

Wasserstoffmobilität – Marktentwicklungsaktivitäten Weltweit

Thomas Bielmeier

The Linde Group, Technology & Innovation – Hydrogen Solutions, Seitnerstraße 70, 82049 Pullach, Deutschland, +49.89.7446-2328, Thomas.Bielmeier@Linde-Gas.com, <http://www.Linde-Gas.com/Hydrogen>

Kurzfassung:

Aufgrund der global immer konkreter erkennbaren Auswirkungen des Klimawandels sowie der regional, in Städten, steigenden Schadstoffkonzentrationen in der Luft, steigt der Druck zeitnah wirksame Maßnahmen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen in die Realität umzusetzen. Neben der zunehmenden Implementierung erneuerbarer Energiequellen in der Energieerzeugung für Industrie und Haushalte, bietet hier insbesondere der Verkehrssektor ein erhebliches Potential. Neben emissionsreduzierenden Technologien wie Erd- und Autogasfahrzeugen sind dabei in den vergangenen Jahren hauptsächlich Elektrofahrzeuge als (lokal) emissionsfreie Lösung in den Vordergrund gerückt. Dabei liegt marktseitig und auch in der öffentlichen Wahrnehmung der Fokus auf batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV), allerdings beginnen Fahrzeughersteller nun auch mit der Markteinführung brennstoffzellenbetriebener Elektrofahrzeuge (FCEV).

Um diese Fahrzeuge alltagstauglich zu machen bedarf es allerdings einer eignen Infrastruktur, weswegen in einigen Ländern Initiativen gegründet und Programme zur Infrastrukturentwicklung aufgesetzt wurden – oft mit staatlicher Unterstützung. Die bedeutendsten Kernmärkte sind dabei Kalifornien, Japan und Deutschland. Zielvorgaben waren in Japan 100 Wasserstofftankstellen (HRS) bis 2015, in Kalifornien 68 HRS bis 2016 und in Deutschland 50 HRS bis 2015. Der tatsächliche Stand Ende 2015 zeigt, dass mit aller Ernsthaftigkeit daran gearbeitet wird, diese Ziele zu erreichen, er zeigt aber auch, dass alle Länder hinter ihrem Zeitplan liegen. Herausforderungen für die Kommerzialisierungspläne liegen im komplexen Zusammenspiel mehrerer Stakeholder und Regularien, wobei die einzelnen Länder unterschiedliche Lösungsstrategien verfolgen. Während nahezu alle subventionierte Infrastrukturentwicklung vorweisen, sind direkte Kaufanreize für FCEVs weniger verbreitet.

Zur Anwendung kommt der Wasserstoff als Energieträger unterdes nicht nur in Pkws, sondern es finden sich auch weitere, zum Teil heute schon wirtschaftlich attraktive, Anwendungsbereiche. So zum Beispiel in den Bussen des öffentlichen Nahverkehrs, bei denen sich vor allem die herausfordernde Infrastruktur durch einen einzelnen Betankungspunkt im Depot leichter abdecken lassen kann. Darüber hinaus werden auch Möglichkeiten der Anwendung in Zügen ernsthaft betrachtet, da z.B. nicht das gesamte Schienennetz ohne weiteres mit Überlandleitungen elektrifiziert werden kann.

Keywords: Wasserstoffmobilität, Brennstoffzellenfahrzeuge, Wasserstofftankstellen

1 Technologien und Anwendungsbereiche

In entwickelten Ländern ist neben dem Energiesektor der Transportsektor am bedeutendsten hinsichtlich des Ausstoßes von Treibhausgasen (EU: ca. 25% [1], USA: ca. 27% [2]). Aus diesem Grund existieren seit längerer Zeit Bestrebungen, die Emissionen in diesem Bereich zu reduzieren. Insbesondere in den letzten 10 Jahren wurden in vielen Ländern zunehmend strengere Grenzwerte verabschiedet, welche die Automobilindustrie dazu zwingt, ihre Modellpalette in Richtung emissionsarmer bzw. gänzlich emissionsfreier Fahrzeuge zu entwickeln. Am Ende dieser Entwicklung stehen aus heutiger Sicht Elektrofahrzeuge, welche mit Strom, entweder an Board gespeichert in einer Batterie oder aus mitgeführtem Wasserstoff in einer Brennstoffzelle erzeugt, angetrieben werden. Während die batteriebetriebenen Elektrofahrzeuge (BEV) eine hervorragende Energieeffizienz aufweisen, haben wasserstoffbetriebene Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) bemerkenswerte Vorteile hinsichtlich Reichweite und Betankungsgeschwindigkeiten. Beiden ist jedoch gemein, dass für ihren Erfolg eine neue Lade- oder Betankungsinfrastruktur geschaffen werden muss, um den Endnutzern den Umstieg auf diese Technologien zu ermöglichen. Ob sich eine der beiden Technologien durchsetzt, oder ob am Ende beide ihre Bedeutung haben werden hängt auch davon ab, wie gut die Barrieren bei der Markteinführung überwunden werden können bzw. die Märkte auf die Technologien vorbereitet sind.

1.1 Brennstoffzellenfahrzeuge

Die Erfindung der Brennstoffzelle geht weit über 150 Jahre zurück. Aufgrund von technischen und wirtschaftlichen Hürden (z.B. wenig kompakte Bauweise, ungünstige Betriebsbedingungen, hohe Kosten) war sie allerdings lange Zeit nicht für mobile Anwendungen geeignet. Erst die Entwicklung neuer Membranmaterialien ermöglichte es zu Beginn der Neunzigerjahre die Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle (PEM) für den Mobilitätssektor attraktiv zu machen [3]. Dies und geänderte politische Rahmenbedingungen in Bezug auf Emissionen führten zu einem zunehmenden Interesse an der Technologie. Insbesondere die Daimler AG machte zu dieser Zeit mit Ihren verschiedenen NECAR 1-5 Varianten auf sich aufmerksam.

Neben der Brennstoffzelle war vor allem die Mitführung des Treibstoffes eine wesentliche Herausforderung, wobei verschiedenste Ansätze untersucht wurden. So setzte Daimler im NECAR 3 und 5 auf Methanol und GM im S10 auf Benzin, welches jeweils zur Wasserstoffproduktion in einem Reformer im Fahrzeug verwendet wurde. Besondere Herausforderung war hierbei der Platzbedarf für den Reformer. BMW (Hydrogen 7, mit Verbrennungsmotor) und GM (HydroGen 3) setzten außerdem auf die Betankung mit tiefkaltem, flüssigem Wasserstoff (LH₂ bei -253°C). Das ermöglichte das Mitführen größerer Mengen Wasserstoff, führte allerdings aufgrund von Wärmeeintrag zur Verdampfung und damit zum Verlust des Wasserstoffs aus dem Tank (ca. 9 Tage zur Entleerung eines halbvollen Tanks). Aufgrund dieser und weiterer Probleme richtete sich der Fokus auf die Speicherung von gasförmigem Wasserstoff (GH₂) in Drucktanks. Während zu Beginn noch mit moderaten Drücken von 350 bar (z.B. Daimlers NECAR 4, Ford Focus FCV) gearbeitet wurde, fiel später die Entscheidung auf 700 bar. Grund dafür war die deutlich höhere Dichte des Wasserstoffs bei dem höheren Druck, während zusätzlich nötiger Energieaufwand und Mehrkosten der Tanks überschaubar waren. 700 bar wurde dabei als ein Optimum

identifiziert, da eine noch weitere Erhöhung des Drucks keine so deutliche Steigerung der Dichte mehr bewirkt (vgl. Tabelle 1), allerdings die Konstruktion der Betankungsanlagen und der Tanks wesentlich erschwerte und verteuerte [4]. Die Architektur eines aktuellen Brennstoffzellenfahrzeuges ist in Abbildung 1 erläutert.

