

# Wasserstoffversorgung für den Schwerlastverkehr

## Abschlussbericht

**Janina Senner, Miriam Bäuerle, Mustafa Flayyih, Juri Scholten**  
Gas- und Wärme-Institut Essen e.V.

**Maximilian Heneka, Volkan Isik, Wolfgang Köppel**  
DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des KIT

**Nico Steyer**  
DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH, Leipzig

**Dr. Dietrich Gerstein**  
KNT Consult GmbH, Essen



# **Wasserstoffversorgung für den Schwerlastverkehr**

## **Abschlussbericht**

September 2023

DVGW-Förderkennzeichen G 202117

## Zusammenfassung

Deutschland und die Europäische Union (EU) haben sich ambitionierte Ziele gesetzt, um den Ausstoß von Treibhausgasen (THG) zu reduzieren und bis zum Jahr 2045 klimaneutral zu werden. Während in der Energiewirtschaft oder der Industrie bereits Emissionen reduziert werden konnten, bleibt der Verkehrsbereich hinter den Zielvorgaben zurück. Gerade im Bereich des Schwerlastverkehrs bietet die Nutzung von erneuerbarem Wasserstoff in Brennstoffzellen Lkw (FCE Lkw) große Potenziale zur Verringerung von THG-Emissionen.

Das Projekt H2net&logistics untersucht die technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Potenziale des Aufbaus von H<sub>2</sub> Tankstelleninfrastruktur für Lkw in Deutschland und der Versorgung der Tankstellen über leitungsgebundene Infrastrukturen. Ergänzend werden Aussagen getroffen zur Nutzung von Wasserstoff im Schienenverkehr.

Der straßengebundene Güterverkehr wird in den betrachteten Studien und Szenarien als ein starker Treiber für H<sub>2</sub>-Nachfrage identifiziert. In technologieoffenen Szenarien wird ein Bedarf von bis zu 76 TWh/a (2045) erwartet. Grüner Wasserstoff kann aus Importprojekten bereitgestellt werden oder zentral in Deutschland bzw. dezentral an der Tankstelle produziert werden. Die Versorgung der Tankstellen kann insbesondere bei höheren Bedarfen über den Anschluss der Tankstellen an ein H<sub>2</sub>-Leitungsnetz erfolgen.

Aus technischer Sicht ist der breite Einsatz von Wasserstoff im Schwerlastverkehr möglich. Dabei zeigen sich Synergien bei der Nutzung von leitungsgebundener Versorgung der Tankstellen. Für den Aufbau der Infrastruktur wird eine Umsetzung in mehreren Phasen vorgeschlagen. Hierbei kann das zukünftige Netz ausgehend von initialen Standorten, die zunächst nur regionale Lieferrouten zulassen, schrittweise hin zu einem vollständigen öffentlichen Tankstellennetz ausgebaut werden.

Über eine TCO-Analyse (Total Cost of Ownership) werden Bereitstellungskosten für Antriebsenergien, Infrastrukturkosten und Fahrzeugkosten analysiert und für Diesel Lkw, FCE Lkw und BE Lkw (batterieelektrisch) verglichen. Momentan liegen die Kosten der Nutzung von FCE Lkw über denen von dieselbetriebenen Lkw. Der Hochlauf von FCE Lkw und der Aufbau der notwendigen Infrastruktur muss zunächst regulatorisch gestützt und gefördert werden. Über ein abgestimmtes Zusammenspiel von Mautreduzierung, direkter Förderung, THG-Quoten und Erhöhung von CO<sub>2</sub> Preisen kann der FCE Lkw zeitnah wettbewerbsfähig zum konventionellen Diesel Lkw werden und ein Markthochlauf erreicht werden.

