

Bundesanstalt für Straßenwesen

Emissionsfreie Antriebe im Straßenbetriebsdienst Grundlagenanalyse

Felix Gersdorf

Dr. Markus Auerbach

Horst Badelt

Schlussbericht

1 Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	4
1 Einleitung.....	5
1.1 Regulatorische Rahmenbedingungen.....	5
1.2 Inhalt und Ziel der Analyse.....	5
2 Physikalische Grundlagen.....	6
2.1 Energiedichte	6
2.2 Herstellung der alternativen Kraftstoffe.....	8
2.2.1 Strom.....	8
2.2.2 Wasserstoff	8
2.2.3 CNG	9
2.2.4 LNG.....	11
2.2.5 Autogas	11
2.2.6 Synthetische Kraftstoffe.....	11
3 Tank- und Ladeinfrastruktur für emissionsfreie Antriebe	13
3.1 Ladeinfrastruktur.....	13
3.1.1 Konduktive Ladeinfrastruktur.....	13
3.1.2 Kosten konduktive Ladeinfrastruktur	14
3.1.3 Dynamische Ladeszenarien	14
3.2 Wasserstoff	15
3.2.1 Technischer Aufbau Tankstelle.....	15
3.2.2 Tankstellendichte und Verfügbarkeit.....	16
3.2.3 Kosten	16
3.3 Erdgas	17
3.3.1 CNG	17
3.3.2 LNG.....	18
3.4 Synthetische Kraftstoffe	20
4 Well-to-Wheels Betrachtungen	20
4.1 Well to Tank und Tank to Wheels	20
4.2 Well-to-Tank.....	21
4.3 Tank-to-Wheels	22
5 Fahrzeuge mit alternativen Antrieben	24
5.1 Nutzfahrzeuge mit Batterieantrieb	24
5.2 Nutzfahrzeuge mit H ₂ -Brennstoffzellenantrieb.....	26
5.3 Nutzfahrzeuge mit LNG und CNG Antrieb	26

6	Zusammenfassung/Fazit.....	26
7	Literaturverzeichnis.....	29

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BOG	Boil-Off-Gas
CCS	Carbon-Capture-Storage
CNG	Compressed Natural Gas
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
CO ₂ -Äq.	Kohlendioxid-Äquivalente
E	Energiedichte
EU	Europäische Union
H ₂	Wasserstoff
HEa	High-Energy-Cell
HDRSA-Model	Heavy-Duty Refueling Station Analysis Model
HPa	High-Power-Cell
KFZ	Kraftfahrzeug
kg/h	Kilogramm pro Stunde
kWh	Kilowattstunden
Lkw	Lastkraftwagen
LNG	Flüssiggas
MGT	Mehrzweckgeräteträger
Mio.	Millionen
Nm ³ /h	Normkubikmeter pro Stunde
PKW	Personenkraftwagen
PR	Performance Ratio
PtL	Power-to-Liquid
STVZO	Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung
to	Tonnen
TTW	Tank-to-Wheel
u.a.	unter anderem
WTT	Well-to-Tank
WTW	Well-to-Wheels

1 Einleitung

Der Straßenbetriebsdienst leistet einen wichtigen Beitrag zur Verkehrssicherheit auf den deutschen Straßen. Aktuell gibt es ca. 178 Autobahnmeistereien und 544 Straßenmeistereien. [1]

1.1 Regulatorische Rahmenbedingungen

Die Bundesregierung hat sich dazu verpflichtet, die CO₂-Emissionen bis 2020 gegenüber dem Bezugsjahr 1990 um 40 % zu verringern. Aktuell liegt dieser Wert bei 37,5 %. Verursacht wird diese Differenz durch höhere Emissionen im Verkehr und im Gebäudebereich. Im Jahr 2030 soll der Ausstoß von Treibhausgasen um 55 % verringert werden. [2].

Am 9. Oktober 2019 wurde das Klimaschutzprogramm 2030 von der Bundesregierung beschlossen. Dieses beinhaltet die Maßnahmen zur Erreichung der 2030er-Ziele, in denen u.a. Maßnahmen in den Sektoren Energiewirtschaft, Gebäude, Verkehr, Industrie, Landwirtschaft benannt werden. [3]. Für den Bereich des Verkehrs und hier im speziellen für den Bereich der CO₂-armen Lkw ist das Ziel, dass „bis 2030 etwa ein Drittel der Fahrleistung im schweren Straßengüterverkehr elektrisch oder auf Basis strombasierter Kraftstoffe sein wird.“ [3]

Auf europäischer Ebene sind in den Verordnungen [4] und [5] die CO₂-Emissionenreduktionszahlen für verschiedene Fahrzeugtypen im PKW-, leichter Nutzfahrzeug-, sowie für den schweren Nutzfahrzeugbereich festgelegt. Diese sind auch für öffentliche Verwaltungen bindend, sobald die Verordnungen in deutsches Recht übergegangen sind.

1.2 Inhalt und Ziel der Analyse

Alternative Antriebe werden in Zukunft auch in den Fuhrparks der Straßen- und Autobahnmeistereien integriert werden müssen. Da auch im Straßenbetriebsdienst verschiedene alternative Antriebsarten denkbar für eine Anwendung sind, sollen in dieser Grundlagenbetrachtung verschiedene Aspekte beleuchtet werden.

Hierzu zählen die physikalischen Grundlagen wie die Energiedichte der alternativen Kraftstoffe. Ziel ist es, einen Überblick über die Unterschiede der Energieträger aufzuzeigen. Zur Herstellung der alternativen Kraftstoffe wird Energie benötigt. Dabei wird zum einen auf die möglichen Arten der Kraftstoffgewinnung eingegangen. Ziel ist es, einen Überblick über den physikalischen Aufwand zur Gewinnung der Energieträger zu geben.

Die Tank- und Ladeinfrastruktur ist ein zentraler Aspekt, den es zu berücksichtigen gilt. Hierbei werden in einer Recherche die anfallenden Kosten aufgezeigt. Darüber hinaus werden die Ausführungen der Tank- und Ladeinfrastruktur beschrieben und auf Besonderheiten eingegangen.

Die Betrachtung von Well-to-Tank und Tank-to-Wheel-Betrachtungen für die verschiedenen alternativen Antriebsarten zeigt die Auswirkungen bezüglich möglicher Emissionen auf.

Mit einer Auflistung über am Markt vorhandene Fahrzeugtypen mit alternativen Antrieben wird ein entsprechender Überblick über die aktuelle Situation gegeben. Hierbei ist das Ziel die bisherige Einsatzbreite der alternativen Antriebstechnik aufzuzeigen um so die Möglichkeiten für den Straßenbetriebsdienst besser abschätzen zu können.

2 Physikalische Grundlagen

Um Kraftfahrzeuge anzutreiben, können und werden schon heute verschiedene Kraftstoffe verwendet. Aktuell ist im Nutzfahrzeugsektor der Kraftstoff Diesel dominierend. Da bei der Verbrennung von Diesel unter anderem Kohlenstoffdioxid (CO₂) entsteht, ist hinsichtlich der Vermeidung von Emissionen und damit eingehend der Einhaltung der Klimaschutzziele eine Abkehr u.a. vom herkömmlichen Kraftstoff „Diesel“ notwendig. Alternativen Kraftstoffe sind neben Wasserstoff und Liquefied Natural Gas (LNG) auch Compressed Natural Gas (CNG). Der Antrieb der Fahrzeuge mittels Batterie ist ebenfalls eine Alternative. Um die vielversprechendsten alternativen Antriebe für den Einsatz im Betriebsdienst abschätzen zu können, gilt es, die physikalisch-chemischen Eigenschaften der Energieträger gegenüber zu stellen.

2.1 Energiedichte

Die Energiedichte E beschreibt in der Physik die Verteilung von Energie auf eine bestimmte Größe. Dabei werden zwei Energiedichten am häufigsten gewählt. Neben der Energiedichte pro Volumen eines Stoffs ist die Energiedichte pro Masse eines Stoffs eine gängige Wahl. [6] und [7] listen die physikalisch-chemischen Eigenschaften von den Kraftstoffen Diesel, Methan und Wasserstoff und Autogas, kurz LPG („Liquefied Petroleum Gas“), auf:

Tabelle 1: Physikalisch-chemische Eigenschaften von Kraftstoffen

Kraftstoff	Dichte bei 15° C [kg/dm ³]	Siedepunkt, - bereich [°C bei 1 bar]	H _u [MJ/kg , 1 bar]	Quelle
Diesel	0,84 – 0,88	170 - 360	42,7	[6]
Methan CH ₄ , gasförmig	0,72 x 10 ⁻³	-162	49,8	[6]
Wasserstoff H ₂ , gasförmig	0,09 x 10 ⁻³	-253	119,6	[6]
LPG	0,51 – 0,56	-	46,1	[7]

Die Dichten der gasförmigen Energieträger Methan und Wasserstoff liegen unterhalb der Dichte von Diesel. Dabei ist die Dichte von Wasserstoff mit $0,09 \times 10^{-3} \text{ kg/dm}^{-3}$ am geringsten unter den Stoffen, die hier miteinander verglichen werden. Der untere Heizwert von Wasserstoff ist bei Umgebungsdruck im Vergleich zu Methan und Dieselmethan mit $119,6 \text{ MJ/kg}$ am größten. Der untere Heizwert für Diesel liegt mit $42,7 \text{ MJ/kg}$ unterhalb des Heizwerts von Methan, das einen Heizwert von $49,8 \text{ MJ/kg}$ besitzt. LPG besitzt einen Heizwert von $46,1 \text{ MJ/kg}$. Der Dieselmethan hat somit den geringsten Heizwert der hier aufgezeigten Energieträger.

Da Methan bei Umgebungsdruck nicht als Kraftstoff für Fahrzeuge praktikabel ist, wird es unter einem Druck von ca. 200 bar verdichtet. Das verdichtete Gas wird als Compressed Natural Gas (CNG) bezeichnet. Nach [8] gibt es an deutschen Tankstellen zwei Arten von CNG, H-Gas und L-Gas. Das H-Gas enthält mehr Methan als das L-Gas. Dementsprechend ist der Heizwert des H-Gases höher als der des L-Gases. Eine weitere Möglichkeit ist, das vorhandene Erdgas zu verflüssigen. Dies geschieht bei einer Temperatur von -162°C bei Umgebungsdruck. Nach [9] liegt die gravimetrische Energiedichte von LNG bei 50 MJ/kg . Die Dichte von Flüssigerdgas ist ca. 600 Mal höher als die Dichte von Erdgas bei Umgebungsdruck, das bedeutet, aus 600 nm^3 (Normkubikmeter) CNG wird 1 m^3 LNG.

Um Energiedichten der Kraftstoffe mit der Energiedichte von Lithium-Ionen-Batterien zu vergleichen, ist der Umrechnungsfaktor $277,778$ zu verwenden, da $1 \text{ MJ/kg} = 277,778 \text{ Wh/kg}$.

In Tabelle 2 sind die Energiedichten der verschiedenen Energieträger gegenübergestellt.

Tabelle 2: Energiedichten im Vergleich

Energieart	E [Wh/kg]	Quelle
Diesel	11.861	nach [6]
Methan	13.833	
CNG (H-Gas)	13.000	nach [8]
CNG (L-Gas)	11.300	
LNG	13.889	nach [9]
Wasserstoff	33.222	nach [6]
Lithium-Ionen-Batterie	130	nach [10]

Diesel besitzt eine Energiedichte von 11,9 kWh/kg und hat damit eine höhere Energiedichte als das L-Gas mit 11,3 kWh/kg. Wasserstoff hat mit 33,2 kWh/kg die höchste Energiedichte der hier miteinander verglichenen Kraftstoffe, gefolgt von LNG (13,9 kWh/kg) und H-Gas (13 kWh/kg). Die mit Abstand geringste Energiedichte weist die Lithium-Ionen-Batterie mit 130 Wh/kg auf.

In Abbildung 1 sind die Energiedichten der verschiedenen Kraftstoffe vergleichend visualisiert. Dabei sind sowohl die volumetrische Energiedichte in MJ/l auf der Ordinate als auch die gravimetrische Energiedichte in MJ/kg auf der Abszisse angegeben.

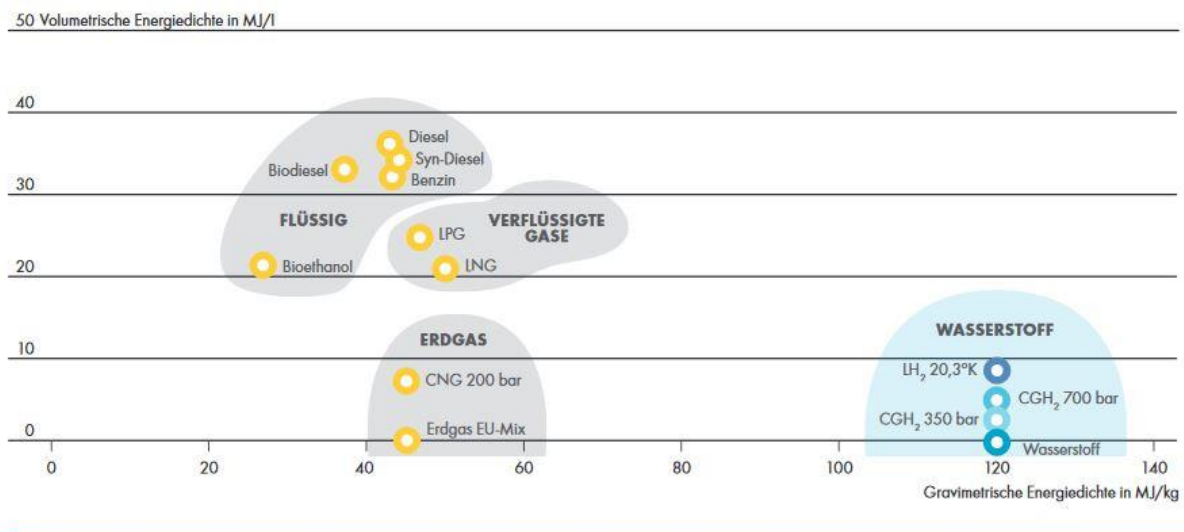


Abbildung 1: Energiedichten [11]

Abbildung 1 verdeutlicht, dass der Wasserstoff die mit Abstand höchste gravimetrische Energiedichte besitzt. Die volumetrische Energiedichte von Wasserstoff ist druckabhängig. Je höher der Druck, desto höher die volumetrische Energiedichte.

