

Rose, Philipp; Wietschel, Martin; Gnann, Till

Working Paper

Wie könnte ein Tankstellenaufbau für Brennstoffzellen-Lkw in Deutschland aussehen?

Working Paper Sustainability and Innovation, No. S09/2020

Provided in Cooperation with:

Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI

Suggested Citation: Rose, Philipp; Wietschel, Martin; Gnann, Till (2020) : Wie könnte ein Tankstellenaufbau für Brennstoffzellen-Lkw in Deutschland aussehen?, Working Paper Sustainability and Innovation, No. S09/2020, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe,
<https://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0011-n-6057481>

This Version is available at:

<http://hdl.handle.net/10419/225286>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.

Working Paper Sustainability and Innovation
No. S 09/2020



Philipp Rose
Martin Wietschel
Till Gnann

Wie könnte ein Tankstellenaufbau für
Brennstoffzellen-Lkw in Deutschland
aussehen?

Abstract

In diesem Working Paper wird ein möglicher Tankstellenaufbau für schwere Brennstoffzellen-Lkw (BZ-Lkw) in Deutschland bis 2050 auf Basis eines wissenschaftlichen Simulationsmodells skizziert. Bestehende oder sich im Aufbau befindliche Wasserstoff(H₂)-Tankstellen für Pkw können nicht oder nur eingeschränkt zum Betanken von Brennstoffzellen verwendet werden, weil andere Anforderungen, hervorgerufen durch die deutliche größere Wasserstoffnachfrage, bestehen.

Um eine bedarfsgerechte Tankstelleninfrastruktur für BZ-Lkw aufzubauen, muss schon relativ früh eine Flächendeckung erreicht werden. Die Stationen werden relativ gleichmäßig über das Autobahnnetz verteilt. Zudem kann man eine Konzentration entlang der Transitrouten sowie in Industrieregionen erkennen. Diese Tankstellen sind zu Beginn unterausgelastet, und es stellt sich die Frage nach Geschäftsmodellen. Im Endausbau reichen ca. 140 Tankstellen, um den kompletten Bedarf, wenn alle schweren Lkw in Deutschland Wasserstoff tanken würden, abzudecken. Hierfür fallen rund 9 Mrd. €/Jahr an Kosten an (Tankstelleninvestitionen plus Wasserstofferzeugungskosten). Durch Analysen mit einem Energiesystemmodell kann gezeigt werden, dass eine flexible Steuerung der Elektrolyseure nach Strompreissignalen an den Tankstellen die Kosten deutlich senken kann (um ca. 1 Mrd. €/Jahr).

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur für Pkw und Unterschiede zur Betankungsinfrastruktur für Lkw.....	3
3	Methodik, Annahmen und Verkehrsdaten.....	6
4	Markthochlaufszenario und Tankstellenbedarf sowie -verteilung.....	9
5	Wechselwirkung mit dem Energiesystem im Jahr 2050.....	12
6	Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick.....	14

1 Einleitung

Um die Klimaziele von Paris zu erreichen, muss der Verkehrssektor bis 2050 quasi emissionsfrei sein. Der Verkehr verursacht heute 20 % der weltweiten Emissionen. In Deutschland fällt etwa ein Viertel (ca. 50 Mt CO₂) davon im Straßengüterverkehr an, wovon schwere Lkw (Lkw > 26 t) rund die Hälfte emittieren, bei einer vergleichsweise geringen Fahrzeugzahl (ca. 250.000 Lkw) (Kluschke et al. 2019a).

Eine mögliche Dekarbonisierungsoption sind mit Wasserstoff betriebene Brennstoffzellen-Lkw¹. Sie spielen aktuell im Rahmen der nationalen Wasserstoffstrategie eine wichtige Rolle. Die Relevanz von BZ-Lkw auch für Fahrzeugherstellern hat sich durch die Entscheidung von Daimler, den Bereich der BZ-Fahrzeuge im Pkw-Sektor vorerst zurückzustellen und sich gemeinsam mit Volvo auf BZ-Lkw zu konzentrieren, gezeigt. Jedoch gilt für BZ-Lkw², dass die Energiedichte von Wasserstoff im Vergleich zum Diesel geringer ist und somit Herausforderungen durch geringe Zuladungen (gewichts- und volumenseitig) beim Lkw und häufigeres Tanken entsteht (vgl. Plötz et al. 2018, Wietschel 2017). Auch sind heute bislang nur wenige Prototypen von BZ-Lkw verfügbar und noch wenige etablierte Hersteller beschäftigen sich aktuell mit dieser Technologie³.

Dafür bieten BZ-Lkw auch Potenziale, denn die Speicherung von Wasserstoff ist deutlich einfacher als für Batterie-Lkw und mit der Entkopplung von Nachfrage und Angebot, ließen sich potentiell auch erneuerbare Energien durch die Erzeugung von Wasserstoff in Zeiträumen mit hohem Angebot besser in das Stromsystem integrieren.

1 Andere Optionen sind u. a. Oberleitungs-Lkw, Batterie-Lkw oder die Verwendung synthetischer Kraftstoffe.

2 Die Well-to-Wheel-Energieeffizienz berücksichtigt nicht nur die Effizienz des Antriebsstrangs (Tank-to-Wheel), sondern auch die Vorkette vom Primärenergieträger zum Kraftstoff (Well-to-Tank).

3 In Ehret (2020) finden sich zu den Fahrzeugen umfangreiche Informationen. Dies sind u. a. der Hyundai BZ-Truck mit acht integrierten Wasserstofftanks und einer Reichweite von 400 Kilometern. Der 18-Tonner (mit Trailer: 34 t) kann in seinen Tanks knapp 33 kg H₂ bei 350 bar vorhalten und verfügt über einen Elektromotor mit 350 kW Spitzenleistung. Der Nikola Two soll ebenso wie der Nikola One kommenden Jahr auf den Markt kommen und über eine Leistung von über 735 kW verfügen. Verbaut wird angeblich eine 320 kWh große Lithium-Ionen-Batterie. Mit einer Wasserstofffüllung sollen Reichweiten zwischen 1.280 und 1.930 Kilometer möglich sein, und es wird an der 700 bar Druckwasserspeicherung gearbeitet. Mit Nikola Tre setzt ein Lkw-Hersteller auf BZ-Lkw, die auch in Deutschland gebaut werden (<https://www.electrive.net/2020/07/24/nikola-beginnt-bau-des-us-werks-in-arizona/>).