Tabelle 1: Dichte von Wasserstoff bei verschiedenen Bedingungen

	LH2	GH2			
	-252°C, 1bar	15°C, 1bar	15°C, 350bar	15°C, 700bar	15°C, 1050bar
Dichte [kg/m ³]	70,8	0,08	23,99	40,17	51,96
Erhöhung abs.			23,91	16,18	11,79
Erhöhung. %				67%	29%

Mittlerweile haben die ersten Automobilhersteller begonnen, Brennstoffzellenfahrzeuge als (Klein-)Serienprodukte in den Markt einzuführen - allen voran: Hyundai. Der koreanische Hersteller startete 2013 im heimischen Ulsan als erster die kommerzielle Produktion und kündigte eine Stückzahl von ca. 1.000 „ix35 Fuel Cell“ bis zum Jahr 2015 an. Danach sei eine Serienfertigung von jährlich etwa 10.000 Stück möglich [5]. Seitdem wurde auch ein FCEV der Tochtermarke KIA für das Jahr 2020 und ein weiteres, mit einer für die Technologie maßgeschneiderten Plattform, unter der Marke Hyundai noch vor 2020 angekündigt [6]. Toyota folgte Hyundai Ende 2014 mit der Markteinführung des „Mirai“. Die initiale Nachfrage war dabei so hoch, dass Toyota Anfang 2015 entschied die Produktionskapazität stufenweise von 700 in 2015 auf 2.000 in 2016 und 3.000 in 2017 zu erhöhen [7]. Später kündigte Toyota an, dass mit 30.000 verkauften FCEVs in 2020 gerechnet würde. Das nächste Serien-FCEV im Markt wird voraussichtlich das Honda „Clarity Fuel Cell“ sein, welches im März 2016 in Fertigung gehen soll [8]. Europäische und amerikanische Automobilhersteller legen hier eine wesentlich defensivere Strategie an den Tag als ihre asiatischen Pendanten, wobei Allianzen (z.B. Daimler, Renault-Nissan, Ford; BMW, Toyota; GM, Honda) für F&E Aktivitäten

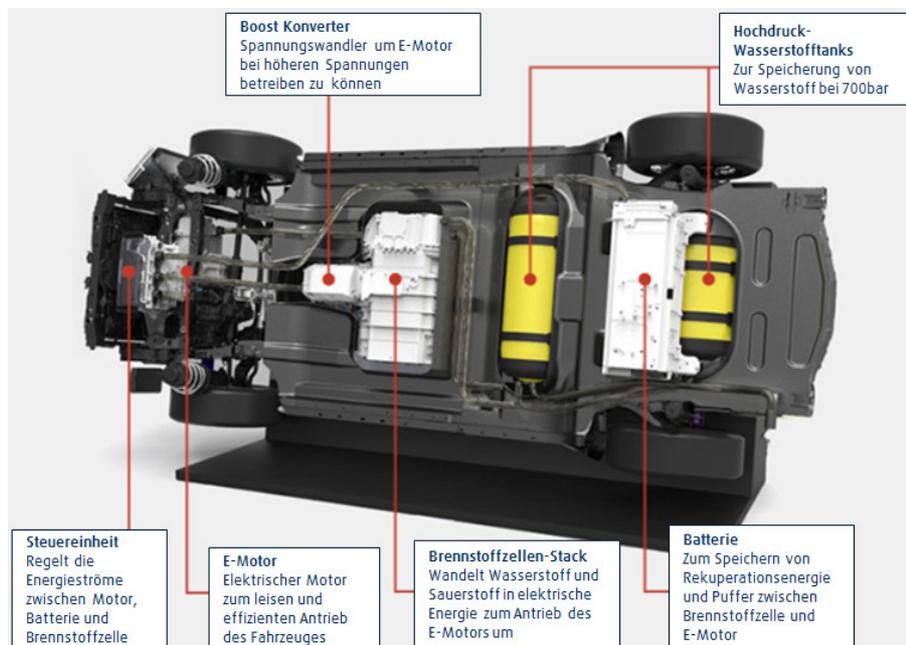


Abbildung 1: Konzeptioneller Aufbau des Antriebsstrangs eines Brennstoffzellenfahrzeuges [9]

und das Erreichen relevanter Stückzahlen für die Markteinführung eines preis-kompetitiven FCEVs geschlossen wurden. Abgesehen von einzelnen Demonstrationsmodellen für Tests

oder Automobilmessen wird es nach aktuellen Aussagen aber zumindest bis zum Jahr 2020 (mehrere OEMs nennen 2020-2025 als Zielzeitraum für FCEVs) keine weiteren marktreifen Serienfahrzeuge geben. Einzig Daimler will hier mit einer angekündigten Serienproduktion für das Jahr 2017 (verschoben von 2014 um höhere Stückzahlen zu erreichen und damit die Kleinstserie zu überspringen) noch vor dem Ende dieses Jahrzehnts nachziehen [10]. Einen Überblick über die bedeutendsten Demonstrationsfahrzeuge und Markteinführungspläne gibt Abbildung 2.

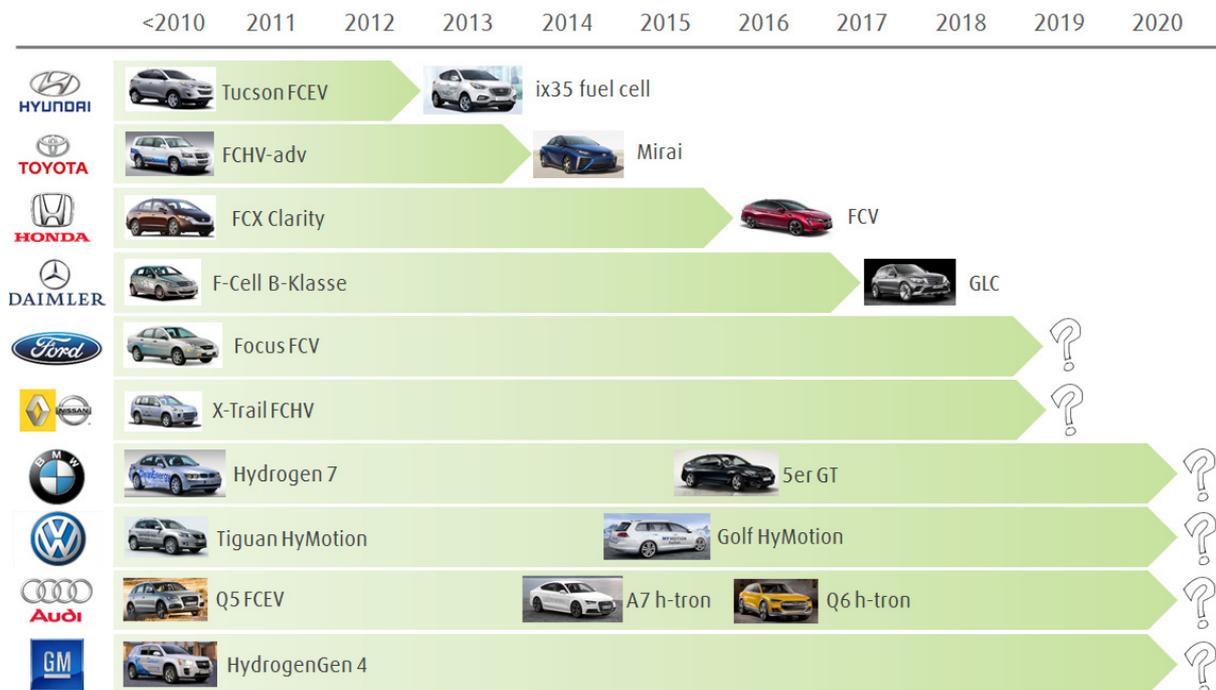


Abbildung 2: Zeitleiste der Markteinführung von FCEVs wesentlicher Automobilhersteller

1.2 Wasserstofftankstellen

Die Entwicklung von Wasserstoffbetankungsanlagen geht zurück in die Achtzigerjahre, als die ersten Automobilhersteller Wasserstoff-Forschungsfahrzeuge entwickelten und dafür Betankungslösungen brauchten. Die technischen Lösungen dafür waren noch relativ einfach umgesetzt. So wurde z.B. eine Betankung mit flüssigem Wasserstoff (LH₂) dadurch bewerkstelligt, dass ein LH₂-Tank mit Überdruck beaufschlagt wurde. Dadurch erfolgte dann ein Überströmen des Wasserstoffs in den Fahrzeugtank. Die erste öffentliche Wasserstoff-tankstelle wurde 1999 im Zuge des Gemeinschaftsprojektes „ARGEMUC“ am Flughafen München eröffnet und funktionierte ebenfalls nach diesem Prinzip [11]. Neben der LH₂-Betankung, welche vollautomatisch mittels eines Tankroboters erfolgte, wurde auch gasförmiger Wasserstoff (GH₂) bei einem Druck von 250/350 bar angeboten, der mittels eines Hochdruckverdichters in entsprechende Speicherflaschen gespeichert und von dort an die Fahrzeuge abgegeben wurde. Die Betankungstechnologie musste sich im Laufe der Zeit immer wieder an die Entwicklungen auf Pkw-Seite anpassen. Entsprechend der nun etablierten 700 bar GH₂ Betankung hat sich in der Industrie ein in den wesentlichen Bestandteilen ähnliches Tankstellensystem gefestigt. Typischerweise besteht dies aus Gasspeicher, Verdichter/Pumpe, Hochdruck-Pufferspeicher, Konditionierungssystem, Dispenser und übergeordnete Systemsteuereinheit.