Die flüssigen Kraftstoffe wie Diesel und Benzin besitzen dagegen die höchsten volumetrischen Energiedichten, gravimetrisch gesehen sind diese jedoch deutlich geringer einzustufen als Wasserstoff. CNG-Erdgas besitzt eine geringere gravimetrische Energiedichte als Wasserstoff und eine deutlich geringere volumetrische Energiedichte als der Dieselmotorkraftstoff. LNG und LP haben dagegen, wie CNG auch, eine ähnliche gravimetrische Energiedichte wie Diesel, die volumetrische

Energiedichte von LPG und LNG liegt dagegen auch deutlich unterhalb der volumetrischen Dichte von Diesel und Benzin.

2.2 Herstellung der alternativen Kraftstoffe

Die Herstellung alternativer Kraftstoffe bzw. von Strom für die alternativen Antriebe ist hinsichtlich ihres Energieaufwands zu bewerten.

2.2.1 Strom

Elektrische Energie kann sowohl aus fossilen Energieträgern wie Kohle und Gas, als auch über erneuerbare Energieträger, wie Sonne, Wind und Wasserkraft gewonnen werden. Die Stromgewinnung durch fossile Brennstoffe wird nicht diskutiert, da diese konträr zu den Klimaschutzzielen der Bundesregierung steht. Es werden die Wirkungsgrade von den Anlagen aufgezeigt, die den Strom aus regenerativen Energien gewinnen. Bei der Windenergie ist die maximale Ausbeute durch das Betz'sche Gesetz beschränkt. Das Gesetz besagt, dass der maximale Wirkungsgrad einer Windkraftanlage bei 16/27 liegt. Das entspricht knapp 60 Prozent. Nach [12] liegt der Wirkungsgrad von Windkraftanlagen bei etwas über 30 Prozent.

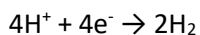
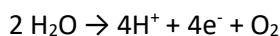
Bei Photovoltaik-Anlagen ist nach [13] ein Wirkungsgrad von 17,5 – 22 Prozent zu erwarten. Bei diesem Anlagentyp wird im Allgemeinen auch die Performance-Ratio (PR-Wert) verwendet. Der PR-Wert, der bei heutigen Anlagen bei 0,8 – 0,9 liegt, beinhaltet die zusätzlichen Verluste, die beim Betrieb der Photovoltaikanlage auftreten.

Im Bereich der Wasserkraft ist der Wirkungsgrad abhängig von den verbauten Turbinentypen. Es ist nach [14] mit Wirkungsgraden von bis zu über 90 Prozent zu rechnen. Der Wirkungsgrad hier ebenfalls abhängig von der Beaufschlagung der Turbine. Bei einer Beaufschlagung von 20 % werden Wirkungsgrade von 80 – 85 Prozent erreicht.

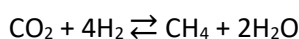
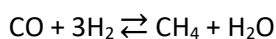
Anlagentyp	Windkraft	Photovoltaik	Wasserkraft
Nettowirkungsgrad	ca. 30 %	17,5 – 22 %	80 – 85 %

2.2.2 Wasserstoff

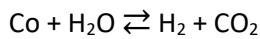
Die Herstellung von Wasserstoff erfolgt über die PEM-Elektrolyse (Proton exchange membrane), bei der, vereinfacht beschrieben, mit Hilfe von Strom Wasser in die Bestandteile Wasserstoff (H₂) und Sauerstoff (O₂) gespalten wird. [15] stellen die ablaufenden chemischen Reaktionen dar:



Des Weiteren zeigt [15] auf, dass mit Hilfe von regenerativ erzeugtem Wasserstoff und Kohlenstoff bzw. Kohlenstoffdioxid Methan produziert werden kann, das anschließend u.a. in einer Brennstoffzelle zum Einsatz kommen kann. Dieses Verfahren wird katalytische Methanisierung genannt und läuft chemisch durch folgende Hauptreaktionen ab:



Diese Reaktionen ist durch die Shift-Reaktion miteinander verknüpft:



Der Rückreaktion der Shift-Reaktion folgt die erste Hauptreaktion und damit die Produktion von Methan. Ein vereinfachtes Schaubild der PEM-Elektrolyse als auch der katalytischen Methanisierung zeigt [16].

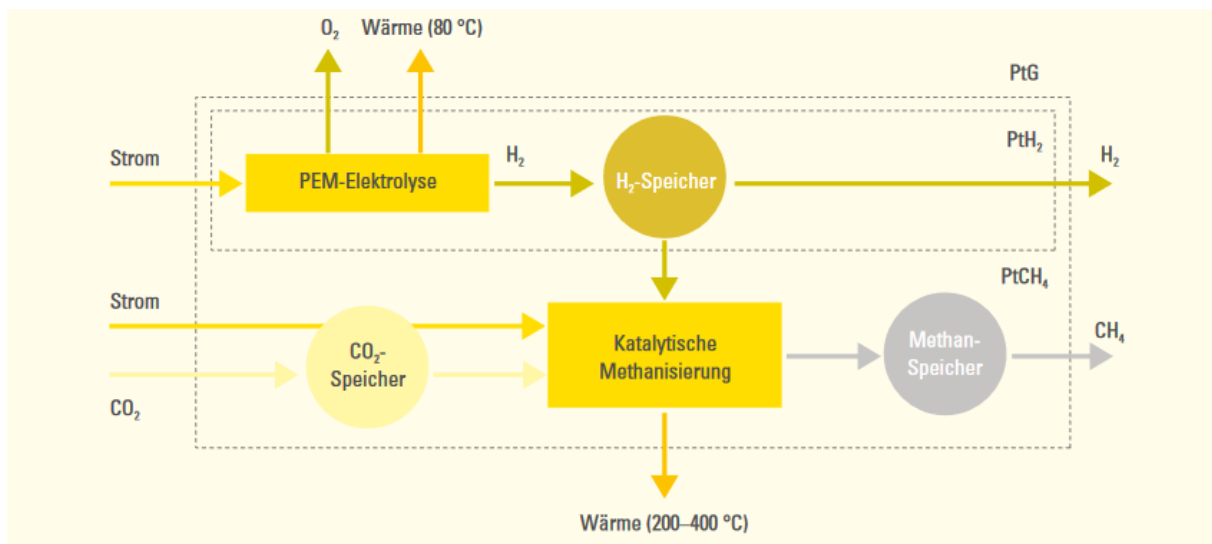


Abbildung 2: Vereinfachtes Anlagenschema einer PtH₂-Anlage mit PEM-Elektrolyse und einer PtCH₄-Anlage mit katalytischer Methanisierung [16]

Um Wasserstoff zu produzieren wird elektrische Energie benötigt. Bei den Prozessschritten selbst wird Energie unter anderem in Form von Wärme abgeführt. Nach [17] sind aktuell Wirkungsgrade bei PEM-Elektrolyseanlagen zwischen 56 und 74 Prozent bezogen auf den unteren Heizwert von Wasserstoff erreichbar. Aufgrund anlagenspezifischer Gegebenheiten verringert sich der Wirkungsgrad auf 53 bis 66 %.

2.2.3 CNG

Erdgas kann nach [18] in die Klassen Trockengas, Nassgas, Sauer- und Süßgas unterteilt werden. Bei Trockengas besteht das Erdgas fast ausschließlich aus Methan mit geringen Anteilen von schweren Kohlenwasserstoffen. Während bei Nassgas der Anteil an schweren Kohlenwasserstoffen bei über 15 Prozent liegt, ist bei Sauer- und Süßgas ein hoher Anteil von Schwefelwasserstoff vorhanden. Bei Süßgas ist dieser Anteil an Schwefelwasserstoff gering. Mit Hilfe einer Bohranlage wird das Erdgas aus seiner natürlichen Lagerstätte gefördert. Durch ein Steigrohr erreicht das Gas die Oberfläche. Der Lagerdruck in der Lagerstätte sorgt dafür, dass das Gas an die Oberfläche steigt. Ist der Druck zu gering, wird nach [19] durch die Installation von Verdichtern der Druck erhöht, um wieder einen Gasfluss zu gewährleisten. Das geförderte Erdgas kann über Pipelines zu seinem Einsatzort transportiert werden. Um das Gas in der Fahrzeugtechnik zu nutzen, wird das Erdgas auf 200 bar komprimiert.

[20] zeigen für CNG den Anteil an Energie auf, der zur Herstellung, Konditionierung, Transport etc. ein MJ dieses Kraftstoffs benötigt wird. Dabei unterscheiden die Autoren zwischen den unterschiedlichen Quellen des CNG. Die betrachteten Varianten sind in Tabelle 3 dargestellt:

Tabelle 3: CNG-Produktionsstätten [20]

JEC Code	
GMCG1	Erdgas (EU-Mix)
GPCG1a	Erdgas, Transport über 7.000 km (z.B. Russland)
GPCG1b	Erdgas, Transport über 4.000 km (z.B. Naher Osten)
SGCG1	Erdgas, Schiefergas aus der EU
GRCG1	Erdgas, aus LNG, Verdampfung am Import-Terminal
GRCG1C	Erdgas, aus LNG, CCS bei der Verflüssigung, Verdampfung am Import-Terminal
GRCG2	Erdgas, Verdampfung am Verteilpunkt
GRLG1	Erdgas, als LNG in Fahrzeugen

In Abbildung 3 ist die aufgewendete Energie der in Tabelle 3 genannten Pfade zur Bereitstellung von CNG dargestellt.

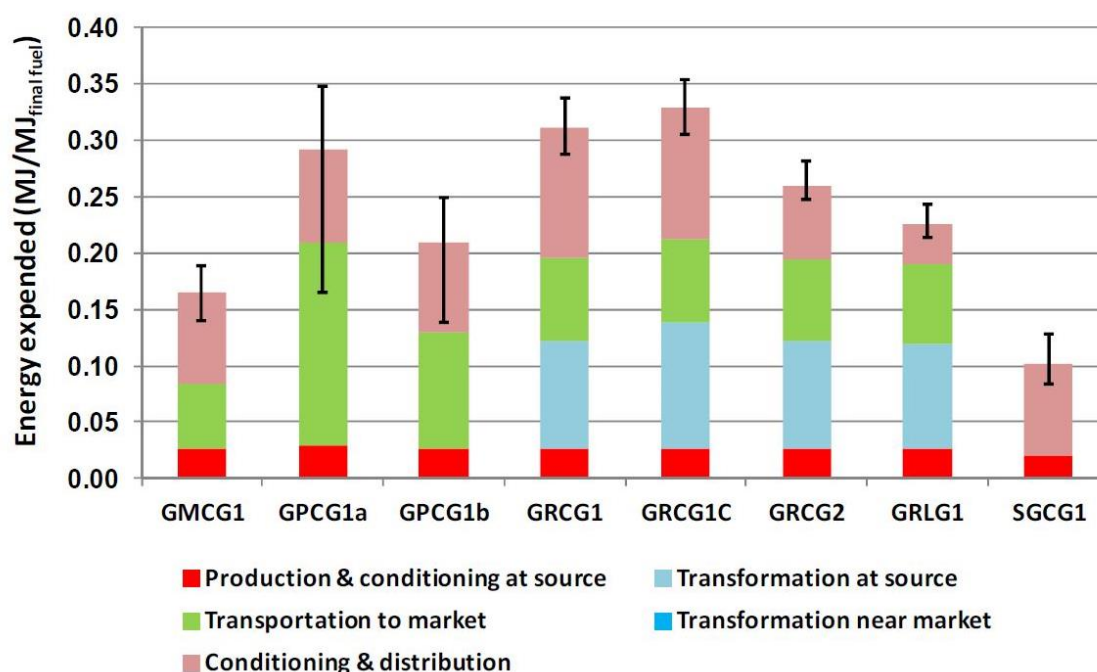


Abbildung 3: Aufgewendete Energie für unterschiedliche Pfade zur Bereitstellung von einem MJ CNG (Well-to-Tank) [20]

Abbildung 3 zeigt, dass je nach Herkunft und Transportart die Energieaufwendung zur Bereitstellung des CNG sich deutlich unterscheidet. Bei der Energieaufwendung um ein MJ CNG bereitzustellen sind deutlich Unterschiede im Bereich des Transports (grün) und bei der Aufbereitung und der Verteilung (in lila) festzustellen. Um 1 MJ CNG aus dem EU-Mix bereitzustellen, werden ca. 0,16 MJ Energie aufgewendet. Kommt das Gas aus 7.000 km Entfernung liegen die Aufwendung knapp unterhalb von 0,3 MJ für ein MJ CNG. Der höchste Energieaufwand fällt an, wenn das Erdgas zum Transport nach Europa verflüssigt und anschließend wieder in seinen ursprünglichen, gasförmigen Zustand transformiert wird. Am wenigsten Energie in Bezug auf ein MJ CNG wird aufgewendet, wenn das Erdgas in Europa aus Schiefergas gewonnen wird.

2.2.4 LNG

Eine zweite Möglichkeit ist die Verflüssigung des Erdgases. Das Endprodukt wird Liquefied Natural Gas (LNG) genannt. Die technischen Schritte zur Verflüssigung des Erdgases werden im Folgenden erläutert und sind in Abbildung 4 dargestellt.