Der Einsatz von BZ-Lkw im Straßenverkehr setzt allerdings einen bedarfsgerechten Aufbau der erforderlichen Tankinfrastruktur voraus. Die bestehenden Wasserstofftankstellen sind für Pkw ausgelegt und reichen für die Bedürfnisse von schweren Lkw nicht aus, da sie die Mengen an notwendigem Wasserstoff nicht bereitstellen können. Gemäß Klimaschutzprogramm 2030 will die Bundesregierung Konzepte im Bereich der Nutzfahrzeuge auch für den Aufbau von Wasserstofftankstellen entwickeln. Um den Einsatz von grünem Wasserstoff im Schwerlastverkehr zu fördern, soll das Wasserstoff-Tankstellennetz zügig ausgebaut werden.⁴ Während für den schon voranschreitenden Ausbau von H₂-Tankstellen Konzepte über den Aufbau einer flächendeckenden Pkw-Betankungsinfrastruktur vorliegen, fehlen diese bisher für Lkw.

Um diese Aspekte gegeneinander abzuwägen, lässt sich folgende Forschungsfrage formulieren:

*Was sind die räumlichen, technischen, ökonomischen und energiewirtschaftlichen Anforderungen für ein optimales Wasserstofftankstellennetzwerk für Brennstoffzellen-Lkw in Deutschland, und wie könnte der Aufbau eines Tankstellennetzes aussehen?*⁵

Im Folgenden wird zuerst kurz auf die Situation bei H₂-Tankstellen (HRS⁶) für Pkw eingegangen und dabei werden auch die Unterschiede zu HRS für BZ-Lkw thematisiert (Abschnitt 2). Dann wird eine Methode beschrieben, die zur Verteilung von HRS für Lkw geeignet ist (Abschnitt 3). Weiter werden sich verändernde Nutzeranforderungen und techno-ökonomische Eckdaten für Lkw-HRS thematisiert, die das System determinieren, sowie die Verkehrsbelastung mit schweren Lkw dargestellt. Mithilfe dieser kann anschließend ein Tankstellenbedarf ermittelt werden (Abschnitt 4). Abschließend wird auf die Auswirkungen auf das Energiesystem eingegangen (Abschnitt 5). Der Beitrag endet mit einer Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und einem Ausblick (Abschnitt 6).

4 Nikola verknüpft den anvisierten Verkauf seiner BZ-Lkw mit der Idee, hierfür auch eine Tankstelleninfrastruktur aufzubauen (<https://www.electrive.net/2020/07/24/nikola-beginnt-bau-des-us-werks-in-arizona/>).

5 In Rose 2020 ist ein optimierter HRS-Tankstellenaufbau für das Jahr 2050 dargestellt, allerdings ohne die vorherigen Zeitschritte zu betrachten, so wie es hier im Working Paper geschieht.

6 Nachfolgend mit HRS (Hydrogen Refueling Stations) abgekürzt.

2 Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur für Pkw und Unterschiede zur Betankungsinfrastruktur für Lkw

Weltweit arbeiten einige Hersteller an der Entwicklung der BZ-Technologie im Pkw-Sektor. Anfang 2020 waren in Deutschland 507 BZ-Pkw zugelassen⁷, weltweit wird der Bestand in Ehret (2020) mit rund 18.000 BZ-PKW angegeben. Derzeit bieten allerdings nur zwei Hersteller Brennstoffzellen-Pkw in Deutschland zum Kauf an (Toyota und Hyundai)⁸. Daimler hat seine Markteinführungsaktivitäten bei BZ-Pkw kürzlich vorerst zurückgestellt.

Die Tankstelleninfrastruktur für Wasserstoff-Pkw in Deutschland wurde in den letzten Jahren mit Unterstützung durch öffentliche Förderung durch private Firmen stetig ausgebaut. Mit Stand Mai 2020 waren in Deutschland 84 Wasserstoff-tankstellen in Betrieb⁹ mit Schwerpunkt auf West- und Süddeutschland. Allerdings ist der Absatz von Wasserstoff derzeit noch sehr gering¹⁰. Im Laufe des Jahres 2020 sollen 100 öffentliche Wasserstoff-Stationen für Pkw zur Verfügung stehen¹¹. Bei der geringen Zahl an BZ-Fahrzeugen und abgesetzter H₂-Menge ergeben sich aktuell und auf absehbare Zeit kaum tragfähige Geschäftsmodelle in diesem Bereich. Wie sich der weitere Ausbau von HRS für Pkw deshalb künftig entwickelt, ist mit Unsicherheiten behaftet.

Eine derzeit wohl unterschätzte Schwierigkeit sind die deutlich abweichenden Anforderungen von BZ-Lkw an entsprechende Tankstellen. Im Vergleich zu BZ-Pkw werden für jeden Tankvorgang deutlich größere Tankmengen benötigt, die in einer entsprechenden Zeit zur Verfügung stehen müssen. Eine mögliche Menge von heute typischen 60 kg/h, die der Verdichter einer Pkw-Tankstelle zur Verfügung stellen kann, reicht theoretisch für die Beladung eines Lkw mit 800 km Reichweite aus. Allerdings sind die Hochdruckzwischenpeicher der vorhandenen 700 bar Wasserstofftankstellen meist nur auf Tankmengen von bis zu 10 kg am Stück ausgelegt. Anschließend muss der Verdichter aus dem Niederdrucktank von 200 bar auf 700 bar verdichten, so dass ein Betankungsvorgang für einen

7 Quelle: <https://www.electrive.net/2020/03/02/elektromobilitaet-bestand-waechst-auf-240-000-e-fahrzeuge/>, abgerufen am 07.06.2020.

8 Honda bietet ein BZ-Fahrzeug international an, jedoch nicht für Deutschland.

9 Quelle: <https://h2.live/>, abgerufen am 07.06.2020.

10 Im bisherigen Spitzenmonat betrug er rund 12 t Wasserstoff (Quelle: <https://h2.live/>, abgerufen am 07.06.2020.).

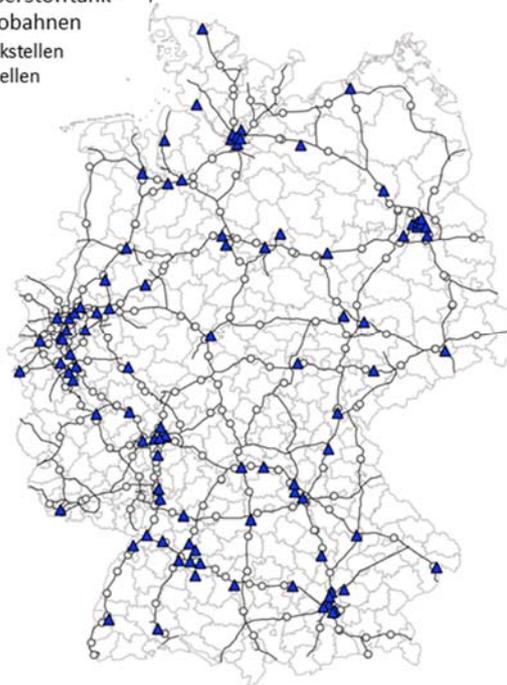
11 Quelle: <https://h2.live/>, abgerufen am 07.06.2020.