Die Speicherung des Wasserstoffs an der Tankstelle erfolgt entweder in LH₂-Tanks bei niedrigen Drücken (<8 bar) oder gasförmig in Drucktanks bei Drücken von typischerweise 45 bar bis 200 bar. Der Wasserstoff wird dann mit einem Verdichter (GH₂) oder einer Pumpe (LH₂) in die Hochdruck-Pufferspeicher (bis zu 1.000 bar) gefüllt. Im Falle einer Betankung strömt der Wasserstoff dann von dort zur Zapfsäule (Dispenser) und in das Fahrzeug. Von entscheidender Bedeutung ist hier das Konditionierungssystem, welches dafür sorgen muss, dass der Wasserstoff am Dispenser die erforderliche/zulässige Temperatur (ca. -40°C) aufweist. Bei Verdichtern ist hier eine Kühleinheit erforderlich, um den Wasserstoff von Umgebungstemperatur abzukühlen, bei Pumpen, welche mit kryogenem LH₂ arbeiten, ist zuvor Wärme in das System zu bringen (elektrische Heizer, Luftwärmetauscher). In Abbildung 3 ist eine schematische Darstellung einer Wasserstofftankstelle basierend auf einer kryogenen LH₂-Pumpe zu sehen.

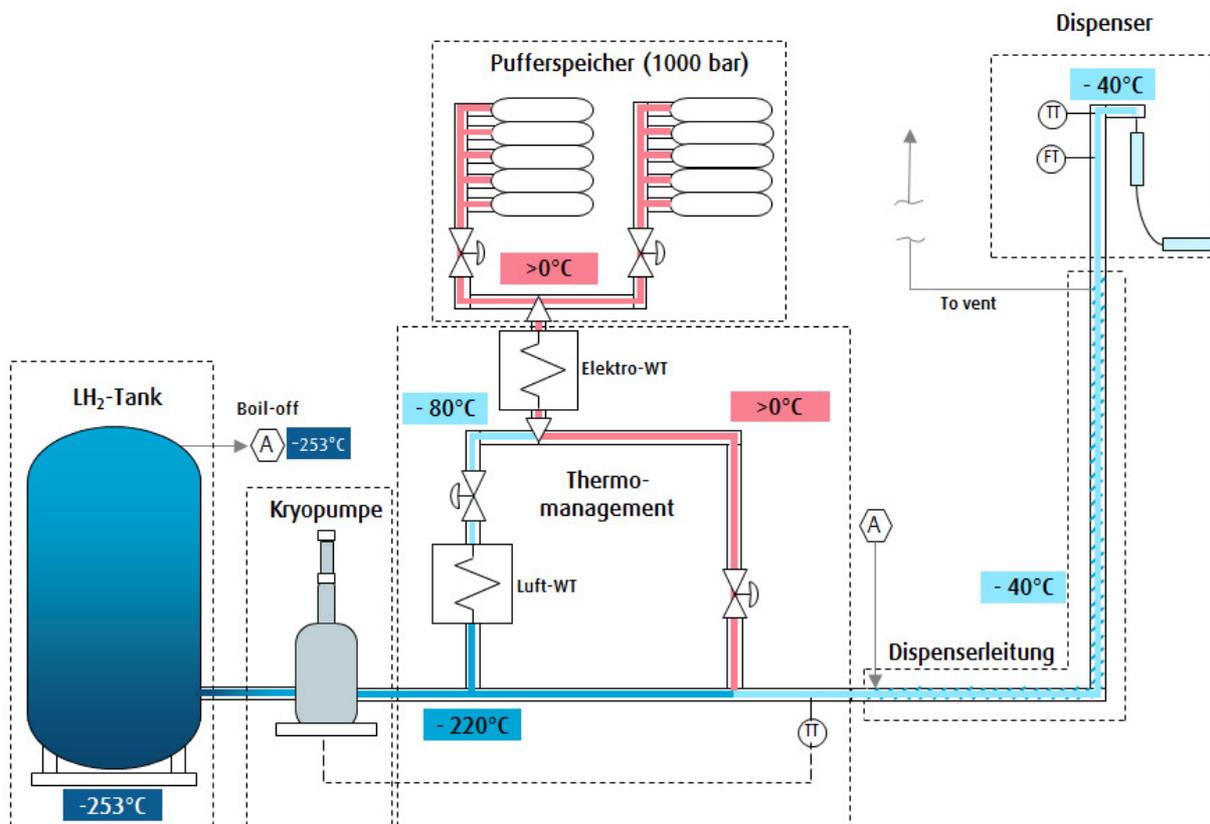


Abbildung 3: Schema einer Wasserstofftankstelle mit Linde Kryopumpen-Technologie

Die erwähnte, weitgehende Annäherung im Tankstellensetup ist insbesondere begleitet durch die fortschreitende Regulierung der Anforderungen an die Tankstellen durch den Industriestandard SAE J2601. Dieser gibt der Tankstelle die Betankungsparameter vor, sodass die Betriebsgrenzen der Fahrzeugtanks (zulässige Tankgrößenkategorien: 2-4 kg, 4-7 kg, 7-10 kg) nicht verletzt werden. Diese sind für einen 700 bar Tank auf einen Temperaturbereich von -40°C bis +85°C und einen Druckbereich von 5 bar bis 875 bar festgelegt. Dazu arbeitet der Standard mit Nachschlagetabellen, welche Ergebnis umfangreicher Modellierungen sind. Basierend auf Tankstellenkategorie (definiert durch Wasserstofftemperatur am Dispenser; typischerweise min. -40°C bis max. -33°C) und Tankgrößenkategorie wird die passende Tabelle ausgewählt. Aus dieser ist dann, in Abhängigkeit von Außentemperatur und Tankstand (Restdruck) im Fahrzeug, der Zieldruck

im Fahrzeug am Ende des Betankungsvorgangs sowie der dafür nötige Druckanstieg pro Minute (durchschnittliche Druckrampe) auszulesen. Sollten bei der Betankung nicht alle Informationen vorliegen, gibt der Standard Minimalbedingungen vor, sodass dennoch eine sichere Betankung durchgeführt werden kann [12].

1.3 Weitere Anwendungsbereiche

Ein weiterer wesentlicher Anwendungsbereich von Wasserstoff in der Mobilität ist neben Pkws der öffentliche Nahverkehr. Weltweit wurden in der Vergangenheit zahlreiche Studien und Demonstrationsprojekte zum Einsatz von Brennstoffzellenbussen (FCBus) durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten, dass die Busse in der Handhabbarkeit positiv wahrgenommen wurden und insbesondere die Belastung für die Busfahrer aufgrund des leisen Betriebs abnahm. Kritische Punkte waren aber stets u.a. die kostspielige Infrastruktur und der hohe Preis eines Brennstoffzellenbusses im Vergleich zu einem konventionellen Dieselbus. Um diese Punkte zu lösen wurde innerhalb des von der EU geförderten „Fuel Cell & Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU)“ ein Kommerzialisierungspfad entwickelt. In der ersten Stufe sollen dabei auf Seiten der Infrastruktur Engineering-Studien mit interessierten Regionen durchgeführt werden, um die Kosten zu analysieren und fertige Konzepte zu entwickeln. Anschließend sollen diese dann weitestgehend entsprechend der Ergebnisse implementiert werden. Zusätzlich sollen die beteiligten Verkehrsgesellschaften und Busbetreiber ihre Nachfrage nach Bussen in einem gemeinsamen Einkauf bündeln, um so für die Bushersteller relevante Stückzahlen zu generieren und die Kosten zu senken. Als Zeitraum für die erfolgreiche Umsetzung und den anschließenden voll-kommerziellen Roll-out ist das Jahr 2020 anvisiert (vgl. Abbildung 4) [13].

