

# LNG im Schwerlastverkehr – eine Alternative!

LNG (Liquefied Natural Gas) wird im straßengebundenen Warentransport, wie z. B. im Schwerlastverkehr, weltweit als **Alternative zu konventionellen flüssigen Kraftstoffen** betrachtet. In Deutschland und Europa kann LNG aus fossilen Quellen zudem als **Brückelösung** für einen zukünftig dekarbonisierten Verkehr im europaweiten Kontext mit geringem Aufwand an benötigter Infrastruktur dienen. Durch eine vollständige **Substitution des fossilen LNG** durch regenerative Gase (insbesondere durch SNG aus Biomasse- und PtG-Prozessen) kann zudem die deutsche Zielvorstellung von 95 Prozent CO<sub>2,äqui</sub>-Emissionsminderung ohne Systemwechsel erreicht werden. Um die vermuteten ökologischen und ökonomischen **Vorteile von LNG im Schwerlastverkehr** zu prüfen, wurde das DVGW-Forschungsvorhaben „Einsatz von LNG in der Mobilität, Schwerpunkte und Handlungsempfehlungen für die technische Umsetzung“ – kurz: **Potenzialanalyse LNG – durchgeführt**.

von: Wolfgang Köppel, Johannes Ruf, Frank Graf (alle: DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des KIT), Frank Burmeister, Alexey Mozgovoy, Rolf Albus (alle: Gas- und Wärme-Institut Essen e. V.), Ronny Erler, Enrico Schuhmann, Marco Henel (alle: DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH)

Der Fernlastverkehr größer 12 Tonnen und Sattelzugmaschinen waren im Jahr 2015 für ca. 45 Prozent des bundesdeutschen Dieselkraftstoffverbrauchs auf der Straße verantwortlich [1, 2]. Für die Zukunft werden dabei noch ca. 50 Prozent höhere Fahrleistungen [1] und dadurch trotz Effizienzverbesserungen keine Emissionssenkungen prognostiziert. Da jedoch die CO<sub>2,äqui</sub>-Emissionen zur Einhaltung der CO<sub>2</sub>-Ziele gesenkt werden müssen, ist ein Strategiewechsel hin zu CO<sub>2</sub>-armen Kraftstoffen wie LNG/CNG und/oder noch effizienteren Fahrzeugtechnologien notwendig. Ferner müssen gerade in Ballungsräumen Verbesserungen der Feinstaub-, der Stickoxid-, der Schwefel- und der Lärmbelastungen erfolgen. Hierfür können straßenbauliche (z. B. Schallschutz) in Kombination mit erheblichen motorischen Maßnahmen (z. B. Abgasnachbehandlungen) eingesetzt oder ebenfalls ein Kraftstoffwechsel angestrebt werden.

Die Anforderungen für den Einsatz von LNG mit Schwerpunkt im Lkw-Bereich wurden im DVGW-For-

schungsvorhaben G7-01-15 „Einsatz von LNG in der Mobilität, Schwerpunkte und Handlungsempfehlungen für die technische Umsetzung“ untersucht. Im ersten Teil werden die Technologien, die vorhandenen technischen Regelwerke und Normen sowie die Potenziale und Märkte von LNG bzw. LNG-Prozessketten beschrieben. Der zweite Teil beschäftigt sich mit der ökologischen Bewertung von LNG im Vergleich zu Diesel als Kraftstoff im Schwerlastverkehr. Abschließend wird ein ökonomischer Vergleich von LNG-betriebenen und von dieselpetriebenen Lkw angestellt.

## Minderungspotenziale verkehrsbedingter Schadstoffemissionen durch den Einsatz von LNG in Deutschland

Neben den CO<sub>2</sub>-Emissionen, die für den Klimawandel mitverantwortlich gemacht werden, sind gesundheitlich bedenkliche Emissionen wie Lärm, Stickoxide oder Feinstaub von besonderer Bedeutung. In Deutschland sind ca. 3.000 Tote pro Jahr auf Verkehrs-

emissionen zurückzuführen [3]. Daneben sind auch diverse gesundheitliche Beeinträchtigungen und Schäden wie z. B. Atemwegserkrankungen, Herzinfarkte und Schlafstörungen [4–10] u. a. auf Verkehrsemissionen zurückzuführen, die zu Kosten im Gesundheitssystem in Höhe von 8 bis 15 Mrd. Euro pro Jahr führen. Davon sind dem Güterverkehr 40 bis 50 Prozent [11–13] zuzurechnen.