Lkw iterativ erfolgen und deutlich länger als eine Stunde dauern würde. Darüber hinaus benötigen Lkw-HRS deutlich mehr Wasserstoff für die gleiche Anzahl an Fahrzeugen als Pkw-Tankstellen. So ist eine große (XXL-) Pkw-Tankstelle auf 2,2 Tonnen Wasserstoff (für 550 Pkw) ausgelegt, wobei eine Lkw-Tankstelle für die gleiche Anzahl an Fahrzeugen ca. 30 Tonnen gelagerten H₂ benötigt.¹² Ebenfalls sind die Tankorte teilweise andere als die Pkw. Lkw-Tankstellen orientieren sich am überregionalen Verkehr, während bei Pkw auch stärker suburbane Räume abgedeckt werden. Natürlich sind dies lösbbare Herausforderungen, aber die Synergieeffekte zwischen BZ-Pkw und BZ-Lkw-Infrastrukturen werden hier eventuell überschätzt.

Beim Aufbau von Tankstellen für Pkw erkennt man eine Konzentration auf den Westen und Süden Deutschlands sowie auf große Städte (u. a. Hamburg, Berlin und München) sowohl bei den H₂-Tankstellen als auch den konventionellen Tankstellen an Bundesautobahnen (BAB).

Konventionelle und Wasserstofftankstellen an deutschen Autobahnen

- ▲ Aktive Wasserstofftankstellen
- Konventionelle Tankstellen
- Bundesautobahnen



Datenquellen: Gürsel und Tölke 2017; H₂-Mobility 2019

Abbildung 1: Öffentliche H₂-Tankstellen für Pkw in Deutschland im Jahr 2019 und öffentliche konventionelle Tankstellen an Bundesautobahnen

¹² Dies entspricht der aktuell gesetzlich maximal erlaubten Wasserstoffmenge.

Während BZ-Pkw den H₂ mit einem Druck von bis zu 700 bar mitführen, können Nutzfahrzeuge hohe Reichweiten teilweise auch mit einem niedrigeren Druck von 350 bar gewährleisten, sofern mehr Platz für On-board-Wasserstoff-Speicher zur Verfügung steht¹³. Heute fahren z. B. vor allem Wasserstoff-Busse mit 350-bar-Technologie, auch einige Lkw mit kleinerer und mittlerer Gewichtsklasse basieren auf dieser Technologie. Für Nutzfahrzeuge mit wenig Platz für große On-board-Speicher (z. B. schwere Lkw mit einem Tankvolumen von 50 bis 60 kg H₂) ist die 700-bar-Technologie unumgänglich, sofern keine Nutzvolumen-Verluste auftreten sollen¹⁴.

Es lässt sich festhalten, dass nur die größten der derzeit bestehenden Wasserstoff-Pkw-Tankstellen – je nach technischer Auslegung bzw. nach technischen Anpassungen – für die allererste Phase des Markthochlaufs von BZ-Lkw genutzt werden könnten.

Eine Alternative für schwere Lkw zur 700-bar-Technologie ist die Verflüssigung von Wasserstoff. Aufgrund der hohen Energiedichte von kryogenem (tiefkaltem) Wasserstoff ist der Platzbedarf deutlich geringer¹⁵. Da hierfür der Wasserstoff auf ca. minus 250 °C heruntergekühlt werden muss, ist ein recht hoher Energieaufwand nötig. Ca. 17 bis 20 % des Energieinhaltes des Wasserstoffes werden hierfür benötigt. Weiterhin müssen Boil-off-Effekte berücksichtigt werden¹⁶.

Heutige Entwickler von BZ-Lkw setzen derzeit eher auf die 700 bar-Technologie, auch um Synergien mit der Technologieentwicklung im Pkw-Sektor zu haben. Diese wird deshalb auch für die folgenden Analysen unterstellt. Weitere Forschungsarbeiten sollten zusätzlich die Alternative flüssigen Wasserstoffs untersuchen.

¹³ siehe Information von H2Mobility, abrufbar unter <https://h2.live/>

¹⁴ Ca. 80 % des schweren Straßengüterverkehrs in Deutschland nutzt das volle Volumen, lediglich 20 % nutzen die maximale (Gewichts-)Zuladung (Rose, 2020). Hieraus leitet sich die hohe Bedeutung der Vermeidung von Nutzvolumen-Verlusten ab, da die Längen von Lkw beschränkt sind und für alternative Antriebe nur geringfügig angepasst werden dürfen (EU 2015).

¹⁵ Faktor 800 höhere Dichte des flüssigen Wasserstoffs im Vergleich zu gasförmigem Wasserstoff bei Umgebungsdruck.

¹⁶ Nachteilig bei kryogenem H₂ ist, dass durch die sehr niedrige Temperatur im Inneren des Tanks auch bei guter Wärmedämmung ein Wärmestrom aus der Umgebung nicht zu vermeiden ist. Dieser führt zu einer teilweisen Verdampfung des Wasserstoffs. Um einen Druckaufbau zu vermeiden, muss dieser Wasserstoff, bei un stetiger oder Nicht-Abnahme des entstehenden Wasserstoffgases, abgelassen werden (sogenannte Boil-off-Verluste).

3 Methodik, Annahmen und Verkehrsdaten

Für die Modellierung eines Tankstellennetzwerks für BZ-Lkw eignet sich ein kapazitätsbeschränktes Fluss-Tankstellen-Verortungsmodell (engl. Node-Capacity Flow Refueling Location Model, NC-FRLM). Hierbei werden Tankstellen für bestehende Verkehrsflüsse ermittelt, die in das Modell eingespeist werden. Die Besonderheit ist die Kapazitätsbeschränkung der Tankstellen, da für Wasserstoff entsprechende Vorschriften gelten. Da Nutzfahrzeuge naturgemäß eine größere Energienachfrage pro Tankvorgang haben (Kluschke et al. 2020), wirkt sich die Größenbeschränkung auf die benötigte Anzahl an Tankstellen aus.

