zumindest einige grundlegende Informationen zu erwähnen.

Im Pkw-Bereich ist der Hauptvorteil des Wasserstoffantriebs die Betankungszeit, die je nach Fahrzeugtyp und Tankstelle in der Regel in der Größenordnung von Minuten (5-10 min) liegt. Ein weiterer Vorteil ist, dass ein Brennstoffzellenfahrzeug nicht so viele Batterien mit sich führen muss und somit leichter ist als ein reines Elektrofahrzeug. Das geringere Gewicht führt zu einer größeren Reichweite, die fast mit der von Fahrzeugen mit fossilen Brennstoffen vergleichbar ist (ca. 450-700 km). Einer der Vorteile von Elektrofahrzeugen ist die Möglichkeit, die Batterien zu Hause aufzuladen. Dieser Vorteil ist jedoch abhängig von der Installation einer Lademöglichkeit und der Notwendigkeit eines privaten Parkplatzes. Der größte Nachteil von wasserstoffbetriebenen Pkw gegenüber Elektroautos ist das fehlende Tankstellennetz und die geringe Reichweite von wasserstoffbetriebenen Pkw.

Weitere Verkehrsbereiche, in denen Wasserstoff als Kraftstoff eingesetzt werden kann, sind insbesondere der Straßengüterverkehr, der öffentliche Verkehr, Arbeits- und Umschlagmaschinen sowie der Schienenverkehr. In diesen Bereichen scheint die Nutzung von Wasserstoff als Energieträger effizienter zu sein als reiner Strom. Die Hauptvorteile des Wasserstoffantriebs sind das deutlich geringere Gewicht dieser Fahrzeuge, die Schnelligkeit der Betankung und der einfachere Aufbau einer Tankstelle im Vergleich zu einer Ladestation mit der benötigten Leistung.

FRAGEN ZUR KONTROLLE:

1) Wo und wann wurde die weltweit erste Wasserstofftankstelle eröffnet? [Reykjavik, 2003]

2) Welches Land hatte im Jahr 2021 die meisten Tankstellen der Welt? [Japan; 154]

3) Nennen Sie mindestens zwei Pkw-Hersteller, die wasserstoffbetriebene Fahrzeuge in Serie produzieren. [Hyundai, Toyota, Honda]

2 RECHTSVORSCHRIFTEN ÜBER DEN BETRIEB UND DIE INSTANDHALTUNG VON TANKSTELLEN

SCHLÜSSELWÖRTER

Gesetzgebung, Norm, ISO, IEC, SAE, HFS, Wasserstoffqualität, Kommunikation, Füllanschluss, Nomenklatur, Normung, Gültigkeit, Sicherheit, Abfüllprozess, Protokoll

Dieses Kapitel befasst sich mit den gesetzlichen Grundlagen für den Betrieb und die Instandhaltung von Wasserstofftankstellen (HFS). Die Gesetzgebung im Zusammenhang mit der Gestaltung von HFS ist ebenfalls mit diesem Thema verbunden, daher ist ein Teil dieses Kapitels auch diesem Thema gewidmet. Die Einhaltung der gesetzlichen Vorschriften ist unerlässlich, um den sicheren Betrieb des HFS und seine Langlebigkeit zu gewährleisten. In diesem Kapitel wird der Leser in die grundlegende Terminologie gemäß der geltenden Gesetzgebung eingeführt und die grundlegenden Konzepte erläutert. Die Gesetzgebung innerhalb der EU wird durch europäische Normen bestimmt, aber einige betriebliche und technische Details können in nationalen Vorschriften, wie z. B. Brandschutzvorschriften, festgelegt werden. Die wichtigsten internationalen Organisationen, die technische Normen herausgeben, sind ISO (Internationale Organisation für Normung), IEC (International Electrotechnical Commission) und SAE (Society of Automotive Engineers). Innerhalb dieser Organisationen werden Normen von den Mitgliedern des TC (Technisches Komitee) der Mitglieder des CEN (Europäisches Komitee für Normung) und des CENELEC (Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung) entwickelt. Die Entwicklung von Rechtsvorschriften ist sehr schnell, und im Zusammenhang mit der Entwicklung der Wasserstofftechnologie werden bestehende Normen ständig weiterentwickelt und geändert und neue geschaffen. [17]

Die wichtigsten CEN/CENELEC-TCs für wasserstoffbezogene Normen sind:

CEN/CLC/TC 6 - Wasserstoff

CEN/TC 23 Transportable Gasflaschen

CEN/TC 69 Industriearmaturen

CEN/TC 185 Verbindungselemente

CEN/TC 197 Pumpen

CEN/TC 234 Gasinfrastruktur

CEN/TC 235 Gasdruckregler und zugehörige Sicherheitseinrichtungen für die Verwendung in der Gasindustrie, Gastransport und -verteilung;

CEN/TC 236 Nichtindustrielle handbetätigte Absperrventile für Gas und Gasverteilung Sonderventilkombinationen - sonstige Produkte

CEN/TC 238 Prüfgase, Prüfdrücke, Geräteklassen und Gasgeräte.

Arten

CEN/TC 268 Kryogene Behälter und spezifische Anwendungen der Wasserstofftechnologie.

Da die Probleme und der Geltungsbereich dieser Normen den Rahmen dieses Moduls sprengen würden, werden im Folgenden Normen beschrieben, die sich speziell auf den Bau und Betrieb von HFS beziehen. [17]

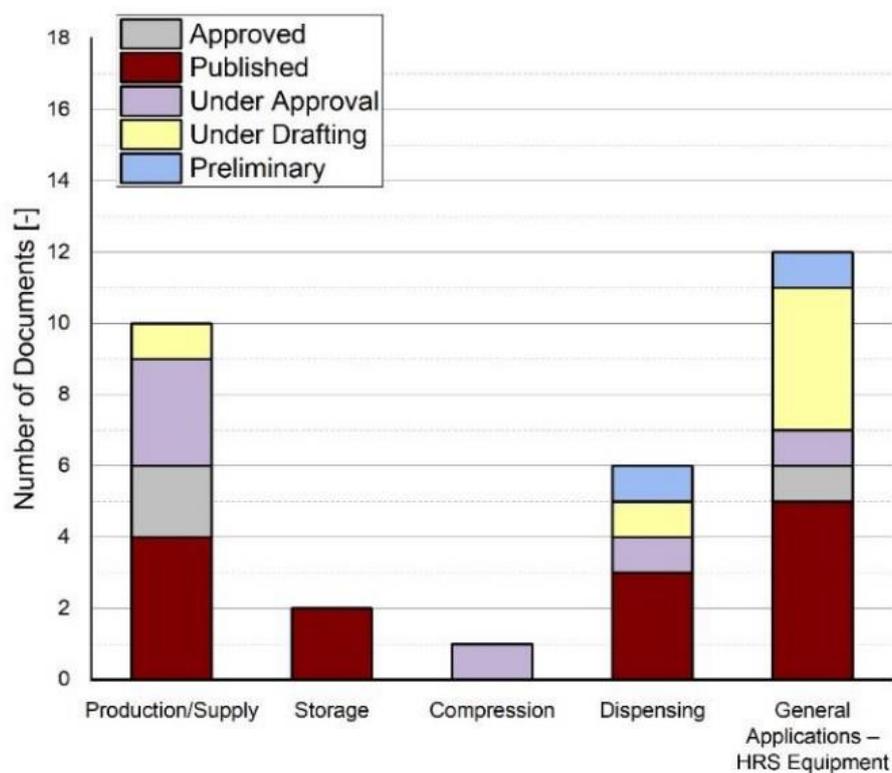


Bild3: Stand der Entwicklung der CEN- und CENELEC-Normen für HFS. [17]

Die Rechtsvorschriften über HFS in der EU werden hauptsächlich durch die folgenden Normen geregelt [12]:

Wasserstofftankstellen – EN 17127 - Wasserstoffgastankstellen für die Abgabe im Freien mit Füllprotokollen; ISO 19880-1:2020 - Wasserstoffgas - Tankstellen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen

Eigenschaften von Wasserstoff – EN 17124 - Wasserstoff-Kraftstoff - Produktspezifikation und Qualitätssicherung für Wasserstoff-Gaszapfsäulen - Protonenaustauschmembran (PEM)-Brennstoffzellenanwendungen für Fahrzeuge

Befüllvorgang – EN 17127 (bezieht sich auf SAE J2601) - Befüllprotokolle für Wasserstoffgasfahrzeuge mit leichter Oberfläche

SAE J2799 – Hard- und Software für die Kommunikation zwischen Wasserstofffahrzeugen und -tankstellen

Befüllung von Anschlüssen – EN ISO 17268 - Anschlussvorrichtungen zum Befüllen von Wasserstoffgas in Oberflächenfahrzeuge.

Bevor die einzelnen Normen besprochen werden, ist es wichtig, sich mit den grundlegenden Begrifflichkeiten vertraut zu machen. Der Einfachheit halber wurde die tschechische Norm TPG 304 03 - Wasserstoff-Gastankstellen für mobile Geräte entwickelt, um die grundlegende Orientierung zu vereinfachen, die für die Planung, den Bau, die Herstellung, den Betrieb und die Wartung von HFS erforderlich ist. Aus dieser Norm werden die notwendigen Begriffe der Grundterminologie herausgearbeitet. Die Kenntnis dieser Terminologie ist nicht nur in Gesetzesdokumenten, sondern auch in technischen Regelwerken und Fachliteratur für die richtige Orientierung notwendig.

2.1 GRUNDNOMENKLATUR NACH TECHNISCHEN REGELN TPG 304 03

Sicherheitsabstand – *der Abstand zwischen der Gefahrenquelle und dem Ziel (Personen, Ausrüstung, Umgebung), der ein akzeptables Risiko bis zu einem vorhersehbaren Grenzwert gewährleistet. Die Wasserstofftankstelle ist Gefahrenquelle und Ziel zugleich. Ähnlich verhält es sich mit der Ausstattung rund um die Wasserstofftankstelle in Bezug darauf. Der Sicherheitsabstand kann durch zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen verringert werden.*

Sicherheitsabstand – der Mindestabstand zwischen der Quelle einer Gefahr und einem Objekt, der erforderlich ist, um die Auswirkungen eines wahrscheinlich vorhersehbaren Ereignisses abzumildern und zu verhindern, dass ein geringfügiger Vorfall zu einem größeren Vorfall eskaliert.

Risikobewertung für den Betrieb einer Wasserstofftankstelle – Ermittlung eines quantitativen oder qualitativen Risikowertes für bestimmte Situationen und erkannte Gefahren einer Wasserstofftankstelle unter normalen Betriebsbedingungen. Der Risikobewertungsbericht des Ausschusses ist Teil der Projektdokumentation.

Kompressor – Eine Vorrichtung, die den durch die Saugleitung zugeführten Wasserstoff mindestens auf den maximalen Betriebsdruck des mobilen Gerätetanks komprimiert.

Mechanisches Trennen – Eine Vorrichtung, die verhindert, dass der Füllschlauch bricht, die Abgabevorrichtung beschädigt und die Füllschnellkupplung löst.

Maximaler Arbeitsdruck (MWP) - Der maximale Druck, dem die Wasserstofftankstelle im Betrieb an einer bestimmten Prozessposition unabhängig von der Wasserstofftemperatur ausgesetzt werden kann, bevor sie durch Maßnahmen eingegriffen wird, die sicherstellen, dass dieser nicht sicher über- oder abgesenkt wird, z. B. durch Sicherheitsventile.

Eventualität – Jede ungeplante Situation im normalen Betrieb einer Wasserstofftankstelle, die zu Gesundheitsschäden, Schäden oder Verlust von Eigentum, Material, Umweltschäden oder Geschäftsverlusten führen kann oder wird.

Gefahrenzone – Ein Bereich, in dem eine explosionsfähige Atmosphäre in einer solchen Menge vorhanden ist oder auftreten kann, dass bei der Planung, Installation und Verwendung der Wasserstofftankstelle besondere Vorsichtsmaßnahmen getroffen werden müssen.

