

WASSERSTOFF-INFRASTRUKTUR FÜR EINE NACHHALTIGE MOBILITÄT

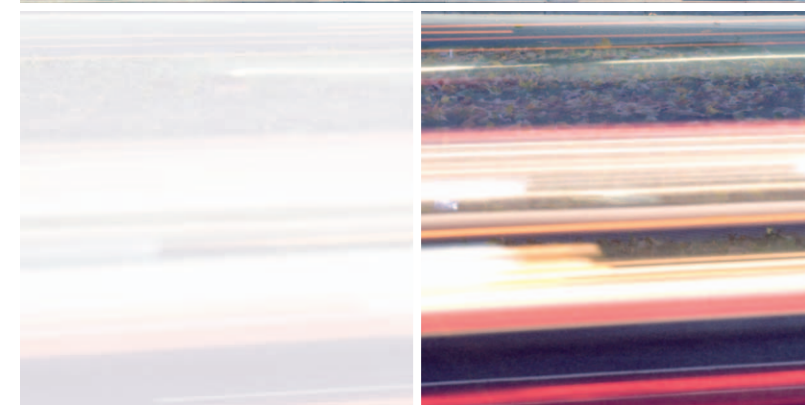
Entwicklungsstand und Forschungsbedarf

 **Fraunhofer**
ISE



Baden-Württemberg

Wasserstoff - H₂



WASSERSTOFF-INFRASTRUKTUR FÜR EINE NACHHALTIGE MOBILITÄT

Entwicklungsstand und Forschungsbedarf

e-mobil BW GmbH – Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg

Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg

Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg

VORWORT



Wasserstoff wird zukünftig eine wichtige Rolle in einer zunehmend auf erneuerbare Energien gestützten Energiewirtschaft spielen. Als speicherbarer Sekundärenergieträger kann er als Kraftstoff im Verkehr, als Brennstoff in der Energiewirtschaft und als Ausgangsstoff in der Industrie vielfältig genutzt werden. Brennstoffzellen-Fahrzeuge werden im Rahmen neuer Mobilitätslösungen einen wichtigen Beitrag sowohl zum Klimaschutz als auch zu einer nachhaltigen Mobilität und Wertschöpfung im Land leisten.

Regenerative Energien und die Brennstoffzellen-Technologie als Schlüsseltechnologie helfen zudem, die Abhängigkeit von Erdölimporten zu reduzieren und gleichzeitig Wertschöpfung und Arbeitsplätze im Land zu schaffen und zu sichern.

Die Studie „Energieträger der Zukunft – Potenziale der Wasserstoff-Technologie in Baden-Württemberg“ hat die mit Elektrolyseuren und Brennstoffzellen-Technologie verbundenen ökonomischen Potenziale im Land aufgezeigt. Die hier vorgelegte Studie beleuchtet die Rolle, den Entwicklungsstand und den Forschungsbedarf bei der Wasserstoff-Infrastruktur als Voraussetzung einer nachhaltigen Mobilität.

Bis die Wasserstoff-Wirtschaft einen bedeutenden Marktanteil der Energiewende tragen kann, werden weitere Schritte in Forschung, Entwicklung und insbesondere zur Validierung der Technologie notwendig sein. Damit die von mehreren führenden Automobilherstellern angekündigte Markteinführung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen in den nächsten Jahren gelingt, brauchen wir den begleitenden Aufbau einer Infrastruktur von Wasserstoff-Tankstellen. Dabei ist in der ersten Phase, in der die wirtschaftlichen Risiken für die Akteure noch sehr groß sind, ein staatliches Engagement erforderlich, um die neue Technologie auf den Weg zu bringen.

Mit dem aktuellen Innovationsprogramm Wasserstoff-Infrastruktur fördert das Land Baden-Württemberg die Errichtung von Wasserstoff-Tankstellen sowie von Anlagen zur Herstellung und Speicherung von Wasserstoff mit 4 Millionen Euro bis zum Jahr 2015.

Gefördert werden außerdem die Weiterentwicklung und Praxiserprobung von Einzelkomponenten einer Wasserstoff-Infrastruktur, wie beispielsweise Kompressoren oder Elektrolyseuren. Dabei ist es wichtig, dass die geförderten Vorhaben übergeordnete bundesweite Anforderungen hinsichtlich Netzaufbau, Standardisierung und Technologieentwicklung berücksichtigen und dass die Anlagen zur Wasserstoff-Herstellung und die Tankstellen nur gefördert werden, wenn der Wasserstoff überwiegend regenerativ erzeugt wird.

Das Land Baden-Württemberg unterstützt die deutschen Aktivitäten zur Energiewende mit einer Vielzahl von Maßnahmen. Der Technologiewandel hin zur Elektromobilität findet operativ Ausdruck in der Zusammenarbeit der baden-württembergischen Akteure aus Wirtschaft, Wissenschaft und öffentlicher Hand, z. B. im Cluster Elektromobilität Süd-West und dem Schaufenster Elektromobilität LivingLab BWe mobil. Mit der vorliegenden Studie werden nun weitere Impulse zur Zusammenarbeit in der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie gegeben.

Der Ausbau der Tankstellen muss zeitlich zum Hochlauf der Fahrzeugflotte passen. Die Studie gibt einen umfassenden Überblick über die aktuelle Ausgangslage sowie die augenblicklich verfügbaren technischen Konzepte und Komponenten der Tankstellen. Die Autoren wagen auch einen Blick in die Zukunft. Wo liegen die Perspektiven und die möglichen Probleme für den Ausbau der Wasserstoff-Infrastruktur? Der letzte Teil der Studie enthält konkrete Vorschläge für den weiteren Forschungs- und Handlungsbedarf von Industrie, Verbänden und öffentlicher Hand.

All dies muss sowohl fachlich als auch politisch diskutiert werden. Wir freuen uns über die vielfältigen Impulse für eine nachhaltige und zugleich mobile Zukunft und empfehlen Ihnen die Lektüre dieser Studie.

Franz Untersteller MdL
Minister für Umwelt, Klima
und Energiewirtschaft

Dr. Nils Schmid MdL
Minister für Finanzen und
Wirtschaft, Stv. MP

Winfried Herrmann
Minister für Verkehr
und Infrastruktur

Franz Loogen
Geschäftsführer der
e-mobil BW

KERNERGEBNISSE

Wasserstoff stellt als Kraftstoff in Brennstoffzellen-Fahrzeugen eine hervorragende Ergänzung zu batteriebetriebenen Antrieben dar und ist essenziell, um Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor zu senken. Wasserstoff-Mobilität – PKW und Stadtbusse – ermöglicht durch die Nutzung erneuerbarer Energien eine emissionsfreie und komfortable Mobilität ohne Einschränkungen. Wasserstoff bietet als vielseitiger und speicherbarer Sekundärenergieträger Synergien, welche die Energiewende unterstützen und beschleunigen können.

Die Nutzung von Wasserstoff in der Mobilität erfordert den Aufbau einer leistungsfähigen Wasserstoff-Infrastruktur. Stand 2012 sind deutschlandweit 15 Wasserstoff-Tankstellen öffentlich zugänglich bzw. im Bau (davon 5 in Baden-Württemberg) und bis zum Jahr 2015 sollen mindestens 35 weitere Tankstellen hinzukommen. Mit einer deutlichen Marktdurchdringung von Wasserstoff im Mobilitätssektor ist ab dem Jahr 2025 zu rechnen. Damit muss bis zu diesem Zeitpunkt ein leistungsfähiges Tankstellennetz in Baden-Württemberg verfügbar sein. Bereits zum Ende der Marktvorbereitung im Jahr 2020/21 werden ca. 70 bis 100 Tankstellen allein in Baden-Württemberg benötigt.

Zur Senkung des Investitionsrisikos wird in der Demonstrationsphase und in der Marktvorbereitungsphase weiterhin ein Engagement der öffentlichen Hand notwendig sein. Um dem bekannten „Henne-Ei-Problem“ Rechnung zu tragen und eine Abschreckung potenzieller Fahrzeugkäufer zu vermeiden, muss der Aufbau der Infrastruktur dem Verkaufsstart der Fahrzeuge leicht vorgelagert sein. Um trotz der v. a. in der Demonstrationsphase geringen finanziellen Rückflüsse und hohen Kosten einen Aufbau der Infrastruktur zu erreichen, ist bis zum Ende der Marktvorbereitung eine Förderung über ein regelmäßig den Marktbedingungen anzupassendes Förderprogramm notwendig.

Zum Erreichen einer Marktreife der Infrastruktur sind weitere Aktivitäten der beteiligten Akteure notwendig. Durch die Erkenntnisse der Demonstrationsphase wurden diverse Hindernisse erkannt, die für eine Marktreife der Infrastruktur beseitigt werden müssen. Hierbei handelt es sich um mannigfaltige technologische, organisatorische und marktbezogene Hindernisse, die durch eine weiterhin enge Zusammenarbeit der bereits existierenden und zukünftigen Akteure, die sich an diesem neuen Markt bzw. an dem neuen Themengebiet beteiligen möchten, beseitigt werden können.

Eine Standardisierung erleichtert den Aufbau einer Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur. Aufgrund des Demonstrationscharakters der bisher errichteten Tankstellen unterscheiden sich diese deutlich in Ausführung und Technologie. Skalen- und Lerneffekte sind daher nur in sehr geringem Umfang spürbar. Eine Standardisierung der Tankstellen verspricht wesentliche Verbesserungen im Bereich der Kosten, Genehmigungsverfahren, Wartung, Zuverlässigkeit, etc. und ist daher die wichtigste, technische Handlungsempfehlung.

Neue Marktkonzepte, neue Betreiber und die Nutzung der Synergien mit erneuerbaren Energien können eine frühe Kommerzialisierung begünstigen. Bedingt durch mögliche Synergien im Bereich der Energiespeicherung, der Entlastung der Stromnetze und des öffentlichen Nahverkehrs kann die Wasserstoff-Infrastruktur auch jenseits der reinen Individual-Mobilität genutzt werden. Entsprechende Synergien sollten ggf. im Rahmen von Leuchtturmprojekten erprobt und ggf. genutzt werden, um bereits frühzeitig höhere finanzielle Rückflüsse und eine Kommerzialisierung zu erreichen.



INHALT

	Vorwort	2
	Kernergebnisse	3
1	Ausgangslage und Zielsetzung der Studie	6
2	Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur für die Mobilität	7
2.1	Wasserstoff als Kraftstoff	7
2.2	Wasserstoff im Öffentlichen Nahverkehr	10
2.3	Bestehende Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur in Deutschland	11
2.4	Ausbau der Wasserstoff-Infrastruktur bis 2015	12
2.5	Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur im internationalen Kontext	14
2.6	Überblick der Initiativen und Forschungsprojekte	16
3	Technische Konzepte und Komponenten für Wasserstoff-Tankstellen	22
3.1	Anforderung zur Betankung von Fahrzeugen	22
3.1.1	Betankung von PKWs	22
3.1.2	Betankung von Brennstoffzellen-Bussen	23
3.2	Systematik der Wasserstoff-Tankstellenkonzepte	23
3.2.1	In Deutschland existierende Konzepte	23
3.2.2	Weitere Wasserstoff-Tankstellenkonzepte	31
3.3	Wesentliche Komponenten einer Wasserstoff-Tankstelle	33
3.3.1	Wasserstoff-Erzeugung	33
3.3.2	Kompressoren/Pumpen	35
3.3.3	Wasserstoff-Speicher	37
3.3.4	Wasserstoff-Vorkühlung/Verdampfer	38
3.3.5	Dispenser	39
3.3.6	Verfahrenstechnische Kleinkomponenten (Ventile, Sensorik)	39
3.3.7	Steuerungstechnik	39
4	Analyse der Technologiekonzepte	40
4.1	Diskussion und Bewertung heutiger Wasserstoff-Tankstellen	40
4.2	Diskussion der Tankstellenkonzepte	41
4.2.1	Flüssig/gasförmig/Pipeline	41
4.2.2	On-site/Off-site	42
4.2.3	Technische Entwicklung des Tankstellennetzausbaus	44
4.3	Betriebsverhalten und Zuverlässigkeit existierender Wasserstoff-Tankstellen und deren Komponenten	45
4.4	Herausforderungen auf dem Weg zu einer Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur	47
4.4.1	Standardisierung	47
4.4.2	Kosten	48
4.4.3	Genehmigungsverfahren	52
4.4.4	Geeichte Abgabemessung	54
4.4.5	Normgerechte Betankung	54

4.4.6	Urbane Busflottenbetankung	56
4.4.7	Sicherheit	57
4.4.8	Wasserstoff-Qualität	57
4.4.9	Nutzerakzeptanz/Nutzerfreundlichkeit	60
4.4.10	Sonstige Herausforderungen	61
5	Wasserstoff-Tankstellen für Baden-Württemberg	62
5.1	Marktdurchdringung wasserstoffbasierter Antriebe im Straßenverkehr	62
5.2	Prognose des verkehrsbedingten Wasserstoffbedarfs	66
5.3	Entwicklung einer Tankstellen-Infrastruktur	67
5.4	Perspektiven der On-site-Erzeugung	72
6	Wettbewerbssituation für kritische Komponenten	74
6.1	Hersteller von Wasserstoff-Kompressoren	75
6.2	Hersteller von Hochdruckspeichern	75
6.3	Hersteller von Füllgarnituren	76
6.4	Hersteller von Elektrolysesystemen	76
6.5	Fazit der Komponentenrecherche	77
7	Forschungs- und Handlungsbedarf	78
7.1	Übergeordnete Leitgedanken	78
7.2	Technologie	79
7.3	Markteinführung	81
7.4	Standardisierung, Normung, Genehmigung, Abnahme	84
8	Zusammenfassung	86
9	Anhang	90
	Experteninterviews	91
	Literaturverzeichnis	92
	Abkürzungsverzeichnis	94



AUSGANGSLAGE UND ZIELSETZUNG DER STUDIE

Auf dem Weg zu einer nachhaltigen, ressourcenschonenden und sicheren Energieversorgung stellt die Nutzung erneuerbarer Energiequellen die tragende Säule dar. Konsequenterweise wird in Deutschland der Ausbau von Wind- und Solarenergie sowie von Biomassenutzung stetig vorangetrieben. Bereits im Jahr 2012 beträgt der Anteil erneuerbarer Energiequellen an der Stromerzeugung ca. 23 % [1]. Nach der Natur- und Reaktorkatastrophe in Japan hat die Bundesregierung im Juni 2011 in einem Eckpunktepapier zur Energiewende das Energiekonzept von 2010 prinzipiell bestätigt und zudem bis zum Jahr 2022 den Ausstieg aus der Kernenergie beschlossen. Wesentliche Elemente des Konzepts sind eine Senkung des Primärenergiebedarfs um 50 % gegenüber 2008 bis zum Jahr 2050 und die Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung auf 50 % im Jahr 2030 und 80 % im Jahr 2050. Zur Einhaltung der Klimaschutzziele sollen die Treibhausgasemissionen um 55 % (2030) bzw. um 80 % bis 95 % (2050) gegenüber dem Basisjahr 1990 gesenkt werden [2]. Die Endlichkeit fossiler Energieträger und der notwendige Klimaschutz werden damit erhebliche strukturelle Veränderungen in vielen Bereichen wie dem Verkehr, der Energiewirtschaft und der Industrie mit sich bringen.

Die zunehmende Marktdurchdringung dezentraler und zentraler regenerativer Energieerzeuger führt bereits heute zu einem großen Handlungsbedarf im elektrischen Verbundnetz. Ein abgestimmter Netzausbau, eine intelligente Steuerung des Netzes, der Erzeuger und der Verbraucher sowie die Entwicklung großskaliger und flexibler Speicherlösungen sind notwendig, um eine sichere und stabile Energieversorgung zu gewährleisten. Durch die Nutzung von Überschussstrom zur Herstellung von Wasserstoff und Einspeisung in das Gasnetz wird es zu einem Zusammenwachsen der Infrastrukturen kommen (sogenannter „Power-to-Gas“-Ansatz). Wasserstoff als Sekundärenergieträger besitzt ein sehr hohes Potenzial, als Kraftstoff im Verkehr, als Brennstoff in der Energiewirtschaft und als Ausgangsstoff in der Industrie vielfältig genutzt zu werden. In verschiedenen Förderinitiativen und -programmen von Bund, Ländern und Industrie wird kontinuierlich an der Weiterentwicklung und Markteinführung der Wasserstoff-Technologie gearbeitet. Vor allem die Nutzung von Wasserstoff als alternativer Kraftstoff in Brennstoffzellen-Fahrzeugen eröffnet die Möglichkeit, eine nachhaltige Mobilität ohne wesentliche Einschränkungen zu realisieren, erfordert aber den Aufbau einer leistungsfähigen Wasserstoff-Infrastruktur. In der bereits im Jahre 2003 gegründeten „Clean Energy Partnership“ (CEP) werden wertvolle Erkenntnisse und Erfahrungen zum Einsatz von Brennstoffzellen-Fahrzeugen und Wasserstoff-Tankstellen gesammelt und die Markteinführung vorbereitet.

Das Land Baden-Württemberg hat ebenfalls in einer ersten Initiative den Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur, u. a. aus Mitteln des Landesinfrastruktur-Programmes, gefördert. Im Dezember 2012 wurde mit dem „H2 BW Innovationsprogramm Wasserstoff-Infrastruktur Baden-Württemberg“ eine weitere Initiative gestartet, den Aufbau einer Infrastruktur voranzutreiben. In einer durch die e-mobil BW geleiteten Studie „Energieträger der Zukunft – Potenziale der Wasserstoff-Technologie in Baden-Württemberg“ werden der aktuelle Entwicklungsstand bei Brennstoffzellen, Elektrolyseuren sowie weiteren Wasserstoff-Erzeugungsarten zusammengefasst, mögliche Einsatzbereiche und Geschäftsfelder diskutiert und die wirtschaftlichen Potenziale für das Land abgeschätzt.

Aufbauend auf dieser Arbeit soll in der vorliegenden Studie der weitere Ausbau einer Wasserstoff-Infrastruktur für eine nachhaltige Mobilität im Land untersucht werden. Dabei sollen sowohl die bereits vorhandenen und geplanten CEP-Maßnahmen berücksichtigt als auch der Forschungs- und Technologiebedarf diskutiert werden. Die Ergebnisse liefern damit einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung einer Wasserstoff-Roadmap des Landes und können als Grundlage für die weitere strategische Planung des Ministeriums genutzt werden.

Der Bericht gliedert sich in sechs Hauptteile. Zuerst wird eine allgemeine Einleitung in das Thema Wasserstoff als Energieträger und Kraftstoff in der Mobilität gegeben, die auch nationale und internationale Aktivitäten zusammenfasst (zweites Kapitel). Im nächsten Kapitel wird eine Systematik zu den unterschiedlichen Tankstellenkonzepten inklusive der Wasserstoff-Erzeugung gegeben und wichtige technische Komponenten vorgestellt. Basierend auf Erfahrungen und Veröffentlichungen aus Forschungs- und Entwicklungsprojekten sowie gezielt durchgeführten Experteninterviews wird im vierten Kapitel der aktuelle Entwicklungsstand von Wasserstoff-Tankstellen diskutiert und aus verschiedenen Blickrichtungen bewertet. Im fünften Kapitel werden verschiedene Prognosen zur Entwicklung der Wasserstoff-Mobilität mit einem eigenen Szenario verglichen und daraus eine Quantifizierung der benötigten Anzahl und der Größe von Wasserstoff-Tankstellen für Baden-Württemberg als auch Deutschland vorgenommen. Anhand von strategischen Überlegungen wird eine Infrastruktur für Baden-Württemberg abgeleitet. Das sechste Kapitel befasst sich mit der Zulieferstruktur für ausgewählte kritische Komponenten einer Wasserstoff-Tankstelle. Im letzten Kapitel wird als Fazit der Erkenntnisgewinn in Handlungsempfehlungen für Politik, Forschung und Wirtschaft formuliert.

AUFBAU EINER WASSERSTOFF-INFRASTRUKTUR FÜR DIE MOBILITÄT

Wasserstoff hat das Potenzial, in einer auf erneuerbaren Energien aufbauenden Energiewirtschaft eine entscheidende Rolle zu spielen. Als speicherfähiger Sekundärenergieträger kann er das fluktuierende Angebot einer regenerativen Energieerzeugung mit der schwankenden Nachfrage auf Verbraucherseite harmonisieren. Bereits mit der Entdeckung des elektrochemischen Prinzips der Elektrolyse und der Brennstoffzelle existierte die Idee der Nutzung von Wasserstoff als speicherbarer Sekundärenergieträger. In der chemischen Industrie wird seit über 100 Jahren Wasserstoff als Edukt genutzt, hergestellt u. a. durch Elektrolyse aus Wasser. In der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts etablierte sich dann die Brennstoffzellen-Technologie in militärischen und Raumfahrtanwendungen. Mit dem weltweit zunehmenden Ausbau erneuerbarer Energien rückt die Nutzung von Wasserstoff in der Energiewirtschaft in den Vordergrund. Für verschiedenste portable, mobile und stationäre Anwendungen werden Brennstoffzellen- und Wasserstoffsysteme entwickelt.

2.1 WASSERSTOFF ALS KRAFTSTOFF

Erste Entwicklungen von Brennstoffzellen-Versuchsfahrzeugen reichen bis in die 1970er Jahre zurück. Angetrieben durch stetig steigende Ölpreise und der verstärkten politischen Forderung nach einer emissionsarmen oder lokal sogar emissionslosen Antriebstechnik wurden in den letzten 20 Jahren große Anstrengungen unternommen, Brennstoffzellen-, Hybrid- und Batteriefahrzeuge zu entwickeln. Dabei ergänzen sich die unterschiedlichen Antriebskonzepte durch ihre spezifischen Charakteristika. Während batteriebetriebene Elektrofahrzeuge aufgrund der begrenzten Kapazität des Akkumulators und der langen Ladezeiten einen Großteil des täglichen Stadt- und Pendelverkehrs übernehmen können, überzeugen Hybrid- und Brennstoffzellen-Fahrzeuge durch ihre größere

Reichweite und die kurzen Betankungszeiten vor allem im Fern- und Überlandverkehr sowie Schwerlasttransport.

Die Entwicklung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen wird heute praktisch von allen namhaften PKW-Herstellern intensiv vorangetrieben. Wurden in früheren Konzepten unterschiedliche Wasserstoff-Speichersysteme (tiefkalter Flüssigwasserstoff – LH₂ – bzw. materialgebundene Speicherung) oder auch die „On-board“-Wasserstoff-Erzeugung durch Reformierung umgesetzt, hat sich in den letzten Jahren die Druckspeicherung von Wasserstoff – CGH₂ – durchgesetzt. Für PKWs gelten heute 700-bar-Drucktanks als Standard. Bei Bussen werden Drucktanks mit 350 bar verwendet. Dies hat unmittelbare Auswirkungen auf die Reichweite der Fahrzeuge, den Füllvorgang und den daraus resultierenden Aufbau einer Wasserstoff-Tankstelle. Tabelle 1 fasst hierzu typische Daten von aktuellen Brennstoffzellen-Fahrzeugen zusammen.

UMWELTVERTRÄGLICHKEIT VON BRENNSTOFFZELLEN-FAHRZEUGEN

Wird eine Brennstoffzelle als Antriebsaggregat eingesetzt, emittiert das Brennstoffzellen-Fahrzeug lokal nur Wasserdampf, Schadstoffe bzw. Treibhausgase werden nicht freigesetzt. Es entsteht auch kein Feinstaub durch den Antrieb. Lediglich der Abrieb der Reifen, der Bremsen und des Straßenbelags erzeugt wie bei allen anderen Straßenfahrzeugen eine Feinstaubbelastung. Dagegen muss in der Umweltbilanz die Herstellung und die Verteilung des alternativen Kraftstoffs mitberücksichtigt werden. Allgemein wird deshalb in der Diskussion zur Umweltverträglichkeit und dem Energiebedarf eines Fahrzeugs zwischen dem „Well-to-Wheel“- und dem „Tank-to-Wheel“-Ansatz unterschieden. Bei der WTW-Methode (wörtlich: vom Bohrloch bis zum Rad) wird die gesamte Wirkkette von der

Tabelle 1: Typische Tankgröße und Reichweiten heutiger Brennstoffzellen-Fahrzeuge

Typ	Fahrzeug	Speicherdruck	Inhalt	Reichweite	Verbrauch
PKW	Daimler B-Klasse F-Cell	700 bar	3,7 kg	380 km ¹	0,97 kg/100 km
PKW	Toyota FCHV-adv	700 bar	6,0 kg	830 km ²	0,72 kg/100 km
PKW	Honda FCX Clarity	50 bar	~ 4,0 kg	460 km ³	0,87 kg/100 km
Bus	Daimler Citaro FuelCELL Hybrid	350 bar	35 kg	> 250 km ³	10–14 kg/100 km

1: nach NEDC, 2: nach Jap. 10–15 Test-Zyklus, 3: Herstellerangabe

Gewinnung und Bereitstellung des Kraftstoffs bzw. Energieträgers bis zur Umwandlung in mechanische (Antriebs-) Energie betrachtet. Die TTW-Methode (wörtlich: vom Tank zum Rad) berücksichtigt nur die Wirkkette im Fahrzeug. Im Kontext einer nachhaltigen Energieversorgung und des Klimaschutzes ist die umfangreichere WTW-Betrachtung notwendig. Ein Vergleich von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren, batterieelektrischem und Brennstoffzellen-Antrieb resultiert in einer komplexen Matrix und war bereits Gegenstand zahlreicher wissenschaftlicher Studien. Auf eine umfassende Betrachtung wird an dieser Stelle verzichtet, stattdessen sollen anhand aktueller Daten des Referenzwerks „Well-to-wheel Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context“ [3] allgemeine Schlussfolgerungen und Ableitungen für eine Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur gezogen werden.

Eine Gegenüberstellung wichtiger Antriebskonzepte nach [3] ist in Abbildung 1 gegeben. Bezogen auf eine PKW-Fahrleistung von 100 km werden der spezifische Primärenergiebedarf als Maß für die Effizienz der gesamten Wirkkette sowie auch die damit ver-

bundenen Emissionen klimaschädlicher Treibhausgase (engl.: greenhouse gas – GHG, ausgedrückt in CO₂-Äquivalent) verglichen. Folgende Antriebskonzepte sind berücksichtigt:

- Ein dieselbetriebener PKW, Stand 2010, mit „Direct-Injection-Compression-Ignition“-Technologie und Diesel-Partikelfilter (ICE Diesel) als Referenzwert für die konventionellen Technologien;
- Brennstoffzellen-PKW mit Wasserstoff aus (I) zentraler Erdgasreformierung nach heutigen Stand der Technik (FCEV, CNG), aus (II) einer zentralen Elektrolyseanlage mit einer Energieversorgung gemäß dem heutigen EU-Strommix (FCEV, EU-Strommix) und letztendlich aus (III) einer zentralen Elektrolyseanlage, welche mit Windstrom versorgt wird (FCEV, Windstrom);
- Sowie Fahrzeuge mit batterieelektrischem Antrieb mit (I) Strom gemäß aktuellen EU-Strommix (BEV, EU-Strommix) und (II) Windstrom als Vertreter für erneuerbare Energien (BEV, Windstrom).

Strom aus erneuerbaren Energien wird gemäß der Literatur [3] mit einem Umwandlungswirkungsgrad von 100 % angenommen.

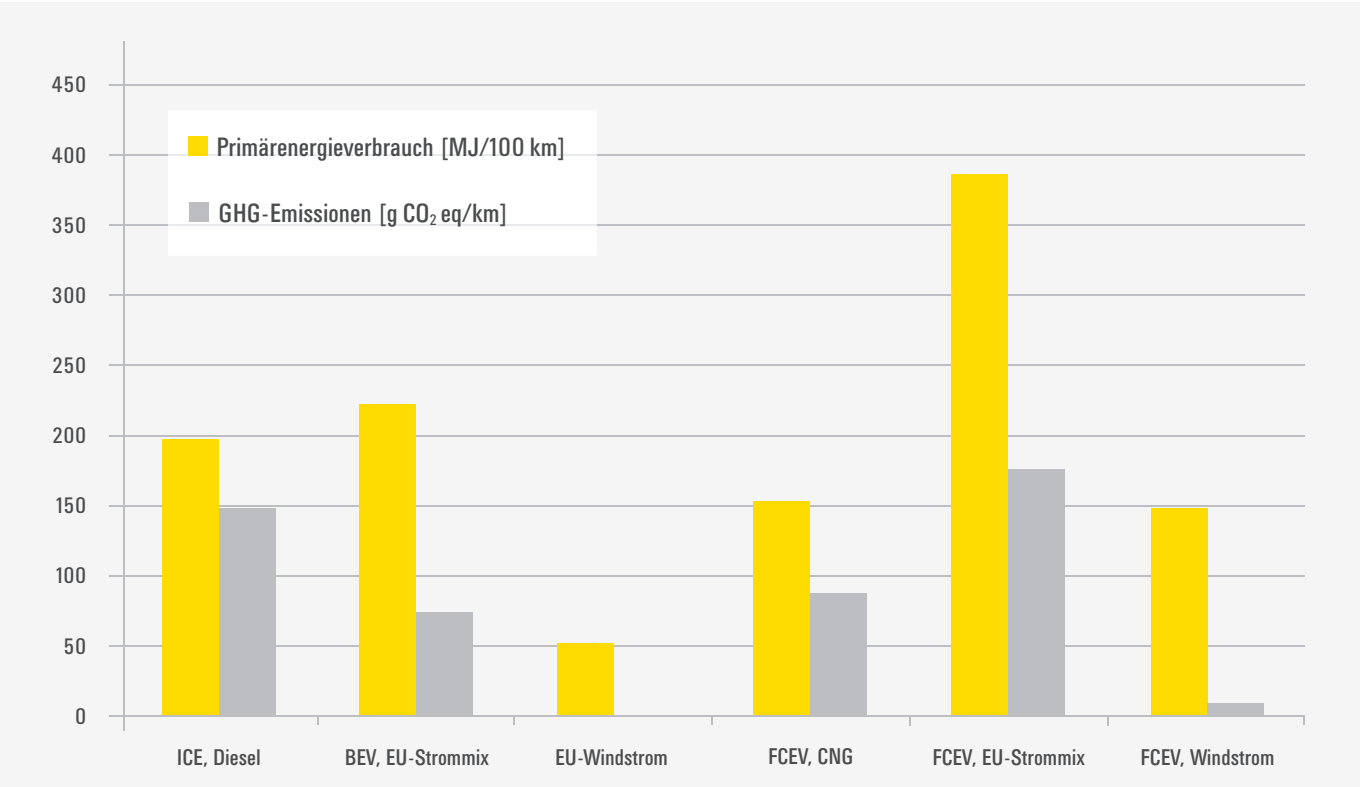


Abbildung 1: Primärenergieverbrauch und Greenhouse-Gas-Emissionen ausgewählter Antriebskonzepte gemäß einer Well-To-Wheel-Analyse nach [3]

Dieser Vergleich macht deutlich, dass batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) und Brennstoffzellen-Fahrzeuge (FCEV) nur durch Nutzung erneuerbarer Energien die Möglichkeit zur emissionsfreien Mobilität bieten. Ein BEV mit Strom aus erneuerbaren Energien („Windstrom“) zeigt bezüglich Effizienz und GHG-Emissionen die besten Werte. Bei einem FCEV („Windstrom“) schlägt zwar ein höherer Primärenergieverbrauch zu Buche, es werden aber ebenfalls fast keine Treibhausgase emittiert. Beide elektrischen Antriebskonzepte eignen sich damit für eine nachhaltige Mobilität und ergänzen sich durch ihre unterschiedlichen Einsatzprofile (Kurzstrecke im urbanen und Pendlerverkehr vs. Langstrecke und Schwerlast- bzw. öffentlicher Personentransport). Der Energieträger Wasserstoff kann darüber hinaus im Zusammenspiel mit erneuerbaren Energien weitere Vorteile nutzen. Eine Nutzung des derzeitigen Strommixes für die Elektromobilität ist nicht sinnvoll und sorgt sowohl bei BEVs, als auch bei FCEVs für schlechtere Effizienzketten und teilweise sogar höhere CO₂-Emissionen als Fahrzeuge mit aktuellen Diesel-Verbrennungsmotoren.

Für eine zukünftige Tankstellen-Infrastruktur wird daraus gefolgert, dass Wasserstoff für die Mobilität aus erneuerbaren Energien stammen muss. Mit über 96 % wird derzeit jedoch der überwiegende Anteil des weltweit benötigten Wasserstoffs in Raffinerien aus fossilen Energieträgern wie Erdgas und Erdöl erzeugt (und direkt vor Ort auch wieder verwendet). Größere Mengen fallen zudem als Nebenprodukt in der Chlor-Alkali-Elektrolyse an. Verfahren wie die Wasserelektrolyse oder Gewinnung aus Biomasse spielen heutzutage nur eine untergeordnete Rolle in der Wasserstoff-Produktion.

KOPPELUNG MIT ERNEUERBAREN ENERGIEN

Der politische Wille zur Nutzung von Wasserstoff als speicherbarer Sekundärenergieträger in Koppelung mit erneuerbaren Energiequellen ist allgemein gegeben, wie u. a. die verschiedenen Förderinitiativen von Bund und Ländern belegen. Wesentliches Argument ist die leichte Speicherbarkeit regenerativer Energien in Form eines chemisch stabilen Energieträgers ohne Selbstentladung. Durch die hohe Energiedichte kann die Speicherung auch im Megawatt-Maßstab erfolgen. Zudem lässt sich das hergestellte Gas vielseitig in industriellen, thermischen und mobilen Anwendungen nutzen.

In der aktuellen technologischen Diskussion wird vor allem die Wasserstoff-Erzeugung über Elektrolyse aus Strom und Wasser betrachtet. Als regelbarer Verbraucher erzeugt der Elektrolyseur

Wasserstoff in Zeiten eines marktseitigen Stromüberangebots. Zur Stabilisierung der elektrischen Netze wird der Elektrolyseur stromgeführt und kann bei Bedarf auch ganz vom Netz genommen werden (Prinzip des verbraucherseitigen Lastmanagement, engl.: Demand Side Management – DMS). Der hergestellte Wasserstoff wird dann vor Ort für eine spätere Nutzung aufbereitet, komprimiert und zwischengespeichert, evtl. mit CO₂ in Methan umgewandelt oder direkt in eine verfügbare (Erdgas-) Leitung eingespeist. Durch die Möglichkeit des aktiven Lastmanagement und der Umwandlung von elektrischer in chemische Energie durch modular anpassbare, zentrale oder dezentrale Elektrolyseanlagen mit entsprechender Betriebsführung können somit höhere Ausbauraten erneuerbarer Energien und eine Entlastung der Stromnetze erreicht werden [4]. Allgemein wird dieser Ansatz in seinen verschiedenen Varianten als „Power-to-Gas“-Konzept bezeichnet und derzeit in mehreren Forschungs- und Demonstrationsvorhaben national und international erprobt.

GRÜNER WASSERSTOFF

In diesem Zusammenhang wird häufig auch der Begriff des „grünen“ oder „erneuerbaren“ Wasserstoffs definiert. Allerdings existiert hierfür keine allgemein anerkannte Definition. Der Dachverband European Renewable Energy Council (EREC) schlägt bspw. vor, den Begriff grüner oder erneuerbarer Wasserstoff an die Definition für erneuerbare Energieträger zu koppeln. Im TÜV Süd Standard CMS 70 (Version 12/2011) [5] wird grüner Wasserstoff als Wasserstoff definiert, welcher „...aus erneuerbaren Energien oder/ und Abfall sowie Reststoffen gemäß diesem Standard...“ hergestellt ist. Die Diskussion, welche Erzeugungsformen und Herstellungspfade „grün“ sind, ist also als umfangreich und komplex zu bewerten und kann an dieser Stelle nicht abschließend behandelt werden. Vereinfacht bedeutet in dieser Studie die Bezeichnung grüner Wasserstoff einen aus erneuerbaren Energiequellen und CO₂-neutral hergestellten, aufbereiteten Wasserstoff, ohne Berücksichtigung notwendiger Verteilungsverluste.

Eine besondere Wasserstoff-Quelle ist der oben erwähnte Nebenprodukt-Wasserstoff, der bei chemischen Prozessen anfällt und dann häufig für thermische Prozesse eingesetzt wird. Die Verwendung im Rahmen der Mobilität ist sinnvoll, zählt allerdings nicht als grüner Wasserstoff.

Die Technologien zur Erzeugung und Speicherung von Wasserstoff sind prinzipiell vorhanden, zum großen Teil marktreif und bereits in diversen Demonstratoren weltweit erprobt. Auf die verschiedenen

Möglichkeiten zur Wasserstoff-Erzeugung durch Elektrolyse wird in Kapitel 3.3 eingegangen. Eine großmaßstäbliche Speicherung in Pipelinenetzen ist prinzipiell möglich und vergleichbar zur heutigen Speicherung von Erdgas (bspw. in Kavernen, Gaskugeln oder Röhreninstallationen), wobei doch noch Fragen in Hinsicht auf die Wasserstoff-Toleranz der Verbraucher geklärt werden müssen. In kleineren Installationen können Standard-Druckgasflaschen oder kleinere Stahlröhren zum Einsatz kommen.

2.2 WASSERSTOFF IM ÖFFENTLICHEN NAHVERKEHR

Ergänzend zu dem im derzeitigen Fokus des öffentlichen Interesses liegenden Start der Kleinserienproduktion von FCEVs soll auch der Einsatz von Wasserstoff im öffentlichen Nahverkehr näher betrachtet und die möglichen Auswirkungen auf eine zukünftige Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur vor allem im innerstädtischen Bereich diskutiert werden. Interessant ist der Einsatz der Brennstoffzellen-Technologie vor allem für Stadtbusse, da hier die Vorteile eines geringen Verbrauchs, sowie der Wegfall von Lärm- und Schadstoffemissionen besonders stark wiegen. Auf diesem Weg kann auch ein wichtiger Beitrag zur Einhaltung kommunaler Klima- und Emissionsschutzziele geleistet werden.

Für eine Reduzierung von CO₂-Emissionen oder gar eine emissionsfreie städtische Mobilität sind Brennstoffzellen-Busse im Vergleich zu alternativ verfügbaren Technologien die am besten geeignet Technologie. Im Vergleich hierzu ermöglichen Hybridbusse eine maximale Reduzierung der CO₂-Emissionen von 20 %. Batterieelektrische Busse ermöglichen eine emissionsfreie Mobilität, benötigen jedoch aufgrund zu geringer Energiedichten der Batterien Kompromisse in den Punkten verfügbarer Fahrgastplatz oder Reichweite.

In mehreren europäischen Forschungsprojekten wurde das Potenzial in den letzten 10 Jahren intensiv untersucht und die Technologie erfolgreich erprobt und weiterentwickelt, vgl. mit Kapitel 2.5. Ein sichtbarer Beleg dafür ist die Reduzierung des Wasserstoff-Verbrauchs von anfänglich 22 kg/100 km auf aktuell ca. 8 kg/100 km und die daraus resultierende Erhöhung der Reichweiten auf bis zu 350 km, was für eine typische Stadtbusanwendung, je nach Route, eine Betankung alle ein bis zwei Tage erfordert.

Aus Sicht eines Tankstellenbetreibers sind Wasserstoff-Busse vorteilhafte „Kunden“, die regelmäßig große Wasserstoff-Mengen auf täglicher Basis abnehmen, vgl. auch mit Tabelle 1. Hierdurch kann die Tankstelle bereits in der frühen Phase des Aufbaus der



Abbildung 2: Wasserstoff-Bus am Karlsruher Institut für Technologie (Quelle: Irina Westermann/KIT)

Wasserstoff-Infrastruktur verlässlich auf einem hohen Niveau ausgelastet werden, sodass frühzeitig ein tragfähiges Geschäftsmodell möglich ist. Für eine Busbetankung müssen dagegen tankstellen-seitig gewisse Voraussetzungen erfüllt werden (siehe Kapitel 3.1.2), die mit Mehrkosten verbunden sein können.

2.3 BESTEHENDE WASSERSTOFF-TANKSTELLEN-INFRASTRUKTUR IN DEUTSCHLAND

Im Bereich der Fahrzeugindustrie rechnet man aufgrund von Absichtserklärungen mit einer beginnenden Markteinführung der Brennstoffzellen-Technologie im mobilen Sektor ab dem Jahr 2015 [6].

Der rechtzeitige und technologisch ausgereifte Aufbau einer öffentlichen Wasserstoff-Infrastruktur wird für eine erfolgreiche Einführung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen ab dem Jahr 2015 entscheidend sein. In diesem Zusammenhang wird häufig vom „Henne-Ei-Problem“ gesprochen. Die wasserstoffbetriebenen Fahrzeuge benötigen entsprechende Tankstellen und die Tankstellen-Betreiber benötigen für einen wirtschaftlichen Betrieb eine entsprechende Anzahl von Kunden bzw. Fahrzeugen. Die Entwicklung der Fahrzeuge und der Aufbau der Infrastruktur muss parallel vorangetrieben werden, damit die Kunden die neuen Möglichkeiten annehmen und sich die erforderlichen Investitionen in möglichst absehbarer Zeit amortisieren. Aus diesem Grund kooperieren in Deutschland bereits seit einigen Jahren Automobilhersteller,

Tabelle 2: Bestehende Wasserstoff-Infrastruktur in Deutschland (Stand 09/2012)

Wasserstoff-Tankstellen	Status	Eröffnung	Betreiber	Technische Partner	700-bar-PKW	350-bar-PKW	350-bar-BUS
Freiburg – Heidenhofstraße	■	02.2012	Fraunhofer ISE	Air Products, Proton On-site, Diamond Lite	■	■	
Karlsruhe – Durlacher Allee	■	12.2011	EnBW	Linde	■		
Karlsruhe – KIT – Campus Nord	●	Ende 2012	KIT	Air Liquide	●	■	■
Stuttgart – Flughafen STR	■	06.2009	OMV	Linde	■	■	
Stuttgart – Talstraße	●	Ende 2012	EnBW	Linde, Hydrogenics Corp.	■		
Berlin – Flughafen Schönefeld	●	Ende 2013	TOTAL	Linde	■	■	■
Berlin – Heerstraße	■	03.2006	TOTAL	Linde	■	■	■
Berlin – Heidestraße	■	04.2012	TOTAL	Linde	■		
Berlin – Holzmarktstraße	■	05.2005	TOTAL	Linde, NEL Hydrogen, Andreas Hofer Hochdrucktechnik, Hexagon	■	■	■
Berlin – Sachsendamm	■	06.2011	Shell	Linde	■	■	
Hamburg – Bramfelder Chaussee	■	08.2012	Shell	Air Products	■		
Hamburg – Cuxhavener Straße	■	03.2012	TOTAL	Linde	■		
Hamburg – HafenCity	■	02.2012	Vattenfall	Shell, Hydrogenics	■	■	■
Frankfurt – Industriepark Höchst	■	11.2006	Eni (Agip)	Linde, IEFE Bocconi University, Eni Tecnologie Italy	■	■	
Düsseldorf – Höherweg	■	09.2012	Air Liquide	Air Liquide	■	■	■
Zeichenerklärung: ■ in Betrieb ● in Planung/Bau							Stand 09.2012

Mineralölfirmen, Gashersteller, Energieversorger sowie Nahverkehrsbetriebe und entwickeln gemeinsam tragfähige Infrastruktur-lösungen für die unterschiedlichen Nutzergruppen. Diese werden aktuell in verschiedenen, zumeist öffentlich geförderten Demonstrationsprojekten, umgesetzt und getestet, siehe auch Kapitel 2.5. In Deutschland waren laut Jahresauswertung der Ludwig-Bölkow-Systemtechnik und des TÜV Süd im Jahr 2011 insgesamt 29 operative Wasserstoff-Tankstellen zu verzeichnen [7]. Darin enthalten sind alle öffentlichen und nicht-öffentlichen, werkseigene und Versuchstankstellen mit unterschiedlichen technischen Konzepten.

Erste Zentren in Ballungsräumen wie Berlin, Hamburg und im Land Baden-Württemberg mit der Region Stuttgart – Karlsruhe sind bereits zu erkennen. Von den gegenwärtig ca. 30 Wasserstoff-Tankstellen in Deutschland sind derzeit 15 in einen öffentlichen Tankstellenbetrieb integriert, an denen Wasserstoff für 700-bar-Fahrzeuge getankt werden kann. Darüber hinaus befindet sich in Baden-Württemberg, Stand Februar 2013, eine 700-bar-Tankstel-len im Bau. Tabelle 2 fasst den aktuellen Stand zur existierenden und öffentlich zugänglichen 700-bar-Wasserstoff-Infrastruktur in Deutschland auf Basis eigener Recherchen zusammen (Stand Sep-tember 2012) und liefert wichtige technische Spezifikationen. Vier der aktuellen 700-bar-Tankstellen verfügen über eine On-site-Was-serstoff-Erzeugung durch Elektrolyse.

Mit diesem Entwicklungsstand hat sich Deutschland europaweit in den letzten Jahren eine Stellung als Leitmarkt erarbeitet und kann diese bei Umsetzung der weiteren Etappen auch erhalten. Ihr Ursprung ist in der „Verkehrswirtschaftlichen Energiestrategie“ (VES) zu finden, aus der im Dezember 2002 die Partnership (CEP) als gemeinsame Initiative von Politik und Industrie unter Feder-führung des Bundesverkehrsministeriums hervorging [8].

2.4 AUSBAU DER WASSERSTOFF-INFRASTRUKTUR BIS 2015

Eine aktuelle und zentrale Entwicklung in Zusammenhang mit dem geplanten Ausbau der Wasserstoff-Infrastruktur in Deutschland stellt die im Juni 2012 unterzeichnete gemeinsame Absichtser-klärung des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtent-wicklung (BMVBS) mit den Vertretern der Unternehmen Air Liquide, Air Products, Daimler, Linde und Total Deutschland dar [9].

Mit einem Gesamtvolumen von über 40 Mio. Euro beabsichtigen der Bund mit beteiligten Unternehmen das bereits bestehende Netz auf insgesamt 50 öffentliche Wasserstoff-Tankstellen im Jahr 2015 aus-zubauen. Die bisherigen Einzelaktivitäten der beteiligten Akteure werden in der neuen Initiative gebündelt. Der Bund wird dafür im Rahmen des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) die Hälfte des Investitionsvolu-

mens (20 Mio. Euro) als Förderung bereitstellen. Die bundeseigene Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentech-nologie (NOW) wird die Koordination des 50-Tankstellen-Projektes im Rahmen der CEP übernehmen.

Um den bereits in den früheren Projektphasen verfolgten koordi-nierten Ansatz zum Ausbau einer deutschlandweiten Wasserstoff-Infrastruktur umzusetzen, sollen die noch zu errichtenden Tankstel-len in einem nach Osten offenen Bogen von Norden nach Süden angeordnet werden, sodass die regionalen Cluster Hamburg, Rhein-Ruhr, Rhein-Main, Stuttgart und München optimal mitein-ander verbunden werden können. Der Berliner Raum komplettiert das Infrastrukturnetz. Abbildung 3 fasst die sich daraus resultieren-den Aufteilung auf die einzelnen Bundesländer gemäß CEP zusam-men. Aus der Tabelle ist zu entnehmen, dass Baden-Württemberg beim Aufbau des Tankstellennetzes eine wichtige Rolle einnimmt. Von den 50 Tankstellen im Land sollen elf aufgebaut werden; Anfang 2013 werden bereits fünf Tankstellen verfügbar sein. Da die Region Stuttgart als Bindeglied zwischen dem Rhein-Main- und dem Münchener Raum fungiert, wird mindestens eine der sechs Korri-dortankstellen entlang der A5 bzw. A8 platziert werden. Mit diesen zwölf Tankstellen wären dann Ende 2015 knapp ein Viertel aller Tankstellen im Land Baden-Württemberg installiert. Die wesentli-chen Akteure des 50-Tankstellen-Programms sollen kurz vorgestellt werden.

DAIMLER/LINDE

Bereits im Juni 2011 hatten die Unternehmen Daimler und Linde in einer gemeinsamen Erklärung angekündigt, zwischen 2012 und 2015 insgesamt 20 Wasserstoff-Tankstellen zu errichten [11]. Die Tank-stellen dieser Initiative sollen in den bestehenden Wasserstoff-Regionen Stuttgart, Berlin und Hamburg, sowie entlang einer neuen durchgängigen Nord-Süd- und Ost-West-Verbindung entstehen. Ziel sei es, verkehrstechnisch günstig gelegene, bestehende Stand-orte unterschiedlicher Mineralölfirmen zu nutzen. Ein Schwerpunkt des Infrastrukturausbaus sollte im Rahmen dieser Erklärung aus-drücklich in Baden-Württemberg liegen, die genauen Standorte der Tankstellen aus der Daimler/Linde-Initiative wurden noch nicht veröffentlicht. Die Mercedes-Benz Niederlassung in Hamburg hat im Rahmen einer Presseveranstaltung bekanntgegeben, dass sie im Jahr 2013 auf ihrem Gelände am Friedrich-Ebert Damm in Hamburg eine öffentliche Wasserstoff-Tankstelle bauen wird.

Daimler und Linde sehen ihre Initiative von 2011 als zusätzlichen Impulsgeber für die bereits bestehenden Initiativen, wie H2 Mobility und die Clean Energy Partnership. Sie soll weiteren Industrie-

partnern, etwa aus der Mineralöl-, Energie- oder Automobilin-dustrie, offenstehen und hat sicherlich zur gemeinsamen Absichts-erklärung des BMVBS und der Industrie beigetragen.

AIR LIQUIDE

Der französische Gashersteller Air Liquide plant im Rahmen der Absichtserklärung vom Juni 2012 nach eigenen Angaben zufolge bis zum Jahr 2015 in Deutschland den Bau von insgesamt 10 der 50 Tankstellen [12]. Dabei sollen weitere drei Tankstellen in Nord-rhein-Westfalen, je zwei weitere Tankstellen in Hessen, Sachsen und Süddeutschland und eine Tankstelle in Niedersachsen errichtet werden.

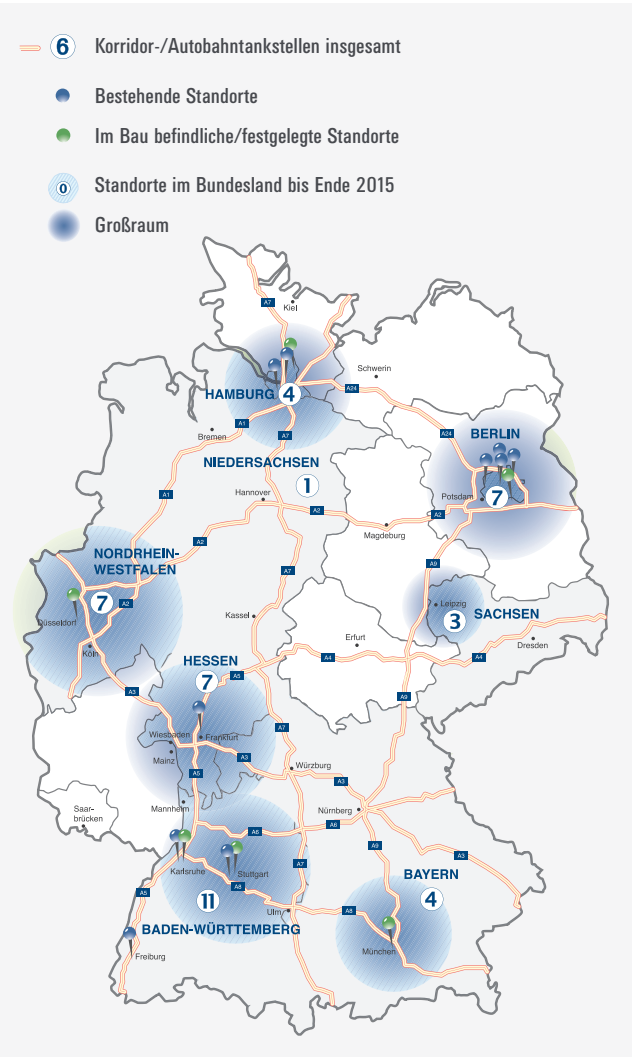


Abbildung 3: Ausbauplan zur Errichtung eines Wasserstoff-Tankstellen-netzes bis 2015 (Quelle: CEP), Stand 2012

Tabelle 3: Ausbauplan des Wasserstoff-Tankstellennetzes bis 2015, abgeleitet von [10], aktualisiert auf Stand Februar 2013

Wasserstoff-Tankstellen	Bestand	in Planung/Bau	Ziel 2015	Standort offen
Baden-Württemberg	4	1	11	6
Bayern	–	–	4	3
Berlin/Brandenburg	4	1	7	2
Hamburg	3	–	4	1
Hessen	1	–	7	6
Niedersachsen	–	–	1	1
Nordrhein-Westfalen	1	–	7	6
Sachsen	–	–	3	3
Korridortankstellen	–	–	6	6
Summe	13	2	50	34

Kapitel 2

TOTAL/ SHELL/ AIR PRODUCTS

TOTAL betreibt deutschlandweit derzeit bereits vier öffentliche Wasserstoff-Tankstellen. Im Rahmen der Clean Energy Partnership hatte sich TOTAL verpflichtet, in Hamburg insgesamt zwei Wasserstoff-Tankstellen zu bauen, wovon bisher eine in Betrieb ist.