Mithilfe von Quelle-Ziel-Matrizen aus der Mobilitätserhebung „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010“ (Wermuth et al. 2012) und Annahmen zu BZ-Lkw-Tankstellen kann damit ein optimales Tankstellennetzwerk ermittelt werden.

Dieses Netzwerk bietet zudem ein Flexibilitätspotential aus Energiesystemperspektive. Daher findet weiterhin eine Kopplung mit einem bestehenden Open-Source-Energiesystemmodell (PyPSA) statt, was anschließend auch Aussagen über die Potenziale zur Lastverlagerung erlaubt (Rose und Neumann, 2020). In Rose (2020) ist die Methodik detailliert dargestellt.

Wichtige Annahmen stellen dabei die Reichweitenanforderungen von Lkw-Nutzern dar, insbesondere im Fernverkehr für schwere Lkw. Hier zeigte sich in einer Interviewstudie mit 63 Nutzern (Kluschke et al. 2019a, 2019b), dass die notwendige Reichweitenanforderung für Lkw bei rund 800 km liegt. Außerdem wurde die Infrastruktur als sehr wichtig empfunden, und es konnten mittlere akzeptierte Tankdauern von 15 Minuten und eine Tank-Umwegebereitschaft von 20 km ermittelt werden. Diese Anforderungen sind für das Modell relevante Eingangsdaten.

Des Weiteren sind die Eigenschaften unterschiedlich großer Tankstellen zu definieren, die in die Modellierung eingehen. Hier wird auf Daten aus (Elgowainy and Reddi 2017) zurückgegriffen und um eigene Annahmen ergänzt (Tabelle 1). So können sechs Tankstellengrößen (von sehr klein – XS – bis sehr groß – XXL) definiert werden.

Während die XS-Tankstellen nur etwa 19 Lkw/Tag befüllen können, sind es bei sehr großen XXL-Tankstellen bis zu 600 Lkw/Tag. Hier sind auch bis zu 16 Zapf-

säulen vorgesehen und entsprechende Verdichter und Tankanlagen. Die Investitionen reichen von rund zwei Millionen Euro für die XS-Tankstelle bis zu 55 Mio. Euro für die XXL-Variante.¹⁷

Tabelle 1: Techno-ökonomische Eckdaten für Wasserstofftankstellen im Jahr 2050

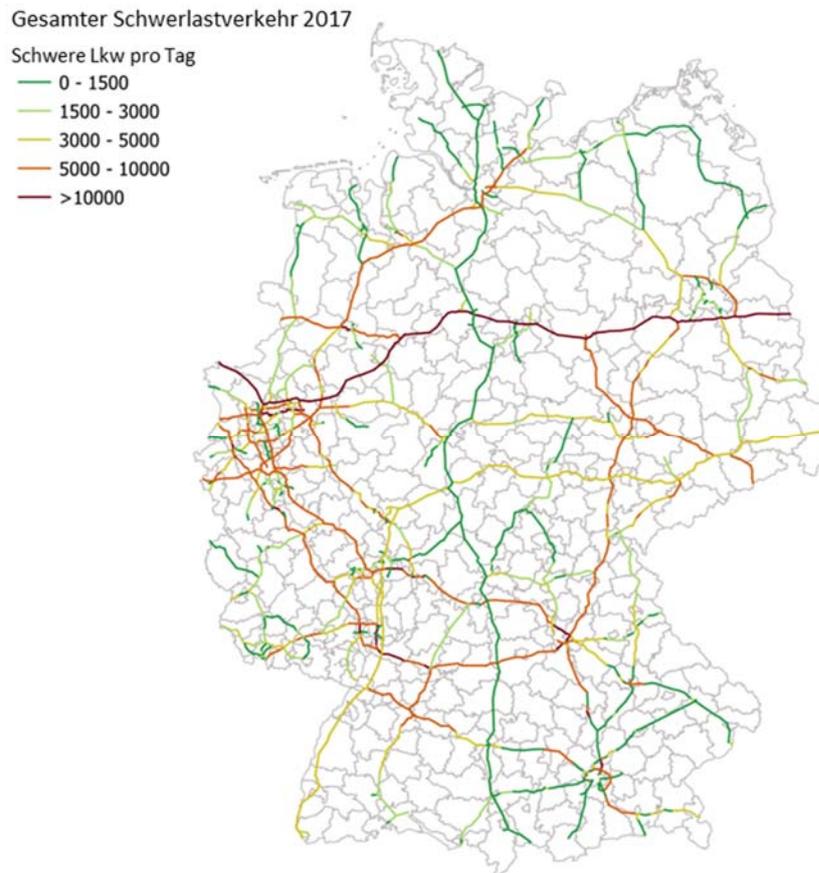
Parameter	Einheit	XS	S	M	L	XL	XXL
Fahrzeuge	Lkw/Tag	19	31	75	150	300	600
H ₂ -Nachfrage	kg H ₂ /Tag	938	1.875	3.750	7.500	15.000	30.000
Anzahl Auslässe	#	1	2	2	4	8	16
Kapazität Niedrigdrucktank	kg H ₂	938	1.875	3.750	7.500	15.000	30.000
Kapazität Hochdrucktank	kg H ₂	114	228	455	900	1.821	3.642
Verdichter	kg H ₂ /h	114	228	455	900	1.821	3.642
Fläche	m ²	290	565	1.190	2.725	6.330	13.470
Investitionen	T€	2.133	3.742	7.154	14.303	27.885	55.265

Quelle: eigene Annahmen basierend auf (Elgowainy und Reddi 2017)

Zum Vergleich bezüglich HRS für Pkw: Diese haben als kleine Tankstellen eine mittlere Kapazität von 168 kg H₂/Tag und, als große Tankstellen ausgelegt, 800 bis 2.200 kg H₂/Tag (siehe e-mobil BW 2013).

Eine wesentliche Analyse bezieht sich auf das Verkehrsaufkommen in Deutschland bei schweren Lkw (Heavy Duty Vehicles, HDV). In der folgenden Abbildung ist die tägliche Verkehrsbelastung mit schweren Lkw auf deutschen Autobahnen dargestellt. Man erkennt u. a. einen starken Ost-Westverkehr über Berlin sowie einen Nord-Südverkehr im Westen von Deutschland.

¹⁷ Weitere Details finden sich in Rose 2020



Quelle: eigene Darstellung basierend auf Daten von BASt 2017

Abbildung 2: Gesamtbelastung (deutsche und ausländische) der BAB mit schweren Lkw

4 Markthochlaufszenario und Tankstellenbedarf sowie -verteilung

Im Folgenden wird ein Markthochlaufszenario für BZ-Lkw entwickelt. Dieses stellt einen optimistischen Hochlauf und eine Zielmarke von 100 % der schweren Lkw, die im Jahr 2050 mit Wasserstoff fahren, dar. Neben den deutschen Lkw (siehe Bestandszahlen in der Tabelle) wird dabei auch der H₂-Bedarf für den Transitverkehr berechnet. Es ist weniger eine Prognose, sondern ein Wenn-Dann-Szenario (Zielszenario).