Nicht-öffentliche Wasserstofftankstelle – eine Tankstelle, die einen geschlossenen Kundenkreis bedient, z.B. eine Firmenstation.

Nominaler Arbeitsdruck (NWP) - der Druck, auf den das Gerät bei einer Wasserstofftemperatur von 15 °C eingestellt ist; typische Werte für Pkw sind 700 bar, für Busse und Lkw 350 bar

Bediener – eine Person, die für die Bedienung des Geräts qualifiziert ist

Wasserstoff-Durchflussbegrenzer – Vorrichtung, die den Wasserstofffluss abschaltet, wenn eine vorgegebene Wasserstoffflussgrenze erreicht ist, die typischerweise 60 g/s Wasserstoff beträgt.

Füllüberdruck – Der Druck, mit dem das Gas dem mobilen Gerät zugeführt wird.

Befüllanschluss – Eine Komponente eines Ausgabegestells oder einer Vorrichtung, die aus einer flexiblen Verbindung (Füllschlauch), einer mechanischen Trennung und einer Befüllschnellkupplung besteht.

Wasserstofftankstelle – Eine Vorrichtung zum Befüllen der Drucktanks mobiler Geräte mit komprimiertem Wasserstoff. Es besteht aus einer Wasserstoffquelle, einem Kompressor, einem Kühlaggregat, Hochdruckspeichern, Schankanlagen und gegebenenfalls weiterem Zubehör.

Langsamtankstelle – eine Tankstelle ohne Hochdruck-Druckwasserstoffspeichertank, bei der der Tank der mobilen Ausrüstung direkt von der Kompressorausstragsleitung befüllt wird.

Arbeitsdruck (WP) - Der höchste Druck, der für eine Wasserstofftankstelle an einer bestimmten Prozessposition im Normalbetrieb erwartet wird.

Nicht explosionsgefährdeter Bereich – Ein Bereich, in dem nicht zu erwarten ist, dass eine explosionsfähige Atmosphäre in solchen Mengen vorhanden ist, dass bei der Planung, Installation und Verwendung der Wasserstofftankstelle besondere Vorsichtsmaßnahmen getroffen werden müssen.

Betriebsdruck-Dichtheitsprüfung – Eine Dichtheitsprüfung, die an in Betrieb befindlichen Geräten durchgeführt wird.

Schnellfüllstation – eine Tankstelle mit einem Hochdruck-Druckwasserstofftank, der eine schnelle Befüllung des Tanks eines oder mehrerer mobiler Geräte gleichzeitig durch Überfüllung ermöglicht.

Saugleitung – die Wasserstoffzuleitung vom Niederdrucktank zum Einlass des Kompressors.

Druckdichtheitsprüfung – Ein Verfahren zur Überprüfung, ob das zu prüfende Gerät die Dichtheitsanforderungen erfüllt.

Benutzer – Der Bediener der mobilen Ausrüstung oder der Fahrer der mobilen Ausrüstung oder der Betreiber der Wasserstofftankstelle, d. h. eine Person über 18 Jahre, die mit der Bedienung der Druckwasserstoff-Abfüllanlage vertraut ist.

Öffentliche Wasserstofftankstelle – eine Tankstelle, die den Verkauf von Wasserstoff an mobile Geräte an die breite Öffentlichkeit gemäß dem Gesetz Nr. 311/2006 Slg. ermöglicht.

Belüftung – der Luftaustausch in einem Raum durch natürliche Konvektion (Windeinwirkung, Temperaturgradient), erzwungene Konvektion (Ventilatorwirkung) oder eine Kombination aus beidem.

Wasserstoff – ein Gas von der Qualität, die für den Betrieb von Brennstoffzellen erforderlich ist; gemäß ISO 14687-2 muss die Reinheit von Wasserstoff mindestens 99,97 % betragen.

Wasserstofffilter – ein Gerät zur Entfernung mechanischer Verunreinigungen aus komprimiertem Wasserstoff.

Druckfestigkeitsprüfung – Ein Verfahren zur Überprüfung, ob das zu prüfende Gerät die Anforderungen an die mechanische Festigkeit erfüllt.

Explosionsfähige Atmosphäre – Ein Gemisch aus Luft mit brennbaren Stoffen, z. B. Wasserstoff, in Form von Gasen, Dämpfen, Nebeln oder Stäuben bei atmosphärischen Bedingungen von der unteren Explosionsgrenze (UEG) bis zur oberen Explosionsgrenze (UEL), bei der sich die Verbrennung nach Initiierung auf das Volumen des gesamten unverbrannten Gemisches erstreckt.

Zapfsäule – eine Zapfsäule, die nicht der Definition einer Zapfsäule entspricht, aber eine Funktion zur Abgabe von komprimiertem Wasserstoff unter bestimmten Bedingungen erfüllt (interne Einrichtungen, kleine Tankstellen, Entwicklungstankstellen und andere Einrichtungen, für die diese Lösung geeignet ist).

Dosiergestell – ein Druckwasserstoff-Zapfgerät, das für den Betrieb nicht geöffnet werden muss und das mit einem spezifizierten Messgerät zur Messung der Menge des für kommerzielle Zwecke abgegebenen Wasserstoffs (in Kilogramm) und einer Kontroll- und Sicherheitsvorrichtung ausgestattet ist, um sicherzustellen, dass die vorgeschriebenen Füllbedingungen eingehalten werden.

Dosiergeräte – Geräte zur Abgabe und Messung der Menge des entnommenen komprimierten Wasserstoffs; dies sind Dosiergestelle und Dosiervorrichtungen.

Hochdruckspeichertank – eine Vorrichtung zur Speicherung von komprimiertem Wasserstoff zur schnellen Befüllung eines oder mehrerer mobiler Geräte gleichzeitig bei gleichzeitiger Reduzierung der Anzahl der Kompressorstarts.

Sicherheitsvorrichtung – Eine Vorrichtung zum Schutz vor einer Gefahrensituation, die automatisch dazu führt, dass die Befüllung eines mobilen Geräts unterbrochen wird, wenn Wasserstoff austritt oder der Füllschlauch gebrochen ist.

Wasserstoff-Kälteanlage – eine Vorrichtung zur Kühlung von Wasserstoff, die sich hinter dem Kompressorauslass befindet

2.2 WASSERSTOFFTANKSTELLEN – EN 17127 - WASSERSTOFF-ZAPFSÄULEN FÜR DEN AUßENBEREICH MIT FÜLLPROTOKOLLEN

In diesem Dokument werden die Mindestanforderungen zur Gewährleistung der Interoperabilität von Wasserstofftankstellen, einschließlich Betankungsprotokollen, festgelegt, die gasförmigen Wasserstoff in Straßenfahrzeuge (z. B. Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge) abgeben, die den für diese Fahrzeuge geltenden Rechtsvorschriften entsprechen. Die Sicherheits- und Leistungsanforderungen der gesamten Wasserstofftankstelle, die in Übereinstimmung mit den geltenden einschlägigen europäischen und nationalen Rechtsvorschriften erfüllt werden, sind in diesem Dokument nicht enthalten. [13]

2.3 WASSERSTOFFTANKSTELLEN – ISO 19880-1:2020 - WASSERSTOFFGAS – TANKSTELLEN - TEIL 1: ALLGEMEINE ANFORDERUNGEN

Sie definiert Mindestanforderungen an die Planung, Installation, Inbetriebnahme, den Betrieb, die Inspektion und Wartung, die Sicherheit und gegebenenfalls die Leistung von öffentlichen und nicht-öffentlichen HFS-Tankstellen, die gasförmigen Wasserstoff für leichte Straßenfahrzeuge abgeben. Die in diesem Dokument enthaltenen Informationen enthalten auch Richtlinien und Anforderungen für die Befüllung mittelschwerer Straßenfahrzeuge. Darüber hinaus können die in diesem Dokument enthaltenen Informationen auf Wasserstofftankstellen mit anderen Verwendungszwecken angewendet werden, wie z. B.:

- Tankstellen für Motorräder, Gabelstapler, Straßenbahnen, Züge, Fluss- und Schiffsanwendungen;
- Zapfsäulen im Innenbereich;
- Wohnanwendungen für den Antrieb von Landfahrzeugen;
- mobile Tankstellen
- nicht-öffentliche Demonstrationstankstellen.

Dieses Dokument geht jedoch nicht auf andere spezifische Anforderungen ein, die für den sicheren Betrieb dieser Tankstellen erforderlich sein können.

Dieses Dokument enthält Anforderungen und Richtlinien für die folgenden Elemente einer Tankstelle

- System zur Erzeugung/Lieferung von Wasserstoff:

- Lieferung von Wasserstoff über Pipelines, Lieferung von gasförmigem und/oder flüssigem Wasserstoff per LKW oder Anhänger zur Lagerung von Metallhydriden;
- Wasserstoffgeneratoren vor Ort, die das Wasserelektrolyseverfahren verwenden, oder Wasserstoffgeneratoren, die Kraftstoffverarbeitungstechnologien verwenden;
- Speicherung von flüssigem Wasserstoff;
- gegebenenfalls Wasserstoffreinigungssysteme;
- Kompression;
- Kompression von Wasserstoffgas;
- Pumpen und Verdampfer;
- Speicherung von Wasserstoffgas;
- Vorkühlgeräte;
- Wasserstoff-Gas-Zapfanlagen; [14]

2.4 WASSERSTOFFEIGENSCHAFTEN – EN 17124 - WASSERSTOFFKRAFTSTOFF - PRODUKTSPEZIFIKATION UND QUALITÄTSSICHERUNG FÜR WASSERSTOFFGASTANKSTELLEN - PROTONENAUSTAUSCHMEMBRAN (PEM)- BRENNSTOFFZELLENANWENDUNGEN FÜR FAHRZEUGE

Dieses Dokument legt die Qualitätsmerkmale von Wasserstoffkraftstoff fest, der an Wasserstofftankstellen für den Einsatz in Protonenaustauschmembran-Brennstoffzellensystemen (PEM) abgegeben wird, und die entsprechenden Qualitätssicherungsaspekte, um die Konsistenz des Wasserstoffkraftstoffs zu gewährleisten. [15]

Gesamtanteil von Wasserstoff und Schadgasen	
Minimaler Gehalt an reinem Wasserstoff	99,97 %
Gesamtmenge an Gasen außer Wasserstoff	300µmol/mol
Maximale Konzentrationen einzelner Schadstoffgase	

Wasser (H ₂ O)	5 µmol/mol
Kohlenhydrate gesamt (Methan)	2 µmol/mol
Sauerstoff (O ₂)	5 µmol/mol
Helium (He)	300 µmol/mol
Gesamtstickstoff (N ₂) a Argon (Ar)	100 µmol/mol
Kohlendioxid (CO ₂)	2 µmol/mol
Kohlenmonoxid (CO)	0,2 µmol/mol
Gesamtschwefelverbindungen (H ₂ S)	0,004 µmol/mol
Formaldehyd (HCHO)	0,01 µmol/mol
Ameisensäure (HCOOH)	0,2 µmol/mol
Ammoniak (NH ₃)	0,1 µmol/mol
Halogenide gesamt	0,05 µmol/mol
Maximale Partikelkonzentration	1 mg/kg

Tabelle1 Anforderungen an die Wasserstoffqualität von Wasserstoff-Brennstoffzellen [8]

2.5 BEFÜLLVORGANG – EN 17127 (BEZIEHT SICH AUF SAE J2601) - BEFÜLLPROTOKOLLE FÜR WASSERSTOFFGASFAHRZEUGE MIT LEICHTER OBERFLÄCHE