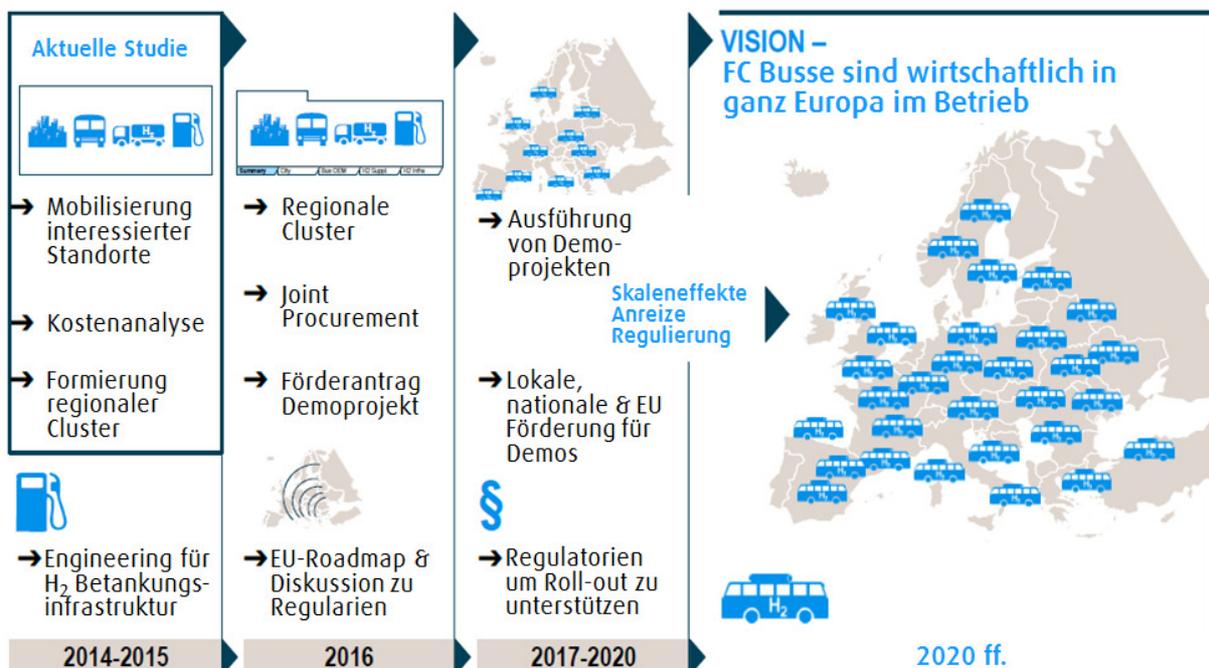


Abbildung 4: FCH JU FCBus Kommerzialisierungsroadmap [13]

Außerdem sind Aktivitäten im Bereich des Schienenverkehrs zu beobachten. Gründe dafür sind z.B. erwarteter Preisanstieg bei konventionellen Kraftstoffen, immer strenger werdende Vorschriften hinsichtlich Lärmemissionen, gesellschaftlicher und regulatorischer Trend hin zu

mehr Nachhaltigkeit und sauberer Energie und Transportmöglichkeiten. Diese Aspekte werden zusätzlich dadurch verstärkt, dass eine vollständige Elektrifizierung des Schienennetzes (mit z.B. Überlandleitungen) nicht möglich sein wird. Schätzungen zu Folge liegt dieser Anteil bei ca. 50% des Netzes. Hierfür wird aktuell im Auftrag des deutschen Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) eine Studie durchgeführt, um technische, rechtliche und ökonomische Fragestellungen zur Integration von Wasserstoff als Kraftstoff für den Schienenverkehr zu klären und die bevorstehende Phase der Markteinführung erster Fahrzeuge zu ermöglichen [14].

2 Marktentwicklungsaktivitäten weltweit

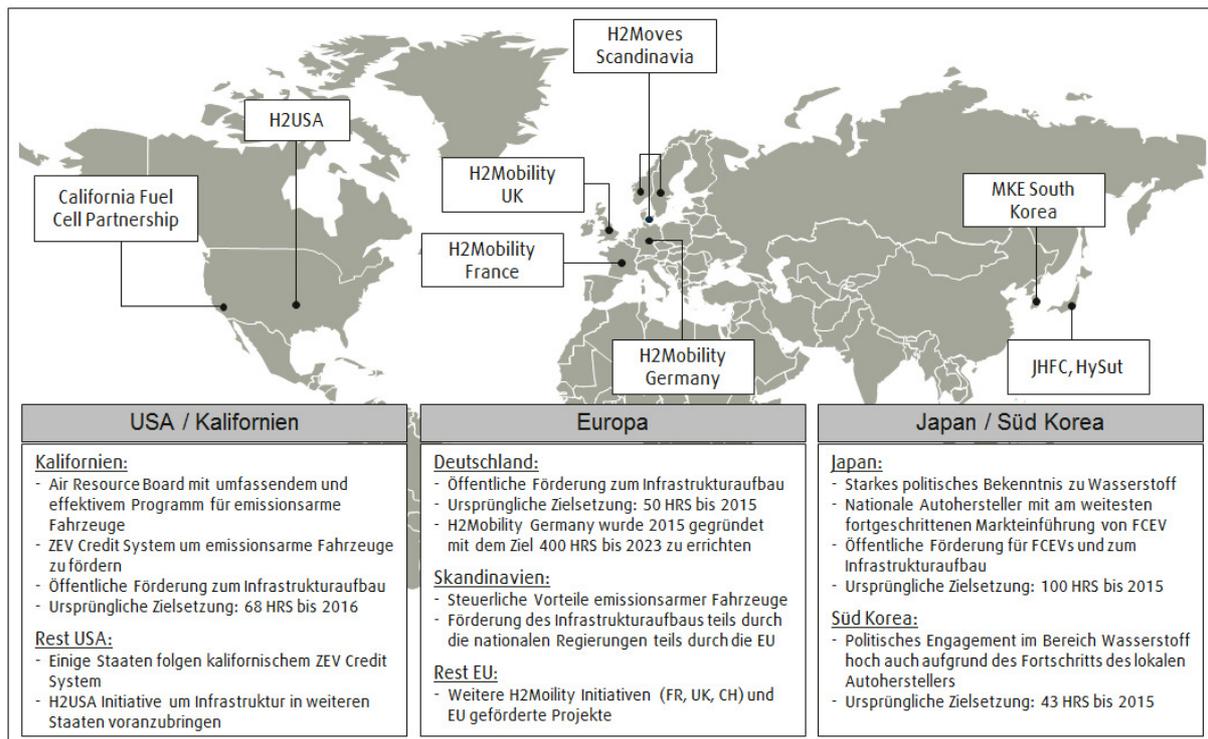


Abbildung 5: Überblick über internationale Aktivitäten im Bereich Wasserstoffmobilität

2.1 Deutschland

In Deutschland ist der Start der Bemühungen zur Markteinführung der Wasserstoffmobilität auf das Jahr 2002 zurückzuführen, in welchem die „Clean Energy Partnership“ (CEP) gegründet wurde. Sie ist eine gemeinsame Initiative von Politik und Industrie der mittlerweile 19 Partner angehören. Seit 2008 ist die CEP auch Leuchtturmprojekt im „Nationalen Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie“ (NIP), welches 2006 initiiert wurde und bis zum Jahr 2016 mit Finanzmittel in Höhe von 1,4 Mrd. € (50% Politik, 50% Industrie) ausgestattet ist [15].

Die CEP befasst sich in ihrer Arbeit mit den Teilbereichen Produktion von Wasserstoff (insb. mit Hinblick auf Nachhaltigkeit), Infrastruktur (Ausbau HRS-Netz und technische Standards) sowie den Fahrzeugen (Optimierung der Effizienz und Zuverlässigkeit, Kundenakzeptanz).

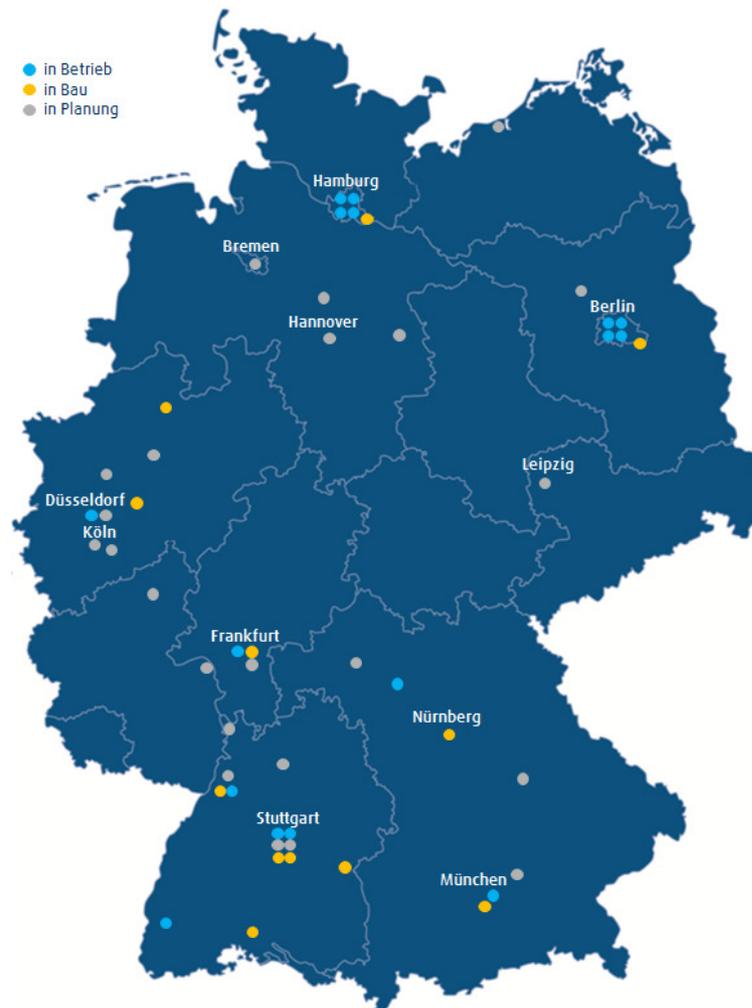


Abbildung 6: HRS Netzwerk in Deutschland (Stand 01/2016, Linde interne Dokumentation)