Tabelle 2: Optimistisches Markthochlaufszenario für schwere BZ-Lkw

	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Anzahl BZ-Lkw in Deutschland	0	15.500	48.700	77.400	135.000	188.100	221.300
Bestandsanteil BZ-Lkw am Gesamtmarkt schwerer Lkw	0 %	7 %	22 %	35 %	61 %	85 %	100 %
H ₂ -Nachfrage in Mio. Tonnen	0	0,09	0,29	0,46	0,79	1,11	1,30
H ₂ -Tankstellenanzahl	0	50	70	90	110	124	137
Jährliche Ausgaben für die Errichtung und den Betrieb von H₂-Tankstellen in Mrd. € (Annuität der Investitionen und Ausgaben für die Wasserstoffherzeugung ohne Steuern und Abgaben)	0	3,06	4,28	5,51	6,73	7,58	8,38

Dieses Szenario ist in Tabelle 2 dargestellt. Im Jahr 2030 sollen hier rund 50.000 BZ-Lkw im Bestand sein, 2040 sind es 135.000 und 2050 alle 220.000 Lkw.¹⁸ Mit der oben vorgestellten Methodik lässt sich zu diesem Markthochlauf der Wasserstoffbedarf sowie die Tankstellenanzahl und -größe berechnen. Es ergibt sich eine Nachfrage von 300.000 t H₂ im Jahr 2030, 800.000 t im Jahr 2040 und 1,3 Mio. t H₂ für 2050. Die jährlichen Ausgaben liegen bei 4,2 Mrd. € für 2030 und 8,38 Mrd. € für 2050. Die spezifischen Ausgaben für die Infrastruktur pro Abgabemenge an Wasserstoff sinken aufgrund der besseren Auslastung also deutlich (von ~15.000 €/t H₂ 2030 auf etwa 6.500 €/t H₂ 2050).

¹⁸ Es wird angenommen, dass der Inlandsverkehr (Verkehrsaufkommen in Deutschland) gleich dem Inländerverkehr (Verkehrsaufkommen deutscher Lkw) ist (vgl. Plötz et al. 2019). Damit lässt sich im Markthochlauf der Anteil der Nachfrage von BZ-Lkw in Deutschland dem Anteil der deutschen Verkehrsnachfrage gleichsetzen.

Abbildung 3 bis Abbildung 5 zeigen die geographische Verteilung der HRS sowie deren Größe. Schon bei einer relativ geringen Anzahl an BZ-Lkw muss ein recht breites Netz an Tankstellen aufgebaut werden, um den Bedarf an zurückgelegten Routen mit den bis dahin sich auf der Straße befindlichen BZ-Lkw abdecken zu können. Dabei kommen am Anfang auch teilweise kleiner ausgelegte Tankstellen zum Zuge.

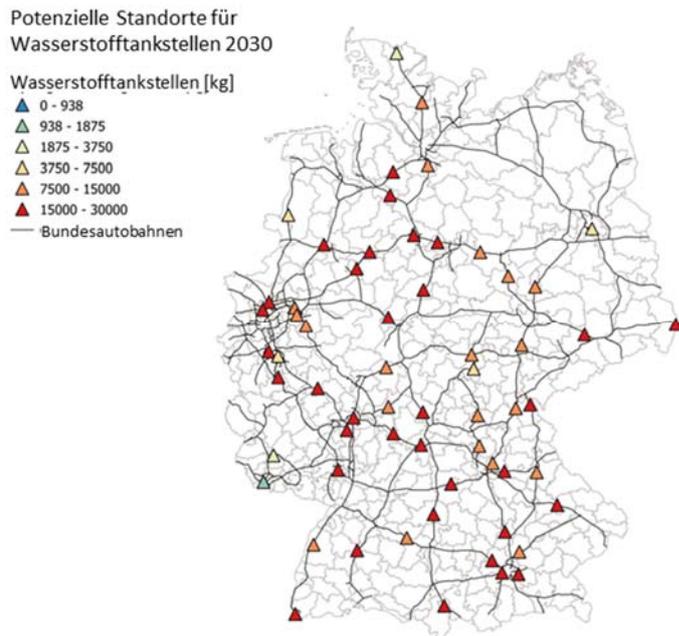


Abbildung 3: Szenario 2030 zum potenziellen Wasserstofftankstellenaufbau mit Wasserstoffnachfrage pro Tag in Deutschland

Man erkennt, dass die Stationen relativ gleichmäßig über das Autobahnnetz verteilt sind. Zudem kann man eine Konzentration entlang der Transitrouten sowie in Industrieregionen erkennen, während im Nordosten Deutschlands weniger Wasserstofftankstellen zu verzeichnen sind, mit Ausnahmen um Berlin und den Ost-West-Routen. Auffallend ist, dass im Nordosten von Deutschland kein Bedarf an Tankstellen besteht, da hier wenig Lkw-Verkehr stattfindet.

Eine Variation der Kapazitätsrestriktion wirkt sich stark auf ein zukünftiges Wasserstofftankstellennetz aus. Im MarkthochlaufszENARIO (Kapazitätsrestriktion bei 30 Tonnen Wasserstoff je Tankstelle) ergibt sich für 2050 ein Netzwerk von 137 Stationen. Sofern diese Kapazitätsbeschränkung aufgehoben wird, resultiert eine Mindestanzahl von 100 Stationen im Modell (größte Station mit 66 Tonnen Wasserstoff). Eine Verkleinerung der Kapazitätsrestriktion korreliert nahezu negativ linear mit der resultierenden Stationsanzahl (so ergeben z. B. 15 Tonnen ein Netzwerk von 276 Stationen).