Die EN 17127 basiert auf SAE J2601 – Füllprotokolle für Wasserstoffgasfahrzeuge mit leichter Oberfläche im Betankungsprozess. Die Norm SAE J2601 definiert die Protokoll- und Prozessgrenzen für die Betankung von Wasserstoff in Fahrzeugen. Die Prozessgrenzen (z. B. Kraftstoffördertemperatur, maximale Durchflussmenge, Enddruck und Geschwindigkeit des Erreichens) hängen von externen Faktoren wie Umgebungstemperatur, Kraftstoffördertemperatur und dem Druck des Tanks ab, in den der Wasserstoff gefüllt wird. Die Norm SAE J2601 definiert Standardprotokolle für die Wasserstoffbetankung. Diese Protokolle basieren entweder auf einer Nachschlagetabelle, die eine feste Druckanstiegsrate im Behälter verwendet, oder auf der Verwendung einer dynamischen Formel für die Druckanstiegsrate. In diesem Fall wird die Füllmenge während des Füllvorgangs kontinuierlich berechnet. Bei Verwendung des Lookup-Tabellenprotokolls ist der am Ende des Füllvorgangs erreichte Wasserstoffdruckwert bekannt, im Gegensatz dazu definiert das Protokoll mit der Formel für die Druckanstiegsrate den maximalen

Wasserstoffdruckwert, der während des Füllvorgangs erreicht wird. Beide Protokolle ermöglichen die Wasserstoffbefüllung mit oder ohne Kommunikation (zwischen dem Füllgerät und dem Fahrzeug). Für die Befüllung mit Kommunikation muss zusätzlich zu SAE J2601 die SAE J2799 – Hardware und Software für die Kommunikation zwischen Wasserstoffoberflächenfahrzeugen und -stationen verwendet werden. Ein entscheidender Faktor für die Leistung der Wasserstoffbefüllung ist die Fähigkeit des HFS, die gewünschte Temperatur des gelieferten Wasserstoffs zu erreichen. Je nach Temperatur wird der gelieferte Wasserstoff in drei Kategorien eingeteilt, die mit dem Buchstaben "T" gekennzeichnet sind: T40, T30, T20. Die T40-Kategorie ist die kälteste. Die Norm SAE J2601 definiert Befüllprotokolle für die Druckklassen 350 bar und 700 bar sowie drei Kategorien von Kraftstoffördertemperaturen (-40 °C, -30 °C, -20 °C). Außerdem werden zwei Größen von Wasserstoffspeichersystemen definiert. Das erste System arbeitet sowohl mit einem Druck von 350 als auch mit einem Druck von 700 bar und hat ein Volumen von 49,7 l - 248,6 l, das zweite arbeitet nur mit einem Druck von 700 bar und einem Volumen von 248,6 l und mehr. [16]

Parameter	Grenze
Minimale Wasserstofftemperatur	-40 °C
Maximale Wasserstofftemperatur	85 °C
Minimaler Druck im Spender	0,5 MPa
Maximaler Druck im Spender	87,5 MPa
Maximale Durchflussmenge	60 g/Sek.

Tabelle2 Leistungs- und Sicherheitsgrenzwerte für die Wasserstoffbetankung nach SAE J260

SAE J2799 – Hard- und Software für die Kommunikation zwischen Wasserstoff-Oberflächenfahrzeugen und -stationen.

Diese Norm legt die Anforderungen an die Kommunikationshardware und -software für die Wasserstoffbetankung von Wasserstoff-Oberflächenfahrzeugen (HSV) wie Brennstoffzellenfahrzeugen fest, kann aber auch potenziell auf schwere Nutzfahrzeuge (z. B. Busse) und Flurförderzeuge (z. B. Gabelstapler) mit einem komprimierten Wasserstoffspeichertank angewendet werden. Es enthält eine Beschreibung der Kommunikationshardware und des Protokolls,

die zum Betanken des HSV verwendet werden können. Ziel dieser Norm ist es, die harmonisierte Entwicklung und Implementierung von Schnittstellen für die Wasserstoffbetankung zu ermöglichen.

2.5.1 BEFÜLLUNG VON ANSCHLÜSSEN – EN ISO 17268 - ANSCHLUSSVORRICHTUNGEN FÜR DIE BEFÜLLUNG VON LANDFAHRZEUGEN MIT WASSERSTOFFGAS

Dieses Dokument definiert das Design, die Sicherheit und die Betriebseigenschaften von Steckverbindern für die Betankung von Wasserstoffgas in Bodenfahrzeugen. In diesem Dokument werden die Betankungsanschlüsse in die folgenden drei grundlegenden Teile unterteilt:

- Druck- und Schutzabdeckung (am Fahrzeug montiert).
- Düse
- Kommunikationsgerät (Kommunikation zwischen dem befüllten Fahrzeug und dem HFS)

Dieses Dokument ist für die Befüllung von Anschlüssen mit einem Nennarbeitsdruck von bis zu 70 MPa vorgesehen.

Der Aufbau und die Arten der Füllanschlüsse werden in einem separaten Abschnitt des Moduls behandelt.

FRAGEN ZUR KONTROLLE:

- 1) Was sind die wichtigsten internationalen Organisationen, die technische Normen herausgeben? (ISO, IEC, SAE)
- 2) EN ISO 17268 - Wasserstoff-Gasfüllanschlüsse für Landfahrzeuge sind für Geräte bestimmt, die bis zu welchem Nennbetriebsdruck betrieben werden? (70 MPa)
- 3) Wie hoch ist der Mindestgehalt an reinem Wasserstoff für Brennstoffzellen? (99,97 %)

3 TECHNISCHE GASABFÜLLANLAGEN

SCHLÜSSELWÖRTER

Wasserstoff, Verteilung, Zylinder, Flaschenbündel, Abfüllung, Produktion, Transport, Lagerung, Industriegase, Sicherheit

Industriegase sind ein alltäglicher Bestandteil unseres Lebens, da sie zur Herstellung der überwiegenden Mehrheit der von uns verwendeten Artikel verwendet werden. Industriegase sind nicht nur ein wesentlicher Bestandteil von Fertigungsprozessen in der Industrie, sondern auch im Gesundheitswesen, in der Lebensmittelindustrie, in der Elektrotechnik, in der Forschung und vielen anderen Anwendungen unverzichtbar. Ihre Verwendung wirkt sich daher nicht nur auf das Leben eines jeden aus, sondern auch auf die Umwelt, in der wir leben. Dieses Modul konzentriert sich auf Wasserstoff und verwandte Technologien. In diesem Teil des Textes werden wir uns neben Wasserstoff auch mit anderen technischen Gasen befassen. Außerdem finden Sie grundlegende Informationen zur Herstellung von Industriegasen, deren Transport und Verteilung. Technische Gasabfüllanlagen beliefern Kunden mit technischen Gasen, befüllen leere technische Gastanks und transportieren diese.

Die Herstellung und der Vertrieb von Industriegasen ist ein Prozess, der von internationalen Unternehmen mit globaler Präsenz durchgeführt wird. Die Produkte ihrer Tätigkeit sind nicht nur Industriegase, sondern auch Chemikalien, die in verschiedenen Industriezweigen verwendet werden, wobei Abfallprodukte der chemischen Produktion verarbeitet werden. Die weltweit größten Produzenten und Vertrieber von Wasserstoff sind Linde, Air Products, Messer, Air Liquide International, Cummins und andere.

In industriellen Gasabfüllanlagen wird Wasserstoff in oberirdischen oder unterirdischen Stahltanks gespeichert. Aus diesen Tanks wird der Wasserstoff weiter in Transport- oder Druckflaschen gefüllt. Die Druckspeicher können an geeigneten Stellen durch unterirdische Großraumbehälter ersetzt werden. Dabei handelt es sich in der Regel um unterirdische Räume, die durch den Bergbau entstanden sind. Der Wasserstoffspeicherdruck beträgt ca. 110 bar; Höhere Drücke werden nicht verwendet, da möglicherweise Erdgas durch die Gesteinsmasse austritt. Unterirdische Lagertanks haben den Vorteil eines großen Fassungsvermögens und nehmen keinen Platz an der Oberfläche ein. Der Nachteil dieser Art der Lagerung ist die Auswahl eines geeigneten Standortes aufgrund der geologischen Gegebenheiten. Voraussetzung für den Ausbau von Wasserstofffahrzeugen ist ein ausreichend dichtes Tankstellennetz, das für die Nutzer gut erreichbar sein muss. Aus diesem Grund

ist es notwendig, Tankstellen in Städten und an Straßen zu bauen, wo es keine geeigneten Quellen für Wasserstoff gibt. Es ist daher notwendig, Wasserstoff ähnlich wie an fossile Brennstoffe oder LPG/CNG-Tankstellen an Tankstellen zu importieren. Am Ort der Produktion wird der Wasserstoff für den Transport in geeignete Behälter abgefüllt und dann zum endgültigen Verteilungspunkt transportiert.

Aufgrund der besonderen Eigenschaften von Wasserstoff ergeben sich bei der Speicherung, dem Transport und der Verteilung von Wasserstoff eine Reihe von Problemen, von denen die wichtigsten sind:

- Extrem niedrige Schüttdichte (3,2-mal niedriger als Erdgas und 2700-mal niedriger als Benzin).
- Komprimierter Wasserstoff kann explosiv sein – Explosionsgefahr
- Die Vorschriften für die Speicherung von Wasserstoff sind weltweit uneinheitlich
- Schwierige Beimischung von Wasserstoff zu Erdgas beim Transport in bestehenden Pipelines
- Wasserstoff kann die Sprödigkeit der Materialien erhöhen, aus denen Transport- und Speichergeräte hergestellt werden [18]

3.1 TRANSPORT VON WASSERSTOFF

Dieser Teil des Textes führt den Leser in den Transport von Wasserstoff zum endgültigen Verteilungspunkt, die Transportmittel und in Bezug auf Tankstellen ein. Da die Frage des Transports von Wasserstoff vom Ort der Produktion bis zur Endtankstelle für Tankstellen von entscheidender Bedeutung ist, wird sich der folgende Abschnitt auf die Art und Weise des Transports von Wasserstoff konzentrieren. Bei Tankstellen ist es essenziell, dass eine ausreichende Versorgung mit Wasserstoff vorhanden ist, um den täglichen Verbrauch zu decken, auch wenn sich diese Stationen in dicht besiedelten Gebieten mit schlechter Erreichbarkeit für Lkw befinden.

Für Wasserstofftankstellen können insbesondere drei Arten des Wasserstofftransports genutzt werden:

- 1) Wasserstofftransport per Pipeline
- 2) Transport von abgefülltem Wasserstoffgas auf der Straße oder auf der Schiene
- 3) Transport von verflüssigtem Wasserstoff

4) Transport von Wasserstoff per Pipeline in einem Gemisch mit Erdgas

3.1.1 TRANSPORT VON WASSERSTOFF PER PIPELINE

Wasserstoffpipelines bestehen aus Metall oder Kunststoff und werden verwendet, um Wasserstoff entweder über die bestehende Erdgasinfrastruktur oder durch den Bau neuer Pipelines ausschließlich für den Transport von Wasserstoff zu verteilen.

Der Bau neuer Wasserstoffpipelines erfordert eine erhebliche Anfangsinvestition, ist aber wahrscheinlich der einfachste Weg, das Gas zu verteilen. Auf der anderen Seite erfordert die Nutzung der bestehenden Erdgasinfrastruktur geringere Anschaffungskosten, aber es muss darauf geachtet werden, dass der richtige Anteil an Wasserstoff im Gasmix enthalten ist. Weitere Investitionen in die Technologie, um den Wasserstoff vom Erdgas zu trennen, sobald er seinen Bestimmungsort erreicht hat, sind ebenfalls erforderlich. [18] Der Transport von Wasserstoff durch Pipelines ist am Ort der Produktion von Vorteil, um eine Wasserstofftankstelle zu versorgen, die für interne Transportfahrzeuge ausgelegt ist, oder um eine öffentliche Wasserstofftankstelle in der Nähe der Wasserstoffproduktion zu versorgen.