Um THG-Minderungsziele zu erreichen ist ein schneller Hochlauf von alternativen Antriebstechnologien erforderlich. Auf der regulatorischen, gesetzgeberischen Seite sind allerdings die Prozesse zur Entwicklung eines stabilen Rechtsrahmens auf Ebene der EU aber auch auf bundesdeutscher Ebene noch nicht abgeschlossen. Auch zeigt die Bestandaufnahme nationaler und internationaler technischer Regelwerke Regelungslücken.

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Basisdaten Wasserstoff, Verfügbarkeit und Infrastruktur</b>	<b>3</b>
2.1	<i>Metaanalyse (grünes) H<sub>2</sub>-Angebot</i>	3
2.1.1	Vorgehen und relevante Literaturstellen	3
2.1.2	Gegenüberstellung der gewählten Literatur	4
2.1.3	Auswahl eines Literaturszenarios und Ableitung Markthochlauf	6
2.1.4	Spiegelung mit Sekundärliteratur und Umfragen	11
2.2	<i>Metaanalyse (grüne) H<sub>2</sub>-Nachfrage im Verkehrssektor</i>	13
2.2.1	Vorgehen und relevante Literaturstellen	13
2.2.2	Gegenüberstellung der H <sub>2</sub> -Nachfrage in den Verbrauchssektoren	13
2.2.3	Gegenüberstellung der Rahmenbedingungen im Verkehrssektor	16
2.2.4	Auswahl eines Literaturszenarios und Ableitung Markthochlauf	19
2.3	<i>Markthochlauf Nutzfahrzeuge und Tankstelleninfrastruktur</i>	22
2.3.1	Ermittlung der Fahrzeugbestände im Straßengüterverkehr	22
2.3.2	Ableitung der benötigten H <sub>2</sub> -Tankstelleninfrastruktur	25
2.3.3	Ansatz zur modellbasierten Verortung von H <sub>2</sub> -Tankstellen	28
2.3.4	Ergebnisse der modellbasierten Verortung von Tankstelleninfrastruktur bis 2045	33
2.3.5	Ergebnisse der modellbasierten Beschreibung von HRS-Versorgungsoptionen	35
2.4	<i>Exkurs: H<sub>2</sub>-Nutzung im Schienenverkehr</i>	40
2.5	<i>Zusammenfassung</i>	42
<b>3</b>	<b>Basisanalyse Brennstoffzellenfahrzeuge und Wasserstofftankstellen</b>	<b>43</b>
3.1	<i>Wasserstofftankstellen: Status Quo und technische Reife</i>	43
3.1.1	Status Quo HRS national und international	43
3.1.2	TRL-Bewertung 350 bar CGH <sub>2</sub> -Tankstellen	44
3.1.3	TRL-Bewertung 700 bar CGH <sub>2</sub> -Tankstellen	45
3.1.4	CcH <sub>2</sub> -Tankstellen	46
3.1.5	sLH <sub>2</sub>	47
3.1.6	TRL-Vergleich Wasserstofftankstellen	47
3.2	<i>TCO-Analyse Wasserstofftankstellen</i>	49
3.2.1	Grundlegende Annahmen zur vergleichbaren TCO-Analyse	49
3.2.2	TCO-Analyse 350 bar CGH <sub>2</sub> -Tankstelle	53
3.2.3	TCO-Analyse 700 bar CGH <sub>2</sub> -Tankstelle	56
3.2.4	TCO-Analyse CcH <sub>2</sub> -Tankstelle	57
3.2.5	TCO-Analyse LH <sub>2</sub> -Tankstelle	59
3.2.6	TCO-Vergleich Wasserstofftankstellen	60
3.3	<i>Brennstoffzellenfahrzeuge im Güterverkehr: Status Quo, Fahrzeugangebot und technische Reife</i>	63
3.3.1	Status-Quo schwere Nutzfahrzeuge	63
3.3.2	TRL und Fahrzeugangebot schwerer Nutzfahrzeuge	67
3.3.3	TCO-Analyse schwerer Nutzfahrzeuge	69
3.4	<i>Einsatz von Brennstoffzellentriebwagen</i>	84
3.5	<i>TCO-Analyse Brennstoffzellentriebwagen</i>	89
3.6	<i>Zusammenfassung</i>	92