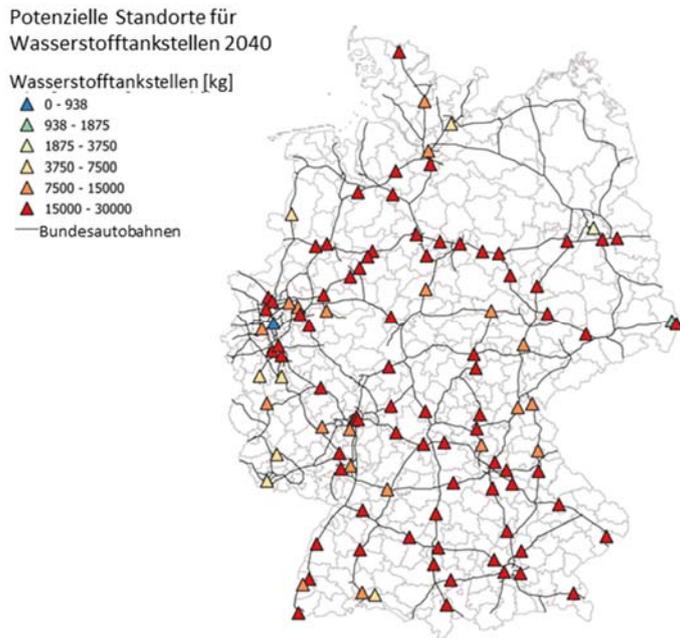


Abbildung 4: Szenario 2040 zum potenziellen Wasserstofftankstellenaufbau mit Wasserstoffnachfrage pro Tag in Deutschland

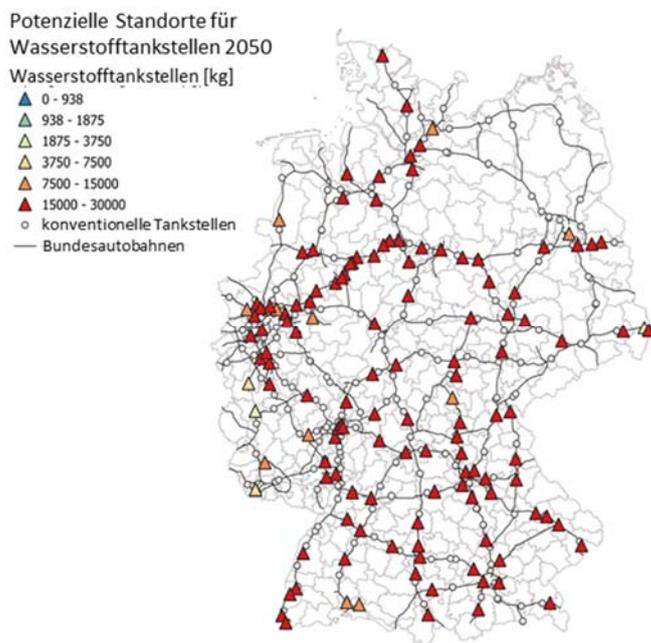


Abbildung 5: Szenario 2050 zum potenziellen Wasserstofftankstellenaufbau mit Wasserstoffnachfrage pro Tag in Deutschland

5 Wechselwirkung mit dem Energiesystem im Jahr 2050

Ausgangspunkt folgender Analyse ist, dass der Wasserstoff, der in Deutschland produziert wird, zur Versorgung der Tankstellen zugelassen wird. Alternativ wird heute auch über den Import von Wasserstoff aus Weltregionen mit besseren klimatischen und geographischen Voraussetzungen diskutiert. Diese Option wird in dieser Untersuchung nicht betrachtet. Weiterhin wird nur das Jahr 2050 untersucht. Siehe zu dieser Untersuchung Rose (2020).

Ein wesentlicher Vorteil eines Elektrolyseurs zur Wasserstofferzeugung ist, dass er flexibel, d. h. nach Strompreisen und damit nach Stromangebot an Erneuerbaren gesteuert, gefahren werden kann. Hier gibt es zwei Optionen:

1. Dies geschieht dezentral an der Tankstelle, d. h. die Stromnetze übernehmen den Transport der benötigten Energiemenge. Dies hat den Vorteil, dass geographisch verteilt in Deutschland große, flexible Nachfrager nach Strom stehen.
2. Oder man errichtet zentral große Elektrolyseure, z. B. an den Anlandepunkten von Stromkabeln aus Wind-Onshore-Parks und transportiert dann den Wasserstoff zu den Tankstellen. Dies kann über Tanklaster oder Wasserstoffpipelines erfolgen. Dies hat den Vorteil, dass große Elektrolyseure günstiger sind als dezentrale und dass mögliche Stromnetzübertragungsgengpässe umgangen werden.

Zur Analyse dieser Fragestellung muss das Energieerzeugungssystem und das Stromnetzsystem sowie die Wasserstofftransportoptionen abgebildet werden. Dies geschieht mithilfe des Energiesystemmodells PyPSA. In das Modell wird die in Kapitel 5 ermittelte geographische Verteilung mit der H₂-Nachfrage als Nachfrage vorgegeben.

Nun kann der Wert der Flexibilität weiter untersucht werden. Hierfür werden zwei Szenarien definiert. Beide gehen von einer Onsite-H₂-Versorgung der Tankstellen mit Elektrolyseuren aus. In Szenario A erfolgt die Wasserstoffproduktion unabhängig von den Preissignalen des Stromsystems. Im Szenario B wird der Elektrolyseur flexibel gefahren. Das heißt, er produziert überwiegend Wasserstoff in Zeiten mit niedrigen Strompreisen, die i.d.R. mit einer hohen Erzeugung durch Erneuerbare einhergehen. Hierfür müssen die Elektrolyseure und (Niederdruck-) Wasserstoffspeicher größer ausgelegt werden.

Die Analysen zeigen, dass eine Überdimensionierung der Elektrolyseure sowie Wasserstoffspeicher an den Tankstellen vorteilhaft für das Energiesystem sein

kann. Dieser Vorteil erklärt sich hauptsächlich durch die bessere Integration von stark fluktuierenden erneuerbaren Energien, welche teilweise azyklisch zum Energieverbrauch erzeugt werden. Hier kann die Lkw-HRS – insbesondere aufgrund ihrer Größe und ihres hohen Energieverbrauchs von ca. 65 TWh Strom jährlich – das Energiesystem entlasten und lokale erneuerbare Energie stärker einbinden. Im Ergebnis kann ca. 1 Mrd. €/a durch die Flexibilisierung des Wasserstoffnetzwerkes (Sektorkopplung) eingespart werden, was sich im Modell durch niedrigere Wasserstoffgestehungskosten an den HRS darstellt.

Gerade der Norden von Deutschland profitiert von niedrigen Strompreisen bedingt durch den notwendigen weiteren Ausbau der Windenergie zur Erreichung der Klimaziele, die hauptsächlich im Norden (on- und offshore) stattfindet. Diese führen zu niedrigeren Wasserstoffgestehungskosten.