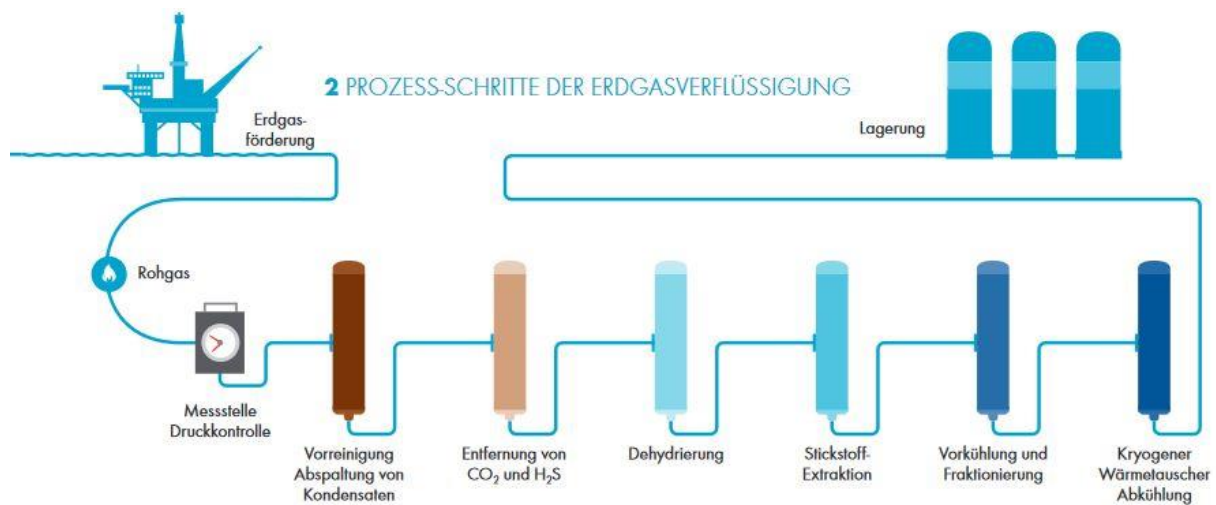


Abbildung 4: Prozessschritte der Erdgasverflüssigung [21]

In einem ersten Schritt wird das Rohgas gereinigt, indem Partikeln und Gaskondensaten entfernt werden. Anschließend erfolgt die Entfernung von CO₂ und Schwefelwasserstoff bevor die Dehydrierung des Gases. Nachdem das Gas die Prozessschritte, die in Abbildung 4 dargestellt sind, durchlaufen hat, liegt ein Gas vor, das zu großen Teilen aus Methan besteht. Dieses Gas wird durch mehrere weitere Prozessschritte heruntergekühlt, sodass am Ende flüssiges Erdgas zur Verfügung steht. Der Prozess zur Verflüssigung benötigt Energie. Der Energiebedarf zur LNG-Verflüssigung beträgt 8 Prozent des produzierten Flüssiggases. [21]

2.2.5 Autogas

Autogas ist ein Gasgemisch, das bei der Produktion von Erdöl beziehungsweise Erdgas als Nebenprodukt anfällt. Chemisch gesehen besteht das Gas aus Propan und Butan, das durch Druck verflüssigt wird, um dieses dann in Fahrzeugen zu nutzen. Im Vergleich zu einem Benzinantrieb werden bis zu 10 Prozent weniger CO₂ emittiert, verglichen mit einem Dieselantrieb jedoch 2 % mehr und gegenüber einem CNG Antrieb liegt der Mehrausstoß bei 12 % bezogen auf CO₂. [22]

2.2.6 Synthetische Kraftstoffe

Als synthetische Kraftstoffe, auch e-fuels genannt, werden die herkömmlichen Kraftstoffe Benzin, Diesel aber auch Kerosin genannt, die durch Umwandlung von Strom erzeugt werden. Das Verfahren wird auch als Power-to-Liquids (PtL) bezeichnet. Der Herstellungspfad für die PtL ist in Abbildung 5 dargestellt.

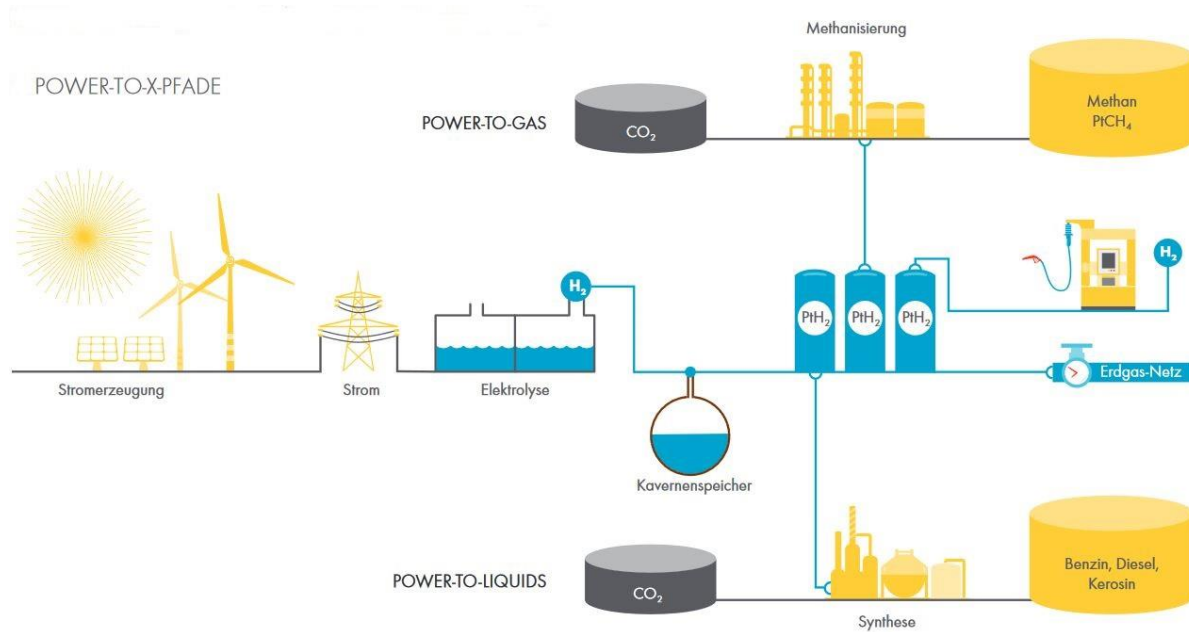


Abbildung 5: Power to Liquids Pfad [11]

Um e-fuels herzustellen wird CO_2 benötigt, das in einer Reaktion mit H_2 zum Endprodukt reagiert. Der Vorteil der e-fuels ist, dass diese, wenn der Wasserstoff aus regenerativen Quellen stammt, ein treibhausgasneutraler Antriebsstrang zur Verfügung steht.

[23] verdeutlicht für e-fuels, dass die Wirkungsgradbetrachtung „von der Stromentnahme aus dem Netz bis zur Umsetzung in Fahrleistung bei [...] unter 11 % liegt.“ (S.6) Damit liegt der Wirkungsgrad deutlich unter dem eines batterieelektrischen Pkw und eines Brennstoffzellen-Pkw, der mit Wasserstoff als Kraftstoff arbeitet.

Die Herstellung von synthetischen Kraftstoffen, kann über verschiedene Verfahrenswege erfolgen. [24] weisen folgende Möglichkeiten auf:

- 1) Wasserstoffherstellung durch Elektrolyse
- 2) Flüssige Kohlenwasserstoffe und Methanol durch die Fischer-Tropsch-Synthese
- 3) Gasförmige Kohlenwasserstoffe durch Vergärung von Biomasse oder die Direktmethanisierung von CO_2 und Wasserstoff

Aus der Direktmethanisierung von CO_2 und Wasserstoff lassen sich nach [25] synthetischer Diesel oder auch synthetisches Benzin herstellen. Idealerweise könnten die e-fuels über das bestehende Tankstellensystem vertrieben werden und es würden demnach keine Kosten für den Aufbau einer Tankinfrastruktur anfallen.

3 Tank- und Ladeinfrastruktur für emissionsfreie Antriebe

Die Tankinfrastruktur für Dieselfahrzeuge wird als bekannt vorausgesetzt und wird daher hier nicht näher betrachtet.

Fahrzeuge mit emissionsfreien Antriebstechnologien sind bisher ebenso wie die dazugehörige Lade- bzw. Tankinfrastruktur nicht in der Dichte vorhanden, wie Fahrzeuge mit Diesel bzw. Benzinmotor und der dazugehörigen Tankinfrastruktur. Im Folgenden wird ein Überblick über Verfügbarkeit, Kosten und ein Überblick über die Technik der emissionsfreien Tank- und Ladeinfrastruktur gegeben.

3.1 Ladeinfrastruktur

Die Möglichkeit Fahrzeuge zu laden beschränkt sich nicht nur auf das konduktive Laden per Kabel. Auch gibt es die Möglichkeit, die Fahrzeuge per Spulentechnologie induktiv zu laden. Es bestehen darüber hinaus Konzepte, Fahrzeuge während der Fahrt zu laden. Hier ist das dynamisch-induktive Laden bzw. das dynamisch-konduktive Laden gemeint.

3.1.1 Konduktive Ladeinfrastruktur

Werden batterieelektrische Fahrzeug in den Fuhrpark eingegliedert, so sind entsprechende Vorrichtungen zum Laden der Fahrzeuge zu installieren. Hierbei gibt es verschiedene Steckertypen, die bei Betriebsdienstfahrzeugen theoretisch zum Einsatz kommen können:

- a. Typ 1-Stecker mit einer Ladeleistung von bis zu 7,4 kW (230 V, 32 A)
- b. Typ 2-Stecker mit einer Ladeleistung von bis zu 43 kW (400 V, 63 A)
- c. CCS (Combined Charging System) mit bis zu 170 kW
- d. CHAdeMO bis zu 100 kW.

Generell gibt es zwei Arten ein Fahrzeug zu Laden. Die erste Möglichkeit ist das Laden mit Wechselstrom (AC-Laden - Alternating Current). Die zweite Möglichkeit ein Fahrzeug mit elektrischem Strom zu versorgen, ist das Gleichstromladen. Dieses wird auch als DC-Laden (Direct Current) bezeichnet. Um ein Fahrzeug mit Gleichstrom laden zu können, ist eine Transformatorstation notwendig, die den Wechsel- in Gleichstrom umwandelt. Der Strom wird direkt an den Akkumulator weitergegeben. Dies kann zu Überhitzung des Akkus führen und daher ist das Gleichstromladen aus technischer Sicht besonderen Anforderungen unterlegen, damit es zu keinen Schäden des Akkumulators kommt. Weiterhin wird eine Leistung von ca. 125 Ampere benötigt um Gleichstromladen anbieten zu können. Ladeleistungen mit bis zu 150 kW und darüber hinaus können damit realisiert werden. Beim Wechselstromladen stehen 3 Phasen zur Verfügung. Es kann mit einer Leistung von bis zu 22 kW geladen werden.

Mit welcher Leistung ein Fahrzeug geladen werden kann, hängt von verschiedenen Faktoren ab. Zu nennen sind hier die technischen Eigenschaften der Fahrzeugbatterie. In Hinblick auf die Schwerlastfahrzeuge im Betriebsdienst sollte die Möglichkeit des DC-Ladens untersucht werden, um lange Ladezeiten und damit potentielle Standzeiten der Fahrzeuge zu verhindern.

Ein Lastmanagement wird eingesetzt um vorhandene Ladestationen untereinander abzustimmen. So kann verhindert werden, dass die maximale verfügbare Leistung am Netzanschlusspunkt überschritten wird. Hierbei unterscheidet [26] zwischen zwei Arten des Lastmanagements:

- Statisches Lastmanagement
Beim statischen Lastmanagement wird eine maximal festgelegte Leistung auf alle vorhanden Ladepunkte fest aufgeteilt. Bei einer fiktiven Anschlussleistung von z.B. 50 kW und 10

Ladesäulen, wovon fünf durch Fahrzeuge belegt sind bekommt jedes Fahrzeug eine Ladeleistung von 10 kW zugeteilt. Sind alle 10 Ladepunkte mit Fahrzeugen belegt, liegt die verfügbare Ladeleistung pro Ladepunkt bei 5 kW.

- **Dynamisches Lastmanagement**

Bei dieser Art Lastmanagement wird die Ladeleistung am Netzanschluss durchgehend erfasst und die Ladeleistung für das Lastmanagement dementsprechend angepasst, dass die maximale Anschlussleistung nicht überschritten wird. Die Messung der aktuellen Leistung wird durch einen Stromzähler realisiert, der den Wert entsprechend weiterleitet.

3.1.2 Kosten konduktive Ladeinfrastruktur

Bei der Installation von Ladeinfrastruktur können die anfallenden Kosten nicht pauschal benannt werden, da die Gegebenheit vor Ort jedes Mal neu bewertet werden muss. Daher wird hier eine (nicht abschließende) Übersicht gegeben, welche Kosten anfallen können:

- Hardware, wie z.B. Wall-Box oder Ladesäulen
- Installationskosten (Tiefbau, Anschlusskosten, etc.)
- Transformator
- Lastmanagement
- Wartungsverträge

Neben der eigentlichen Ladeinfrastruktur ist zu berücksichtigen, mit welcher Leistung geladen werden soll. Hier macht es einen Unterschied, ob das DC- und/oder AC-Laden zur Anwendung kommen soll. Des Weiteren fallen Tiefbauarbeiten an, um die Kabel fachgerecht verlegen und anschließen zu können. Es empfiehlt sich bei Aufbau einer Ladeinfrastruktur und keinem Fachpersonal vor Ort einen Wartungsservice zu vereinbaren, der sofort reagiert, wenn die Ladeinfrastruktur ausfallen sollte. Darüber hinaus fallen Kosten für ein Lastmanagement an, welches installiert werden sollte.