3.1.2 TRANSPORT VON KOMPRIMIERTEM WASSERSTOFF FÜR STRAÙE ODER SCHIENE

Der Transport von komprimiertem Wasserstoff auf der Straße oder der Schiene ist derzeit die am weitesten verbreitete Art des Wasserstofftransports. Wasserstoff wird in Druckbehältern mit einem Druck von 200 bar transportiert (definiert durch das Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße – ADR) [19] Als Beispiel für den Einsatz von Wasserstoff und Benzintransport per LKW können wir den in der "Wasserstoffstrategie der Tschechischen Republik" veröffentlichten Vergleich heranziehen. Derselbe LKW mit komprimiertem Wasserstoff kann 500 kg Wasserstoff transportieren (in Flaschen bei 200 bar Druck). Das liegt daran, dass die Zylinder einem sehr hohen Druck standhalten müssen. Ein Lkw mit Wasserstoff wiegt fast genauso viel wie ein Lkw ohne Wasserstoff, der einzige Unterschied sind die 500 kg. Der Druckwasserstofftank ist robust. Aufgrund der geringen Menge an Wasserstoff, die in einem einzigen Anhänger transportiert wird, ist diese Transportart nur bis zu einer Entfernung von etwa 150 km wirtschaftlich. [19] Beim Transport von komprimiertem Wasserstoff auf der Straße oder der Schiene muss keine Transportinfrastruktur aufgebaut werden und die transportierte Wasserstoffmenge kann

entsprechend dosiert werden. Für die Endverteilung von Wasserstoff können Transportbehälter als mobile Speicher für Tankstellen eingesetzt werden, so dass kein Wasserstoff in den Speicher der Tankstelle gepumpt werden muss. Die Nachteile sind die begrenzte Entfernung, insbesondere beim Straßentransport, und die Unfallgefahr. [19]

3.1.3 TRANSPORT VON VERFLÜSSIGTEM WASSERSTOFF

Eine alternative Route, die die Menge des transportierten Wasserstoffs deutlich erhöhen könnte, ist die Verflüssigung. Flüssiger Wasserstoff wird bei einer Temperatur von -253°C gespeichert. Dies impliziert erhöhte Anforderungen an die verwendeten Materialien und einen hohen Energiebedarf für die Verflüssigung, so dass ein großer Nachteil der Verlust von ca. 40 % der Energie bei der Verflüssigung selbst ist (Devinn, Irena).

Eine weitere Möglichkeit, das transportierte Volumen des Wasserstoffs zu erhöhen, ist die Verflüssigung. Flüssiger Wasserstoff wird bei einer Temperatur von -253°C gespeichert. Das Erreichen einer derart niedrigen Temperatur ist mit den hohen Energiekosten der Verflüssigung und den hohen Anforderungen an die Materialien verbunden, die zur Speicherung des verflüssigten Wasserstoffs verwendet werden. Bis zu 40 % der im Wasserstoff gespeicherten Energie gehen bei der Verflüssigung verloren. [19] Der Vorteil dieser Art des Transports ist die Möglichkeit, große Mengen Wasserstoff über beträchtliche Entfernungen zu transportieren (bis geeignete Gasleitungen gebaut sind). Die Nachteile sind der Energieverbrauch und beim Straßenverkehr die Unfallgefahr. [19]

3.1.4 TRANSPORT VON WASSERSTOFF PER PIPELINE IM GEMISCH MIT ERDGAS

Diese Art des Transports nutzt das bestehende Netz von Pipelines, die für den Transport von Erdgas ausgelegt sind, dem eine bestimmte Menge Wasserstoff zugesetzt würde. Aktuell ist das Gasnetz technisch für Wasserstoffzusätze von bis zu 2 % vorbereitet. Nach technischen Modifikationen wäre es theoretisch möglich, bis zu 10 % Wasserstoff zu transportieren. Der Hauptnachteil dieser Art des Transports besteht darin, dass Wasserstoff am Endverbraucher von Erdgas getrennt werden muss. Der Vorteil ist die höhere Durchflussrate des Erdgas-Wasserstoff-Gemisches durch die Pipeline. Diese Transportart ist bei hohem Transportaufkommen und wenn sich eine große Anzahl von Kunden in einer Region konzentriert, wirtschaftlich. Für den Transport von 100 000 Tonnen Wasserstoff sind

nach der deutschen Wasserstoffstrategie 1 200 Waggons, 600 Schiffe oder Pipelines mit einem Durchmesser von 82 cm erforderlich. [19]

3.2 SICHERHEITSREGELN FÜR DEN UMGANG MIT INDUSTRIEGASEN

Die Arbeit mit Industriegasen ist äußerst gefährlich. Ein unsachgemäßer Umgang mit diesen Stoffen kann schwerwiegende Folgen haben und Gesundheit und Leben gefährden. Je nach Art des verwendeten Gases gibt es folgende Gefahrenkategorien:

- Toxische Gefahren,
- brandgefahren
- Explosionsgefahr.

Das sichere Arbeiten mit Gasen sollte immer mit der Schaffung einer geeigneten Infrastruktur beginnen, wie z. B. interne und externe Gasinstallationen, ein- und doppelseitige und automatische Gasexpansionsstationen, hochdichte Installationen aus Kupfer- oder Stahlrohren sowie zusätzliche Ausrüstungen (Druckminderventile, Absperrventile). Räume, in denen eine explosionsfähige Atmosphäre entstehen kann, müssen zunächst mit aktiven Sicherheits- und Lüftungssystemen ausgestattet werden. Laboratorien oder Produktionshallen sollten mit Detektionssystemen ausgestattet sein, die für die Art des Gases geeignet sind, und mit wirksamen Absaugsystemen für Reaktionsgase. Darüber hinaus sollte für eine effektive Belüftung von Räumen, Gasschränken und Lagerräumen gesorgt werden. Flaschen mit komprimierten Gasen sollten vor Kippen, Überhitzung und Beschädigung geschützt werden. Nach Abschluss der Arbeiten sollten die Gasflaschen entfernt und an einen Ort gebracht werden, an dem sie keine Gefahr darstellen. Denken Sie daran, dass im Falle eines Brandes oder eines unsachgemäßen Transports eine hohe Explosionsgefahr besteht (für den Transport sollten spezielle Wagen verwendet werden). Reinigen Sie die Zylinder außerdem nicht selbst. Es ist auch verboten, brennbare Gase mit unverträglichen Stoffen zu lagern, z. B. oxidierende Gase mit brennbaren oder aggressiven Gasen. Die Kenntnis der Grundregeln und Vorschriften ist der Schlüssel zum sicheren Arbeiten mit Gasen. Es zahlt sich aus, die Regeln und Vorschriften zu kennen und sich gegenseitig über Sicherheit aufzuklären.

FRAGEN ZUR KONTROLLE

1) Können Sie mindestens drei Arten des Wasserstofftransports nennen? (Transport per Pipeline; Transport von komprimiertem Wasserstoff auf der Straße oder auf der Schiene, Transport von

verflüssigtem Wasserstoff auf der Straße oder auf der Schiene, Transport von Wasserstoff über Pipelines im Gemisch mit Erdgas)

2) Warum ist es notwendig, Tankstellen in städtischen Gebieten oder in der Nähe von Straßen zu bauen? (wegen der guten Zugänglichkeit)

3) Welche Risiken birgt der Umgang mit Industriegasen? (Explosionsgefahr, Brandgefahr, toxische Risiken)

4 BAUTEILE DER TANKSTELLE

Der Leser erfährt mehr über die Hauptbestandteile einer Wasserstofftankstelle, ihren Zweck und ihre Funktion. Außerdem wird gezeigt, wie die verschiedenen Teile einer Wasserstofftankstelle zu einer funktionalen und sicheren Einheit verbunden werden. Da es sich bei einer Wasserstofftankstelle um ein komplexes Gerät handelt, das elektrische, mechanische und Hochdruckelemente kombiniert, ist es unerlässlich, die Funktion der einzelnen Teile und die Sicherheitsvorschriften für deren Wartung und Reparatur zu kennen.

4.1 DIE HAUPTBESTANDTEILE EINER WASSERSTOFFTANKSTELLE

Eine Wasserstofftankstelle besteht aus folgenden Teilen:

- Wasserstoffspeicher (unterirdisch, oberirdisch)
- Kompressor
- Wärmetauscher
- Hochdruck-Vorratsbehälter
- Kühlende Dosiervorrichtung
- Ausgabegestell
- Befüll-Schnellwechsler

Wasserstoffspeichertank – Der Wasserstoff, der in der Wasserstofftankstelle abgefüllt wird, wird meist komprimiert in Drucktanks gelagert. Aufgrund des sehr kleinen Wasserstoffmoleküls ist es notwendig, ein Material für die Speicher zu wählen, das den Austritt von Wasserstoff durch die Materialstruktur verhindert. Druckbehälter werden meist aus Stahl oder Verbundwerkstoffen hergestellt. Bei Verbundbehältern wird eine Stahl- oder Aluminiumschicht in den Behälter eingebracht, um das Austreten von Wasserstoff zu verhindern. Der Wasserstoff wird in den Tanks bei einem Druck von 200 bar gespeichert. Dieser Wasserstoffspeicher hat sich seit langem bewährt. Der Nachteil ist die beachtliche Größe der Tanks, insbesondere bei Tankstellen, die eine große Anzahl von Fahrzeugen bedienen müssen. Die Druckspeicher können ein fester Bestandteil der Tankstelle sein und der Wasserstoff wird mit LKWs eingespeist oder zum Standort transportiert und dann in den Tank gepumpt. Die andere Möglichkeit ist der Einsatz mobiler Lagertanks, bei denen der Wasserstoff an der Industriegastankstelle abgefüllt wird und dieser Tank dann auf der Straße oder der Schiene zur Tankstelle transportiert wird. Druckbehälter aus Stahl oder Verbundwerkstoff können an der Oberfläche oder unter der Erde aufgestellt werden.

In einigen Fällen ist es möglich, Wasserstoff vor Ort zu produzieren, meistens durch Elektrolyse, um Wasserstoff vor Ort herzustellen, wodurch die Kosten für den Transport des Wasserstoffs zur Tankstelle entfallen.

Die folgenden beiden Systeme werden hauptsächlich für die Wasserstoffspeicherung vor Ort eingesetzt:

Bulk-Bündel – ein Gestell mit Gasflaschen. Alle Gasflaschen des Schüttguts sind durch Rohre und Ventile miteinander verbunden. Dieses Konzeptspeicher eignet sich ideal, wenn das System später erweitert werden soll, da beliebig viele Volumina angeschlossen werden können. Auch sehr kleine Mengen können mit diesem Konzept gelagert werden.



Bild4 Bulk-Bündel [20]

Rohrspeicher – diese Lagertanks bestehen aus langen Speichern, die in einem Rahmen eingebaut sind. Ein Röhrenspeicher ist 6 oder 12 Meter lang und kann große Mengen Wasserstoff speichern.



Bild5 Röhrenspeicher [20]

Kompressor – Der Kompressor komprimiert den Wasserstoff, um den Druck zu erhöhen und das Volumen zu reduzieren, sodass mehr Wasserstoff im System gespeichert werden kann und das Gas für die Abgabe effizient fließen kann. [22] Bei der Hochdruckbefüllung (700 bar) muss der Kompressor den Wasserstoff auf etwa 950 bar unter Druck setzen. [23] Bei der Mitteldruckfüllung wird der Wasserstoff auf einen Druck von etwa 530 bar verdichtet. [23] Für die Wasserstoffverdichtung werden Trockenketten-Kolbenkompressoren mit elektrohydrostatischem Antrieb eingesetzt. Die Verdichtereinheit besteht aus zwei koaxialen, vertikalen Gasflaschen, die jeweils mechanisch gekoppelt sind und von einem Hydraulikzylinder angetrieben werden. Der Abstand zwischen Gas- und Antriebszylinder verhindert eine Verunreinigung des Mediums mit Hydrauliköl.