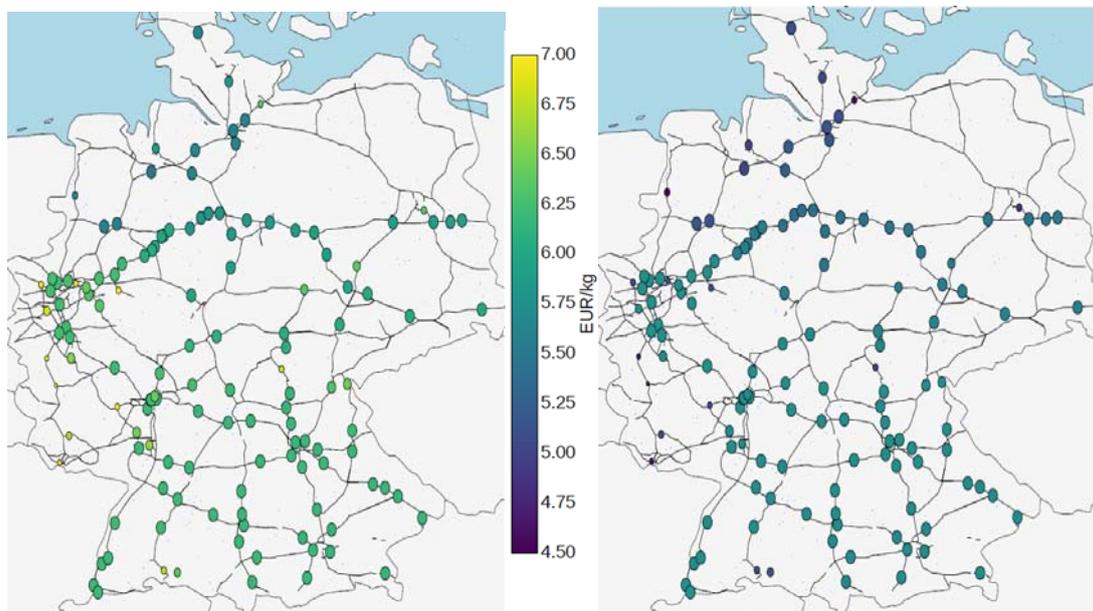


Abbildung 6: Wasserstoffgestehungskosten (LCOH – Levelised Cost of Hydrogen) an der Tankstelle in den beiden Szenarien A (ohne Lastflexibilität) und B (mit Lastflexibilität)

6 Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Ausgangsfragestellungen dieses Beitrags waren, was die räumlichen, technologischen, ökonomischen und energiewirtschaftlichen Anforderungen für ein optimales Wasserstofftankstellennetzwerk für schwere Wasserstoff-Lkw (größer 26 t zGG) in Deutschland sind und wie der Aufbau eines Tankstellennetzes in Deutschland aussehen könnte, der diesen Anforderungen genügt.

Die Analysen zu den Anforderungen zeigen, dass Wasserstofftankstellen für BZ-Lkw andere Anforderungen erfüllen müssen als solche für Pkw. Die nachgefragte Wasserstoffmenge ist deutlich größer und man kommt an heute vorgegebene erlaubte Kapazitätsgrenzen für die Lagerung von H₂. Auch ist der Platzbedarf zur Speicherung der benötigten Wasserstoffmenge relevant (H₂ hat eine deutlich geringere Energiedichte als Benzin und Diesel). Dies führt dazu, dass die Investitionen in Lkw-Tankstellen damit deutlich größer als in Pkw-Tankstellen sind. Heute existierende H₂-Tankstellen für Pkw können kaum von BZ-Lkw genutzt werden.

Nutzer von Lkw haben heute hohe Reichweitenanforderungen an einen Lkw (Tagesreichweite ~800 km). Unter deren Einbeziehung wurde nach Wissen der Autoren erstmals für Deutschland eine Simulation eines optimierten H₂-Tankstellenaufbaus in Deutschland für Lkw durchgeführt. Dabei wird ein optimistisches Marktdurchdringungsszenario von BZ-Lkw unterstellt. Diese Analysen führen zu folgenden Schlussfolgerungen:

1. Man muss schon relativ früh eine recht hohe Anzahl an Lkw-HRS aufbauen, um die Anforderungen von BZ-Lkw-Nutzern erfüllen zu können. Für knapp 50.000 BZ-Lkw in 2030 würde man ca. 70 Wasserstofftankstellen benötigen. Dabei kommen am Anfang auch teilweise kleiner ausgelegte Tankstellen zum Zuge. Diese zum Wasserstoffabsatz vergleichsweise hohe Tankstellenanzahl führt zu der Frage, wie hier Geschäftsmodelle aufgebaut werden können und welcher staatliche Förderbedarf hier besteht. Heutige Wasserstofftankstellen für Pkw werden mit staatlicher Förderung gebaut.
2. Ein komplett ausgebautes Lkw-HRS-Netz in Deutschland im Jahr 2050 hat etwa 140 Stationen zur Abdeckung des gesamten deutschen schweren Lkw-Verkehrs bei Gesamtkosten von etwa 9 Mrd. Euro/Jahr (2050). Die Stationen werden relativ gleichmäßig über das Autobahnnetz verteilt, weiterhin kann man eine Konzentration entlang der Transitrouten sowie in Industrieregionen erkennen.
3. Durch flexible Steuerung der Elektrolyseure an den Tankstellen nach Preissignalen des Stromsystems könnten die Gesamtkosten um etwa 1 Mrd.

€/Jahr gesenkt werden. Die Rahmenbedingungen für eine flexible Steuerung sollten deshalb früh gesetzt werden.

4. Im Vergleich zu anderen Studien¹⁹ mit BZ-Pkw-Tankstellennetzwerken zeigt sich deutlich, dass die benötigte Anzahl der Stationen für Pkw-Infrastrukturen wesentlich höher als für Lkw ist (für eine komplette Umstellung des Verkehrs auf BZ-Fahrzeuge wären ca. 10.000 für Pkw vs. den oben bereits genannten 140 für Lkw notwendig).

Erwähnenswerte Einschränkungen der Modellierung sind die fehlende Berücksichtigung von zukünftigen Verhaltensänderungen (z. B. durch Hub-and-Spoke-System). Ein Aspekt ist hier, ob die von den Nutzern heute geforderten Reichweitenanforderungen auch künftig weiter bestehen bleiben. Wenn man sich die tatsächlich zurückgelegten Routen und die Anforderungen an Pausenzeiten anschaut, könnte man künftig gegebenenfalls mit niedrigeren Reichweiten auskommen. Eine Verbesserung der Modellierung umfasst u. a. die Verbesserung der Datenlage. Was ebenfalls in weiteren Untersuchungen eingeschlossen werden sollte, ist, ob es möglich ist, über Lkw, die rein lokal eingesetzt werden, mit lokalen Tankstellenorten den Start des Tankstellenaufbaus zu bewerkstelligen.