In Tabelle 4 werden die Kosten wie folgt angegeben:

Tabelle 4: Kosten für Ladeinfrastruktur [27]

	Wallbox	Ladesäule	Schnellladestation
Bau/Installation/Anschluss	200 – 2.000 €	1.500 – 3.000 €	16.000 – 40.000 €
Hardware	300 – 1.500 €	3.000 – 8.000 €	20.000 – 75.000 €
Betriebskosten pro Jahr	0 – 350 €	0 – 600 €	900 – 2.000 €

In Hinblick auf die nicht komplett kalkulierbaren Einsatzzeiten der Fahrzeuge ist zumindest für eine Pilotanwendung eine Schnellladestation zu planen. Nach Tabelle 4 fallen damit Kosten in Höhe von bis zu 40.000 € für den Bau der Station, bis zu 75.000 € für die Hardware und bis zu 2.000 € pro Jahr für die Betriebskosten an. In Summe ergeben sich Kosten für eine Schnellladestation in Höhe von bis zu 115.000 € für die Installation und jährlich bis zu 2.000 € für die Betriebskosten.

3.1.3 Dynamische Ladeszenarien

Beim dynamisch-konduktiven Laden sind mehrere Möglichkeiten denkbar. Europaweit gibt es mehrere Teststrecken, bei denen unterschiedliche Systeme in Erprobung sind. Einerseits wird das Laden der Fahrzeuge per Oberleitung erprobt. Andererseits sind mit Elonroad AB [28] und Elways

[29] zwei schwedische Hersteller, die über Stromschienen im Boden die Fahrzeuge mit elektrischer Energie versorgen möchten.

Das Laden von LKW per Oberleitung wird aktuell an verschiedenen Teststrecken im deutschen Autobahnnetz getestet. [30] [31] Damit ergäbe sich zumindest für die LKW in den Meistereifloten die theoretische Möglichkeit, auf diesen Streckenabschnitten zwischenzuladen. Allerdings ist diese Art der Lademöglichkeit nicht für PKW noch für kleine Nutzfahrzeuge geeignet. Die schwedischen Systeme sind theoretisch für jeden Fahrzeugtyp der Meisterei geeignet.

Das dynamisch induktive Laden wird aktuell in dem Projekt „InductInfra“ untersucht. Hier werden 1,9 Millionen Euro seitens des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur bereitgestellt, damit die Technik durch ein Konsortium erforscht und erprobt werden kann. Ein zweites Projekt, eCharge, das sich auf ähnliche Weise mit dem Thema beschäftigt, ist im Jahr 2021 gestartet und erprobt ebenfalls die Technologie. Sollte sich diese Technik als geeignet erweisen, um Fahrzeuge während der Fahrt laden zu können, ergibt sich auch für den Straßenbetriebsdienst theoretisch der Anwendungsfall als Nutzer.

Dynamische Ladeszenarien sind auch für die Meistereien und ihre Fahrzeuge interessant. Die Fahrzeuge der Meistereien können dann während ihres Einsatzes auf der Bundesautobahn geladen werden. Dies hat zur Folge, dass die Fahrzeuge selbst kleinere Batteriegrößen benötigen und somit in der Anschaffung günstiger werden. Zweitens ist es denkbar, dass durch die Zwischenladungen lange Ladezeiten auf dem Meistereihof selbst entfallen. Dadurch kann drittens möglicherweise die maximal benötigte Anschlussleistung auf dem Meistergehöft reduziert werden, was wiederum Kosten senken würde.

3.2 Wasserstoff

3.2.1 Technischer Aufbau Tankstelle

Nach [32] und [11] besteht eine Wasserstofftankstelle aus verschiedenen Modulen. In einem Niederdruckspeicher wird der Wasserstoff bei 20 bis 200 bar zwischengelagert. Über Kompressoren wird der Wasserstoff weiter verdichtet und so auf den Tankdruck eingestellt. Der auf bis zu 1.000 bar verdichtete Wasserstoff wird in entsprechenden Hochdruckbehältern gespeichert. Des Weiteren ist eine Vorkühlung vorhanden, die den Wasserstoff vor dem Tankvorgang auf ca. -40°C vorkühlt. Eine Vorkühlung ist zwingend erforderlich, da der Wasserstoff bei der Betankung komprimiert wird und sich hierdurch erwärmt. Nach dem internationalen Standard SAE J2601 ist jedoch eine Erwärmung über 85°C zu vermeiden. Über einen Dispenser erfolgt analog zur heutigen Zapfpistole der eigentliche Tankvorgang.

Bei einer Flüssiggastankstelle wird der Wasserstoff an der Tankstelle in entsprechenden Behältern entsprechend flüssig gespeichert. Wird das Fahrzeug betankt, so wird der flüssige Wasserstoff mit Hilfe einer Pumpe in einen Verdampfer eingebracht. Anschließend erfolgt ohne Vorkühlung die Befüllung des Fahrzeugs. [11]

Die Vorteile der Speicherung von gasförmigem H_2 erfolgt unter hohem Druck. Der dadurch entstehende Energieaufwand „kann durch den hohen Wirkungsgrad der Brennstoffzellen ausgeglichen werden“ (S. 17) Der Vorteil bei Flüssigwasserstoff liegt in der hohen Energiedichte. Aufgrund dessen sind die Kapazitäten beim Transport und bei der Lagerung größer. Die Lagerungskapazität ist diametral zum Flächenbedarf der Tankstelle. Nachteilig ist anzusehen, dass ein Boil-Off-Effekt auftritt.

3.2.2 Tankstellendichte und Verfügbarkeit

Auf der Homepage der H2 Mobility Deutschland GmbH & Co. KG ist die aktuelle Anzahl der Wasserstofftankstellen in Deutschland mit Standort aufgezeigt. Ebenfalls werden die Tankstellen angezeigt, die bereits eröffnet sind, aufgrund einer Störung bzw. Wartung aktuell nicht in Betrieb sind. Stand 19.11.2020 sind es sieben Tankstellen. Beispielhaft sei hier die Station „Pentling“ genannt, wo die Störung spätestens zum 30.11.2020 wieder behoben sein soll. In Hinblick auf den Straßenbetriebsdienst ist eine Reparaturzeit von über 10 Tagen kritisch zu betrachten. Nach [33] sind organisatorische Gründe dafür verantwortlich, dass die Dauer der Ausfallzeit der Anlagen demensprechend lang ausfällt. Zu den Gründen zählen eine dünne Servicestruktur aufgrund der geringen Anzahl an Tankstellen und dass die Patentrechte die freie Vergabe von Serviceleistungen erschweren.

3.2.3 Kosten

Die Kosten für die Errichtung einer Tankstelle wurden von [32] und [34] mit einer Million Euro beziffert.

[35] haben auf Basis des Heavy-Duty Refueling Station Analysis Model (HDRSA-Modell) des U.S. Departement of Energy und eigenen Annahmen die folgenden Investitionskosten ermittelt:

Tabelle 5: Investitionskosten Wasserstofftankstellen nach [35] auf Basis des HDRSA-Modells

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	1.975	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

[36] geben an, dass ca. drei bis vier Tankvorgänge pro Stunde von Lkw an den Tankstellen vorgenommen werden können. Die Kosten für eine solche Tankstelle werden mit fünf Millionen Euro beziffert.

Zum Vergleich hierzu benennt [16] die Investitionskosten in Abhängigkeit der Kapazität der zu errichtenden Tankstelle für Pkw. Dabei wird zwischen vier Kapazitätsgrößen unterschieden, nämlich klein, mittel, groß und sehr groß. Eine kleine Tankstelle hat eine Kapazität von 212 kg/Tag, die Investitionskosten hierfür betragen 0,4 Millionen Euro. Für eine mittlere Kapazität von 420 kg/Tag werden Investitionskosten von 0,7 Millionen Euro angegeben. Für die Tankstellen mit großer Kapazität mit rund 1.000 kg/Tag beziehungsweise sehr großer Kapazität mit 2.000 kg/Tag werden Investitionskosten von 1,2 Millionen Euro beziehungsweise die doppelte Summe dessen genannt.

3.2.3.1 Betankung

Wasserstofffahrzeuge werden heute mit einem Druck von 700 bar betankt (Pkw). Bei der Fahrzeugklasse der Nutzfahrzeuge und Busse ist die Betankung mit Wasserstoff bei 300 Bar eine weitere Möglichkeit. Zwingende Voraussetzung hierfür ist, dass bei den entsprechenden Fahrzeugen

entsprechend mehr Platz für den Wasserstoff im Fahrzeugaufbau vorhanden ist. Ist dieser Platz nicht vorhanden, ist auch hier eine Ausrüstung mit der 700 bar Technologie unumgänglich. [35]

3.3 Erdgas

Bei der Tankinfrastruktur für Erdgas ist technisch zwischen dem Aufbau für CNG-Tankstellen und LNG-Tankstellen unterschieden werden.

3.3.1 CNG

CNG Tankstellen bestehen aus einer Erdgaszuleitung (1), einem Erdgaszähler (2), Kompressor (3), Trockner (4), HD-Flaschenspeicher (5), Blech- oder Betongehäuse (6), HD-Verbindungsleitung (7), Zapfsäule (8), HD-Schlauch (9) und der NGV-Kupplung (10). Eine visualisierte Darstellung des prinzipiellen Aufbaus einer CNG-Tankstelle ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

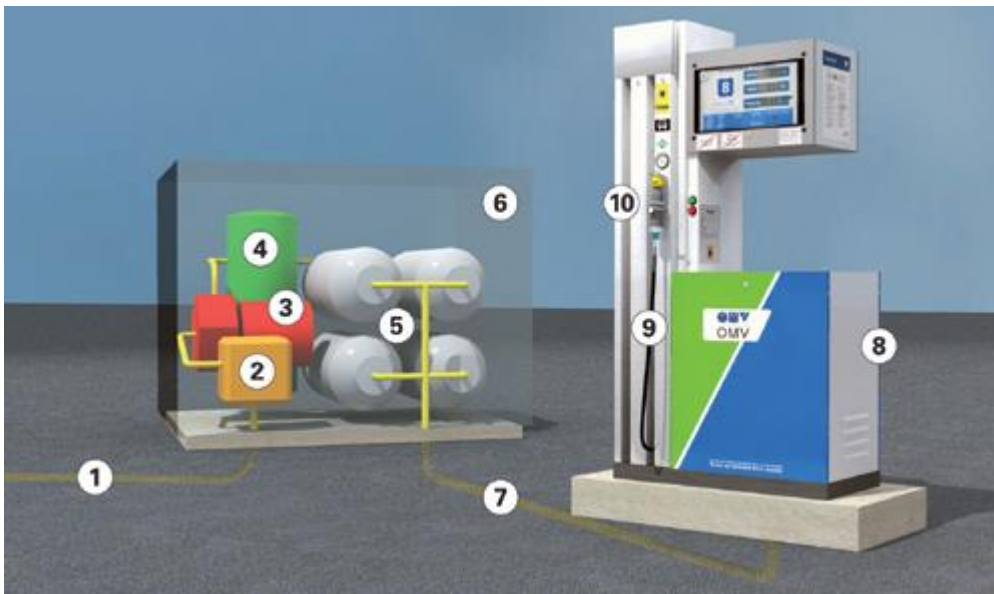


Abbildung 6: Aufbau einer CNG-Tankstelle nach [37]

3.3.1.1 Tankstellendichte

Im Februar 2021 waren in Deutschland nach [38] 816 CNG-Tankstellen verfügbar. Davon waren 433 mit Biogas-Anteil (414 mit 100 % Biogas-Anteil).

3.3.1.2 Kosten

Die Kosten für die Errichtung einer CNG-Tankstelle mit 6 Zapfsäulen belaufen sich nach [39] auf 250.000 Euro. Solche Tankstellen sind nach [40] mit einer Verdichterleistung von 100 bis 150 Nm³/h ausgestattet und damit für wenige PKW nutzbar.

Nach [40] werden in Europa CNG-Schnellbetankungstankstellen gebaut. Diese haben den Vorteil, dass große Abnehmer wie Busse schneller betankt werden können. An einer Betankungseinrichtung in Augsburg können rund 6.000 Nm³/h verdichtet werden. Hierfür sind sechs Kompressoren verbaut und das Gas kann über 4 Dispenser abgegeben werden. In Madrid verdichten 9 Kompressoren 25.000 Nm³/h. Über 9 Dispenser können so 120 Busse in 1,5 Stunden mit bis zu 180 Nm³/h betankt werden. Dies entspricht 129 kg CNG. Die Kosten der Anlage werden mit 47 Millionen Euro beziffert.

Für eine CNG-Tankstelle mit zwei Dispensern und einem Kraftstoffabsatz in Höhe von 22,4 Mio. kWh pro Jahr kalkuliert [40] Kosten in Höhe von ca. 1,85 Millionen Euro. Das entspricht ca. 1.700 Tonnen H-Gas pro Jahr. Die jährlichen Betriebskosten werden mit ca. 9.200 € angegeben.

3.3.1.3 *Betankung*

Die Fahrzeugtanks für CNG sind so ausgelegt, dass dieser beim Tankvorgang auf 200 bar gebracht wird bei einer Außentemperatur von 15 °C. Liegt die Außentemperatur unterhalb oder oberhalb der 15 °C, so wird der Druck im Tank so kalkuliert, dass bei einer Angleichung der Außentemperatur auf 15 °C der Tankdruck bei 200 bar liegt.

Die Reichweite von CNG-Fahrzeugen liegt unterhalb der Reichweite von Dieselfahrzeugen, da für die entsprechenden Tanks ein größeres Volumen benötigt wird. Aus Platzgründen wird entsprechend weniger Tankvolumen verbaut. Häufigeres Auftanken ist daher bei gleicher Fahrleistung unumgänglich.