Die beiden Antriebszylinder sind hydraulisch miteinander verbunden. Hubrichtungswechsel erfolgen über berührungslose Schalter und der Antrieb der Hydraulikzylinder erfolgt über ein Hydraulikaggregat. Bei Verwendung eines Systems mit Regelpumpe kann die Änderung des Kolbenhubs stufenlos geregelt werden. Elektrohydrostatisch angetriebene trockenlaufende Kolbenkompressoren verdichten Gase wie Wasserstoff, Stickstoff, Helium, Argon oder Ethylen völlig frei von Schmierstoffen und Feststoffen. Durch die spezielle Anordnung und Konstruktion der Gaskolbendichtungen und Führungselemente kann zudem bei Hoch- und Spitzendruckanwendungen komplett auf die sonst übliche Schmierung der Dichtungskomponenten verzichtet werden.



Bild6 Kompressor für Tankstelle [21]

**KEY COMPRESSOR COMPONENTS –
FOR BEST PERFORMANCE AND LONGEST LIFETIME**

PISTON RINGS

- Specially designed for high pressure
- Metallic for optimum cylinder lubrication and to limit the oil content in discharge gas
- Non metallic for special cases

CONCENTRIC VALVES

- Combined suction and discharge
- Compact in size
- Easy to assemble and dismantle
- Metallic/non metallic internals

SMALL END BEARINGS

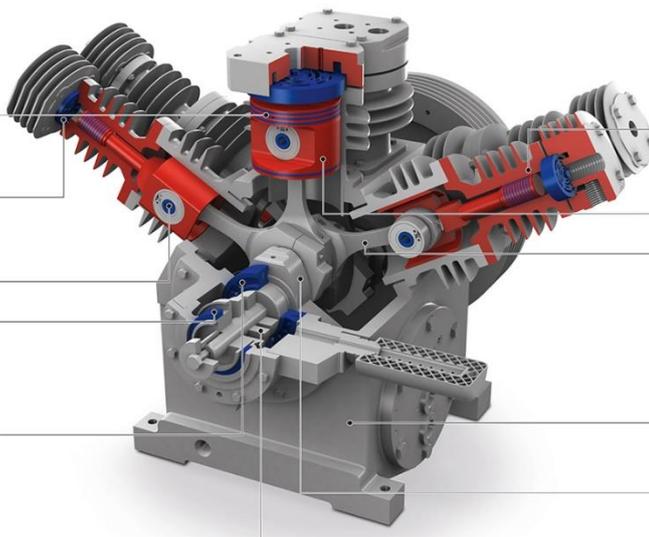
- Cylindrical roller bearings/sleeve bearings with high reliability

SEALS

- Pressure-tight and pressure-relieved
- Oil seal for low suction pressure application
- Mechanical seal for high suction pressure application
- Available in two versions
- No gas loss

MAIN BEARINGS

- Specially designed journal type for H₂ application with high suction pressure
- Angular contact double roller bearings for other applications



**IN-HOUSE DESIGNED AND
MANUFACTURED MAIN PARTS –
FOR HIGHEST RELIABILITY**

CYLINDER

- Single acting
- Specially coated for longer ring life
- No liner required
- Air cooled or water cooled

PISTON

- Wide range of sizes

CONNECTING ROD

- High strength material

**RUGGED DESIGN –
FOR HIGHEST DURABILITY**

CRANKCASE

- Robust and compact design
- Suitable for elevated suction pressure

CRANKSHAFT

- Dynamically balanced

LUBRICATION PUMP

- Highly reliable
- Lobe type
- Crankshaft-driven

Bild7 Hochdruckverdichter-Diagramm [20]

Wärmetauscher – während des Verdichtungsprozesses wird Wasserstoff unerwünscht erhitzt, so dass der hochkomprimierte Wasserstoff einen Wärmetauscher passieren muss, wo er gekühlt wird.

Hochdrucktank – Das hochverdichtete Gas wird in einem Tank gelagert, wo es bereit ist, in das Fahrzeug eingefüllt zu werden. Die Lagerung wird durch speziell entwickelte Ventile, Armaturen und elektrische Steuerungen gesteuert, die den Druck regulieren und je nach Bedarf mit der Dosieranlage und dem Fahrzeug interagieren können. [22]

Gekühlte Zapfanlagen – Zum Abfüllen wird der Wasserstoff für eine schnelle und effiziente Befüllung auf -40 °C gekühlt, um eine sichere Wasserstoffabgabe und die Einhaltung der Abfüllprotokolle, d. h. des J2601-Protokolls, zu gewährleisten.

Zapfsäule – Dient dem gleichen Zweck wie das Zapfsäulengestell an einer herkömmlichen Tankstelle. Inklusive Füllkupplung, Füllschlauch, Anzeige- und Steuerungstechnik. Das Bezahlterminal kann separat aufgestellt werden. Über das Display kann der Nutzer den Tankvorgang bequem starten. Anschließend folgt eine kurze Schritt-für-Schritt-Anleitung, bis die Füllkupplung fest mit dem Tankstutzen des Fahrzeugs verbunden ist. Der bis zu -40 °C heiße Wasserstoff fließt dann durch die Füllkupplung in den Wasserstofftank des Fahrzeugs. Die Zapfanlage kann den Fahrzeugtank sowohl mit einem Druck von 350 bar als auch mit 700 bar befüllen. [20]



Bild 8 Dosiergeräte [20]

Die Spender müssen im Freien unter einem Unterstand aus nicht brennbaren Materialien, einschließlich einer Überdachung, aufgestellt werden. Sie müssen so angeordnet sein, dass sie von der Position des Wasserstofftankstellenbetreibers aus gut sichtbar oder videovideoüberwacht werden können und dass Fahrzeuge die sie umgebenden Gefahrenbereiche nicht durchfahren. Die Schutzhütte muss für eine Windgeschwindigkeit von 160 km/h und eine Dachsneelast von 100 kg/m² unter Berücksichtigung der Erdbebensicherheit ausgelegt sein.

Befüll-Schnellwechsler – verbindet die Schankanlage und das befüllte Fahrzeug. Er muss eine Fülldruckauflösung von 350 bar oder 700 bar bieten. Für die Befüllung von Anschlüssen dürfen nur Füllschläuche verwendet werden, deren Konstruktion eine leitende Verbindung zum mobilen Befüllgerät gewährleistet, dem Wasserstofffluss und dem Betriebsdruck standhält. Der Füllanschluss darf nicht kürzer als 3 m und nicht länger als 5 m sein. Die Konstruktion der Schnellkupplung für die Befüllung schließt ihre Verwendung zu anderen Zwecken als der Befüllung der Tanks von mobilen Wasserstoffgeräten aus. Darüber hinaus muss sie sicherstellen, dass der Wasserstoffstrom nur dann offen ist, wenn er fest mit dem Füllanschluss der mobilen Ausrüstung verbunden ist, und eine unbeabsichtigte Trennung ausschließen. Das Trennen der Befüllschnellkupplung darf erst nach Druckentlastung möglich sein. Wenn die mechanische Beanspruchung einen bestimmten Grenzwert überschreitet, wird die Wasserstoffzufuhr von der Zapfsäule und der Wasserstoffrückfluss aus dem Tank des zu befüllenden mobilen Geräts unterbrochen und geschlossen. Die Kraft, die zum Trennen erforderlich ist, ist wesentlich geringer als die Zugfestigkeit des Füllanschlussschlauchs oder die Kraft, die erforderlich ist, um die Füllschnellkupplung zu ziehen oder die Zapfvorrichtung zu beschädigen. [24] Die Befüll-Schnellkupplung muss einen ausreichend schnellen Gasfluss für eine möglichst kurze Befüllzeit des Fahrzeugs ermöglichen und auch eine Datenverknüpfung zwischen dem befüllten Fahrzeug und der Zapfvorrichtung ermöglichen, um die Datenkommunikation und die optimale Einstellung des Befüllmodus zu gewährleisten.



Bild9 Befüll-Schnellkupplung für 700 bar Druck. [25]

FRAGEN ZUR KONTROLLE

- 1) Welche Materialien werden am häufigsten für Druckwasserstoffspeicher verwendet (Stahl oder Verbundwerkstoffe)?
- 2) Wozu dient der Kompressor in einer Wasserstofftankstelle? (verdichtet den Wasserstoff aus dem Tank auf einen hohen Druck, der dann in das Fahrzeug eingespeist wird)
- 3) Listen Sie mindestens vier Funktionen auf, die von der Füllstation gewährleistet werden müssen (ausreichend schneller Gasfluss, sichere Abschaltung und Druckentlastung, Kommunikation zwischen Zapfanlage und befülltem Fahrzeug, keine Verwechslung der Fülldrücke)

5 BETRIEB UND WARTUNG DER TANKSTELLE

SCHLÜSSELWÖRTER

Sicherheit, Wasserstoff, Gasdetektion, Inspektion, Wartung, Zertifizierung, Qualifizierung, Sicherheitsabstand, Insassenschutz, Risiken, Explosion, Leckage.

Um die Sicherheit bei der Betankung von Fahrzeugen und beim eigentlichen Betrieb der Tankstelle zu gewährleisten, muss der Funktionskontrolle und Wartung der Wasserstofftankstelle ausreichend Aufmerksamkeit geschenkt werden. Diese Frage wird in diesem Teil des Textes behandelt. Der Leser wird in die verschiedenen Aufgaben der Zustandskontrolle einer Wasserstofftankstelle, die Sicherheitsvorschriften und die Systeme zur Gewährleistung eines sicheren Betriebs eingeführt. Abschließend werden Fälle von Wasserstofftankstellenunfällen vorgestellt und deren Ursachen und Folgen erläutert.

5.1 VORAUSSETZUNGEN FÜR DEN SICHEREN BETRIEB EINER WASSERSTOFFTANKSTELLE

Die Einhaltung der Betriebsanweisungen und Betriebsregeln der Anlage ist für den sicheren Betrieb der Tankstelle unerlässlich. Ein Diagramm der Wasserstofftankstelleneinrichtung, Betriebsanleitungen, örtliche Betriebsvorschriften (Brandschutzvorschriften) müssen am Tankstellenstandort vorhanden sein.

Ein Schild, das das Befüllen durch Unbefugte verbietet, und Anweisungen zum Befüllen müssen an prominenter Stelle in der Nähe jeder Druckwasserstoffzapfsäule angebracht werden. Es wird empfohlen, dieses Verbot in mindestens zwei Weltsprachen und in Grenzgebieten in den Sprachen der Nachbarländer umzusetzen. Der Motor des mobilen Gerätes muss während der Befüllung ausgeschaltet und gegen Bewegung gesichert werden. Nur das befüllte Mobilgerät darf sich während des Abfüllvorgangs im dafür vorgesehenen Bereich des Dosiergerätes befinden. Rauchen und offenes Feuer sind im Bereich der Wasserstofftankstelle verboten. Dieses Verbot muss an einer gut sichtbaren Stelle angebracht werden. Es sind Sicherheitsschilder und Plakate zu verwenden, deren Gestaltung und Lage in den einschlägigen Rechtsvorschriften festgelegt sind. Dazu gehören Warnungen vor folgenden Arten von Gefahren:

- Bereiche, in denen sich eine explosionsfähige Atmosphäre befinden kann;
- brennbare Stoffe;
- komprimierte Gase;
- Gefahr eines Stromschlags;
- Abblasen von Sicherheitsventilen;
- heiße oder kalte Oberflächen;
- Mechanische Gefahren.

Die Ausgabegeräte müssen gegen Missbrauch während der Betriebszeiten in der in den örtlichen Vorschriften beschriebenen Weise gesichert sein.