Inhaltlich könnte der Vergleich zusätzlicher Technologien (z. B. Batterie-Lkw, Oberleitungs-Lkw) und deren Bedarf an Infrastrukturen sowie die räumliche Erweiterung auf die EU interessant sein. Weiterhin basiert die Analyse auf dem Tanken von Druckwasserstoff. Wie oben angesprochen ist auch Flüssigwasserstoff eine Alternative. Für künftige Analysen sollte dies auch in Betracht gezogen werden. Alternativ zur Brennstoffzelle wird derzeit auch wieder verstärkt an dem Thema von Wasserstoffverbrennungsmotoren gearbeitet, die aufgrund des geringeren Wirkungsgrades einen höheren Wasserstoffbedarf haben. Weitere Analysen sollten auch den Import von grünem Wasserstoff näher analysieren, der in der vorliegenden Studie ausgeklammert wurde.

¹⁹ siehe Robinius et al. 2017

Acknowledgement

Dieses Diskussionspapier entstand innerhalb des von der Fraunhofer Gesellschaft geförderten Projektes H2-D - EINE WASSERSTOFFWIRTSCHAFT FÜR DEUTSCHLAND.

Literatur

- Ehret, O. (2020): Wasserstoffmobilität - Stand, Trends, Perspektiven. Studie im Auftrag des DVGW (Hrsg.). Durchgeführt vom Center of Automotive Management (CAM). DVGW: Bonn
- Elgowainy, A.; Reddi, K. (2017): Heavy-Duty Refueling Station Analysis Model (HDRSAM). <https://hdsam.es.anl.gov/index.php?content=hdsam>, accessed 16 September 2019.
- e-mobil BW (2013): Wasserstoff-Infrastruktur für eine nachhaltige Mobilität – Entwicklungsstand und Forschungsbedarf. e-mobil BW: Stuttgart
- EU (2015): Richtlinie 2015/719/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2015 zur Änderung der Richtlinie 96/53/EG des Rates zur Festlegung der höchstzulässigen Abmessungen für bestimmte Straßenfahrzeuge im innerstaatlichen und grenzüberschreitenden Verkehr in der Gemeinschaft sowie zur Festlegung der höchstzulässigen Gewichte im grenzüberschreitenden Verkehr. Brüssel: EU
- Kluschke, P.; Gnann, T.; Plötz, P.; Wietschel, M. (2019a): Market diffusion of alternative fuels and powertrains in heavy-duty vehicles: A literature review. *Energy Reports* 5, 1010–1024. 10.1016/j.egy.2019.07.017.
- Kluschke, P.; Uebel, M.; Wietschel, M. (2019b): Alternative Antriebe im straßengebundenen Schwerlastverkehr: eine quantitative Ermittlung der Nutzeranforderungen an schwere Lkw und deren Infrastruktur. ISI Working Paper Sustainability and Innovation No. S 05/2019.
- Kluschke, P.; Nugroho, R.; Gnann, T.; Plötz, P.; Wietschel, M.; Reuter-Oppermann, M. (2020): Optimal development of alternative fuel station networks considering node capacity restrictions. In: *Transportation Research Part D: Energy and Environment* (Special Issue: „Role of Infrastructure to Enable and Support Electric Drive Vehicles”) [accepted for publication].
- Plötz, P.; Gnann, T.; Wietschel, M.; Kluschke, P.; Doll, C.; Hacker, F.; Blanck, R.; Kühnel, S.; Jöhrens, J.; Helms, H.; Lambrecht, U.; Dünnebeil, F. (2018): Alternative drive trains and fuels in road freight transport: recommendations for action in Germany. Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI, Oeko-Institut, Institute for Energy and Environmental Research, Karlsruhe.
- Plötz, P.; Gnann, T.; Jochem, P.; Yilmaz, H. Ü.; Kaschub, T. (2019). Impact of electric trucks powered by overhead lines on the European electricity system and CO2 emissions. *Energy policy*, 130, 32-40.
- Robinius, M.; Linßen, J.; Grube, T.; Reuß, M.; Stenzel, P. (2017): Comparative Analysis of Infrastructures: Hydrogen Fueling and Electric Charging of Vehicles. *Energy & Environment*. Forschungszentrum Jülich.

- Rose, P.; Neumann, F. (2020): Interaction of a Hydrogen Refueling Station Network for Heavy-Duty Vehicles and the Power System in Germany for 2050. Transportation Research Part D: Energy and Environment (Special Issue: „Sustainable Transportation Energy Pathways“). June 2020, Vol. 83. DOI: 10.1016/j.trd.2020.102358.
- Rose, P. (2020): Modeling a potential hydrogen refueling station network for fuel cell heavy-duty vehicles in Germany in 2050. Dissertation am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Mai 2020.
- Wermuth, M.; Neef, C.; Wirth, R.; Hanitz, I.; Löhner, H.; Hautzinger, H.; Stock, W.; Pfeiffer, M.; Fuchs, M.; Lenz, B.; Ehrter, V.; Schneider, S.; Heinzmann, H.-J. (2012): Mobility Study „Motor Vehicle Traffic in Germany 2010“ (Mobilitätsstudie „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010“ (KiD 2010)): Braunschweig.
- Wietschel, M.; Gnann, T.; Kühn, A.; Plötz, P.; Moll, C.; Speth, D.; Stütz, S.; Schellert, M.; Rüdiger, D.; Balz, W.; Frik, W., Wassmuth, V.; Pauffler-Mann, D.; Rödl, A.; Schade, W. (2017): Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw. Studie im Rahmen der wissenschaftlichen Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung. Beteiligte Forschungsinstitute: Fraunhofer ISI, Karlsruhe, Fraunhofer IML, Dortmund, PTV Group, Stuttgart, Karlsruhe, TU Hamburg-Harburg, Hamburg, M-Five. Fraunhofer ISI: Karlsruhe.



Authors' affiliations

Martin Wietschel, Till Gnann

Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research (Fraunhofer ISI)
Competence Center Energy Technology and Energy System

Philipp Rose

PwC Strategy& (Germany) GmbH

Contact: Martin Wietschel

Fraunhofer Institute for Systems
and Innovation Research (Fraunhofer ISI)
Breslauer Strasse 48
76139 Karlsruhe
Germany
E-Mail: martin.wietschel@isi.fraunhofer.de
www.isi.fraunhofer.de

Karlsruhe 2020