Weitere fünf Tankstellen werden zudem von TOTAL, Shell und Air Products errichtet. Zusammen mit den 15 existierenden und im Bau befindlichen Tankstellen sollen damit Ende 2014 mindestens 50 Tankstellen bereit stehen. Das Engagement der Industrie beim Aufbau des Wasserstoff-Tankstellennetzes in Deutschland wird – wie eingangs erwähnt – in erheblichem Umfang auch durch die öffentliche Hand unterstützt. Auf Bundesebene ist hier vor allem das NIP, in gleichen Teilen vom BMVBS und dem BMWi gefördert, zu nennen, welches durch die NOW koordiniert und abgewickelt wird. Aber auch auf Länderebene gibt es teilweise substantielle Unterstützung. In Baden-Württemberg treibt die Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie, e-mobil BW den



Abbildung 4: Wasserstoff-Tankstelle Berlin Sachsensdamm (Quelle: Shell)

Technologiewandel hin zu wasserstoff- und batteriebetriebenen Fahrzeugen voran. Ebenso wird aus Mitteln der Landesinitiative Elektromobilität II der Aufbau von Wasserstoff-Tankstellen aktiv unterstützt. Ankündigungen bzw. Planungen zu ähnlichen Programmen gibt es auch in Hessen und Nordrhein-Westfalen.

2.5 WASSERSTOFF-TANKSTELLENINFRASTRUKTUR IM INTERNATIONALEN KONTEXT

Wie bereits in Kapitel 2.3 dargelegt, nimmt Deutschland mit der Realisierung seines 50-Tankstellen-Programms in Europa eine Vorreiterrolle ein und stellt damit einen Leitmarkt dar. In Europa gibt es neben Deutschland vor allem in Skandinavien weitere konzentrierte Aktionen, ein Wasserstoff-Tankstellennetz auszubauen. Die Vereinigung Scandinavian Hydrogen Highway Partnership (SHHP) ist ein Zusammenschluss der Organisationen HyNor (Norwegen), Hydrogen Sweden (Schweden) und Hydrogen Link (Dänemark). SHHP hat sich zum Ziel gesetzt, in diesen Ländern eines der ersten Wasserstoff-Tankstellennetze zu etablieren. Im internationalen Kontext sind auch große Aktivitäten in Japan und den USA zu verzeichnen.

DÄNEMARK

Gemessen an der Größe des Landes plant Dänemark einen zu Deutschland vergleichbaren Ausbau des Wasserstoff-Tankstellennetzes bis zum Jahre 2050 [8]. Die Regierung hat sich das Ziel gesetzt, im Jahr 2050 komplett unabhängig von fossilen Energiequellen zu sein. Bereits 2020 sollen 50 % des Strombedarfs durch Windenergie gedeckt werden. Mit Hilfe der Wasserstoff-Technologie soll auch der Verkehrssektor bis 2050 CO₂-emissionsfrei sein. Laut Szenario in [8] wird im Jahr 2050 der Anteil an batteriebetriebenen PKWs (BEV) bei etwa 45 % und der Anteil an Brennstoffzellen-PKWs (FCEV) bei etwa 50 % liegen. Wie in Deutschland wird mit einer FCEV-Markteinführung ab dem Jahr 2015 gerechnet. Aktuell existieren in Dänemark erst zwei öffentlich zugängliche Wasserstoff-Tankstellen. Bis 2015 sollen es bereits 15 Tankstellen sein, die ein landesweites Netzwerk ermöglichen. Im Jahr 2025 sollen 185 Stationen verfügbar sein und schließlich werden in einem voll entwickelten Markt bis 2050 1.000 Stationen erwartet [8].

NORWEGEN

Auch in Norwegen wird seit über zehn Jahren der Ausbau eines Wasserstoff-Tankstellennetzes vorangetrieben. Vor allem innerhalb



Abbildung 5: CEP-Tankstelle Berlin Heerstraße (Quelle: TOTAL/Pierre Adenis)

des HyNor-Projektes wurde ab 2003 ein „Hydrogen highway“ in Norwegen entlang der Küste von Stavanger bis Oslo aufgebaut. Die Strecke hat eine Länge von 580 km und wird aktuell durch mehrere Tankstellen mit Wasserstoff versorgt, u. a. in Stavanger (eröffnet in 2006), Porsgrunn (2007), Drammen, Oslo und Lillestrom (alle drei 2009 eröffnet). Allerdings fehlt ein wichtiger Verbindungspunkt in der Mitte der Strecke, da die Tankstelle in Lyndgal nie eröffnet wurde. Insgesamt waren bis zu 40 FCEVs im norwegischen Einsatz. Ende 2011 hat die norwegische Firma Statoil angekündigt, sich Ende 2012 aus dem Wasserstoff-Markt zurückzuziehen. Damit würden Statoils Tankstellen in Stavanger, Porsgrunn, Drammen und Oslo geschlossen, was ein herber Rückschlag für das HyNor-Projekt wäre. Aktuell wird nach Betreiberersatz für Statoil gesucht, eine Übernahme der Tankstellen durch ein norwegisches Konsortium scheint in Sicht.

Neben HyNor wird es auch im Rahmen des EU-Projekts H2moves seit 2012 eine 700-bar-Tankstelle durch die dänische Firma H2 Logic in Oslo betrieben.

Vor allem die norwegischen Tankstellen werden durch verschiedene Wasserstoff-Quellen jenseits von Solar und Wind versorgt. Wasserstoff wird durch Erdgasreformierung, als Nebenprodukt einer Chlorgas-Produktion, aus Biomasse mit CO₂-Abscheidung und via Sorption Enhanced Steam Methane Reforming gewonnen.

JAPAN/SÜDKOREA

In den beiden asiatischen Ländern wird ebenfalls seit über 15 Jahren an Brennstoffzellen-Fahrzeugen und am Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur für die Mobilität gearbeitet [9]. Bisher wurden in

beiden Ländern über 600 FCEVs erprobt und getestet [13]. Aktuell gibt es in Japan und Südkorea 22 Wasserstoff-Tankstellen – jeweils hälftig aufgeteilt. Bis zum Jahr 2020 soll mit staatlicher Unterstützung ein dichtes Tankstellennetz aufgebaut werden. Es wird davon ausgegangen, dass bis zu 1.450 Stationen aufgebaut werden können, davon alleine in Japan ca. 83 %. Die japanischen Automobilfirmen Honda, Toyota, Nissan und Suzuki sowie der südkoreanische Hersteller Hyundai-Kia gehen von einer FCEV-Markteinführung ab dem Jahr 2015 aus. Vor allem Honda zeigt großes Engagement. Honda wird 2020 in beiden Ländern einen Marktanteil von über 40 % haben, gefolgt von Toyota mit gut 17 %, [9]. Insgesamt sollen dann über 58 Tausend FCEVs in beiden Ländern unterwegs sein (japanischer Anteil: ca. 75 %).

USA

Im US-amerikanischen Raum sind vor allem die Aktivitäten der California Fuel Cell Partnership (CaFCP) zu nennen. Sie wurde Anfang 1999 als öffentlich-private Partnerschaft (public private partnership) von zwei staatlichen Einrichtungen (California Air Resources Board und California Energy Commission) und sechs Industrieunternehmen (damals Ballard Power Systems, Daimler-Chrysler, Ford Motor Company, BP, Shell Hydrogen and Chevron-Texac) gegründet. Nach wie vor sind in der CaFCP Automobilhersteller, Komponentenzulieferer, Energieversorger, öffentliche Einrichtungen und Forschungsinstitute engagiert, um die Kommerzialisierung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen als Teil einer nachhaltigen Energieversorgung voranzutreiben. Aufgrund des Modell- und Vorbildcharakters des kalifornischen Raumes werden die Pläne der CaFCP hier detaillierter vorgestellt.

Laut Internetstatistik der CaFCP sind in Kalifornien aktuell (Stand 09/2012) 37 Tankstellen(-projekte) gelistet, darunter acht öffentliche Stationen und 15 private oder Demonstrationseinrichtungen ohne öffentlichen Zugang. 14 Tankstellen befinden sich in der Planungsphase. Etwa 300 FCEVs erproben den Wasserstoff-Antrieb. Der Aufbau einer Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur wurde in mehreren wissenschaftlichen Studien durch Entwicklung von Szenarien untersucht und diskutiert [14], [15]. Laut aktuellen Planungen soll die FCEV-Kommerzialisierung in drei Phasen erfolgen und damit den übergeordneten Zielen gerecht werden, bis 2020 eine Infrastruktur für 1 Mio. sogenannter Zero-Emission-Vehicles (ZEVs) aufzubauen. Unter ZEV sind in Amerika BEV, PHEV als auch FCEV zusammengefasst. Fünf Jahre später in 2025 sollen dann über 1,5 Mio. ZEVs auf Kaliforniens Straßen unterwegs sein. Die drei Phasen werden wie folgt beschrieben:

- **Bildung von Pre-commercial clusters in 2012–14:** Drei Cluster in der Greater Los Angeles Area (Santa Monica und West Los Angeles, Coastal Southern Orange County, Torrance mit nahen Küstenstädten) und zwei Cluster in der San Francisco Bay Area (Berkeley, San Francisco South Bay).
- **Early commercial-Phase in 2015–2017:** 68 strategisch platzierte Tankstellen sollen bis Ende 2015 aufgebaut werden, um eine Infrastruktur für etwa 20 Tausend FCEVs zu bieten. Damit soll in der zweiten Phase eine kritische Masse für den folgenden Markthochlauf überwunden werden. Die Kosten werden auf 65–67 Mio. US\$ geschätzt.
- **Network building-Phase ab 2017:** Unter marktnahen Bedingungen wird ein dichtes Tankstellennetz aufgebaut.

Neben diesen Ausbauplänen und Aktivitäten sei auch das DOE-Programm „National Fuel Cell Electric Vehicle Learning Demonstration“ des US-amerikanischen Energieministeriums genannt [16]. Im Zeitraum von 2005–2011 wurde ein umfangreiches Test- und Evaluierungsprogramm mit zahlreichen Akteuren durchgeführt. Insgesamt wurden 25 Tankstellen aufgebaut, über 180 Wasserstoff-Fahrzeuge betrieben und 152 Tausend t Wasserstoff getankt, ohnedass es zu schwerwiegenden, sicherheitstechnischen Risiken kam [16].

2.6 ÜBERBLICK DER INITIATIVEN UND FORSCHUNGSPROJEKTE

Die bereits in den vorherigen Kapiteln 2.4 und 2.5 eingeführten Initiativen und wichtigen Forschungs- und Demonstrationsprojekte mit Bezug zu dem Aufbau einer Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur sind in der folgenden tabellarischen Übersicht zusammengefasst und durch weitere Aktivitäten ergänzt. Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass aus Platzgründen nicht alle Projekte und Initiativen in dieser Zusammenfassung vorgestellt werden können. Da die verschiedenen Initiativen zum Teil in gemeinsamen, öffentlich geförderten Projekten zusammenarbeiten und nach Projektende ihre Aktivitäten fortsetzen, kann nicht immer exakt zwischen Projekt und Initiative unterschieden werden. Aus diesem Grunde wird auf eine getrennte Darstellung verzichtet.

Clean Energy Partnership CEP

Region: Deutschland

Gründung: 12.2002

Laufzeit:

CEP I: 12.2002–05.2008

CEP II: 05.2008–12.2010

CEP III: 2011–2016

Partner: Air Liquide, Berliner Verkehrsbetriebe BVG, BMW, Daimler, EnBW, Ford, GM/Opel, Hamburger Hochbahn, Honda, Linde, Shell, Siemens, TOTAL, Toyota, Vattenfall Europe und Volkswagen

Assoziierte Mitglieder:

Bundesländer

Baden-Württemberg, Hessen

und Nordrhein-Westfalen

Im Jahr 2001 wurde die CEP in Berlin initiiert. Ziel war und ist es, die technische Alltagstauglichkeit von Fahrzeugen (PKW und Busse) und die kostengünstige Erzeugung und Bereitstellung des Wasserstoffs zu demonstrieren sowie Wasserstoff-Tankstellen aufzubauen. Ursprünglich für Berlin konzipiert, sind seit der CEP-Phase II auch weitere Bundesländer als assoziierter Partner beigetreten. Seit Ende 2010 ist das Land Baden-Württemberg assoziiertes Mitglied in der CEP, die Interessen werden durch die e-mobil BW vertreten [17]. Hessen (seit 09.2011) [17] und Nordrhein-Westfalen (seit 2010) sind ebenfalls neue Partner in der CEP.

Mit der Festlegung technischer Standards an den Wasserstoff-Tankstellen sowie der Koordinierung des Ausbaus des Tankstellennetzes beschäftigt sich innerhalb der CEP die Arbeitsgruppe Infrastruktur. Nachdem bei der Partnerschaft in den Phasen I und II der Schwerpunkt auf der Qualitätsentwicklung von Wasserstoff-Fahrzeugen und -Infrastruktur gelegen hat, steht nun im Mittelpunkt der gegenwärtigen Projektphase III von 2011 bis 2016 die Marktvorbereitung mit einem breit angelegten Betrieb von Fahrzeugen in Kundenhand.

Die CEP ist seit 2008 ein Leuchtturmprojekt innerhalb des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie. Das NIP bietet einen breiten Rahmen für zahlreiche Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Forschungsprojekte. Mit dem Innovationsprogramm stellte die Bundesregierung insgesamt 200 Mio. Euro öffentlicher Mittel für Forschung und Entwicklung sowie weitere 500 Mio. Euro für die Demonstration von Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie in den Bereichen Verkehr, stationäre Versorgung und spezielle Märkte zur Verfügung. Durch den Beitrag der Industrie wird diese Summe verdoppelt, sodass bis 2016 rund 1,4 Mrd. Euro zur Förderung der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie investiert werden.



Abbildung 6: Beitritt der EnBW zur CEP, Hannover Messe 2012 (Quelle: Tobias Renz FAIR)

H2 Mobility	
Region: Deutschland	Die Initiative H2 Mobility ist ein Zusammenschluss verschiedener Industrieunternehmen und kann als eine Weiterführung der CEP-Aktivitäten verstanden werden. In einer gemeinsamen Absichtserklärung wurde 2009 die „Roadmap H2 Mobility“ vereinbart, um die infrastrukturseitigen Rahmenbedingungen zur Markteinführung von Wasserstoff zu schaffen. Die Absichtserklärung geht auf eine Initiative von Daimler und Linde zurück. Ein Spiegelbild ähnlicher Bemühungen ist die ebenfalls im Jahr 2009 abgeschlossene Vereinbarung weltweit führender Automobilunternehmen, die sich auf die Produktion größerer Stückzahlen von FCEV ab dem Jahr 2015 verständigt haben. „Sie gehen dabei ab 2015 von weltweit mehreren hunderttausend Fahrzeugen über den gesamten Lebenszyklus aus [6].“ Die Vereinbarung H2 Mobility sieht zwei Phasen vor. In Phase I sollten verschiedene Optionen für den bundesweiten Aufbau eines Wasserstoff-Tankstellennetzes sowie die Entwicklung eines gemeinsamen, wirtschaftlich tragfähigen Geschäftskonzeptes unter Berücksichtigung möglicher Förderungen durch die öffentliche Hand untersucht werden. Sollte sich das Geschäftskonzept für alle Beteiligten positiv entwickeln, werden die Partner in Phase II einen entsprechenden Aktionsplan umsetzen, der auch bis zur Gründung gemeinsamer Joint-Ventures gehen kann [6]. Ihren Plan für die Einführung einer Tankstellen-Infrastruktur will H2 Mobility 2013 präsentieren. Laut dem Wirtschaftsmagazin Wirtschaftswoche [18] sollen ersten Informationen aus Teilnehmerkreisen zufolge zwischen 2015 und 2018 jährlich 100 Wasserstoff-Tankstellen in den Ballungsräumen Hamburg, München, Berlin, Stuttgart Rhein-Ruhr und Rhein-Main entstehen. „Auch an den Autobahnen dazwischen werden Zapfsäulen gebaut. Kostenpunkt: rund 300 Millionen Euro. In der zweiten Stufe soll das Netz auf mehr als 1000 Tankstellen landesweit wachsen. Der Wasserstoff wird entweder mit Lastwagen von zentralen Produktionsstellen im Land angeliefert oder bei abgelegenen Tankstellen durch (...) Elektrolyseure (...) erzeugt. Die Kosten über eine Milliarde Euro der zweiten Ausbaustufe, könnten sich wie bei herkömmlichen Tankstellen selbst tragen [18].“
Gründung: 09.2009	
Partner: Air Liquide, Air Products, BMW, Daimler, Eni, Ford, GM, Honda, Hyundai, Kia Motors, Linde, Nissan, NOW, OMV, Siemens, Renault, Shell, TOTAL, Toyota, Vattenfall, Volkswagen	



Abbildung 7: Gründung der Initiative H2 Mobility zum Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur in Deutschland (Quelle: NOW)

CaFCP	
Region: Kalifornien, USA	Die California Fuel Cell Partnership (CaFCP) ist ein Zusammenschluss von Fahrzeugherstellern, Energiedienstleistern, Regierungsbehörden und Brennstoffzellen-Herstellern, die zusammen an der Kommerzialisierung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen arbeiten. Insgesamt hat die Organisation 34 Mitglieder. Durch die Zusammenarbeit sollen die Fahrzeugtechnologie und die Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur im Rahmen der Marktvorbereitung vorangetrieben werden. CaFCP hat auf Basis der bisherigen Erfahrungen im Jahr 2012 eine Roadmap für die Einführung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen und deren Infrastruktur für die Jahre 2012–2017 veröffentlicht, näheres dazu siehe Kapitel 2.5.
Gründung: 1999	
Partner: 34 u. a. AFCC, Chrysler, Daimler, Ford, GM, Hyundai, Honda, Linde, Air Liquide	
Weitere Informationen: www.cafcp.com	
UK H2 Mobility	
Region: Großbritannien	Ähnlich wie die CEP ist die UK H2 Mobility als öffentlich gefördertes Projekt aktiv, kann aber im weiteren Sinne als Initiative bzw. Arbeitskreis der Akteure im Bereich Wasserstoff-Infrastruktur verstanden werden. Das Projekt UK H2 Mobility untersucht das Potenzial von Wasserstoff für CO₂-arme Fahrzeuge in Großbritannien. Anschließend soll ein Maßnahmenplan für die vorgesehene Markteinführung besagter Fahrzeuge zwischen 2014 und 2015 entwickelt werden. Neben den 13 Teilnehmern aus der Industrie beteiligen sich drei britische Ministerien an UK H2 Mobility. Die Ergebnisse der Analyse bezüglich des Potenzials von Wasserstoff als Kraftstoff werden Ende 2012 erwartet. Sollten diese positiv ausfallen, wird ein Maßnahmenplan entwickelt, um Großbritannien als einen der ersten Märkte für die weltweite Einführung wasserstoffbetriebener Brennstoffzellen-Fahrzeuge zwischen 2014 und 2015 vorzubereiten [19].
Gründung: 01.2012	
Partner: Air Liquide, Air Products, Daimler AG, FCH JU, Hyundai, Intelligent Energy, ITM Power, Johnson Matthey, Nissan, Scottish and Southern Energy, Tata Motors, European Technical Centre, The BOC Group, Toyota Motor, Vauxhall, UK Department for Business, Innovation & Skills, UK Department of Energy and Climate Change, UK Department for Transport	
H2moves Scandinavia	
Region: Skandinavien	Im November 2011 wurde EU-Leuchtturmprojekt H2moves Scandinavia (H2mS) in Skandinavien gestartet. Wie die Initiativen H2 Mobility und UK H2 Mobility ist H2moves Scandinavia ein Zusammenschluss von europäischen Unternehmen aus den Bereichen Infrastruktur und Kraftfahrzeugproduktion, die sich auf die skandinavischen Länder konzentriert. Mit diesem Engagement knüpfen die Projektpartner nahtlos an die bestehenden Wasserstoff-Demonstrationsprojekte in Europa an. H2moves Scandinavia ist u. a. wichtig, da die Alltagstauglichkeit von FCEVs unter extremen Wetterbedingungen getestet wird. Innerhalb des Projektzeitraums werden u. a. zehn Mercedes-Benz B-Klasse F-CELL an ausgewählte Kunden übergeben und auf skandinavischen Straßen unterwegs sein. Im Rahmen des Projektbeginns wurde die dritte norwegische Wasserstoff-Tankstelle in Oslo eingeweiht. Die 17 Fahrzeuge des Projektes sind an private Kunden und Kunden aus der Industrie verleast, so sollen Erkenntnisse über die Kundenzufriedenheit mit dieser neuen Technologie gewonnen werden.
Projektstart: 11.2011	
Partner: u. a. Daimler, H2 Logic, Hyundai, LBST, TÜV Süd	
Weitere Informationen: www.h2moves.eu	

CHIC	
Regionen: Aargau (CH), Bozen (IT), London (UK), Mailand (IT) und Oslo (NO)	Das Akronym CHIC steht für Clean Hydrogen in European Cities. Die Aufgabe des Projekts ist es, den Einsatz von Brennstoffzellen-Bussen in europäischen Städten und Regionen kontinuierlich zu erweitern.
Projektstart: 2010	CHIC ist das Dritte einer Folge von Projekten, in denen Wasserstoff als Kraftstoff in den öffentlichen Personenverkehr eingeführt und sein Einsatz optimiert wird. Bis Ende 2009 wurden in CUTE und HyFLEET:CUTE nach eigenen Angaben mehr als 8,5 Mio. Passagiere weltweit befördert. Mit über 555.000 kg Wasserstoff, zu einem großen Teil aus erneuerbaren Energiequellen gewonnen, konnte mehr als 1 Mio. Liter Diesel ersetzt werden.
Förderung: 26 Mio. Euro	Für das europäische CHIC-Busprojekt werden in den fünf europäische Städten Brug/Schweiz, Bozen/Italien, London/Großbritannien, Mailand/Italien und Oslo/Norwegen wie bei den Vorgängerprojekten CUTE/ECTOS und HyFLEET:CUTE Wasserstoff-Tankstellen für die Betankung von 26 Brennstoffzellen-Bussen der neuesten Generation installiert, die vorwiegend auf den Betriebshöfen allokiert sind. Um Synergien zu erzeugen, werden die Bustankstellen teilweise so ausgelegt, dass eine Nutzung durch PKW möglich ist. CHIC ist gleichzeitig mit ähnlichen Demonstrationsprojekten in Berlin, Köln, Hamburg und Whistler (Kanada) verknüpft. Diese Projekte werden ihre Ergebnisse in das CHIC Projekt einbringen, sodass die CHIC-Partner diese nutzen können.
Partner: 25	
Weitere Informationen: www.chic-project.eu	

CUTE/ECTOS	
Regionen: Hamburg (DE), London (UK), Barcelona (ES) , Stockholm (SE), Porto (PT), Stuttgart (DE), Amsterdam (NL), Luxemburg (LU) und Madrid (ES)	CUTE (Clean Urban Transport for Europe) war ein wegweisendes, EU-gefördertes Projekt u. a. für den Aufbau des öffentlichen Nahverkehrs mit BZ-Bussen. Das Projekt CUTE wurde im Jahre 2001 begonnen und endete im Mai 2006 mit einem Kongress in Hamburg.
Laufzeit: 2001–05.2006	Teil dieses Programmes waren Projekte der Verkehrsbetriebe in europäischen Großstädten wie zum Beispiel das der Hamburger Hochbahn unter der Bezeichnung HH2. In den neun am Programm teilnehmenden Städten Hamburg, London, Barcelona, Stockholm, Porto, Stuttgart, Amsterdam, Luxemburg und Madrid wurden jeweils drei Busse mit Brennstoffzellen betrieben. Die Städte wurden ausgewählt, um Unterschiede bezüglich der klimatischen und topografischen Situation sowie des Verkehrsaufkommens zu untersuchen. Im Rahmen des parallel durchgeführten Programms ECTOS (Ecological City TranspOrt System) wurde in Reykjavík auf Island ein CO ₂ -freier öffentlicher Nahverkehr erprobt.
Förderung: 6. EU RP	Nach Ablauf des Projekts wurde CUTE ausgeweitet und unter der neuen Bezeichnung HyFLEET:CUTE fortgeführt. In Hamburg wurde die Kapazität auf neun Fahrzeuge erhöht.

High V.LO-City	
Regionen: Ligurien (IT), Flandern (BE), Oslo (NO), Malmö (SE)	Das übergeordnete Ziel von High V.LO-City ist es, die schnelle Bereitstellung der neuesten Generation von Brennstoffzellen-Bussen im öffentlichen Nahverkehr zu erleichtern.
Projektstart: 2010	In Zusammenhang mit dem Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur ist insbesondere das Arbeitspaket 2 des Projektes verknüpft. Zu ihm gehören u. a. der Aufbau von modularen Wasserstoff-Infrastrukturen und innovative Wasserstoff-Produktionslösungen.
Förderung: 7. FRP der EU	Aufbauend auf Erfahrungen aus früheren Demonstrationsprojekten mit Brennstoffzellen-Bussen wird sich dieses Arbeitspaket auf einen flexiblen und modularen Ansatz zur Entwicklung der Infrastruktur konzentrieren.
Partner: 25	
Weitere Informationen: www.highvlocity.eu	

NextHyLights	
Region: Europa	Im Rahmen von NextHyLights soll die Planung und Vorbereitung von weiteren Demonstrationsprojekten für die nächste Generation von Wasserstoff-Fahrzeugflotten an weiteren Demo-Standorten in ganz Europa erfolgen. Dies geschieht parallel zu den bereits bestehenden Demonstrationsprojekten (Light-house Projects) und auf Basis der Erfahrungen aus den bereits beendeten Projekten. Die wichtigsten betrachteten Projekte sind HyFLEET:CUTE, ZERO REGIO, HyCHAIN, ZEMSHIPS, CEP und HyNor, von denen die meisten inzwischen beendet oder am Ende ihrer Laufzeit stehen.
Projektstart: 2010	NextHyLights soll einen Kriterienkatalog und einen Rahmen für die Auswahl geeigneter Regionen/Gemeinden oder auch Cluster-Regionen für künftige, groß angelegte Wasserstoff-Demonstrationsprojekte liefern. Der Kriterienkatalog deckt eine Reihe von technischen und sozioökonomischen Indikatoren ab, wie bspw. vorhandene Infrastruktur, regulatorische Bedingungen, staatliche Unterstützung, potenzielle erneuerbare Erzeugung von Wasserstoff, die Verfügbarkeit von Nebenprodukt-Wasserstoff, Vorsorge für die Zusammenschaltung mit anderen Wasserstoff-Cluster-Regionen/Gemeinden, etc.
Förderung: 7. FRP der EU	
Weitere Informationen: www.nexthylights.eu	

HyER/HyRaMP	
Region: Europa	HyER ist die European Association for Hydrogen and Fuel Cells and Electromobility in European Regions. Der Interessenverband (früher: HyRaMP) wurde in 2008 mit Hilfe und Unterstützung der EU-Kommission gegründet. Aktuell sind 30 europäische Regionen und Städte Mitglied in der Vereinigung. Ziele von HyER sind die Begleitung und das Monitoring von Projektergebnissen im Bereich Wasserstoff- und Elektromobilität, die Entwicklung von Langzeitstrategien zur Markteinführung und die Beratung nationaler und der europäischen Exekutive.
Gründung: 2008	HyER ist teilweise eigenständiger Partner in EU-Projekten und vor allem für die Kommunikation und Dissemination der Ergebnisse zuständig.
Partner: 30 Regionen, u. a. Abruzzo (IT), Akershus (NO), Aragon (ES), Baden-Württemberg (DE), Hamburg (DE), London (UK), Midi Pyrénées (FR), Wroclaw (PL)	
Weitere Informationen: www.hyer.eu	

TECHNISCHE KONZEPTE UND KOMPONENTEN FÜR WASSERSTOFF-TANKSTELLEN

3.1 ANFORDERUNG ZUR BETANKUNG VON FAHRZEUGEN

3.1.1 BETANKUNG VON PKWS

Die Automobilhersteller und einige Gas- sowie Anlagenhersteller haben sich auf einen weltweit gültigen Standard zur Betankung von PKWs mit gasförmigem Wasserstoff geeinigt. Der resultierende Standard SAE TIR J2601 (SAE: Society of Automotive Engineers) ist im März 2010 veröffentlicht worden. Die Entwicklung des Standards durch Tankstellenbetriebserfahrungen ist v. a. in der Anfangsphase ein fortlaufender Prozess, die Grundaussagen des Standards sind dagegen fixiert.

Ziel der Norm ist es, die Grundlage für einen sicheren und den Verbraucher zufriedenstellenden Tankvorgang (3–5 Minuten Tankzeit, Füllgrad 90–100 %) zu gewährleisten. Die Norm definiert u. a.:

- Fülldrücke fahrzeugseitig: 700 bar (bei 15 °C) oder 350 bar (bei 15 °C)
- Maximaldrücke (875 bar) und Maximal- bzw. Minimaltemperaturen des Wasserstoffs an der Zapfpistole (-33 °C bis -40 °C)
- Verweise auf die Norm SAE TIR J2799, die eine 700-bar-Füllkupplung inklusive Kommunikationsschnittstelle (für die Kommunikation zwischen Fahrzeug und Tankstellen; Kommunikation ist fahrzeugseitig optional) und Verweise auf die SAE J2600, die eine 350-bar-Füllkupplung definiert. Die Kommunikation ist über eine Infrarotschnittstelle mit dem IrDA-Protokoll umgesetzt.
- Definition von Fülltabellen, die abhängig von Umgebungstemperatur und Füllgrad des Tanks eine unter den Umständen möglichst schnelle und dabei immer sichere Betankung gewährleisten, sowie sichere Maximaldrücke mit möglichst großem Füllgrad garantieren.
- Fülltabellen liegen jeweils für 700 bar -40 °C, 700 bar -20 °C, 350 bar 0 °C und 350 bar ungekühlt bzw. mit Umgebungstemperatur vor. Die Tankstellen können pro Zapfpistole nur eine der vier Modi unterstützen.
- Definition der Betankungsprozedur: Erkennung der Kommunikationsfähigkeit, Druckstoß zur Erkennung des Startdrucks im Fahrzeugtank, Lecktest, Füllprozedur etc.

Die für aktuell gebaute Tankstellen relevante Betankung ist die 700-bar-Schnellbetankung mit -40 °C Vorkühlung, mit der die meisten Brennstoffzellen-Fahrzeuge (FCEV) kompatibel sind und welche eine Schnellbetankung innerhalb von max. 3 Minuten erlaubt.

Die Betankung erfolgt über die sogenannte Durchschnitts-Druckanstiegsraten-Methode (engl.: Average Pressure Ramp Rate Methodology). Dabei wird abhängig von Starttemperatur und Startdruck eine Druckanstiegsrate gewählt, mit welcher der Druckanstieg pro Zeiteinheit festgelegt wird (max. 60 g H₂/s). Damit ist die Fülldauer unabhängig von der Tankgröße. Da die entstehende Kompressionswärme proportional zum Druckanstieg und nicht zum Volumenstrom ist, gilt dieses Protokoll auch als sicherer gegenüber bspw. einer Betankung mit konstantem Volumenstrom.

Eine Definition von Füllrampen und Vorkühlung sind notwendig, um trotz einer schnellen Betankung die notwendige Sicherheit zu gewährleisten. Bei der Betankung entsteht durch den Druckanstieg im Fahrzeugtank Wärme, die bei einer zu schnellen Betankung zu einer Überhitzung und Schädigung des Tanks, in Extremfällen sogar zu einem Versagen des Tanks führen kann.

Die Tankstelle ist dafür verantwortlich, dass die Betankung innerhalb eines Betriebsfensters abläuft. Die in der Norm genannten Füllrampen sind durch Simulationen ermittelt und durch die Fahrzeughersteller sowie durch spezielle Testapparaturen unter Extrem-



Abbildung 8: 700-bar-Füllkupplung (Quelle: Toyota)

bedingungen validiert worden. Die derzeitige Version des Standards ist gültig für Fahrzeugtanks mit einer Größe von 1 kg bis 7 kg. Typische Tankgrößen liegen momentan zwischen 3,5 kg und 6 kg.

Besteht eine Kommunikation zwischen Fahrzeug und Tankstelle, so wird durch die Kenntnis der Fahrzeugparameter von den Worst-Case-Annahmen der Betankungstabellen abgewichen und so bei gleicher Betankungsgeschwindigkeit ein höherer Füllgrad erreicht.

3.1.2 BETANKUNG VON BRENNSTOFFZELLEN-BUSSEN

BEFÜLLVORGANG

Da bei Brennstoffzellen-Bussen im Gegensatz zu FCEVs der Speicher nicht im Fahrzeug sondern auf dem Dach platziert ist, existiert keine Raumnot und damit keine Notwendigkeit zu höheren Speicherdichten. Daher kann die günstigere 350-bar-Technik verwendet werden und bei akzeptablen Betankungszeiten trotzdem auf eine energie- und kostenintensive Vorkühlung verzichtet werden. Experten betrachten die 350-bar-Technik im Bereich der Brennstoffzellen-Busse als gesetzt.

Stand der Technik sind aktuell Betankungszeiten von ca. 7 bis 10 Minuten für 35 kg Wasserstoff. Bei einer Reichweite der Busse von bis zu 350 km und damit bei typischen Stadtbusanwendungen erfolgt eine Betankung alle 1 bis 2 Tage.

Im Gegensatz zu PKWs ist für Busse derzeit noch kein standardisiertes Befüllprotokoll verfügbar. Daher werden die Tankstellen derzeit bei Inbetriebnahme auf einen Bustyp abgestimmt. Dieses Vorgehen ist in der momentanen Konstellation unproblematisch, da brennstoffzellenbetriebene Busse fast ausschließlich als regional gebundene Stadtbusse im Einsatz sind. Damit sind der Tankstelle die Spezifikationen der zu betankenden Busse bekannt und es muss keine normkonforme Betankung für sämtliche verfügbaren Tank- und Bustypen sichergestellt werden. Im Normungsgremium der SAE gibt es die mittelfristige Absicht, die SAE J2601 über die PKW hinaus auszuweiten und eine vereinheitlichte Betankungsprozedur für Busse einzufügen.

TECHNISCHE ANFORDERUNGEN

Technisch notwendig zur Busbetankung sind ausreichend große Speicher und/oder Kompressoren, um den ggf. erhöhten Bedarf zu decken und den Bus je nach Tankstellenkonzept aus den Speichern

oder über Booster-Kompressoren zu betanken, vgl. Kapitel 3.2. In vielen Fällen bedeutet das die Verwendung größerer Kompressoren und Mitteldruckspeicher als für eine reine PKW-Tankstelle notwendig wäre, wodurch für eine Bustauglichkeit der Tankstelle Mehrkosten entstehen. Zusätzlich wird ein separater Dispenser mit entsprechender Füllkupplung sowie eine entsprechende Wendepalte/Einfahrt benötigt.

Da Stadtbusse regelmäßig tanken und einen Teil der städtischen Transportinfrastruktur bereitstellen, ist besonders für Tankstellen mit Busbetankung ein hohes Maß an Verfügbarkeit notwendig. Diese hohe Verfügbarkeit können Tankstellenbetreiber durch organisatorische Maßnahmen (mobile Notfalltankstellen), durch redundante Ausführung kritischer Komponenten wie bspw. Kompressoren (siehe Hamburg) oder durch weitere bustaugliche Tankstellen im näheren Umfeld (Bsp.: Berlin) gewährleisten, vgl. Kapitel 4.3.

3.2 SYSTEMATIK DER WASSERSTOFF-TANKSTELLENKONZEPTE

3.2.1 IN DEUTSCHLAND EXISTIERENDE KONZEPTE

Im Rahmen der CEP-Phasen I bis III wurden und werden in Deutschland verschiedene Tankstellen-Konzepte realisiert und demonstriert. Nicht alle Konzepte werden noch aktiv weiterverfolgt, einzelne angepasst oder sogar rückgebaut. Vor allem die Flüssiganglieferung (LH₂) wurde in einigen Fällen wieder rückgebaut, da die Boil-off-Verluste bei der derzeitigen geringen Auslastung der Tankstellen zu groß waren.

Abbildung 9 gibt einen Überblick über die Kombinationsmöglichkeiten der verschiedenen Konzeptbausteine, wobei hier zugunsten der Verständlichkeit einige Vereinfachungen getroffen wurden. Die Erzeugung ist in Off-site- (Wasserstoff-Erzeugung an zentralen, großen Erzeugungsanlagen) und On-site-Verfahren (Erzeugung im kleinen Maßstab vor Ort an der Tankstelle) unterteilt. Die Wahl zwischen On-site und Off-site und die Transportweise (gasförmig oder flüssig) reduziert hierbei die Auswahl der verwendbaren Tankstellenkonzepte.

WASSERSTOFF-ERZEUGUNG: DAMPFREFORMIERUNG

Die Dampfreformierung von Methan ist mit einem Marktanteil von 48 Prozent der momentan meist genutzte Prozess zur Herstellung von Wasserstoff. Neben den geringen Herstellungskosten besitzt die Dampfreformierung von Methan die beste Umweltbilanz bezüg-

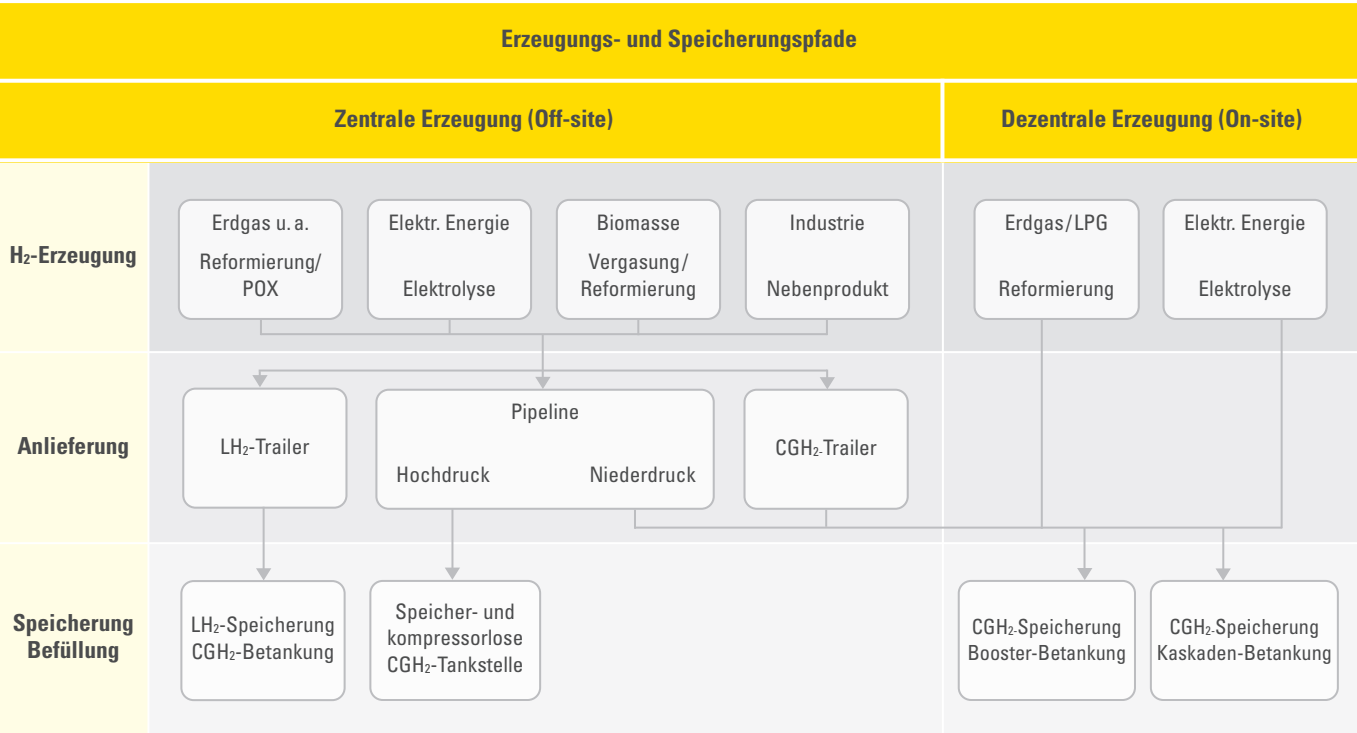


Abbildung 9: Systematik der Tankstellenkonzepte

lich der Herstellung von Wasserstoff aus fossilen Energieträgern [20]. Bei der Dampfreformierung handelt es sich um eine endotherme Reaktion, welche unter Anwesenheit von Nickel/Keramik-Katalysatoren abläuft [21]. Die Kohlenwasserstoffe reagieren mit dem Wasserdampf zu einem wasserstoffreichen Synthesegas, welches jedoch noch einen hohen Anteil an Kohlenstoffmonoxid besitzt. Zur Steigerung der Wasserstoff-Ausbeute kann das entstehende Kohlenmonoxid in einer nachfolgenden Shift-Reaktion zu Kohlendioxid und weiterem Wasserstoff umgesetzt werden [21]. Zur Herstellung von Wasserstoff durch Dampfreformierung sind grundsätzlich Kohlenwasserstoffe mit hohem Anteil an Wasserstoff als Ausgangsstoff geeignet. Bisher im Mobilitätskontext verwendete Ausgangsstoffe für die Reformierung sind Biogas und Glycerin (siehe Linde-Anlage in Leuna) für grünen Wasserstoff, sowie LPG und Erdgas für Wasserstoff aus konventionellen Kraftstoffen.

Ein weiteres bedeutendes Verfahren zur Erzeugung von Wasserstoff mit einem Marktanteil von etwa 25 Prozent basiert auf der partiellen Oxidation (POX). Unter partieller Oxidation versteht man die thermische Umsetzung von Kohlenwasserstoffen mit Sauerstoff zu

Synthesegas. Dabei sind Prozesstemperaturen von etwa 1300 °C erforderlich [21]. Im Gegensatz zur Dampfreformierung wird dem Reformierungsprozess bei der partiellen Oxidation kein Wasserdampf zugeführt. Weiterhin handelt es sich bei der partiellen Oxidation um ein exothermes Verfahren, wodurch es keines komplexen Wärmereaktors bedarf. Das Verhältnis von erzeugtem Wasserstoff und Kohlenstoffmonoxid ist bei diesem Verfahren geringer als bei der Dampfreformierung. Dies hat zur Folge, dass größere Reaktoren für die Shift-Reaktion notwendig sind [21]. Dieses Verfahren der Wasserstoff-Herstellung lässt sich auch mit Schweröl und Kohle betreiben.

WASSERSTOFF-ERZEUGUNG: ELEKTROLYSE

Die Wasserstoff-Erzeugung durch elektrolytische Wasserspaltung mit Hilfe von elektrischer Energie wird zur zukünftigen Deckung des Wasserstoffbedarfs als wichtiges Verfahren angesehen, siehe dazu auch Kapitel 2.1. Industriell verfügbar sind heute die alkalische Elektrolyse und die Membranelektrolyse, welche mit einem sauren Festelektrolyten arbeitet. Beide Verfahren arbeiten bei vergleichs-

weise geringen Zelltemperaturen zwischen ca. 50 °C und 90 °C. Die Hochtemperatur- oder auch Dampfelektrolyse ist noch nicht verfügbar, sondern befindet sich im Stadium der Material- und Zellentwicklung.

Vor allem die alkalische Elektrolyse ist ein seit über 100 Jahren genutztes industrielles Verfahren, es stehen Elektrolysesysteme in einem breiten Leistungsbereich zur Verfügung. Die Membran- oder auch PEM-Elektrolyse wird aktuell vor allem im kleineren Leistungsbereich eingesetzt. Da das Verfahren mit einer höheren Dynamik

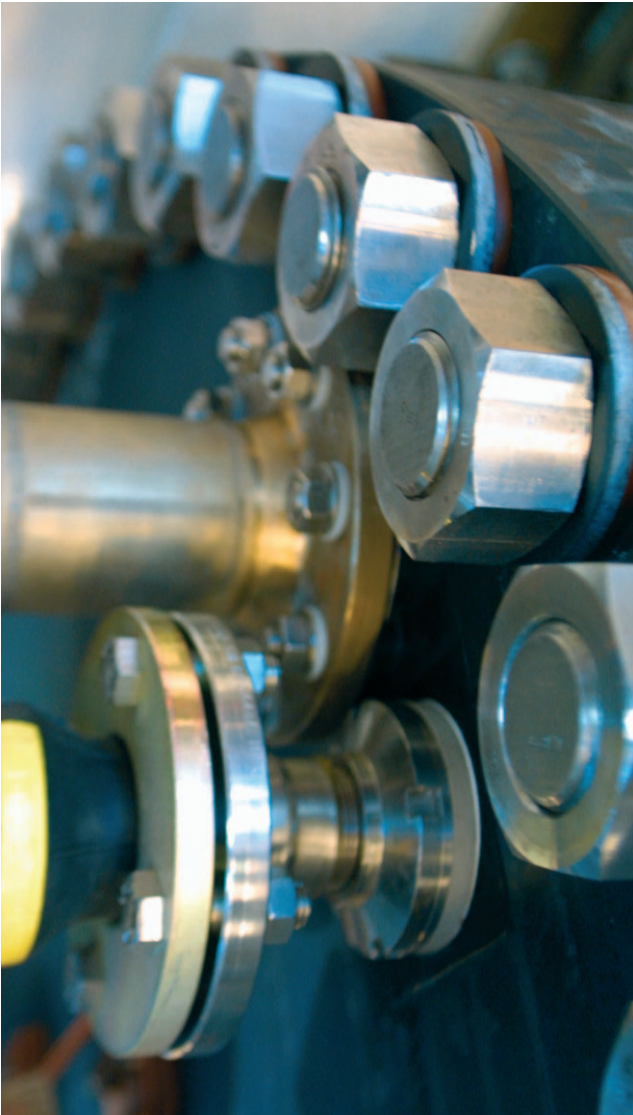


Abbildung 10: Elektrolysestack – Endplatte (Quelle: NEL Hydrogen)

und bei höheren Drücken eingesetzt werden kann, gibt es z. Zt. Bestrebungen, dieses Verfahren in größere Leistungsklassen aufzuskalieren.

Neben der Art des Verfahrens kann auch zwischen zentralen und dezentralen Elektrolyse-Einheiten unterschieden werden. Die zentrale (Off-site-) Herstellung von Wasserstoff bietet gegenüber der dezentralen On-site-Produktion den Vorteil, dass aufgrund der Anlagengröße höhere Wirkungsgrade erreicht werden können. Vergleicht man kleine Elektrolyseanlagen mit einer Anlagengröße von bspw. 30 Nm³/h mit einer Elektrolyseanlage, welche nominell 250 Nm³/h (entspricht 530 kg/d) Wasserstoff erzeugt, können deutlich höhere Systemwirkungsgrade erzielt werden [22]. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Anteil der peripheren Verbraucher am Gesamtverbrauch mit der Größe der Anlage abnimmt. Als Beispiel der zentralen Wasserstoff-Produktion sei hier das Hybridkraftwerk von Enertrag in Prenzlau angeführt. In diesem Projekt wird aus überschüssigem Windstrom Wasserstoff hergestellt, welcher verdichtet in einem CGH₂-Trailer an eine TOTAL-Tankstelle in Berlin geliefert wird [23].

WASSERSTOFF-ERZEUGUNG: BIOMASSE

Wasserstoff als flexibler Energieträger kann prinzipiell auch über diverse Verfahren aus Biomasse erzeugt werden. Die energetische Biomassennutzung zur Herstellung von Kraftstoffen der sogenannten ersten Generation erfolgt aus zucker- oder ölhaltiger Biomasse. Diese Eigenschaften treffen häufig auf Pflanzen zu, welche auch als Nahrungs- und Futtermittel dienen und führen dadurch zur aktuellen „Teller-Tank-Debatte“. Hier ist mit ähnlichen Akzeptanzproblemen wie bei der Beimischung von Ethanol im Otto-Kraftstoff zu rechnen. Kraftstoffe der zweiten Generation hingegen werden aus lignocelluloseartiger Biomasse oder organischen Rest- und Abfallstoffen hergestellt, wodurch sie keine direkte Konkurrenz zu Lebensmitteln hervorrufen. Für die Biomasse-zu-Wasserstoff-Konversion stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung, von denen hier die wichtigsten genannt werden sollen:

Glycerin-Reformierung: Linde wandelt am Standort Leuna einen Teil der bei der Biodiesel-Erzeugung entstandenen Glycerin-Abfälle über Dampfreformierung in Wasserstoff um. Derzeit handelt es sich um eine Pilotanlage, die aber Potenzial für Ausbau und Optimierung bietet. Da der Biodiesel jedoch hauptsächlich aus Pflanzenölen hergestellt wird, zählt er zu den Kraftstoffen der ersten Generation und steht somit in direkter Konkurrenz zu Nahrungsmitteln. Auch wenn

Glycerin als Nebenprodukt dieser Herstellung anfällt, könnte diesem aufgrund der Herkunft ein negatives Image anhaften.

Biogasreformierung: Biogas wird in heutzutage üblichen Biogasanlagen erzeugt und über Dampfreformierung analog zu Erdgas in Wasserstoff umgewandelt. Da nur teilweise Rest- und Abfallstoffe, wie z. B. Gülle, verwendet werden, zählt Biogas ebenfalls zu den Kraftstoffen der ersten Generation und unterliegt den bereits beschriebenen Einschränkungen.

Biomassevergasung: Bei der Biomassevergasung wird Biomasse in Vergasungsreaktoren unter Luftmangel ($\lambda < 1$) vergast. Das Eduktgas ist bei den meisten Prozessen eine Mischung aus Wasserstoff, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Methan und meist auch Teeren und muss gereinigt werden. Es gibt eine Vielzahl von Vergasungsverfahren, die jeweils einen spezifischen Prozess mit unterschiedlichem Aufwand sowie Vor- und Nachteilen aufweisen. In diesem Zusammenhang kann das bioliq®-Verfahren genannt werden, welches vom Karlsruher Institut für Technologie (KIT) entwickelt wurde. Dabei wird aus organischen Abfallstoffen, wie z. B. Stroh, über die Flashpyrolyse ein sog. Bioslurry hergestellt. Dieser Prozessschritt erfolgt dezentral. Der Slurry wird anschließend zu einer zentralen Vergasungsanlage transportiert und dort vergast. Das daraus entstandene Synthesegas wird über eine Fischer-Tropsch-Synthese in Kraftstoffe umgewandelt.

Bis dato konnte sich noch kein marktdominierender Prozess unter den Vergasungsverfahren herausbilden. Durch die verfahrenstechnisch aufwändigen Anlagen sind diese erst ab einer Größe von mehreren Megawatt Brennstoffleistung wirtschaftlich sinnvoll. Bis auf die Biogasreformierung sind diese Verfahren für eine On-site-Erzeugung aufgrund des Platzbedarfs nicht geeignet. Von den hier genannten Verfahren wird in Deutschland im Zusammenhang mit der Wasserstoff-Mobilität bisher nur die Glycerin-Reformierung genutzt.