Die Dokumentation der in Betrieb befindlichen Wasserstofftankstelle muss eine Betriebsanleitung enthalten, in der die ordnungsgemäßen Verfahren für die Verwendung aller Teile der Wasserstofftankstelle aufgeführt sind. In der Betriebsanleitung müssen die Risiken und Gefahren identifiziert und Sicherheitsvorkehrungen festgelegt werden. Die Betriebsanleitung muss auch eine Beschreibung und Erläuterung aller Warnhinweise und Kennzeichnungen enthalten, die an der Wasserstofftankstelle verwendet werden, insbesondere solche, die sich auf explosionsgefährdete Bereiche beziehen. Das Servicehandbuch muss Teil der technischen Dokumentation sein und Anweisungen für die qualifizierte Wartung der Verfahrensausrüstung enthalten, in denen die korrekten Verfahren für die Einrichtung, Behandlung, vorbeugende Kontrollen und Reparaturen aufgeführt sind. Das Servicehandbuch muss Empfehlungen für eine qualifizierte Wartung,

Wartungsintervalle und Aufzeichnungen enthalten. Soweit Methoden zur Überprüfung des ordnungsgemäßen Betriebs zur Verfügung stehen (z. B. Softwaretestprogramme), ist die Verwendung dieser Methoden ausführlich zu beschreiben. Die qualifizierte Wartung muss von einer autorisierten Organisation durchgeführt werden. Die Bestimmungen gelten sinngemäß für die Bauteile von Wasserstofftankstellen, bei denen die Wartungsanweisungen vom Bauunternehmer erstellt werden. [24] Bei einem Ausfall im Hochdruckbereich der Tankstelle muss die Wasserstoffzufuhr abgeschaltet werden, wobei die Wasserstoffversorgung des zu betankenden Fahrzeugs unterbrochen wird, falls angeschlossen. Anschließend erfolgt eine kontrollierte Freisetzung von Wasserstoff aus den unter Druck stehenden Teilen in die umgebende Atmosphäre.

5.2 BETRIEBSSTEUERUNG DER WASSERSTOFFTANKSTELLE

Die Wasserstofftankstelle muss mindestens alle 6 Monate einer regelmäßigen Inspektion unterzogen werden, bei der Folgendes durchzuführen ist:

- eine Sichtprüfung des Zustands der gesamten Anlage;
- Überprüfung der Funktion der Sicherheitseinrichtungen und der ferngesteuerten Ventile;
- Überprüfung des Betriebszustandes der Brandschutzeinrichtungen
- Überprüfung der Dichtheit der Anschlüsse während des Betriebs der Anlage;
- Sichtprüfung der Unversehrtheit der Kabelisolierung;
- Sichtprüfung von Erdungs- und Verbindungseinrichtungen (Integrität der Leiter, korrosions- und mechanische Lösefreiheit der Verbindungsstellen usw.).

Wasserstofftankstellen werden regelmäßig einmal jährlich überprüft:

- Inspektion der Gasanlage
- Überprüfung des Durchgangs und Einstellung von Druckentlastungsvorrichtungen;
- Wasserstoff-Qualitätstests
- Überprüfung der Kompaktheit und Kennzeichnung von Brandschutzdichtungen;
- Überprüfung des Wasserstoff-Massendurchflussmessers
- Funktionsprüfung von elektrischen Betriebsmitteln in explosionsgefährdeten Bereichen.

Wasserstofftankstellen werden alle drei Jahre einer regelmäßigen Inspektion unterzogen:

- eine Funktionsprüfung der Gasanlage, einschließlich einer Überprüfung der Qualifikation des Betreibers;
- eine Funktionsprüfung der elektrischen Betriebsmittel, einschließlich der Überprüfung der Qualifikation des Bedieners.

Nur Personen, die älter als 18 Jahre sind, medizinisch fit, nachweislich geschult, mit den örtlichen Betriebsvorschriften vertraut, im Falle eines Unfalls geschult und für den Betrieb einer Wasserstofftankstelle geprüft sind, dürfen eine Wasserstofftankstelle betreiben.

5.3 UNFÄLLE AN WASSERSTOFFTANKSTELLEN

Trotz aller Sicherheitsmaßnahmen zur Gewährleistung des Betriebs von Wasserstofftankstellen kam es am 10. Juni 2019 in der norwegischen Gemeinde Bærum zu einer Wasserstofftankstellenexplosion. Zwei Personen, die sich in einem Fahrzeug in der Nähe der Wasserstofftankstelle befanden, wurden bei dem Unfall verletzt. Die Explosion war so stark, dass sie die Airbags der Fahrzeuge in der Nähe auslöste. Hersteller der Wasserstofftankstelle war NEL, sie ist der größte Hersteller von Elektrolyseuren mit einer Geschichte, die bis ins Jahr 1927 zurückreicht, und ein führender Hersteller von Wasserstofftankstellen.

Eigentümer der betroffenen Wasserstofftankstelle ist Uno-X Hydrogen, die Station wurde 2016 eröffnet. Es handelte sich um eine Nel H2Station mit Wasserstoffproduktion vor Ort.

Die Hauptursache für die Explosion war ein schlechtes Anziehen der Schrauben am Wasserstoffspeichertank, was zu einem allmählichen Versagen des Dichtungssystems führte, gefolgt von einem unkontrollierten Austritt von Wasserstoff (Zeit: 17.30 Uhr) und dann einer Explosion (Zeit: 17.37 Uhr). Die anschließende Untersuchung ergab einen Fehler bei der Montage des Hochdruckspeichers, der aus Stahltanks und anderen Komponenten von Subunternehmern besteht.

Die Untersuchung testete die in dieser Art von Abfüllstation verwendeten Hochdruckspeicher und stellte fest, dass das System in Bezug auf Materialstruktur und Design absolut sicher ist, die Montage des Systems jedoch als unsicher befunden wurde. Ein unzureichendes Anziehen der Schrauben kann zu einem Wasserstoffleck mit fatalen Folgen führen.

Nach diesem Vorfall hat NEL die Kontrolle der Montage der Druckbehälter noch weiter verschärft, wobei die einzelnen Montageschritte wie in der Luft- und Raumfahrtindustrie kontrolliert werden.

PROBLEME BEI DER KONTROLLE

- 1) Wer darf eine Wasserstofftankstelle betreiben? (Personen, die älter als 18 Jahre sind, medizinisch fit sind, nachweislich geschult sind, mit den örtlichen Betriebsvorschriften vertraut sind, in Notfallübungen geschult und für den Betrieb einer Wasserstofftankstelle geprüft sind)
- 2) In welchen Abständen wird die Wasserstofftankstelle kontrolliert? (6 Monate, 1 Jahr, 3 Jahre)
- 3) Welche Aufgaben werden bei der 1-Jahres-Inspektion durchgeführt? Listen Sie mindestens vier auf. (Gasgeräte prüfen, Druckentlastungseinrichtungen auf Spiel und Einstellung prüfen, Wasserstoffqualität prüfen, Kompaktheit und Kennzeichnung von Brandschutzdichtungen prüfen, Wasserstoffmassendurchflussmesser prüfen, Betriebsprüfung von elektrischen Betriebsmitteln in explosionsgefährdeten Bereichen.)

6 ARTEN VON TANKSTELLEN

SCHLÜSSELWÖRTER

Technische Rahmenbedingungen, Wasserstoffquelle, Wasserstofftankstelle, Speicher, Mobilität, stationärer Bahnhof, innerbetrieblicher Verkehr, Pkw, Busse, Bahnen, Flugzeuge, komprimierter gasförmiger Wasserstoff, Flüssigwasserstoff, Wirtschaftlichkeit, Kälte, Verfügbarkeit, öffentlich

Im Folgenden werden Wasserstofftankstellen in mehrere Kategorien eingeteilt. Diese Kategorisierung soll dem Leser helfen, die Wasserstofftankstellen zu verstehen und die wichtigsten Vor- und Nachteile jeder Lösung zusammenzufassen. Bei der Auswahl des Typs einer bestimmten Wasserstofftankstelle sind die wirtschaftlichen, technischen und sicherheitstechnischen Möglichkeiten sowie der konkrete Verwendungszweck der Tankstelle entscheidend. Nach Berücksichtigung all dieser Aspekte wird eine Studie durchgeführt und das am besten geeignete Tankstellendesign ausgewählt. Hier werden Wasserstofftankstellen nach der Art des verwendeten Wasserstoffs, dem Standort der Tankstelle, dem Fahrzeugtyp, für den die Station bestimmt ist, und der Quelle des in der Tankstelle verteilten Wasserstoffs klassifiziert.

6.1 KLASSIFIZIERUNG NACH WASSERSTOFFART

(1) Wasserstofftankstellen für komprimierten gasförmigen Wasserstoff

2) Wasserstofftankstellen für flüssigen Wasserstoff

Wasserstofftankstellen zur Betankung von Brennstoffzellenfahrzeugen mit gasförmigem Wasserstoff werden für Fahrzeuge eingesetzt, bei denen der Wasserstoff ebenfalls als Gas im Lagertank des Fahrzeugs gespeichert ist. Grundsätzlich gibt es zwei Standards für gasförmige Wasserstofftankstellen – das Nachfüllen von Wasserstoff bei 700 bar (H70) oder bei 350 bar (H35). Pkw verwenden in der Regel die H70-Technologie. Tankstellen, die mit flüssigem Wasserstoff betrieben werden, sind deutlich seltener. Wasserstoff liegt nur bei Temperaturen unter $-252,87\text{ °C}$ in flüssiger Form vor. Eine Flüssigwasserstoff-Tankstelle erfordert ein intensives Kühlsystem, das sehr energie- und technologieintensiv ist. [26]

6.2 VERTEILUNG NACH STANDORTEN

1) Stationär

2) Mobil

Wasserstofftankstellen sind in der Regel ein stationäres System. Die Hauptfunktion einer Wasserstofftankstelle besteht darin, als Wasserstoffspeichersystem mit Wasserstoffspeicher- und Betankungstechnologie zu fungieren. In den meisten Fällen wird Wasserstoff derzeit in Flaschen oder in speziellen Wasserstoffbehältern auf Lkw an die Station geliefert. Einige Stationen produzieren Wasserstoff direkt an der Wasserstoffstation durch Elektrolyse (aus Wind oder Sonne). Pipelines wären eine weitere effiziente Möglichkeit, diese Stationen in Zukunft mit Wasserstoff zu versorgen. Mobile Wasserstoffbetankungssysteme sind viel kleiner und werden für die Notbetankung oder für einige spezielle mobile Anwendungsfälle verwendet. Der Vorteil mobiler Tankstellen besteht darin, dass die Station als funktionale Einheit konzipiert werden kann, die von der Industriegasabfüllanlage auf den Einsatzort gebracht und bei Entleerung durch eine Vollstation ersetzt wird, während die leere Tankstelle zur Befüllung abtransportiert wird. Dieses System eignet sich z.B. für innerbetriebliche Transporte. [26]. Wasserstoff für Personenkraftwagen erfordert Wasserstofftankstellen, die einen Druck von H70 (700 bar) liefern, während Lastkraftwagen und andere Spezialfahrzeuge heutzutage typischerweise Wasserstofftankstellen mit H35 (350 bar) benötigen. Flüssiger Wasserstoff könnte in Zukunft auch für Lkw-Anwendungen eingesetzt werden; Der Vorteil ist die höhere Energiedichte von flüssigem Wasserstoff. Flüssiger Wasserstoff soll nach dem neuesten Stand der Technik in einem

Wasserstofftank gespeichert werden. Brennstoffzellenbusse werden immer beliebter, weil diese Art von Wasserstofffahrzeugen einen hohen Wasserstoffverbrauch haben, der vorhersehbar ist. Eine Flotte von mehreren Wasserstoffbussen kann die Investition in eine eigene Wasserstofftankstelle rechtfertigen. Der Wasserstoffverbrauch kann berechnet und die Station regelmäßig aufgefüllt werden. Wasserstoff-Brennstoffzellenbusse speichern Wasserstoff derzeit bei 350 bar. Bei innerbetrieblichen Transportfahrzeugen kommt hauptsächlich die 350-bar-Technologie zum Einsatz, da ein solches Speichersystem weniger Investitionen erfordert und im Gegensatz zu Pkw die regelmäßige Betankung an einer Station geplant und durchgeführt werden kann, die in der Nähe der allgemeinen Betriebsbasis (z. B. außerhalb oder innerhalb der Anlage) errichtet wurde. Andere Verkehrsträger wie Züge, Straßenbahnen oder sogar Flugzeuge können Wasserstofftankstellen in einem Depot oder Hangar haben. [26]

6.3 KLASSIFIZIERUNG NACH WASSERSTOFFQUELLE

1) Wasserstofftankstellen ohne eigene Wasserstoffquelle

2) Wasserstofftankstellen mit eigener Wasserstoffquelle

Die meisten Tankstellen werden an Orten gebaut, an denen es keine geeigneten Wasserstoffquellen gibt und Wasserstoff zu diesen Stationen transportiert werden muss. Wasserstofftankstellen mit eigener Wasserstoffquelle sollten an Wasserstoffproduktionsstandorten errichtet werden (z.B. Herstellung aus Deponiegas, Wasserstoff als Abgas aus der chemischen Produktion etc.). Durch den Bau von Wasserstofftankstellen an diesen Standorten werden erhebliche Kosten eingespart, die mit dem Transport des Wasserstoffs und der Abfüllung in Transportbehälter verbunden sind. Der Nachteil ist, dass es in der Regel für die Öffentlichkeit weniger zugänglich ist. Daher eignet sich diese Art von Tankstelle besonders für lokale Kunden oder für die Betankung von Fahrzeugen, die in der Produktion dieser Art von Wasserstoff tätig sind.