Sie ist dabei in drei Phasen untergliedert. In Phase 1 (2002-2008) wurde eine erste Testflotte aufgebaut und verschiedenste Technologien und Anwendungen von Wasserstoff untersucht und getestet. So z.B. on-site Produktion an der Tankstelle durch Elektrolyse oder Erdgasreformierung, die Distribution mittels Trailern und der Vergleich zwischen Pkws mit Brennstoffzelle und Wasserstoff-Verbrennungsmotor. Außerdem wurde 2004 die erste HRS der CEP in Berlin eröffnet. In Phase 2 (2008-2010) wurde die Weiterentwicklung der sich aus Phase 1 ergebenden relevanten Technologien vorangetrieben (z.B. Froststart von FCEVs) und insbesondere das Ziel der Kostenreduktion verfolgt. Durch eine Aufstockung der FCEV Flotte auf über 40 Stück wurden zunehmend Daten gesammelt und die Praxistauglichkeit der Technologie nachgewiesen. In

der nun laufenden Phase 3 (2010-2016) steht die Marktvorbereitung im Mittelpunkt. Dazu wurde die Flotte auf über 100 FCEVs ausgebaut und einzelne Fahrzeuge an Kunden übergeben, wodurch Erkenntnisse über die Schnittstellen zwischen FCEV, HRS und Endkunden gewonnen werden sollen [16]. Wesentliche Aufgabe in dieser Phase ist auch der Aufbau eines vorkommerziellen Wasserstofftankstellennetzes, das es den ersten Kunden ermöglicht sich in ganz Deutschland zu bewegen. Dazu hat das BMVI gemeinsam mit Industriepartnern 2012 die „50 Wasserstofftankstellen Initiative“ (H50) ins Leben gerufen. Durch das NIP mit einer Quote von 48% gefördert, sollten bis zum Jahr 2015 50 Tankstellen in ganz Deutschland errichtet werden [17]. Es zeigte sich allerdings, dass die Standortfindung für eine HRS schwieriger ist als ursprünglich angenommen. Trotz erreichter Weiterentwicklungen auf Tankstellen- und Regularienseite, waren Platzbedarf sowie Genehmigungsprozess und -fähigkeit weiterhin Hürden für den schnellen Ausbau. Auch kostenseitig waren die Fortschritte noch nicht ausreichend, um vor allem auch Partner außerhalb der CEP, deren strategisches Interesse noch nicht auf Wasserstoff liegt, für die Initiative zu gewinnen. Daher wurde der Zieltermin auf das Jahr 2016 und damit das Ende des NIP verschoben. Der aktuelle Stand des Netzausbaues ist in **Abbildung 6** dargestellt. Als nächster und entscheidender Schritt zum Markterfolg der Wasserstoffmobilität in Deutschland wurde

Anfang 2015 das Joint Venture „H₂Mobily Deutschland GmbH & Co. KG“ gegründet. Die Grundlage dafür wurde bereits im Jahr 2009 gelegt, als die H₂Mobility Initiative ins Leben gerufen und unter Beteiligung vieler Partner eine Machbarkeitsstudie durchgeführt wurde. Die nun am Joint Venture beteiligten Unternehmen (Air Liquide, Daimler, Linde, OMV, Shell, Total) wollen bis zum Jahr 2023 gut 400 HRS flächendeckend errichten und somit den Nutzern von Brennstoffzellenfahrzeugen die uneingeschränkte Mobilität in ganz Deutschland ermöglichen. In einer ersten Phase werden bereits sieben Tankstellen im Zuge der H50 Initiative implementiert. Anschließend soll bis 2018, unabhängig von der weiteren Entwicklung der Anzahl der Brennstoffzellenfahrzeuge im Markt, diese Zahl auf 100 erhöht werden. Der weitere Netzausbau bis 2023 wird dann bedarfsgerecht, an den Fahrzeugzahlen ausgerichtet, durchgeführt. Ziel soll neben der Errichtung und des Betriebes der Tankstellen auch sein, die vollständige Einbindung der HRS in bestehende, konventionelle Tankstelleninfrastruktur zu ermöglichen und den Endkunden denselben Standard und Komfort eben dieser bereitzustellen.

Abbildung 7 zeigt den zeitlichen Verlauf des Marktentwicklungspfad für die Wasserstoffmobilität in Deutschland.

2002	...	2012	2015	...	2023
		Marktreife: 50 HRS		Kommerzialisierung: H₂Mobility	
		- BMVI: 50 HRS bis 2015		- Industriepartnerschaft	
				- Joint-Entity um in flächendeckende H ₂ Infrastruktur zu investieren (ca. 400 HRS bis 2023)	
		Demonstration: Clean Energy Partnership			
		- Momentan 16 öffentliche HRS in Betrieb			
		- Key Cluster: Berlin, Stuttgart, Hamburg			

Abbildung 7: Marktentwicklungspfad Wasserstoffmobilität in Deutschland

2.2 Kalifornien

Kalifornien ist mit ungefähr 2 Mio. Neuwagenverkäufen im Jahr 2015 [18] der größte Automarkt innerhalb der USA und damit für alle Automobilhersteller von enormer Bedeutung. Im Jahre 1990 wurde dort ein Regelwerk für „Low Emission Vehicles“ (LEV) und „Zero Emission Vehicles“ (ZEV) auf den Weg gebracht [19]. Mit den ZEV Regularien sollten die Automobilhersteller motiviert werden in Zukunft auch Pkws mit keinen bzw. minimal möglichen Emissionen auf den Markt zu bringen. Diese umfassen heute im wesentlichen Plug-In Hybride (PHEV), Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) und Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV). Die ZEV Regularien beinhalten auch ein Creditsystem, mit dem durch die Produktion von ZEVs Credits erhalten werden. Bei Übererfüllung des Jahreszieles, können diese Punkte in weitere Jahre Fortgeschrieben werden und in ggf. schwächeren Jahren angerechnet werden. ZEV Credits können auch zwischen Automobilherstellern gehandelt werden, was z.B. Tesla Motors im ersten Quartal 2015 \$51 Mio. eingebracht hat [20]. Im Laufe der Jahre erhielten die ZEV Regulierungen zahlreiche Änderungen, um den technischen Möglichkeiten und deren Entwicklungsstand zu berücksichtigen und den Automobilherstellern die Erreichung der ambitionierten Ziele zu ermöglichen. Zuletzt wurden die Regularien mit Hinblick auf zwei Zeitblöcke angepasst. Im Zeitraum 2009-2017 sind weiterhin die bis dahin eingeführten ZEV-Klassen mit ihren Abstufungen bzgl. der

Emissionen akzeptiert. Außerdem wurden Anpassungen vorgenommen, welche Technologien die näher an der Marktreife sind (z.B. nun BEV) mit weniger Credits belohnen als Technologien, welche für die zukünftige Markteinführung noch stark weiterentwickelt werden müssen (z.B. FCEV mit >300 Meilen Reichweite) [21]. Für den Zeitraum 2018ff. wurden die ZEV-Klassen reduziert, da davon ausgegangen wurde, dass alle außer pure ZEVs und „Transitional“ ZEVs zu diesem Zeitpunkt Marktreife erreicht haben werden. Außerdem wurde die Anzahl an Credits die ein ZEV generieren kann von der Reichweite und der Wiederbetankungs/-beladungszeit des Fahrzeugs abhängig gemacht. Dementsprechend würde ein BEV mit ca. 50 Meilen Reichweite einen Kreditpunkt, ein FCEV mit mehr als 300 Meilen Reichweite vier Kreditpunkte generieren [22]. Schafft es ein Automobilhersteller nicht die erforderlichen ZEV Credits mittels ZEV Verkäufen im jeweiligen Jahr oder durch Kredite aus vergangenen Jahren zu erbringen, wird eine Strafzahlung von \$5.000 je fehlendem Punkt fällig [23].

Von der kalifornischen Regierung verabschiedete Assembly Bills (AB) mit bedeutendem Einfluss auf die Entwicklung der emissionsarmen/-losen Mobilität sind die AB118 aus dem Jahr 2008 [24], sowie die AB8 aus dem Jahr 2014 [25], welche im Wesentlichen die Beibehaltung der Forderungen der AB118 bis in das Jahr 2024 vorgibt.