WASSERSTOFF-ERZEUGUNG: NEBENPRODUKT

Jährlich fallen in Deutschland etwa 1 Milliarde Nm^3 Wasserstoff als Nebenprodukt bei Prozessen in der chemischen Industrie an [24]. Bereits fünf Prozent dieser Menge reichen aus, jährlich eine FCEV-Flotte von einer halben Million Fahrzeuge mit Wasserstoff zu versorgen. Als Beispiel der Versorgung mit als Nebenprodukt anfallendem Wasserstoff sei die Wasserstoff-Tankstelle im Industriepark Höchst in Frankfurt/M angeführt. Dort wird Wasserstoff, welcher als Nebenprodukt in der Chlorproduktion anfällt, in einer

Hochdruckpipeline an die im Rahmen des ZeroRegio-Projektes errichtete Tankstelle transportiert.

TANKSTELLEN-KONZEPTE: KASKADENSPEICHERUNG

Die Kaskadenspeicherung ist kein eigenes Füll- oder Speicherkonzept, sondern eine Speicherbetriebsweise, bei der nicht ein Gesamtspeicher mit einem bestimmten Zieldruck verwendet wird, sondern der Speicher in mehrere Bänke mit jeweils unterschiedlichen Drücken aufgeteilt wird, aus denen dann nacheinander das Fahrzeug betankt wird. Man befüllt also ein Fahrzeug mit 50 bar Fülldruck nicht komplett aus einem 700-bar-Speicher, sondern erst aus einem 200-bar-Speicher, dann einem 300-bar-Speicher und so weiter. Diese Betriebsführung wird primär bei größeren Tankstellen ohne Booster genutzt.

Die Aufteilung in mehrere Bänke hat den Vorteil, dass die notwendige Kompressionsarbeit und die Belastungen/Anforderungen an die Tanks sinken. Da die Kompression nur 10 % des Energieinhalts ausmacht, ist der Energiespareffekt im Vergleich zur Wasserstoff-Erzeugung nicht überragend, kann aber bei entsprechend großen Tankstellen durchaus die Investitions-Mehrkosten rechtfertigen.



Abbildung 11: Wasserstoff-Tankstelle mit On-site-Erzeugung Berlin Holzmarktstraße (Quelle: TOTAL/Pierre Adenis)

WASSERSTOFF-VERSORGUNG: ON-SITE-ERZEUGUNG

Neben der Anlieferung aus zentralen Erzeugungsanlagen kann Wasserstoff auch vor Ort – also On-site – erzeugt werden. Derzeit werden in Deutschland zwei Herstellungsverfahren an Wasserstoff-Tankstellen angewendet: Elektrolyse und Dampfreformierung. Bei beiden Verfahren liegt der produzierte Wasserstoff bei einem Druck von bis zu 50 bar (meist 1–30 bar) vor. Da bei einer Hochdruckbetankung jedoch mit sehr viel höheren Drücken gearbeitet wird, muss der Wasserstoff anschließend durch Kompressoren verdichtet werden. Hochdruckelektrolyseure mit Drücken von bis zu 200 bar wurden bereits für den militärischen Bereich entwickelt und befinden sich für den zivilen Bereich noch in der Entwicklung. Sie haben das Potenzial einer deutlich effizienteren und kostengünstigeren Kompression (Verzicht auf teure Kompressoraggregate) im Vergleich zu heutigen Konzepten. Typische Kapazitäten für Tankstellenanlagen (industriell sind größere Anlagen verfügbar) sind 5–100 Nm^3/h für einzelne Elektrolyseure (bei redundanten Systemen entsprechend mehr) und bis zu 300 Nm^3/h für Dampfreformer.

Abbildung 12 zeigt ein Schema einer Tankstelle mit On-site-Erzeugung. Der im On-site-System erzeugte und gereinigte Wasserstoff wird von einem Mitteldruckkompressor in den Mitteldruckspeicher komprimiert. Ab hier unterteilen sich die On-site-Anlagen in zwei

Konzepte: Die erste Möglichkeit ist die Installation eines Hochdruckspeichers und die Befüllung desselben über einen Hochdruckkompressor (siehe blauer Strang). Eine Betankung erfolgt in diesem Fall zuerst aus dem Mitteldruckspeicher und anschließend aus dem Hochdruckspeicher.

Alternativ kann statt der zweiten Speicherstufe ein Booster-Kompressor verwendet werden (siehe grüner Strang). Dieser Kompressor hat eine wesentlich höhere Förderleistung als der Hochdruckkompressor. Bei einer Betankung wird das Fahrzeug bis zum Druckausgleich aus dem Mitteldruckspeicher gefüllt und im Folgenden fördert der Booster-Kompressor Wasserstoff aus dem Mitteldruckspeicher direkt in den Tank. Dieses Konzept stellt hohe Anforderungen an den Booster-Kompressor und dessen Regelung und ist damit eine Herausforderung für Anlagenbauer und Kompressorhersteller.

Bei beiden Konzepten muss der Wasserstoff vor dem Fahrzeug in einem Wärmeübertrager vorgekühlt werden, dessen Kälte meist über eine Kompressionskältemaschine hergestellt wird.

Beispiele für Tankstellen mit On-site-Erzeugung sind Berlin Holzmarktstraße, Freiburg Fraunhofer ISE, Stuttgart Talstraße und Hamburg Speicherstadt.

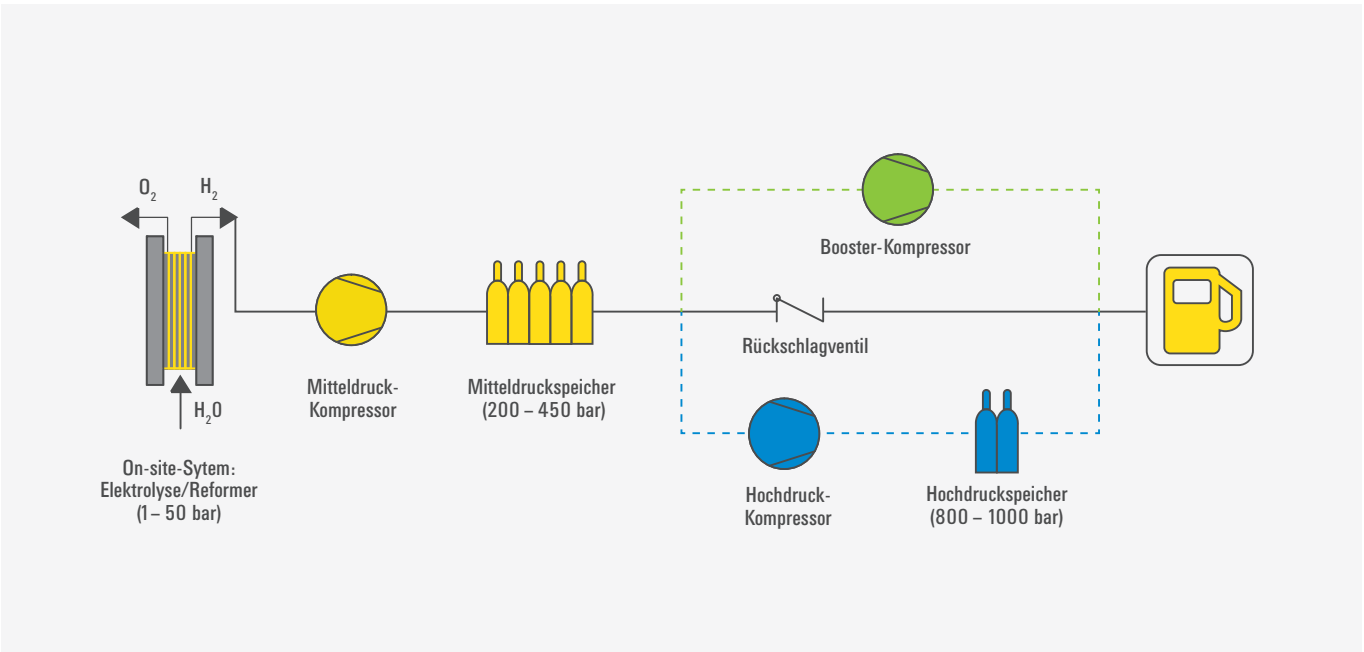


Abbildung 12: Schema einer On-site-Erzeugung durch Elektrolyse

WASSERSTOFF-VERSORGUNG: CGH₂-ANLIEFERUNG

Die Versorgung einer Tankstelle mit einem CGH₂-Trailer (Trailer mit komprimiertem gasförmigem Wasserstoff) ist eine einfache Form des Wasserstoff-Transportes. Der Transport findet bei einem Druck von 200–500 bar statt, womit ein typischer CGH₂-Trailer 400–800 kg Wasserstoff enthält. CGH₂-Trailer werden bevorzugt bei kleinen Transportdistanzen bis 400 km eingesetzt, was aufgrund der Dichte der Wasserstoff-Erzeugungsanlagen für alle Tankstellen in Deutschland zutrifft. Da CGH₂-Trailer im Vergleich zu den anderen Transportmöglichkeiten eine vergleichsweise geringe Kapazität besitzen, ist deren Einsatz auf Tankstellen mit einer geringen Nachfrage limitiert. Der CGH₂-Trailer bleibt entweder vor Ort und dient direkt als Niederdruckspeicher oder befüllt einen Niederdruckspeicher der Tankstelle vor Ort. In beiden Fällen sind eine oder mehrere Kompressionsstufen zur Druckerhöhung des Wasserstoffs an der Tankstelle erforderlich.

Jenseits des Niederdruckspeichers werden zwei verschiedene Verfahren zur Kompression, Lagerung und Befüllung der Fahrzeuge angewandt, die in Abbildung 13 dargestellt sind.

Eine Möglichkeit ist die Befüllung des Hochdruckspeichers durch einen Hochdruckkompressor aus dem Niederdruckspeicher (blauer Strang). Die Betankung des Fahrzeuges erfolgt dann aus dem Hochdruckspeicher mit Vorkühlung des Wasserstoffs in einem Wärmeübertrager. Je nach Ausführung des Niederdruckspeichers können auch Teile der Befüllung aus dem Niederdruckspeicher erfolgen. Ein anderes Konzept ist das Vorhalten eines Mitteldruckspeichers, der zwischen Betankungen mit einem (Booster-)Kompressor aus dem Niederdruckspeicher gefüllt wird (grüner Strang). Bei einer Betankung wird das Fahrzeug zuerst aus dem Mitteldruckspeicher gefüllt und sobald Druckausgleich zwischen Speicher und Fahrzeug eintritt, füllt der Kompressor das Fahrzeug im Booster Betrieb direkt aus dem Mitteldruckspeicher. Der Vorteil dieses Konzeptes ist

(wenn nur ein Kompressor verwendet wird) die Kostenersparnis des Hochdruckspeichers und der energetisch leicht bessere Wirkungsgrad, da nur die wirklich notwendige Verdichtungsarbeit geleistet wird. Die Booster-Betankung ist hingegen sehr diffizil auf die Anforderungen der SAE J2601 einzustellen und anspruchsvoll für Anlagenbauer und Kompressorhersteller.

Derzeit existierende Beispiele für Tankstellen mit CGH₂-Anlieferung sind Berlin Heidestraße, Hamburg Cuxhavener Straße und Hamburg Bramfelder Chaussee mit Hochdruckspeicher, sowie Berlin Heerstraße, Stuttgart Flughafen mit Boosterbetankung.

WASSERSTOFF-VERSORGUNG: LH₂-ANLIEFERUNG

Größere Tankstellen mit hohem Umsatz und geringem Platzangebot oder sehr hohem Umsatz (beispielsweise an Autobahnen), eignen sich besonders für die Belieferung durch LH₂-Trailer. Dabei wird

Wasserstoff an einer zentralen Verflüssigungsanlage erzeugt, verflüssigt und an die Tankstellen geliefert. Hierdurch kann die volumetrische Energiedichte signifikant erhöht werden und LH₂-Trailer können im Vergleich mit CGH₂-Trailern große Mengen an Wasserstoff transportieren. Typischerweise wird Flüssigwasserstoff zur Versorgung bei größeren Distanzen von 400–1000 km eingesetzt. Der Wasserstoff wird hierbei bei einer Temperatur von -253 °C transportiert.

Das Konzept der Flüssiganlieferung mit gasförmiger Betankung wird in Abbildung 14 dargestellt. Der Wasserstoff wird in einem LH₂-Trailer angeliefert, in einen isolierten Tank für Flüssigwasserstoff gepumpt und dort gelagert. Im Betankungsfall wird der flüssige Wasserstoff über eine Flüssigwasserstoff-Pumpe durch einen Verdampfer gepumpt, verdampft und dann gasförmig in das Fahrzeug gefüllt. Aufgrund der niedrigen Temperaturen des Wasserstoffs kann auf ein Kälteaggregat zur Vorkühlung verzichtet werden.

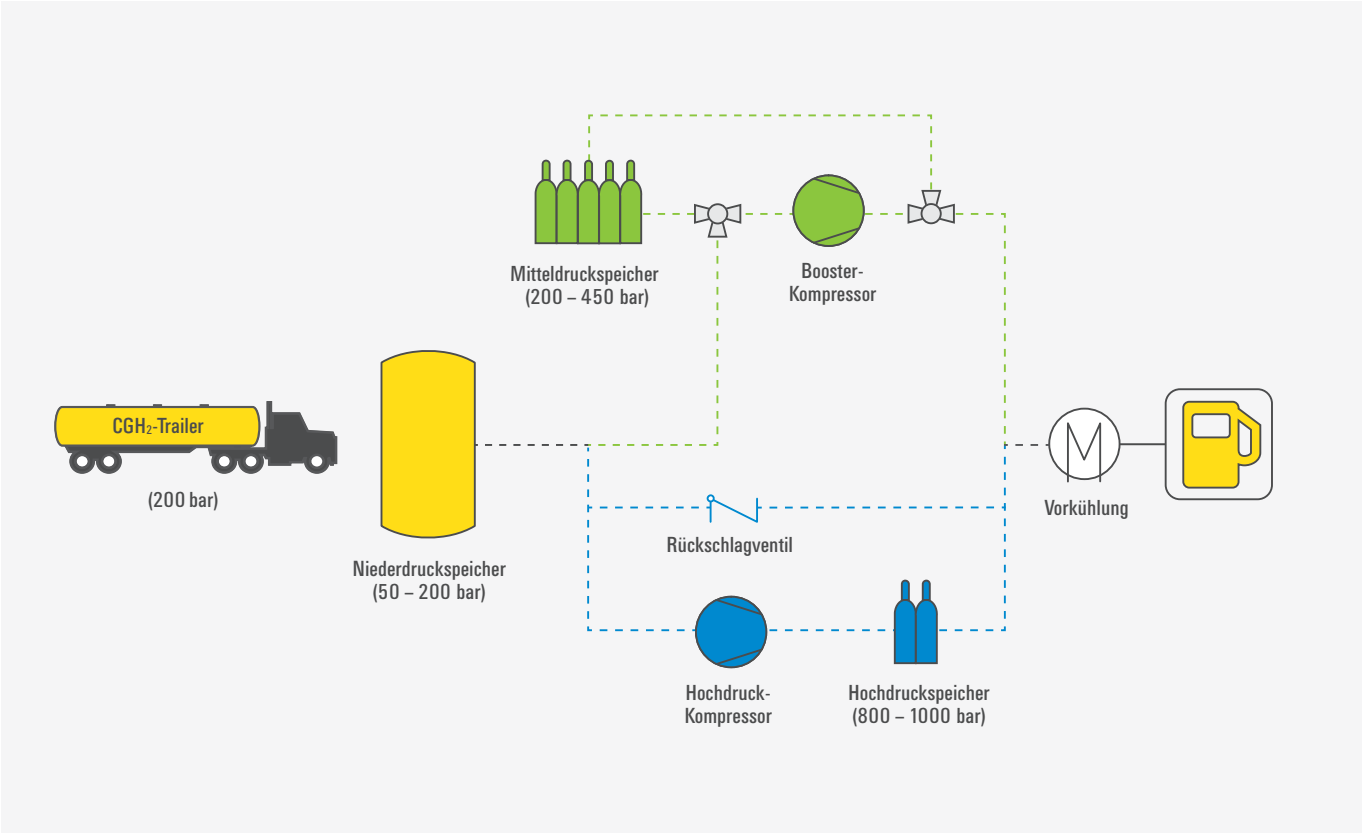


Abbildung 13: Schema gasförmige Anlieferung und Betankung

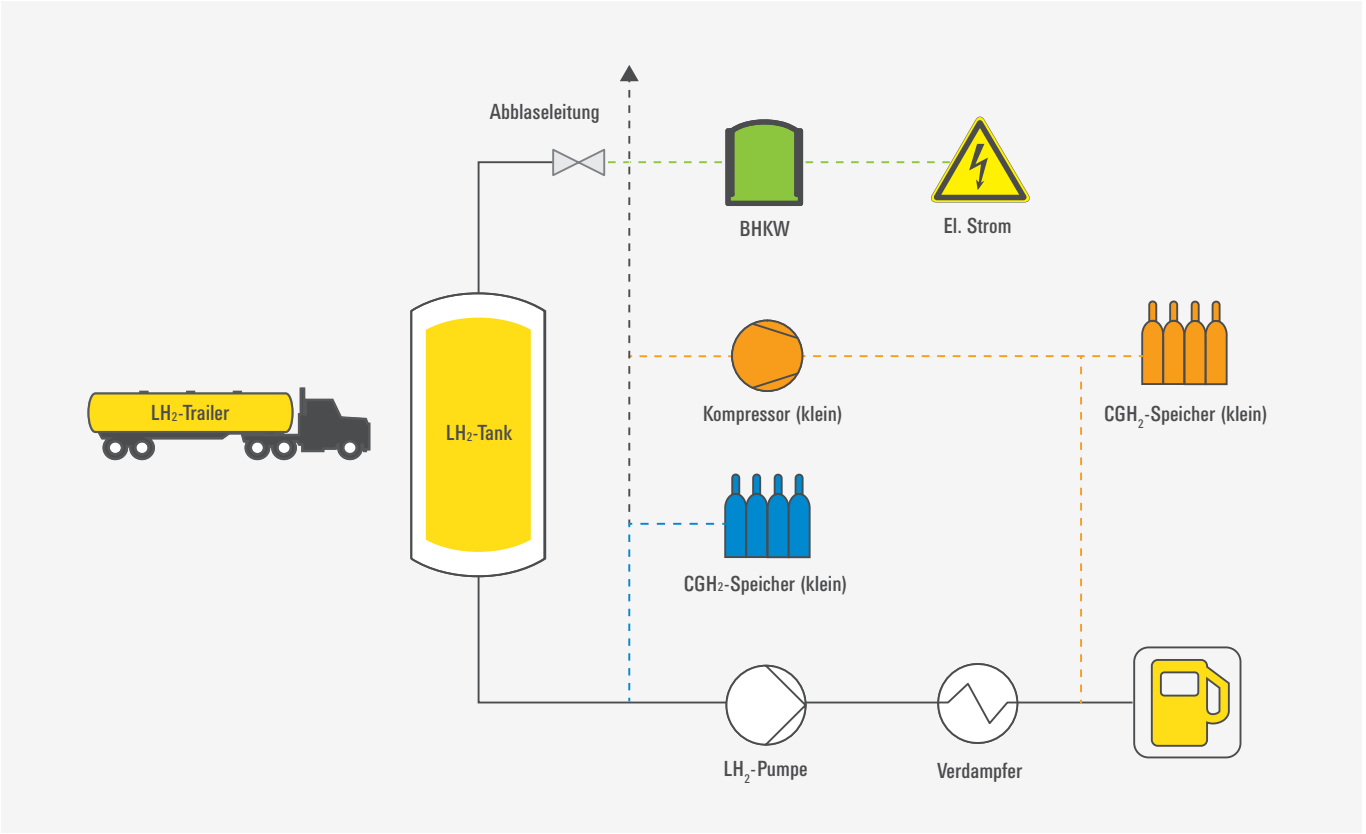


Abbildung 14: Schema Flüssiganlieferung und Gas-Betankung

Bei der Flüssiglagerung lässt sich die Verdampfung eines Teils des Wasserstoffs durch einen Wärmeeintrag in den LH₂-Tank nur schwer vermeiden. Der verdampfte Wasserstoff muss aus dem LH₂-Tank entlassen werden, um einen Druckanstieg bis zur Überlastung zu vermeiden. Schlimmstenfalls muss der verdampfte Wasserstoff abgelassen werden, was einen energetischen und wirtschaftlichen Verlust darstellt. Um dies zu vermeiden, existieren mehrere Konzepte zur Nutzung des entstehenden gasförmigen Wasserstoffs:

- Blauer Strang: Mit entsprechend geeigneter Pumpe kann der verdampfte Wasserstoff zur Fahrzeugbetankung genutzt werden, indem er gasförmig gespeichert und mit bis zu 40 % Anteil dem flüssigen Wasserstoff beigemischt wird
- Orangener Strang: Alternativ kann er durch einen kleinen Zusatzkompressor und einen kleinen Gasspeicher zur Befüllung von Bussen genutzt werden (Vermeidung von Vorkühlung und zweitem Kompressor bei 350 bar)
- Grüner Strang: Eine andere weniger aufwändige Alternative ist die Nutzung in einem BHKW zur Stromerzeugung

Ein aktuelles Beispiel für eine Tankstelle mit LH₂-Anlieferung ist Hamburg Sachsenkamm.

WASSERSTOFF-VERSORGUNG: PIPELINE

Eine Pipeline-Infrastruktur ist die ökonomischste Methode für den Transport großer Mengen an gasförmigem, komprimiertem

Wasserstoff, eignet sich aber aufgrund der hohen Investitionskosten nur für dicht besiedelte Regionen mit vielen Abnehmern großer Wasserstoff-Mengen. Der Wasserstoff wird i. d. R. bei einem Druck von 20–100 bar transportiert. Es finden sich aber auch Beispiele einer Wasserstoff-Versorgungsleitung mit Drücken bis zu 1000 bar, wodurch eine weitere Kompressionsstufe an der Tankstelle entfallen würde. Durch eine Pipeline-Versorgung werden hohe Kapazitäten und Lieferraten erreicht, wodurch eine hohe Flexibilität der Tankstellen bezüglich der Versorgung bei Nachfragespitzen ermöglicht wird. Wasserstoff-Pipelines sind bereits an diversen Stellen in Deutschland, Europa oder den USA im industriellen Einsatz und bieten zukünftig ideale Bedingungen für dicht besiedelte Regionen bzw. Regionen mit dichter Nutzerstruktur und hohem Wasserstoffbedarf [25].

Bei Pipelines mit Drücken oberhalb von 700 bar können die Tankstellen durch einen Verzicht auf Kompressoren und Speicher – den größten und teuersten Komponenten der Wasserstoff-Tankstellen – mit deutlich reduzierten Kosten und Platzbedarf errichtet werden. Im Falle der Tankstelle Frankfurt Hoechst wird der Wasserstoff vor der Pipelineeinspeisung auf 1000 bar komprimiert, sodass die Tankstelle nur die Abnahme und Befüllung mit Vorkühlung umsetzen muss.

Liegt der Druck der Pipeline niedriger als 700 bar, wird die Tankstelle als On-site-versorgt gehandhabt und entsprechende Anlagenkonzepte (siehe Abschnitt On-site-Versorgung) werden eingesetzt.

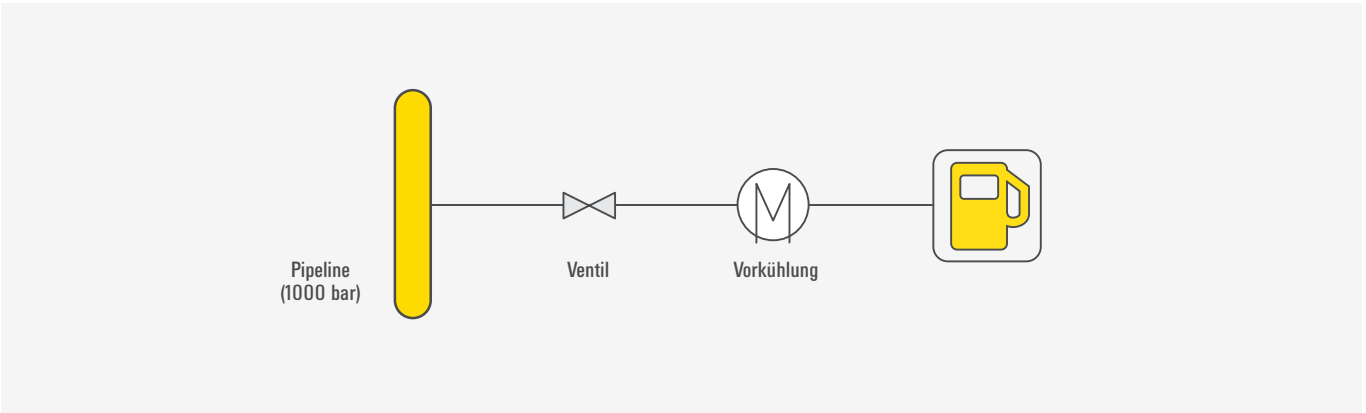


Abbildung 15: Schema Hochdruck-Pipeline-Versorgung mit Gas-Betankung

LH₂-BETANKUNG

Der Vollständigkeit wegen soll an dieser Stelle auch die Flüssigwasserstoff-Betankung von Flüssigwasserstoff-Fahrzeugen erwähnt werden. Flüssigwasserstoff in Fahrzeugen wurde mit dem Ziel verfolgt, für die Übergangszeit eine Treibstoffflexibilität – also Benzin und Wasserstoff im selben Fahrzeug analog zu Erdgasfahrzeugen – zu bieten und um Wasserstoff-Verbrennungsmotoren mit gewohnten oder ähnlichen Reichweiten und Leistungsdichten im Vergleich zu konventionellen Benzin-Motoren zu ermöglichen. Wegen diverser Gründe – u. a. der Boil-off-Problematik der Fahrzeuge – wird diese Betankungsart jedoch in dieser Form nicht mehr weiter verfolgt und Tankstellen, die Flüssigwasserstoff anbieten sind derzeit im Rückbau.

Gegenwärtig wird im Rahmen des CryoComp-Projektes ein überkritischer Kryodruck-Speicher (CcH₂) erforscht, welcher eine deutliche Erleichterung der Isolationsanforderungen (im Vergleich zu Kryospeichern) und einen verlust-/Boil-off-freien Betrieb des Fahrzeugspeichers in allen typischen automotiven Kundenzyklen bei höchster Speicherdichte ermöglichen soll. Da dies im Gegensatz zu den Brennstoffzellen-Fahrzeugen mit Druckspeicher und Betankungsnorm aber von einer Serienreife noch weit entfernt ist, ist die CryoComp-Technologie derzeit für die Wasserstoff-Tankstellen-Infrastruktur nicht relevant.

3.2.2 WEITERE WASSERSTOFF-TANKSTELLENKONZEPTE

Im amerikanischen und japanischen Raum wird neben den oben diskutierten Konzepten auch noch die Idee einer kleinen dezentralen Wasserstoff-Tankstelle als sogenannte „Home refueller“ verfolgt. Sowohl Honda als auch der US-amerikanische Elektrolysehersteller Proton OnSite haben dafür Prototypen entwickelt und testen sie auf dem US-amerikanischen Markt.

HOME REFUELLER

Die Konzepte entsprechen dem in Kapitel 3.2.1 vorgestellten Anlagenschema mit On-site-Erzeugung. Kernelement eines „Home refueller“ ist ein Hochdruckelektrolyseur, der bei Drücken über 100 bar Wasserstoff erzeugt und in einen Puffertank zwischenspeichert. Ein Booster dient zum direkten Befüllen eines 350-bar- oder 700-bar-Tanks. Für diese Anwendung werden vor allem

PEM-Elektrolyseure eingesetzt. Home refueller sollen als private Tankstelle eingesetzt werden. Die Koppelung mit einer PV-Anlage zur Erzeugung CO₂-freien Wasserstoffs bietet sich an. Der Prototyp der Firma Proton Onsite hat eine nominelle Produktionsrate von 2,2 kg/d. Honda verzichtet auf einen Booster und füllt direkt in einen 350-bar-Tank. Über 8 h können 0,5 kg Wasserstoff erzeugt werden. Dies reicht aus, um den täglichen Pendlerweg zur Arbeit hin- und zurück zu schaffen [26]. Neben dem Einsatz eines Elektrolyseurs wird durch Honda und Plug Power auch die Methanreformierung für diese kleinen Tankstellenkonzepte erprobt.



Abbildung 16: Prototyp einer dezentralen Wasserstoff-Tankstelle „Home refueller“, Aufstellung an einem Privathaus (Quelle: Proton Onsite)

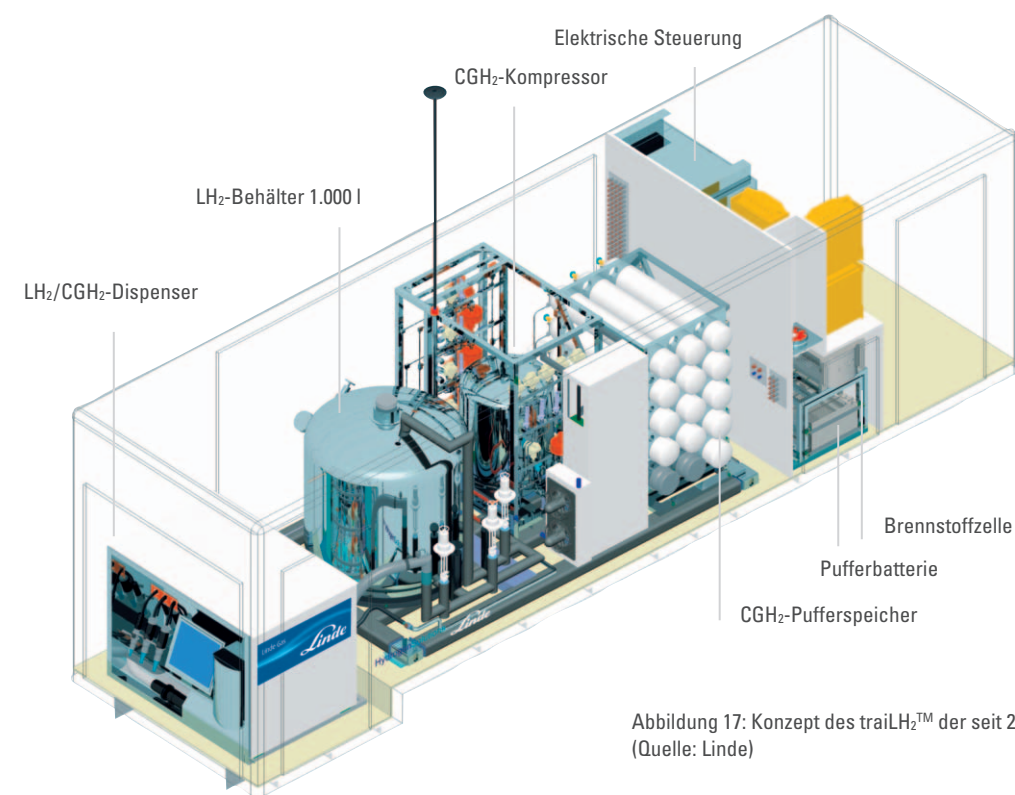


Abbildung 17: Konzept des trailLH2™ der seit 2006 als Prototyp getestet wird (Quelle: Linde)

MOBILE TANKSTELLEN

Obwohl Wasserstoff-Tankstellen als Containerlösung transportabel und gemäß Tabelle 8 (siehe Seite 48) in den Typen XS und S umgesetzt werden können, gibt es zusätzlich die Idee, mobile Tankstellen auf LKW-Aufliegern zu installieren. Der Trailer kann als LH₂- oder aber als CGH₂-Anlage aufgebaut sein. Seit 2006 erprobt Linde seinen trailLH₂™ als Prototypen einer mobilen Tankanlage. Tiefkalter verflüssigter Wasserstoff (LH₂) wird bei -253 °C in einem 1000 Liter-Dewargefäß gespeichert. Eine integrierte Brennstoffzelle versorgt das Bordnetz mit Strom. Die mobile Tankanlage ist mit vier Tankkupplungen ausgerüstet: einer LH₂-Kupplung und drei CGH₂-Anschlüssen in unterschiedlichen Druckstufen von 200–350 bar [27]. Der Aufbau des Trailers ist in Abbildung 17 dargestellt.

In Analogie zur mobilen Tankanlage auf LH₂-Basis ist dieses Konzept auch als reine CGH₂-Tankanlage denkbar. Hier werden auf dem LKW-Auflieger Mitteldruck-Flaschenbündel mit 300 bis 450 bar Druck mitgeführt. Ein integrierter Kompressor fördert den Wasserstoff auf den benötigten Hochdruck in einem Hochdruckspeicher. Dieser versorgt die 350-bar- und 700-bar-Dispenser-Einheiten [26]. Weitere mobile Konzepte wurden auch von anderen Firmen wie bspw. GHR und ITM Power präsentiert.



Abbildung 18: Lindes mobile Betankungsanlage trailLH₂-gas auf der Hannover Messe 2012 (Quelle: Tobias Renz FAIR)

WASSERSTOFF-TANKSTELLE

In Kapitel 2.1 wurden die bisher existierenden Konzepte für Wasserstoff-Tankstellen erläutert. Die Entwicklung dieser Konzepte und der entsprechenden Steuerungs- und Sicherheitskonzepte wird durch die Anlagenbauer durchgeführt. Je nach Firmenpolitik werden für die Umsetzung und den Bau der Anlagen Subunternehmen mit entsprechender fachlicher Spezialisierung herangezogen.

Die genaue Auswahl der Komponenten und damit auch die Umsetzung der Konzepte werden von den Anlagenherstellern nach technischen, preislichen und firmenpolitischen Gesichtspunkten sowie nach den Anforderungen im Lastenheft des Kunden getroffen.

Im folgenden Kapitel sollen die benötigten Komponenten und deren Anforderungen grob erläutert werden.

3.3.1 WASSERSTOFF-ERZEUGUNG

Die überwiegende Anzahl der Tankstellen wird heutzutage von den großen Gaslieferanten Air Liquide, Air Products, Linde und Weiteren mit Wasserstoff versorgt. Die Herstellung des Wasserstoffs ge-

schieht also Off-site in großen, zentralen Erzeugungsanlagen meist über die Dampfreformierung von Erdgas – und wird mit Trailern angeliefert. Um eine Versorgung mit regenerativ erzeugtem, klimaneutralem Wasserstoff voranzutreiben, werden zunehmend auch andere Wege beschritten. Teilweise wird als Ausgangsbasis für die Wasserstoff-Erzeugung statt Erdgas Biogas oder in der Linde-Erzeugungsanlage in Leuna Glycerin – ein Nebenprodukt der Biodieselherstellung – verwendet. Mehrere Tankstellen im Berliner Großraum erhalten ihren Wasserstoff inzwischen auch aus dem Prenzlauer Hybridkraftwerk, in welchem Windstrom über Elektrolyse Wasserstoff erzeugt. In Frankfurt und Hürth (nur Busse) wird Abfall- oder Nebenproduktwasserstoff aus der chemischen Industrie verwendet.

Für die On-site-Erzeugung von Wasserstoff werden verschiedene Wasserstoff-Erzeugungsmethoden verfolgt. Eine Gegenüberstellung der Verfahren zeigt Tabelle 4. Bei der On-site-Elektrolyse stehen prinzipiell zwei verschiedene Verfahren mit ihren Vor- und Nachteilen zur Verfügung. Die alkalische Elektrolyse ist in großem Maßstab verfügbar und daher in der Anschaffung meist etwas günstiger, enthält aber prinzipbedingt 20 %ige Kalilauge und benötigt neben Wasser auch Stickstoff für den Betrieb.



Abbildung 19: Onsite-Elektrolyse-Systeme PEM Elektrolyseur der Firma Proton Onsite (früher Proton Energy Systems) an der Wasserstoff-Tankstelle am Fraunhofer ISE, Freiburg (links: Verfahrenstechnischer Aufbau, rechts: Bedienpanel)



Abbildung 20: Alkalischer Elektrolyseur der Firma NEL Hydrogen (früher Statoil Hydrogen Technologies) an der Wasserstoff-Tankstelle in der Holzmarktstraße, Berlin (Quelle: NEL Hydrogen)

ON-SITE-ELEKTROLYSE

Die PEM-Elektrolyse bietet einfachen Betrieb und Wartung und einen hochdynamischen Betrieb – dies bringt vor allem Vorteile bei der Koppelung mit regenerativen Energien. Ein weiterer wesentlicher Vorteil ist, dass PEM-Elektrolyseure tendenziell bei höherem

Arbeitsdruck arbeiten, wodurch Energie- und Anschaffungskosten bei der mechanischen Kompression gespart werden können. Derzeit werden PEM-Elektrolyseure nur für sehr kleine Tankstellen verwendet, wohingegen die alkalische Elektrolyse eher bei großen Tankstellen eine Rolle spielt. Derzeit arbeiten die Hersteller von PEM-Elektrolyseuren an einer Vergrößerung und energetischen Optimierung der Anlagen, um diese für eine Nutzung im Mobilitäts- und Energiespeicherkontext attraktiv zu machen. Der Reifegrad und die Zuverlässigkeit beider Technologien sind sehr hoch.

ON-SITE-REFORMIERUNG

Eine Alternative zur Erzeugung durch Elektrolyse ist die On-site-Reformierung aus Erdgas. Über katalytische Dampfreformierung wird Erdgas/Biogas/Flüssiggas in Wasserstoff und weitere Produkte umgewandelt. Eine nachgeschaltete Gasreinigung sorgt dann für die Gewinnung von hochreinem Wasserstoff als Endprodukt. Reformer bevorzugen einen möglichst permanenten Betrieb ohne große An- und Abfahrzyklen und benötigen neben Strom auch einen ausreichend großen Erdgasanschluss zur Versorgung. Kleine Reformieranlagen im On-site-Einsatz hatten in den vergangenen Projekten noch nicht den hohen Reifegrad der Elektrolyseanlagen und gelegentliche Ausfälle aufgrund von Anfangsschwierigkeiten gezeigt. Große, zentrale Reformieranlagen sind Stand der Technik.

Tabelle 4: Vergleich der On-site-Erzeugungsverfahren Elektrolyse und Reformierung

Alkalische Elektrolyse	PEM-Elektrolyse	Reformierung
Benötigt leistungsfähigen Stromanschluss, Wasser und Stickstoff	Benötigt leistungsfähigen Stromanschluss, Wasser	Benötigt normalen Stromanschluss und eine Erdgas- oder LPG- Versorgung
Leistungsaufnahme zwischen 5 kW – 3 MW möglich, derzeit üblich: (1–2 mal) 400 kW-System = 128 kg/d	Leistungsaufnahme bis 150 kW (= 64 kg/d). Entwicklung großer Systeme (bis 0,5 MW) nahe Marktreife	Erzeugungsraten bis 650 kg/d üblich
Schnelle Regelbarkeit der Wasserstoffabgabe und Leistungsaufnahme	Sehr schnelle Regelbarkeit der Wasserstoffabgabe und Leistungsaufnahme	Träge Regelbarkeit der Wasserstoffabgabe
Gasverunreinigungen sind Kalilauge, Wasserdampf und Sauerstoff (da i. d. R. kein Differenzdruckverfahren)	Gasverunreinigungen sind Wasserdampf und ggf. Sauerstoff (wenn kein Differenzdruckverfahren)	Gasreinigung wichtig! Typische Verunreinigungen sind Wasserdampf, CO, CO ₂ , Kohlenwasserstoffe
Zuverlässig im Betrieb	Zuverlässig im Betrieb, sehr wartungsarm	Vereinzelt Probleme im Betrieb

3.3.2 KOMPRESSOREN / PUMPEN

Zur Druckerzeugung gibt es eine breite Spanne an möglichen Komponenten. Allen gemein ist die Anforderung, dass aus Niederdruck-Vorratsspeichern mit Drücken zwischen 50 und 200 bar Zieldrücke bis zu 1000 bar erzeugt werden müssen (nicht zwangsläufig in einer Stufe/Verdichter), dass das geförderte Gas nicht verunreinigt werden darf (bspw. durch Öl, Partikel oder ähnliches) und die verwendeten Materialien wasserstoffverträglich sein müssen (bspw. resistent gegen Wasserstoffversprödung).

KOLBENVERDICHTER

Kolbenverdichter verdichten das Gas durch die Bewegung eines (meist hydraulisch angetriebenen) Kolbens. Für die im Mobilitätsbereich benötigten Drücke wird i. d. R. mit einem Übersetzungsverhältnis gearbeitet – d. h. der Druck des Hydraulik-Öls ist dabei niedriger als der Zieldruck des Wasserstoffs (siehe hydraulische Presse). Bedingt durch die Erwärmung des Gases bei der Kompression werden die Maschinen meist mehrstufig mit Zwischenkühlung ausgeführt, um Wirkungsgrad und Lebensdauer der Verdichter zu verbessern.

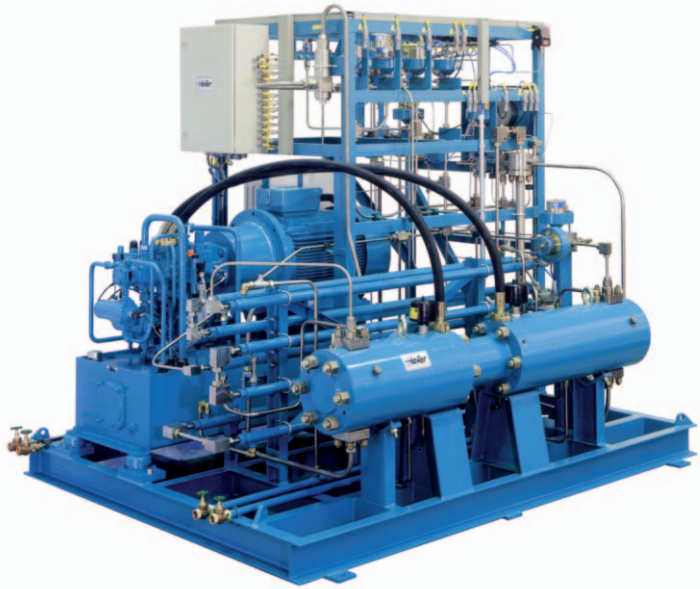


Abbildung 21: Kolbenkompressor für Wasserstoff (Quelle: Andreas Hofer Hochdrucktechnik)

Diese Kompressoren bestehen aus den Verdichtungskolben, Hydraulikaggregaten, entsprechender Steuertechnik und verfahrenstechnischen Komponenten bzw. Sicherheitstechnik. Je nach benötigter Fördermenge fallen diese Komponenten sehr groß aus – d. h. vor allem für Boosterbetankungen (vgl. Kapitel 3.2.1, Abschnitt CGH₂-Anlieferung) sind große und teure Kompressoren notwendig. Kolbenverdichter für Wasserstoff werden öl- und schmiermittelfrei ausgeführt, um eine Verunreinigung des Produktgases zu vermeiden und nehmen dafür aber Abrieb an den Dichtungen in Kauf. Kolbenkompressoren sind beschränkt im Enddruck und können nur bestimmte maximale Drucksteigerungen erreichen.

Druckluftbetriebene Verdichter sind eine Unterart der Kolbenkompressoren. Das Funktionsprinzip ist identisch, doch werden diese Kompressoren nicht mit Hydrauliköl, sondern mit Druckluft (also bei Drücken bis 10 bar) angetrieben. Entsprechend müssen auch zusätzlich zu diesen Verdichtern noch Druckluftkompressoren mit entsprechender Druckluftreinigung installiert werden, um die Antriebsluft bereitzustellen. Diese Spezialart der Kolbenverdichter ist i. d. R. nur für kleine Fördervolumenströme verfügbar und damit für die meisten kommerziellen Tankstellen uninteressant. Vorteile dieser Verdichter liegen in der kompakten Bauweise, sowie den geringen Anschaffungs- und Wartungskosten. Nachteilig sind hier der schlechte Wirkungsgrad (und damit hohe Energiekosten) und die je nach Auslastung häufigen Wartungen/kurzen Wartungsintervalle.

MEMBRANVERDICHTER

Membranverdichter verzichten zur Druckerhöhung auf einen Kolben und verwenden stattdessen eine Membran (meist metallisch), welche auf der einen Seite durch einen Kolben mit Hydrauliköl nach außen gesaugt und nach innen gepresst wird und auf der anderen Seite durch diese Bewegung das zu fördernde Gas ansaugt, verdichtet und wieder ausstößt. Rückschlagventile verhindern dabei das Rückströmen des Produktgases. Beim Membrankompressor wird die Trennung zwischen Wasserstoff und Hydrauliköl statt durch Kolbenringdichtungen durch eine Membran bewirkt, wodurch ein Dichtungsabrieb kein Thema mehr ist. Membranverdichter sind im Gegensatz zu Kolbenkompressoren nicht so stark limitiert, was die Drucksteigerung bzw. die Enddrücke betrifft, stoßen jedoch bei der Fördermenge an ihre Grenzen. Einzelne Firmen bieten daher auch kombinierte Verdichter an, zum Beispiel werden Membrankompressoren mit einem zusätzlichen Vorverdichter verwendet.



Abbildung 22: Zwei LH₂-Pumpen und ein LH₂-Speicher (Hintergrund) an der Shell-Tankstelle Berlin (Quelle: Linde)

IONISCHER VERDICHTER

Der Verdichter mit ionischen Flüssigkeiten (hier im Dokument vereinfachend „Ionischer Verdichter“ genannt) ist eine Eigenentwicklung der Firma Linde und wird ausschließlich in deren Anlagen verbaut. Die durch Patente geschützte Verdichtertechnologie ist noch vergleichsweise neu und wurde inzwischen an mehreren Tankstellen in Deutschland mit steigender Zuverlässigkeit installiert. Technologisch basiert der Kompressor auf der Nutzung von mehreren Flüssigkolben – d. h. ein sonst bei Kolbenkompressoren verwendeter mechanischer Kolben wird durch eine ionische Flüssigkeit ersetzt, die im Gegensatz zu anderen Flüssigkeiten keine Durchmischung von Wasserstoff und Flüssigkeit erlaubt und damit verhindert, dass der Wasserstoff durch verdampfte Flüssigkeit verunreinigt wird. Dieses Konzept verspricht durch die Verringerung von beweglichen Teilen laut Herstellerangaben längere Lebensdauern sowie längere Wartungsintervalle und soll durch die wärmeabführende Wirkung (isotherme Kompression) und die Vermeidung von Totvolumina auch die zur Kompression benötigte Energie verringern [28], [29].

LH₂-PUMPE

Flüssigwasserstoffpumpen – oder auch Kryopumpen genannt – kommen nur bei einer tankstellenseitigen Flüssigspeicherung (siehe Kapitel 3.2.1) zum Einsatz. Durch den Druckaufbau in der flüssigen Phase kann hier ein höherer Wirkungsgrad der Kompression erzielt werden. Im Gegensatz zu üblichen Kolbenkompressoren sind LH₂-Pumpen kompakter (2,5 m³ für 120 kg/h Förderrate im Vergleich zu einem 10-Fuß-ISO-Container bei Verwendung eines ionischen Kompressors mit 35 kg/h Förderrate) und preisgünstiger als sonstige Verdichter. Air Products und Linde setzen beide auf firmeneigene Entwicklungen mit leicht unterschiedlichen Konzepten. Air Products kann nach Firmenangaben auch einen Anteil gasförmigen Wasserstoffs mitfördern ohne pumpenschädigende Kavitationseffekte¹ zu riskieren und kann damit Boil-off-Verluste in einem gewissen Rahmen für die Betankung nutzen. LH₂-Pumpen bspw. der Firma Linde können bei maximal 900 bar Zieldruck Förderraten von bis zu 120 kg/h erreichen und sind damit geeignet für große Betankungsanlagen [28], [29].

¹ Durch lokalen Unterdruck verdampfen kleine Mengen der geförderten Flüssigkeit in der Pumpe. Die entstandenen Dampfblasen implodieren meist sofort wieder und erzeugen kleine, aber sehr starke Druckstöße, welche die Pumpe beschädigen.



Abbildung 23: LH₂-Anlieferung an der Shell-Tankstelle in Berlin Sachsensdamm (Quelle: Linde)

ELEKTROCHEMISCHE VERDICHTER

Elektrochemische Verdichter befinden sich aktuell im Stadium der Entwicklung und sind kommerziell noch nicht verfügbar. Sie versprechen aber sehr gute Wirkungsgrade der Kompression und sehr geringe Wartungskosten, weshalb sie an dieser Stelle kurz beschrieben werden sollen. Elektrochemische Kompressoren sind ähnlich zu einer PEM-Brennstoffzelle aufgebaut. Wasserstoff wird auf der Anodenseite einer elektrochemischen Zelle zugeführt. Durch Zufuhr elektrischer Energie wird der Wasserstoff aufgespalten, die Protonen wandern durch die Membran und die Elektronen über den äußeren Stromkreis zur Kathode, an der Protonen und Elektronen wieder zu Wasserstoff rekombinieren. Da der Wasserstofftransport elektrochemisch getrieben ist, kann bei druckfester Auslegung der Zelle auf der Kathodenseite ein höherer Druck erzielt werden. Im Zellinneren muss die Druckdifferenz von der protonenleitenden Membran getragen werden. Dies erfordert spezielle Konstruktionen, Druckdifferenzen von mehreren 100 bar sind jedoch technisch möglich. Die Wirkungsgrade der Kompression liegen nahe am thermodynamischen Idealfall, da die Wasserstoffaufspaltung nur geringe kinetische Verluste verursacht.

3.3.3 WASSERSTOFF-SPEICHER

Für Wasserstoff-Tankstellen mit gasförmiger Speicherung gibt es i. d. R. drei verschiedene Drucktankstufen: Niederdruckspeicher (ca. 50 bar, große Volumina), Mitteldruckspeicher (meist zwischen 200 bar und 500 bar) und Hochdruckspeicher (700 bar bis 1000 bar). Wenn eine Tankstelle auf flüssige Wasserstoff-Bevorratung setzt, dann spielen auch Flüssigwasserstoff-Tanks eine Rolle.

NIEDERDRUCKSPEICHER

Niederdruckspeicher sind häufig als 2,5 oder 4 Meter hohe, runde Gasbehälter („Zigarren“) mit einem Druck von ca. 45 bar und einem Wasserstoffinhalt in der Größenordnung 200 kg ausgeführt.

FLÜSSIGWASSERSTOFF

Speicher für Flüssigwasserstoff ähneln von außen den Gasbehältern, die typischerweise bei Niederdruckspeichern verbaut werden und sind mit Größen von 1 und 5 t Wasserstoffinhalt verfügbar. Meist werden diese Tanks von den Gaslieferanten vermietet.

Technisch gesehen sind diese Druckbehälter für Drücke bis ca. 10 bar ausgelegt und mit einer Isolierung ausgestattet, um einen Wärmeeintrag aus der Umgebung zu vermeiden. Trotz Isolierung lässt sich eine Erwärmung des Behälters nicht vermeiden, sodass ca. 0,5 % des gespeicherten Wasserstoffs pro Tag verdampft (so genannter Boil-off-Verlust). Dieser verdampfte Wasserstoff wird meist energetisch oder für die Fahrzeugbetankung genutzt. Bei nicht ausreichender Auslastung der Tankstelle muss er jedoch abgelassen werden siehe Kapitel 3.2.1.

MITTELDRUCKSPEICHER

Mitteldruckspeicher können auf der einen Seite Gasröhren sein – vielfach auch im Einsatz für Kaskadenspeicherung und größere Speicherkapazitäten – meist wird der Mitteldruckspeicher aber aus Kostengründen in Form von Flaschenbündeln umgesetzt. Hier herrscht bis zu einer gewissen Menge ein Kostenvorteil durch die allgemein große Hersteller- und Absatzmenge von Standardflaschen für Drücke zwischen 200 bar und 500 bar.

HOCHDRUCKSPEICHER

Hochdruckspeicher sind aufgrund der hohen Drücke Sonderanfertigungen, die nur von wenigen Firmen angeboten werden, da jenseits der Tankstellen kein Massenmarkt besteht. Bei diesen Firmen gibt es verschiedene Auslegungsziele, die sich in unterschiedlichen Zyklenzahlen (und damit unterschiedlichen Lebensdauern/Prüf-



Abbildung 24: Flaschenbündel (500 bar) der Firma Air Products

zyklen) und Zertifizierungen ausprägen. Bekannte Arten von Tanks sind einerseits Vollcomposite-Behälter (Typ IV) und Stahlcomposite-Behälter (Typ II) mit jeweils bis zu 1000 bar Designdruck.