Derzeit ist die gebräuchlichste Art von Wasserstofftankstelle die für komprimiertes Wasserstoffgas. Diese Stationen sind stationär und ähnlich aufgebaut wie CNG-Tankstellen. Der Fülldruck ist auf 700 bar für Pkw und 350 bar für Lkw eingestellt. In den meisten bereits realisierten Tankstellen wird Wasserstoff in Tanks importiert und dann in einen Lagertank in der Tankstelle gepumpt.

Als interessantes Beispiel sei hier ein Beispiel für eine kleine Wasserstofftankstelle genannt, die sich dank der verwendeten Technologie und ihrer geringen Größe beispielsweise sehr gut für dicht besiedelte Stadtgebiete eignet. Honda hat eine ziemlich lange Geschichte mit Wasserstoffautos,

wobei das erste FCX-Clarity-Modell bereits 2007 auf den Markt kam. Gleichzeitig hat das Unternehmen lange Zeit in die Entwicklung einer besseren Wasserstofftankstelle investiert. Im Jahr 2014 erschien der erste Prototyp einer SHS-Station – eine Station, die auf kleinstem Raum alles beherbergt, was zur Herstellung von Wasserstoff benötigt wird. Im Jahr 2015 entwickelte das Unternehmen eine revolutionäre Technologie zur Wasserstofferzeugung mittels Hochdruckelektrolyse mit einem eigenen Gerät namens Power Creator. Die SHS-Station ist eine sehr kompakte Möglichkeit, Wasserstoff zu produzieren, zu speichern und nachzufüllen, und das alles nur mit einem Anschluss an Wasser und Strom. Die Energieversorgung soll überwiegend aus erneuerbaren Quellen stammen, wodurch der CO₂-Ausstoß auch bei der Herstellung von Wasserstoff reduziert wird. Durch die Verwendung des Power-Creator-Systems wird Hochdruckwasserstoff erzeugt und daher ist es nicht erforderlich, Kompressoren zu verwenden, die Platz beanspruchen, und somit wird auch der Stromverbrauch der gesamten Anlage reduziert, laut der Honda-Website wurde der Stromverbrauch auf 1/4 reduziert. Gleichzeitig entfallen so große Tanks, um mehr Wasserstoff zu speichern. All diese Verbesserungen haben es ermöglicht, dass die Station eine Fläche von 3,7 m x 2,25 m x 2,57 m einnimmt und fast überall aufgestellt werden kann.

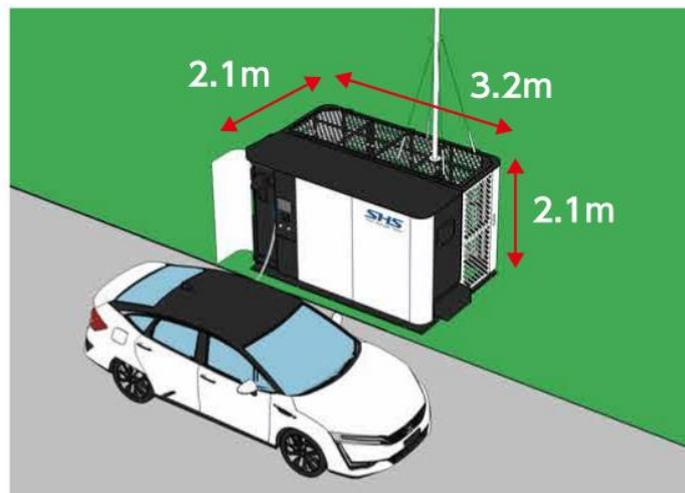


Bild10 Honda SHS [27]

FRAGEN ZUR KONTROLLE

1) Was sind die Vor- und Nachteile von Wasserstofftankstellen, die vor Ort gebaut werden? (Vorteile: eliminiert die Kosten für die Abfüllung von Wasserstoff in Transportbehälter und den Transport vom Ort der Produktion bis zur Abfüllung; Nachteile: weniger zugänglich für die Öffentlichkeit, besser geeignet für die lokale Verteilung)

2) Was ist der Hauptnachteil von Wasserstofftankstellen für flüssigen Wasserstoff? (energetischer und technischer Aufwand, bei verflüssigtem Wasserstoff muss er bei Temperaturen unter -258°C gehalten werden.)

3) Was ist derzeit die häufigste Art von Wasserstofftankstelle? (stationär für komprimiertes Wasserstoffgas mit einem Fülldruck von 700 bar für Pkw und 350 bar für Lkw, ohne eigene Wasserstoffquelle).

7 PROGNOSEN IN ENTWICKLUNG

SCHLÜSSELWÖRTER

Zukunft, Entwicklung, Effizienz, Nutzung, Forschung, Verfügbarkeit, Umwelt, Europäische Union, Subventionen, Emissionen, Brennstoffzelle, Tankstellen, Unabhängigkeit, Wasserstoff, Ökologie, Lkw, Pkw

Die Zukunft der Wasserstofftankstellen ist eng verknüpft mit der Entwicklung der Wasserstoffproduktion und der Infrastruktur für den Transport zum Tankort. Die nächsten notwendigen Schritte werden die Umstellung auf grüne Energiequellen für die Wasserstoffproduktion und die Effizienzsteigerung der Brennstoffzelle sein. Die zunehmende Anzahl von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen wird Druck auf die wachsende Zahl von Tankstellen und deren erhöhte Verfügbarkeit ausüben.

Um nur einige Beispiele zu nennen: Der japanische Autobauer Toyota brachte mit dem Mirai sein erstes Wasserstoffauto auf den Markt und stellte Anfang Dezember den experimentellen GR Yaris mit Wasserstoff-Verbrennungsmotor vor. Beide Autos demonstrieren auf geniale Weise zwei unterschiedliche Ansätze für den Einsatz von Wasserstoff im Verkehr: Während der Mirai chemische Reaktionen in Brennstoffzellen nutzt, um Strom für den Elektroantrieb zu erzeugen, verbrennt der GR Yaris Wasserstoff in einem modifizierten konventionellen Motor. Beides hat unbestreitbare Umweltvorteile: Bei der Verwendung von Wasserstoff in einer Brennstoffzelle fällt nur nicht mineralisiertes Wasser als Abfall an, und selbst bei der Verbrennung in einem konventionellen Motor fallen nur relativ geringe Mengen an schädlichem NO_x an. "Die Wasserstoff-Brennstoffzelle ist deutlich einfacher zu recyceln, mit dem Nachteil, dass sehr seltene Metalle wie Platin oder Iridium verwendet werden."

Als die Europäische Kommission 2020 ihre Wasserstoffstrategie vorlegte, setzte sie sich das Ziel, ein vollständiges Wasserstoff-Ökosystem in der EU zu schaffen, um zur Dekarbonisierung aller betroffenen Sektoren beizutragen. Zwei Jahre später gibt es auf EU-Ebene konkrete Rechtsvorschriften, die dazu beitragen sollen, die Ziele in die Praxis umzusetzen. Wasserstoff wird beispielsweise durch das bekannte Klimagesetzpaket "Fit for 55" abgedeckt, das die Produktion von erneuerbarem Wasserstoff definiert und Maßnahmen zur Förderung seines Verbrauchs enthält. Dazu gehört der Bau von Tankstellen und der dazugehörigen Infrastruktur. Im neuen Energieplan REPowerEU, der der EU helfen soll, ihre Energieabhängigkeit von Russland zu beenden und erschwingliche und saubere Energie für die EU-27 zu gewährleisten, hat die Kommission eine Erhöhung der Wasserstoffziele vorgeschlagen. In Europa wird Wasserstoff nicht nur als eine weitere saubere Energiequelle oder Energiespeicherung betrachtet, sondern auch als alternativer Kraftstoff für Fahrzeuge. Obwohl Wasserstofftransportprojekte noch in den Kinderschuhen stecken, haben sie Potenzial.

Es gibt bereits wasserstoffbetriebene Autos, Lastwagen, Busse, Züge und sogar Schiffe. Aber sie sind weit davon entfernt, weit verbreitet zu sein. Und einige von ihnen werden es vielleicht nicht einmal mehr erleben. Verkehrsexperten sagen, dass sich Wasserstoff eher im Güterverkehr als im Personenverkehr durchsetzen wird. Bei Autos sind Batterien führend. Wenn wir über den Personenverkehr sprechen, hat die Batterieleistung einen Vorsprung von fast einem Jahrzehnt, was auch zeigt, dass die Einführung von Wasserstoff im Verkehr im Allgemeinen und im Personenverkehr im Besonderen eher eine ergänzende als die wichtigste Lösung zu sein scheint. Im Güterverkehr hat Wasserstoff jedoch eine Reihe von Vorteilen gegenüber Batterien. Einer der Vorteile ist das geringere Gewicht der Fahrzeuge, sowie die schnelle Betankung in 20 Minuten und die zuverlässige und höhere Reichweite, die auch bei Kälte nicht wesentlich abnehmen soll. Auch aus diesem Grund wird Wasserstoff als Lösung gesehen, insbesondere für den Güterfernverkehr und dort, wo das Fahrzeug kontinuierlich beladen werden muss. Es ist wahrscheinlich, dass Batterien und Wasserstoff nachgefüllt werden und nebeneinander existieren werden. Wasserstoff ist auch aus Sicht der ČESMAD BOHEMIA (Verband der Spediteure) sinnvoll. "Die getesteten Prototypen (von Wasserstofffahrzeugen) scheinen für den Fernverkehr geeignet zu sein, ihre Reichweite ist vergleichbar mit Dieselfahrzeugen und besser als batterieelektrische Fahrzeuge."