3.3.2 LNG

3.3.2.1 *Technischer Aufbau Tankstelle*

Eine LNG Tankstelle besteht nach [41] aus folgenden Bestandteilen:

1. Kryogener Speichertank für LNG mit einem Fassungsvermögen zwischen 60 und 70m³
2. Kryotechnische Tauchpumpe
3. Geeichte LNG-Zapfsäulen mit angeschlossenem Bezahlsystem
4. LNG-Kühlsystem, welches das LNG kühlt und dadurch ein Ausströmen des Gases verhindert
5. Ein System um kaltes Flüssigerdgas in gesättigtes Erdgas umzuwandeln
6. Eine Ausrüstung zur Erkennung von Gaslecks
7. Ein PLC-Steuerungssystem mit Unterstützung für Remote-Zugang

[40] beschreibt, dass wenn der kryogene Speichertank mit LNG gefüllt wird, ist die Tankstelle für ca. 2 Stunden nicht benutzbar. Grund hierfür ist, dass das tiefkalte, mit bei 1 bis 2 bar und -163 °C angelieferte LNG auf ca. -130 °C erwärmt und auf einen Druck von 7 bis 10 bar transformiert wird. Das Boil-Off-Gas wird über Kompressoren in Druckflaschen abgefüllt und mit einem Riechstoff versetzt. Beim Tankvorgang selbst haben die Fahrzeugführenden verschiedene Sicherheitsaspekte zu beachten. So sind Handschuhe anzuziehen, da der Tankstutzen beim Tankvorgang selbst vereisen kann. Auch ist das Gesicht z.B. durch eine Gesichtsschild zu schützen. Die Tankdauer selbst unterscheidet sich nicht deutlich von der eines typgleichen Dieselfahrzeugs.

3.3.2.2 *Tankstellendichte und Verfügbarkeit*

Im Februar 2021 waren in Deutschland nach [38] 42 LNG-Tankstellen verfügbar.

3.3.2.3 *Kosten*

[42] und [43] beziffern die Kosten für eine LNG Tankstelle mit einer Zapfsäule auf 0,75 Mio. bis 1 Mio. Euro. Für jede weitere Zapfsäule betragen die Kosten 0,1 Mio. bis 0,15 Mio. Euro. Es können ca. 150 kg/h getankt werden. [39] geben die Kosten für eine Tankstelle mit 6 Zapfsäulen mit 1,5 Mio. Euro an. [40] geben Kosten in Höhe von knapp über 1 Mio. Euro an. Eine solche Tankstelle umfasst zwei LNG Dispenser und einen CNG Dispenser, die den zweitgrößten Investitionsanteil bei der Anlage einnehmen. Den größten Investitionskostenanteil bei der Errichtung einer LNG Tankstelle sind die Baukosten, die mit 400.000 Euro veranschlagt werden. Die Betriebskosten werden mit ca. 31.000 € pro Jahr veranschlagt. Damit erscheint die CNG Tankstelle mit 1,85 Mio. Euro deutlich teurer als eine LNG-Tankstelle. Es ist jedoch darauf hingewiesen, dass in [40] bei der CNG Tankstelle ein redundantes System mit zwei Verdichtern berücksichtigt wurde, bei der LNG-Tankstelle standen jedoch keine Daten bzgl. einer redundanten Auslegung zur Verfügung. Damit kann der Investitionsvergleich nur als begrenzt sinnvoll erachtet werden.

3.3.2.4 Besonderheiten

Flüssiggas (LNG) besteht nach [44] zu 90 % aus Methan und zu weiteren 9 % aus Ethan. Das Gas verflüssigt sich bei Atmosphärentemperatur von -162° . Durch die Verflüssigung des Gases verringert sich das Volumen des Gases um das 600-fache. Ein geräuscharmer Antrieb, eine höhere Reichweite im Vergleich zum Erdgas (CNG) werden als Vorteile genannt. LNG kann bei Fahrzeugen mit bis zu 44 Tonnen Zuggewicht eingesetzt werden. Zu beachten ist, dass die Technik vor allem im Fernverkehr und bei Fahrzeugen mit einer maximalen Standzeit von drei Tagen eingesetzt werden kann. [45] gibt eine maximale Standzeit von sieben Tagen an. Grund der maximalen Standzeit ist, dass sich hiernach das verflüssigte Erdgas, das sich in isolierten Tanks befindetet, erwärmt und gasförmig wird. Um den Druck im Tank zu verringern, wird das Gas abgelassen.

Bei dem Einsatz von LNG in Fahrzeugen, sind vor allem Effekte wie das Boil-Off-Gas (BOG), die Alterung (engl.: Ageing / Weathering) als auch der Roll-Over zu beachten. Bei Eintreten dieser Effekte kommt es zu unerwünschten negativen Effekten bezüglich der Umweltauswirkungen oder auch der Fahrzeugtechnik. Die drei Effekte werden in [46] beschrieben:

Wärme dringt in den gut isolierten Tank ein, in dem sich das LNG befindet. Hierdurch wird das LNG erwärmt und erreicht seinen Siedepunkt und verdampft. Das nun wieder in gasförmiger Phase vorliegende Methan wird, wenn es über Ventile abgelassen wird, als Boil-Off-Gas bezeichnet. Genaue Daten zu den Boil-Off-Raten liegen nicht vor, die Autoren gehen für große Tanks von einem 0,1-prozentigen Anteil pro Tag aus. Bei kleineren Tanks gehen die Autoren von einem Boil-Off-Anteil von einem Prozent pro Tag aus. Das Ageing/Weathering von LNG tritt ein, wenn die Eigenschaften und damit die Qualität des Gases sich ändern. Dies passiert aufgrund des BOG, bei dem die flüchtigen Gasbestandteile des LNG sich verflüchtigen. Zurück bleibt eine geänderte Gaszusammensetzung. Ein weiterer Effekt ist der Roll-Over. Der Roll-Over wird entweder durch einen Boil-Off oder durch das Einfüllen von einem LNG mit einer unterschiedlichen Dichte in einen teilweise gefüllten Tank. Hierbei bilden sich Schichten. Die wärmere LNG bildet die obere Schicht. Die Verdampfung der leichteren Bestandteile in der oberen Schicht bewirkt eine Verdichtung dieser. Zur gleichen Zeit erwärmt sich die untere Schicht im Tank. Aufgrund des Drucks durch die obere Schicht kommt es zu keiner Verdampfung. Die untere Schicht erwärmt sich in der Folge bis sich die Dichten der beiden Schichten angleichen und sich plötzlich vermischen. An diesem Punkt ist die untere Schicht im Tank so stark erwärmt, dass sich plötzlich eine große Menge an Dampf im Tank bildet. Hierdurch kommt es zu einem starken Anstieg des Drucks im Tank, dem Roll-Over. Folgen des Roll-Over können die Beschädigung des Tanks und angrenzender Systeme sein. Die Schichtenbildung kann dazu genutzt werden um BOG zu verhindern, gleichzeitig ist eine Überwachung des Zustands notwendig, um einen Roll-Over zu verhindern.

Tabelle 6: Tabelle zur Gasdruckplanung: Beispiel Volvo nach [47]

Tankdruck	LNG im Tank			
	90 %	75 %	50 %	25 %
	Tage bis zum Ablassen			
3 bar	6,5	8	6	5
5 bar	6	6	4,5	3,5
7 bar	4,5	4	3	2,5
9 bar	3	2,5	2	1,5
11 bar	2	1,5	1	1
13 bar	0,5	0,5	0,5	0,5
14 bar	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5

3.4 Synthetische Kraftstoffe

Nach [48] lassen sich E-Fuels über das bestehende Tankstellennetz vertreiben. Daher wird nicht näher auf die Kosten, Tankstellendichte und den technischen Aufbau eingegangen.

4 Well-to-Wheels Betrachtungen

Emissionstechnische Betrachtungen sind insbesondere hinsichtlich der Klimaschutzziele der Bundesregierung mitzudenken. Auch ist hinsichtlich der zu erwartenden Preissteigerung von Diesel durch die eingeführte CO₂-Steuer eine Untersuchung des monetären Effekts zu überprüfen. Technisch gesehen ist darüber hinaus zu beachten, dass emissionsfreie bzw. -arme Antriebsstränge im Allgemeinen bewirken können, dass das Mehrgewicht der Fahrzeuge steigt. Um zu verhindern, dass die maximale Zuladung abnimmt, regelt die Richtlinie EU 2015/719, dass die maximale Zuladung gleichbleibt. [49] Dies ist auch für den Straßenbetriebsdienst von Bedeutung, da gerade bei Winterdienstfahrten eine Beladung mit ausreichend Streusalz auch bei Fahrzeugen mit alternativen Antrieben sichergestellt sein muss.

4.1 Well to Tank und Tank to Wheels

CO₂-Emissionen treten bei Fahrzeugen sowohl bei der Fahrt selbst auf, z.B. bei der Verbrennung von Diesel. Dieser Betrachtungsansatz wird auch Tank-to-Wheel (TTW) bezeichnet. Werden auch noch die Vorketten betrachtet, wie z.B. die Gewinnung des Primärenergieträgers oder der Transport desselbigen, wird dieser Abschnitt mit Well-to-Tank (WTT) bezeichnet. Wird der gesamte Prozess hinsichtlich der Emissionen betrachtet, so wird dies mit Well-to-Wheels (WTW) angegeben, vgl. auch Abbildung 7.

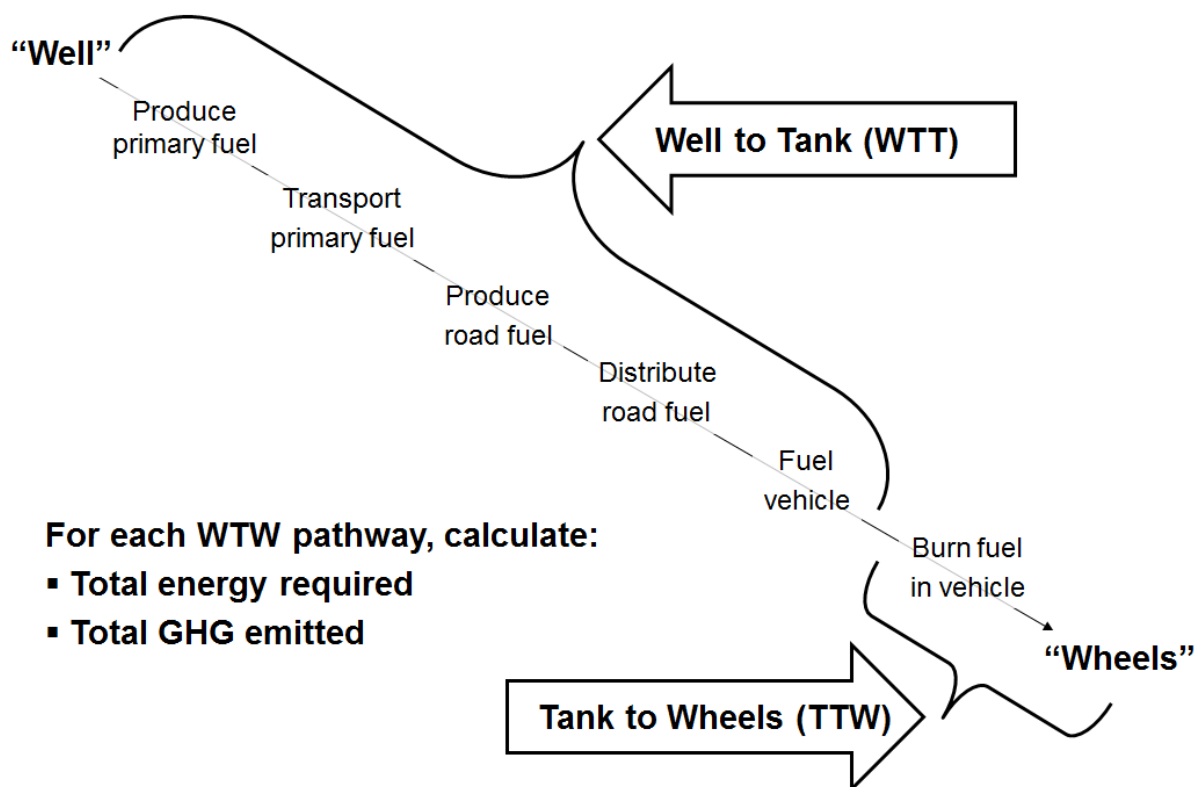


Abbildung 7: Well-to-Wheel Betrachtungsweise nach [50]

Im Gegensatz zu einer Lebenszyklusanalyse umschließt eine Well-to-Wheels-Betrachtung nicht die Emissionen, die beim Bau von Fabriken und Fahrzeugen an sich entstehen. Auch der Aspekt der

Verwertung der Fahrzeuge nach ihrer Lebensdauer fließt nicht in die Well-to-Wheels-Betrachtung mit ein. [50]

4.2 Well-to-Tank

Die Well-to-Tank-Betrachtungen für den Kraftstoff Wasserstoff bzw. für elektrischen Strom bei batterieelektrischen Fahrzeugen sind in [51] dargestellt. Um elektrische Energie zu erzeugen sind mehrere Wege der Energieumwandlung vorhanden. [51] listet die Primärenergieträger auf, durch dessen Umwandlung elektrische Energie erzeugt werden kann. Diese sind in dargestellt.