3.3.4 WASSERSTOFF-VORKÜHLUNG / VERDAMPFER

Für die 700-bar-Schnellbetankung nach SAE J2601 (siehe Kapitel 3.1.1) ist es notwendig, den Wasserstoff auf eine Temperatur zwischen -33 °C bis -40 °C zu temperieren. Je nach Vorratsspeicherung (flüssig oder gasförmig) ist entweder ein Verdampfer oder eine Kältemaschine notwendig, um den Wasserstoff gasförmig bei den gewünschten Temperaturen bereit zu stellen.

VORKÜHLUNG

Die Wasserstoff-Vorkühlung erzeugt hierfür Kälte in einer Kompressionskältemaschine und speichert diese in einem Wärmeträgermedium (bspw. Thermoöl). Dieses Wärmeträgermedium überträgt dann die Kälte bei Bedarf an den Wasserstoff über einen Wärmeübertrager – dies kann bspw. ein Rohr-in-Rohr Wärmeübertrager oder ein Block aus solidem Aluminium mit integrierten Rohren sein. Je nach Ausführung sind hier größere oder kleinere Kälteverluste an die Umgebung und damit Energieverluste zu beobachten.

Die Kompressionskältemaschine ist hierbei eine Komponente, die durch entsprechende Spezialfirmen hergestellt und aufgrund der geringen Stückzahl nach Spezifikationen des Anlagenherstellers in Manufaktur angefertigt wird.

Vereinzelt wurde die Vorkühlung auch mit flüssigem Stickstoff umgesetzt – ein nur in Sonderfällen bei entsprechenden Rahmenbedingungen eingesetzter Weg und wird daher nicht näher beleuchtet.

WÄRMEÜBERTRAGER

Der Wärmeübertrager ist mit den Anforderungen Wasserstoffverträglichkeit, Druckstabilität bis zu 900 bar und Temperaturschwankungen zwischen -50 °C und +50 °C eine herausfordernde Spezialanfertigung, die analog zu den Kompressionskältemaschinen von entsprechend qualifizierten Firmen des metallverarbeitenden Gewerbes nach den gültigen Normen kundenspezifisch in Manufaktur hergestellt wird.

VERDAMPFER

Im Falle der Flüssiglagerung passiert der flüssige Wasserstoff anstelle der Vorkühlung einen Verdampfer, der ähnlich zu den

Verdampfern für Flüssigstickstoff aus einem druckfesten Rohr besteht, das mit Finnen versehen ist, um die Kälte besser an die Umgebung abzugeben. Die genaue Temperierung des Wasserstoffs ist derzeit aufgrund der geringen Anzahl an Flüssigwasserstoff-Tankstellen noch eine Spezialmethode, die firmenspezifisch gehandhabt wird.

3.3.5 DISPENSER

Bezüglich der Dispenser werden derzeit noch verschiedene Wege eingeschlagen. Während die Füllkupplung normiert ist, sind die Benutzerschnittstellen und Bedienelemente teilweise noch sehr unterschiedlich, auch wenn an einigen Tankstellen die Ähnlichkeit zur Erdgaszapfsäule angestrebt wird.

Linde hat mit einem für Wasserstoff angepassten Dispenser der Firma Tokheim eine Abgabeeinheit im Angebot, die mit seiner auf Zählwerk und Zweiknopf-Bedienung reduzierten Benutzerschnittstelle den Erdgas-Zapfsäulen sehr stark ähnelt. Die anderen Hersteller orientieren sich bei dem Design der Dispenser primär an den Kundenwünschen und schlagen teilweise bewusst neue Pfade ein, um Wasserstoff über ein neuartiges Design interessant zu gestalten. Diese Entscheidung hängt auch vom Einsatzort (integriert in bestehende Tankstelle oder unabhängig davon) ab.



Abbildung 25: 700-bar-Zapfsäule an der CEP Tankstelle Berlin Holzmarkstraße (Quelle: CEP)

Der Dispenser enthält neben der Benutzerschnittstelle typischerweise Temperatur- und Drucktransmitter, Ventile, eine Mengenummessung – derzeit in Form eines noch nicht eichfähigen Coriolis-Messgeräts (siehe Kapitel 4.4.4) – und die Befüllgarnitur, bestehend aus Abreißkupplung, Füllschlauch und Füllkupplung.

3.3.6 VERFAHRENSTECHNISCHE KLEINKOMPONENTEN (VENTILE, SENSORIK)

Für Steuerung, Automatisierung und Sicherheitsfunktionen sind diverse Ventile in der Tankstelle selbst notwendig. Für eine typische Tankstelle werden Rückschlagventile, Handventile (für die Wartung), gesteuerte Ventile in explosionsgeschützter Bauweise (bspw. pneumatisch betätigte Absperrventile) sowie ggf. Magnetventile in einer kleineren zweistelligen Stückzahl pro Ventilart und Tankstelle verwendet.

Je nach Konzept und Stelle in der Anlage müssen die Ventile Drücke von 50 bar, 500 bar oder 1000 bar aushalten und sind damit zum Teil noch normale Standardkomponenten. Verträglichkeit mit Wasserstoff ist für alle medienberührenden Teile notwendig und wird i. d. R. von den Firmen durch entsprechende Materialauswahl beherrscht. Einige wenige Ventile im 700-bar-Befüllstrang müssen zusätzlich zu Drücken von bis zu 1000 bar auch bei Temperaturen bis zu -40 °C noch zuverlässig arbeiten, was durchaus eine Herausforderung darstellt und vereinzelt zu Ausfällen führte.

Des Weiteren sind Drucktransmitter, Temperatursensoren und Manometer zur Steuerung und Absicherung des Anlagenbetriebs notwendig. Die Sensorik-Komponenten unterliegen Anforderungen analog den Ventilen und werden in ähnlicher Stückzahl verwendet.

Häufig gibt es für entsprechende Komponenten Erfahrungen aus anderen Bereichen, sodass diese bis auf wenige Spezialfälle (1000 bar und -40 °C) zuverlässig arbeiten.

3.3.7 STEUERUNGSTECHNIK

Die Steuerungstechnik der Anlagen besteht aus für Industrieanlagen typischen Komponenten. Sie ist zusammengesetzt aus einem oder mehreren individuell angefertigten Schaltschränken mit verschiedensten Standardkomponenten der Automatisierungstechnik. Diese werden zentral durch eine SPS gesteuert. Die Entwicklung und die Programmierung der Steuerungssoftware wird durch die Anlagenhersteller oder deren Subunternehmer gemäß dem Anlagen- und Sicherheitskonzept des Anlagenherstellers durchgeführt/ realisiert.

ANALYSE DER TECHNOLOGIEKONZEPTE

4.1 DISKUSSION UND BEWERTUNG HEUTIGER WASSERSTOFF-TANKSTELLEN

EXISTIERENDE WASSERSTOFF-TANKSTELLEN

In der vorliegenden Studie wird für Deutschland i. d. R. von 15 existierenden Tankstellen gesprochen. Dies sind die bereits vorhandenen oder kurz vor Eröffnung stehenden Tankstellen, die für wasserstoffgetriebene Fahrzeuge als Infrastruktur zur Verfügung stehen. Diese Tankstellen besitzen daher zwei wichtige Abgrenzungsmerkmale gegenüber anderen Wasserstoff-Tankstellen: Sie sind (halb-) öffentlich zugänglich und verfügen über die Möglichkeit der 700-bar-Schnellbetankung nach SAE J2601 (siehe Kapitel 3.1.1). Abgesehen davon sind in Deutschland weitere Tankstellen vorhanden – diese sind jedoch entweder nicht öffentlich (bspw. firmeninterne Tankstelle auf dem Werksgelände von Daimler) oder sie verfügen nicht über die Möglichkeit einer 700-bar-Schnellbetankung (bspw. die Tankstelle in Hürth verfügt nur über eine 350-bar-Busbetankung).

ALTER/REIFEGRAD

Nachdem die Technologie der Schnellbetankung und der Betankungsstandard selbst erst zum Ende des letzten Jahrzehnts entstanden sind, sind die in dieser Studie betrachteten Tankstellen mit 700-bar-Schnellbetankung im Jahre 2009 und später entstanden oder noch nach einer Entwurfsversion des Betankungsprotokolls errichtet worden. Bedingt dadurch sind Teile dieser Tankstellen noch eine vergleichsweise neue Technologie und haben in den letzten Jahren eine deutliche Lernkurve durchlaufen.

Auch komponentenseitig ist diese Lernkurve sichtbar. Für einige der Elemente existieren aus anderen Branchen Erfahrungen, die dafür sorgen, dass diese auch in der neuen Anwendung bereits zuverlässig, mit großer Produktreife und/oder zu günstigen Preisen verfügbar sind. Bedingt durch die Neuheit der 700-bar-Technik im Tankstellenbereich existiert vor allem für Komponenten der Hochdrucktechnik von 700–1000 bar noch ein deutliches Optimierungspotenzial. Davon betroffen sind namentlich der Hochdruckspeicher, die Vorkühlung und die 700-bar-Füllgarnitur.

BETREIBERFIRMEN

Betreiber der öffentlichen Tankstellen sind derzeit hauptsächlich Mineralölkonzerne wie TOTAL, Shell und OMV und im geringeren Umfang große Energieversorger wie die EnBW oder Vattenfall. Für Einzeltankstellen sind auch andere Betreiber aus der Forschung,



Abbildung 26: Wasserstoff-Tankstelle von Vattenfall in der Hamburger Speicherstadt (Quelle: Vattenfall Europe)

wie bspw. das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE und das Karlsruher Institut für Technologie KIT verantwortlich.

Zum jetzigen Zeitpunkt zeigt sich hier eine Sondersituation, da neben den klassischen Anlagenbetreibern (Mineralölkonzerne) sowohl Anlagenbauer als auch Anlagennutzer (bspw. Daimler) mithelfen, die Infrastruktur aufzubauen, um das Henne-Ei-Problem zu lösen. Dies zeigt sich in den Aufbauplänen, siehe Kapitel 2.4, bei denen auch Tankstellen von Linde/Daimler/Air Liquide errichtet werden. Vor allem während des Aufbaus einer Grundinfrastruktur bis 2015 (vgl. Phase 1 in Kapitel 5.3) werden wahrscheinlich ähnliche oder weitere Sonderkonstruktionen entstehen (Koppelung der Tankstellen an Forschungszentren, Testzentren, Automobilhersteller), um diesen ersten strategisch wichtigen Strukturaufbau zu stemmen. Nach 2015 (vgl. Phase 2 in Kapitel 5.3) werden klassische Tankstellenbetreiber zunehmend stärker benötigt, um ein flächendeckendes Netz aufzubauen. Durch die Möglichkeit der Koppelung mit erneuerbaren Energien über den Power-to-Gas-Ansatz sollten auch neue Betreiber und passende Betreibermodelle eruiert werden. Denkbare Akteure dafür sind Stadtwerke, Bürgerkraftwerke, die Koppelung mit dem ÖPNV und Betreiber von EE-Anlagen, die Auflagen (Speicherbarkeit) erfüllen müssen.

TECHNOLOGIELIEFERANT

Von den derzeit 15 Tankstellen, die in Betrieb sind, wurden zwei Tankstellen von Air Products, zwei Tankstellen von Air Liquide und eine Tankstelle von Statoil Hydro aufgebaut. Damit enthalten die verbleibenden 10 Tankstellen Technik und Komponenten von Linde, womit das Unternehmen in Deutschland eine führende Position innehat. Aus diesem Grund sind die Betreibererfahrungen der deut-

schen Tankstellen, die im Rahmen dieser Studie erfragt wurden, durch Technologie und Wartungskonzepte von Linde geprägt. Dies verstärkt sich dadurch, dass sämtliche Tankstellen von Air Liquide und Air Products zum Zeitpunkt der Erstellung der Studie nicht älter als ein Jahr waren. Da Linde von den 50 Tankstellen bis 2015 mindestens zehn weitere stellen wird (mindestens die Hälfte der zusammen mit Daimler angekündigten Tankstellen) nimmt Linde auch in den nächsten Jahren eine starke Stellung auf dem Markt ein. Der Aufbau von Wettbewerb kann hier sinnvoll sein, um einen Innovations- und Kostendruck trotz Marktführerschaft für den Markt Deutschland zu erhalten.

GRÜNER WASSERSTOFF

Grüner Wasserstoff ist erklärtes politisches Ziel und eine Voraussetzung für die Akzeptanz der Technologie in der Gesellschaft, siehe Kapitel 2.1. Erste Demonstrationsprojekte sind dafür bereits errichtet worden. Konkrete Beispiele sind u. a. die On-site-Elektrolyse mit Photovoltaik- und Ökostrom (für eventuelle Deckungslücken) in Freiburg und die Versorgung der Berliner TOTAL Tankstellen mit aus Windenergie erzeugtem Wasserstoff vom Hybridkraftwerk Prenzlau. Weitere entsprechende Projekte sind in Vorbereitung. Die CEP als Leuchtturmprojekt gibt in ihren Richtlinien einen Anteil von 50 % grünem Wasserstoff für den CEP-weit erzeugten/genutzten Wasserstoff vor. Dennoch wird zur Steigerung des Anteils von grünem Wasserstoff weiteres Engagement und die Vorgabe von grün erzeugtem Wasserstoff empfohlen, um eine nachhaltige, emissionsfreie und von der Bevölkerung akzeptierte neue Mobilität zu ermöglichen.

FAZIT

Die Technologie der 700-bar-Schnellbetankung ist vergleichsweise jung. Bedingt dadurch werden auch im Bereich der Tankstellen und deren Komponenten noch einzelne „Kinderkrankheiten“ beobachtet. Der Reifegrad der Anlagen muss für eine Kommerzialisierung und zur Markteinführung der PKWs weiter erhöht werden. Bis zum heutigen Zeitpunkt hat Linde durch die frühe strategische Besetzung des Themas eine marktdominierende Stellung erreicht. Die Schaffung von mehr Wettbewerb durch das nachhaltige Engagement weiterer Akteure aus dem Bereich der Anlagenhersteller wäre eine förderliche Entwicklung.

Durch neue Betreiberkonzepte wie dem Power-to-Gas-Ansatz und der Koppelung mit erneuerbaren Energien ist absehbar, dass sich weitere Betreiber auf dem Markt etablieren können. Davon würde der Aufbau einer Grundinfrastruktur profitieren.

Die Verwendung von grünem Wasserstoff ist demonstriert, muss aber weiter ausgebaut werden und stärker in die Standortkonzepte der neuen Tankstellen integriert werden.

4.2 DISKUSSION DER TANKSTELLENKONZEPTE

4.2.1 FLÜSSIG/GASFÖRMIG/PIPELINE

Für die Wasserstoff-Speicherung bei Fahrzeugen ist die gasförmige Speicherung bei 700 bar der aktuelle Standard und durch die gängigen Normen definiert. Tankstellenseitig besteht neben der Versorgung mit gasförmigem Wasserstoff die Möglichkeit, den Wasserstoff flüssig angeliefert zu bekommen, in diesem Zustand zu speichern und dann erst zur Betankung zu verdampfen und gasförmig in das Fahrzeug zu tanken (siehe Konzept LH₂-Anlieferung in Kapitel 3.2.1). Die flüssige Anlieferung und Speicherung von Wasserstoff tankstellenseitig hat mehrere Vorteile: Die Investitionskosten für Speicherung, Druckerzeugung und Temperierung sind kleiner, der Tankstellen-Energiebedarf und damit die Betriebskosten sind niedriger; der Platzbedarf für die stationäre Speicherung ist geringer und die Häufigkeit der Anlieferung reduziert sich. Dementgegen stehen die höhere Wasserstoffkosten und das Problem des Boil-offs.

Bedingt durch einen nie vollständig vermeidbaren Wärmeeintrag aus der Umgebung verdampft stetig eine kleine Menge des Flüssigwasserstoffs von ca. 0,25 % – 0,5 % des Tankinhalts pro Tag. Dies entspricht bei einer Lagerung von 5 t einem Boil-off von ca. 12,5 kg/d. Dieser verdampfte Wasserstoff muss aus dem Flüssigtank abgeleitet werden, um einen Druckanstieg zu vermeiden. Wenn die Auslastung der Tankstelle groß genug ist, dann kann dieser Boil-off-Verlust auch zur Betankung genutzt werden, andernfalls muss der Wasserstoff anderweitig genutzt oder in die Umgebung abgelassen werden. Ein Nachteil des LH₂-Transports liegt im hohen Energieaufwand für die Verflüssigung (ca. 20–30 % des Wasserstoff-Energieinhalts [30]) und den hohen Kosten der dafür benötigten Verflüssigungsanlage, wodurch sich ein im Vergleich zum gasförmigen Wasserstoff höherer Preis für den angelieferten Wasserstoff ergibt. Bei ausreichender Auslastung macht eine flüssige Speicherung jedoch wirtschaftlich und technisch Sinn. Die Menge an Wasserstoff, welche in einem LH₂-Trailer transportiert werden kann, liegt etwa bei 3500 kg im Gegensatz zu ca. 800 kg bei gasförmiger Anlieferung, was deutlich niedrigere Anlieferzyklen bzw. einen größeren Wasserstoffabsatz erlaubt.

Eine weitere Option ist die Versorgung der Tankstellen mit Wasserstoff-Pipelines. Vorteilhaft sind die sehr kompakten und günstigen

Tabelle 5: Gegenüberstellung CGH₂-Anlieferung, LH₂-Anlieferung und Pipeline

CGH ₂ -Anlieferung	LH ₂ -Anlieferung	Pipeline
Hohe Investitionskosten	Mittlere Investitionskosten	Sehr hohe Investitionskosten für gemeinsame Pipeline
Geringe Abgabemengen pro Tag möglich	Hohe Abgabemengen pro Tag und viele Betankungen möglich	Sehr hohe Abgabemenge pro Tag möglich
Mittlerer Platzbedarf	Geringer Platzbedarf	Sehr geringer Platzbedarf
Geringe Wasserstoffkosten	Höhere Wasserstoffkosten	Geringe Wasserstoffkosten
Max. 800 kg pro Anlieferung	Max. 3,5 t pro Anlieferung	Kein Limit für Tankstellendurchsatz
Versorgungssicherheit abhängig von Trailern	Versorgungssicherheit abhängig von Trailern	Da meist Speicherung auf Pipelineebene sehr große Versorgungssicherheit
	Abdampfverluste (Boil-off) müssen genutzt werden	Kein Logistikaufwand (vgl. On-site-Erzeugung)
	Energiebilanz in Gesamtsumme schlechter als CGH ₂ oder Pipeline	

Tankstellen, die quasi unbegrenzt mögliche Abgabemenge von Wasserstoff und die Unabhängigkeit von Trailern. Bedingt durch die gasförmige Lieferung ohne Trailer sind niedrige Wasserstoffkosten möglich. Schwierigkeiten innerhalb des Aufbaus einer Pipeline-Infrastruktur sind in den hohen Investitionskosten sowie im Genehmigungsaufwand zu sehen. Weiterhin steigen die Betriebskosten mit der Länge des Transportweges, da der Druckabfall über die Leitung durch Kompressoren entlang der Pipeline kompensiert werden muss. Besonders in Anbetracht der momentan sehr niedrigen Nachfrage nach Wasserstoff stellen die hohen Investitionskosten das Haupthindernis für den Ausbau einer Pipeline-Infrastruktur dar. Diese Option ist daher erst ab einer hohen Tankstellendichte und -nutzung oder in Gegenden mit einem existierenden Wasserstoff-Pipelinenetz (bspw. im Ruhrgebiet und im Industriegebiet Leuna-Bitterfeld-Wolfen) wirtschaftlich sinnvoll.

4.2.2 ON-SITE/OFF-SITE

Die überwiegende Anzahl der Tankstellen ist Off-site versorgt. Von den 15 Tankstellen verfügen aktuell fünf Tankstellen über eine On-site-Erzeugung: Hamburg Speicherstadt, Berlin Flughafen, Freiburg Fraunhofer ISE, EnBW Talstraße und Berlin Holzmarktstraße. Eine dieser Tankstellen wird mit PEM-Elektrolyse und die

restlichen Anlagen mit alkalischen Elektrolyseuren betrieben. Eine weitere Tankstelle wird über eine Pipeline versorgt (Frankfurt Höchst). In der Vergangenheit gab es weitere On-site versorgte Anlagen, wobei am Standort Heerstraße (Berlin) auch Erdgasreformierung eine Rolle gespielt hat.

Die Wahl zwischen On-site- und Off-site-Erzeugung ist eine sehr komplexe Entscheidung, die in den meisten Fällen nicht pauschal beantwortet werden kann. Im Folgenden sollen relevante Entscheidungskriterien für den Fall einer On-site-Elektrolyse näher erläutert werden. Tabelle 6 stellt Vor- und Nachteile zusammenfassend gegenüber. Zu berücksichtigen ist dabei der erhöhte Genehmigungsaufwand, da eine On-site-Wasserstoff-Erzeugung ein aufwändigeres Genehmigungsverfahren bedeuten kann, siehe Kapitel 4.4.1.

PLATZBEDARF

Eine On-site-Erzeugung bedeutet immer einen zusätzlichen Platzbedarf und einen wesentlich stärkeren Stromanschluss, da die Elektrolyseeinheit einen großen Energiebedarf hat. Eine Elektrolyseeinheit mit 130 kg/d benötigt bspw. eine elektrische Anschlussleistung von ca. 400–500 kW und einen Wasseranschluss. Eine Reformereinheit benötigt im Vergleich lediglich einen leistungs-

fähigen Erdgasanschluss. Damit ist eine On-site-Erzeugung für mobile Tankstellen nach den H2-Mobility-Größen XS und S nicht sinnvoll, da die kompakte Ausführung und damit die Mobilität der Anlagen sowie die Standortwahl bei Versetzung eingeschränkt werden.

KOPPELUNG MIT GASFÖRMIGER ANLIEFERUNG

Eine On-site-Erzeugung kann eine bestehende Tankstelle, deren Speicherkapazität mit steigender Auslastung zu klein geworden ist, erweitern. Hierfür muss der Kompressor jedoch bereits entsprechend groß ausgelegt sein oder nachgerüstet werden. Dies ist ein deutlicher Investitionsaufwand unter Berücksichtigung von Zusatzanforderungen für die Strom-, Gas- und Wasserversorgung und ist nicht mit jedem Tankstellenkonzept oder Standort vereinbar. Je nach Gegebenheiten kann dies hingegen eine passende Lösung für eine stationäre Tankstelle mit einer steigenden Auslastung > 100 % sein, die dadurch bspw. eine größere Kapazität sowie Redundanz (durch zweiten Kompressor) erhält und damit auch für eine Nutzung durch Busse interessant werden kann.

Die On-site-Erzeugung kann auch bei neu geplanten Anlagen in Kombination mit gasförmiger Anlieferung eingesetzt werden, um den Logistikaufwand der Anlieferung durch Eigenerzeugung deutlich zu reduzieren und damit die maximale, sinnvolle Größe der Tankstellen mit gasförmiger Speicherung (vgl. Tabelle 5, Seite 42) zu erhöhen. Zusätzlich kann vor allem in Anfangszeiten mit geringer Auslastung durch eine Kombination von On-site-Erzeugung und gasförmiger Anlieferung eine teure Überkapazität der Elektrolyse vermieden werden. Eine Koppelung der On-site-Erzeugung mit Flüssiganlieferung verursacht im Gegensatz zur gasförmigen Anlieferung eine zweite unabhängige Speicher- und Füllanlage ohne Synergien und ist damit i. d. R. nicht sinnvoll.

KOSTEN

Wasserstoff durch elektrolytische On-site-Erzeugung wird im Allgemeinen als teuer im Vergleich zu Wasserstoff aus der Erdgasreformierung angesehen. Der Grund dafür ist der meist höhere Umwandlungsaufwand der entsteht, wenn die benötigte elektrische Energie aus fossilen Energiequellen stammt. Ein Kostenvergleich zwischen direkt aus Erdgas hergestelltem Wasserstoff und Elektrolyse-Wasserstoff, erzeugt durch Strom aus Gaskraftwerken, wird immer zugunsten der direkten Umwandlung durch Reformierung sprechen. Wenn der für die Elektrolyse benötigte Strom jedoch an der Börse eingekauft wird, kann die Elektrolyse von den Einkaufs-

preisen und Preisschwankungen an der Börse profitieren und in Zeiten des Stromüberschusses sehr günstigen Wind- oder Solarwasserstoff produzieren (eine gewisse Mindestauslastung der Elektrolyseanlage muss vorausgesetzt werden, da sonst die Investitionskosten dominieren). Der Aufwand des Stromhandels an der Börse rentiert sich aber nicht für einzelne wenige Tankstellen mit ihrem vergleichsweise geringen Energiebedarf. Damit wäre eine On-site-Elektrolyse eher für größere Betreiber von mehreren Wasserstoff-Tankstellen interessant. Energieversorger, die bereits einen Handel an der Strombörse betreiben, werden hier vermutlich Synergien nutzen können und so auch zur On-site-Erzeugung tendieren.

ERNEUERBARE ENERGIEN

Die Bedeutung von grünem Wasserstoff aus erneuerbaren Energien wird bereits in Kapitel 2.1 näher erläutert. On-site-Erzeugung hat zudem einen Mehrwert für Stromerzeuger und Stromnetzbetreiber. Bei der energetischen Koppelung mit erneuerbaren Energien können On-site-Elektrolyseanlagen grünen Wasserstoff erzeugen und dabei gleichzeitig zur Stabilisierung von Stromnetzen als regelbare Last dienen. Vor allem die Erzeugung von grünem Wasserstoff aus erneuerbaren Energien ist momentan im Bereich der Wasserstoff-Mobilität einer der Treiber für Elektrolyse an sich und – aufgrund derzeit noch fehlender zentraler Elektrolyseanlagen – für die On-site-Elektrolyse. On-site-Elektrolyse mit Strom aus erneuerbaren Energien bietet damit derzeit den bevorzugten, kommerziell verfügbaren Weg, um grünen Wasserstoff herzustellen.

Um unabhängig von der Auslastung der Tankstelle eine möglichst gute Auslastung der Elektrolyse-Anlage zu erzielen, macht eine zusätzliche Koppelung mit einer Wasserstoff-Einspeisung in das Erdgasnetz Sinn, um so vor allem bei anfänglich geringen Fahrzeugzahlen eine gute Anlagenauslastung und damit einen frühen finanziellen Rückfluss zu erzielen. Hierfür fehlen derzeit noch verlässliche und praktische Erfahrungen, sodass die Durchführung entsprechender industrienaher Demonstrationsprojekte für die Koppelung von Wasserstoff-Tankstellen mit On-site-Erzeugung und Einspeisung empfohlen wird.

BETREIBER/MEHRGEWINN

Je nach Betreiber kann die Entscheidung auch firmenpolitisch getrieben sein. Gasversorger als Errichter und Betreiber der Tankstellen haben ein großes Interesse daran, die bereits firmenintern existierende Wasserstoff-Verteil- und Erzeugungsstruktur zu nutzen, und werden daher tendenziell eher zentrale Erzeugungsanlagen

Tabelle 6: Vor- und Nachteile der On-site-Erzeugung

Vorteile	Nachteile
Versorgungssicherheit bzw. Unabhängigkeit von Anlieferung durch Gaslieferant Sinnvolle Ergänzung der gasförmigen Lagerung existierender Tankstellen Grüner Wasserstoff bei Verwendung von Ökostrom/Biogas/Biomasse Ggf. Mehrgewinn jenseits der Wasserstoff-Erzeugung (Netzdienstleistungen)	Größerer Platzbedarf Höhere Anschaffungskosten Zusätzliche Infrastruktur notwendig (Gas-/Strom-/Wasseranschluss) u. U. Höherer Genehmigungsaufwand

mit Gas- oder Flüssiganlieferung bevorzugen. Energieversorger verfolgen das Thema Wasserstoff u. a. mit der Motivation, zusätzliche Netzdienstleistungen (bspw. Leitungsentlastung oder Power-to-Gas-Koppelung) zu bieten.

VERSORGUNGSSICHERHEIT

Die Wahl der On-site-Erzeugung bietet auch eine zusätzliche Versorgungssicherheit durch eine Unabhängigkeit von Gaslieferanten und aktueller Verkehrswegesituationen.

4.2.3 TECHNISCHE ENTWICKLUNG DES TANKSTELLENNETZAUSBAUS

Als einfach zu regelnde Energieverbraucher müssen sich Wasserstoff-Erzeugungs- und Tankstellenkonzepte mittelfristig in lokale und regionale Energiekonzepte integrieren. Dies muss nicht zwangsläufig einer Standardisierung widersprechen. Die Einbindung des Themas nachhaltige Wasserstoff-Erzeugung in regionale Konzepte eröffnet neue Möglichkeiten in der politisch und gesellschaftlich gewollten Energiewende und bietet Synergien mit einer nachhaltigen Mobilität.

Zum aktuellen Zeitpunkt mit überwiegend geringer Auslastung sind vor allem Tankstellen mit gasförmiger Anlieferung und Speicherung sinnvoll. Dies gilt auch weiterhin für kleine Tankstellen mit geringer Auslastung und bestätigt sich auch darin, dass Tankstellen mit Flüssigwasserstoff-Speicherung in letzter Zeit eher rückgebaut wurden.

Im Zuge der zunehmenden Auslastung der Anlagen können kleine Tankstellen graduell durch größere ersetzt werden. Das H2-Mobility-Lastenheft (siehe Kapitel 4.4.1), adressiert diesen Punkt und fordert für Tankstellen der Größen XS und S mobile Containerlösungen, die dann im Erweiterungsfalle an einen anderen Standort versetzt werden können. Am bisherigen Standort kann dann bedarfsgerecht eine größere stationäre Anlage installiert werden. Dieses Konzept wird in der Roadmap für Baden-Württemberg in Kapitel 5.3 aufgegriffen.

Mit steigender Größe werden andere Konzepte sinnvoller. Für kleine Tankstellen ist eine gasförmige Anlieferung (max. 800 kg pro Trailer) angebracht. Mit steigender Anlagengröße und Pro-Tag-Umsatz wird aus logistischen Gründen eine Flüssiganlieferung (bis ca. 3500 kg pro Trailer) empfehlenswert bzw. auch notwendig. Als untere Akzeptanzgrenze wird allgemein eine Anlieferfrequenz von einem Trailer pro Tag und Tankstelle angesehen. Die optimale Losgröße wäre eine Trailieranlieferung alle zwei Tage pro Tankstelle.

Die On-site-Erzeugung (siehe Kapitel 3.2.1) stellt eine Alternative zur gasförmigen oder flüssigen Anlieferung dar und eröffnet bei Verwendung von regenerativ erzeugtem Strom die Möglichkeit, CO₂-neutralen, grünen Wasserstoff zu verkaufen. Damit ist die On-site-Erzeugung über Elektrolyse dort, wo es die Rahmenbedingungen erlauben, eine wichtige Möglichkeit, grünen Wasserstoff – die Basis für den Ausbau der Wasserstoff-Mobilität – zu erzeugen. Bei alkalischen Elektrolyseanlagen im großindustriellen Maßstab können derzeit Module bis zu 1.600 kg/d (entspricht 760 Nm³/h, siehe [22]) realisiert werden. In diesem Kontext benötigten Tankstellen mit On-site-Erzeugung jedoch einen deutlich größeren Platzbedarf und stoßen damit in innerstädtischen Standorten an ihre Grenzen.

Tabelle 7: Prognose der zukünftigen Versorgung von Wasserstoff-Tankstellen²

H2-Mobility-Größen XS + S		H2-Mobility-Größen M + L		Coalition Study Größe L (nach 2030)
Maximaler Verbrauch	< 212 kg/d	< 1.000 kg/d		< 2.500 kg/d
Innerstädtisch (begrenztes Platzangebot)	CGH ₂ -Anlieferung von grünem Wasserstoff	LH ₂ -Anlieferung von grünem Wasserstoff		LH ₂ -Anlieferung von grünem Wasserstoff oder Pipeline
Tankhof / Stadtrand (ausreichendes Platzangebot)	CGH ₂ -Anlieferung von grünem Wasserstoff	Elektrolyse On-site und CGH ₂ -Anlieferung kombiniert	LH ₂ -Anlieferung von grünem Wasserstoff	Großmaßstäbliche On-site-Elektrolyse an Tankstelle

² Eine Erläuterung der H2-Mobility-Größen befindet sich in Kapitel 4.4.1

Daher ist bei großen Tankstellen im innerstädtischen Raum bzw. bei beengten Verhältnissen eher eine flüssige Anlieferung sinnvoll. Stadtkernferne Standorte wie Tankhöfe scheinen für On-site-Erzeugung eher geeignet – vor allem auch aufgrund der räumlichen Möglichkeiten, die Erzeugungskapazität modular zu erweitern.

Langfristig (nach 2030) werden Pipeline-Konzepte interessant, da dann in Ballungszentren von einer großen Auslastung und Tankstellendichte ausgegangen werden kann. Vor allem in Ballungszentren, in denen ein geringes Platzangebot zur Verfügung steht und eine Anlieferung mit Trailern eine logistische Herausforderung darstellt, werden Tankstellen mit Pipelineversorgung wirtschaftlich und bezüglich des Platzbedarfes interessant. In diesem Kontext könnte man sich im Umfeld von Städten größere Wasserstoff-Erzeugungsanlagen in der Nähe von regenerativen Strom- oder Gaserzeugungsanlagen vorstellen, die Wasserstoff großmaßstäblich erzeugen und dann über ein Pipeline-Netzwerk innerstädtische Tankstellen versorgen. In diesem Pipeline-Netzwerk können dann auch größere, zentrale Wasserstoffspeicher (Gaskugeln, Kavernen, usw.) integriert werden, die eine krisensichere Versorgung und eine stromangebotsorientierte Erzeugung ermöglichen.

Je nach betrachtetem Stromerzeugungs- und Stromnutzungsszenario (typische Situation: große Windparkkapazitäten im Norden und großer verbraucherseitiger Bedarf im Süden) kann auch eine Flüssiganlieferung von Wasserstoff aus dem Norden Deutschlands oder ggf. sogar eine überregionale Wasserstoff-Transportleitung sinnvoll sein [31]. Eine Betrachtung in diesem Maßstab soll aber nicht Teil dieser Studie sein. Tabelle 7 fasst die Ausführungen des Kapitels noch einmal zusammen.

4.3 BETRIEBSVERHALTEN UND ZUVERLÄSSIGKEIT EXISTIERENDER WASSERSTOFF-TANKSTELLEN UND DEREN KOMPONENTEN

BETRIEBSVERHALTEN

Die Wasserstoff-Tankstellen werden analog zu den Benzintankstellen auf einen automatisierten Betrieb ausgelegt und dementsprechend betrieben. Eine Ausnahme sind Stand-alone-Tankstellen (nicht angegliedert an eine konventionelle Tankstelle) – hier übernimmt das Tankstellenpersonal oder der Pächter die Aufsichtsfunktion. Die Tankstellen sind durchgehend in Betrieb und werden nur für geplante Wartungen oder automatisch bei der Erkennung von Defekten oder sicherheitskritischen Ereignissen abgeschaltet.

ZUVERLÄSSIGKEIT

Der automatisierte Betrieb ist an sich funktionsfähig. Die Tankstellen leiden jedoch immer wieder unter Ausfällen und zeigen eine Zuverlässigkeit von, je nach Tankstelle 90–95 %. Im Gegensatz zu Ausfällen von Fahrzeugen betrifft der Ausfall einer Tankstelle gleich mehrere Fahrzeuge, ein Effekt der bei der momentan geringen Tankstellendichte sogar verstärkt wirkt. Aus diesem Grund wird dem Thema Zuverlässigkeit in der Einführungsphase eine besondere Aufmerksamkeit gewidmet.

URSACHEN

Die Ursachen der Ausfälle sind vielfältig. Genannt werden von den Anlagenbetreibern als Ausfallursachen die Kompressoren (bei neueren Anlagen mit sinkender Tendenz), die Vorkühlung, geplante Wartungen und vielfältige „Kinderkrankheiten“.

Die Kompressoren stellen eine kritische Komponente innerhalb der Anlagen dar. Ohne Redundanz führt der Ausfall eines Kompressors zwangsläufig zum Verlust der Betriebsfähigkeit der Tankstelle. Eine Reparatur oder Ersatz des Kompressors kann zu Ausfallzeiten führen, da es sich um komplexe Spezialmaschinen handelt. Die Mehrzahl der Tankstellen in Deutschland ist z.Zt. mit den ionischen Kompressoren der Firma Linde ausgerüstet (siehe Kapitel 3.3.2), die aufgrund des im Vergleich zu anderen Kompressoren neuen Technologieprinzips mit typischen Anfangsschwierigkeiten zu kämpfen hatten und teilweise noch haben. Zur Erhöhung der Zuverlässigkeit von ionischen Kompressoren wird durch die NOW derzeit ein Projekt gefördert [28], in dessen Rahmen die ionischen Kompressoren im Dauertest laufen. Ziel ist es, die Technik zu optimieren und die Zuverlässigkeit zu erhöhen. Für Kompressoren jenseits der Linde-Modelle gibt es mehrere Hersteller. Über Erfahrungen mit großen Projekten wie CUTE und HyFLEET:CUTE ergibt sich aus Expertengesprächen ein heterogenes Bild hinsichtlich der Zuverlässigkeit mechanischer Kompressoren. Offensichtlich wurden in manchen Fällen Kompromisse in den Punkten Wartungszyklen und Zuverlässigkeit zugunsten des Anschaffungspreises oder der Lieferzeit eingegangen.

Die Probleme mit der Wasserstoff-Vorkühlung sind vermutlich u. a. durch die allgemein strengen Anforderungen an die Vorkühlung begründet (siehe Kapitel 3.3.4), die zum Zeitpunkt der Erstellung der Studie noch nicht von allen Anlagen ausreichend erfüllt wurden. Zudem sind auch hier die Kälteanlagen Einzelstücke, sodass sowohl komponenten- als auch anlagenseitig noch einzelne Anfangsprobleme beseitigt werden müssen.

Geplante Wartungen haben den Vorteil, dass die Ausfallzeit planbar ist, verursachen aber dennoch mehrere Tage Stillstand ohne Betankungsmöglichkeit. In der aktuellen Anfangsphase der Technologie sind die Wartungszyklen – vor allem von neuartigen Komponenten wie den Kompressoren oder den Füllgarnituren – i. d. R. noch sehr kurz gesetzt. Mit steigender Erfahrung können diese Zyklen verlängert werden und Wartungsschritte optimiert werden.

Als häufige Ausfallursache werden auch „Kinderkrankheiten“ der Anlage oder „alles“ genannt. Mit dieser Bezeichnung sind sehr viele unterschiedliche und vielfältige Fehler mit meist unkritischer Ursache gemeint, die nur unter bestimmten Voraussetzungen auftreten. Beispiele dafür sind ausgefallene Sensoren, falsch konfigurierte Liefertelemetrie, zu sensible Sicherheitsabschaltungen und Ähnliches. Vor allem die Betriebsführung und Steuerung hat noch

sehr viele kleine Probleme, die mit zunehmender Erfahrung erkannt und beseitigt werden.

AUSFALLDAUER

Neben der Häufigkeit der Ausfälle ist vor allem auch die Dauer der jeweiligen Ausfälle ein großes Problem. Dies liegt in mehreren Punkten begründet, von denen die Hauptzahl organisatorischen Ursprungs ist:

Die Servicestruktur der Tankstellenhersteller befindet sich derzeit erst im Aufbau. Dies äußert sich darin, dass bspw. bei einigen Tankstellen-Herstellern keine durchgängige Störungsbereitschaft existiert. Die Tankstellen melden Fehler zwar automatisiert an Hersteller und Betreiber, die Behebung/Quittierung der Fehler – auch wenn ein Knopfdruck genügen würde–kann mehrere Tage dauern.

Durch die noch „dünne“ Servicestruktur und die resultierende geringe Anzahl an Mitarbeitern im Service sind Anfahrtswege lang und Reaktionszeiten im Reparaturfall betragen zum Teil mehrere Wochen. Bedingt durch starke Schutzrechte (Patente) können Wartungsverträge und Reparaturen teilweise nicht frei vergeben werden, wodurch eine Abhängigkeit von den Anlagenherstellern entsteht. In einzelnen Gesprächen wurde die Meinung vertreten, dass nach einer gewissen Startphase (Gewährleistungs- bzw. Garantiefrist), die Wartung unkritischer Komponenten ausgeschrieben werden sollte. Durch die Nutzung teilweise lokaler Dienstleister (für bspw. Gassensorkalibrierung/-wartung) könnten Reaktionszeiten erhöht, sowie Ausfallzeiten und Kosten minimiert werden. Einzelne Spezialkomponenten, wie bspw. LH₂-Pumpen oder Wasserstoffkompressoren können dagegen nur vom Hersteller oder dessen Vertrieb gewartet werden.

Derzeit existiert keine Lagerhaltung von wichtigen Ersatzteilen – weder beim Komponenten- noch beim Anlagenhersteller. Dies führt dazu, dass bei Ausfall oder Defekt von einzelnen kritischen Komponenten der Tankstelle die Herstellung der Ersatzkomponenten frühestens mit Bestelleingang und je nach Auftragslage des Komponentenherstellers deutlich später beginnt. Das führt in so einem Fall zu langen Ausfallzeiten. Betroffen davon sind primär Komponenten, die nur für den Wasserstoff-Tankstellenbereich gefertigt/entwickelt werden – also bspw. die Füllgarnituren. Standard- und Massenkomponten wie Ventile, Sensoren oder elektrische Bauteile sind davon meistens nicht betroffen.

Diese Effekte sorgen dafür, dass bei Defekt eine Reparatur i. d. R. mehrere Tage bis Wochen dauert im Vergleich zu einer konventinellen Tankstelle, die innerhalb eines Tages wieder betriebsbereit ist.

VERBESSERUNG DER SITUATION/HANDLUNGSBEDARF

Eine Verbesserung der Situation kann durch entsprechende Lastenhefte, Vertragsvereinbarungen oder Wartungsverträge erreicht werden, die dem Anlagenhersteller Zuverlässigkeitsraten und Reaktionszeiten vorschreiben und mit Vertragsstrafen untermauern. Durch die Forderung von Zuverlässigkeitsraten anstelle von konkreten Maßnahmen wie bspw. Redundanz ist die technische/organisatorische Umsetzung dem Anlagenhersteller überlassen und er kann die für seine Firmenstruktur passende Methode zum Erhalt der Zuverlässigkeit wählen – sei es ein besseres Servicenetz mit Unterauftragnehmern, die Verwendung hochwertigerer bzw. zuverlässigerer (und damit teurerer) Komponenten oder mobile Reserve-Tankstellen (siehe Kapitel 3.2.2). Dieser Ansatz wird in dem H2-Mobility-Lastenheft bereits angesetzt, indem dort die Definition und die Ziele für die Tankstellenverfügbarkeit (> 95 %) definiert werden. Dies muss im Vertragswerk zwischen Betreiber und Hersteller aufgegriffen und verankert werden. Eine Verfügbarkeit von 95 % ist in der Einführungsphase aus ökonomischen Gründen akzeptabel, sollte aber nicht zulasten der Akzeptanz gehen. Je nach Anwendungsfall kann auch eine höhere Zuverlässigkeit gefordert werden, die jedoch dann u. U. vergleichsweise hohe Investitionskosten verursacht. Eine individuelle Prüfung ist empfehlenswert.

Bei einigen Komponenten herrscht eine ungünstige Zuliefersituation, in der ein Komponentenhersteller aufgrund des noch kleinen Marktes ohne Wettbewerb agiert und daher nur einen sehr geringen Service- und Innovationsdruck spürt. Mit steigender Tankstellenzahl und ggf. durch Förderungen wird der Markt auch für Konkurrenten zunehmend interessant, wodurch die Leistungsbereitschaft der Zulieferer oder neuer Konkurrenten vermutlich steigen wird.

Insgesamt wird mit steigender Tankstellendichte in den entsprechenden Zielstädten durch die Vielzahl an Tankstellen auch eine Redundanz und damit Erhöhung der gemeinsamen Verfügbarkeit erreicht. Dies ist jetzt in Berlin und auch Hamburg zu beobachten. Speziell empfindlich bezüglich der Zuverlässigkeit sind damit in der Anfangsphase vor allem einzelne Tankstellen entlang von Korridoren, die zum jetzigen Zeitpunkt durch ihren Ausfall eine Lücke im Tankstellennetz hinterlassen.

4.4 HERAUSFORDERUNGEN AUF DEM WEG ZU EINER WASSERSTOFF-TANKSTELLENINFRASTRUKTUR

4.4.1 STANDARDISIERUNG

Standardisierung ist wohl das wichtigste Thema, dass derzeit diskutiert wird. Bedingt durch den Forschungs- und Demonstrationscharakter der bisherigen Projekte sind die bislang errichteten Tankstellen allesamt Einzelanfertigungen. Eine Standardisierung und damit höhere Stückzahlen gleicher oder ähnlicher Tankstellen können zur Lösung einiger Probleme beitragen: Kostensenkung durch Stückzahlen, mehr Wettbewerb und dadurch Innovations- und Kostendruck, eine Verkürzung der Genehmigungsverfahren, Erhöhung der Technologiereife und damit Beseitigung von „Kinderkrankheiten“ sowie erhöhte Zuverlässigkeit und zunehmend reduzierter Wartungsaufwand/-kosten. Daher findet sich die Handlungsempfehlung Standardisierung als einer der Lösungsansätze in vielen der vorgehenden und folgenden Kapitel wieder.

Innerhalb der H2-Mobility-Initiative wird dieses Thema aktuell adressiert, indem die „H2 Mobility functional description“, eine standardisierte funktionelle Beschreibung für 700-bar-Tankstellen – kurz H2-Mobility-Lastenheft genannt – entwickelt wird. Diese Beschreibung regelt bestimmte Mindestanforderungen für die Tankstellen, bspw. nach welchen Standards die Betankung abzulaufen hat, welche Aufstellflächen zur Verfügung stehen, einen Teil der Abnahmetests, sowie Weiteres. Sie lässt immer noch viele Freiheiten für Kundenspezifikationen und verweist in einigen Punkten sogar explizit auf solche, bietet aber für viele wichtige Punkte (Sicherheit, Abnahme, Größe, Gasreinheit, Layout und zu beachtende Standards) eine gemeinsame Anforderungsbasis und nutzt damit viele Erkenntnisse aus den Demonstrations-Projekten der letzten drei bis zehn Jahre. Das H2-Mobility-Lastenheft ist damit zum jetzigen Zeitpunkt kein Lastenheft im klassischen Sinn, sondern eine wichtige Basis für die Erstellung eines Kundenlastenheftes und ist als solches für eine Standardisierung der Tankstellen sehr sinnvoll. Einige der zuletzt gebauten Tankstellen (bspw. TOTAL in Berlin oder Shell in Hamburg) wurden bereits nach frühen Versionen der „H2 Mobility functional description“ – dem H2-Mobility-Lastenheft – beauftragt.

Das Lastenheft definiert u. a. vier standardisierte Größen (vgl. Tabelle 8), die in dieser Studie die Basis für Größenangaben von Tankstellen geben sollen.

Tabelle 8: Größenkategorien (Auszug) nach Definition der H2 Mobility Initiative [33]

Typ XS – Very Small	Typ S – Small	Typ M – Medium	Typ L – Large
1 Zapfpunkt	1 Zapfpunkt	2 Zapfpunkte	4 Zapfpunkte
2,5 Betankungen pro Position und Stunde, keine back-to-back-Betankung ⁴ ; max. 20 min Wartezeit	6 Betankungen pro Position und Stunde, 1 back-to-back-Betankung ⁴ pro Position; max. 5 min Wartezeit	6 Betankungen pro Position und Stunde, 2 back-to-back-Betankung ⁴ pro Position; max. 5 min Wartezeit	10 Betankungen pro Position und Stunde, 10 back-to-back-Betankugen ⁴ pro Position; keine Wartezeit
Mobile Containerlösung	Mobile Containerlösung	Stationäre Lösung	Stationäre Lösung
Option zur modularen Erweiterung	Option zur modularen Erweiterung	Option zur modularen Erweiterung	Option zur modularen Erweiterung
Durchschn. 10 Betankungen pro Tag (56 kg/d)	Durchschn. 30 Betankungen pro Tag (168 kg/d)	Durchschn. 60 Betankungen pro Tag (336 kg/d)	Durchschn. 125 Betankungen pro Tag (700 kg/d)
Maximalumsatz 80 kg H ₂ pro Tag	Maximalumsatz 212 kg H ₂ pro Tag	Maximalumsatz 420 kg H ₂ pro Tag	Maximalumsatz 1.000 kg H ₂ pro Tag

⁴ Mit „back-to-back-Betankung“ sind mehrere Betankungen nacheinander mit nur geringen oder ohne Wartezeiten gemeint

Die Standardisierung ist noch nicht abgeschlossen, da sich die bestehenden Konzepte aufgrund neuer Betreibermodelle, Erfahrungen aus Demonstrationsprojekten und Stückzahlerhöhungen noch weiterentwickeln. In Bezug auf das H2-Mobility-Lastenheft sollte diesem Umstand Rechnung getragen und das Lastenheft als gute Grundlage und lebendes Arbeitsdokument unter Berücksichtigung und Einbindung möglichst vieler Akteure weiterentwickelt werden. Darüber hinaus sollte im Rahmen der Standardisierung eine Validierung der Tankstellen über größere Stückzahlen in Betracht gezogen werden. Über die Validierung können systematische Fehler erkannt und zusätzlich Abnahmeverfahren vereinfacht werden. Die verschiedenen Verfahren der Tankstellenabnahme (vgl. Kapitel 4.4.5 und 4.4.8) sind zeitlich und finanziell aufwändig. Zusätzlich zu diesen Verfahren sind weitere Abnahmen der Betreiber notwendig, um eine vollständige Funktion und eine Erfüllung der Normen zu überprüfen. Mit steigender Stückzahl gleicher Tankstellen könnte eine Validierung der Tankstellen – also eine Gewährleistung der Funktionalität und Normkonformität baugleicher Tankstellen durch Prüfung an einer Mustertankstelle – erreicht werden. Hierdurch könnte der Abnahmeaufwand für neue Tankstellen deutlich reduziert werden. Diese Vorgehensweise sollte von Betreibern und Anlagenherstellern geprüft werden.

4.4.2 KOSTEN

Ein Punkt, der von Betreibern wiederholt als zentrales Problem genannt wird, ist der hohe finanzielle Aufwand, der sich einerseits aus hohen Anschaffungskosten (ca. 3- bis 4-facher Preis einer Ergastankstelle) und andererseits aus hohen Betriebskosten (ca. 3-facher Preis einer Benzintankstelle) zusammensetzt. Diese hohen Kosten werden als Hemmnis für den Ausbau einer flächendeckenden Infrastruktur gesehen und müssen adressiert werden.

INVESTITIONSKOSTEN

Aktuelle Zahlen bezüglich der Investitionskosten sind für 700-bar-Tankstellen in Deutschland derzeit nicht verfügbar und variieren auch je nach Tankstellenkonzept und den verwendeten Komponenten. Eigene Zahlen sind aufgrund ihres sensiblen und potenziell wettbewerbsschädigenden Charakters nicht verwendbar. Stellvertretend dafür sollen Zahlen aus [33] verwendet werden. Diese Zahlen stellen nach eigener Erfahrung und einzelnen Gesprächen einen guten Anhaltswert für eine Investitionskostenverteilung dar. Die Anteile der einzelnen Komponenten an den Investitionskosten für eine 700-bar-Tankstelle mit Gasspeicherung ist in Abbildung 27 zu sehen.

