

PhD Planung und Status

**„Entwicklung einer Ausbaustrategie für Wasserstoff-Tankstellen
zur Dekarbonisierung des straßengebundenen Güterfernverkehrs
in Deutschland bis 2050“**

Zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktors der Ingenieurwissenschaften

Dr.-Ing.

von der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften
des Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

von Dipl.-Wirtsch.-Ing. Philipp Kluschke

Referent (Erstprüfer):
Koreferent (Zweitprüfer):

Apl. Prof. Dr. Martin Wietschel (KIT)
Prof. Wolf Fichtner

1. Ausgangssituation und Problemstellung

Mit etwa 14%¹ der CO₂-Emissionen weltweit stellt der Transportsektor den viertgrößten Emittenten dieses Treibhausgases im Jahr 2012 dar (IPCC 2013). Innerhalb dieses Sektors repräsentiert der Güterfernverkehr mit ca. 40% einen sehr großen Anteil mit steigender Tendenz (IPCC 2013). Zwar werden CO₂-Emissionen z.B. im PKW-Bereich² in der EU stark reguliert (Europäische Union 2009), dennoch gab es in Mitgliedsstaaten wie Deutschland lediglich eine minimale Reduktionen im Verkehr.

Der notwendige Beitrag von Lastkraftwagen (LKW) zur Einsparung von CO₂-Emissionen ist signifikant, da er einen Anteil von 73% an der Transportleistung im deutschen Güterverkehr darstellt. Weiterhin wird von 2010 bis 2030 ein Anstieg des deutschen LKW-Verkehrs von 28% prognostiziert (BMUB 2016).

Der aktuelle deutsche LKW-Bestand setzt sich nach Wietschel et al. (2018) überwiegend aus Fahrzeugen <3,5t zusammen (ca. 75% des Bestandes) und nur zu einem geringen Anteil aus schweren Sattelzugmaschinen³ (weniger als 10% des Bestandes, ca. 183.000 Fahrzeuge). Jedoch weisen die Sattelzugmaschinen (SZM) aufgrund einer hohen durchschnittlichen Fahrzeug-Laufleistung durch hauptsächliche Nutzung im Fernverkehr einen hohen Anteil an der LKW-Gesamtfahrleistung auf (fast 30%, ca. 19,4 Mrd. Kilometer). Darüber hinaus sorgen sie aufgrund des höheren spezifischen Energieverbrauch pro Fahrzeug für rund 50% der CO₂-Emissionen der deutschen "LKW-Flotte" (Wietschel et al. 2018).

Um die deutschen Emissionsziele aus dem Klimaschutzplan zu erreichen, braucht Deutschland also ein umfassendes Konzept für die Dekarbonisierung des straßengebundenen Güterfernverkehrs - insbesondere mit Fokus auf SZM.

Daher rückt die Nutzung alternativer Antriebe zunehmend in den Fokus. Während ein rein batterieelektrischer Antrieb aufgrund der geringen Energiedichte des Batteriespeichers nicht für große Reichweiten im straßengebundenen Güterfernverkehr geeignet scheint (Gnann et al. 2017a), könnten Oberleitungs-Antriebe durchaus mit 30% der Fahrzeuge und davon 60% der Fahrleistung bis 2030 einen signifikanten Anteil zu CO₂-Reduktion beitragen (Wietschel et al. 2017).

¹ 8,4Gt von 60Gt CO₂

² Die Ausgestaltung der CO₂-Regularien für in der EU neu zugelassene LKW ab 1. Januar 2019 wird aktuell diskutiert (ICCT 2018).

³ Sattelzugmaschinen (SZM) haben zwischen 26t und 40t zulässiges Gesamtgewicht (zGG). Diese Fahrzeuge werden überwiegend im Güterfernverkehr eingesetzt.

Den größten technologischen Hebel zur Reduktion von CO₂-Emissionen im straßengebundenen Güterverkehr stellt nach einer aktuellen Einschätzung der Brennstoffzellen-Antrieb (engl. Fuel Cell, FC)⁴ dar (Kast et al. 2017a).