Tabelle 7: Stromgewinnung aus Primärenergieträgern [51]

Stromgewinnung aus Primärenergieträger	
EU-mix Niederspannungsnetz	EMEL3
Schweröl herkömmliches Kraftwerk	FOEL1
Steinkohle (EU-mix) herkömmliches Kraftwerk	KOEL1
Steinkohle (EU-mix) Gas-Dampf-Prozess mit vorgeschalteter Brennstoffvergasung + CO ₂ Capture and Storage	KOEL2C
Erdgas (4000 km)	GPEL1b
Gas- und Dampf	GEPEL1bC
LNG	GREL1
Siedlungsabfälle, KWK	OWEL1a
Dung, Gülle, gasdichte Gärrestespeicher, KWK	OWEL21a
Holz (Anbau), small conventional	WFEL3
Holz (Abfallprodukt), small conventional	WWEL3
Holz (Abfallprodukt), Beigabe bei Kohleverfeuerung	WWEL4
Schwarzlauge	WWEL5
Nuklear	NUEL
Wind	WDEL

Die Treibhausgasemissionen für den WTT-Bereich batterieelektrischer Fahrzeuge sind in Abbildung 8 visualisiert.

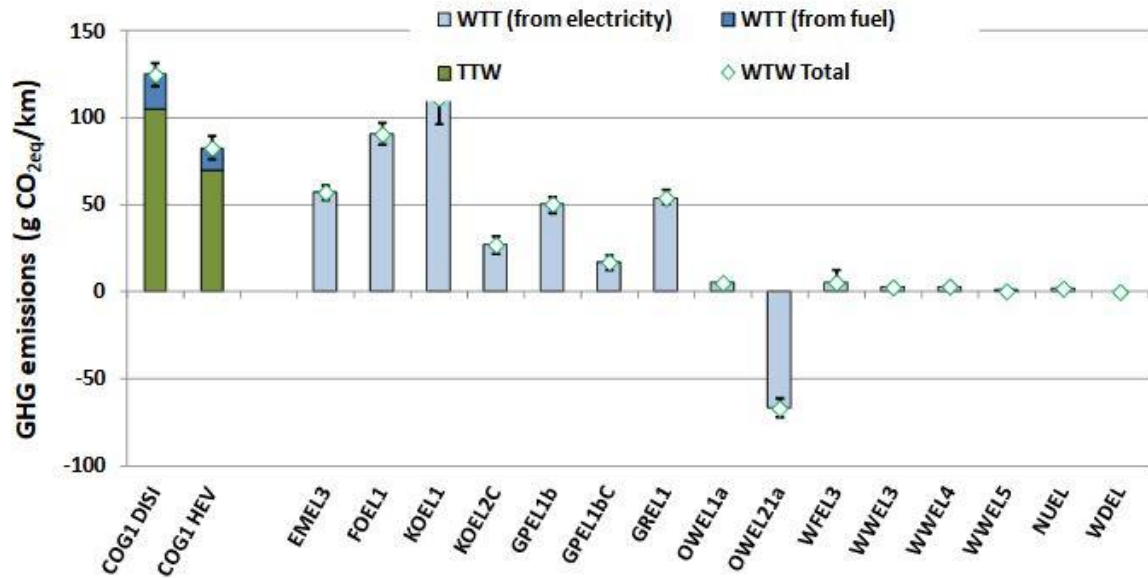


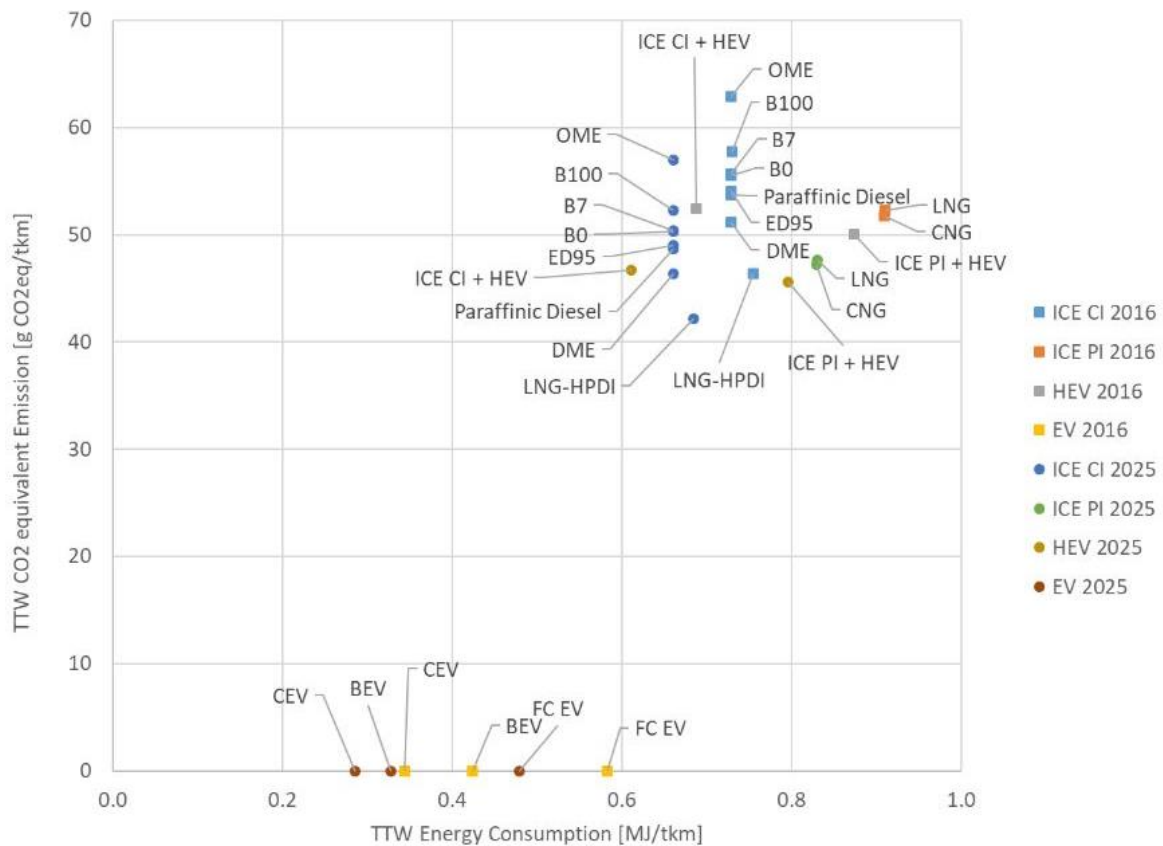
Abbildung 8: WTT: Treibhausgasemissionen bei der Stromerzeugung [51]

Abbildung 8 zeigt, dass bei batterieelektrisch angetriebenen Fahrzeugen die Treibhausgasemissionen vernachlässigbar gering sind, wenn diese mit Strom aus erneuerbaren Energiequellen gespeist werden. Werden tierische Abfallprodukte verwendet, ist die Treibhausgasbilanz sogar negativ. Das bedeutet, dass aufgrund eingesparter Emissionen, wie Methan, eine Gutschrift erfolgt. Wird dagegen der Strom aus konventionellen Primärenergieträgern wie Öl und Kohle hergestellt, liegen die Emissionen im Bereich von teilweise 100 g CO₂-Äq. pro Kilometer.

Auch für die Wasserstoffproduktion zeigt [51] die unterschiedlichen Auswirkungen der Primärenergieträger hinsichtlich des Ausstoßes von CO₂-Äq. auf. Wie bei der Generierung von elektrischer Energie gilt auch bei der Produktion von Wasserstoff, dass die Wahl des Primärenergieträgers entscheidend für die Treibhausgasemissionen im Bereich WTT ist. Wird Windenergie in der Elektrolyse als Primärenergieträger eingesetzt, so sind die Treibhausgasemissionen in der WTT-Betrachtung marginal. Wird dagegen die Elektrolyse mittels Kohleverstromung durchgeführt, liegen die Emissionen bei über 200 g CO₂-Äq. pro km.

4.3 Tank-to-Wheels

In der Tank-to-Wheels Betrachtung zeigen [52] die verschiedenen Emissionen für verschiedene Antriebe von Fernverkehrsfahrzeugen pro Tonnenkilometer auf. Dabei zeigen die Autoren die Situation aus dem Jahr 2016 und berechnen die Situation für das Jahr 2025. Die Ergebnisse sind in Abbildung 9 dargestellt.



Group 5; VECTO Long-Haul cycle; Weighted payload (13064 kg for BEV 2016; 14290 g for all others)
Analysed propulsion systems do vary in performance criteria like operating range, payload capacity or fuelling time

Abbildung 9: TTW CO₂-Äq.-Emissionen [52]

[52] zeige auf, dass bei den Fahrzeugen mit LNG und CNG für das Jahr 2016 die Emissionen bei über 50 g CO₂-Äq. pro Tonnenkilometer liegen. Die Autoren gehen davon aus, dass sich diese im Jahr 2025 auf knapp unter 50 g CO₂-Äq. pro Tonnenkilometer belaufen werden. Der Energieverbrauch dieser Fahrzeuge liegt bei über 0,8 MJ pro Tonnenkilometer. Für die emissionsfreien Antriebsmöglichkeiten wie die Brennstoffzelle (hier FC EV) nehmen die Autoren einen Energieverbrauch von unter 0,6 MJ pro Tonnenkilometer an. Bis 2025 soll dieser bei unter 0,5 MJ pro Tonnenkilometer liegen. Für den batterieelektrischen Antrieb gehen die Autoren einem Energieverbrauch von über 0,4 MJ pro Tonnenkilometer an, für das Jahr 2025 wird mit einem Rückgang auf einen Wert zwischen 0,3 und 0,4 MJ pro Tonnenkilometer gerechnet. Leicht besser sind die Werte noch für die Oberleitungs-Fahrzeuge (CEV). Hier liegt der Energieverbrauch bei deutlich unter 0,4 MJ pro Tonnenkilometer im Jahr 2016, für das Jahr 2025 lassen die Berechnungen der Autoren jedoch eine Angleichung der Energieverbräuche zwischen BEV und CEV erahnen.

[53] kommen zu ähnlichen Ergebnissen und geben den Energieverbrauch in kWh pro km an. In ihrer Studie untersuchten die Autoren den Energieverbrauch von Oberleitungs-Lkw, wenn diese durchgehend an vorhandenen Oberleitungen fahren (Continuous Catenary) bzw. von Oberleitungs-Lkw, wenn das Oberleitungssystem nicht durchgehend, sondern nur in bestimmten Abständen gebaut wird (Sectional Catenary). Der Energieverbrauch des Oberleitung-Lkws wird mit einem Lkw mit batterieelektrischem Antriebsstrang sowie einem herkömmlichen Diesel-Lkw verglichen. Dabei unterscheiden die Autoren zudem die Batterietechnik. In ihrer Studie untersuchen diese zum einen die Energieverbräuche mit Batterien, deren Zellen eine hohe Energiedichte vorweisen (High-Energy-Cells, HEa) sowie Batterien, deren Zellen eine hohe Leistung nachweisen (High-Power-Cells, HPa).

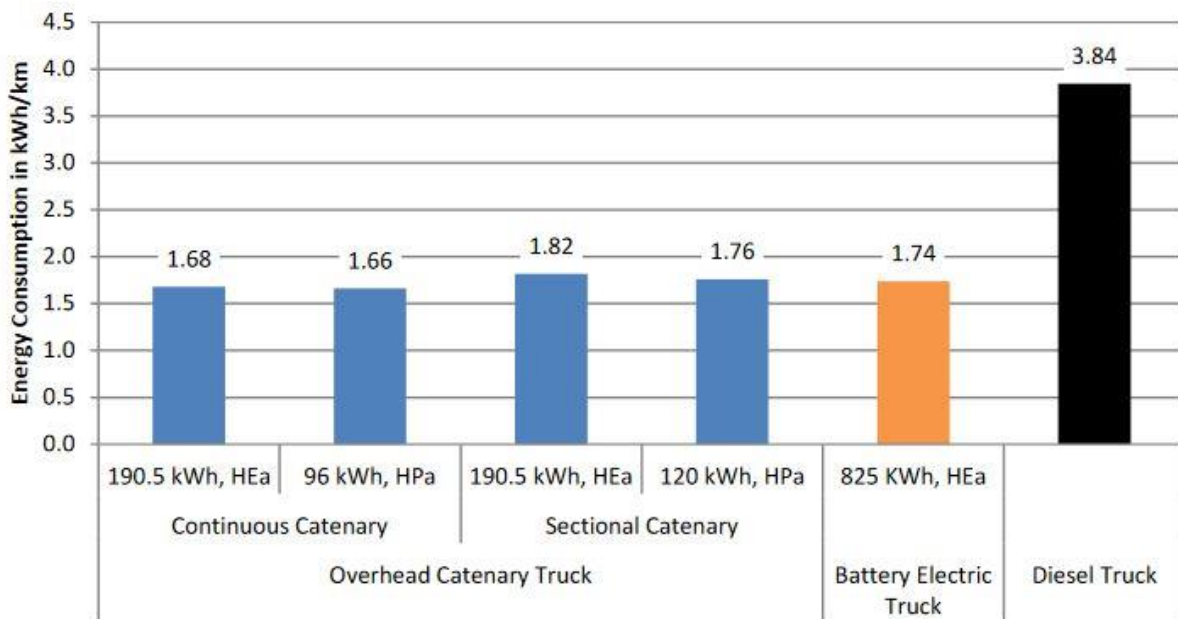


Abbildung 10: Energieverbrauch für Oberleitungs-Lkw mit unterschiedlichen Oberleitungs-Konfigurationen und Traktionsbatterien im Vergleich zu einem batterieelektrischen und einem Diesel-Lkw [53]

Sowohl Oberleitung-Lkw als auch der Lkw mit einem rein batterieelektrischen Antriebsstrang haben einen deutlich geringeren Energieverbrauch in kWh pro km als der Diesel-Lkw mit 3,84 kWh pro km. Das BEV mit einer Batteriekapazität von 825 kWh und einer HEa benötigt 1,74 kWh/km und damit nur etwa 45 % der Energie, die ein baugleiches Dieselfahrzeug benötigt. Auch im Vergleich zu den Oberleitung-Lkw, die abschnittsweise an Oberleitungen fahren, schneidet das BEV hinsichtlich des Energieverbrauchs besser ab. Hier liegen die Energieverbräuche bei 1,80 bzw. 1,76 kWh pro km. Bei einem durchgehenden Oberleitungssystem für Lkw ist der Energieverbrauch hier für die Fahrzeuge am geringsten, mit einem Verbrauch von 1,68 kWh pro km (HEa) bzw. 1,66 kWh pro km (HPa). Dass das BEV einen höheren Energieverbrauch hat als der Lkw, der durchgehend an der Oberleitung fährt, ist laut den Autoren auf das höhere Fahrzeuggewicht des BEV zurückzuführen. Das der Energieverbrauch des BEV geringer ist als bei dem teilweisen Betrieb an der Oberleitung, ist mit den Verlusten zu begründen, die vom Pantographen zur Batterie und zur Traktionsmaschine auftreten.