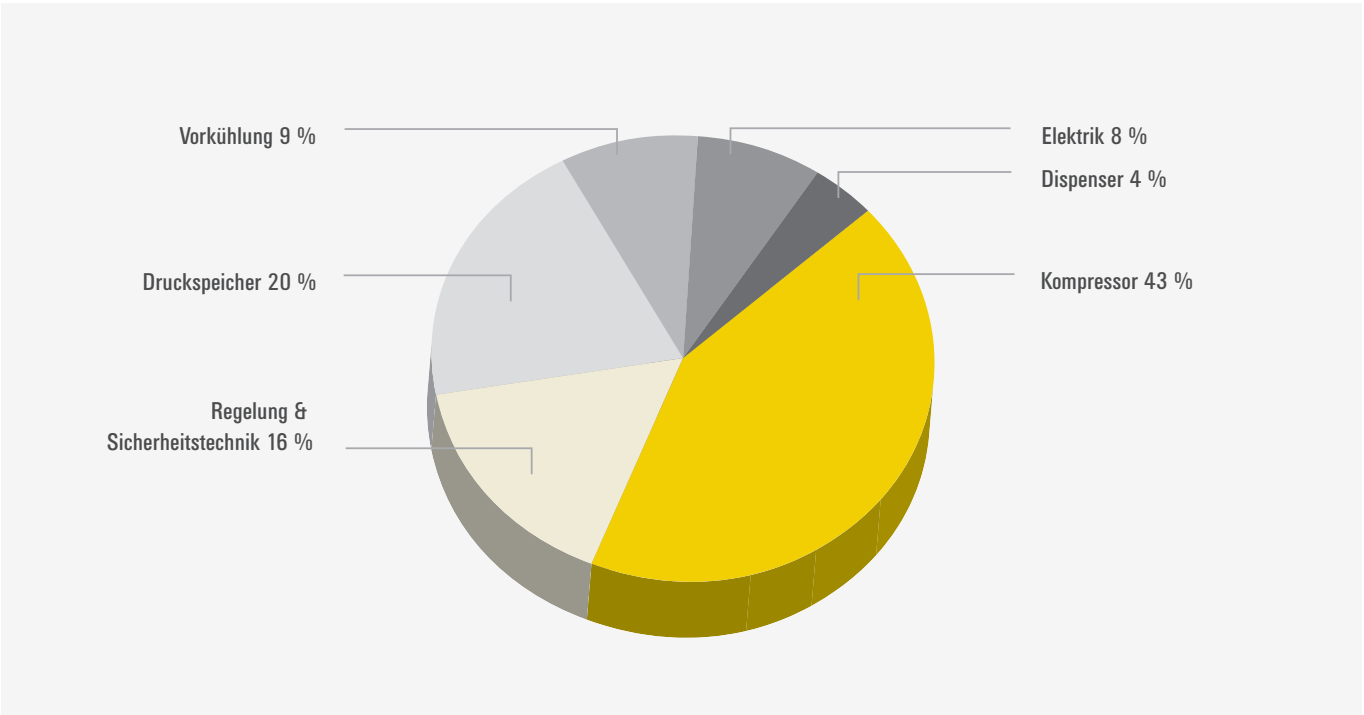
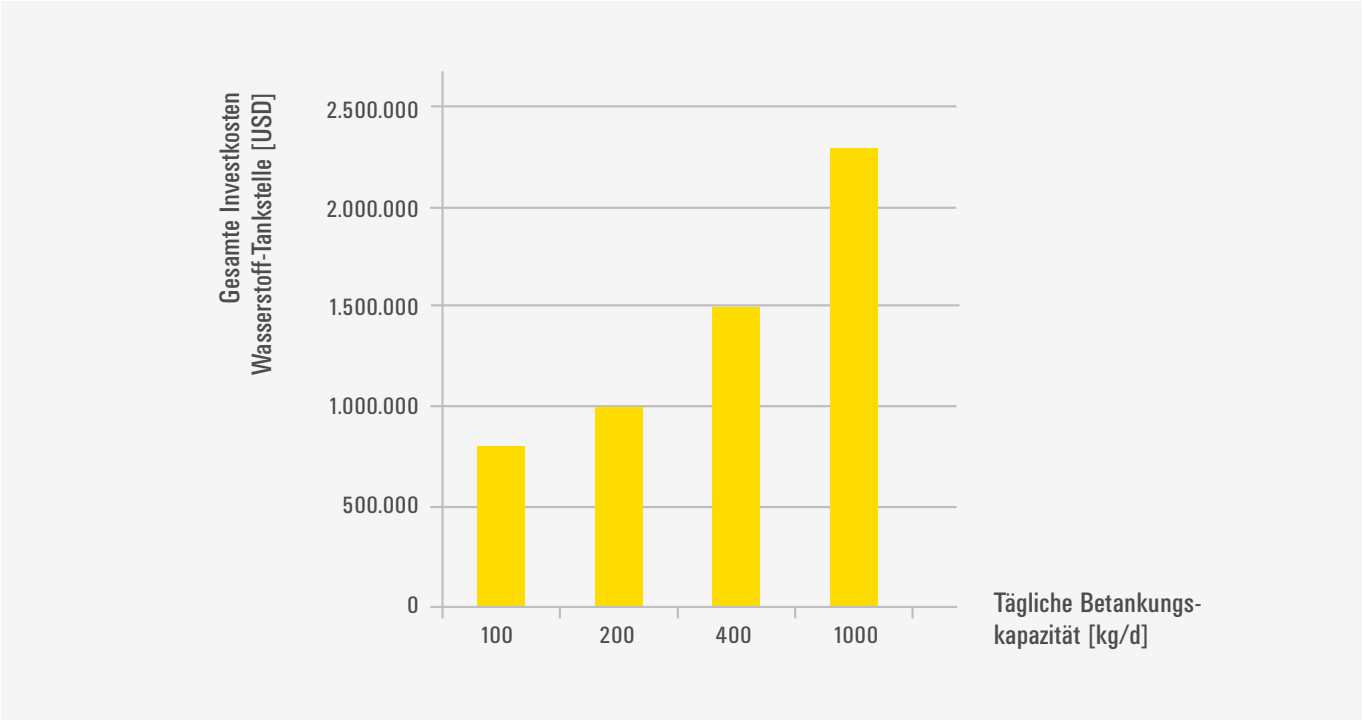


Abbildung 27: Investkostenverteilung einer Wasserstoff-Tankstelle nach [33]

Hier zeigt sich deutlich, dass derzeit die in der Anschaffung teuersten Komponenten der Kompressor und die Druckspeicher sind.

Eine Senkung der Investitionskosten kann durch höhere Stückzahlen der Komponenten, standardisierte Anlagenkonzepte und durch einen größeren Wettbewerb (teilweise auch das Ergebnis von höheren Stückzahlen) erreicht werden. Bisher sind Wasserstoff-Tankstellen und deren Komponenten aufgrund der geringen Stückzahlen ein kleiner Markt. Daher ist die Zahl der Komponenten-Zulieferer (v. a. für Hochdruckkomponenten oberhalb von 500 bar) sehr gering. Eine weitere Möglichkeit, die Kosten von Tankstellen zu reduzieren, können kompressorlose Tankstellenkonzepte sein, bei denen der Kompressor bspw. zugunsten größerer Hochdruckspeicher eingespart wird, welche entweder durch Hochdrucktrailer (in Europa derzeit nicht zugelassen) oder durch einen im Wasserstoff-Trailer integrierten Kompressor (Bsp. Hydra von Air Products) befüllt werden. Dadurch wird an der Tankstelle jedoch eine deutlich größere Zahl an Hochdruckspeichern für größere Lagermengen benötigt, sodass dies vermutlich nur bis zu einer gewissen Größe wirtschaftlich umsetzbar ist.

Für On-site-Erzeugungsanlagen können ebenfalls höhere Betriebsdrücke angestrebt werden. Betriebsdrücke von mehreren hundert bar sind bei Elektrolyseanlagen technisch machbar und teilweise in Entwicklung. Ein höherer Ausgangsdruck der On-site-Erzeugung und damit ein höherer Eingangsdruck des Kompressors reduziert einerseits die Anforderungen an die Kompressoren (und bei Boosterkonzepten evtl. sogar den Vorverdichter) und ist andererseits auch energetisch von Vorteil, wodurch sowohl Investitions- als auch Betriebskosten reduziert werden können. Demgegenüber steht ein größerer technischer und finanzieller Aufwand für die Elektrolyseeinheit.

Mittelfristig kann auch eine Entwicklung von elektrochemischen Kompressoren von Vorteil sein. Diese Kompressoren bieten prinzipiell das Potenzial geringer Betriebs- und Investitionskosten, sind aber noch im Prototypenstadium, vgl. Kapitel 3.3.2.

In Summe wird eine Standardisierung und Erhöhung der Stückzahl von Tankstellen als wichtigste kurzfristige Maßnahme zur Reduzierung der Investitionskosten empfohlen. Darüber hinaus wird mittelfristig die Entwicklung von Hochdruckelektrolyseuren und kompressorlosen Tankstellenkonzepten empfohlen, um die Investitions- und teilweise auch Betriebskosten zu senken.

BETRIEBSKOSTEN

Als Verursacher von hohen Betriebskosten werden von Betreibern die Wartungskosten (Hauptverursacher) und die Energiekosten genannt.

Im Bereich der Wartungskosten liegt dies einerseits an kurzen Wartungsintervallen und häufig anfallenden Entstörungen. Verstärkt wird dies teilweise durch starke technologische Schutzrechte der Hersteller, welche eine freie Vergabe von Wartungsarbeiten verhindern und dafür sorgen, dass der Wartungsumfang fast ausschließlich durch den Hersteller durchgeführt werden muss. Kombiniert mit lückenhaften Servicestrukturen (fehlende regionale Präsenz) sind Wartungen und Entstörungen sehr kostenintensiv. Einige Anlagenhersteller planen laut eigenen Angaben den Ausbau der Servicestrukturen, um diesem Problem zu begegnen. Hauptverursacher für teure Wartungen sind vor allem die Kompressoren, die aufgrund der anspruchsvollen Aufgabe, trockenen Wasserstoff ohne Verschmutzung oder Schmierung mit großen Druckverhältnissen³ und Zieldrücken zu verdichten, einen hohen Verschleiß aufweisen.

Einzelne Betreiber erwarten, dass sich nach einer Startphase die Kosten für Wartungen durch einerseits sich vergrößernde Wartungsintervalle und durch – soweit aufgrund der Schutzrechte möglich – offene Ausschreibung der Wartungsarbeiten und Vergabe der Wartungsverträge unter Wettbewerbsbedingungen verringern. Ob dies im Kontext der deutschen Tankstellen-Infrastruktur so funktioniert, muss sich zeigen. Auch Entstörungsfälle sollten nach der Startphase seltener werden und die dadurch entstehenden Kosten sinken.

Hohe Energiekosten entstehen einerseits durch die benötigte Energie zur Kompression (ca. 10 % des Wasserstoff-Energieinhalts) und durch die Vorkühlung des Wasserstoffs.

Im Bereich der Kompressoren bieten die inzwischen eingesetzten ionischen Verdichter das theoretische Potenzial, durch diverse Eigenschaften (Vermeidung von Totvolumina, annähernd isotherme Verdichtung, etc.) eine vergleichsweise effiziente Verdichtung zu gewährleisten.

Bezüglich der Vorkühlung sind Lerneffekte aus dem Betrieb der Tankstellen beobachtbar, die bei neueren Tankstellen für effizientere Kühlkonzepte sorgen. Beispiele dafür sind kompaktere Wärme-

übertrager, kurze Leitungswege zwischen Wärmeübertrager und Dispenser, sowie eine geschicktere Betriebsführung der Vorkühlung. Dennoch sind die Energieverluste durch Erwärmung der gekühlten Bauteile vor allem auch bei geringer Auslastung der Anlage signifikant und das Verbesserungspotenzial muss weiter ausgeschöpft werden. Der theoretische Energieaufwand für die Vorkühlung des Wasserstoffs beträgt ca. 0,7 % des Energieinhaltes des zu kühlenen Wasserstoffs [34] und damit ca. 0,24 kWh/kg. Praktische Erfahrungen zeigen jedoch, dass der tatsächliche Energiebedarf im Betrieb um den Faktor zwei bis drei höher liegt. Ferner kann der reine Bereitschaftsdienst der Vorkühlung an heißen Sommertagen dem Energieinhalt einer PKW-Tankfüllung entsprechen (abhängig von Anlagengröße und -konzept). Hier herrscht starker Handlungsbedarf durch die Anlagenhersteller und Bedarf an entsprechenden Vorgaben in den Lastenheften durch Anlagenbetreiber zur Entwicklung bzw. Umsetzung energieeffizienterer Tankstellen. Zudem sollten im Rahmen von Monitoringprogrammen aktuelle Neuanlagen mit entsprechender Sensorik ausgestattet werden, um die Hauptenergieverbraucher von Tankstellen zu identifizieren und Optimierungsbedarf und verbesserte Betriebsführungskonzepte aufzuzeigen.

WIRTSCHAFTLICHKEITSUNTERSUCHUNG / -RECHNUNG

Die Investitions- und Betriebskosten sind immer noch ein Haupthindernis für den Ausbau einer flächendeckenden Infrastruktur. Für einen sich selbst tragenden, flächendeckenden Ausbau der Wasserstoff-Infrastruktur muss die Frage beantwortet werden, ab welcher Auslastung Wasserstoff-Tankstellen rentabel sind und Geschäftsmodelle entwickelt werden.

In der Vergangenheit wurden zahlreiche Wirtschaftlichkeitsrechnungen basierend auf theoretischen Hochrechnungen durchgeführt – vielfach mit Fokus auf die Investitionskosten. Nachdem mit Vorhandensein des H2-Mobility-Lastenhefts die Basis für eine Standardisierung vorhanden ist und erste Tankstellen entsprechend gebaut wurden, können nach einigen Jahren Betriebszeit mit innerhalb der CEP entstandenen Daten, die Wirtschaftlichkeitsrechnungen auf Basis von Erfahrungswerten unter Einbeziehung sämtlicher Kosten durchgeführt und starke Kostentreiber analysiert werden.

Dennoch muss an dieser Stelle auch klar dargelegt werden, dass die derzeit laufende Demonstrationsphase noch eine vorwettbewerbliche Phase ist, in der die Technologie praktisch kein gewinnfähiges Geschäft ermöglichen kann. Mit innovativer Zusammen-

arbeit (bspw. Tankstellen mit Wasserstoff-Stadtbussen als Kunden) und Konzepten zur mehrfachen Nutzung (bspw. Netzdienstleistung, Energiespeicherung, Gaseinspeisung) kann ein finanzieller Rücklauf beschleunigt werden. Solche Chancen sollten gesucht und genutzt werden.

Viele Tankstellenbetreiber sehen die 700-bar-Technik anlagenseitig als schwer wirtschaftlich darstellbar an. Komponenten oberhalb von 500 bar sind meistens Spezialanfertigungen in kleiner Stückzahl mit entsprechend hohen Kosten. Auch der apparative Aufwand und die resultierenden Kosten der Vorkühlung und der Hochdruckspeicher werden kritisch betrachtet. Umso wichtiger ist die genaue Betrachtung des Themas Wirtschaftlichkeit anhand aktueller Daten.

DISKUSSION ZUR 700-BAR-TECHNIK UND WASSERSTOFF-VORKÜHLUNG

Befragungen der Betreiber haben ergeben, dass die 700-bar-Technologie mit der notwendigen Vorkühlung auf -40 °C enorme Herausforderungen impliziert. Diese sind deutlich höhere Kosten, eine aufwändige und energieintensive Vorkühlung und der Nachteil, dass die 700-bar-Druckstufe in der Industrie keinen etablierten Industriestandard darstellt. Dementgegen stehen bei Reduzierung des Drucks oder Verzicht auf eine Vorkühlung die Nachteile einer geringeren Reichweite und einer deutlich langsameren Befüllung – zwei wesentliche Argumente für eine hohe Kundenakzeptanz und damit für eine Markteinführung.

Die Meinungen zur zukünftigen Entwicklung der Technologie gehen an diesem Punkt auseinander. Einige Akteure sind davon überzeugt, dass der mittelfristig zu erwartende technologische Fortschritt der Fahrzeug- und Antriebstechnik zu einer Vergrößerung des Komforts und Erhöhung der Reichweite führen wird. Andere Akteure sind überzeugt, dass der technische Fortschritt in den Punkten Effizienz und Speichermaterialien zu niedrigeren Druckstufen und temperaturstabileren Tanks führen wird und damit zu einer Abkehr von der 700-bar-Technologie mit Vorkühlung hin zu einer vorkühlungslosen 500-bar-Technologie, die deutliche Kostenvorteile bringen würde.

Für den Moment ist die 700-bar-Technologie mit Vorkühlung auf -40 °C als etablierter, weltweiter Standard gesetzt. Tankstellen mit 700-bar-Technik sind in jedem Fall zukunftssicher und können auch im Falle einer Druckreduzierung oder Verzicht auf Vorkühlung mit kleinem Aufwand an verringerte Anforderungen angepasst werden.

³ Verhältnis Zieldruck zu Eingangsdruck

Tabelle 9: Vereinfachte Darstellung der typischen Genehmigungsverfahren für Wasserstoff-Tankstellen nach [36] (Stand 2009), [37] (Stand 2012) und eigenen Erhebungen

Verfahren	Rahmenbedingungen	Gesetzliche Fristen ⁶	Bisheriger zeitlicher Aufwand ⁵
Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV)	Weniger als 3 t Gesamtlagerung	3 Monate	3–6 Monate bei gut eingespielten Akteuren
Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG): vereinfachtes Verfahren	Mehr als 3 t und weniger als 30 t Gesamtlagerung	3 Monate	5–9 Monate
Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG): förmliches Verfahren	Mehr als 30 t Gesamtlagerung und / oder On-site-Erzeugung im industriellen Maßstab	7 Monate	5–14 Monate
Zusätzlich: weitere Betreiberpflichten nach Störfallverordnung	Bei Lagerung von mehr als 5 t unter Berücksichtigung weiterer Stoffe mit jeweiligen Gewichtungen		Bisher nur wenige Anlagen

⁵ Inklusive Vorbesprechungen, Unterlagenerstellung (bspw. „Gutachterliche Äußerung im Rahmen des Erlaubnisverfahrens nach §13 BetrSichVO“ – meist erstellt durch eine ZÜS) und Nachforderungen

⁶ Ab Einreichung der vollständigen Unterlagen

4.4.3 GENEHMIGUNGSVERFAHREN

Für Tankstellen gelten derzeit je nach Ausführung der Anlage verschiedene Genehmigungsverfahren, wie sie in Tabelle 9 mit steigendem Aufwand dargestellt sind.

EXKURS ZUM RECHTLICHEN RAHMEN

Für Füllanlagen in der Größenordnung von Wasserstoff-Tankstellen treffen die Bedingungen der Betriebssicherheitsverordnung zu, d. h. ein entsprechendes Verfahren und eine entsprechende Zulassung sind verpflichtend für die Inbetriebnahme. Zusätzlich sind je nach Standort und Vorhaben weitere Genehmigungen wie bspw. eine Baugenehmigung notwendig.

Bei einer Überschreitung einer Grenze des gelagerten Wasserstoffs von 3 t ist ein Verfahren nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz notwendig. Dieses Verfahren schließt alle anderen Genehmigungen (bspw. Baugenehmigung) ein, d.h. statt einzelner Verfahren und Genehmigungen werden alle Verfahren gebündelt und haben amtsseitig einen Ansprechpartner. Im Vergleich zum Verfahren nach Betriebssicherheitsverordnung hat dieses Verfahren aber auch einen erhöhten Umfang (bspw. zusätzliche Berücksichtigung des Lärm- und Gewässerschutzes). Ferner kann die genannte Bündelung bei Fehlen einzelner Unterlagen auch das komplette Verfahren verzögern. Bei einer „Gesamtlagerung“ von weniger als 30 t Wasserstoff, ist das vereinfachte Verfahren möglich. Bei Überschreitung dieser Grenze oder einer On-site-Erzeugung von Wasserstoff „im

industriellen Maßstab“ muss das förmliche Verfahren durchgeführt werden, was zusätzlich eine Öffentlichkeitsbeteiligung bedingt. Auch dadurch kann es zu einer Verlängerung des Verfahrens kommen.

Für die Bestimmung der „Gesamtlagerung“ für die Auswahl des Verfahrens sind hier Gefahrstoffe (meist aber nicht ausschließlich brennbare und brandfördernde Stoffe) in der Anlage (die Abgrenzung der Anlage und damit die für die Ermittlung relevanten Gefahrstoffe ist sehr komplex und muss im Einzelfall nach dem Anlagenbegriff der 4. BImSchV geprüft werden) relevant, wobei die Mengen nicht direkt addiert werden, sondern mit den jeweiligen Mengenschwellen aus der 4. BImSchV gewichtet werden. Hier spielen also ebenso Flüssigkraftstoffe und damit auch Ottokraftstoffe, Dieselmotorkraftstoffe, Erdgas und LPG eine Rolle, wobei die Mengenschwellen höher als bei Wasserstoff sind und damit die reine Masse der gemeinsamen Lagerung größer sein darf als 3 t. Wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass auch Nebeneinrichtungen mit gefährlichen Stoffen direkt hinzu zählen – eine Sauerstoffnutzung der Elektrolyse mit entsprechender Lagerung würde bspw. die Schwelle der Gesamtlagerung erniedrigen!

Ab einer Menge von 5 t „Gesamtvorhandensein“ (also nicht nur Lagerung) im Betriebsbereich (Bedingung: gleiches Gelände, gleicher Betreiber) fällt der gesamte Betriebsbereich zudem unter die Störfallverordnung, was weitere Betreiberpflichten mit sich bringt. Auch hier spielen weitere Stoffe mit den jeweiligen Mengenschwellen aus der 12. BImSchV (die von den Stoffen und den Mengenschwellen

der 4. BImSchV abweichen) eine Rolle und werden gewichtet mit hinzugezählt. Wasserstoff-Lagermengen oberhalb von 5 t sind für Wasserstoff-Tankstellen derzeit eher selten. Wenn das betreffende Betriebsgelände jedoch bereits aus anderen Gründen unter die Störfallverordnung fällt (bspw. durch größere Mengen anderer Kraftstoffe oder brennbarer Gase), ist auch die Tankstelle von der Störfallverordnung betroffen. Ein Beispiel hierfür ist die Wasserstoff-Tankstelle Stuttgart Talstraße am Stuttgarter Gaskessel.

Diese Beschreibung stellt eine rechtlich nicht abschließende grobe Übersicht dar, die eine Einzelfallprüfung nicht ersetzt und je nach Standort und Rahmenbedingungen um entsprechende zusätzliche Verfahren und Auflagen erweitert werden muss.

BISHERIGE ERFAHRUNGEN/KRITIK

Die bis zum Zeitpunkt der Erstellung der Studie abgewickelten Genehmigungsverfahren verursachten teilweise deutliche Kritik von den Anlagenbetreibern. In Reaktion darauf wurde seitens der e-mobil BW und der NOW im Juni 2012 ein Workshop zu diesem Thema veranstaltet, in welchem das Thema und mögliche Maßnahmen mit Vertretern der Anlagenbetreiber, der zugelassenen Überwachungsstellen (ZÜS) und der Genehmigungsbehörden diskutiert wurden. Zum Zeitpunkt der Erstellung der Studie sind laut Aussage der Veranstalter mehrere Maßnahmen bereits in Vorbereitung.

Betreiberseitig wird hauptsächlich der zeitliche (und damit auch finanzielle) Aufwand der Genehmigungsverfahren kritisiert. Kritisiert werden zudem unterschiedlich verlaufende Verfahren sowohl von Seiten der Genehmigungsbehörden, als auch von Seiten der ZÜS. Dementgegen stehen die bisher sehr unterschiedlichen Tankstellenkonzepte mit ihren vielfältigen Sicherheitsmaßnahmen und -einrichtungen, die schwer einheitlich beurteilt werden können und für die auch bisher in den meisten Fällen noch keine Erfahrungen bei den genehmigenden Behörden und teilweise auch der ZÜS existieren. Lange Verfahren können zudem auch an einer geringen Qualität der eingereichten Unterlagen (aufgrund geringer Erfahrung der Betreiber) oder auch an einer hohen Arbeitsbelastung der Behörde (konjunkturabhängig) liegen.

Eine Standardisierung der Tankstellen mit steigenden Stückzahlen ist die sinnvollste und effektivste Maßnahme zur Beschleunigung solcher Verfahren. Am Beispiel der Erdgastankstellen lässt sich ableiten, dass die Genehmigungsprozesse mit steigender Stückzahl und der Herausbildung entsprechender Experten bei den beteiligten Akteuren zunehmend effizienter werden. Unterlagen werden zügi-

ger vorbereitet, gutachterliche Äußerungen schneller erstellt und Unterlagen schneller geprüft. Bei Städten mit mehreren Wasserstoff-Tankstellen sind bereits jetzt erste Beschleunigungseffekte durch gut eingespielte Akteure sichtbar.

Neben der Standardisierung ist als Folge des NOW-Workshops ein deutschlandweiter Genehmigungsleitfaden für Anlagenbetreiber und -errichter in Vorbereitung, der in Zusammenarbeit mit den Behörden und der ZÜS entwickelt wird. Dieser Leitfaden hat als Ziel, Betreiber und Errichter von Anlagen bei Genehmigungsverfahren zu unterstützen und den Prozess durch Vermeidung von unnötigen Iterationsschleifen und Fehlern zu beschleunigen. Zudem wird auch eine Internetplattform errichtet, die sowohl für Anlagenbetreiber und -errichter, als auch für Behörden eine Informationsplattform zu Wasserstoff-Tankstellen und Genehmigungsverfahren bieten soll. Zur Beschleunigung der Verfahren wird von Behörden und ZÜS empfohlen, in diesem frühen Stadium des Tankstellenausbaus zudem eine möglichst frühe Einbeziehung von allen Akteuren (Behörde, ZÜS, Anlagenbauer und lokalen Experten für die entsprechenden Genehmigungsverfahren) zu berücksichtigen, sowie die verfügbaren Genehmigungslotsen der Behörden zu sichten, um bereits frühzeitig die gewünschten Dokumente und mögliche Fehlerquellen zu identifizieren. Die Pflicht zur Durchführung des Verfahrens liegt beim Betreiber, trotzdem wird empfohlen, die Unterstützung und ggf. sogar die Durchführung des Verfahrens durch den Anlagenbauer im Lastenheft der Tankstelle festzuhalten.

ERRICHTUNGSNORMEN

Bereits existierende Normen sind derzeit einerseits auf internationaler Ebene die ISO/TS 20100 (Vornorm) und das VdTÜV-Merkblatt 514, welches im deutschen Raum gerne herangezogen wird. An diesen Standards besteht aktuell Kritik von diversen Akteuren, da sie sich in einigen Punkten (bspw. den Abstandsregelungen) widersprechen und durch die schnellen und starken Entwicklungen der letzten Jahre nicht mehr aktuell sind. Vor allem für Anlagenhersteller und Unternehmen ohne deutschen Firmensitz sind die Widersprüche ein Eintrittshindernis und Probleme werden oft erst im Genehmigungsverfahren bemerkt. Einheitliche, aktuelle Normen sind für eine zügige, problemlose Errichtung und Genehmigung notwendig – auch um im Umfeld der Anlagen (Anfahrerschutz, etc.) einheitliche Sicherheitskonzepte zu erreichen und die Verfahren zu beschleunigen. Eine Überarbeitung/Aktualisierung dieser beiden Normen wird von vielen Akteuren als dringende Notwendigkeit gesehen und empfohlen! Von einzelnen Akteuren wird in diesem Zusammenhang die ISO 20100 bevorzugt, da sie „aus technischer

Sicht (...) die Anforderungen an die HRS in einer detaillierteren Weise abdeckt als das VdTÜV Merkblatt 514“ [37]. Zudem bietet eine internationale Norm in diesem Zusammenhang eine einheitliche internationale Einigung, die internationale Aktivitäten von Anlagenbauern und Tankstellenbetreibern vereinfacht. In diesem Zusammenhang wird empfohlen, dass auch weitere deutsche Akteure von Seiten der Anlagenbetreiber und Anlagenbauer sich aktiv in den Normungsgremien engagieren, um die Erfahrungen aus den deutschen Leuchtturmprojekten einzubringen und die Normung – die für alle Beteiligten eine Vereinfachung der Genehmigungsprozesse bedeuten kann – voranzubringen.

Das H2-Mobility-Lastenheft als de facto öffentlich verfügbare Standardisierungsdokument des Industriekonsortiums H2 Mobility bietet eine systematische Beschreibung der Tankstellentechnologie und schreibt viele sicherheitsrelevante Aspekte und Maßnahmen vor. Beispiele dafür sind die Vorgabe von Gasdetektoren und Feuermeldern, Forderungen zur Dokumentation des Sicherheitskonzeptes, Durchführung von FMEA und HAZOP, Vorgabe von Sicherheitsabstandsregelungen und Vorgabe komponentenspezifischer Sicherheitsmaßnahmen (bspw. Installation von sowohl softwaregesteuerten Druckentlastungsventile, also auch mechanischen Sicherheitsventilen zur Absicherung der Kompressoren). Auch Vorgaben bezüglich zu verwendender Normen für einzelne Bauteile und Anforderungen für die Aufstellung und Montage der Tankstelle werden aufgelistet. Das H2-Mobility-Lastenheft bietet im Bereich der Sicherheit daher wichtige, sinnvolle und einheitliche Vorgaben zur Gewährleistung einer Anlagensicherheit auf hohem Niveau und dem Stand der Technik. Damit hat das H2-Mobility-Lastenheft das Potenzial, den Status eines Industriestandards zu erreichen und dementsprechend eine Genehmigung zu erleichtern und zu beschleunigen. Hierfür muss es jedoch in den oben genannten Punkten konsequent weiter entwickelt werden. Eine Prüfung dieser Option durch die H2 Mobility in Zusammenarbeit mit Genehmigungsbehörden und der NOW (als Ersteller des oben erwähnten Leitfadens) wird empfohlen.

4.4.4 GEEICHTE ABGABEMESSUNG

Beim Verkauf von Kraftstoffen und anderen Gütern, die nach Menge bepreist werden, ist eine Eichung der für die Mengenbestimmung notwendigen Messgeräte notwendig. Die derzeitige maximal erlaubte Abweichung der Messgeräte hierfür liegt derzeit bei 1,5 % für Neuanlagen und 2,0 % für Altanlagen.

Zur Messung von Gasströmen (bspw. bei Erdgastankstellen) werden typischerweise Coriolis-Massendurchflussmessgeräte verwendet. Dieses Verfahren misst – im Gegensatz zu vielen anderen Verfahren – direkt den Massenstrom unabhängig von Dichte, Druck, Temperatur oder Leitfähigkeit und ist damit für eine Betankung mit sich kontinuierlich veränderlichen Drücken und Temperaturen prinzipiell gut geeignet. Die großen Drücke stellen jedoch die derzeit verfügbaren Abgabemessgeräte vor Probleme. Die Coriolis-Massendurchflussmessgeräte erreichen im Gegensatz zur 350-bar-Anwendung bei höheren Drücken nicht die notwendigen Genauigkeiten. Speziell kurze Betankungen verursachen hohe Abweichungen.

In einem CEP-Arbeitskreis wird dies derzeit thematisiert. Dieser Arbeitskreis recherchiert Techniken und mögliche Genauigkeiten und will im weiteren Verlauf im Dialog mit den Behörden eine Lösung finden. Momentan wird bei der CEP-Kartenausgabe den Kunden verdeutlicht, dass zur Abrechnung ein ungeeichtes Messsystem verwendet wird. Dieser Ansatz ist derzeit möglich, da es sich bei der CEP um ein Demonstrationsprojekt handelt, er wird aber mit der Markteinführung der FCEVs hinfällig.

Hier herrscht Forschungsbedarf an Messgeräten, die diese Eichanforderungen nachweislich erbringen. Weitere Hersteller von Durchflussmessgeräten haben dieses Thema inzwischen für sich erkannt und arbeiten vereinzelt an Lösungen. Ende 2012 wurde zu diesem Thema unter Einbeziehung wichtiger Akteure und Vertretern der CEP ein Workshop in Oslo abgehalten.

Ein weiteres verwandtes Thema, die regelmäßig notwendige Kalibrierung der Messgeräte vor Ort, wurde bereits von Linde durch die Entwicklung eines Kalibrierungsanhängers mit Fahrzeug-Tanksystem und Präzisionswaage gelöst.

4.4.5 NORMGERECHTE BETANKUNG

Die Norm SAE J2601 definiert neben anderen Aspekten genaue Druckrampen und ein Temperaturfenster für die Betankung des Wasserstoffs (-40 °C bis 33 °C), die die Tankstelle im Rahmen der Betankung einhalten muss, um eine sichere und schnelle Betankung zu ermöglichen. Durch ein konsequentes Befolgen dieser Spezifikationen ist sichergestellt, dass die Fahrzeugtanks auch in Extremfällen nicht überhitzen und damit keine Schädigung des Tanksystems (Tanktemperatur > 85 °C) oder sicherheitskritische Zustände (> 100 °C Tanktemperatur) entstehen.

ABNAHMETEST

Die Verträglichkeit der Tankstellen mit den verschiedenen Fahrzeugen wird meist durch die Automobilhersteller an jeder Tankstelle selbst geprüft. Nach dem jeweiligen Betankungstest und einer Analyse der Tankstellentechnologie wird vom Automobilhersteller eine Eignung der Tankstelle für ihre Fahrzeuge bescheinigt, was bei den meisten Automobilherstellern auch eine Voraussetzung ist, dass deren Fahrzeuge dort tanken dürfen. Ohne den Abnahmetest ist eine Betankung der jeweiligen Automobilmarke nicht erlaubt. Dies führt dazu, dass entweder ein enormer Aufwand für die Abnahme getrieben wird oder die Tankstellen nur für manche Fahrzeuge frei gegeben sind.

Zur Lösung dieser Problematik wurde in der CEP ein gemeinsamer Abnahmetest vereinbart, der bis Ende 2012 durch Opel durchgeführt und von allen Automobilherstellern, die Teil der CEP sind, akzeptiert wurde. Opel hat dafür eine Testapparatur entwickelt, die die Normkonformität überprüfen kann und damit auch eine Eignung der Tankstelle für alle normkonformen Fahrzeuge belegt.

Diese Möglichkeit stand jedoch nur bis November 2012 zur Verfügung. Aus diesem Grunde wird derzeit im Rahmen eines CEP-Arbeitskreises nach einer Alternative gesucht. Ein entsprechendes Lastenheft für eine im Umfang reduzierte Testapparatur ist angefertigt. Zum Zeitpunkt der Erstellung der Studie wird nach einem unabhängigen Betreiber (bspw. eine ZÜS) für diese Testapparatur gesucht, welcher dann die Abnahme der Tankstellen übernehmen soll. Im Rahmen dieses Wechsels sollen auch der Aufwand und damit die Kosten der Norm-Konformitäts-Prüfung gesenkt werden.

ERFAHRUNGEN BISHERIGERER ABNAHMETESTS

Bisher dauerte eine Norm-Konformitäts-Prüfung ca. 2–3 Tage (im Vergleich zu einer Abnahme nach Betriebssicherheitsverordnung von 3 Stunden). Dieser hohe Aufwand wird einerseits dadurch verursacht, dass die meisten Anlagen die Tests bisher nicht erfüllten. Viele der Anlagen wurden nach einer Vorversion der SAE J2601 (Release A) gefertigt und aufgrund des apparativen Aufwands ist die Norm-Konformitäts-Prüfung durch Opel bisher der erste, präzise Test der Tankstellen gewesen. Die Feineinstellung der Anlagen für eine vollständige Konformität zur SAE J2601 wurde also erst mit diesem Abnahmetest durchgeführt. Sowohl die Druckrampenregelung, als auch die Vorkühlung sind in den meisten Fällen derzeit noch

nicht normkonform. Dies liegt auch an sehr ambitionierten Vorgaben der Norm. Temperaturseitig sind es 33 °C Gastemperatur, die spätestens 15 Sekunden nach Betankungsstart erreicht werden müssen und die bisher nur von wenigen Tankstellen erfüllt werden. Die Realisierung dieser Forderung ist regelungstechnisch anspruchsvoll und kann apparativ gelöst werden (bspw. durch gekühlte Leitungen nach dem Wärmeübertrager), ist energetisch jedoch aufwändig. Mit zunehmenden Lerneffekten der Anlagenhersteller und einem aufgrund der Felderfahrung optimierten Testumfang wird ein geringerer Abnahmeaufwand erwartet.

NORMANPASSUNG

Die Betankungsnorm – vor allem die Anforderungen an die Vorkühlung – wird von vielen Akteuren als ehrgeizig betrachtet. Motivation für diese ambitionierten Vorgaben ist der Komfort, den eine maximal dreiminütige Betankung kundenseitig bietet. Für Bestandstankstellen, die diese Norm noch nicht erfüllen oder aufgrund ihres Alters nach einer Vorversion der Norm (Release A) gefertigt wurden, wurden im Auftrag von Daimler alternative Fülltabellen ermittelt, die dann eine sichere Befüllung der Fahrzeuge mit einem etwas einfacherem Temperaturfenster (-30 °C in 30 Sekunden) zulasten einer leicht erhöhten Betankungszeit erlauben.

Prinzipiell gibt es starke Bestrebungen, die Betankungsnorm weiterzuentwickeln bzw. zu finalisieren. Treiber dieser Bestrebungen sind u. a. Akteure aus Japan, die die Norm zu einem verbindlichen Standard und damit zu einer gesetzlichen Grundlage für den dortigen ambitionierten Tankstellenausbauplan (siehe Kapitel 2.5) erheben wollen. Erfahrungen aus den Demonstrationsprojekten (also der CEP und anderen Projekten) werden an die Normungsgremien, die diese Norm weiterentwickeln und finalisieren, weitergegeben.

FAZIT

Der Vorgang der Fahrzeug-Betankung ist über die gemeinsame, internationale Norm gesetzt und wird auf absehbare Zeit seine Gültigkeit behalten. Diese Norm ist eine wichtige Basis für die Markteinführung weltweit kompatibler Wasserstoff-Fahrzeuge mit den hierfür notwendigen Stückzahlen. Im weiteren Verlauf müssen die Erfahrungen aus den Demonstrationsprojekten in die Norm einfließen, um diese weiterzuentwickeln. Zudem ist es für den deutschen Raum sehr wichtig, dass für die Abnahmetests ein neuer Betreiber gefunden wird, um diese Abnahme einfach und umfas-

send zu gestalten. Eine Einzelabnahme durch sämtliche Fahrzeughersteller ist nach der weltweiten Markteinführung nicht mehr praktikabel und Tankstellen mit einer Zulassung für nur einzelne Fahrzeugtypen würden ein nicht akzeptables Markthemmnis darstellen.

4.4.6 URBANE BUSFLOTTENBETANKUNG

DERZEITIGE SITUATION

Für konventionell angetriebene Busse unterhalten Verkehrsbetriebe eigene Tankanlagen auf den jeweiligen Betriebshöfen, um durch langfristige Verträge und große Absatzmengen günstige Einkaufskonditionen für die Kraftstoffe zu erzielen und um kurze und effiziente Prozesse für die täglichen Wartungs- und Pflegearbeiten der Fahrzeuge zu gewährleisten. Häufig wird eine dezentrale Struktur mit mehreren Betriebshöfen gepflegt – im Falle Hamburgs verteilen sich ca. 700 Stadtbusse auf 7 Betriebshöfe, in Stuttgart sind es 280 Busse und 3 Betriebshöfe.

UMSTELLUNG AUF BRENNSTOFFZELLEN-BUSSE

Eine Umstellung der Busse muss aus betriebswirtschaftlichen Gründen graduell erfolgen. Nach einer anfänglichen Erprobungsphase würden sukzessive die konventionellen Busse ersetzt und die Betankungsinfrastruktur entsprechend erweitert werden.

Am Beispiel Hamburg bedeutet dies konkret, dass aufgrund einer politischen Vorgabe ab 2020 ausschließlich klimaneutrale Busse (nicht zwangsläufig nur Brennstoffzellen-Busse) beschafft werden. Über einen Zeitraum von 12–14 Jahren müssen im Extremfall unter Berücksichtigung von Fahrgastanstiegen also ca. 1000 Brennstoffzellen-Busse angeschafft werden. Dies bedeutet einen jährlichen Anstieg des täglichen Wasserstoffbedarfs um weitere 2.500 kg/d, wofür entweder weitere Anlagen gebaut oder anfänglich gebaute Anlagen entsprechend vergrößert werden müssten. Am Ende des Ausbaus im Jahr 2030 müsste für maximal 1000 Busse ein täglicher Bedarf von knapp 30 t/d Wasserstoff verteilt auf 7 Betriebshöfe bereitgestellt werden. Zur Sicherstellung von Krisensicherheit würden zudem Reservekapazitäten in der Größenordnung von 100 t vorgehalten werden. Diese Zahlen beinhalten nur die Stadtbusse der Hamburger Hochbahn und nicht der angeschlossenen weiteren Busunternehmen im Großraum Hamburg. Auf Stuttgart übertragen, bedeutet eine analoge Umstellung der städtischen Busflotte auf

Wasserstoffantrieb einen jährlichen Zuwachs der täglichen Abgabekapazität von 800 kg/d bis hin zu einem Wasserstoffumsatz von 8,4 t/d für derzeit 280 Busse und 30 t Reservekapazität.

Der oben beschriebene Vorgang des schrittweisen Ausbaus der Wasserstoff-Kapazitäten und der damit notwendige Flächenbedarf für solche Anlagen erschweren jedoch den effektiven Aufbau betriebseigener Betankungsinfrastrukturen.

HANDLUNGSBEDARF/CHANCEN

Der geplante Tankstellenausbau für Brennstoffzellen-Fahrzeuge bietet hier eine Chance für eine partnerschaftliche Zusammenarbeit zwischen Tankstellenbetreibern und städtischen Busunternehmen:



Abbildung 28: Brennstoffzellen-Hybridbus der Hamburger Hochbahn (Quelle: HOCHBAHN)

Busbetreiber tanken ihre Fahrzeuge bei Tankstellen externer Betreiber. Diese Vorgehensweise wird derzeit bereits in Hamburg und Berlin erprobt.

Busbetreiberseitig liegt der Vorteil darin, dass der technisch und finanziell aufwändige Schritt-für-Schritt-Aufbau der Betankungs-Infrastruktur nicht aus eigenen Mitteln erfolgen muss. Allerdings wird durch eine solche Kooperation zumindest zeitweise auch das Risiko einer externen Abhängigkeit und eventueller nicht selbst verschuldeter Betriebsausfälle eingegangen. Tankstellenseitig ermöglicht die Zusammenarbeit einen vergleichsweise frühen finanziellen Rückfluss und kann damit den Aufbau der Tankstellen-Infrastruktur erleichtern, wobei jedoch auch deutliche Zusatzkosten für die bustaugliche Ausrüstung der Tankstellen entstehen.

Für den Ausbau von Bustankstellen auf Betriebshöfen, als auch für urbane Tankstellen allgemein müssen technische Lösungen für die Themen Verfügbarkeit (vgl. Kapitel 4.3) und Flächenbedarf (vgl. Kapitel 4.4.10) der Anlagen gefunden werden.

4.4.7 SICHERHEIT

In den Expertengesprächen herrscht ein großer Konsens, dass die derzeit verwendeten Anlagen ein hohes Maß an Sicherheit bieten. Die Anlagen enthalten i. d. R. ein umfangreiches, mehrstufiges Sicherheitskonzept und werden nach einem hohen technischen Standard und den geltenden gesetzlich vorgeschriebenen Richtlinien hergestellt und aufgebaut. Diese Richtlinien sind aus einer langen Erfahrung mit Wasserstoffnutzung in der Industrie entstanden und fordern von Hersteller und Betreiber ein hohes Maß an Sicherheit und Dokumentation, die dann durch zugelassene Überwachungsstellen anhand der gesetzlich vorgeschriebenen Verfahren sowohl in der Konzeptphase, als auch vor der Inbetriebnahme der Tankstellen überprüft werden. Durch frühe Involvierung der ZÜS und der Genehmigungsbehörden können Probleme und besondere standortbezogene Anforderungen frühzeitig erkannt werden. Im Zusammenhang mit dem Thema Sicherheit kann das DWV Wasserstoff-Sicherheits-Kompodium [38] empfohlen werden, das sich diesem Thema ausführlicher widmet.

Trotzdem herrscht an einigen Stellen Forschungsbedarf. Eines der Themen dabei ist die Wasserstoff-Versprödung. Das Problem ist an sich bekannt und kann durch entsprechende Materialauswahl adressiert werden. Austenitische Stähle und Aluminium oder

Kupfer-Legierungen werden meist als stabil gegen Wasserstoff-Versprödung bezeichnet. Trotzdem gilt dies nicht pauschal für diese Werkstoffgruppen und im Zusammenhang mit Brennstoffzellen ist eine Verwendung von Buntmetallen als kritisch zu beurteilen, da herausgelöste Buntmetallionen Brennstoffzellen schädigen. Das Sandia National Laboratory pflegt eine Datenbank mit Informationen zu Werkstoffverträglichkeiten mit Wasserstoff. Auch wenn hier eine gute Informationsquelle existiert, gibt es noch Erfahrungslücken bei hochreinem Wasserstoff und hohen Drücken. Durch Forschung in diesem Bereich kann die Materialauswahl erweitert werden und Aufklärung kann zu mehr Sicherheit bei der Materialauswahl führen.

Auch wenn die Anlagen selbst sicher sind, ist es sinnvoll, die Auswirkung von Havariefällen näher zu untersuchen. Konkret betrifft das die Freisetzung großer Mengen gasförmigen und flüssigen Wasserstoffs und dessen Ausbreitung bzw. die Identifikation von Effekten bei flüssigem Wasserstoff an Luft. Empirische Versuche an Trailern und im Labor existieren bereits; für ein umfassendes Verständnis ist jedoch eine genauere Untersuchung notwendig. Zusätzlich zu den allgemeinen Fällen der Freisetzung ist eine Untersuchung von unfallbedingter Wasserstoff-Freisetzung in Tunneln und den Auswirkungen der Brandbekämpfungsmaßnahmen in Tunneln sinnvoll.

Im Rahmen von Demonstrationsprojekten wie der CEP wurden und werden weitere kleinere sicherheitsrelevante Aspekte entdeckt, die dann im Rahmen der CEP oder durch Weitergabe der Information in die Normungsgremien (bspw. Anpassung Befüllnorm oder Aufstellungsnormen) berücksichtigt werden.

4.4.8 WASSERSTOFF-QUALITÄT

Das Thema Wasserstoff-Qualität bzw. -Reinheit birgt derzeit viele offene Fragen und wird aufgrund seiner Wichtigkeit von einem Arbeitskreis der CEP (siehe Kapitel 2.3) bearbeitet.

QUALITÄTSSTANDARD

Der Standard SAE J2719 beschreibt die Wasserstoff-Qualität, die für Brennstoffzellen-Fahrzeuge vorgegeben ist und enthält eine Liste von Verunreinigungen mit Angabe der erlaubten Konzentrationsanteile. Diese Verunreinigungen teilen sich auf in Bestandteile, die für Brennstoffzellen nicht lebensdauerverkürzend sind und nur

die Leistung herabsetzen (bspw. Stickstoff, Wasserdampf und Edelgase), Katalysatorgifte, die für eine vorzeitige Alterung der Brennstoffzelle sorgen (bspw. Kohlenmonoxid, Ammoniak), wie auch membranschädigende Verunreinigungen (bspw. schwefelhaltige Verbindungen und Säuren), die einen Defekt und Austausch des Brennstoffzellen-Stacks zur Folge haben. Die Grenzen für diese Verunreinigungen liegen teilweise unterhalb des ppm-Bereiches und sind damit messtechnisch schwer erfassbar. Basis für die genannten maximalen Konzentrationen sind (teilweise ältere) wissenschaftliche Untersuchungen, die in referenzierten Veröffentlichungen beschrieben werden.

VERUNREINIGUNGEN IM WASSERSTOFF

Je nach Verfahren treten unterschiedliche Verunreinigungen bei der Wasserstoff-Herstellung auf. Wasserstoff aus Elektrolyse enthält nur Wasserdampf und ggf. Sauerstoff als Verunreinigung (PEM-Elektrolyse) oder im Falle der alkalischen Elektrolyse zusätzlich Kalilauge und ggf. Stickstoff aus Spülvorgängen. Bei Wasserstoff aus der Erdgas-Dampfreformierung sind zusätzlich noch Kohlenmonoxid, Kohlendioxid und schwefelhaltige Verbindungen im Wasserstoff enthalten. Bei der zentralen Herstellung durch Gaslieferanten wie Linde, Air Products und Air Liquide werden bei der Herstellung von Wasserstoff kontinuierlich die wichtigsten Verunreinigungen im produzierten Wasserstoff gemessen. Typische Nachweisgrenzen in einer großtechnischen Anlage sind: 5 ppm Wasser, 0,1 ppm CH_x, 1 ppm O₂, 5 ppm N₂ bzw. Ar, 0,1 ppm CO₂ – je nach Anlage leicht unterschiedlich (siehe Tabelle 10).

Die Online-Messfähigkeit unterscheidet sich leicht je nach Anlage. Die Norm definiert jedoch auch maximale Verunreinigungen durch Schwefelverbindungen, Formaldehyde, Ameisensäure etc. in Größenordnungen von 0,1 ppm und kleiner, die nicht Teil der Online-Messung dieser Anlage sind. Mindestens für Schwefelverbindungen (und Ammoniak) ist bekannt, dass dies auch Nebenprodukte bei der Wasserstoff-Erzeugung über Erdgasreformierung sind.

VERUNREINIGUNG DURCH TANKSTELLEN

Der getankte Wasserstoff kann jedoch auch durch die Tankstelle verunreinigt werden. In den Tanksystemen der Fahrzeuge wurden weitere Verunreinigungen festgestellt. Einerseits wurden Partikel (Ursache vermutlich Abrieb der Dichtungen im Kompressor) und Metallspäne (Ursache vermutlich unsaubere Montage der Tankstellen) gefunden, andererseits auch Aliphat-Kondensationen (vermutlich auf Schmiermittel von Kompressoren zurückzuführen) und auch Fremdgase (v. a. große Anteile Stickstoff wurden festgestellt, vermutlich auf nach Wartungen nicht ausreichend gespülte Rohrleitungen zurückzuführen).

Tankstellen haben zum Schutz der Fahrzeuge vor Partikeln bereits typischerweise Sintermetallfilter verbaut, die jedoch nicht stabil genug sind und bereits öfters durchschlagen wurden. Zur Analyse der Partikel im Gasstrom wurde vor kurzem von der Firma Hydac die „PSA“, ein Filtersystem mit Membran zum Zwischenschalten zwischen Kupplung und Fahrzeug, entwickelt, welches die Möglich-

keit bietet, Partikel und nicht-gasförmige Verunreinigungen herauszufiltern und zu analysieren. Entsprechende Untersuchungen auf Verunreinigungsarten werden zum Zeitpunkt der Erstellung der Studie durchgeführt.

STICHPROBENMESSUNGEN

Die in der Norm geforderten Grenzwerte sind derzeit zumindest in Europa messtechnisch nicht erfassbar. Die SAE J2719 schlägt geeignete Laborverfahren zur Analyse der Verunreinigungen vor – diese Verfahren sind derzeit in Europa größtenteils nicht zugelassen, enorm aufwändig und damit sehr teuer. Damit können die durch die Norm geforderten Grenzwerte in Europa gegenwärtig nicht vollständig überprüft werden.

Entsprechend werden technische Alternativen gesucht und diskutiert. Angestrebt werden Stichproben mit labortechnischer Auswertung, die die prinzipielle Gasreinheit von Wasserstoff-Tankstellen überprüfen können – jedoch zur Online-Reinheitsüberwachung an einer speziellen Tankstelle eher ungeeignet sind.

Zur Gas-Probenahme an der Zapfsäule gibt es derzeit noch keine in Europa zugelassene Abnahmevorrichtung. Ideal ist hier eine Vorrichtung, die während der Betankung aus einem Bypass-Gasstrom repräsentative Proben abzieht, um anschließend im Labor den Tankstellenwasserstoff untersuchen zu können.

ANFORDERUNGEN BRENNSTOFFZELLE / KRAFTSTOFFNORM

Die hohe Reinheit, die in der Norm gefordert ist, wird von Gasherstellern und Tankstellenbetreibern als zu vorsichtig und veraltet betrachtet. Da hochreiner Wasserstoff mit der Qualität 5.0 vergleichsweise teuer ist, wird erwartet, dass durch eine geringere benötigte Reinheit auch die Wasserstoffkosten gesenkt werden können und zudem auch die Anforderungen an die Stichprobenmessung sinken. De facto sind jedoch die verschiedenen Anforderungen auf wissenschaftliche Veröffentlichungen gestützt und damit durchaus fundiert.

Von vielen Befragten wird aber eine aktuelle Bewertung der Grenzwerte – ergänzt durch Erfahrungen der laufenden Projekte auf Fahrzeugseite – als sinnvoll angesehen. Ziel ist die Ermittlung eines Kompromisses zwischen automobiler Lebensdauer und infrastrukturseitigem Aufwand, um den Punkt einer optimalen Gesamtkostenrechnung und das Einfließen dieser Ergebnisse in die Kraftstoffnorm zu erreichen.