Ein potentieller Weg zur Erreichung der CO₂-Ziele im Bereich des straßengebundenen Güterfernverkehrs ist also die Nutzung von FC-Antrieben in LKWs - aufgrund des Hebels insbesondere in SZM.

Im Gegensatz zu konventionellen Antrieben ist hier jedoch eine komplett neue Infrastruktur notwendig. Daher ist eine wichtige Voraussetzung für zukünftig größere FC-LKW-Stückzahlen die Verfügbarkeit eines LKW-geeigneten Wasserstoff-Tankstellennetzes (Melania et al. 2012).

2. Stand der Forschung

Nachfolgend wird vom Autor der aktuelle Stand der Forschung zur FC-Technologie für den straßengebundenen Güterfernverkehr reflektiert. Dies erfolgt in zwei Bereichen: einerseits der Fahrzeug-Technologie sowie andererseits bezüglich der entsprechend notwendigen Wasserstoff-Infrastruktur bzw. -Tankstellen.

Hinsichtlich der existierenden Fahrzeug-Technologie für FC-LKWs liegen Forschungsarbeiten auf 2 Ebenen vor: So wurden von Macauley et al. (2016) auf Komponenten-Ebene die Langlebigkeit der Brennstoffzellen-Technologie bei Anwendung für den Heavy-Duty-Bereich analysiert. Auf Gesamtfahrzeug-Ebene haben Kast et al. (2017a) für verschiedene Heavy-Duty-Klassen ausgehend von dem initial definierten Betriebsbereich (Reichweite) und den Gewichts- und Raumbegrenzungen der Fahrzeuge die grundsätzliche Anwendbarkeit der FC-Technologie bestätigt. Gnann et al. (2017b) weisen jedoch darauf hin, dass bezüglich der FC-LKW-Technologie viele Fragen hinsichtlich des technologischen Standes (Energieinhalt des Tanks, verfügbarer Leistungen >250kW), der Nutzer-Akzeptanz sowie der passenden Infrastruktur noch nicht geklärt sind.

Grundsätzlich sind Wasserstoff-Tankstellen (engl. Hydrogen Refueling Stations, HRS) bereits Bestandteil zahlreicher Untersuchungen. In wissenschaftlichen Veröffentlichungen wurden sowohl qualitative als auch quantitative Analysen durchgeführt - jedoch ausschließlich mit Blick auf den leichten Straßenverkehr⁵.

So haben Schwoon (2007), Seydel (2008) und Robinius (2016) vorrangig die Kraftstoffbereitstellung für Brennstoffzellen-Fahrzeuge (FCEV) im PKW- und leichten Nutzfahrzeug-Segment untersucht. Hierbei wurde von Schwoon (2007) eine HRS-Entwicklung modelliert. Seydel (2008) projizierte den Wasserstoff-

⁴ Die Brennstoffzelle im Fahrzeug wird von Wasserstoff (aus mitgeführten Tanks) sowie Sauerstoff versorgt und erzeugt elektrische Energie zum Antrieb des Fahrzeugs über einen Elektromotor.

⁵ Der leichte Straßenverkehr umfasst PKW und leichte Nutzfahrzeuge (LNF; light-duty).

Infrastrukturaufbau unter Einbezug regionaler Aspekte für Deutschland bis 2050. Robinius (2016) fokussierte in seiner Arbeit vor allem die Wasserstoffinfrastrukturkosten sowie CO₂-Einsparungen.

Jedoch wurde in keiner wissenschaftlichen Untersuchung die Nutzung der HRS durch den Güterfernverkehr analysiert - auch wenn in Studien bereits darauf verwiesen wurde (Wietschel et al. 2017). Insbesondere die LKW-taugliche Ausgestaltung der individuellen Tankstelle (Betankungszeit, Anzahl LKW pro Tag), aber auch die benötigte Anzahl an LKW-HRS in Deutschland sind bisher in keiner dem Autor bekannten Forschungsarbeit näher untersucht worden.

Aktuell ist nicht eindeutig zu sagen, welche Tankstellen-Typen sich für FC-LKWs eignen⁶. So ermittelten Alazemi und Andrews (2015) zwar die globale Anzahl an bereits errichteten HRS (ca. 220 Stationen) sowie den jeweiligen Typ zur H₂-Versorgung (ca. 50-70% mit lokalem Elektrolyseur), jedoch findet sich keine Zuordnung zur Eignung für den straßengebundenen Güterfernverkehr.