5 Fahrzeuge mit alternativen Antrieben

Nutzfahrzeuge mit alternativer Antriebstechnik werden von verschiedenen Herstellern auf dem Markt zum Kauf angeboten. Betriebsdienstfahrzeuge mit alternativer Antriebstechnik sind aktuell nicht käuflich zu erwerben. Es wird daher ein Überblick über Nutzfahrzeuge mit alternativen Antriebstechnologien gegeben. Ziel ist eine Übersicht zu erstellen aus der erkennbar wird, in welchen Bereichen die alternativen Antriebstechnologien bereits verfügbar sind. Diese Übersicht erhebt, auch aufgrund der dynamischen Situation keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

5.1 Nutzfahrzeuge mit Batterieantrieb

Nutzfahrzeuge mit batterieelektrischen Antrieben werden von verschiedenen Herstellern am Markt angeboten bzw. Prototypen werden von Unternehmen getestet. Für den Betriebsdienst interessant sind u.a. Radlader. In diesem Fahrzeugbereich gibt es verschiedene Hersteller, die diese bereits vollelektrisch anbieten. Eine Auswahl dieser ist in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Batterieelektrische Radlader

Hersteller	Typenbezeichnung	Quelle
Schäffer	Schäffer 24e	https://www.schaeffer-lader.de/de/schaeffer/news/schaeffer-24e-elektrolader-fuer-die-bauwirtschaft/
Kramer	KL25.5e	https://www.kramer-online.com/de/produkte/model/kl255e/
Wacker Neuson	WL20e	https://www.wackerneuson.de/de/produkte/radlader/knickgelenkte-radlader/model/wl20e/
Volvo	Volvo L25 Electric	https://www.volvoce.com/deutschland/de-de/products/electric-machines/l25-electric/

In Tabelle 8 wird auch der Radlader der Firma Wacker Neuson aufgelistet. Das Modell WL20e besitzt zwei Elektromotoren. Einer ist für den Antrieb des Radladers zuständig, der zweite für die Arbeitshydraulik. Der Hersteller gibt eine fünfstündige Laufzeit an. Das Fahrzeug kann innerhalb von sechs bis acht Stunden an handelsüblichen 230 V Steckdosen aufgeladen werden. Die Investitionskosten liegen ca. 20 Prozent höher als bei herkömmlichen Radladern. [54] Durch den Einsatz von batterieelektrischen Radladern betragen die lokalen Emissionen Null Gramm pro Kilometer. Der Radlader ist in Abbildung 11 zu sehen.



Abbildung 11: Radlader der Firma Wacker Neuson mit Elektroantrieb

Im Bereich der schweren Nutzfahrzeuge (2-Achser, 3-Achser, Mehrzweckgeräteträger) sind aktuell noch keine Fahrzeuge mit batterieelektrischem Antriebsstrang von den Herstellern zu erwerben. Dafür sind bereits im Transportgewerbe, der Abfallsammlung, im Bergbau und der Baubranche verschieden Fahrzeugtypen verfügbar.

Von der Firma Mercedes Benz wird der e-Actros als Verteiler-Lkw angeboten. Die Reichweite wird mit bis zu 400 km angegeben. [55] Darüber hinaus ist bei Mercedes Benz auch ein Abfallsammelfahrzeug in Planung, der eEconic. [56] Verschiedene batterieelektrische schwere Nutzfahrzeuge werden auch von dem Hersteller Volvo. Hierzu zählen Sattelzugmaschinen, Fahrzeuge für die Baubranche, den Regionalverkehr und die Abfallwirtschaft. [57]

Im Bereich der Sonderfahrzeuge sind ebenfalls Bestrebungen festzustellen, diese mit batterieelektrischem Antriebsstrang auszustatten. Hier sind neben einem Sonderfahrzeug für den Bergbau [58] die elektrische Straßenwalze [59] als auch der Asphaltfertiger mit Elektroantrieb [60] des niederländischen Unternehmens BAM Infra zu nennen.

Darüber hinaus kündigt der Pkw-Hersteller Tesla an, einen batterieelektrischen Lkw auf den Markt zu bringen, welcher Reichweiten von bis 1.000 km auf den Markt zu bringen. Die Reichweite soll mit einer

Batterieladung erreicht werden. Um die Batterien wieder aufzuladen, arbeitet Tesla an einem neuen Ladestandard, dem MCS (Megawatt Charging Standard). [61]

Die Auflistung zeigt, dass schwere batterieelektrische Nutzfahrzeuge in unterschiedlichsten Bereichen bereits zum Einsatz kommen bzw. als Prototypen im Einsatz sind.

5.2 Nutzfahrzeuge mit H₂-Brennstoffzellenantrieb

Im Bereich der Nutzfahrzeuge mit H₂-Brennstoffzellenantrieb ist die frei am Markt verfügbare Auswahl geringer. Das Unternehmen Toyota hat wasserstoffbetriebene Gabelstapler in ihrem Sortiment, siehe Abbildung 12.



Abbildung 12: Wasserstoffbetriebener Gabelstapler (Toyota Deutschland GmbH)

Im Bereich der Lkw gehen Daimler und Volvo ein Joint Venture ein. „In der zweiten Hälfte dieses Jahrzehnts sollen dann die H₂-Trucks von Daimler auf der Straße rollen. Bis 2030 visiert Daimler einen Marktanteil von 15 Prozent an.“ [62] Fahrzeuge mit Wasserstoffantrieb kommen unter anderem in der Stadtreinigung von Bremen [63] zum Einsatz. In der Schweiz fahren 38 Brennstoffzellenfahrzeuge für Havi Logistics, bis Ende 2025 sollen es 1.000 Brennstoffzellenfahrzeuge sein. [64]

Insgesamt zeigt die Recherche zu Wasserstoff in der Nutzfahrzeugbranche, dass dieser noch nicht so weit verbreitet und am Markt verfügbar ist wie die Nutzfahrzeuge mit Batterietechnik.

5.3 Nutzfahrzeuge mit LNG und CNG Antrieb

Lkw mit LNG-Antrieb werden aktuell vor allem in Sattelzugmaschinen im Logistikbereich eingesetzt. Eine Nutzung von LNG in anderen Nutzfahrzeugtypen ist nicht bekannt. Eine Auflistung über verschiedene Hersteller und Reichweiten der Fahrzeuge listet die PRIMAGAS Energie GmbH auf. [65]

Nutzfahrzeuge mit CNG-Antrieb sind am Markt verfügbar und von der Technik her erprobt. Hierbei sind verschiedene Anwendungen denkbar. Verfügbar am Markt sind u.a. Kühlfahrzeuge und Trecker [66] oder auch Fahrzeuge im Bereich der Abfallsammlung [67].

6 Zusammenfassung/Fazit

Die Erarbeitung der physikalischen Grundlagen hat gezeigt, dass Wasserstoff der alternative Kraftstoff mit der höchsten Energiedichte im Vergleich zu den anderen betrachteten Kraftstoffen als auch Diesel ist. Einer Energiedichte von ca. 33 kWh/kg_{H₂} stehen die Energiedichten von LNG (13,9 kWh/kg_{H₂}), CNG (13,9 kWh/kg_{H₂}), Diesel 11,9 kWh/kg_{H₂} bzw. der Lithium-Ionen-Batterien

0,13 kWh/kg_{H₂}) gegenüber. Die Frage der Energiedichte spielt eine wesentliche Rolle in der Betrachtung der Ausgestaltung der Fahrzeuge bezüglich der Tank-/Batterie-Größe für vorgesehene Einsatzfahrten einerseits und der Möglichkeiten der schnellen Nachtankung/-ladung andererseits. Bei den Betriebsdienst-LKWs ist hier der Winterdienst mit seinem Rund-um-die-Uhr-Einsatz-Vorgaben maßgebend.

Die Herstellungs- bzw. Gewinnungsprozesse der alternativen Kraftstoffe werden beschrieben. Hierbei wird der Fokus auf die Wirkungsgrade gelegt. Bei der Stromproduktion variiert der Wirkungsgrad je nach Technologie. Photovoltaik (20 %), Windkraftanlagen (30 %) oder Wasserkraftanlagen (80 %) besitzen unterschiedliche Wirkungsgrade. Der Wirkungsgrad zur Herstellung von Wasserstoff liegt bei 53 – 66 %. Im Bereich von CNG und LNG sind die Herkunft des Gases von wichtiger Bedeutung, da hier u.a. zum Transport entsprechende Energiemengen mit eingeplant werden müssen. Für die Bereitstellung von 1 MJ CNG aus dem EU-Mix, werden ca. 0,16 MJ Energie aufgewendet.

Die Lade- und Tankinfrastruktur für alternative Energien ist bisher nicht in dem Maße im öffentlichen Netz verfügbar, verglichen mit der relativ dichten vorhandenen bisherigen Tankinfrastruktur. Im Bereich der Meistereien kann eigene Ladeinfrastruktur aufgebaut werden. Die Kosten und anfallenden Arbeiten werden benannt. Dabei ist immer eine Einzelfallbetrachtung notwendig, gerade auch im Hinblick auf die maximal mögliche Anschlussleistung der jeweiligen Meisterei vor Ort. Sowohl LNG als auch Wasserstoff-Tankinfrastruktur ist bisher nur sehr punktuell im öffentlichen Raum vorhanden. Es wird auf die Kosten und mögliche Hemmnisse bei Wartung der Anlagen, Stichwort Patente, und physikalische Aspekte, Stichwort Boil-Off-Effekt, eingegangen.

Im Bereich der Emissionen wird auf die Bedeutung der Well-to-Tank-, Tank-to-Wheels- als auch die entsprechend kombinierte Well-to-Wheels-Betrachtung eingegangen. Es zeigt sich, dass im Bereich der Well-to-Tank Betrachtung der Einsatz von erneuerbaren Energieträgern hinsichtlich der Emissionsbilanz deutlich positiver ist als die Emissionsbilanz z.B. von LNG. Bei der Tank-to-Wheels-Betrachtung schneiden sowohl die Brennstoffzellen, der Einsatz batterieelektrischer Fahrzeuge als auch die Oberleitungsfahrzeuge emissionsbilanziell am besten ab. Die Emissionen gerade auch im Bereich der Energieträger CNG und LNG sind nicht vernachlässigbar.

Ein aktueller Überblick über den Markt für Fahrzeuge mit alternativer Antriebstechnik beschließt dieses Papier. Es zeigt sich, dass Nutzfahrzeuge mit rein batterieelektrischem Antriebsstrang in einer Vielzahl am Markt bereits verfügbar sind. Für den speziellen Fall der der LKW und Geräteträger für den Straßenbetriebsdienst gilt dies allerdings noch nicht. Weitaus geringer ist das Angebot von Nutzfahrzeugen mit Wasserstoff-Brennstoffzellenantrieb. Das gleiche gilt auch für Nutzfahrzeuge mit CNG- und LNG-Antrieb. Beim LNG-Antrieb liegt der Fokus auf den Sattelzugmaschinen für den Schwerlast-Güterverkehr.

Da es aktuell noch keine schweren Nutzfahrzeuge mit alternativen Antrieben im Straßenbetriebsdienst frei am Markt zu erwerben sind, ergibt sich aus den vorliegenden, herausgearbeiteten Gegebenheiten folgendes Bild. Der batterieelektrische Antriebsstrang ist aktuell auch in der Nutzfahrzeugbranche weit verbreitet und wird an unterschiedlichsten Stellen eingesetzt. Hinzu kommt, dass durch entsprechende Ladeinfrastruktur die Fahrzeuge vor Ort geladen werden können. Auch ist diese im Vergleich zu den weiteren alternativen Tankinfrastrukturen relativ günstig. Es wird vorgeschlagen, zuerst die Möglichkeiten in einer Studie zu untersuchen, schwere Nutzfahrzeuge im Straßenbetriebsdienst mit Batterien zu versehen. Hierzu sind die

Randbedingungen zu untersuchen, die von den Fahrzeugen zu erfüllen sind. Hierzu zählt u.a. die Leistungsaufnahme der Anbaugeräte wie z. B. Schneepflug oder Mähwerkzeuge. Die Ergebnisse sind entsprechend zu interpretieren und wo möglich in einem Pilotprojekt umzusetzen.

Kommt die Studie zum Schluss, dass batterieelektrische Fahrzeuge für den Straßenbetriebsdienst nicht geeignet sind, sollte auch hinsichtlich anfallender Emissionen, die Möglichkeit des Einsatzes der Wasserstoff-Brennstoffzelle in den Fahrzeugen des Straßenbetriebsdienstes untersucht werden.