FAZIT

Die Qualitätsnorm SAE J2719 gibt Grenzwerte für Verunreinigungen im Kraftstoff Wasserstoff vor, die von Wasserstoff-Tankstellen eingehalten werden müssen. Die derzeitigen Grenzwerte sind in Europa nicht vollständig und nur mit hohem finanziellem Aufwand überprüfbar. Hier sollten passende Verfahren zur Überprüfung der Gasreinheit an Tankstellen mit vernünftigen Aufwand entwickelt werden. Eine Wasserstoff-Erzeugung über On-site-Elektrolyse kann das Problem der Gasreinheitsprüfung reduzieren, da hier die möglichen Verunreinigungen stark begrenzt sind und damit auch ein geringerer Prüfungsumfang ausreichend sein kann.

Damit erscheint eine Stichprobenmessung zur Ermittlung der Gasqualität und der sonstigen Verunreinigungen (bspw. Partikelmessung mit der „PSA“ von Hydac) an neuen Tankstellen sinnvoll und kann eine praktikable Ergänzung der Tankstellenabnahme und der Vorgaben im H2-Mobility-Lastenheft darstellen.

Weiterführend erscheint eine Beurteilung der Grenzwerte, ergänzt durch die Erfahrungen laufender Projekte auf Fahrzeugseite und die Findung eines Kompromisses hinsichtlich der automobilen Lebensdauer und des infrastrukturseitigen Aufwands sehr sinnvoll.



Abbildung 29: Klimaprüfzelle zur Untersuchung von Brennstoffzellen-Systemen am Fraunhofer ISE

Kapitel 4

4.4.9 NUTZERAKZEPTANZ / NUTZERFREUNDLICHKEIT

Nutzerakzeptanz und Nutzerfreundlichkeit sind zentrale Voraussetzungen für eine Markteinführung von FCEVs, der Wasserstoff-Mobilität und der Weiterentwicklung der Technologie nach dem Markteintritt.

ÖFFENTLICHKEITSARBEIT

Eine gute und anhaltende Öffentlichkeitsarbeit wird von vielen Befragten als eine sehr wichtige Maßnahme gesehen, da in der Öffentlichkeit aufgrund nicht vorhandener Erfahrungen oft noch reichlich Halb- und Falschwissen bezüglich Wasserstoff, Wasserstoffsicherheit und Wasserstoff-Mobilität vorherrschen. Wasserstoff wird oftmals mit Knallgasexperimenten, hohen Diffusionsraten, leer verdampften Speichertanks und allgemeiner Gefahr in Verbindung gebracht und daher irrtümlicherweise gefährlicher als Erdgas oder sogar LPG wahrgenommen. Da die öffentliche Meinungsbildung entscheidet, ob Wasserstoff als Kraftstoff eine Zukunft hat, ist es sehr wichtig, Halbwissen und Ängste durch Aufklärung zu bereinigen. Projekte wie HyTrust sind neben der allgemeinen Aufklärungsarbeit ein probates Mittel, müssen aber konsequent weitergeführt werden. Ebenso wichtig sind ein störfall- oder vorfallfreier Betrieb und eine hohe Verfügbarkeit, um die öffentliche Wahrnehmung von Wasserstoff und die Reife der Wasserstoff-Technologie positiv zu prägen.

NUTZERFREUNDLICHKEIT

Bezüglich Nutzerfreundlichkeit ist die Zuverlässigkeit von Tankstellen (siehe Kapitel 4.3) ein zentrales Element. Seitens der CEP wird für Mitgliedstankstellen ein Tankstellenverfügbarkeitssystem vorgeschrieben, welches ein guter Schritt ist, um trotz derzeitiger Anlagenausfälle mehr Planungssicherheit zu bieten. Trotzdem ist eine hohe Verfügbarkeit der Tankstellen ein wichtiger Aspekt der Nutzerfreundlichkeit, der ab dem Rollout der Fahrzeuge gewährleistet sein muss.

Im Bereich der Füllkupplung sind in der Vergangenheit mehrere Punkte aufgefallen, die die Nutzerfreundlichkeit reduzieren und daher gelöst werden sollten. Kapitel 4.4.10 geht näher auf die Füllkupplung ein.

Bezüglich der Dispenser werden eine einheitliche und einfache (bspw. Bedienungsführung mit Piktogrammen) Nutzerschnittstelle als verbessernde Maßnahmen genannt. Für eine CEP- oder CEP-Ready-Tankstelle wird inzwischen die „Zweiknopf-Bedienung“

(analog zu Erdgastankstellen) gefordert, was ein Ansatz für einheitliche Bedienungsführung analog zu konventionellen Tankstellen ist. Weiter wird eine Integrierung des Dispensers in die normale Tankstelle (möglichst geringe bis keine Abstände zur restlichen Anlage) als sinnvoller Ansatz zur Erhöhung der Nutzerfreundlichkeit genannt. Derzeit wird von der CEP noch eine Einweisung mit Tankkartenausgabe gefordert. Dies hat diverse Gründe und ist auch dem Demonstrationscharakter des Leuchtturmprojekts CEP (geschlossener Kundenkreis) geschuldet. Für barrierefreie Mobilität ist es notwendig, die Kartenleser wieder abzuschaffen und einen öffentlichen Zugang zu ermöglichen. Gesetzlich ist eine Einweisung jenseits einer Bedienungsanleitung für die Kunden nicht vorgeschrieben.



Abbildung 30: Betankung eines FCEV (Quelle: CEP)

4.4.10 SONSTIGE HERAUSFORDERUNGEN

PLATZBEDARF

Der Platzbedarf der Tankstellen – speziell der von Kompressoren und Wasserstoffspeichern – ist ein Thema, das an den meisten derzeitigen Aufstellungsorten noch nicht kritisch ist. Mit zunehmendem Aufbau der Infrastruktur und zunehmender Tankstellengröße wird dies aber vor allem im urbanen Bereich problematisch werden. Vor allem Tankstellen für Busbetankungen benötigen besonders große Speicher und Kompressoren. Vielfach wird ein Teil der Anlage unterirdisch installiert, was jedoch weitere Kosten verursacht. Hier müssen organisatorische oder technische Lösungen gefunden werden. Eine mögliche Technologie zur Reduzierung des Platzbedarfs können Feststoffspeicher z. B. in Form von Metallhydridspeicher sein. Daher wird empfohlen, die Eignung bzw. auch die Sinnhaftigkeit von Metallhydridspeichern als Niederdruckspeicher zu untersuchen.

BEFÜLLEQUIPMENT

Die Füllgarnitur – bestehend aus Abreißkupplung, Füllschlauch und Betankungskupplung – ist eine Baugruppe, an die strenge Anforderungen gestellt werden (stark schwankende Temperaturen, Drücke und mechanische Belastungen) und die zum Zeitpunkt der Erstellung der Studie noch einige Schwierigkeiten verursacht.

An den derzeit im Einsatz befindlichen Füllgarnituren wurden an mehreren Stellen Undichtigkeiten bemerkt. Sowohl Abreißkupplungen im Dispenser, als auch Füllkupplungen und die Schlauchverpressung der 700-bar-Schläuche haben in der Vergangenheit Undichtigkeiten gezeigt. Die Undichtigkeiten der Schlauchverpressungen sind jedoch seit Mitte 2011 behoben.

Im Bereich der Füllkupplung sind in der Vergangenheit mehrere Punkte aufgefallen, die die Nutzerfreundlichkeit reduzieren und gelöst werden sollten: Eine unsaubere Fixierung der Kupplung am Fahrzeug, ein ausgeleierter Entriegelungsmechanismus (350 bar) und zu kurze Schlauchlängen sind diverse Punkte. Zudem zeigt sich, dass bei starker Auslastung (mehrere Betankungen hintereinander) die Füllkupplung durchkühlt, bei den vom Kunden berührten Teilen unangenehm tiefe Temperaturen erreicht und teilweise am Fahrzeug anfriert (Wartezeit bis zum Abtauen der Kupplung).

Die Kupplung ist zudem stoßempfindlich und kann nach Herabfallen ein Auswechseln erfordern, was für höhere Betriebskosten sorgt. Weltweit existieren mehrere Hersteller für Füllkupplungen.

Im deutschen Raum dominiert die Firma WEH derzeit den Markt für Füllgarnituren, wobei Walther Präzision laut Aussagen Befragter inzwischen bei den eigenen Komponenten einige Probleme ausgeräumt hat und eine konkurrenzfähige Kupplung mit leicht anderem Konzept (Klauenkupplung mit Trocknung durch Instrumentenluft) vertreibt, welche einige der genannten Probleme adressiert.

Zusammenfassend ist im Bereich der Füllkupplungen noch weiterer Entwicklungsbedarf vorhanden, um die genannten Probleme der Nutzerfreundlichkeit und Dichtigkeit zu lösen.

LÄRM

Das Thema Lärmemissionen ist vor allem in Wohn- und Mischgebieten ein zu beachtendes Thema. Kompressoren und Kälteaggregate sind neben Lüftern und den im Außenraum installierten Rückkühlern/Verflüssigern große Lärmemittelen. Mit geeigneten technischen Maßnahmen (bspw. Kapselung) können jedoch Kompressoren und Kältemaschinen gedämmt werden und durch größere Ventilatoren und Reduzierung der Drehzahl werden auch die Rückkühlwerke bezüglich der Lärmemissionen deutlich verbessert. Unlösbar Schwierigkeiten mit Lärmemissionen wurden an keiner Tankstelle in nennenswertem Umfang berichtet.

ELEKTROLYSEURE

Im Bereich der On-site-Elektrolyseure ist die Entwicklung von Hochdruckelektrolyse und großmaßstäblicher PEM-Elektrolyse zu nennen. Durch Entwicklung von Hochdruckelektrolyseuren können sowohl Wirkungsgradvorteile bei der Verdichtung, als auch eine Reduzierung der Kompressoranforderungen (und damit Kostenersparnisse) erreicht werden. Im besten Fall kann sogar auf einen Teil der Kompressoren verzichtet werden (bspw. Vorverdichter). Durch die Entwicklung großmaßstäblicher PEM-Elektrolyse stehen die Vorteile der PEM-Technologie (siehe Kapitel 3.3.1) auch für die großskalige On-site-Erzeugung an Tankstellen zur Verfügung.

Die Koppelung einer Wasserstoff-Tankstelle mit regenerativen Energien bzw. der stromgeführte Betrieb mit den jeweiligen Auswirkungen auf die Tankstelle in technischer und wirtschaftlicher Hinsicht, sowie auch die Koppelung mit Energiespeichern (Koppelung mit großen Gasspeichern) sind wichtige Themen für die regenerative Mobilität. Für die stadtnahe, zentrale Elektrolyse zur Versorgung von städtischen Tankstellen kann auch die Entwicklung kleiner Verflüssiger relevant sein, um hier bei steigender Anlagengröße die Anlieferfrequenz auf einem logistisch vertretbarem Niveau zu halten.

WASSERSTOFF-TANKSTELLEN FÜR BADEN-WÜRTTEMBERG

Im Kapitel 3 wurden die technologischen Aspekte einer Wasserstoff-Tankstelle erörtert und die verfügbaren Konzepte klassifiziert sowie bewertet. Darauf aufbauend wurden in Kapitel 4 aktuelle Herausforderungen und Problemstellungen beim Bau und Betrieb zusammengefasst und diskutiert. In diesem Kapitel soll der zukünftige Bedarf an Wasserstoff-Tankstellen in Baden-Württemberg quantifiziert und eine Roadmap zur Errichtung eines Tankstellennetzes entworfen werden. Dazu wird die Klassifizierung aus Kapitel 3 aufgegriffen.

5.1 MARKTDURCHDRINGUNG WASSERSTOFFBASIERTER ANTRIEBE IM STRAßENVERKEHR

Die Prognose des zukünftigen Bedarfs an Wasserstoff-Tankstellen für Baden-Württemberg wird anhand der erwarteten Marktdurchdringung wasserstoffbasierter Antriebe im Straßenverkehr vorgenommen. Hierzu lassen sich verschiedene nationale als auch internationale Studien aktuellen Datums heranziehen, die jedoch aufgrund unterschiedlicher methodischer Ansätze zu abweichenden Aussagen kommen, siehe u. a. [39], [31], [40]. Um die spezifischen Fragestellungen dieser Arbeit beantworten zu können, wurde die BMU-Leitstudie 2011 [41] als Grundlage für die Roadmap-Entwicklung herangezogen. Sie bietet den Vorteil, dass sie – aufbauend auf den durch die nationale und europäische Politik formulierten Klimaschutzziele – in verschiedenen Szenarien eine detaillierte Analyse der Energieflüsse in Deutschland bis 2050 liefert. Dabei berücksichtigt die Studie die Besonderheiten des deutschen Wegs beim Ausbau der erneuerbaren Energien und liefert zudem Kennziffern für die einzelnen Verkehrssektoren. Zum Abgleich der Ergebnisse werden zwei weitere Quellen herangezogen, die aus einer anderen Blickrichtung Szenarien zur Entwicklung der Wasserstoff-Mobilität aufbauen.

Die Studie „Energieträger der Zukunft – Potenziale der Wasserstoff-Technologie in Baden-Württemberg“ im Auftrag der e-mobil BW wurde unter Federführung des ZSWs erstellt. Sie liefert einen allgemeinen Überblick zur Wasserstoff-Technologie, beleuchtet den Aufbau der Wertschöpfungsketten und die jeweiligen Kompetenzen in Baden-Württemberg und schätzt die zukünftigen Umsatz- und Beschäftigungspotenziale für das Land Baden-Württemberg bis zum Jahr 2050 ab. Damit stehen Zahlen zum Bestand von Brennstoffzellen-Fahrzeugen (FCEVs) und leichten Nutzfahrzeugen (LNF) zur Verfügung. Die Prognosen basieren auf dem „World Energy Technology Outlook 2050 (WETO H2)“ der Europäischen Kommission von 2006, sowie auf der BMU-Leitstudie 2010 [42]. In letzterer Studie ergibt sich bis zum Jahr 2050 im Leit- bzw. Basisszenario A

für Deutschland ein Anteil der batteriebetriebenen Elektromobilität (PHEV und BEV) an der Verkehrsleistung im Personenverkehr von 33 % und ein Anteil der Brennstoffzellen-PKW von 20 %. Mit Hilfe eines eigenen Modells zum Markthochlauf bis auf 20 % im Jahr 2050 und statistischen Daten zum deutschen PKW-Bestand wird daraus in der Studie des ZSWs auf den Bestand und die Verkaufszahlen für Brennstoffzellen-PKW (FCEV) und -LNF geschlossen. Wesentliche Anteile (2 %) an der Verkehrsleistung im Individualverkehr werden ab dem Jahr 2030 erreicht. Für 2030 wird im Referenzszenario ein Bestand von 127 Tausend und für 2050 von 1,28 Mio. FCEVs in Baden-Württemberg prognostiziert. Wasserstoffbetriebene LNF erreichen Stückzahlen von 6 Tausend bzw. 75 Tausend in den Jahren 2030 bzw. 2050. In einem optimistischen Szenario wird darüber hinaus eine Verdoppelung der FCEVs gegenüber dem Referenzszenario betrachtet.

Neben der Studie des ZSWs im Auftrag der e-mobil BW wird ferner das Datenwerk der Industrieinitiative H2 Mobility herangezogen, um die Marktdurchdringung von Wasserstoff im Verkehrssektor aus industrieller Sicht zu bewerten. Bereits im November 2010 wurde die europäische Studie „Ein Portfolio von Antriebssystemen für Europa: Eine faktenbasierte Analyse“ – auch bekannt als „EU Power Train Report“ bzw. „EU Coalition Study“ – unter Beteiligung wesentlicher Akteure der H2-Mobility-Initiative veröffentlicht [43]. Die Studie liefert ein Szenario zur Marktdurchdringung alternativer Antriebe wie BEVs, PHEVs, FCEVs und konventioneller ICEs auf Basis vertraulicher und geschützter Industriedaten für Europa bis zum Jahr 2050 und diskutiert auch den Aufbau der benötigten Wasserstoff-Infrastruktur in Europa. Weiterführend zu dieser Analyse wurde durch die Initiative H2 Mobility im Jahr 2011 ein Szenario zum Markthochlauf von Brennstoffzellen-PKW in Deutschland entwickelt. Es geht von ca. 1,8 Mio. FCEVs und 1.000 Wasserstoff-Tankstellen bis zum Jahr 2030 aus. Der Wasserstoffbedarf wird auf 180.000 t/a im Jahr 2030 abgeschätzt [40]. Da es sich bei dieser Studie um ein nicht öffentlich zugängliches Dokument handelt, sind keine weiteren Details zur Methodik verfügbar. Es wird aber davon ausgegangen, dass der Ansatz in Analogie zum „EU Power Train Report“ steht.

Die Marktdurchdringung an wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen gemäß des Basisszenarios A der BMU-Leitstudie 2011 orientiert sich wie die Studie des ZSWs an dem übergeordneten Ziel des Energiekonzepts der Bundesregierung, die Treibhausgasemissionen bis 2050 um mindestens 80 % zu senken. Zudem berücksichtigt das Basisszenario A weitere Ziele hinsichtlich des EE-Ausbaus und der Effizienzsteigerung, u. a. das Ziel, den Stromverbrauch um 25 % bis

2050 zu mindern (bezogen auf 2008) [41]. Es stellt bezüglich des EE-Ausbaus das mittlere Szenario dar und prognostiziert einen Anteil von 50 % an der Fahrleistung des PKW-Verkehrs durch PHEV und BEV. Die verbleibenden 50 % der Verkehrsleistung im Individualverkehr werden durch Wasserstoff-Fahrzeuge und sonstige Hybridfahrzeuge erbracht. Damit bleibt das Basisszenario A der Leitstudie aus Sicht des Verkehrssektors konservativ im Vergleich zu anderen Studien wie bspw. GermanHy. Die Marktdurchdringung der einzelnen Antriebsstränge wird durch eine ökonomische Optimierung mit Hilfe eines Flottensimulationsmodells auf Basis der Total Cost of Ownership und in Verbindung mit einer Minimierung der CO₂-Emissionen ermittelt. Unter den getroffenen Annahmen im Basisszenario A können FCEVs langfristig einen stabilen Marktanteil erreichen. Der FCEV-Anteil am Individualverkehr steigt auf ca. 23 % bis zum Jahr 2050. Auch für die anderen Fahrzeugsegmente des Straßenverkehrs wurde durch eine Plausibilisierung der Anteil der einzelnen Endenergieträger an der Verkehrsleistung bestimmt.

Abbildung 31 fasst für die einzelnen Fahrzeugsegmente den relativen Anteil der Wasserstoff-Fahrzeuge an der Verkehrsleistung bis zum Jahr 2050 zusammen.

Mit gut 3 % Anteil in den Segmenten PKW und LNF leistet der Wasserstoff-Antrieb bereits im Jahr 2025 einen deutlichen Beitrag zur gesamten Fahrleistung. Erwartungsgemäß setzt sich der Wasserstoff-Antrieb im LKW-Segment (> 3,5 t) erst relativ spät durch. Der Einsatz von Wasserstoff im öffentlichen Personenverkehr (Busse) erfolgt überraschenderweise ebenfalls erst ab 2030, erreicht dann aber in 2050 einen Anteil von knapp 16 %.

Diese Prognose erscheint sehr konservativ. Eine betriebswirtschaftlich vertretbare Umstellung auf Wasserstoffantrieb im öffentlichen Nahverkehr erfordert jedoch eine graduelle Anschaffung der Busse, welche eine Lebensdauer von bis zu 15 Jahren erreichen. Eine Umstellung des Fuhrparks kann also inklusive Erprobungsphase bis zu

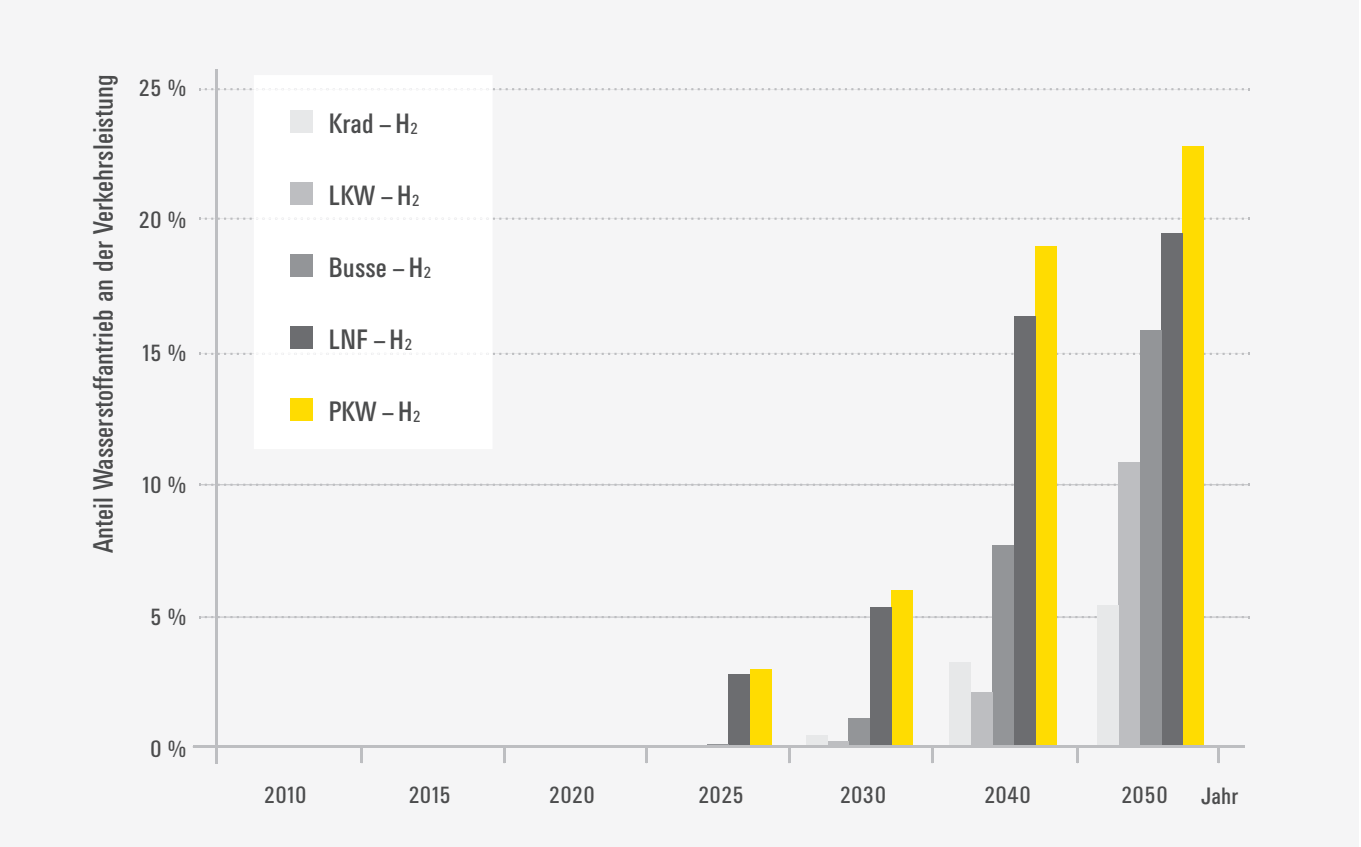


Abbildung 31: Anteil des Wasserstoffantriebs in den einzelnen Segmenten des Straßenverkehrs gemäß Basisszenario A der BMU-Leitstudie 2011

Kapitel 5

20 Jahren dauern. Die Hansestadt Hamburg ist Beispiel eines Verkehrssystems, für welches ab 2020 nur noch emissionsfreie Busse beschafft werden sollen. Auch Köln und Berlin sind im Bereich Busse aktiv und in NRW wird derzeit die Ankoppelung von Wasserstoff-Bustankstellen an bestehende Wasserstoff-Pipelines geprüft.

Insgesamt entspricht das Resultat der BMU-Leitstudie 2011 den prinzipiellen Aussagen der Industrieinitiative H2 Mobility zur Marktdurchdringung des Wasserstoffantriebs im PKW-Segment. In der Studie des ZSWs werden erhebliche Anteile an der Wasserstoff-Mobilität jedoch erst ab 2030 erwartet.

Mit Kenntnis der mittleren jährlichen Fahrleistung eines Fahrzeugs kann aus der Verkehrsleistung in den einzelnen Fahrzeugsegmenten der Kfz-Bestand abgeleitet werden. Die mittlere jährliche Fahrleistung für LNF und PKWs wurde aus Daten des Statistischen Bundesamtes ermittelt und für die Zukunft bis 2050 als konstant angenommen. Der Bestand an Wasserstofffahrzeugen kann daraus

mit Hilfe des relativen Wasserstoff-Anteils an der gesamten Verkehrsleistung (siehe Abbildung 31) berechnet werden. Für die Fahrzeugsegmente LKW und Bus musste aufgrund der Datenlage eine alternative Berechnungsmethode gewählt werden. Ausgehend von den Bestandszahlen für LKWs und Busse des Statistischen und des Kraftfahrt-Bundesamtes (Basisjahre 2005 und 2010) wurde aus den Prognosedaten zur Entwicklung der Verkehrsleistung der zukünftige LKW- und Bus-Bestand abgeleitet. Anhand der Zahlen zur Marktdurchdringung des Wasserstoff-Antriebs (siehe Abbildung 31), kann damit der zukünftige Bestand an wasserstoffbetriebenen LKWs und Bussen ermittelt werden. Die Bestandszahlen für Deutschland sind in Anhang 9 zusammengefasst.

Ein Rückschluss von den für Deutschland ermittelten Daten auf den Bestand an wasserstoffbetriebener Fahrzeuge in Baden-Württemberg erfolgt in Analogie zur Studie des ZSWs. Mit Hilfe der Daten des Kraftfahrt-Bundesamtes der Jahre 2001 bis 2012 wurde der relative Anteil des Fahrzeugbestands Baden-Württembergs in den einzel-

nen Fahrzeugsegmenten bestimmt und daraus die Absolutwerte für Baden-Württemberg berechnet. Dabei wurde ein sogenannter Baden-Württemberg-Faktor eingerechnet. Die Entwicklungspläne der CEP zeigen, dass Baden-Württemberg zu den ersten Modellregionen gehört, in der die Wasserstoff-Mobilität etabliert werden soll, vgl. mit Kapitel 2.4. Jede vierte Tankstelle des 50-Tankstellen-Programms wird in Baden-Württemberg errichtet werden. Ebenso werden sich die Flottenversuche in der Demonstrationsphase u. a. auf dieses Bundesland konzentrieren. Aus diesem Grund wird der Anteil an wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen in Baden-Württemberg am deutschen Gesamtbestand im Jahr 2015 zu 25 % angenommen, um dann bis zum Jahr 2025 auf den normalen statistischen Wert des Bestandes an konventionellen Fahrzeugen zurückzugehen (für PKWs bspw. auf knapp 14 %).

In Abbildung 32 und Abbildung 33 sind die Zahlen für Baden-Württemberg nach Fahrzeugsegmenten grafisch aufbereitet. Die

berechneten Bestandszahlen sind durch eine Näherungskurve dargestellt. In Abbildung 32 sind zum Vergleich neben den eigenen Zahlen auch die Prognosedaten der Studie des ZSWs und der H2-Mobility-Initiative wiedergegeben.

Es wird deutlich, dass nach [41] und [40] die Marktdurchdringung der Wasserstoff-Antriebe ca. 5 Jahre früher erfolgt als in [44] beschrieben. Dies lässt sich auch für die leichten Nutzfahrzeuge aus Abbildung 33 ableiten. Die jährlichen Steigerungsdaten lassen eine Sättigung der Marktdurchdringung ab dem Jahr 2050 vermuten. Dabei muss beachtet werden, dass dies nach [41] für die Verkehrsleistung gilt und nicht unmittelbar auf den Kfz-Bestand übertragen werden kann. Durch die sinkende Bevölkerungszahl in Deutschland wird zukünftig ebenfalls von einer rückläufigen Verkehrsleistung und kleineren Kfz-Bestandszahlen ausgegangen; Daten dazu sind in [41] zu finden. In dieser Arbeit wird von einer konstanten jährlichen Laufleistung pro Fahrzeug ausgegangen. Sinkt zukünftig ebenfalls

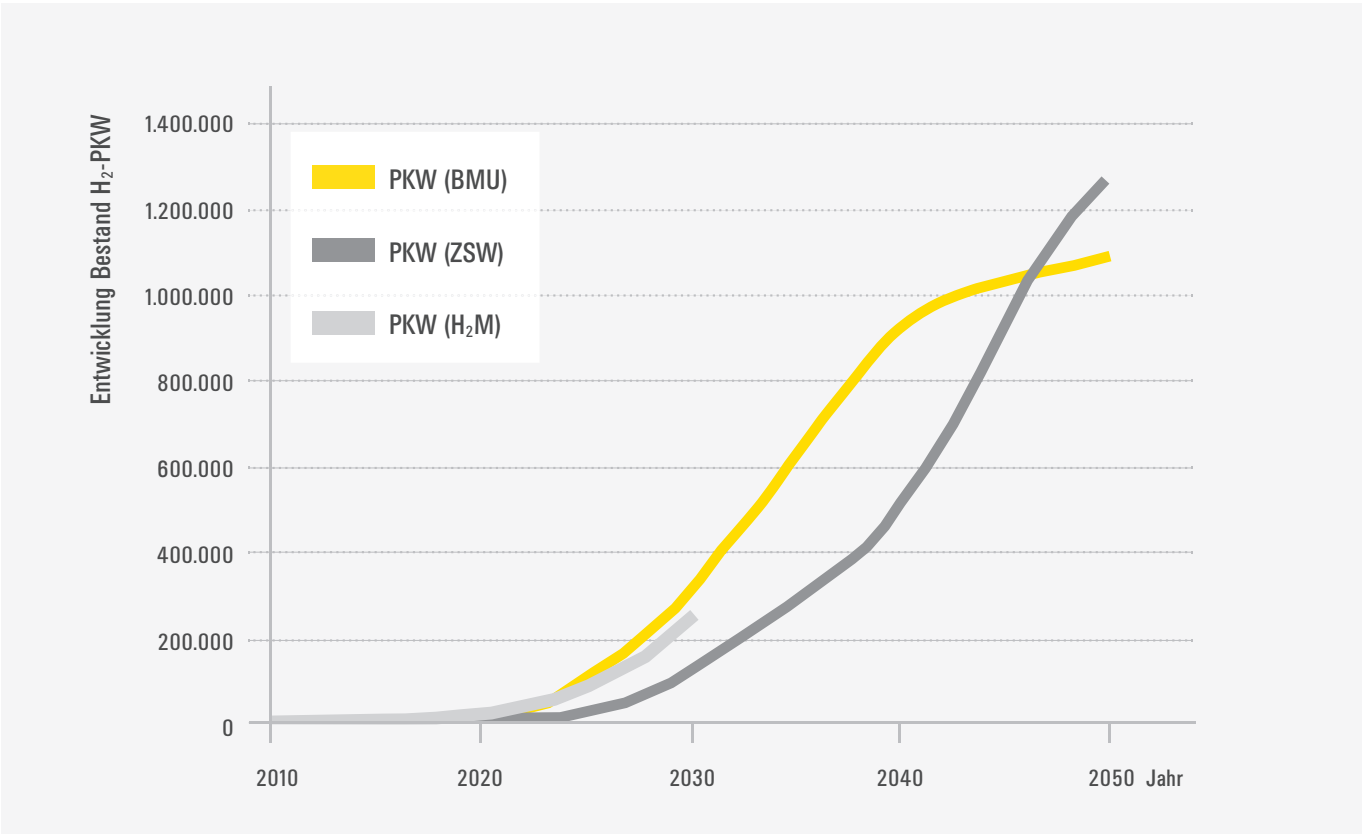


Abbildung 32: Entwicklung des wasserstoffbasierten PKW-Bestandes in Baden-Württemberg nach [41] = BMU, [44] = ZSW und [40] = H2M

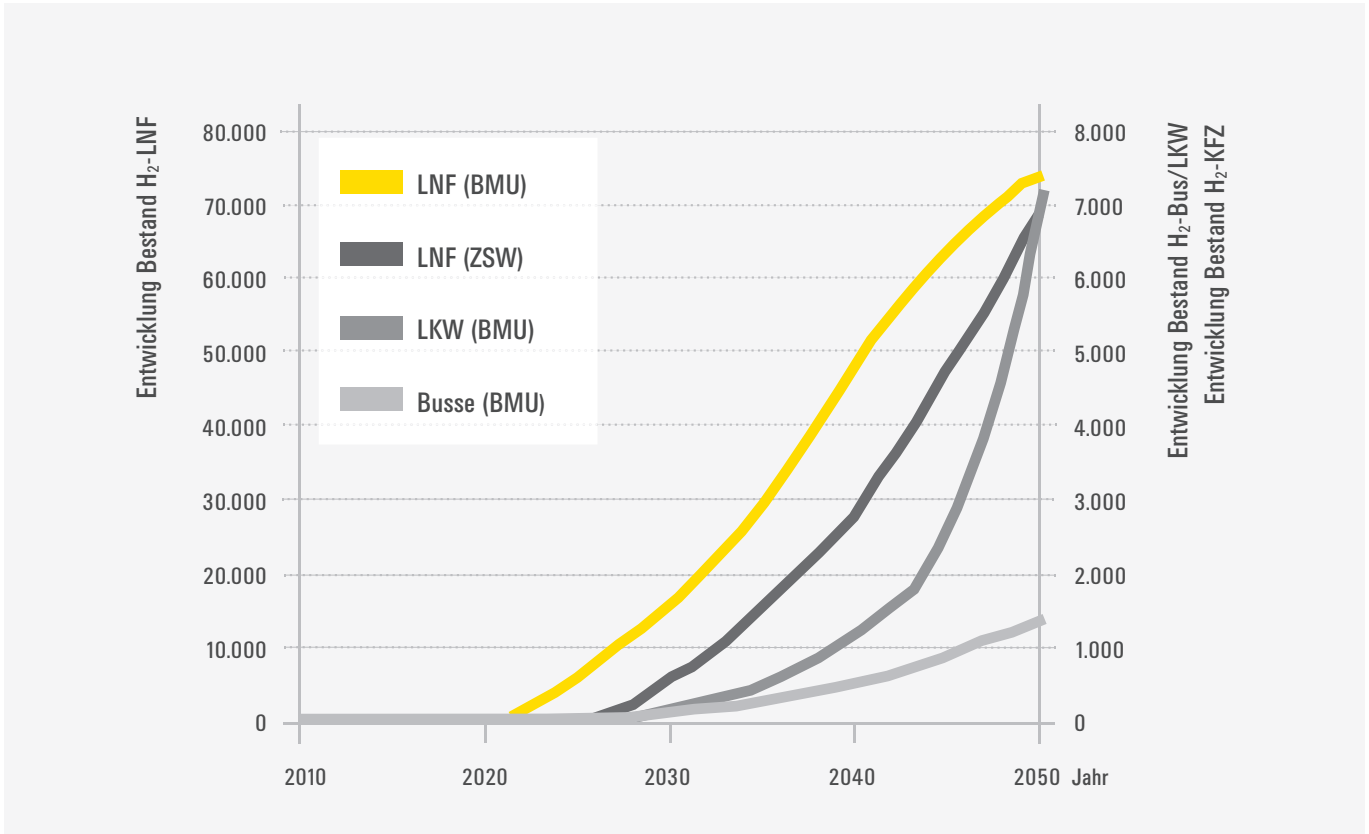


Abbildung 33: Entwicklung des wasserstoffbasierten Bestandes an LNF, LKW und Bussen in Baden-Württemberg gemäß der untersuchten Studien [41] = BMU und [44] = ZSW

die jährliche Laufleistung pro Kfz (wie in [41] prognostiziert), würden sich höhere Kfz-Bestandszahlen ergeben als hier berechnet. Letztendlich hat dies allerdings keinen Einfluss auf den zukünftigen Wasserstoffbedarf, da dieser nur von der Verkehrsleistung und der angenommenen Effizienz der FCEVs abhängt. Die Daten hierzu werden im folgenden Kapitel dargestellt und diskutiert.

5.2 PROGNOSE DES VERKEHRSBEDINGTEN WASSERSTOFFBEDARFS

Anhand der spezifischen Verbräuche einzelner Verkehrsträger und der prognostizierten Verkehrsleistungen wird in der BMU-Leitstudie der Endenergieverbrauch nach den einzelnen Energieträgern ermittelt [41]. Konsequenterweise sind in den Endenergieverbräuchen auch die Anteile des Energieverbrauchs für Erzeugung, Transport, ggf. Speicherung und Verteilung enthalten. Der zukünftig erwartete Technologiefortschritt einzelner Nutzungspfade wird durch sogenannte Effizienzfaktoren berücksichtigt, die angeben, mit welcher Effizienzsteigerung bezogen auf ein Basisjahr zu rechnen ist. Damit kann aus der Datenlage der Leitstudie nicht direkt auf den Wasserstoffbedarf des Straßenverkehrs geschlossen werden.

Stattdessen wird der Wasserstoffbedarf auf Basis des spezifischen Kraftstoffverbrauchs der einzelnen Fahrzeugsegmente und der prognostizierten Verkehrsleistung berechnet. Die Weiterentwicklung der Antriebstechnik und der damit einhergehende Effizienzgewinn werden über fahrzeugspezifische Effizienzfaktoren berück-

sichtigt. Die Verbrauchswerte stützen sich auf aktuelle Daten, als Basisjahr wird 2010 verwendet. Der beschriebene zu erwartende Effizienzgewinn basiert im Wesentlichen auf Expertenmeinungen und wird durch Näherungsfunktionen für die einzelnen Jahre berechnet. Tabelle 11 fasst die Annahmen zur Berechnung des Wasserstoffbedarfs zusammen.

Der so ermittelte Wasserstoffbedarf für Baden-Württemberg ist in Abbildung 34 für die einzelnen Fahrzeugsegmente dargestellt. Eine detaillierte Darstellung in Tabellenform ist im Anhang enthalten und zeigt auch den Wasserstoffbedarf für die anderen beiden Szenarien. Analog zu den Kfz-Bestandszahlen ist in den Jahren bis 2020 nur mit einem geringen Wasserstoffbedarf für den Verkehr zu rechnen (2015: 70 t/a und 2020: 456 t/a). Danach steigt der Bedarf erheblich an und liegt im Jahr 2025 bereits bei über 18.000 t/a für alle Fahrzeugsegmente. Dies muss sich auch in dem Wasserstoff-Tankstellennetz widerspiegeln und wird ausführlich im nächsten Kapitel diskutiert.

Eine genauere Betrachtung der einzelnen Fahrzeugsegmente macht deutlich, dass der Wasserstoffbedarf nahezu vollständig im Individualverkehr (PKW und LNF) anfällt. Auch dies wird bei der Entwicklung einer Roadmap für das Wasserstoff-Tankstellennetz berücksichtigt werden. Eine möglicherweise schnellere Marktdurchdringung des Wasserstoffantriebs im öffentlichen Nahverkehr hätte auf diese Roadmap keinen wesentlichen Einfluss, da selbst eine Verdoppelung der Verkehrsleistung im Sektor Busse nur einen unerheblich höheren Wasserstoffbedarf verursachen würde.

Tabelle 11: Annahmen zur Berechnung des Wasserstoffbedarfs in den einzelnen Fahrzeugsegmenten

	Einheit	PKW	Bus	LNF	LKW
Verbrauch 2010	[kg/100 km]	1,1	14,0	2,5	15,0
Laufleistung	[km/a]	15.000	44.000	21.500	39.500
Effizienzfaktor					
2020	[%]	90	87	89	85
2030	[%]	83	77	79	73
2040	[%]	78	71	73	64
2050	[%]	75	67	70	60

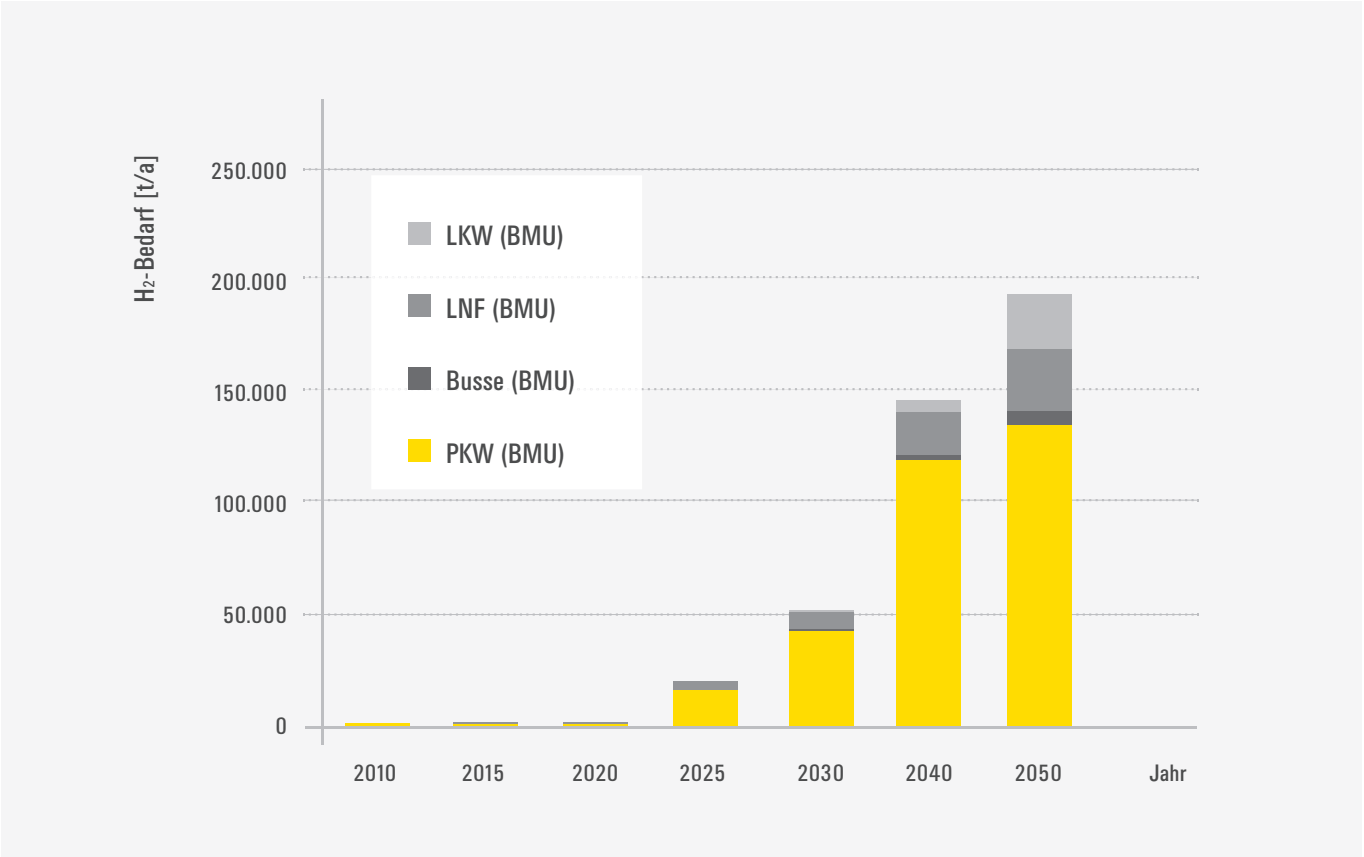


Abbildung 34: Entwicklung des jährlichen Wasserstoffbedarfs in Baden-Württemberg anhand des prognostizierten Bestands an Wasserstoff-Fahrzeugen

5.3 ENTWICKLUNG EINER TANKSTELLEN-INFRASTRUKTUR

Der Wasserstoffbedarf für Baden-Württemberg bis zum Jahre 2050 stellt die wesentliche Grundlage für das zukünftige Wasserstoff-Tankstellennetz im Land dar. Weiterhin wirken sich die gewählte Größe der Tankstellen (vgl. mit Tabelle 8 auf Seite 48), der Zeitraum der Markteinführung, sowie die politischen und gesetzlichen Rahmenbedingungen auf den Aufbau des Wasserstoff-Tankstellennetzes aus.

In einer ersten Abschätzung wird davon ausgegangen, dass eine Tankstelle der Größe M im Dauerbetrieb eine durchschnittliche Jahreskapazität von ca. 122 t/a hat (durchschnittliche Wasserstoffabgabe von 336 kg/d). Damit wären im Jahr 2015 eine und im Jahr 2020 erst vier Tankstellen nötig. Fünf Jahre später (2025) müssten dann aber bereits 150 und weitere zehn Jahre später (2030) über 400 Tankstellen in Betrieb sein. Dieses Beispiel macht deutlich, dass eine Roadmap zur Errichtung und zum Ausbau des Wasserstoff-

Tankstellennetzes notwendig ist. Zum einen muss zum richtigen Zeitpunkt eine möglichst flächendeckende Infrastruktur vorhanden sein, um für Wasserstoff-Fahrzeuge eine breite Akzeptanzbasis zu bekommen (Lösung des Henne-Ei-Problems), zum anderen muss der Aufbau einen ökonomisch gangbaren Weg darstellen, um Investoren kalkulierbare Risiken bieten zu können.

Allgemein wird in der entsprechenden Literatur der Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur durch drei Phasen beschrieben, vgl. auch mit Kapitel 2.5.

Phase 1: Die erste Phase des Aufbaus ist durch den Forschungs- und Entwicklungs- sowie den Demonstrationscharakter der Projekte dominiert, die größtenteils durch Unterstützung der öffentlichen Hand ermöglicht werden. Wichtige Ziele sind eine technologische Weiterentwicklung der benötigten Komponenten, ein Machbarkeitsnachweis der Gesamtkonzepte, eine Verbesserung der Hardware

durch Erfahrungen aus dem Probetrieb, die Entwicklung von Standards sowie eine Platzierung des Themas in der öffentlichen Wahrnehmung. In Deutschland wird diese Phase seit 2006 stark durch das NIP und seinem Leuchtturmprojekt CEP geprägt.

Phase 2: Die zweite Phase wird als Marktvorbereitung bezeichnet. In dieser Phase geht es darum, die Zuverlässigkeit der standardisierten Anlagen im realen Betrieb und in größerer Stückzahl unter Beweis zu stellen. Die Standardisierung wird dazu genutzt, Serienprodukte zu etablieren und Kosten zu senken. Am Ende der Marktvorbereitung muss die allgemeine Nutzerakzeptanz vorhanden sein, u. a. durch Verfügbarkeit eines akzeptablen Tankstellennetzes zur Lösung des Henne-Ei-Problems. Ferner müssen in der Phase 2 von den Akteuren mögliche Geschäftsmodelle ausgearbeitet und die rechtlichen Rahmenbedingungen gesetzt werden.

Phase 3: In der dritten Phase erfolgt letztendlich die Kommerzialisierung der Technologie. Durch Skaleneffekte kommt es zu einer deutlichen Kostenreduzierung, die Technologie wird attraktiv für einen breiten Nutzerkreis. Aufgrund der großen Stückzahlen an FCEVs und auch Tankstellen muss der Aufbau ökonomisch sich selber tragen können, sofern die gesetzlichen Randbedingungen stimmen. Mit Blick auf die derzeitigen Aktivitäten in Deutschland (siehe Kapitel 2.4), befindet sich der Aufbau der Wasserstoff-Infrastruktur gerade am Übergang von Phase 1 zu 2. Mit der Realisierung der 50 Tankstellen und den Aktivitäten der Initiative H2 Mobility kann von einem gewissen Standard ausgegangen werden. Damit muss für Baden-Württemberg die Frage geklärt werden, wie in der Phase 2 das Wasserstoff-Tankstellennetz ausgebaut werden soll, um eine ausreichende Infrastruktur für eine breite Nutzerakzeptanz aufzubauen. In dieser Phase wird ein rentabler Betrieb der Tankstellen nicht möglich sein; es muss von einer Förderung/Unterstützung seitens der öffentlichen Hand ausgegangen werden. Die Herausforderung besteht also darin, eine möglichst schlanke Infrastruktur mit breiter Abdeckung zu realisieren, die in den ersten Jahren mit akzeptablem Aufwand errichtet und betrieben werden kann.

CLUSTER UND KORRIDORE

Die Roadmap zur Errichtung eines Wasserstoff-Tankstellennetzes in Baden-Württemberg orientiert sich an der regionalen Struktur der Ballungsgebiete und des Straßennetzes. Eine orientierende Darstellung mit wichtigen Entfernungsangaben ist in Anhang 9 zu finden. Unter Berücksichtigung aller größeren Städte bzw. regio-

naln Zentren lässt sich eine Rasterung von 50–90 km erkennen. Autobahnen übernehmen eine zentrale Funktion als interregionale Trassen. Vertikale Achsen sind von Nord nach Süd:

- A5: Frankfurt/M – Richtung Basel
- A81: Würzburg – Richtung Konstanz
- A7/A96: Würzburg – Richtung Lindau (teilweise in Bayern)

Horizontal lässt sich Baden-Württemberg grob unterteilen durch folgende Autobahnen und Bundesstraßen (von Ost nach West):

- B34/B31: Lindau – Lörrach
- B31/B311: Ulm – Freiburg
- A8: Ulm – Richtung Karlsruhe
- A6: Mannheim – Heilbronn und im weiteren Verlauf Richtung Nürnberg

Der Schwarzwald und das Gebiet westliche und mittlere schwäbische Alb, inklusive des schwäbischen Oberlands stellen dünn besiedelte Regionen dar. Unter Berücksichtigung der in der CEP definierten Cluster zum Ausbau einer deutschlandweiten Wasserstoff-Infrastruktur werden für diese Studie folgende regionale Cluster bzw. Zentren definiert:

- Stuttgart – Karlsruhe, als zentrales Cluster in Baden-Württemberg
- Rhein-Neckar, mit Anschluss an das Cluster Rhein-Main
- Ulm – Donau, mit Anschluss an das Cluster München
- Nördlicher Bodensee
- Südlicher Oberrhein mit Anschluss an die Schweiz (und Frankreich)

Wichtige Korridore zur Verbindung der CEP-Cluster sind die Autobahnen A5, A8 und A81. Da die Entwicklung der Roadmap für Baden-Württemberg im Einklang mit dem nationalen Aufbau der Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur stehen muss, ist vor allem in Phase 1 und 2 darauf Rücksicht zu nehmen. Insgesamt sind damit auch Kernelemente des „Diskussionspapier: Wasserstoff in Baden-Württemberg – Erzeugung, Infrastruktur und Technologie“ der Forschungseinrichtungen ZSW, DLR und Fraunhofer ISE von 2009 enthalten [45].

ANZAHL AN TANKSTELLEN

Die Quantifizierung des Tankstellenbedarfs für Baden-Württemberg richtet sich in erster Linie am Wasserstoffbedarf für das prognostizierte Verkehrsaufkommen aus. Folgende Randbedingungen und Annahmen werden dabei berücksichtigt:

- Die Anlagengröße orientiert sich gemäß Definition der H2 Mobility an den Typen S, M und L. In dieser Studie wird der Typ XS nicht weiter betrachtet.
- Mobile Tankstellen vom Typ S können bedarfsgerecht versetzt werden.
- Es wird eine mittlere Nutzungsdauer für die Tankstellen von 20 Jahren angenommen. Damit besteht der Aufbau bis zum Jahr 2030 ausschließlich aus der Neuerrichtung von Tankstellen. Ersatz für existierende Tankstellen ist erst nach 2030 notwendig.
- In den ersten Jahren werden diese Tankstellen nur eine geringe

Auslastung erfahren. Basierend auf Erfahrungen mit bisherigen Wasserstoff-Tankstellen und in Anlehnung an [43] sowie [15] wird eine steigende Auslastung prognostiziert, siehe Abbildung 43 in Anhang 9.

- Bis zum Ende eines Kalenderjahres muss mindestens die Anzahl an Wasserstoff-Tankstellen errichtet sein, die unter Berücksichtigung der mittleren jährlichen Auslastung im Folgejahr den Wasserstoffbedarf decken können.
- Die Anzahl der Tankstellen muss einerseits eine gute Abdeckung der Cluster, Regionen und Korridore gewährleisten (unter Berücksichtigung der Redundanz), andererseits bedeutet eine zu große Anzahl an Tankstellen mit geringer Auslastung eine ökonomische Belastung.