Nach aktuellem Forschungsstand ist der individuelle Tankvorgang nicht auf LKW-Anforderungen ausgelegt und dauert vergleichsweise lange (vgl. HRS-Betankungsnorm SAE J2601). HRS mit einer täglichen Kapazität von ca. 200kg können innerhalb von 3 Minuten etwa 5kg Wasserstoff (entspricht der Größe eines FC-PKW-Tanks) betanken und benötigen dann eine Pause zur Selbstaufladung von etwa 3 Minuten (Elgowainy et al. 2014). Ein 50kg LKW-Fahrzeugtank wäre also nach ca. 57 Minuten gefüllt, was in etwa der fünffachen Dauer eines LKW-Tankvorganges mit Diesel entspräche.⁷

Auch die maximale Anzahl an LKW-Tankvorgängen spielt in aktuellen Forschungsvorhaben kaum eine Rolle. Eine der weltweit größten HRS sichert die Versorgung einer Nahverkehrs-Busflotte (Hua et al. 2014): In Vancouver können beispielsweise an einem Tag maximal 15 Busse mit je 50kg Wasserstoff befüllt werden. Der lokale Speicher mit 5300 kg Wasserstoff reicht demnach für etwa 7 Tage ohne Nachfüllung. Die benötigte Tankmenge von etwa 40kg bis 50kg Wasserstoff pro Tankvorgang im Busverkehr⁸ ist vergleichbar mit der von FCEV-Sattelzugmaschinen. Allerdings liegt die durchschnittliche Jahresfahrleistung der Busse deutlich unter dem von Sattelzugmaschinen mit ca. 55.000km zu ca. 100.000km (Hua et al. 2014). Selbst die größte heute existierende HRS kann also theoretisch maximal 15 Sattelzugmaschinen täglich betanken⁹. Diese Limitierung geht mit neuen Herausforderungen bezüglich der Sicherheitskonzepte für die Speicherung von mehr als 5 Tonnen Wasserstoff in den lokalen Speichern einher

⁶ Aktuell werden HRS häufig nach täglicher Kapazität klassifiziert z.B. in Größe S, M und L (vgl. Michaelis et al. 2012).

⁷ Annahmen: 40Liter / 100km (Verbrauch) * 800km (Reichweite) = 320Liter (Tankgröße); 30Liter / Minute (Betankungsgeschwindigkeit); ergibt ca. 11Minuten (Betankungszeit)

⁸ Die benötigte Betankungszeit für 50kg entspricht etwa 20-35 Minuten und reicht für etwa 700km.

⁹ Hierbei wurden keine Druckausgleichsvorgänge innerhalb der Station berücksichtigt.

(NewBusFuel 2017). Gleichzeitig bietet eine sehr große Dimensionierung der HRS auch eine Chance zur Degression der dominierenden Elektrolyseur-Kapitalkosten auf die hohe Nachfragemenge an Wasserstoff (Brynolf et al. 2018). Die Versorgung von HRS mit einem täglichen Verbrauch von über 1.000kg durch LKW-Trailer wird von Reddi et al. (2016) praktisch ausgeschlossen, sodass ab einer Frequenz von etwa 20 LKW-Betankungen täglich lediglich eine Versorgung mit lokalem Elektrolyseur oder einer Pipeline für Wasserstoff-Tankstellen möglich wäre.

Auch eine Prognose für die Anzahl der benötigten HRS zur Versorgung des straßengebundenen Güterfernverkehrs ist nicht erforscht. Zwar stimmen aktuelle Untersuchungen über den benötigten Hochlauf an PKW-HRS fast überein (vgl. Robinius et al. 2018), jedoch wird hierbei kaum der Bedarf durch den Straßen-Güter(fern)verkehr berücksichtigt.