Tabelle 2: Förderhöhe und Anzahl der genehmigten Förderanträge im Clean Vehicle Rebate Program

	FY 2010-2011 [\$/Auto]	FY 2011-2014 [\$/Auto]	FY 2014ff. [\$/Auto]	Gesamtzahl geförderter Pkws*
BEV	\$5.000	\$2.500	\$2.500	78.178
PHEV	-	\$1.500	\$1.500	54.491
FCEV	\$5.000	\$2.500	\$5.000	131

* im Zeitraum April 2010 bis Dezember 2015¹

Unter anderem wurden im Zuge der AB118 zwei wesentliche Programme geschaffen: das Alternative and Renewable Fuel and Vehicle Technology Program (ARF VTP), verwaltet durch die California Energy Commission (CEC), sowie das Air Quality Improvement Program (AQIP), verwaltet durch das ARB. Ersteres wird mit \$100 Mio. jährlich ausgestattet und hat einen stärkeren Fokus auf den Ausbau von Betankungsinfrastruktur. Es müssen z.B. jährlich \$20 Mio. davon in den Ausbau eines Wasserstofftankstellennetzwerkes investiert werden, bis 100 öffentlich zugängliche HRS in Kalifornien verfügbar sind [24, 25]. Dies führt zu Förderquoten von ca. 50% bis 70% für HRS. Zweiteres hat Mittel in Höhe von ca. \$20-25 Mio. zur Verfügung und fokussiert sich hauptsächlich auf die Incentivierung für ZEVs über das Clean Vehicle Rebate Program (CVRP) [26]. Tabelle 2 gibt hierzu einen Überblick über die Entwicklung der Förderung ausgewählter ZEVs, sowie die Gesamtzahl der geförderten Fahrzeuge seit Einführung des CVRP. Diese Programme sind auch wesentliche Grundlage für den „ZEV Action Plan“ von Gouverneur Brown aus dem Jahr 2013 [27]. Aus diesem gehen folgende Zielvorgaben hervor:

- Infrastruktur für 1 Mio. ZEVs im Jahr 2020
- 1,5 Mio. ZEVs im Verkehr bis 2025

¹ <https://cleanvehiclerebate.org/eng/rebate-statistics>

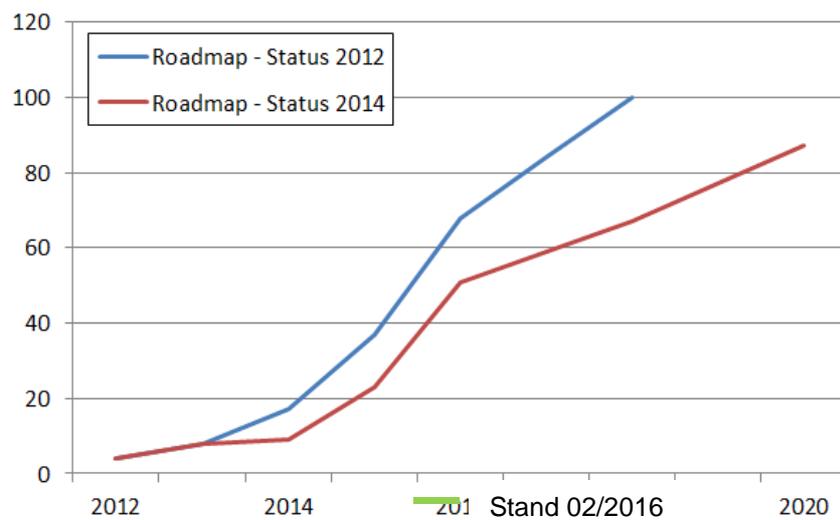


Abbildung 8: HRS Ausbauplanung gemäß CaFCP Roadmaps [28, 29]

- 15% ZEV-Anteil an Neuwagenverkäufen im Jahr 2025

Die Aktivitäten im Bereich der Wasserstoffmobilität sind in Kalifornien auf eine der deutschen CEP ähnlichen Organisation zurückzuführen: der „California Fuel Cell Partnership“ (CaFCP). Diese wurde im Jahr 1999 ebenfalls als Initiative von Staat und Industrie gegründet und besteht mittlerweile aus

36 Partnern. Sie organisierte ihre Arbeit ebenfalls in Phasen und befindet sich nun in der vierten Phase, wobei dabei der Fokus auf der Marktvorbereitung und damit auf der Infrastrukturentwicklung liegt. In den vorherigen Phasen wurden technische Machbarkeit (Phase 1, 1999-2004) sowie kommerzielle Machbarkeit und Kundenakzeptanz (Phase 2, 2004-2007) untersucht. Außerdem wurden erste HRS errichtet, an den dafür geltenden Regularien gearbeitet und die erforderliche Versorgungsinfrastruktur für die großskalige Markteinführung beleuchtet (Phase 3, 2007-2012).

2012 veröffentlichte die CaFCP eine Roadmap für den geplanten Ausbau des HRS-Netztes in Kalifornien. Dabei wurde berücksichtigt, dass eine Markteinführung der ersten Serien-FCEVs für Jahr 2015 geplant ist und dafür eine gewisse Abdeckung mit Tankstellen erreicht sein muss. Ab 2016 sollten dann Tankstellen nach Bedarf in Abhängigkeit von der Nachfrage nach FCEVs errichtet werden. Bei der Netzplanung wurde dabei auf die Abdeckung von fünf bedeutenden Clustern (hauptsächlich im Großraum Los Angeles und San Francisco) und zusätzlich einiger Verbindungskorridore gesetzt [28].



Abbildung 9: HRS Netzwerk in Kalifornien (Stand 01/2016, Linde interne Dokumentation)

Im Jahr 2014 erhielt die Roadmap eine Aktualisierung, um den Erkenntnissen der vergangenen Jahre Rechnung zu tragen. So führten u.a. Genehmigungsaspekte zu Verzögerungen in der Implementierung neuer HRS und die durch die AB8 erforderliche jährliche Umfrage unter den Automobilherstellern, zu den erwarteten Stückzahlen von FCEVs in den folgenden drei bzw. fünf Jahren, zeigte reduzierte Erwartungen. Diese Ergebnisse führten zu einer Verschiebung des Ziels von 68 HRS in 2016 um etwa zwei Jahre (vgl. Abbildung 8) [29]. Der aktuelle Stand des Wasserstofftankstellennetzausbaus ist in Abbildung 9 dargestellt.

2.3 Japan

Japan reiht sich in die Liste der drei Kernregionen für Wasserstoffmobilität mit einem ebenso vergleichbaren Vorgehen, welches von vielseitigen R&D Aktivitäten begleitet wurde, ein. Im Jahr 2002 startete das staatlich geförderte „Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project“ (JHFC) in seine erste Phase, welche bis 2005 dauerte. Die Ziele waren die Technologie-Validierung entlang der gesamten Supply Chain, insbesondere die hohe Energie-Effizienz der Brennstoffzellen, sowie Untersuchungen zu „Well-to-Wheel“-Effizienz und -Emissionen mit einigen Demonstrationsfahrzeugen und -tankstellen. Es sollte eruiert werden, ob Wasserstoffmobilität hier einen technologischen Fortschritt und positiven Beitrag leisten kann. Nachdem diese Phase erfolgreich verlief, wurden in Phase 2 (2006-2010) die Untersuchungen auf mehr Regionen, eine größere Flotte und mehr Tankstellen unterschiedlicher Bauweise ausgeweitet. Außerdem starteten Bestrebungen, Regulierungen und Standards für die Technologien zu entwickeln oder anzupassen. In Phase 3 (2011-2013) kam insbesondere der Aspekt hinzu, gesellschaftlichen Nutzen und Implementierbarkeit der funktionierenden Technologie zu demonstrieren, sodass Adoptionsbarrieren bei den Endkunden bis zur geplanten Markteinführung 2014/15 abgebaut werden [30].