7 Literaturverzeichnis

- [1] BMVI. Straßenbetriebsdienst. [April 13, 2021]; Available from: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/StB/strassenbetriebsdienst.html>.
- [2] Presse- und Informationsamt der Bundesregierung. Was tut die Bundesregierung für den Klimaschutz? [October 21, 2020]; Available from: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/bundesregierung-klimapolitik-1637146>.
- [3] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050; 2019.
- [4] Europäisches Parlament. Verordnung (EU) 2019/631 zur Festsetzung von CO₂-Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen und für neue leichte Nutzfahrzeuge und zur Aufhebung der Verordnungen (EG) nr. 443/2009 und (EU) Nr. 510/2011: Verordnung 2019/631; 2020.
- [5] Europäisches Parlament. Verordnung (EU) 2019/1242 zur Festlegung von CO₂-Emissionsnormen für neue schwere Nutzfahrzeuge und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 595/2009 und (EU) 2018/956: Verordnung (EU) 2019/1242; 2019.
- [6] Zellbeck H. Energiefragen im 21. Jahrhundert: Mobil mit Energie. Dresden; 2017.
- [7] Ersoy M, Gies S. Fahrwerkhandbuch: Grundlagen - Fahrdynamik - Fahrverhalten- Komponenten - Elektronische Systeme - Fahrerassistenz - Autonomes Fahren- Perspektiven. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; 2017.
- [8] Dr. Paschotta R. Erdgasfahrzeug. [February 23, 2021]; Available from: <https://www.energielexikon.info/erdgasfahrzeug.html>.
- [9] Dr. Paschotta R. Flüssigerdgas. [23.02.20021]; Available from: <https://www.energielexikon.info/fluessigerdgas.html>.
- [10] Vekic N. Lithium-Ionen-Batterien für die Elektromobilität: Status, Zukunftsperspektiven, Recycling; 2020.
- [11] Dr. Adolf J, Dr. Balzer C, Dr Louis J, Schabla U, Prof. Dr. Fishedick M, Dr. Arnold K et al. Shell Wasserstoff-Studie. Energie der Zukunft?: Nachhaltige Mobilität durch Brennstoffzelle und H₂. Hamburg; 2017.
- [12] Wagner H-F. Physik der Windenergie. [February 18, 2021]; Available from: <https://www.weltderphysik.de/gebiet/technik/energie/windenergie/physik-der-windenergie/>.
- [13] Wirth H. Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Freiburg; 2021.
- [14] Forschungszentrum Jülich GmbH. Wirkungsgrad einer Wasserturbine. [February 18, 2021]; Available from: https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d14004-2/*/*/*Wirkungsgrad%20einer%20Wasserturbine.html?jsearch=1&search=Wirkungsgrad%20einer%20Wasserturbine&op=Wiki.getwiki.
- [15] Schmidt M, Schwarz S, Stürmer B, Wagener L, Zuberbühler U. Technologiebericht 4.2a Power-to-gas (Methanisierung chemisch-katalytisch): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2

an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal, Karlsruhe, Saarbürcken; 2018.

- [16] Albrecht U, Bünger U, Michalski J, Weindorf W, Zerhusen J. Kommerzialisierung der Wasserstoff-Technologie in Baden-Württemberg: Rahmenbedingungen und Perspektiven; 2016.
- [17] Tjarks GH. PEM-Elektrolyse-Systeme zur Anwendung in Power-to-Gas Anlagen. Jülich; 2017.
- [18] Zukunft Gas GmbH. Erdgas - Die Entstehung eines natürlichen Energieträgers. [March 15, 2021]; Available from: <https://www.erdgas.info/energie/erdgas/entstehung-von-erdgas/>.
- [19] Bundesverband Erdgas, Erdöl und Geoenergie e.V. Fördertechnik: Erdgasförderung. [March 15, 2021]; Available from: <https://www.bveg.de/Erdgas/Technik-Standards/Produktion/Foerdertechnik>.
- [20] Edwards R, Larivé J-F, Riceard D, Weindorf W. WELL-TO-TANK Report Version 4.a JEC WELL-TO-WHEELS ANALYSIS: WELL-TO-WHEELS ANALYSIS OF FUTURE AUTOMOTIVE. Luxembourg; 2014.
- [21] Dr. Adolf J, Dr. Balzer C, Dr. Kofod M, Prof. Dr. Lenz B, Lischke A, Knitschky G et al. Shell LNG-Studie. Verflüssigtes Erdgas - Neue Energie für Schiff und LKW?: Fakten, Trends und Perspektiven. Hamburg; 2019.
- [22] Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V. Autogas - eine umweltfreundliche Alternative. [March 04, 2021]; Available from: <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/autogas/>.
- [23] Dr.-Ing. Rudolph F. Der Beitrag von synthetischen Kraftstoffen zur Verkehrswende: Optionen und Prioritäten. Hamburg; 2019.
- [24] Liebich A, Fröhlich T, Münter D, Fehrenbach H. Systemvergleich speicherbarer Energieträger aus erneuerbaren Energien; 2019.
- [25] Rudschies W. Synthetische Kraftstoffe - Energieträger der Zukunft. [December 21, 2020]; Available from: <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/synthetische-kraftstoffe/>.
- [26] Kompetenzzentrum Elektromobilität NRW. Wie steuert man mehrere Ladestationen? [November 19, 2020]; Available from: <https://www.elektromobilitaet.nrw/infos/lastmanagement/>.
- [27] Volkswagen Group Fleet International. E-Laden von Flotten: Ein Kompendium für den Aufbau einer E-Ladeinfrastruktur in Unternehmen; 2018.
- [28] ELONROAD. Unplug yourself! [February 28, 2022]; Available from: <https://elonroad.com/>.
- [29] Elways. The future is here. [February 28, 2022]; Available from: <https://elways.se/>.
- [30] Hessen Mobil. ELISA - Elektrifizierter, innovativer Schwerverkehr auf Autobahnen. [February 28, 2022]; Available from: <https://ehighway.hessen.de>.

- [31] Forschungs- und Entwicklungszentrum Fachhochschule Kiel GmbH. Feldversuch eHighway Schleswig-Holstein. [February 28, 2022]; Available from: <https://www.ehighway-sh.de/de/>.
- [32] Leiva L. Wie Wasserstoff in den Tank kommt. Neue Züricher Zeitung 2016, 2 April 2016; Available from: <https://www.nzz.ch/wissenschaft/technik/wasserstofftankstellen--ausgereift-aber-noch-teuer-1.18721222>. [November 19, 2020].
- [33] Smolinka T, Voglstätter C. Wasserstoff-Infrastruktur für eine nachhaltige Mobilität: Entwicklungsstand und Forschungsbedarf. Stuttgart; 2013.
- [34] Oel S. Dieses Jahr eröffnet die 100. Wasserstofftankstelle. Auto Motor Sport 2020.
- [35] Wietschel M, Gnann T, Rose P. Wie könnte ein Tankstellenaufbau für Brennstoffzellen-Lkw in Deutschland aussehen? Karlsruhe; 2020.
- [36] Klausmann F, Mauch L, Dr. Klingler A-L, Röckle F, Dr. Wohlhüter M. Anforderungen an eine elektrische Lade- und Wasserstoffinfrastruktur für gewerbliche Nutzfahrzeuge mit dem Zeithorizont 2030. Berlin; 2021.
- [37] Fachverband Gas Wärme (FGW). Tankvorgang. Schnell & sicher: Aufbau einer Erdgastankstelle. [June 07, 2021]; Available from: <https://www.erdgasautos.at/tanken/tankvorgang/>.
- [38] Baumann J. Statistiken zu Erdgas-Fahrzeugen und -Tankstellen: Tankstellen-Report: Anzahl der Erdgas-Tankstellen in Deutschland. [March 17, 2021]; Available from: <https://www.gas.info/presse-publikationen/gas-statistik/kenndaten-mobilitaet>.
- [39] Engel T, Rentschler C, Brunsing J, Caba S. Tankstelle 2.0: Strategie zur nachhaltigen Versorgung von Kraftfahrzeugen mit alternativen Antrieben in Rheinland-Pfalz. Kaiserslautern; 2018.
- [40] Dr. Bünger U, Landinger H, Weindorf W, Wurster R, Zerhusen J, Dr. Zittel W. Vergleich von CNG und LNG zum Einsatz in Lkw im Fernverkehr: Eine Expertise für die Open Grid Europe GmbH. Abschlussbericht; 2016.
- [41] Linde GmbH. LNG Tankstellen. [November 19, 2020]; Available from: https://www.linde-engineering.com/de/process-plants/lng-and-natural-gas-processing-plants/liquefied_natural_gas/lng_fuelling_stations/index.html.
- [42] Bode M. LNG Tankstelle kaufen: Kosten, Vorschriften, Ablauf. [March 17, 2021]; Available from: <https://www.fluessiggas1.de/lng-tankstelle-kaufen-kosten-vorschriften-ablauf/>.
- [43] Partz J. Spezifizierung Kosten LNG Tankstelle. e-Mail; 2021.
- [44] Scania Deutschland. Flüssiggas (LNG). [February 03, 2021]; Available from: <https://www.scania.com/de/de/home/products-and-services/trucks/sustainability/gas/fluessiggas--lng-.html>.
- [45] Schmidt B. Lastwagen mit LNG: Die Kühlkette darf nicht reißen; 2013.
- [46] Ernebrant S, Johansson T. LNG Blue Corridors.: Studies regarding Ageing of Fuel. Brüssel; 2017.

- [47] DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. Fact Sheet. Methanemissionen bei der Nutzung von LNG als Kraftstoff für Lkw.
- [48] Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V. Synthetische Kraftstoffe - Sind E-Fuels die Zukunft? [February 25, 2022]; Available from: <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/synthetische-kraftstoffe/>.
- [49] Europäisches Parlament. Richtlinie (EU) 2015/719; 2015.
- [50] JRC-Eucar-Concawe (JEC). Well-to-Wheels Analyses. [March 25, 2021]; Available from: <https://ec.europa.eu/jrc/en/jec/activities/wtw>.
- [51] Edwards R, Hass H, Larive J-F, Lonza L, Maas H, Rickeard D. WELL-TO-WHEELS Report Version 4.a. JEC WELL-TO-WHEELS ANALYSIS. Luxemburg; 2014.
- [52] Röck M, Martin R, Hausberger S, Hanarp P, Bersia C, Colombano M et al. JEC Tank-to-Wheels Report v5: Heavy duty vehicles. Luxemburg; 2020.
- [53] Mareev I, Sauer D. Energy Consumption and Life Cycle Costs of Overhead Catenary Heavy-Duty Trucks for Long-Haul Transportation; 2018.
- [54] Wacker Neuson SE. WL20e - Innovativ, elektrisch, emissionsfrei – der Radlader mit Elektroantrieb. [July 09, 2019]; Available from: <https://www.wackerneuson.de/de/produkte/radlader/knickgelenkte-radlader/model/wl20e/>.
- [55] Mercedes Benz Trucks. Der eActros und seine Services.: Mehr als ein Truck. [February 28, 2022]; Available from: https://www.mercedes-benz-trucks.com/de_DE/emobility/world/our-offer/eactros-and-services.html.
- [56] Daimler Truck AG. Der eEconic. Empower your eMotion. Der eEconic. Empower your eMotion. [February 28, 2022]; Available from: <https://mbs.mercedes-benz.com/de/eeconic.html#view-0>.
- [57] Volvo Group Trucks Central Europe GmbH. Für eine saubere Zukunft. Elektro Lkw von Volvo Trucks. [February 28, 2022]; Available from: <https://www.volvotrucks.de/de-de/trucks/alternative-antriebe/elektro-lkw.html>.
- [58] Werwitzke C. Sandvik setzt neun elektrische Bergbaufahrzeuge ab. [February 28, 2022]; Available from: <https://www.electrive.net/2021/07/01/sandvik-setzt-neun-elektrische-bergbaufahrzeuge-ab/>.
- [59] Werwitzke C. BAM Infra nimmt elektrische Straßenwalze in Betrieb. [February 28, 2022]; Available from: <https://www.electrive.net/2020/04/29/bam-infra-nimmt-elektrische-strassenwalze-in-betrieb/>.
- [60] Sciurti D. BAM Infra rüstet Asphaltfertiger auf Elektroantrieb um. [February 28, 2022]; Available from: <https://www.electrive.net/2022/01/31/bam-infra-ruestet-asphaltfertiger-auf-elektroantrieb-um/>.

- [61] Baumann U, Hebermehl G, Harloff, Thomas, Knecht, Jochen. 1000 km Reichweite und schnelles Megawatt-Laden. [February 28, 2022]; Available from: <https://www.auto-motor-und-sport.de/elektroauto/tesla-semi-truck-daten-fotos-marktstart-elektro-lkw-reichweite/>.
- [62] Blechner N. Mit dem Wasserstoff-Lkw in die Zukunft. [February 28, 2022]; Available from: <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/boerse/wasserstoff-lkw-101.html>.
- [63] Weyerer G. Bluepower: Das modernste Müllauto der Welt. [February 28, 2022]; Available from: <https://p.dw.com/p/3rwl1>.
- [64] Weinrich R. Erfolgreich mit Wasserstoff. Täglich 10.000 Lkw-Kilometer in der Schweiz. [February 28, 2022]; Available from: <https://www.eurotransport.de/artikel/erfolgreich-mit-wasserstoff-taeglich-10-000-kilometer-in-der-schweiz-11183476.html>.
- [65] PRIMAGAS Energie GmbH. Was bringt ein Erdgas-Antrieb - LNG-Lkw statt Dieselfahrzeuge für die Logistik? [February 28, 2022]; Available from: <https://fluessiggas.de/wissen/gewerbe/lng-lkw/#was-sind-lng-lkw>.
- [66] gibgas medien. Fahrzeuge: Einsatzfreudig: Folgende CNG-Nutzfahrzeuge sind derzeit in Deutschland erhältlich. [February 28, 2022]; Available from: <https://www.gibgas.de/Fahrzeuge/Nutzfahrzeuge>.
- [67] Volvo Group Trucks Central Europe GmbH. Der Volvo FE CNG. [February 28, 2022]; Available from: <https://www.volvotrucks.de/de-de/trucks/trucks/volvo-fe/volvo-fe-cng.html>.