Mit Hilfe dieser Annahmen und Randbedingungen wurde der Bestand an verfügbaren Tankstellen in Baden-Württemberg gemäß Abbildung 35 entwickelt.

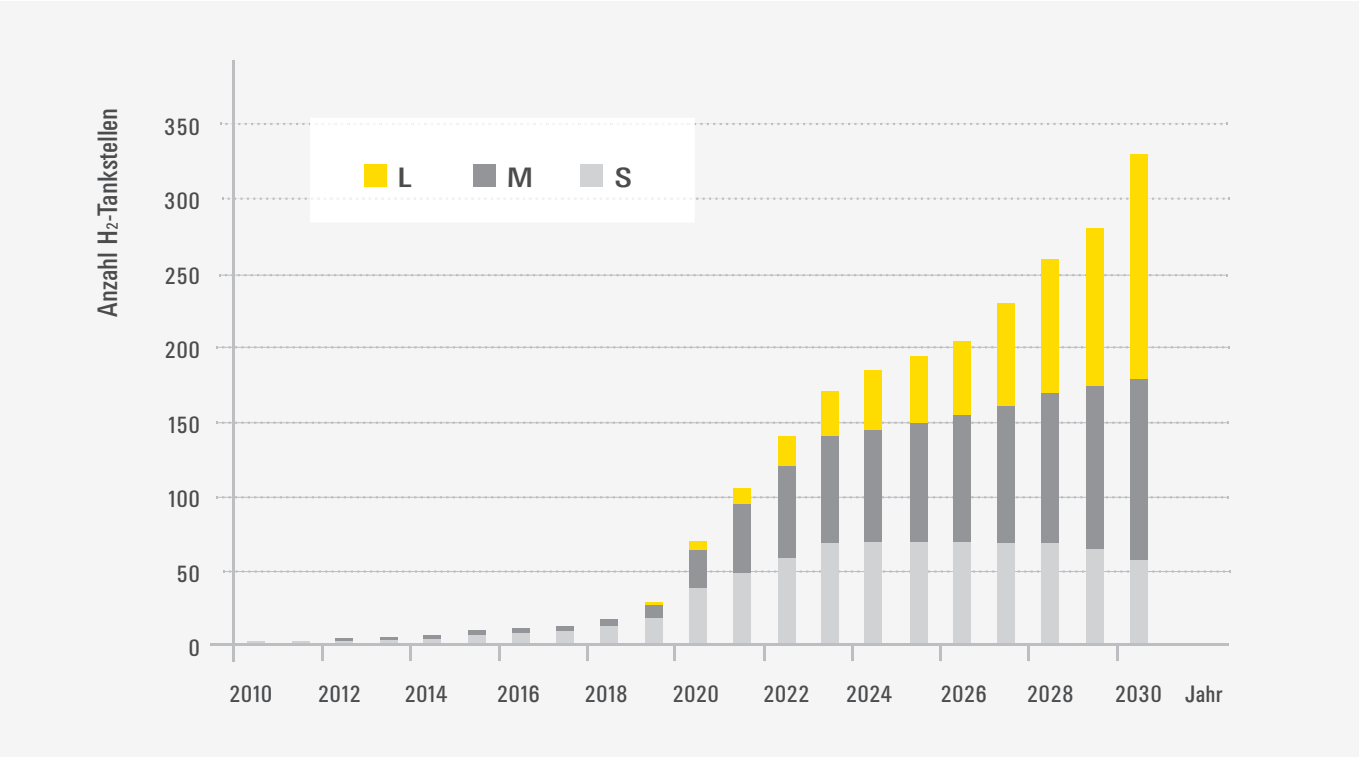


Abbildung 35: Bedarfsprognose für Wasserstoff-Tankstellen in Baden-Württemberg gemäß dem gewählten Szenario bis 2030

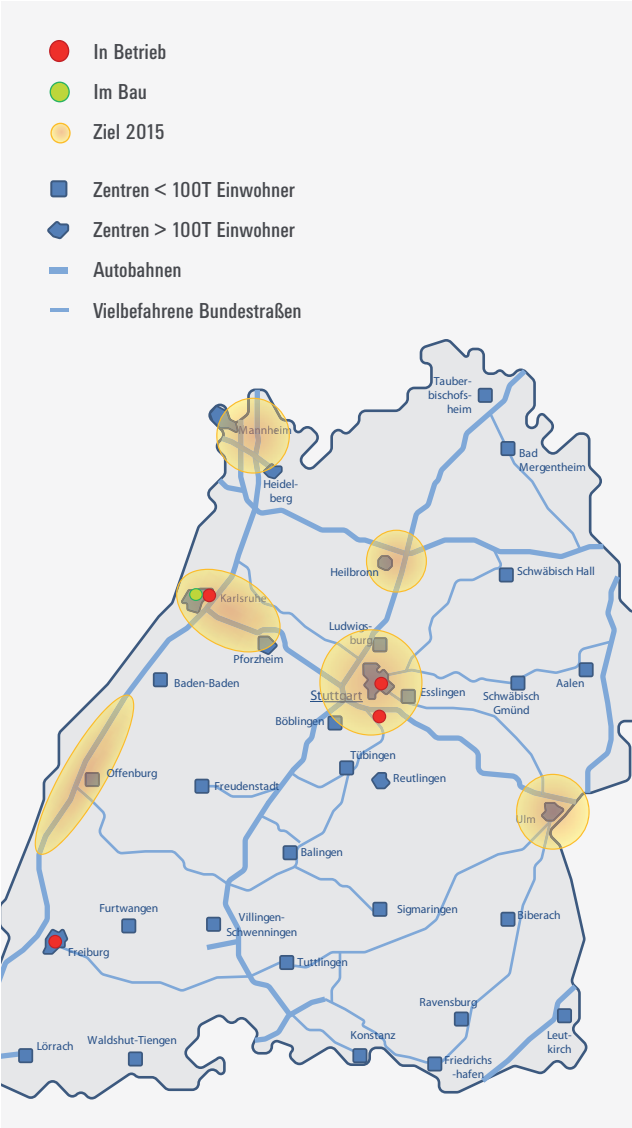


Abbildung 36: Mögliches Ausbauszenario der Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur in Baden-Württemberg bis 2015 (auf Grundlage der CEP)

PHASE 1

Anhand des Wasserstoffbedarfs und der daraus resultierenden Anzahl an Tankstellen lassen sich die einzelnen Phasen erkennen. Gemäß den CEP-Ausbauzielen werden für 2015 ca. 12 öffentlich zugängliche Tankstellen mit 700-bar-Zapfsäulen in Baden-Württemberg erwartet. Bis dahin sollten die wesentlichen Ziele der Phase 1

erreicht sein. Die strategische Platzierung dieser Wasserstoff-Tankstellen orientiert sich vor allem an dem CEP-Konzept und berücksichtigt die Ausgangslage im Land Mitte 2012 mit bereits drei existierenden und zwei im Bau befindlichen, öffentlichen Wasserstoff-Tankstellen. Im Weiteren soll vor allem das Cluster Stuttgart gestärkt werden und die Korridore zu den anderen CEP-Clustern aufgebaut werden, vgl. auch mit Abbildung 36:

- Stärkung des Clusters Stuttgart mit Erweiterung auf die Region Karlsruhe
- Anbindung des Clusters Rhein-Main über das Rhein-Neckar-Gebiet
- Anschluss des Clusters München über den Korridor A8
- Anschluss der Länder Schweiz/Frankreich über den Korridor A5

Es sei darauf hingewiesen, dass die hier beschriebene Entwicklung des Tankstellennetzes und die Angabe möglicher Standpunkte nur übergeordneten Überlegungen folgen, aber keine Ausbauempfehlung darstellt. Die Entscheidung für einen konkreten Standort ist ein deutlich komplexerer Prozess unter Beteiligung vieler Akteure.

PHASE 2

Die zweite Phase dauert bis ca. 2020/21 und stellt die kritische Phase während des Ausbaus einer Wasserstoff-Infrastruktur dar. Sie dient im Wesentlichen als Marktvorbereitung zur Lösung des Henne-Ei-Problems und zum Aufbau einer Kundenakzeptanz, verlangt aber von den Akteuren größere Investitionen, ohne dabei sofort einen entsprechenden Mittelrückfluss zu generieren. In der zweiten Phase wird dabei das Ziel verfolgt, eine hohe Abdeckung bezogen auf die Bevölkerung im Land zu erreichen. Eine hohe Abdeckung in der Fläche wird erst mit der Phase 3 möglich werden. Der Ausbau konzentriert sich deshalb auf die regionalen Zentren mit großer Bevölkerungsdichte und eine Vernetzung durch Korridore. Anhand der Bevölkerungszahlen ergeben sich folgende regionale Zentren und Cluster:

- Stuttgart – Karlsruhe
- Rhein-Neckar-Gebiet
- Donau-Iller-Gebiet
- Bodenseeregion

Die Verbindung dieser Zentren erfolgt über folgende Korridore:

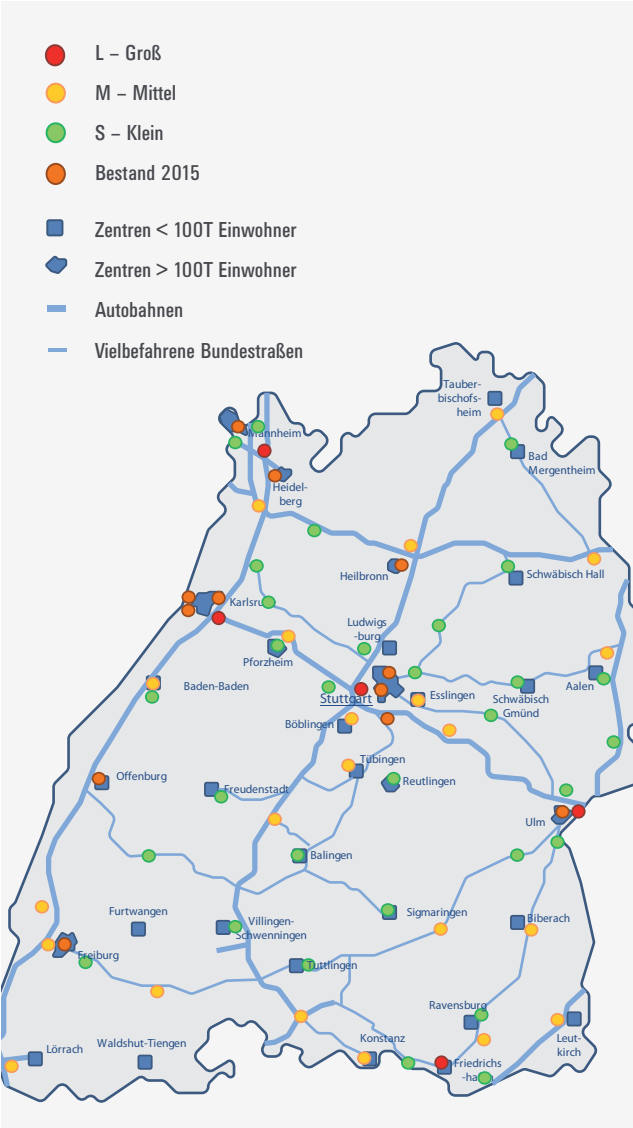


Abbildung 37: Mögliches Ausbauszenario der Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur in Baden-Württemberg bis 2020 (auf Grundlage des Basis-szenarios A der BMU-Leitstudie 2011)

- Autobahnen A5, A6, A8 und A81
- Bundesstraßen B10, B14, B29, B30, B31, B290 und B311

Gemäß Wasserstoffbedarf werden bis Ende 2019 ca. 30 Tankstellen benötigt, in 2020 und 2021 jedoch bereits ca. 70 bzw. über 100 Tankstellen. Während zu Beginn der Phase 2 Tankstellen vom Typ S vor allem die Redundanz in den regionalen Zentren erhöhen

sollen, dienen sie zum Ende der Phase 2 überwiegend der Absicherung der Korridore und Erweiterung des Netzes in der Fläche um die Cluster herum (vgl. mit Abbildung 37 – wiederum keine finale Ausbauempfehlung).

Es wird davon ausgegangen, dass mit diesem Ausbauszenario bis 2020 eine Akzeptanz vergleichbar zum CNG-Tankstellennetz erreicht werden kann. Stand Anfang 2012 gab es deutschlandweit über 900 CNG-Tankstellen, davon befanden sich über 100 Tankstellen in Baden-Württemberg. Die Anzahl der Erdgasautos in Deutschland betrug am 1. Januar 2011 nach Angaben des Kraftfahrtbundesamtes 71.519 Fahrzeuge. Es wird abgeschätzt, dass davon ca. 10.000 CNG-Fahrzeuge in Baden-Württemberg angemeldet sind. Damit entspricht die Wasserstoff-Infrastruktur des Jahres 2020 in etwa der heutigen Verbreitung von Erdgas-Fahrzeugen.

Ein weiterer Vergleich kann mit dem Ausbauprogramm der California Fuel Cell Partnership (CaFCP) gezogen werden (siehe auch Kapitel 2.5). Für Ende 2015 wird von 20 Tausend FCEVs ausgegangen, die überwiegend in fünf Ballungsräumen konzentriert sein sollen. Zur Abdeckung dieser Ballungsräume werden nach Analysen der CaFCP etwa 45 Wasserstoff-Tankstellen in den Ballungsräumen und weitere 23 Wasserstoff-Tankstellen zur Verknüpfung dieser untereinander benötigt [15].

Die Positionierung der Tankstellen bis 2020 folgt überwiegend strategischen Überlegungen, ohne dabei Rücksicht auf die möglichen Herstellungsverfahren und -quellen sowie Distributionswege zu nehmen. Aufgrund der verhältnismäßig geringen Mengen an Wasserstoff (für 2020 in Baden-Württemberg: < 500 t/a) wird nicht mit wesentlichen Auswirkungen auf die Versorgungsstruktur ausgegangen. Zum Vergleich: Deutschlandweit werden jährlich ca. 19 Mrd. Nm³ Wasserstoff erzeugt. Dies entspricht ca. 1,7 Mio. t Wasserstoff. Allerdings gelangen davon nur etwa 5–10 % in den Handel (ca. 0,1–0,15 Mio. t). Als Nebenprodukt entsteht Wasserstoff in Deutschland jährlich in der Größenordnung von 0,85 – 1 Mrd. Nm³ [24], [39].

PHASE 3

Zwischen den Jahren 2020 und 2025 beginnt die Phase 3 mit der breiten Kommerzialisierung. Bereits im Jahre 2025 wird mit über 100 Tausend FCEVs in Baden-Württemberg gerechnet, vgl. mit Abbildung 32, die über knapp 200 Tankstellen mit Wasserstoff



Abbildung 38: Wasserstoff-Tankstelle am Fraunhofer ISE, Freiburg – im Bau

versorgt werden sollen. Ab diesem Zeitpunkt steigt der Bedarf an großen Tankstellen vom Typ L deutlich an, während die Anzahl der kleinen Tankstellen stagniert oder sogar leicht rückläufig sein wird und sich die Zuwachsrate für mittlere Tankstellen abschwächt. Es wird in dieser Studie darauf verzichtet, eine räumliche Verteilung der Tankstellen für die Zeit nach 2020 vorzuschlagen. Nach 2020 wird die Wasserstoff-Infrastruktur stetig wachsen und sich in der räumlichen Verteilung der konventionellen Betankungsinfrastruktur angleichen. Dies wird überwiegend unter ökonomischen Gesichtspunkten durch die Tankstellenbetreiber erfolgen.

Wie anfangs gezeigt, wird nach der BMU-Leitstudie 2011 für das Jahr 2030 in Baden-Württemberg ein Bestand an Brennstoffzellen-Fahrzeugen von 315 Tausend FCEVs prognostiziert (deutschlandweit: 2,3 Mio. FCEVs), die dann durch 330 Wasserstoff-Tankstellen versorgt werden sollen. Jede Tankstelle muss damit durchschnitt-

lich etwa 1.000 FCEVs versorgen. Für die knapp 43 Mio. PKWs mit konventionellem Antrieb stehen ca. 14.500 herkömmliche Tankstellen zur Verfügung. Dies entspricht etwa 3.000 PKWs mit Verbrennungsmotor pro Tankstelle für Benzin und Diesel. Dieser Vergleich macht deutlich, dass bis zum Jahr 2050 die Anzahl an Wasserstoff-Tankstellen nicht linear zur Entwicklung des FCEV-Bestands steigen muss. Sobald eine komfortable Abdeckung in der Fläche erreicht ist, sind auch Konzepte zur Erhöhung der Anlagenkapazität denkbar, vgl. dazu mit Kapitel 4.4.

5.4 PERSPEKTIVEN DER ON-SITE-ERZEUGUNG

Die Analyse des vorherigen Kapitels macht deutlich, dass eine Versorgung mit CGH₂- und LH₂-Trailern nach dem Jahr 2030 an ihre Grenze stoßen wird. Tankstellen der Größe L lassen sich noch gut per Anlieferung durch Trailer versorgen. Für größere Kapazitäten werden ergänzende Konzepte benötigt, wie sie bereits in Kapitel 4.4 diskutiert wurden:

- Versorgung durch eine Pipeline
- On-site-Erzeugung durch Elektrolyse oder auch Reformierung

Beide Optionen beinhalten spezifische Vor- und Nachteile und benötigen zur Realisierung entsprechende Randbedingungen. Im Rahmen dieser Studie kann nicht abschließend bewertet werden, welche Art der Versorgung sich zu welchen Anteilen in Baden-Württemberg nach 2030 durchsetzen wird. Dazu ist eine ökonomische Optimierung auf Basis eines umfassenden Modells unter Berücksichtigung der zukünftigen Versorgung durch erneuerbare Energien notwendig. Prinzipielle Überlegungen zu dem Thema On-site- vs. zentraler Wasserstoff-Erzeugung sind in Kapitel 4.2.2

Tabelle 12: Größenabschätzung der Elektrolyse-Einheiten zur On-site-Erzeugung

Tankstellengröße	Einheit	S	M	L
Nominelle Kapazität	kg/d	212	420	1.000
Auslastung	%	80	80	80
Mittlere Kapazität	kg/d	168	336	800
Größe Elektrolyseur (24/7-Betrieb)	Nm³/h	78	155	370
Größe Elektrolyseur (16/7-Betrieb)	Nm³/h	117	232	555
Elektrische Anschlussleistung	kW	600	1.200	2.500

zu finden. Trotzdem soll im Folgenden eine Abschätzung vorgenommen werden, ob sich eine eigene On-site-Versorgung durch dezentrale Elektrolyse realisieren lässt. Die On-site-Erzeugung durch Reformierung wird hier nicht weiter vertieft, da durch den erwarteten EE-Ausbau die Option Elektrolyse eher wahrscheinlich ist. Tabelle 12 fasst die Daten zur Bestimmung der Anlagengröße des Elektrolyseurs zusammen. Wie zuvor wird dabei die Tankstellengröße gemäß Klassifikation der H2 Mobility herangezogen. Zur Bestimmung der Größe des Elektrolyseurs wird eine Volllaststundenzahl von 5.840 h angenommen. Dies entspricht einer täglichen Laufzeit von 16 h (16/7-Betrieb). Im Falle einer stromgeführten Betriebsweise (Netzdienstleistung) ist eher von weniger Betriebsstunden auszugehen.

Die abgeschätzte Größenordnung der Elektrolysemodule stellt keine besondere technische Herausforderung dar, entsprechende Produkte sind am Markt verfügbar [22]. Allerdings wird vor allem für die großen Module eine technische Weiterentwicklung notwendig sein, da die Anlagenkonzepte bisher von einem kontinuierlichen Dauerbetrieb in industriellen Anwendungen ausgehen. Für den Tankstellenbetrieb mit häufigen Start-Stopp-Prozeduren und diskontinuierlicher Betriebsweise besteht für Module jenseits einer Produktionsrate von 60 Nm³/h Handlungsbedarf.

Unter Berücksichtigung der zukünftigen Technologieentwicklung wird grob abgeschätzt, dass in einem 20-Fuß-ISO-Container ein Elektrolyseur mit einer Wasserstoff-Erzeugungsrate von 60 Nm³/h untergebracht werden kann. Für Tankstellen der Größe S wären zwei 20-Fuß-ISO-Container notwendig, für die Größe M bereits vier und für die Größe L etwa 10 Container. Sehr wahrscheinlich lässt sich durch den zusätzlichen Containerbedarf beim Typ S eine mobile Installation nicht mehr sinnvoll umsetzen. Die notwendige Verrohrung zwischen den einzelnen Containern und damit die notwendigen Abnahmen würden einen Abbau und Wiederaufbau sehr aufwändig machen. Eine stationäre Installation in Containerbauweise für Typ M wäre denkbar. Für Tankstellen des Typs L würde eine eigens errichtete Elektrolyse-Halle Vorteile bieten.

Vor allem Tankstellen der Größe M scheinen geeignet für eine Kombination mit einer On-site-Elektrolyseanlage. Je nach Aufstellungs-ort ist noch eine Containerlösung denkbar, die infrastrukturellen Voraussetzungen würden die Standortwahl nicht zu sehr eingrenzen und wären für Betreiber auf kommunaler Ebene in einer vernünftigen Größenordnung.

Elektrolyseure für Tankstellen vom Typ L erhöhen deutlich den Platzbedarf der Tankstelle und benötigen einen leistungsfähigen



Abbildung 39: Wasserstoff-Tankstelle am Fraunhofer ISE, Freiburg – abgeschlossen

Netzanschluss, der sich nicht an allen Stellen realisieren lässt. Verbunden mit genehmigungsrechtlichen Auflagen scheint eine innerstädtische Aufstellung ausgeschlossen. Als mögliche Standorte kommen eher Gewerbegebiete mit ausreichender Infrastruktur in Frage. Ebenfalls wären Autohöfe an Autobahnen oder andere größere Verkehrsknotenpunkte denkbar.

In einem weiteren Entwicklungsschritt kann die dezentrale On-site-Elektrolyseanlage auch als eine zentrale Anlage mit angeschlossener Tankstelle gedacht werden. Diese sollte stadtnah positioniert sein, um vor allem in der Phase 2 kurze Wege für den Trailertransport zu ermöglichen. Ab einer gewissen FCEV-Marktdurchdringung wird die innerstädtische Trailerversorgung an ihre Grenzen stoßen. Die stadtnahe Elektrolyseanlage könnte dann über eine Wasserstoff-Pipeline den Transport in innerstädtische Gebiete übernehmen.

WETTBEWERBSSITUATION FÜR KRITISCHE KOMPONENTEN

Aus den Betrachtungen der vorangehenden Kapitel 3 und 4 wird deutlich, dass einige Komponenten von Wasserstoff-Tankstellen gegenwärtig noch als besonders kritisch angesehen werden müssen. Im vorliegenden Kapitel wird die Wettbewerbssituation für diese als kritisch betrachteten Komponentengruppen einer Wasserstoff-Tankstelle analysiert:

- Mechanische Kompressoren
- Hochdruckspeicher
- Füllgarnituren
- Elektrolyseure zur On-site-Erzeugung von Wasserstoff

Die ermittelten Ursachen hierfür sind vielfältig und liegen bei einzelnen Komponenten bspw. an den mit den sogenannten

„Kinderkrankheiten“ der neuen Technologie einhergehenden, noch vergleichsweise hohen Ausfallhäufigkeiten. Weitere kritische Kennzeichen sind die langen Ausfallzeiten aufgrund der noch unzureichenden Service-Infrastruktur und der gleichzeitigen Abhängigkeit von einzelnen oder wenigen Anbietern, die ggf. auch nicht im Inland ihre Produktionsstätten und Servicestrukturen haben. Letztendlich führen einige Komponenten auch zu sehr hohen Investitionskosten bzw. werden nicht auf Lager vorrätig gehalten und/oder verursachen hohe Betriebs- bzw. Wartungskosten.

Somit herrscht in der gegenwärtigen Marktentwicklungsphase insgesamt eine ungünstige Zuliefersituation für die genannten Komponenten, bei der zum Teil ein einzelner Komponentenhersteller aufgrund des noch sehr kleinen Marktes ohne Wettbewerb

Tabelle 13: Hersteller von Wasserstoff-Kompressoren in Baden-Württemberg (BW), Deutschland (DE) und weltweit

Hersteller		Stadt/Land	Bemerkung
Gardner Denver Schopfheim	BW / US	Schopfheim	
J.A. Becker & Söhne	BW	Erlenbach	Erdgas
Josef Mehrer	BW	Balingen	
KNF-Neuberger	BW	Freiburg,	
Air Products	DE	Bochum	LH ₂
Bauer Kompressoren	DE	München	CNG
Hofer Hochdrucktechnik	DE	Mülheim	
Hydrogenics	DE / CA	Gladbeck	
Köhler & Hörter	DE	Hagen	
Linde AG	DE	München	
Maximator	DE	Nordhausen	
Sera – Seybert & Rahier	DE	Immenhausen	
Brotie Technology	CN	Beijing	
Cryostar SAS	FR	Hésingue	LH ₂
Greenfield	CH	Birsfelden	H ₂
Haskel International	US	Burbank	
Hydro-Pac	US	Fairview	
PDC Machines	US	Warminster	H ₂
RIX Industries	US	Benica	

Tabelle 14: Hersteller von Hochdruckspeichern in Baden-Württemberg (BW), Deutschland (DE) und weltweit

Hochdruckspeicher		Stadt / Land	Bemerkung
MCS International	D	Dinslaken	CNG 300 bar
EFEREST	D	Wilnsdorf	H ₂ < 1000 bar
Dyetek EUROPE	D (CA)	Ratingen	H ₂ 700 bar
Faber Industrie	IT	Cividale del Friuli	H ₂ < 1000 bar
Quantum Fuel Systems Techn.	US	Lake Forest	
Fiba Technologies	US	Millbury	
Hexagon Composites	NO	Ålesund	H ₂ < 1000 bar

agiert und bisher einen geringen Innovationsdruck spürt. Aus Sicht des Betreibers fehlen weitere, kompetente Hersteller für diese Komponenten.

Anhand der Internet- und Datenbankrecherche konnte nachgewiesen werden, dass für verfahrenstechnische Standard-Komponenten von Wasserstoff-Tankstellen wie bspw. Ventile oder elektrische Bauteile zum Teil hunderte potenzielle Anbieter existieren. In diesem Bereich kann die Versorgungssituation als unkritisch angesehen werden, da es keiner weitreichenden Spezialisierung auf das neue Einsatzfeld bedarf. Gleichzeitig ist aufgrund der noch vergleichsweise geringen Absatzvolumina gegenwärtig noch nicht abschätzbar, welcher Anteil dieser Unternehmen sein Produktportfolio in Zukunft explizit auf das neue Einsatzfeld ausrichten bzw. erweitern wird.

Die folgende Analyse des Wettbewerbs erfolgt im Rahmen einer Unternehmensrecherche in Firmendatenbanken und einer allgemeinen Internetrecherche.

6.1 HERSTELLER VON WASSERSTOFF-KOMPRESSOREN

Die Betrachtung von mechanischen Kompressoren zur Verdichtung von Wasserstoff inklusive der Kostenanalyse zeigt, dass sich hier ein großes Umsatzpotenzial bietet, da auf dieses Bauteil ein vergleichsweise großer Anteil an den Investitionskosten der Wasserstoff-Tankstelle entfällt und die erwarteten Stückzahlen ausreichend groß sind (vgl. mit Kapitel 4.4.2 und 5.3). Aus den Experten-

gesprächen ergab sich ein heterogenes Bild hinsichtlich deren Zuverlässigkeit. Weitere Anbieter könnten bei diesen Komponenten einen zusätzlichen Innovationsimpuls erzeugen und die Anschaffungskosten sinken lassen.

Insgesamt wurden durch die Marktrecherche weltweit 19 Hersteller identifiziert, die Wasserstoff-Kompressoren produzieren (siehe Tabelle 13). Deutschland als auch Baden-Württemberg besitzen hier eine gute Ausgangslage, da es traditionell eine ausgeprägte Zuliefererstruktur im Land gibt und Wasserstoff als technisches Gas vertraut ist. Zudem beschäftigen sich zahlreiche Hersteller mit der Erschließung neuer Märkte, wie u. a. auch die Entwicklungsarbeiten von Linde auf diesem Gebiet zeigen.

6.2 HERSTELLER VON HOCHDRUCKSPEICHERN

Die Kaskaden-Speicherelemente nehmen nach den Kompressoren den zweitgrößten Investitionskostenanteil beim Aufbau einer Wasserstoff-Tankstelle ein. Gerade im Hochdruckbereich existieren jedoch gegenwärtig nur wenige Anbieter von Hochdruckspeichern für Wasserstoff. Insgesamt konnten lediglich sieben Unternehmen (siehe Tabelle 14) weltweit identifiziert werden, die Hochdruckspeicher herstellen. Gemessen an dieser Zahl ist Deutschland gut vertreten, allerdings gibt es keine Akteure in Baden-Württemberg. Da die Verfügbarkeit und Kosten für Hochdruckspeicher hinsichtlich der flexiblen Erweiterung und Anpassung an den wachsenden Markt als kritisch zu bewerten sind, muss hier die Zulieferstruktur mit dem Aufbau der Tankstellen-Infrastruktur verbessert werden.

6.3 HERSTELLER VON FÜLLGARNITUREN

Die Füllgarnitur muss speziell für den Wasserstoff-Tankstellenbereich entwickelt und gefertigt werden und besteht aus Abreißkupplung, Füllschlauch und Betankungskupplung. In den Expertenbefragungen ergab sich, dass im Zusammenhang mit den Füllgarnituren zum einen zahlreiche Probleme bei intensiver Nutzung beschrieben wurden und zum anderen ein Engpass in der Versorgungssituation aufgetreten war.

Im Rahmen der Unternehmensrecherche konnten weltweit zehn Unternehmen ermittelt werden, die zumindest potenziell Füllgarnituren für Wasserstoff-Tankstellen herstellen könnten. (Tabelle 15) Teilweise bieten diese derzeit nur Füllgarnituren für Erd- oder Autogas an. Wie auch bei den anderen Komponenten ist Deutschland als Industrienation gut vertreten; es konnten aber keine Hersteller in Baden-Württemberg identifiziert werden.

Weltweit gibt es somit zwar mehrere Hersteller für diese speziellen Füllkupplungen, jedoch ist mit den für Europa relevanten Zertifizierungen derzeit ausschließlich ein einziger Kupplungshersteller bekannt. Einem Großteil der Anbieter fehlen für Wasserstoff-Tankstellen noch die nötigen europäischen Zertifizierungen

für Wasserstoff. Asiatische und US-amerikanische Unternehmen konzentrieren sich mit der Auslegung ihrer Füllgarnituren zum Teil auf den jeweiligen heimischen Markt. Erhöhter Wettbewerb wäre aus Betreiber- und Investorensicht in diesem Bereich wünschenswert.

6.4 HERSTELLER VON ELEKTROLYSESYSTEMEN

Obwohl Elektrolysesysteme nicht unmittelbar zur eigentlichen Wasserstoff-Tankstelle gehören, spielen sie zur Erzeugung des Wasserstoffs eine wichtige Rolle und nehmen auch eine wichtige Schlüsselposition im Konzept einer nachhaltigen Mobilität ein. Bereits heute werden Tankstellen mit einer On-site-Elektrolyse betrieben, siehe Kapitel 2.3. In den weiteren Ausbaustufen wird eine deutlich höhere Marktdurchdringung mit großen Stückzahlen erwartet. Damit zählt die Elektrolyseeinheit zu den kritischen Komponenten, zumal weltweit nur wenige Firmen geeignete Elektrolyseure anbieten, siehe Tabelle 16.

Grundsätzlich verfügen Deutschland und auch Baden-Württemberg im internationalen Kontext über Elektrolyse-Hersteller und können auf eine lange Tradition in diesem Bereich zurückblicken. Zudem ist durch die zunehmende Bedeutung der Wasserstoff-Technologie

Tabelle 16: Auswahl geeigneter Hersteller von Elektrolysesystemen in Baden-Württemberg (BW), Deutschland (DE) und weltweit

Hersteller		Stadt/Land	Bemerkung
Wasserelektrolyse Hydrotechnik	BW	Karlsruhe	AEL
ELB Elektrolysetechnik	DE	Butzbach	AEL
Enertrag HyTec	DE	Dauerthal	AEL
h-tec Systems	DE	Lübeck	PE-MEL
Hydrogenics	DE/BE/CA	Mississauga	AEL
CETH	FR	Villebon-sur-Yvette	PE-MEL
H2Logic	DK	Herning	AEL
Helion	FR	Aix en Provence	PE-MEL
ITM Power	UK	Sheffield	PE-MEL
NEL Hydrogen	NO	Notodden	AEL
Piel	IT	Ponsacco	AEL
Proton OnSite	US	Wallingford	Sheffield
Teledyne	US	Hunt Valley	AEL

im Rahmen des Ausbaus erneuerbarer Energien eine leichte Belebung des Marktes zu beobachten. Jedoch werden heutige Anlagen und Systeme größtenteils in Kleinserie oder Einzelanfertigung hergestellt, sodass aktuell keine Skaleneffekte zu beobachten sind. Vor allem bei der PEM-Technologie gibt es zudem starke ausländische Konkurrenz und Bestrebungen, diese Produkte auch am deutschen Markt zu etablieren.

6.5 FAZIT DER KOMPONENTENRECHERCHE

Baden-Württemberg ist als industrielles Kernland im Bereich der Zulieferindustrie für verfahrenstechnische Standard-Komponenten sehr gut aufgestellt. Für die kritischen Komponenten von Wasserstoff-Tankstellen kann jedoch für das Land gegenwärtig keine zufriedenstellende Wettbewerbsposition festgestellt werden. Die potentielle Zulieferindustrie hat sich auf diesen Anwendungsbe-reich bis jetzt noch nicht fokussiert. Aufgrund der breit aufgestellten

verfahrenstechnischen Kompetenzen der mittelständisch geprägten baden-württembergischen Industrie wird jedoch davon ausgegangen, dass die Unternehmen diesen Anwendungsbereich bedienen werden, sobald das Absatzpotenzial steigt. Doch sollte es für baden-württembergische Unternehmen von grundlegendem Interesse sein, sich bereits in der frühen Phase der Markteinführung an den technologischen Entwicklungen zu beteiligen, um langfristig an den Marktpotenzialen partizipieren und Lernkurveneffekte frühzeitig realisieren zu können. Gezielte Marktunterstützungsmaßnahmen in Baden-Württemberg könnten in der Einführungsphase der noch neuen Technologie die erforderlichen Bemühungen der Industrie anstoßen helfen.

Beschäftigungseffekte in der Zulieferindustrie sollen an dieser Stelle nicht quantifiziert werden. Spürbare Beschäftigungseffekte sind aus den oben genannten Gründen erst ab dem Jahr 2025 zu erwarten.

Tabelle 15: Hersteller von Füllgarnituren in Baden-Württemberg (BW), Deutschland (DE) und weltweit

Hersteller		Stadt/Land	Bemerkung
Elaflex Hiby Tanktechnik	DE	Hamburg	LPG
Walther-Präzision	DE	Haan	H ₂
WEH	DE	Illertissen	H ₂ , EPG
Witt-Gasetechnik	DE	Witten	CNG
FTI International Group	CA	Vaughan	Dispenser
Nitto Kohki	JP	Tokyo	H ₂
OPW	US/ CZ	Hamilton	H ₂ , EPG
Quantum Fuel Systems Techn.	US	Lake Forest	H ₂ , CNG
Snap-tite	US	Union City	CNG
Stäubli	CH	Horgen	CNG, NGV

FORSCHUNGS- UND HANDLUNGSBEDARF

Die Erkenntnisse aus den vorherigen Kapiteln werden hier herangezogen, um offene Themen, Herausforderungen und Lösungsansätze zu benennen und daraus Handlungsempfehlungen abzuleiten. In einem ersten Schritt werden übergeordnete Leitgedanken formuliert und Handlungsfelder diskutiert. Darauf aufbauend wird im folgenden Schritt der Handlungsbedarf konkretisiert. Für eine bessere Übersichtlichkeit werden die Themen in die Bereiche Technologie, Marktentwicklung sowie Standardisierung, Normung, Genehmigung und Abnahme unterteilt.

7.1 ÜBERGEORDNETE LEITGEDANKEN

Die zentralen Handlungsfelder für den weiteren Ausbau einer Wasserstoff-Infrastruktur können durch vier übergeordnete Leitgedanken umrissen werden. Sie basieren auf den wesentlichen Erkenntnissen der technischen Bestandsaufnahme, der Experteninterviews, der Diskussion und Szenarienentwicklung und werden im Folgenden dargestellt.

1. Leitgedanke: Wasserstoff als Energieträger kann einen wichtigen Beitrag zur Erreichung der Ausbauziele für erneuerbare Energien leisten.

Allgemein ist die Notwendigkeit eines speicherbaren Sekundärenergieträgers anerkannt, sollen die Ausbauziele erneuerbarer Energien erreicht werden. Die Nutzung eines chemischen Energiespeichers wie Wasserstoff, oder in zweiter Stufe ggf. auch Methan, erlaubt die Speicherung volkswirtschaftlich relevanter Energiemengen zur Sicherung der Energieversorgung über ein ganzes Jahr. Darüber hinaus ist es unbestritten, dass eine nachhaltige und CO₂-emissionsarme Mobilität nur möglich ist, wenn erneuerbare Energien zur Ladung der Batterie oder zur Erzeugung des Wasserstoffs eingesetzt werden. Die Ausrichtung der Wasserstoff-Infrastruktur muss sich damit am Ausbau der erneuerbaren Energien in Baden-Württemberg orientieren. In den nächsten Jahren kann der (geringe) Wasserstoffbedarf für die Mobilität noch aus den bisherigen Wasserstoff-Quellen gedeckt werden. Mit dem Ziel einer minimalen Belastung der elektrischen Netze, einer hohen Ausnutzungsrates von Wind- und PV-Anlagen und einer effizienten und kostengünstigen Erzeugung sowie Distribution von Wasserstoff muss ein Konzept zur Wasserstoff-Versorgung der Zukunft entwickelt werden. Dieses muss beantworten, wie eine zentrale und dezentrale Wasserstoff-Versorgungsstruktur räumlich aufgeteilt werden kann und wie die weiteren Nutzungspfade des Power-to-Gas-Ansatzes berücksichtigt werden. Der Einsatz „grünen“ Wasserstoffs sollte Vorgabe in zukünftigen Anreizprogrammen und Förderinitiativen des Landes zum Ausbau einer Wasserstoff-Infrastruktur sein.

Die Nutzung der Elektrolyse als Bindeglied zwischen Strom- und Gasnetz sowie Mobilität gewinnt damit an strategischer Bedeutung. Vor allem auf Forschungsseite hat Baden-Württemberg eine gute Ausgangsbasis, die wirtschaftlichen Aktivitäten halten sich bislang aber in Grenzen.

2. Leitgedanke: Zur Senkung des Investitionsrisikos und zur Marktvorbereitung wird auch weiterhin ein Engagement der öffentlichen Hand notwendig sein.

Die Lösung des sogenannten „Henne-Ei-Problems“ stellt die beteiligten Akteure vor enorme Herausforderungen. Die technische und rechtliche Komplexität der Materie und die notwendigen hohen Anfangsinvestitionen stehen einem signifikanten Markthochlauf zu einem späteren Zeitpunkt und damit einem geringen Mittelrückfluss entgegen. Der Aufbau der Infrastruktur muss dem Fahrzeughochlauf leicht vorausgehen, um mögliche Fahrzeugkäufer nicht abzuschrecken. Bisher haben sowohl der Bund als auch das Land den Aufbau einer Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur durch Investitionsbeihilfen unterstützt. Für die Dauer der Demonstrationsphase (Phase 1) wird es auch weiterhin notwendig sein. Darauf aufbauend sollte nach einer Zwischenevaluation aber auch je nach Marktsituation ein Förderkonzept für die spätere Phase 2 entwickelt werden, das maßvoll die Belange der Marktentwicklung berücksichtigt und nicht zwangsläufig eine Investitionsförderung sein muss. Das Engagement von öffentlicher Seite sollte dagegen weiter gefasst werden. Dazu kann auch die Unterstützung oder Initiierung von Leuchtturmprojekten zur Erhöhung der Sichtbarkeit gehören. Zudem sollte die Einbindung von kommunalen Unternehmen (wie Stadtwerke und Verkehrsbetriebe) gefördert werden, da vor allem im Bereich ÖPNV und kommunale Energieversorgung viele Synergieeffekte genutzt werden können, die einen frühen finanziellen Rückfluss begünstigen und damit ggf. einen früheren Abbau von Förderung ermöglicht.

3. Leitgedanke: Eine Standardisierung erleichtert den Aufbau einer Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur.

In den letzten Jahren konnten in Deutschland bereits zahlreiche Erfahrungen mit dem Betrieb von verschiedenen Tankstellen generiert werden. Deutschland nimmt damit eine Vorreiterrolle ein und soll auch zukünftig zu den Leitmärkten gehören. Allerdings stellen alle heutigen Tankstellen technische Einzellösungen dar. Die bisherigen technischen Lösungen für den Hochdruckbetrieb sind teilweise Sonderanfertigungen, bedingen damit ein hohes Investitionsvolumen und verursachen aufgrund noch geringer Erfahrungen hohe Betriebskosten.

Einheitliche und standardisierte Konzepte für höhere Stückzahlen und Lernkurven bei den Komponentenherstellern werden bereits für die nächste Generation von Tankstellen benötigt. Sie führen zu einer Erhöhung der Zuverlässigkeit und Nutzerfreundlichkeit, Reduzierung der Investitionskosten und Beschleunigung der Genehmigungsverfahren. Eine Einigung der Industrie auf einheitliche Tankstellenkonzepte wie z. B. eine funktionale Tankstellenbeschreibung der H₂ Mobility erlaubt zudem eine Vereinfachung des Betriebs von Wasserstoff-Tankstellen. Kostensenkung und Effizienzsteigerung der Komponenten und der Gesamtanlage müssen stärker im Fokus der technologischen Weiterentwicklung und Forschung stehen.

4. Leitgedanke: Ein enges Zusammenwirken aller Beteiligten führt zu einer beschleunigten und vereinfachten Errichtung, Abnahme und Betrieb von Wasserstoff-Tankstellen.

Neben Kostenaspekten besteht heute auch eine gehemmte Investitionsbereitschaft durch genehmigungsrechtliche Unsicherheiten und dem hohen Aufwand zur Erfüllung der erforderlichen Betreiberpflichten. Dem kann teilweise durch eine gute Vernetzung und einen engen Erfahrungsaustausch der Beteiligten begegnet werden. Ein positiver Ansatz dazu ist bspw. das Initiieren einer Landesagentur wie der e-mobil BW in Baden-Württemberg. Weiterführende Beratungsangebote und Schulungen wie ein Leitfaden für Betreiber und Errichter sowie Informationsmöglichkeiten zu „Bestpractice“-Beispielen können den genehmigungsrechtlichen Aufwand verringern. Auch untere Behörden sollten in dieses Netzwerk einbezogen werden, da die genehmigungsrechtlichen Verfahren i. d. R. auf kommunaler Ebene abgewickelt werden. Ferner sollte die Weiterentwicklung von Standards und Prüfverfahren (Stichpunkte: Wasserstoff-Qualität, Betankungsnorm, etc.) vorangetrieben werden, um für diese zentralen Aspekte allseits anerkannte Lösungen zur Verfügung zu stellen. Zudem sollte auch der Aspekt einer hohen Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der Anlagen stärker berücksichtigt werden, u. a. durch Vorgabe von Verfügbarkeiten und Reaktionszeiten in Lastenheften und Wartungsverträgen der Betreiber. Letztendlich herrscht dringender Entwicklungsbedarf für vielfältige technische Komponenten sowohl auf Anlagenebene, Komponentenebene oder bei Prüfverfahren, um vor der Marktvorbereitungsphase die wesentlichen technischen Schwierigkeiten beseitigt zu haben und eine Standardisierung konsequent vorantreiben zu können.

Die Formulierung und Diskussion der übergeordneten Leitgedanken dient einer thematischen Sortierung der wesentlichen Ergebnisse der Studie. Zur besseren Orientierung der daraus abgeleiteten Handlungsempfehlungen werden diese in den nächsten Kapiteln

jedoch nach technologischen, kommerziellen sowie genehmigungs- und betreiberrechtlichen Aspekten sortiert.

7.2 TECHNOLOGIE

Die Handlungsempfehlungen zur weiteren Technologieentwicklung sind in die Unterpunkte Wasserstoffkomprimierung, Zuverlässigkeit, weitere Komponenten, Platz- und Speicherbedarf, Wasserstoff-Qualität und -versprödung gegliedert und werden in Tabelle 17 aufgelistet.

KOMPRESSOREN

Die Kompressoren stellen derzeit einen großen Kostentreiber der Wasserstoff-Tankstellen dar. Sie verursachen den höchsten Investitionskostenanteil der Tankstelle und sind durch wiederkehrende und aufwändige Wartungen auch für den Großteil der Wartungskosten verantwortlich. Es lohnt also, Konzepte für einen kompletten oder teilweisen Verzicht auf Kompressoren zu betrachten, um hierdurch Investitions- und Betriebskosten zu senken.

Durch Entwicklung von elektrochemischen Kompressoren könnten die mechanischen Kompressoren mittelfristig ersetzt bzw. erheblich vereinfacht werden. Diese Kompressoren (technische Beschreibung siehe Kapitel 3.3.2) sind durch eine sehr geringe Anzahl an beweglichen Teilen analog zu Membran-Elektrolyseuren sehr wartungsarm, befinden sich jedoch noch im Demonstrator-Status und müssen weiter zur Produktreife entwickelt werden.

Die Hochdruckelektrolyse bietet im On-site-Bereich ebenso das Potenzial durch hohe Ausgangsdrücke auf mindestens eine Kompressorstufe zu verzichten und ist in Analogie zu elektrochemischen Kompressoren die effizienteste Möglichkeit der Gaskompression. Drücke von 30 bar sind bei Elektrolyseuren derzeit verfügbar – hier muss der Druckbereich weiter erhöht werden, bspw. bis auf 100 bar. Zudem müssen die Hochdruckelektrolyseure auf für Tankstellen typische Größen erweitert werden, da bestehende 30-bar-Elektrolyseure derzeit eher im kleinen Leistungsbereich zu finden sind.

Abgesehen von der Weiterentwicklung der Kompressoren und der On-site-Erzeugung kann auch der (teilweise) Verzicht auf Kompressoren durch neuartige Tankstellen-Konzepte erreicht werden. Beispiele dafür können die Versorgung der Tankstellen durch Hochdrucktrailer oder Trailer mit integrierten Kompressoren sein. Entsprechende Konzepte sollten geprüft werden.

Tabelle 17: Übersicht Handlungsempfehlungen im Bereich Technologie

Handlungsempfehlung	Ziel	Adressat
Entwicklung elektrochemischer Kompressoren	Senkung Invest- und Betriebskosten. Höhere Effizienz	Forschung/Industrie
Entwicklung Hochdruckelektrolyse	Senkung Invest- und Betriebskosten durch Verzicht auf Kompressoren, Höhere Effizienz	Forschung/Industrie
Kompressorlose Tankstellenkonzepte	Senkung Invest- und Betriebskosten durch Verzicht auf Kompressoren	Forschung/Industrie
Erhöhung Verfügbarkeit durch geeignete technische Maßnahmen	Erhöhung Verfügbarkeit und damit Nutzerfreundlichkeit	Industrie
Entwicklung stabiler, genauer Mengenmessung	Geeichte Abgabemessung	Forschung/Industrie
Weiterentwicklung Füllkupplung	Erhöhung Bedienerfreundlichkeit, Senkung Kosten, (Verbesserung Sicherheit)	Forschung/Industrie
Entwicklung robusterer Partikelfilter	Gewährleistung Wasserstoffqualität	Industrie
Reduzierung Footprint der Tankstellen	Innenstadttauglichkeit der Tankstellen, Lösung Platzproblem bei Bustauglichkeit der Tankstellen	Forschung/Industrie
Untersuchung/Erprobung alternativer Wasserstoff-Speicherkonzepte	Reduzierung Platzbedarf und damit Kosten, Lösung Standortproblem	Forschung/Industrie
Entwicklung Abnahmeapparatur und Verfahren für Betankungsnorm	Sicherstellung Betankungssicherheit / Abnahme	Industrie
Entwicklung Verfahren und Probenahmegerät Gasqualität	Sicherstellung Wasserstoffqualität / Abnahme	Industrie
Neubewertung Wasserstoffversprödung	Sicherheit bei Materialeinsatz auch bei neuen Anwendungsfällen	Forschung / Politik / Fachverbände

ZUVERLÄSSIGKEIT (vgl. Kapitel 4.3)

Die Zuverlässigkeit der Tankstellen ist ein wesentlicher Aspekt für Kundenfreundlichkeit und Akzeptanz der Technologie. Die Lösungsansätze für die Zuverlässigkeit sind vielseitig und gliedern sich in technische und organisatorische Maßnahmen. Im Bereich der technologischen Lösungen sollten durch geeignete technische Maßnahmen die Zuverlässigkeit der Komponenten und der Tank-

stellen erhöht werden, und die Lerneffekte aus dem Betrieb der Anlagen sollten in die Anlagenentwicklung einfließen.

WEITERE KOMPONENTEN

Im Bereich der Mengenmessung (vgl. Kapitel 4.4.4) ist dringender Handlungsbedarf vorhanden. Eine genaue und stabile Mengenmessung ist Voraussetzung für einen kommerziellen Betrieb der Tank-

stellen, die aktuell aber noch nicht erfüllt ist. Die Entwicklung genauer und eichfähiger Durchflussmessgeräte ist daher für den Übergang in Phase 2 des Tankstellenaufbaus dringend erforderlich. Die Befüllkupplung als die einzige Komponente mit Kundenkontakt prägt deutlich das Bild der Kunden von der Technologie. Derzeit gibt es noch diverse Probleme mit den Kupplungen, die in Kapitel 4.4.10 näher erläutert werden. Eine Weiterentwicklung der Kupplung sollte vorangetrieben werden, um die Bedienerfreundlichkeit, Betriebskosten (Wartung/Austausch) und die Sicherheit (Leckagen) zu verbessern.

Für die Wasserstoffbetankung ist es wichtig, einen möglichst sauberen Wasserstoff ohne Verunreinigungen zu liefern. Für diesen Zweck besteht technologischer Handlungs- bzw. Entwicklungsbedarf für robustere Partikelfilter, da bestehende Filter wiederholt durchschlagen wurden, vgl. Kapitel 4.4.8.

PLATZBEDARF/ALTERNATIVE SPEICHERKONZEPTE

Ein derzeit noch nicht kritisches Thema ist der Platzbedarf der Tankstellen. Vor allem für Anlagen mit größeren Umsätzen und für Anlagen mit großen Lagermengen (Busbetankung) steigt der Platzbedarf bedingt durch große Komponenten (Kompressoren) und große Speicher. Demgegenüber stehen der allgemein geringe Platzbedarf bzw. die Kosten für das Grundstück der Tankstelle und im innerstädtischen Bereich ein sehr limitiertes Platzangebot. Dies ist noch durch eine geschickte Standortwahl der Tankstelle lösbar, wird aber in Phase 2 und 3 ein Problem darstellen. Hierfür sollten organisatorische oder technische Lösungen gefunden werden.

Technisch ist eine Betrachtung alternativer Speicherkonzepte sinnvoll. Eine mögliche Alternative sind hier Metallhydrid-Festkörperspeicher, die eine 1,5-fache Speicherdichte gegenüber Flüssigwasserstoff und zusätzlich Vorteile in den Punkten Sicherheit und Energieaufwand (verglichen zur LH₂-Anlieferung) bieten. Aufgrund des Gewichtes von Metallhydridspeichern ist zu prüfen, ob hier bezogen auf den Aufstellungs-Footprint wirklich höhere Speicherdichten erreicht werden als bspw. bei Gas- und Flüssigspeichern. Eine Eignung von Metallhydridspeichern als Niederdruckspeicher sollte untersucht und ggf. in einer Tankstellenumsetzung erprobt werden.