Im Jahr 2008 hat die „Fuel Cell Commercialization Conference of Japan“ (FCCJ) eine Roadmap für den Weg zur angestrebten Kommerzialisierung der Wasserstoffmobilität im Jahr 2015 veröffentlicht. Dabei wurde auf einen Infrastrukturaufbau ab 2015 abgezielt, dem über die folgenden 10 Jahre eine zunehmende Anzahl von FCEVs im Markt folgen soll, bis dann ab 2025 ein synchronisierter weiterer Ausbau erfolgt. Für das Jahr 2025 waren 1.000 HRS und ca. 2 Mio. FCEVs anvisiert [31]. Diese ambitionierte Roadmap erhielt im Jahr 2011 Rückenwind, als 13 japanische Unternehmen gemeinsam ankündigten, bis 2015 FCEVs in den Markt zu bringen und dies mit dem dafür rechtzeitigen Bau von 100 HRS zu flankieren [32]. Der Fokus dieser ersten Tankstellen soll dabei auf den vier Metropolregionen Tokyo, Nagoya, Osaka und Fukuoka, sowie einigen Korridorbereichen liegen. Das japanische Wirtschaftsministerium setzte dafür einen neuen Förderrahmen auf, wodurch der Bau jeder HRS mit ca. 50% der Kosten unterstützt wird (je nach Größenklasse der HRS zwischen 1,4 Mio. € und 2,1 Mio. €). Im Juli 2015 haben die drei Automobilhersteller Toyota, Honda und Nissan beschlossen, bis 2020 ca. 40 Mio. € für den Betrieb der errichteten Tankstellen zur Verfügung zu stellen, um den Infrastrukturausbau weiter voranzutreiben und ihren Kunden den Umstieg auf Wasserstoff bestmöglich zu erleichtern [33]. Dies wird zudem dadurch unterstützt werden, dass die japanische Regierung beim Kauf eines FCEVs 2 Mio. ¥ (ca. 15.000 €) an Subventionen bereitstellt [34].

Bei der Umsetzung der Pläne treten auch in Japan ähnliche Probleme wie in den anderen Kernmärkten auf. Insbesondere in den Metropolregionen stellt der Platzbedarf der Wasserstofftankstellen ein Problem dar. Außerdem sind die technischen Standards und genehmigungsseitigen Anforderungen in Japan trotz aller vorangegangenen Bemühungen nach wie vor sehr hoch. Dies führt zu einem zu deutlich höheren Kosten als in anderen Regionen und zu einer Verzögerung im Aufbau der angekündigten 100 HRS. Nichtsdestotrotz

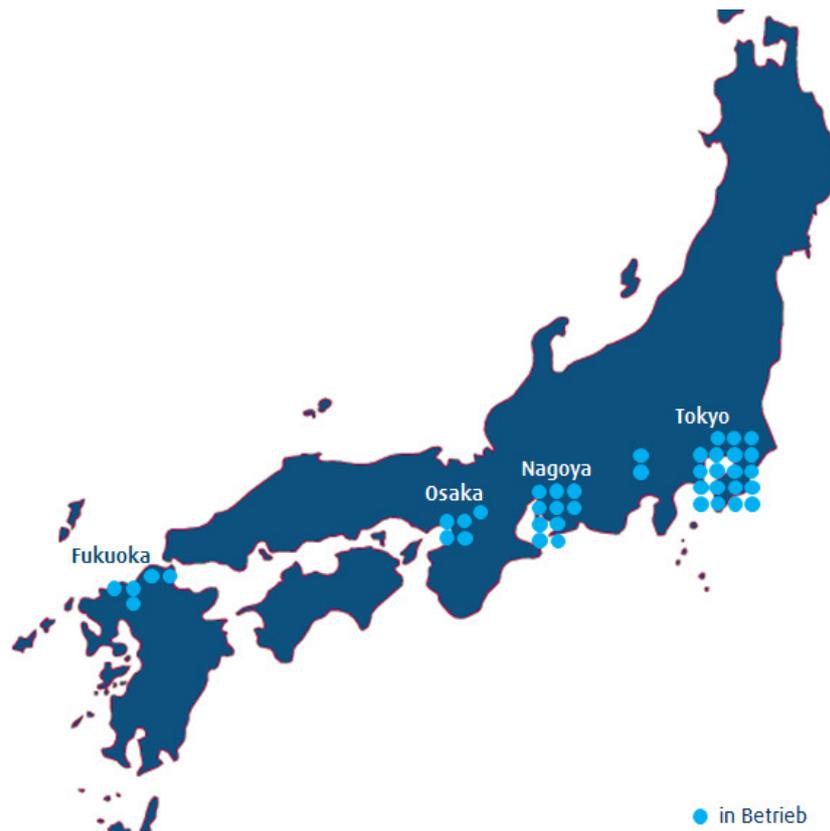


Abbildung 10: HRS Netzwerk in Japan (Stand 01/2016, Linde interne Dokumentation)

ist Japan heute am weitesten fortgeschritten und hat bereits 41 HRS in Betrieb. Bis März 2016 sollen weitere 40 folgen. Den derzeitigen Stand des Netzausbaus zeigt Abbildung 10.

2.4 Süd Korea

Süd Korea ist einer der aussichtsreichsten „Fast Follower“ Märkte. Grund dafür ist zum einen der politische Rahmen, den die Regierung in der Vergangenheit etabliert und Ende 2015 mit einem neuen Fünfjahresplan ambitioniert erneuert hat. Zum anderen ist in Süd Korea mit Hyundai-Kia einer der in der Wasserstofftechnologie aktivsten Automobilhersteller beheimatet und hat dort mit einem Marktanteil von ca. 70% einen gewissen Einfluss [35].

Mit dem „Domestic Fleet Program“ (Stufe 1 und Stufe 2) wurden mit finanzieller Förderung durch die koreanische Regierung, insb. das Ministry of Knowledge Economy (MKE, heute Ministry of Trade, Industry and Energy, MOTIE), von 2006 bis 2011 mehr als 100 FCEVs und 4 FCBusse im Markt getestet. Außerdem wurde die Anzahl der HRS auf 13 erhöht, wobei zu beachten ist, dass lediglich drei davon mit der neueren 700bar Technologie ausgestattet wurden [36].

Unter anderem ausgehend von den gewonnenen Erkenntnissen aus diesem Programm, hat die koreanische Regierung eine Wasserstoff-Infrastruktur-Roadmap bis zum Jahr 2030 ausgearbeitet (Abbildung 11). Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie wurden als wesentliche, neue Bereiche für kohlenstoffarmen, grünen Wachstum identifiziert. Mit der

Roadmap sollte sichergestellt werden, dass der für den Markterfolg wichtige infrastrukturelle Rahmen geschaffen wird. Letztendlich wurde diese Roadmap allerdings nie so in die Realität umgesetzt.

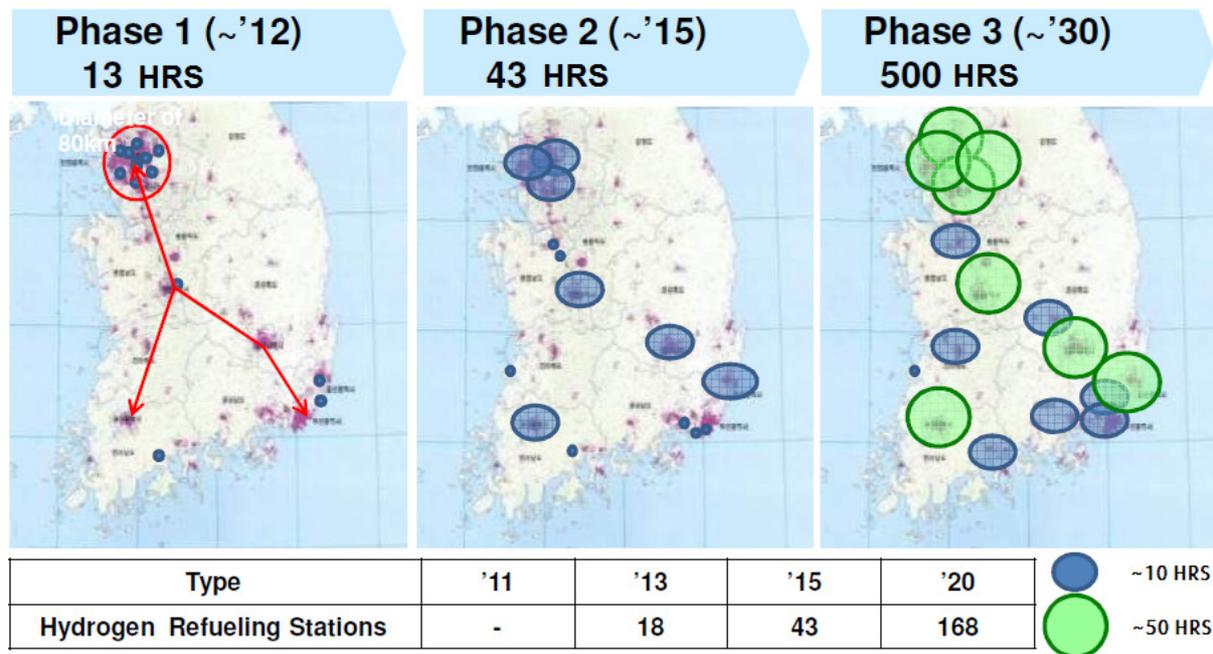


Abbildung 11: Koreanische Wasserstoff-Infrastruktur-Roadmap (2010) [37]

Im Dezember 2015 hat Süd Korea nun einen neuen Fünfjahresplan für die Jahre 2016-2020 präsentiert, welcher insbesondere darauf abzielt, die Anzahl umweltfreundlicher Fahrzeuge im Markt zu erhöhen, um damit zum Erreichen der anvisierten Treibhausgasreduktionsziele beizutragen. Die Hauptziele des Plans für das Land sind zum einen ein Marktanteil von 20% am Neuwagenmarkt für „grüne“ Fahrzeuge im Jahr 2020, sowie eine CO₂ Reduktion von 3,8 Mio. Tonnen. Um diese Ziele zu erreichen, soll die Entwicklung von grünen Fahrzeugen, welche aufgrund ihrer Eigenschaften auch von den Kunden angenommen werden, wie auch die Ausweitung der erforderlichen Lade- und Betankungsinfrastruktur gefördert werden. Neben der Förderung von Forschung und Entwicklung (ca. \$130 Mio.) zur weiteren Steigerung der Fahrzeugperformance und Senkung der Fahrzeugkosten, sollen dafür ca. 22.000€ pro Fahrzeug als direkter Kaufanreiz für Brennstoffzellenfahrzeuge bereitgestellt werden. Mit diesen (und weiteren) Maßnahmen, zielt die Regierung auf ein HRS Netzwerk von 80 Stationen im Jahr 2020, um eine erwartete Anzahl von ca. 9.000 FCEVs zu versorgen (Hochlaufplanung siehe Tabelle 3) [38, 39].