Doch der Ausbau des Wasserstoffantriebs ist nach wie vor die Musik der Zukunft, und es bleiben noch einige Fragezeichen zu klären. Eine davon ist zum Beispiel, wo die sperrigen Wasserstofftanks installiert werden sollen, die Lkw benötigen. Ob Europa es schafft, genügend reinen Wasserstoff zu produzieren, bleibt ebenfalls ein zentrales Fragezeichen. Die Herstellung von Wasserstoff aus fossilen

Brennstoffen würde sicherlich nicht zur Klimaneutralität führen. Wenn wir über sogenannten grünen Wasserstoff sprechen, ist der größte Stolperstein der Umfang der benötigten Produktion. Um den wasserstoffbetriebenen Verkehr zu entwickeln, ist es natürlich auch notwendig, genügend Tankstellen zu bauen. Der Bau von Tankstellen ist nicht nur finanziell, sondern auch technisch anspruchsvoll. So kostete die tschechische Tankstelle, die seit Juni 2022 in Ostrava in Betrieb ist, rund 15 Millionen CZK. Die Tschechische Republik plant, bis 2030 etwa 80 davon im Inland zu bauen. Ein weiteres Hindernis, das die schnelle Entwicklung von Wasserstofffahrzeugen behindern wird, ist die Annahme eines sehr hohen Preises für Wasserstofffahrzeuge. Will die EU ihre Ziele erreichen, den Verkehr emissionsfrei zu gestalten, sollen bis 2030 mindestens alle 150 Kilometer Wasserstofftankstellen entlang des transeuropäischen Autoverkehrsnetzes zur Verfügung stehen. Dadurch würde ein ausreichend dichtes Netz von Wasserstofftankstellen geschaffen, um eine angemessene grenzüberschreitende Konnektivität in der EU zu gewährleisten und die 60 000 Wasserstoff-Lkw zu unterstützen, die im Jahr 2030 voraussichtlich auf den Straßen der EU unterwegs sein werden. Die 60.000 Wasserstoff-Lkw spiegeln die Ergebnisse einer Studie aus dem Jahr 2020 wider, die vom Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU) in Auftrag gegeben wurde und zu dem Schluss kam, dass Brennstoffzellen "eine sehr vielversprechende Lösung für einen emissionsfreien Antrieb im Schwerlastverkehr sind. Die Studie kam zu dem Schluss, dass Wasserstoff-Brennstoffzellen-Lkw bis 2027 kostengünstig werden könnten, wenn der Preis für Wasserstoff auf 6 €/kg sinkt. Die Studie hob auch die hohe Einsatzflexibilität und die relativ kurzen Betankungszeiten von Wasserstoff-Lkw hervor. Ein gesetzlicher Rahmen wird jedoch unerlässlich sein, damit Wasserstoff-Lkw auf dem Markt Fuß fassen können. "Ohne das Flaggschiff-Klimapaket der EU Fit for 55 würden bis 2030 nur 3 000 Wasserstoff-Lkw auf Europas Straßen unterwegs sein", sagte ein Beamter der Europäischen Kommission gegenüber EURACTIV. Mit den aktuellen Vorschlägen zur Erreichung der Klimaziele der EU wird diese Zahl jedoch auf 60 000 steigen. Die Studie skizziert ein Szenario, in dem 17 % der im Jahr 2030 verkauften Neufahrzeuge mit Wasserstoff betrieben werden. Zwei wichtige Kriterien müssen jedoch erfüllt sein: Wasserstoff soll zu einem Preis von unter 6 €/kg verkauft werden und die mit der Wasserstofftechnologie verbundenen Kosten sollen sinken. In diesem Fall würden bis 2030 rund 60.000 Wasserstoff-Lkw auf europäischen Straßen unterwegs sein. Im Jahr 2030 könnte grüner Wasserstoff nur noch 1,8 €/kg kosten. Die Kosten der Technologie könnten durch eine gemeinsame Forschungsfinanzierung der EU und der Industrie auf einen vielversprechenden Abwärtstrend gebracht werden.

Bei Wasserstofftankstellen geht es in Zukunft vor allem darum, ein ausreichend dichtes Tankstellennetz aufzubauen, das Wasserstoffversorgungsproblem zu lösen und die Betankungszeiten zu verkürzen. Eine Option, die in Betracht gezogen wird, ist die Erhöhung des Fülldrucks, was jedoch

zu noch höheren Anforderungen an die Sicherheit, die Qualität der Materialien und das Design sowohl der Tankstellen als auch der Fahrzeuge führen wird. Mit zunehmender Anzahl der Tankstellen sinkt auch der Preis der Tankstellen, so dass ihre Anzahl noch weiter erhöht werden kann.

Um den Bau und Betrieb von Wasserstofftankstellen effizienter und kostengünstiger zu gestalten, entwickeln der Lehrstuhl für Energietechnik der Universität Duisburg-Essen (UDE) und das Zentrum für Brennstoffzellentechnologie (ZBT) derzeit Simulationsmodelle von Tankstellenkomponenten, um Entwürfe zu analysieren und zu bewerten. Forschende der UDE und des ZBT beschäftigen sich mit den Grundbausteinen einer Wasserstofftankstelle. Auf dem ZBT-Prüfstand untersuchen sie die Kraftstoffpumpe, die Tankgröße und den Druck, speisen die Ergebnisse in Simulationen ein und berechnen die Zusammenhänge zwischen den Komponenten, um das Tanken effizient zu gestalten. Entscheidend für die Auslegung einer Wasserstofftankstelle ist ihr Verwendungszweck. Tankstellen in Kleinstädten oder Geschäften und Tankstellen entlang von Autobahnen werden völlig anders sein.

Ein weiteres Problem, das angegangen werden muss, sind die Verluste in der Wasserstoffherstellungs- und -verteilungskette. Je effizienter der Prozess, desto niedriger der Endpreis für Wasserstoff. Wasserstoff ist zudem deutlich teurer als fossile Brennstoffe. Projektleiter Dr. Jürgen Roes vom Fachgebiet Energietechnik sagt: "Nichtsdestotrotz ist Wasserstoff aus Sonnen- und Windenergie ein wichtiger Energiespeicher der Zukunft, weil er die Umwelt nicht belastet." Es ist daher sinnvoll, die Ressource so effizient wie möglich zu nutzen und sich Gedanken darüber zu machen, wie man sie möglichst sparsam einsetzen kann. [28]

FRAGEN ZUR KONTROLLE

- 1) In welchem Verkehrsträger wird Wasserstoff voraussichtlich die Hauptanwendung sein? (Güterverkehr und Stadtbusse)
- 2) Was sind die Vorteile von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen im Vergleich zu Elektrofahrzeugen? (geringeres Gewicht, größere Reichweite, Reichweite unabhängig von der Außentemperatur, schnellere Betankung)
- 3) Wie viel Prozent der in der EU verkauften Neufahrzeuge sollen im Jahr 2030 mit Wasserstoff betrieben werden (17 %)?

8 ZUSAMMENFASSUNG

Ziel dieses Textes ist es, den Leser mit den Grundfragen der Wasserstofftankstelle, ihrer Geschichte und ihrem Betrieb vertraut zu machen. Der Leser sollte mit den grundlegenden rechtlichen Fragen und technischen Vorschriften vertraut sein, die sowohl die eigentliche Planung und den Bau von Tankstellen als auch die Regeln für deren Betrieb und Wartung betreffen. In den folgenden Abschnitten wird der Leser mit den Arten von Wasserstofftankstellen, ihren grundlegenden Eigenschaften und ihrem Verwendungszweck vertraut gemacht. Der Text schließt mit einer Einschätzung der zukünftigen Entwicklung von Wasserstofftankstellen sowie der generellen Nutzung von Wasserstoff als Energieträger im Verkehr.

Das Thema Wasserstofftechnologie ist sehr breit gefächert und befindet sich in einer dynamischen Entwicklung, so dass es nicht möglich ist, alle Informationen zu diesem Thema in einem Bildungstext abzudecken. Für eine perfekte Orientierung im Thema Wasserstoff und dessen Nutzung ist es notwendig, sich mit anderen Modulen vertraut zu machen und die Entwicklungen im Bereich der Wasserstofftechnologie zu verfolgen. Im Allgemeinen können Wasserstofftechnologien als sehr vielversprechend angesehen werden, obwohl ihr flächendeckender Einsatz mit einer beträchtlichen Anzahl von Problemen einhergehen und kostspielig sein wird.

9 QUELLEN

[1]: <https://finmag.penize.cz/veda-a-technika/430830-je-vodik-palivem-budoucnosti-nastupujici-trend-ocima-expertu>

(2) <https://www.wired.com/2007/11/checking-in-on/>

(3) <https://www.statista.com/statistics/1026719/number-of-hydrogen-fuel-stations-by-country/>

[4] CHIC » *Brennstoffzellen-Elektrobus-Projekt CHIC veröffentlicht Abschlussbericht als Werkzeug für Städte und Busbetreiber* [online]. [vid. 2017-01-19]. Dostupné z: <http://chic-project.eu/newsevents/news/fuel-cell-electric-bus-project-chic-launches-final-project-report-as-tool-for-cities-and-bus-operators>

[5] H2-Stationen. *H2 Mobility* [online]. [vid. 2017-02-10]. Dostupné z: <http://h2-mobility.de/h2-stationen/>

- [6] <https://www.iberdrola.com/sustainability/hydrogen-stations>
- [7] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/hydrogen-refuelling-station>
- [8] TPG 304 03 www.cgoa.cz
- [9] <https://hydro-tech.hennlich.cz/produkty/kompresory-a-plnici-stanice-vodiku-14468.html>
- [10] <https://www.sultrade.cz/standardni-vysokotlake-kompresory/>
- [11] <https://www.products.pcc.eu/cs/blog/vyznam-technicky-plynu-v-prumyslu/>
- [12] <https://www.technicka-zarizeni.cz/sbornik-prednasek-kh-2021/vystavba-a-provoz-vodikovych-plnicich-stanic-a-nektere-souvislosti/>
- [13] <https://www.technickenormy.cz/csn-en-17127-venkovni-vydejni-vodikove-cerpaci-stanice-na-plynnny-vodik-s-plnicimi-protokoly/>
- [14] <https://www.iso.org/standard/71940.html>
- [15] <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/90016399-7325-4ffa-a34f-058be6306350/en-17124-2022>
- [16] https://www.sae.org/standards/content/j2601_202005/
- [17] Vergleichende Studie über globale, europäische und italienische Normen für Wasserstofftankstellen .
- Matteo Genovese, Viviana Cigolotti, Elio Jannelli und Petronilla Fragiaco E3S Web Conf., 334 (2022) 09003
- ZWEI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202233409003>
- [18] <https://www.tuvsud.com/cs-cz/odvetvi/energetika/konvencni-energie/vodikova-energie/skladovani-preprava-a-distribuce-vodiku>
- [19] Wasserstoffstrategie der Tschechischen Republik, *Ministerium für Industrie und Handel*.
- [20] <https://www.sultrade.cz/standardni-vysokotlake-kompresory/>
- [21] <https://hydro-tech.hennlich.cz/produkty/kompresory-a-plnici-stanice-vodiku-14468.html>

[22] <https://www.haskel.com/en-us/blog/how-does-a-hydrogen-refuelling-station-work>

[23] <https://hdsam.es.anl.gov/index.php?content=hrsam>

[24] TPG 304 03.

[25] <https://www.weh.us/weh-fueling-nozzle-tk17-h-70-mpa-for-fast-filling-cars-singlehanded-operation-selfservice.html>

[26] <https://hyfindr.com/hydrogen-refueling-station/>

[27] <https://global.honda/innovation/FuelCell/smart-hydrogen-station-engineer-talk.html>

[28] <https://fuelcellsworks.com/news/filling-station-of-the-future-using-hydrogen-more-efficiently/>

10 LISTE DER BILDER

Bild 1 Tankstellennetz in Deutschland in den Jahren 2016, 2018, 2023 [5]	66
.....	6
Bild 2: Aktueller Stand und Ausblick für den Ausbau von wasserstoffbetriebenen Bussen. [4]	77
.....	7. Sonstiges
Bild 3: Stand der Entwicklung der CEN- und CENELEC-Normen für HFS. [17]	1010
.....	10
Bild 4 Bulk-Bündel [20].....	2625
.....	26
Bild 5 Rohrspeicher [20].....	2725
.....	27
Bild 6 Kompressor für Tankstelle [21].....	2826
.....	28
Bild 7 Hochdruckverdichter-Diagramm [20]	2827
.....	28
Bild 8 Dosiergeräte [20]	2928
.....	29
Bild 9 Befüll-Schnellkupplung für 700 bar Druck. [25]	3029
.....	30
Bild 10 Honda SHS [27]	3836
.....	38

11 LISTE DER TABELLEN

Tabelle 1 Anforderungen an die Wasserstoffqualität von Wasserstoff-Brennstoffzellen [8]	1716
.....	17
Tabelle 2 Leistungs- und Sicherheitsgrenzwerte für die Wasserstoffbetankung nach SAE J260	1817
.....	18