QUALITÄTSSICHERUNG/ABNAHME

Um eine sichere Betankung von Fahrzeugen aller Hersteller sicherzustellen, ist es wichtig, eine Normkonformität des Betankungsablaufs – also die Konformität zum Standard SAE TIR J2601 – zu

erfüllen und im Rahmen der Tankstellen-Abnahme zu überprüfen. Nach dem Ende der Betankungstests durch Opel fehlt derzeit eine Abnahmeapparatur zur Überprüfung des Betankungsablaufs. Um für die neu zu errichtenden Tankstellen eine Abnahme durchführen zu können, müssen ein neues Abnahmeverfahren und eine neue Abnahmeapparatur entwickelt werden, vgl. Kapitel 4.4.5.

Für die Abnahme der Tankstellen und eine laufende Qualitätssicherung ist es wichtig, anfangs und im laufenden Betrieb Stichproben des Gases zu nehmen und es auf verschiedene Verunreinigungen zu überprüfen. Für eine effektive und korrekte Durchführung müssen noch Probenahmegeräte entwickelt werden. Zur Messung von Partikel- und Flüssigverunreinigungen existiert bereits ein Probenahmegerät; für die Probenahme von Gasen an der Befüllkupplung ist bis jetzt noch kein Gerät verfügbar. Hier sollte ein entsprechendes Gerät entwickelt werden, um als Teil der Tankstellenabnahme und -qualitätssicherung zur Verfügung zu stehen. Auch entsprechende in Europa gültige Analyseverfahren zur Ermittlung der Verunreinigungen müssen entwickelt werden, vgl. Kapitel 4.4.8.

WASSERSTOFFVERSPRÖDUNG

Die materialtechnischen Effekte der Wasserstoff-Versprödung sind an sich bekannt. Es ist aber eine Unsicherheit der Akteure beim Einsatz von Wasserstoff in der Energiewirtschaft (Mobilität, Elektrolyseure, Power-to-Gas, Pipelines) zu beobachten. Es wird empfohlen, das Wissen durch Experten für die geänderten Anforderungen neu zu bewerten und die Ergebnisse verfügbar zu machen.

7.3 MARKTEINFÜHRUNG

Die Handlungsempfehlungen zur Markteinführung sind in die Unterpunkte Marktvorbereitung, Kosten sowie Öffentlichkeitsarbeit und Nutzerfreundlichkeit gegliedert und sind in Tabelle 18 aufgelistet.

MARKTVORBEREITUNG

Zur Marktvorbereitung ist vor allem in der anfänglichen Zeit eine Unterstützung durch die öffentliche Hand notwendig, um das Investitionsrisiko zu senken und eine Grundinfrastruktur aufzubauen. Zu diesem Zweck wird die Entwicklung eines Förderkonzeptes zur Einführung von Wasserstoff in der Mobilität vorgeschlagen, vgl. Kapitel 5.3. Mögliche Elemente in den einzelnen Phasen könnten sein:

- Phase 1: Zur Errichtung einer Tankstelle werden die Investitionskosten teilweise durch die öffentliche Hand übernommen (siehe NOW, siehe Landesinfrastrukturprogramm BW)

Tabelle 18: Übersicht Handlungsempfehlungen im Bereich Markteinführung

Handlungsempfehlung	Ziel	Adressat
Entwicklung eines Förderkonzeptes zur Einführung von Wasserstoff in der Mobilität/Verkehrssektor	Senkung Investitionshindernisse, Marktvorbereitung	Politik
Initiierung weiterer Leuchtturmprojekte	Senkung Investitionshindernisse, Marktvorbereitung, Erhöhung Sichtbarkeit	Politik
Einbindung kommunaler Unternehmen (ÖPNV, Stadtwerke) in den Infrastrukturausbau zur Erhöhung von Synergien	Senkung Investitionshindernisse, Marktvorbereitung,	Politik
Entwicklung Konzept für On-site/Off-site-Verteilung in Baden-Württemberg	Integration Mobilität in EE-Konzepte, Marktvorbereitung	Politik
Entwicklung einheitlicher Förder- und Steuerungskonzepte für FCEV und Wasserstoff	Marktvorbereitung, Verbesserung Akzeptanz	Politik
Ausbau Servicestruktur und technologische Weiterentwicklung der Anlagen	Senkung Wartungs-Kosten	Anlagenhersteller
Energetische Analyse und Optimierung der Tankstellen	Senkung Energie-Kosten	Anlagenhersteller
Prüfung: Einführung von Energiestandards für Wasserstoff-Tankstellen	Senkung Energie-Kosten	Politik
Förderung Integration neuer H ₂ -Tankstellen in konventionelle Tankstellen	Erhöhung Nutzerfreundlichkeit	Politik
Einigung auf einheitliche Nutzerschnittstelle	Erhöhung Nutzerfreundlichkeit	Fachverbände/ Industrie wie CEP
Mittelfristig: Abschaffung verpflichtender Tankkarten	Erhöhung Nutzerfreundlichkeit	Fachverbände/ Industrie wie CEP
Erhöhung Tankstellen-Zuverlässigkeit	Erhöhung Nutzerfreundlichkeit	Industrie
Integration Tankstellen in CEP-Tankstellenverfügbarkeitssystem	Erhöhung Nutzerfreundlichkeit / Öffentlichkeitsarbeit	Industrie
Öffentlichkeits- und Informationskampagne Bestandteil der Fördermaßnahmen	Erhöhung Nutzerakzeptanz	Politik
Anhaltende Öffentlichkeitsarbeit	Erhöhung Nutzerakzeptanz	Alle Akteure

- Phase 2: Nach einer Zwischenevaluation zur Anpassung an die Marktsituation wird die Förderung der Investitionskosten mit einem geringeren oder degressiven Fördersatz fortgeführt. Zeitgleich werden steuerliche Vergünstigung als Kaufanreiz für FCEVs eingeführt
- Phase 3: Sukzessiver Rückzug der öffentlichen Hand aus der Förderung, da der kommerzielle Fall erreicht ist

Als Teil dieser Marktvorbereitung werden auch ein oder mehrere Leuchtturmprojekte in Landesinitiative ggf. in Kombination mit einem Schaufenster, Wasserstoff zur Senkung von Investitionshürden, Erhöhung der Sichtbarkeit und Nutzung weiterer Synergien empfohlen. Vorschläge für Leuchtturmprojekte sind:

- Wasserstoff-Erzeugung aus On-site-Elektrolyse, Netzdienstleistung durch den Elektrolyseur und Joint Venture mit Busunternehmen/Stadtwerke für Schaufenster ÖPNV mit Wasserstoff-Antrieb bis 2020 (Phase 2). Da der Betrieb von Wasserstoff-Bussen derzeit noch nicht wirtschaftlich ist, sollte hier auch der Aufbau einer kleinen Wasserstoff-Busflotte durch die öffentliche Hand unterstützt werden.
- Errichtung einer Wasserstoff-Tankstelle mit Elektrolyse-Erzeugungsanlage im Umkreis einer Großstadt an einer Autobahntankstelle der Größe L. Auf ein ausreichendes Platzangebot für eine Erweiterung des Elektrolyseurs sollte geachtet werden. Eine mittelfristige Versorgung der umliegenden Tankstellen durch grün erzeugten Wasserstoff über CGH₂-Trailer sollte erprobt werden. Dieser Leuchtturm bietet das Potenzial der Konzeptentwicklung für die innerstädtische Versorgung ab dem Markthochlauf (Übergang Phase 2/3).
- Koppelung Tankstelle mit Wasserstoff-Einspeisung in das Erdgasnetz als Demonstrations- und Leuchtturmprojekt zur Kombination Wasserstoff-Mobilität und Energiespeicherung.

Für den Ausbau des Tankstellennetzwerks wird empfohlen, ein Konzept für die Verteilung der On-site und Off-site versorgten Tankstellen unter Berücksichtigung der spezifischen regionalen Ausbaupotenziale erneuerbarer Energien in Baden-Württemberg zu erarbeiten, vgl. Kapitel 5.4.

Zur Vorbereitung einer Markteinführung sollten auch einheitliche Förder- und Steuerungskonzepte für FCEV und Wasserstoff in der Mobilität durch die Politik entwickelt werden, um die Akzeptanz der Technologie zu erhöhen und über Anreize die Einführung der Wasserstoff-Mobilität zu erhöhen.

KOSTEN

Für eine erfolgreiche Kommerzialisierung der Tankstellen sind die Kosten und der finanzielle Rückfluss von zentraler Bedeutung. Derzeit verursachen die Tankstellen hohe Investitions- und Betriebskosten. Eine Senkung der Investitionskosten kann neben technologischen Lösungen (vgl. Kapitel 7.2) auch über Skaleneffekte von standardisierten Anlagen erreicht werden. Hierfür ist neben einer Standardisierung der Anlagen (vgl. Kapitel 7.4) vor allem in der Anfangszeit eine Unterstützung durch die öffentliche Hand notwendig, um das Investitionsrisiko zu senken und die notwendigen Stückzahlen zu erreichen.

Zur Senkung der Betriebskosten ist es wichtig, dass durch den Ausbau von lokalen Servicestrukturen der Anlagenhersteller Anfahrtswege und -kosten reduziert und mit konsequenter Weiterentwicklung der Anlagen Serviceintervalle länger und notwendige Entstörungen seltener werden. Zudem müssen die Energiekosten der Anlagen gesenkt werden. Hierfür wird eine energetische Analyse und Optimierung der Anlagen (speziell der bisherigen Konzepte für die Vorkühlung) und – wo anwendbar – die Verwendung energetisch optimierter Komponenten und Betriebsführungskonzepte empfohlen. Eine Einführung von Energiestandards für Tankstellen kann durch die Politik/Verbände geprüft werden, vgl. Kapitel 4.4.2. Um trotz der derzeit noch hohen Kosten und geringen Fahrzeugdichte einen finanziellen Rückfluss zu generieren und die Kommerzialisierung zu beschleunigen, ist es hilfreich, durch erweiterte Nutzungskonzepte einen Mehrwert für die Tankstellen zu generieren. Geschäftsmodelle für diese erweiterten Nutzungsmöglichkeiten sollten durch Tankstellenbetreiber entwickelt und erprobt werden.

ÖFFENTLICHKEITSARBEIT & NUTZERFREUNDLICHKEIT

Ein entscheidender Punkt für eine Markteinführung ist die Kunden- bzw. Nutzerakzeptanz und die Wahrnehmung des Energieträgers/ Kraftstoffs Wasserstoff, da eine fehlende Akzeptanz durch die Öffentlichkeit eine Markteinführung verhindern könnte. Daher wird das Thema Öffentlichkeitsarbeit allseits als wichtig erachtet. Dem sollte durch alle Akteure Rechnung getragen werden, und eine anhaltende Öffentlichkeitsarbeit Teil aller Vorhaben sein. Im Rahmen von Förderprogrammen sollten entsprechende Öffentlichkeits- und Informationskampagnen fester Bestandteil der Maßnahmen sein.

Neben der Akzeptanz sind auch die Wahrnehmung der Technologie und damit die Nutzerfreundlichkeit entscheidend für den Erfolg.

Um Kunden den gewohnten Komfort durch Tank-Shops inklusive sonstiger Infrastruktur zu bieten, sollte eine Integration von neu gebauten Wasserstoff-Tankstellen in bestehende Tankstellen möglichst gefördert werden, ohne dabei neue Betreibermodelle zu benachteiligen.

Eine Einigung auf die einheitliche und einfache Nutzerschnittstelle (bspw. analog zu Erdgastankstellen) und die Verwendung eines zentralen Tankstellen-Verfügbarkeitssystems analog zur CEP sind weitere Schritte, um die Nutzerfreundlichkeit zu erhöhen. Mittelfristig muss die Verfügbarkeit der Tankstellen so gut sein, dass ein Verfügbarkeitssystem nicht mehr nötig ist. Auch der CEP-Kartenleser ist ein richtiger Schritt, um zum jetzigen Zeitpunkt überregional tanken zu können. Mittelfristig sollte hingegen zugunsten einer vollständig öffentlich verfügbaren Betankung auf CEP-Tankkarten verzichtet werden.

7.4 STANDARDISIERUNG, NORMUNG, GENEHMIGUNG, ABNAHME

Die Handlungsempfehlungen zu genehmigungs- und betreiberrechtlichen Aspekten sind in die Punkte Standardisierung, Normung, Genehmigung und Abnahme gegliedert und in Tabelle 19 aufgelistet.

STANDARDISIERUNG (vgl. Kapitel 4.4.1)

Durch eine Standardisierung der Wasserstoff-Tankstellen sind sinkende Investitionskosten aufgrund von rückläufigem Entwicklungsaufwand und höheren Stückzahlen, schneller ablaufender und vereinfachter Genehmigungsverfahren, Zuverlässigkeitssteigerungen durch Lerneffekte, sowie einheitlicher und hochwertiger Sicherheitskonzepte zu erwarten. In Summe wird eine deutliche Kostensenkung und Beschleunigung der Anlagenerrichtung durch die Standardisierung erwartet. Diese ist daher unbedingt anzustreben.

Tabelle 19: Übersicht Handlungsempfehlungen im Bereich Standardisierung, Normung, Genehmigung, Abnahme

Handlungsempfehlung	Ziel	Adressat
Standardisierung der Tankstellen-Konzepte	Kostensenkung, Beschleunigung, Steigerung Zuverlässigkeit	Industrieverbände
Erstellung eines Genehmigungsleitfadens für Betreiber/Errichter	Beschleunigung Genehmigungsverfahren	Politik
Erstellung einer Informationsplattform für Behörden und Betreiber	Beschleunigung und Vereinheitlichung Genehmigungsverfahren	Politik
Prüfung: H2-Mobility-Lastenheft als Industriestandard	Beschleunigung und Vereinheitlichung Genehmigungsverfahren	Politik mit Industrieverbänden
Aufbau Anbieter einer SAE J2601-Abnahme für Tankstellen	Qualitätssicherung / Abnahme / Sicherheit	Industrie
Einigung bezüglich und ggf. Überprüfung notwendiger Qualitätsanforderungen	Einheitliche und allseits akzeptierte Anforderungen für Wasserstoffqualität, ggf. Kostensenkung	Industrieverbände
Prüfung: Einführung von Musterabnahmen baugleicher Tankstellen	Senken Abnahmeaufwand	Industrie
Überarbeitung Wasserstoff-Tankstellen-Normen durch deutsche Akteure	Vereinfachte Errichtung, mittelfristige Beschleunigung Genehmigungsverfahren	Industrie

GENEHMIGUNGSVERFAHREN (vgl. Kapitel 4.4.3)

Im Bereich der Genehmigungsverfahren gibt es viel Kritik an langwierigen und uneinheitlich ablaufenden Verfahren. Eine vorherige Aufklärung über die Verfahren bzw. das Aufzeigen bisheriger Best-Practice Beispiele kann den Ablauf der Verfahren verbessern. Hierfür wird die Erstellung eines Leitfadens empfohlen, welcher Betreiber/Errichter von Anlagen auf die Verfahren vorbereitet und durch exemplarische Vorgehensweisen viele Stolperstricke der Verfahren aus dem Weg räumt. Weiterhin wird auch eine Informationsplattform für Betreiber/Errichter und Genehmigungsbehörden empfohlen, die die Technologie der Wasserstoff-Tankstellen beschreibt und typische Beispiels-Genehmigungsverfahren aufzeigt. Eine einheitliche Anlagengestaltung erleichtert die Genehmigung. Die Standardisierung ist damit ein wichtiger Schritt zur Beschleunigung der Verfahren. Das H2-Mobility-Lastenheft, ein durch das Industriekonsortium erstelltes, öffentlich verfügbares Instrument der Standardisierung, bietet das Potenzial als Industriestandard die Genehmigung zu vereinfachen. Die Prüfung dieser Option wird empfohlen. Mittelfristig sollten jedoch die Informationen aus dem H2-Mobility-Lastenheft in die Tankstellen-Normen einfließen, um über den Weg eines internationalen Standards sowohl im deutschen, als auch im europäischen und internationalen Raum die Errichtung von Wasserstoff-Tankstellen zu vereinheitlichen und die Genehmigung zu beschleunigen.

TANKSTELLENABNAHME (vgl. Kapitel 4.4.5 und 4.4.8)

Für einen ordnungsgemäßen und sicheren Betrieb der Tankstellen sind mehrere Abnahmen notwendig. Zentral hierbei sind neben den funktionellen Abnahmen der Betreiber die Überprüfung und Sicherstellung der Wasserstoffqualität (um eine lange Lebensdauer der Fahrzeuge sicherzustellen) und eine Einhaltung der Betankungsnorm (um eine sichere Betankung aller Fahrzeuge zu gewährleisten).

Seitens der Betankungsnorm ist mit dem angekündigten Ende der SAE J2601-Abnahmen durch Opel im 4. Quartal 2012 kein Abnahmetest mehr verfügbar. Um die freie Tankstellennutzung durch alle Fahrzeuge zu gewährleisten, ist es von zentraler Bedeutung, zeitnah einen Akteur zu finden, der eine Abnahme neuer Tankstellen anbietet, da an den neuen Tankstellen sonst entweder nur ausgewählte Fahrzeuge tanken dürfen oder durch jeden Fahrzeughersteller eine eigene Abnahme stattfinden muss.

Bezüglich der Wasserstoffqualität muss aktuell die Norm SAE J2719 erfüllt werden, welche einerseits sehr strenge Anforderungen an

die Wasserstoff-Qualität stellt und für die andererseits in Europa derzeit nur sehr teure bzw. teilweise auch keine Messverfahren zur Verfügung stehen. Zur Lösung dieser Probleme sollte eine aktuelle Bewertung der Grenzwerte ergänzt durch Erfahrungen der laufenden Projekte auf Fahrzeugseite erfolgen mit dem Ziel, durch einen Kompromiss bezüglich automobiler Wartungs- /Reparaturkosten und infrastrukturseitigem Aufwand ein Optimum der Total Cost of Ownership zu erreichen.

Allgemein erscheint eine Überprüfung der Tankstellen auf Verunreinigungen im getankten Wasserstoff aufgrund des direkten Einflusses auf die Lebensdauer sinnvoll. Eine Aufnahme der Stichproben in das H2-Mobility-Lastenheft (Abnahmeprozedur) und in einen wiederkehrenden Wartungszyklus sollte geprüft werden. Für die Prüfung sollten wirtschaftlich optimierte Prüfgeräte und Analyseverfahren entwickelt werden.

Die verschiedenen Verfahren der Tankstellenabnahme sind zeitlich und finanziell aufwändig. Mit steigender Stückzahl gleicher Tankstellen könnte eine Validierung der Tankstellen – also eine Gewährleistung der Funktionalität und Normkonformität baugleicher Tankstellen durch Prüfung an einer Mustertankstelle – erreicht werden. Hierdurch könnte der Abnahmeaufwand für neue Tankstellen reduziert werden. Betreiberseitig kann dies durch das Akzeptieren erfolgreicher Tests an einer exakt identischen Tankstelle als Alternative zu den Abnahmetests und das Festschreiben in den Lastenheften erreicht werden. Anlagenherstellerseitig sollte diese Validierung und Musterabnahme als Möglichkeit zur Senkung von Kosten angestrebt werden. Eine Prüfung dieser Möglichkeit wird empfohlen.

NORMUNG

Für Wasserstoff-Tankstellen werden u. a. Normen für die Betankung der Fahrzeuge (SAE TIR J2601), für Errichtung und Betrieb der Tankstellen (ISO TS 20100 bzw. ISO DIS 20100, VdTÜV 514) und für die Wasserstoff-Qualität (SAE J2719) verwendet. Diese Normen bedürfen aber nach Meinung vieler Experten einer Überarbeitung. Die SAE TIR 2601 sollte angepasst werden, um die Erfahrungen aus den Demonstrationsprojekten zu berücksichtigen. Die ISO TS 20100 und VdTÜV 514 sind aufgrund der rapiden Entwicklung der letzten Jahre nicht mehr auf dem Stand der Technik und widersprechen sich in einigen Punkten. Die SAE J2719 schreibt strenge Grenzwerte vor, die überprüft werden sollten und empfiehlt Messverfahren, die in Europa nicht verfügbar sind. Damit ist in allen Fällen eine Überarbeitung der Normen – besonders auch durch involvierte Akteure aus den Demonstrationsprojekten – stark zu empfehlen.

ZUSAMMENFASSUNG

AUSGANGSLAGE UND MOTIVATION

Noch ist der deutsche Mobilitätssektor fast ausschließlich durch konventionelle Antriebstechnologien geprägt. Im Vergleich zum Basisjahr 1990 konnten die Emissionen klimaschädlicher Gase im Verkehrssektor im Wesentlichen durch effizientere Verbrennungsmotoren nur um 6 % gemindert werden und sind für aktuell ca. 17 % der gesamten Treibhausgas-Emissionen in Deutschland verantwortlich.

Wasserstoff als Sekundärenergieträger kann aus vielfältigen konventionellen und regenerativen Energiequellen gewonnen werden und besitzt ein sehr hohes Potenzial zur Nutzung als Kraftstoff im Verkehr sowie darüber hinaus als Brennstoff in der Energiewirtschaft und als Ausgangsstoff für die Industrie. Vor allem die Nutzung von Wasserstoff als alternativer Kraftstoff in Brennstoffzellen-Fahrzeugen eröffnet in Ergänzung zu batteriebetriebenen Antrieben die Möglichkeit, eine nachhaltige und klimaneutrale Mobilität zu realisieren. Dies erfordert den Aufbau einer leistungsfähigen Wasserstoff-Infrastruktur. Zudem kann Wasserstoff durch seine Speicherbarkeit in großem Umfang und durch stromgeführte Erzeugung über Elektrolyse zur Stabilisierung der Stromnetze beitragen und damit die Energiewende unterstützen bzw. beschleunigen.

Durch die vielfältigen nationalen und regionalen Aktivitäten wie bspw. CEP und H2 Mobility besitzt Deutschland eine gute Ausgangslage und ist auf dem Wege, sich im internationalen Kontext als Leitmarkt zu etablieren. Bereits heute sind in Deutschland 15 Wasserstoff-Tankstellen gebaut bzw. im Bau (Stand September 2012). Unterstützt durch die Ankündigung von Bundesverkehrsminister Ramsauer sollen deutschlandweit weitere 35 Tankstellen in den nächsten Jahren gebaut werden.

WASSERSTOFF-ERZEUGUNG UND TANKSTELLENKONZEPTE

Wasserstoff kann über vielfältige Wege aus Biomasse, regenerativ oder fossil erzeugtem Strom und auch über die thermisch-katalytische Umwandlung fossiler Energieträger erzeugt werden. Die heutige Erzeugung erfolgt überwiegend zentral in großindustriellen Anlagen aus fossilen Energieträgern, sie kann aber auch direkt vor Ort an der Tankstelle erfolgen. Je nach Anlieferungsform (flüssig oder gasförmig) oder On-site-Erzeugung ergeben sich zahlreiche Tankstellenkonzepte, die derzeit in der Erprobung sind. Der Elektrolyse als aktuell vielversprechendste Technologie zur Erzeugung von grünem Wasserstoff kommt hierbei eine Schlüsselrolle zu, zum Erstellungszeitpunkt der Studie wird sie jedoch nur im Rahmen der On-site-Erzeugung eingesetzt.

Die derzeit bevorzugte Versorgung der Tankstellen ist die gasförmige Anlieferung, bei welcher der Wasserstoff in Niederdruck (< 200 bar) oder Mitteldruckspeichern (< 500 bar) gelagert wird und bei Bedarf auf höhere Drücke komprimiert wird. Bei größeren täglichen Abgabemengen (> 400–800 kg/d) stoßen die Anlagen an logistische Grenzen. Durch eine On-site-Erzeugung wird diese logistische Hürde genommen und es können auch größere Tagesumsätze abgedeckt werden. Diese Art der Tankstelle benötigt jedoch größere Aufstellflächen, was an beengten Aufstellungsorten (Innenstädten) problematisch ist. Dennoch werden vor allem in jüngster Zeit verstärkt Tankstellen mit On-site-Elektrolyse gebaut, wobei die Motivation hierbei häufig die Bereitstellung grünen Wasserstoffs ist.

Bei LH₂-Tankstellen mit Flüssiganlieferung wird der Flüssigwasserstoff in 1 t oder 5 t fassenden Vorratsspeichern vorgehalten. Im Betankungsfall wird der Wasserstoff mit einer Flüssigwasserstoff-Pumpe auf Druck gebracht, verdampft und in das Fahrzeug gefüllt. Diese Art der Tankstelle spielt seine Vorteile primär bei großen Umsätzen und Platzmangel aus und ist in der Demonstrationsphase i. d. R. überdimensioniert.

Weiterführend ist auch die Versorgung der Tankstellen über Pipelines mit gasförmigem Wasserstoff möglich, wodurch die resultierenden Tankstellen sehr kompakt und günstig in der Anschaffung werden und große tägliche Wasserstoffmengen abgeben können. Die Investitionskosten und der bauliche Aufwand für eine Pipeline sind indes sehr hoch, sodass sich eine Pipeline nur bei sehr großen Wasserstoffmengen und einem dichten Netz an Verbrauchern amortisiert und damit eher ein Konzept der Zukunft (nach 2030) ist.

ERGEBNISSE DER BEFRAGUNGEN

Zur Ermittlung des Status quo und des Handlungsbedarfs wurden die wesentlichen Akteure, bestehend aus Anlagenhersteller, Tankstellenbetreibern, Verbänden und übergreifende Einrichtungen, befragt.

Betreiber der seit ca. 2009 gebauten oder umgerüsteten 700-bar-Tankstellen sind im Wesentlichen Mineralölkonzerne, Energieversorger und während der zur Erstellungszeit der Studie laufenden Demonstrationsphase auch Forschungsinstitute und Gaslieferanten. Im Rahmen der Interviews wurden die derzeitigen Herausforderungen und der zukünftige Handlungsbedarf ermittelt und diskutiert. Die größten Herausforderungen auf dem Weg zu einer Wasserstoff-Infrastruktur sind demnach die Kosten, die Zuverlässigkeit, die Abnahme und die Genehmigungsverfahren der

Tankstellen, sowie die (Weiter-) Entwicklung einzelner, wichtiger Komponenten. Dem übergelagert bleibt in der aktuellen Phase das sogenannte Henne-Ei-Problem, sodass aus Marktsicht häufig der Anreiz fehlt, aktiv zu werden.

Eine Standardisierung der Tankstellen ist von großer Bedeutung. Dies haben die Interviews mit Experten ergeben. Die aktuellen Anlagen sind aufgrund der Demonstrationsphase meist noch Einzelstücke mit resultierenden Nachteilen in den Punkten Kosten, Zuverlässigkeit und Dauer der Genehmigungsverfahren. Eine Standardisierung ist damit notwendig für eine Markteinführung.

AUFBAU DER WASSERSTOFF-INFRASTRUKTUR IN DREI PHASEN

Zur Entwicklung eines strategischen Konzeptes für eine Wasserstoff-Infrastruktur in Baden-Württemberg wurde mit Hilfe des Basisszenarios der BMU-Leitstudie 2011 die Marktdurchdringung von Wasserstoff im Verkehrssektor quantifiziert. Daraus leitet die Studie den Wasserstoffbedarf und die Anzahl benötigter Wasserstoff-Tankstellen und deren Größe bis zum Jahr 2030 ab. Der Aufbau

einer Wasserstoff-Infrastruktur sollte in drei Phasen erfolgen:

- **Phase 1 – Demonstrationsphase bis 2015:** Ca. 10–15 Tankstellen mit geringer Auslastung (vermutl. ~ 10 %) decken den Bedarf der Vorserienfahrzeuge in Baden-Württemberg und erzeugen ein rudimentäres Tankstellennetz für die Flottenversuche. In der Errichtung und im Betrieb werden noch wichtige Erfahrungen gewonnen.
- **Phase 2 – Marktvorbereitungsphase bis ca. 2020:** Weitere standardisierte Tankstellen werden aufgebaut und erweitern das Tankstellennetz. Es werden zum Ende dieser Phase ca. 70 Tankstellen benötigt, um einen Wasserstoffbedarf von ca. 2.000 t pro Jahr in Baden-Württemberg zu decken. Die Auslastung der Tankstellen steigt auf ca. 25 %.
- **Phase 3 – Markthochlauf ab 2020:** Mit dem Übergang in Phase 3 beginnt die Kommerzialisierung. Standortwahl und Bau der Tankstellen erfolgen unter ökonomischen Gesichtspunkten durch die Tankstellenbetreiber. Erwartet werden in Baden-Württemberg gemäß Prognose der Brennstoffzellen-Fahrzeuge ca. 330 Tankstellen und ein Wasserstoff-Umsatz von 50.000 t pro Jahr in 2030.



Abbildung 40: Display des Opel HydroGen4 (Quelle: Clean Energy Partnership, Caroline Scharff)



Abbildung 41: Toyota Brennstoffzellen-PKW an der Wasserstoff-Tankstelle Berlin Sachsenham (Quelle: Shell)

HANDLUNGSBEDARF

Aus den Befragungen und der Analyse des Status quo ergibt sich ein Handlungsbedarf auf verschiedenen Feldern, um Wasserstoff in der Mobilität zu ermöglichen und mit Erfolg zu starten. Die Handlungsfelder lassen sich in vier Leitgedanken zusammenfassen:

- **Wasserstoff als Energieträger kann einen wichtigen Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele leisten und einen Ausbau der erneuerbaren Energien fördern.** Um dies zu erreichen, muss die Wasserstoff-Infrastruktur am Ausbau der erneuerbaren Energien im Land ausgerichtet werden, außerdem ein Konzept zur Koppelung der erneuerbaren Energien mit der Wasserstoff-Infrastruktur sowie eins zur Nutzung der On-site- und Off-site-Erzeugung entwickelt werden. Eine Vorgabe von grünem Wasserstoff für den geförderten Infrastrukturausbau und eine Nutzung der Elektrolyse als Bindeglied zwischen Strom- und Gasnetz sowie der Mobilität werden empfohlen.
- **Zur Senkung des Investitionsrisikos und zur Marktvorbereitung wird auch weiterhin ein Engagement der öffentlichen Hand notwendig sein.** Hierfür wird die konkrete Weiterentwicklung

des in den Handlungsempfehlungen vorgeschlagenen Förderkonzeptes empfohlen. Die Unterstützung weiterer Leuchtturmprojekten zur Erhöhung der Sichtbarkeit des Themas wird empfohlen. Die Einbindung kommunaler Unternehmen (Stadtwerke und ÖPNV) in den Ausbau kann Synergien schaffen und eine Kommerzialisierung durch neue Geschäftsmodelle begünstigen. Der Ausbau des Tankstellennetzes sollte sich am Bedarf orientieren, zugleich aber die Bereitschaft der Industrie fördern, in Baden-Württemberg Brennstoffzellen-Fahrzeuge und auch Busse auf die Straße zu bringen.

- **Standardisierung erleichtert den Aufbau einer Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur.** Durch die Standardisierung der Tankstellenkonzepte und eine Einigung der Industrie auf einheitliche Tankstellenkonzepte werden deutliche Verbesserungen in Bezug auf Kosten, Zuverlässigkeit, Nutzerfreundlichkeit und Genehmigungsverfahren erwartet. Eine Standardisierung ist daher eine dringende Empfehlung.
- **Eine Vereinfachung von Errichtung, Abnahme und Betrieb der Wasserstoff-Tankstellen muss erreicht werden.** Hierfür müssen in diesen Bereichen diverse Herausforderungen und Probleme angegangen werden, um eine Kommerzialisierung zu erreichen.



Abbildung 42: CEP-Wasserstoff-Fahrzeugflotte (2008) an der Wasserstoff-Tankstelle Berlin Heerstraße (Quelle: CEP)

AUSBLICK

Mit der Einführung von Wasserstoff in die Mobilität bietet sich die Möglichkeit, eine nachhaltige Mobilität auf Basis elektrischer Antriebe zu realisieren und die Energiewende zu fördern. Die Mobilität kann zudem Treiber einer technologischen Entwicklung hin zu einem neuen, sauberen und nachhaltigen Energieträger Wasserstoff auch in anderen Bereichen des täglichen Lebens sein. Baden-Württemberg als innovatives Bundesland mit starken Wurzeln im automobilen Sektor hat gute Voraussetzungen, diese Entwicklung zu fördern und zu unterstützen.

Kapitel 9

ANHANG

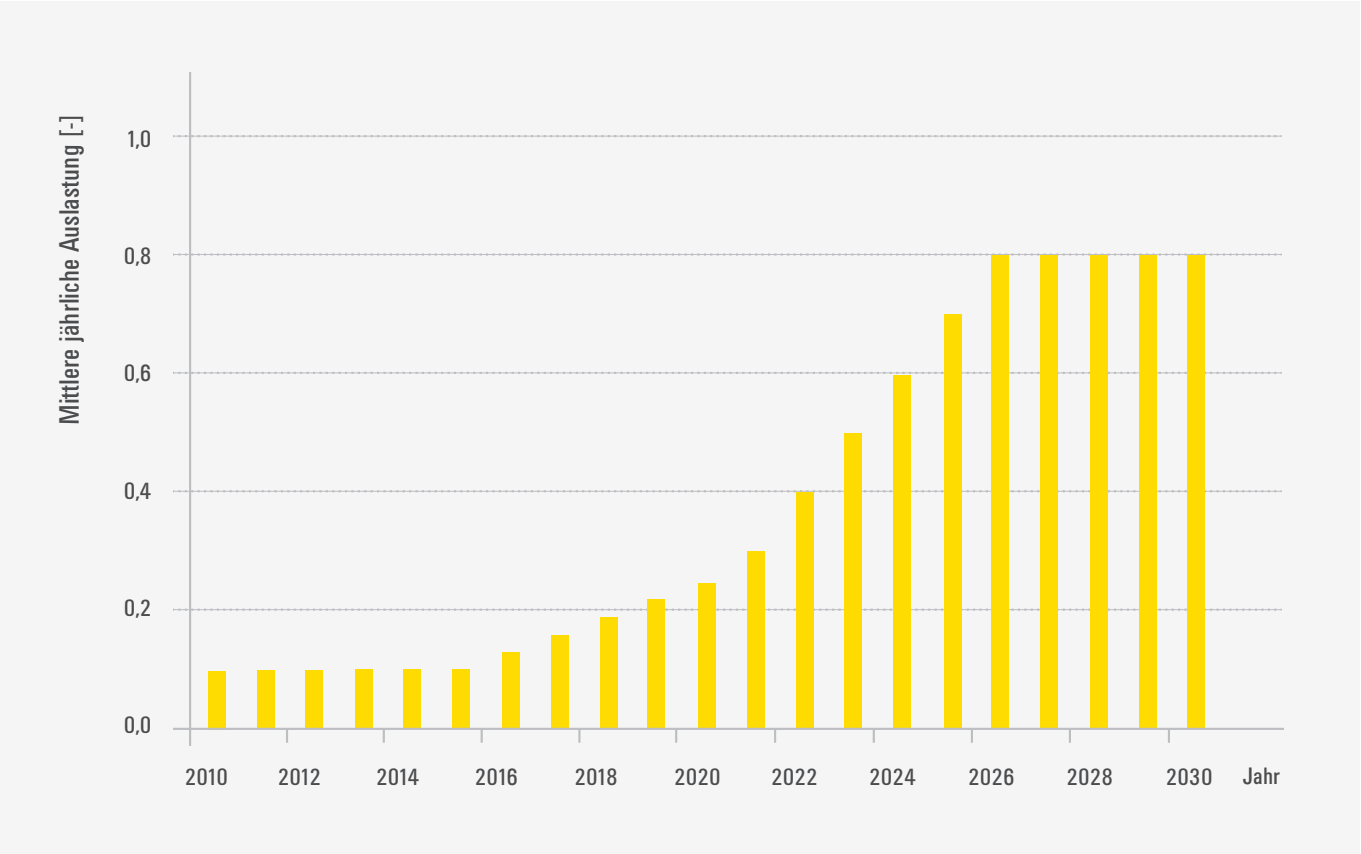


Abbildung 43: Durchschnittliche Auslastung einer Wasserstoff-Tankstelle in der Markteinführung bis 2030, ab dem Jahr 2026 bleibt die mittlere Auslastung konstant

Tabelle 20: Prognose der Bestandszahlen für wasserstoffbetriebene Kfz in Deutschland bis zum Jahr 2050, abgeleitet nach verschiedenen Studien [40] [41] [44]

Fahrzeugart	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2040	2050
PKW (BMU)	10	100	1.300	13.300	1.115.000	2.311.000	6.933.000	7.911.000
Bus (BMU)	–	–	54	89	268	894	5.800	11.600
LNF (BMU)	–	–	–	930	65.000	134.900	441.900	544.200
LKW (BMU)	–	–	–	–	–	1.100	11.900	56.000
PKW (ZSW)	–	–	–	45.300	k. A.	932.000	3.786.000	9.360.000
LNF (ZSW)	–	–	–	–	–	48.700	238.800	571.000
PKW (H2M)	10	100	5.000	150.000	650.000	1.800.000	k. A.	k. A.

Tabelle 21: Entwicklung des jährlichen Wasserstoffbedarfs für den Straßenverkehr in Baden-Württemberg, abgeleitet nach verschiedenen Studien

Jahr	PKW (BMU)	BUS (BMU)	LNF (BMU)	LKW (BMU)	PKW (ZSW)	PKW (H2M)
	[t/a]					
2010	3	–	–	–	–	3
2015	36	32	1	–	–	140
2020	329	60	68	–	1.064	3.524
2025	15.583	164	2.767	–	3.896	12.661
2030	43.084	534	6.822	558	17.458	33.718
2040	118.969	2.248	19.180	4.447	66.729	k. A.
2050	134.429	5.641	28.645	24.223	158.670	k. A.

Tabelle 22: Befragte Personen

Branche	Interviewpartner
Fahrzeughersteller	- Daimler: Martin Schwab, Dr. Jörg Wind - GM/Opel: Dr. Stefan Berger, Horst Jürgen Hill, Jürgen Klugmann
Anlagenhersteller	- Air Products: Katrin Denise Meyer - Air Liquide: Andrés Fernández-Durán - Linde: Dr. Alexander Stubinitzky
Tankstellenbetreiber	- EnBW: Alexander Thomas - KIT: Dr. Thomas Jordan - OMV: Wilhelm Lang - Shell: Andreas Pagel - TOTAL: René Kirchner - Vattenfall: Daniel Hustadt
Verbände und übergreifende Einrichtungen	- E-mobil BW: Dr. Manuel C. Schaloske - LBST: Reinhold Wurster - NOW: Thorsten Herbert - Planet: Klaus Stolzenburg - Spilett (CEP): Mike Hutmacher
Forschungsinstitute	- KIT: Dr. Thomas Jordan - ZSW: Benjamin Schott
Ministerien	- UM Baden-Württemberg: Stefan Gloger, Thomas Gschwind, Dr. Gabriel Striegel - MVI Baden-Württemberg: Rolf Hönig, Helene Weidner - MFW Baden-Württemberg: Dr. Markus Decker
Anwender (Busse)	- HySolutions /Hamburger Hochbahn: Heinrich Klingenberg - Stuttgarter Straßenbahnen: Markus Wiedemann
Genehmigungsbehörden/ZÜS	- Regierungspräsidium Stuttgart: Malte Jahn - TÜV-Süd: Otto Stertz, Dirk Walter und Rolf Wagner

LITERATURVERZEICHNIS

[1]

BDEW, Pressemitteilung: „Anteil der Erneuerbaren Energien steigt auf 23 Prozent“, Berlin, 18.12.2012.

[2]

Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit BMU (Oktober 2011, letzter Zugriff: 19.12.2012): „Das Energiekonzept und seine beschleunigte Umsetzung.“ Available: http://www.bmu.de/energiewende/beschluesse_und_massnahmen/doc/47892.php

[3]

R. Edwards, J.-F. L., J.-C. Beziat (2011): „Well-to-wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context Version 3c“, JEC – Joint Research Centre-EUCAR-CONCAWE collaboration, Luxemburg.

[4]

Wilson, D. (2010): „Hydrogen as an Energy storage Medium“ in Solar Summit 2010, Freiburg.

[5]

TÜV-Süd Zertifizierstelle 'klima und energie' (2011): „TÜV-Süd Standard CMS 70: Erzeugung von grünem Wasserstoff (GreenHydrogen)“, München.

[6]

EnBW, Pressemitteilung:„H2 Mobility – Gemeinsame Initiative führender Industrieunternehmen zum Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur in Deutschland“, Berlin, 10.09.2009

[7]

LBST, Pressemitteilung: „Jahresauswertung von LBST und TÜV SÜD – Weltweit 12 neue Wasserstoff-Tankstellen im Jahr 2011“, München, 22.02.2012.

[8]

Sloth, M. (2012): „The cost of establishing a hydrogen infrastructure for transport – A case study covering Denmark“ in SYMPOSIUM Water electrolysis and hydrogen as part of the future Renewable Energy System, Kopenhagen.

[9]

Frost & Sullivan (2012): „CEO’s 360 Degree Analysis of Fuel Cell Electric Vehicle Market in Japan and South Korea Fuel Cell Electric Vehicle Market to Emerge by 2015.“

[10]

CEP (letzter Zugriff: 30.09.2012): „50 Wasserstofftankstellen für Deutschland.“ Available: http://www.cleanenergy-partnership.de/uploads/tx_cepdownloads2/Deutschland-karte_CEP_50_TS_A4.pdf

[11]

Daimler, Pressemitteilung: „Linde und Daimler treiben Infrastrukturaufbau für Brennstoffzellenfahrzeuge weiter voran“, Stuttgart/München, 01.06.2011.

[12]

AirLiquide, Pressemitteilung: „Air Liquide eröffnet erste öffentliche Wasserstofftankstelle für PKW in Nordrhein-Westfalen“, Düsseldorf, 07.09.2012.

[13]

Fuchs, A. (2011): „Flottenbetrieb Toyota Brennstoffzellenfahrzeuge“ in NIP Vollversammlung 2011, Berlin.

[14]

Ogden, J.; Cunningham, J. and Nicholas, M. (2009): „Roadmap for Hydrogen and Fuel Cell Vehicles in California: A Transition Strategy through 2017“, Institute of Transportation Studies, University of California, Davis.

[15]

CaFCP (2012): „A California Road Map: The Commercialization of Hydrogen Fuel Cell Vehicles“, West Sacramento.

[16]

Wipke, K.; et al. (2012): „National Fuel Cell Electric Vehicle Learning Demonstration (Final Report)“, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden.

[17]

CEP, Pressemitteilung: „Baden-Württemberg wird Partner der Partnership“, Berlin, 01.12.2010.

[18]

Wirtschaftswoche (letzter Zugriff: 30.09.2012): „Aufbruch in das Wasserstoff-Jahrhundert“. Available: <http://www.wiwo.de/technologie/auto/energie-wasserstoff-tankstellen-fuer-deutsche-ballungsräume/6184106-6.html>

[19]

FCH-JU, Pressemitteilung: „Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking: New Government and cross industry programme to make hydrogen powered travel in the UK a reality“, London, 18.01.2012.

[20]

Ursúa, A.; Gandia, L. M. and Sanchis, P. (2012): „Hydrogen Production From Water Electrolysis: Current Status and Future Trends“ in Proceedings of the IEEE, vol. 100, pp. 410–426.

[21]

Rostrup-Nielsen, J. (2010): „Reforming and Gasification – Fossil Energy Carriers“ in Hydrogen and Fuel Cells, Detlef Stolten (Ed.), Wiley VCH Verlag, Weinheim.

[22]

Smolinka, T.; Günther, M. and Garche, J. (2010): „Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien“, NOW GmbH Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (Hrsg.), Berlin.

[23]

Enertrag, Pressemitteilung: „Wasserstoff-Hybridkraftwerk Prenzlau: ENERTRAG, TOTAL und Vattenfall vereinbaren Kooperation“, Berlin, 18.01.2011.

[24]

Wurster, R. (2003): „Möglichkeiten der Wasserstoffbereitstellung und das Tankstellennetz der Zukunft“ in Hessischer Mobilitätskongress 2003, Frankfurt/Main.

[25]

Yang, C. and Ogden, J. (2007): „Determining the lowest-cost hydrogen delivery mode“ in International Journal of Hydrogen Energy, vol. 32, pp. 268–286.

[26]

H2BZ (2011): „Wasserstoff-Tankstellen: Ein Leitfaden für Anwender und Entscheider“, HA Hessen Agentur GmbH, Wiesbaden.

[27]

Linde (2006): „Mobile Wasserstofftankstelle präsentiert“ in Linde Technology: Berichte aus Wissenschaft und Technik, Wiesbaden, p. 6.

[28]

Bachmeier, M. (2011): „Mobilität mit Wasserstoff: Wasserstofftankstelle“ in NIP Vollversammlung 2011, Berlin.

[29]

Stubinitzky, A. (2012): „Advanced H2 fuelling & compression technologies. Experiences gained and technology improvements“ in WHEC 2012, Toronto.

[30]

Winter, C.-J. and Nitsch, J. (1988): „Wasserstoff als Energieträger: Technik, Systeme, Wirtschaft“, Springer Verlag, Heidelberg.

[31]

Deutsche Energie Agentur (2009): „GermanHy: Woher kommt der Wasserstoff in Deutschland bis 2050?“, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), Berlin.

[32]

H2M (2010): „H2 Mobility 70 MPa Hydrogen Refuelling Station Standardization – Functional Description of Station Modules (V1.1)“, herausgegeben durch die NOW GmbH Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, Berlin.

[33]

Elgowainy, A. (2012): „Hydrogen Refueling Infrastructure Options for Early Fuel Cell Vehicle Markets“ in WHEC 2012, Toronto.

[34]

Bert Hobein and Krüger, R. (2010): „Physical Hydrogen Storage Technologies – a Current Overview“ in Hydrogen and Fuel Cells: Fundamentals, Technologies and Applications, Detlef Stolten (Ed.), Wiley VCH Verlag, Weinheim.

[35]

Wurster, R. (2012): „Übersicht über Wasserstofftankstellenkonzepte“ in NOW H2-Tankstellen Genehmigungsworkshop, Stuttgart.

[36]

Empere, D. (2012): „Wasserstofftankstellen – Status quo der Genehmigungsverfahren aus Sicht eines Antragstellers“ in NOW Genehmigungsworkshop, Stuttgart.

[37]

Wurster, R.; et al. (2011): „Sichere Wasserstoffinfrastruktur“, NOW GmbH Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (Hrsg.); im Auftrg durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin.

[38]

Wurster, R. and Schmidtchen, D. U. (2011): „DWV Wasserstoff-Sicherheits-Kompodium“, Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband (Hrsg.), Berlin.

[39]

Wurster, R. (2008): „HyWays: The European Hydrogen Roadmap“, LBST, München.

[40]

McKinsey (2011): „Communication document H2 Mobility: Study results on developing a hydrogen refueling infrastructure in Germany.“

[41]

Nitsch, D. J.; et al. (2012): „Leitstudie 2011: Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global“, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.), Berlin.

[42]

Nitsch, D. J.; et al. (2011): „Leitstudie 2010: Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global“, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.), Berlin.

[43]

NOW (2010): „Ein Portfolio von Antriebssystemen für Europa: Eine faktenbasierte Analyse (EU Power Train Report)“, Berlin.

[44]

Schott, B.; et al. (2012): „Energieträger der Zukunft – Potenziale der Wasserstofftechnologie in Baden-Württemberg“, e-mobil BW GmbH (Hrsg.), Stuttgart.

[45]

Tillmetz, W.; et al. (2009): „Diskussionspapier: Wasserstoff in Baden-Württemberg – Erzeugung, Infrastruktur und Technologie“, im Auftrag durch das Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg, Stuttgart.

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BetrSichV	Betriebssicherheitsverordnung
BEV	Battery Electric Vehicle (batteriebetriebenes Elektrofahrzeug)
BHKW	Blockheizkraftwerk
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
BZ	Brennstoffzelle
CcH ₂	Cryo compressed hydrogen (Kryodruckwasserstoff)
CGH ₂	Compressed Gaseous Hydrogen (komprimierter gasförmiger Wasserstoff)
CNG	Compressed Natural Gas (komprimiertes Erdgas, hier für Erdgas-Fahrzeug)
DMS	Demand Side Management
EE	Erneuerbare Energie(n)
EU-FRP	EU-Forschungsrahmenprogramm
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle (Brennstoffzellen-Fahrzeug)
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse – Verfahren zur Untersuchung der Anlagenzuverlässigkeit
GHG	Greenhouse Gas (Treibhausgas)
HAZOP	Hazard and Operability – Verfahren zur Untersuchung von Anlagensicherheit
HRS	Hydrogen Refuelling Station (Wasserstoff-Tankstelle)
ICE	Internal Combustion Engine (Verbrennungsmotor)
IrDA	Infrared Data Association (Industriestandard zur Datenübertragung mit Infrarot, bezeichnet auch das normierende Gremium)
Kfz	Kraftfahrzeug
LH ₂	Liquified Hydrogen (verflüssigter Wasserstoff)
LKW	Lastkraftwagen (hier Fahrzeuge über 3,5 t zulässiges Gesamtgewicht)
LNF	Leichte Nutzfahrzeuge (hier bis 3,5 t zulässiges Gesamtgewicht)
LPG	Liquefied Petroleum Gas (Autogas)
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PEM	Proton Exchange Membrane (Protonen-Austausch-Membran)
PHEV	Plug In Electric Vehicle (Plug-In-Elektrofahrzeug)
PKW	Personenkraftwagen
POX	Partielle Oxidation
PSA	Pressure Swing Adsorption (Druckwechseladsorption)
PV	Photovoltaik
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TTW	Tank To Wheel (vom Tank zum Rad)
VES	Verkehrswirtschaftliche Energiestrategie
WTW	Well To Wheel (vom Bohrloch zum Rad)
ZEV	Zero Emmision Vehicle (Null-Emmissions-Fahrzeug)
ZÜS	Zugelassene Überwachungsstelle

INSTITUTIONEN / VERBÄNDE / FIRMENNAMEN

BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
CaFCP	California Fuel Cell Partnership
CEP	Clean Energy Partnership
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
DWV	Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband e.V.
EnBW	Energie Baden-Württemberg AG
EREC	European Renewable Energy Council
FCH JU	Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking
IEFE	IEFE Centre for Research on Energy and Environmental Economics and Policy der Università Bocconi, Italien
ISE	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
LBST	Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH
NIP	Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie
NOW	Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie GmbH
SAE	Society of Automotive Engineers, heute SAE International genannt
SHHP	Scandinavian Hydrogen Highway Partnership
TÜV	Technischer Überwachungsverein
UM	Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg
VdTÜV	Verband der Technischen Überwachungs-Vereine e. V.
ZSW	Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg

SONSTIGE ABKÜRZUNGEN

L	Large (groß)
M	Middle (mittelgroß)
ppm	Parts Per Million (10 ⁻⁶ , eine Volumenanteilsangabe, 1 ppm = 0,0001 Vol. %)
S	Small (klein)
XS	Extra Small (sehr klein)



Impressum

Herausgeber

e-mobil BW GmbH – Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg
Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg
Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg

Redaktion

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE: Dr. Tom Smolinka, Christopher Voglstätter
Fraunhofer-Marketing-Netzwerk: Erik Sicha

Koordination Studie

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg:
Stefan Gloger, Thomas Gschwind, Dr. Gabriel Striegel
e-mobil BW GmbH: Dr. Manuel C. Schaloske
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE: Dr. Tom Smolinka, Christopher Voglstätter

Layout/Satz

herminghaus-design, Freiburg

Fotos

Alle Abbildungen sind Eigentum der gekennzeichneten Personen/Firmen.
Abbildungen, die nicht gegenteilig gekennzeichnet sind, sind Eigentum
des Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE.
Titel: Fraunhofer ISE
Seite 1: TOTAL / Pierre Adenis
Seite 3: Linde
Seite 5: Linde
Seite 95: Shutterstock

Druck

burger)(druck GmbH, Waldkirch

Auslieferung und Vertrieb

e-mobil BW GmbH
Leuschnerstraße 45
70176 Stuttgart
Tel.: 0711/892385-0
Fax.: 0711/892385-49
Mail: info@e-mobilbw.de
www.e-mobilbw.de

März 2013

© Copyright liegt bei den Herausgebern

Alle Rechte vorbehalten. Dieses Werk ist einschließlich seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwendung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung der Herausgeber unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen. Für die Richtigkeit der Herstellerangaben wird keine Gewähr übernommen.



e-mobil BW GmbH

Leuschnerstr. 45 | 70176 Stuttgart

Telefon: +49 711 892385-0

Telefax: +49 711 892385-49

info@e-mobilbw.de | www.e-mobilbw.de