Tabelle 3: FCEV und HRS Roadmap gemäß koreanischem Fünfjahresplan (2016-2020) [38]

	2016	2017	2018	2019	2020	2025
FCEV (cum.)	200	500	2.500	5.100	9.000	
HRS (cum.)	13	20	30	50	80	bis zu 210

2.5 Weitere Märkte

In Europa haben mehrere Länder begonnen, bekräftigt durch die Erkenntnissen Deutschland, ähnliche H₂Mobility Initiativen zu formen. So zum Beispiel „UK H₂ Mobility“, „Mobilité Hydrogène France“ und „H₂ Mobility Swiss“. Dabei wurden länderspezifische Untersuchungen angestellt und teilweise Roadmaps zur Infrastrukturentwicklung aufgestellt. Zum jetzigen Zeitpunkt konnte allerdings kein vergleichbarer Schritt zu H₂Mobility Deutschland erreicht werden.

In Skandinavien haben sich die nationalen Initiativen – Norsk Hydrogenforum, Hydrogen Sweden, Hydrogen Link – zur „Scandinavian Hydrogen Hyway Partnership“ (SHHP) zusammengeschlossen und in den vergangenen Jahren 16 HRS errichtet. Sie profitieren dabei sowohl von nationalen als auch von EU-weiten Förderprogrammen. Insbesondere der bisherige Umgang mit Elektroautos in Norwegen oder Dänemark könnte hier einen entscheidenden Impuls für die weitere Entwicklung geben.

Ein weiterer Impulsgeber für die Entwicklung der Wasserstoffmobilität ist das FCH JU auf EU Ebene, welches mit etwa 500 Mio. € an Fördermitteln ausgestattet ist. So werden beispielsweise über das Projekt HyFIVE über 100 neue Brennstoffzellenfahrzeuge in den europäischen Markt gebracht. Außerdem solln mit dem neu initiierten Projekt „H₂Mobilty Europe“ die nationalen Initiativen der europäischen Länder vernetzt werden, um so zukünftig auch grenzübergreifende Wasserstoffmobilität zu ermöglichen. Dazu sollen bis 2019 weitere 200 FCEVs und 29 neue HRS in 10 Ländern implementiert werden.

In den USA wurde 2013 mit H₂USA ebenfalls ein ähnliches Unterfangen gestartet. Neben zahlreichen Industriepartnern, gehören diesem Kalifornien, sowie mehrere Staaten an der amerikanischen Ostküste an. Vorrangiges Ziel ist es hierbei zunächst Hürden hinsichtlich technischer Regelwerke und Standards für den Infrastrukturaufbau zu beseitigen und den weiteren politischen Rahmen für einen größeren Infrastrukturausbau zu schaffen. Außerdem soll weitere Forschung und Entwicklung betrieben werden, um weitere für den effizienten Roll-out notwendige Kostenreduktionen bei Autos und Tankstellen zu erreichen.

3 Quellenverzeichnis

- [1] Hill, N., Brannigan, C., Smokers, R., Schroten, A., van Essen, H., Skinner, I., 2012, Developing a better understanding of the secondary impacts and key sensitivities for the decarbonisation of the EU's transport sector by 2050 - Final Project Report
- [2] EPA430-R-15-004, Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks:1990–2013
- [3] Naunin, D., 2007, Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge – Technik, Struktur und Entwicklung
- [4] Von Helmolt, R., Eberle, U., 2007, Fuel Cell Vehicles: Status 2007, Journal of Power Sources, 165 (2007), 833-843
- [5] <http://www.hyundai.com/us/en/media/pressreleases/38232>
- [6] <http://www.autocar.co.uk/car-news/new-cars/hyundai-plans-new-hydrogen-fuel-cell-suv>
- [7] <http://newsroom.toyota.co.jp/en/detail/5503668>
- [8] <http://world.honda.com/news/2015/4151028eng.html>
- [9] <https://ssl.toyota.com/mirai/fcv.html>
- [10] <http://www.manager-magazin.de/unternehmen/autoindustrie/daimler-verschiebt-markteinfuehrung-fuer-wasserstoffautos-auf-2017-a-980873.html>
- [11] <http://www.aral.de/de/forschung/zukunft/wasserstoff/erste-wasserstofftankstelle.html>
- [12] SAE J2601:2014-07, Surface Vehicle Standard – Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles
- [13] Ammermann, H., Ruf, Y., Lange, S., Fundulea, D, Martin, A., 2015, Fuel Cell Electric Buses – Potential for Sustainable Public Transport in Europe
- [14] <http://ted.europa.eu/udl?uri=TED:NOTICE:196527-2015:TEXT:DE:HTML>
- [15] Nationaler Entwicklungsplan 3.0 – Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, 2011
- [16] Clean Energy Partnership, 2015, Veröffentlichung der Projektergebnisse
- [17] [http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2012/125-ramsauer-wasserstofftankstellen.html?](http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2012/125-ramsauer-wasserstofftankstellen.html?__blob=publicationFile)
- [18] California New Car Dealers Association (CNCDA), 2015, California Auto Outlook, Vol. 11, Nr. 4
- [19] <http://www.arb.ca.gov/msprog/zevprog/zevregs/zevregs.htm>
- [20] Tesla Motors, Inc., First Quarter 2015 Shareholder Letter, May 6, 2015.
- [21] California Code of Regulations (CCR), Section 1962.1
- [22] California Code of Regulations (CCR), Section 1962.2
- [23] California Health & Safety Code, Section 43211
- [24] Assembly Bill 118, 2007-2008 Reg. Sess. (Cal. 2007)
- [25] Assembly Bill 8, 2013-2014 Reg. Sess. (Cal. 2013)

- [26] Californian Energy Commission, 2015, 2015-2016 Investment Plan Update for the Alternative and Renewable Fuel and Vehicle Technology Program
- [27] Governor's Interagency Working Group on Zero-emission Vehicles, 2013, 2013 ZEV Action Plan - A roadmap toward 1.5 million zero-emission vehicles on California roadways by 2025
- [28] CaFCP, 2012, A California Road Map – Bringing Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles to the Golden State
- [29] CaFCP, 2014, A California Road Map – The Commercialization of Hydrogen Fuel Cell Vehicles (2014 Update)
- [30] www.jari.or.jp/Portals/0/jhfc
- [31] Watanabe, S., 2014, Hydrogen Infrastructure in Japan, Presentation at the DOE Hydrogen and Fuel Cells Program and Vehicle Technologies Office Annual Merit Meeting
- [32] <http://www2.toyota.co.jp/en/news/11/01/0113.html>
- [33] <http://www.emobilitaetonline.de/news/wirtschaft/1623-japanische-autohersteller-kooperieren-bei-wasserstoff-tankstellen-infrastruktur>
- [34] <http://www.hzwei.info/blog/2014/10/17/japan-geht-bei-der-foerderung-von-brennstoffzellen-autos-voran/>
- [35] http://www.marklines.com/en/statistics/flash_sales/salesfig_korea_2014
- [36] Shul, Yong-Gun, 2012, Hydrogen and Fuel Cells in Korea, 17th IPHE Steering Committee Meeting
- [37] Kim, Jong Won, 2013, Recent Achievements in Hydrogen and Fuel Cells in Korea, International Hydrogen Energy Development Forum
- [38] <http://www.wsj.com/articles/south-korea-unveils-plan-to-rev-up-sales-of-greener-cars-1449544974>
- [39] Linde Gas Korea Zusammenfassung des koreanischen Fünfjahresplan