Zusammengefasst lässt sich feststellen, dass auch die für 2030 prognostizierte Anzahl an HRS die Nachfrage durch Wasserstoff-LKWs vermutlich nicht abdecken würde und auch nicht auf die Anforderungen der LKWs ausgelegt wären. Mit dem Plan zum HRS-Ausbau ist eine Dekarbonisierung des straßengebundenen Güterfernverkehrs mit FC-LKWs und damit ein Beitrag zu den Klimaschutzzielen schwer erreichbar.

Eine Strategie zur Kraftstoffversorgung eines straßengebundenen Güterfernverkehrs, welcher zukünftig in Teilen auf Brennstoffzellen-Antrieben basiert, ist nicht ausreichend untersucht worden.

3. Zielsetzung

In dieser Dissertation sollen der Aufbau und die Ausgestaltung einer Wasserstoff-Tankstellen-Infrastruktur (HRS-Infrastruktur) für den straßengebundenen Güterfernverkehr in Deutschland bis 2050 analysiert werden. Hierbei liegt der Fokus auf verschiedenen Aspekten. Zunächst sollen die Nutzer-Anforderungen an eine spezifische LKW-HRS geklärt werden, um eine Auslegung der Komponenten für eine LKW-HRS vornehmen zu können. Daraus ergeben sich die erste Forschungsfrage:

Forschungsfrage 1: Welche Nutzer-Anforderungen werden an einen FC-LKW (und damit indirekt an eine LKW-HRS) gestellt und welche Auslegung ergibt sich daraus an die einzelnen HRS-Komponenten (H₂-Speicher, H₂-Puffer, Kompressor, Chiller, Zapfhahn)?

Zur Dekarbonisierung des straßengebundenen Güterverkehrs ist darauf aufbauend die Anzahl der HRS zur Versorgung der notwendigen Anzahl an FC-LKW in Deutschland relevant:

Forschungsfrage 2: Welcher Anteil (bzw. welche Anzahl) an FC-LKWs ist notwendig, um die Ziele des deutschen Klimaschutzplanes 2050 zu erreichen und wie viele LKW-HRS wären notwendig, um diesen Anteil an FC-LKWs hinreichend zu versorgen?

Zur finalen Ausgestaltung einer LKW-HRS-Infrastruktur ist die Art der Wasserstoff-Bereitstellung an den HRS zu ermitteln. Hierbei sind theoretisch drei unterschiedliche Anbindungen möglich: lokale Wasserstofferzeugung (1) bzw. zentrale Wasserstofferzeugung mit einer Belieferung mittels LKW-Trailer (2) oder Pipeline (3).¹⁰ Es ergeben sich daher folgende Forschungsfragen:

Forschungsfrage 3: Wie werden die LKW-HRS mit Wasserstoff versorgt?

Daraus abgeleitet:

(a) Wie sind die LKW-HRS regional verteilt?

(b) Welche Auswirkungen ergeben sich auf die Energiewirtschaft (z.B. durch Entkopplung von Energie- und Wasserstoff-Nachfrage?

(c) Welche Synergien ergeben sich mit einem HRS-Netz für den Personenverkehr?

Zur besseren Einordnung der Zielsetzung und Abgrenzung sind mittels eines Morphologischen Kastens die Systemgrenzen dieser Analyse definiert worden. So wurde als Untersuchungsobjekt für *schwere LKW ab 12t zGG* die lokal CO₂-neutrale Antriebstechnologie *Wasserstoff in Brennstoffzellen-Antrieben (FCEV)* fokussiert. Weiterhin erfolgt eine techno-ökonomische Betrachtung der technischen Systeme zur Wasserstoff-Produktion (Elektrolyseur), zur Verteilung, zur Speicherung, zur Entnahme (Tankstelle) sowie zum Fahrzeug-Antrieb. Ziel dieser Dissertation ist, ein Konzept zum Infrastruktur-Aufbau zu erstellen. Die Bereitstellung von elektrischer Energie sowie der Hochlauf des FC-LKW-Marktes sind außerhalb der Systemgrenzen.

¹⁰ Die Verwendung von Hydriden (z.B. LOHC) zur Bindung von Wasserstoff während des Transportes für größere Mengen wird nach aktuellem Forschungsstand eher ausgeschlossen (Mohrdieck 2017).