<b>4</b>	<b>Infrastrukturkonzepte.....</b>	<b>94</b>
4.1	<i>Betrachtete Versorgungsoptionen .....</i>	94
4.2	<i>Ökologische Bewertung.....</i>	98
4.2.1	<i>Methodik.....</i>	98
4.2.2	<i>Datenbasis.....</i>	100
4.2.3	<i>Ergebnisse .....</i>	110
4.3	<i>Ökonomische Bewertung .....</i>	115
4.3.1	<i>Methodik.....</i>	115
4.3.2	<i>Datenbasis.....</i>	115
4.3.3	<i>Ergebnisse .....</i>	118
4.4	<i>Zusammenfassung .....</i>	120
<b>5</b>	<b>Technische Rahmenbedingungen Normen, Standards, Zertifizierung.....</b>	<b>121</b>
5.1	<i>Bestandanalyse Wasserstoff-Quelle und Zertifizierung .....</i>	123
5.1.1	<i>Begriffsdefinition und Anforderungen „grüner Wasserstoff“ .....</i>	123
5.1.2	<i>Aktueller Stand der Zertifizierung .....</i>	124
5.1.3	<i>Anforderung an H<sub>2</sub>-Qualität .....</i>	125
5.2	<i>Bestandsanalyse Transport, Tankstelle, Betankung.....</i>	127
5.3	<i>Zusammenfassung .....</i>	128
<b>6</b>	<b>Regulatorischer Rahmen, Roadmap, Handlungsempfehlungen.....</b>	<b>131</b>
6.1	<i>Grundlagen.....</i>	131
6.2	<i>Regulatorische Maßnahmen auf EU-Ebene mit Fokus auf den Verkehrsbereich .....</i>	133
6.2.1	<i>Kraftstoff/H<sub>2</sub> (Verfügbarkeit und Anrechnung).....</i>	133
6.3	<i>Fahrzeuge (CO<sub>2</sub> Standards).....</i>	135
6.4	<i>THG-Minderungsziele im Überblick.....</i>	135
6.5	<i>Infrastruktur (Aufbau Tankstellennetz und Versorgung) .....</i>	136
6.6	<i>Zusammenfassung .....</i>	137
<b>7</b>	<b>Nationale Ziele und Rechtsrahmen Deutschland.....</b>	<b>139</b>
7.1	<i>Klimaziele .....</i>	139
7.2	<i>Kraftstoffe .....</i>	140
7.3	<i>Fahrzeuge.....</i>	141
7.4	<i>Infrastruktur .....</i>	141
7.5	<i>Steuern und Abgaben.....</i>	142
7.6	<i>Zusammenfassung .....</i>	143
<b>8</b>	<b>Barrieren für einen Markthochlauf .....</b>	<b>144</b>
8.1	<i>Wirtschaftlichkeit .....</i>	144
8.2	<i>Infrastruktur .....</i>	146
8.3	<i>Regulatorischer Rahmen .....</i>	147

<b>9</b>	<b>Vorschläge zum Infrastrukturhochlauf (Entwicklung H<sub>2</sub> Tankstellennetz) .....</b>	<b>148</b>
<b>10</b>	<b>Handlungsempfehlungen .....</b>	<b>150</b>
<b>11</b>	<b>Schlussfolgerungen und Ausblick .....</b>	<b>153</b>
<b>12</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>154</b>
<b>13</b>	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>172</b>
<b>14</b>	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>177</b>
<b>15</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>179</b>
<b>Anhang.....</b>	<b>.....</b>	<b>183</b>
	<i>Anhang Kapitel 2 .....</i>	<i>183</i>
	<i>Anhang Kapitel 3 .....</i>	<i>188</i>
	<i>Anhang Kapitel 4 .....</i>	<i>194</i>
	<i>Anhang Kapitel 5 .....</i>	<i>200</i>