## Lärm, Stickoxide und Feinstaub

In **Abbildung 1** ist die Verteilung der betrachteten Emissionen (Feinstaub, Stick- und Schwefeloxide sowie Lärm) aller Sektoren in Deutschland dargestellt. Methodisch werden die vom Umweltbundesamt dokumentierten Überschreitungen [14] der jeweilig gültigen Grenzwerte der Tages- und Jahresmittelwerte aller Messstellen in Deutschland als Daten herangezogen. Es werden Summenwerte dargestellt, um die Regionen zu ermitteln, die eine hohe Anzahl an Überschreitungen aufweisen. Hierfür wird keine Wertung der Schadstoffe vorgenommen, son-

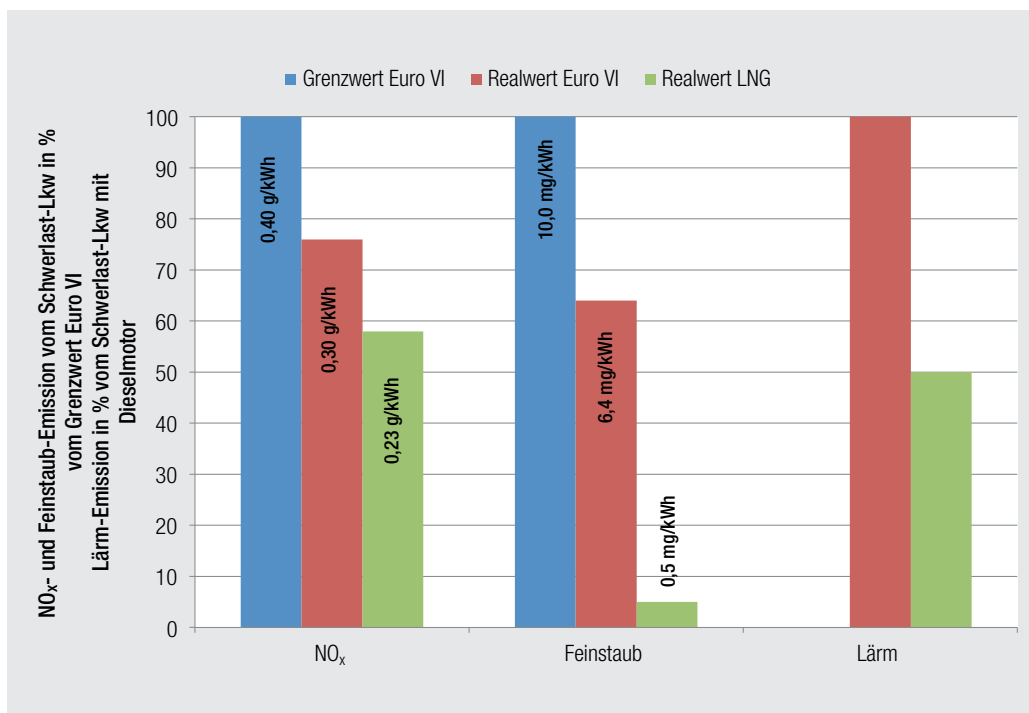
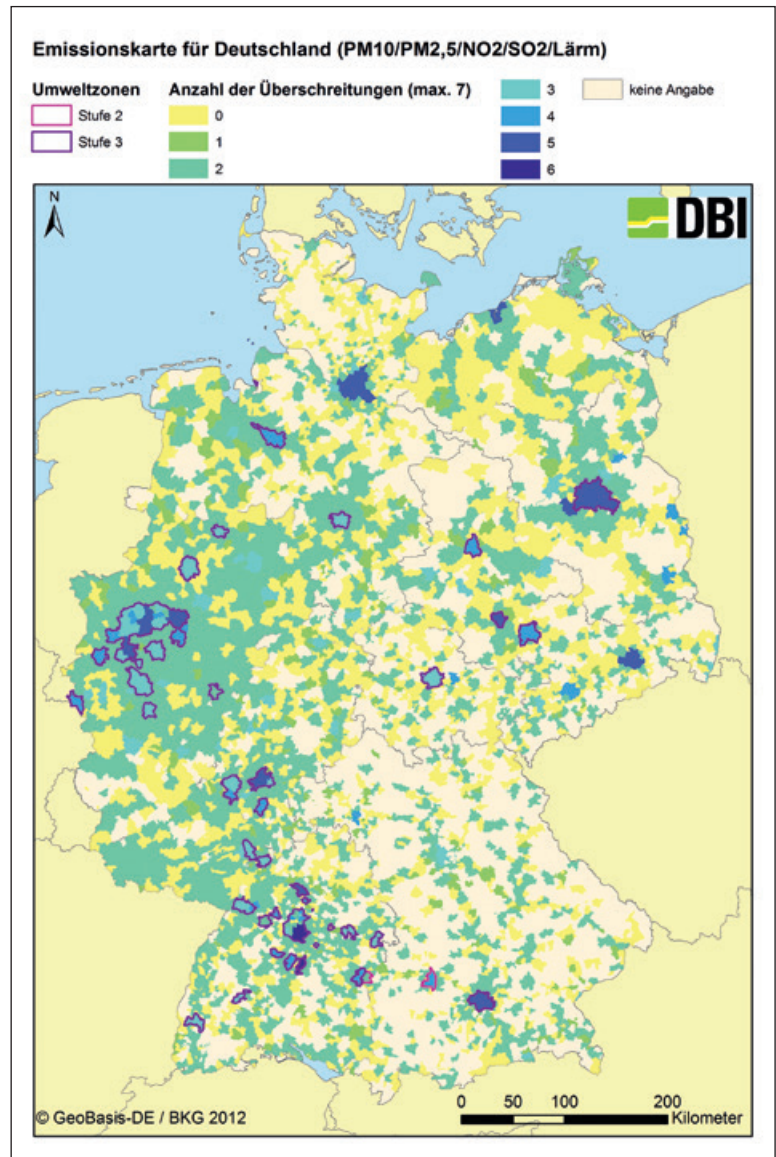
dern alle werden als gleichwertig betrachtet. Im Einzelnen sind die folgenden Emissionen einfließen:

- Feinstaubbelastung PM10 (Tagesmittelwert) 2010–2015 (TMW PM10)
- Feinstaubbelastung PM10 (Jahresmittelwert) 2010–2015 (JMW PM10)
- Feinstaubbelastung PM2,5 (Jahresmittelwert) 2010–2015 (JMW PM2,5)
- Stickstoffoxide 2014
- Schwefelverbindungen 1985–2008
- Lärmbelastung (24-h-Wert) 2012
- Lärmbelastung (nachts) 2012

Zu erkennen ist, dass insbesondere in den Ballungsräumen und an den großen Verkehrsstraßen eine starke Belastung vorliegt.

Beim Einsatz von LNG im Schwerlastverkehr sowie CNG im sonstigen Güter- und Personenverkehr können deutliche Verbesserungen der Schadstoffemissionen  $\text{NO}_x$  (-23 Prozent), Feinstaub (-92 Prozent) und Lärm (-50 Prozent) gegenüber Dieselmotoren neuester Generation, die die Euro-VI-Grenzwerte sogar unterschreiten, erzielt werden (Abb. 2). Aufgrund der guten Verbrennungseigenschaften von LNG und CNG werden diese Verbesserungen im Gegensatz zum Dieselmotor mit relativ geringem technischem Aufwand erreicht.

Unter Beachtung, dass der Güterverkehr beim Lärm bzw. bei den  $\text{NO}_x$  für 47 Prozent bzw. für



**Abb. 1:** Regionale Verteilung der kumulierten Grenzwertüberschreitungen innerhalb eines Jahres verschiedener Emissionen (PM10 JMW; PM10 TMW; PM2,5 JMW; NO2 JMW; SO2 JMW; Lärm 24h; Lärm nachts) JMW: Jahresmittelwert; TMW: Tagesmittelwert, PM: Feinstaub

**Abb. 2:** Emissionsminderungspotenzial von LNG und Dieselmotoren im Vergleich zu den Euro VI-Grenzwerten

**Tabelle 1: Verkehrsemissionen, verursacht durch den Güterverkehr [18-22]**

	Emissionsanteil Güterverkehr in % bezogen auf Gesamtemission Verkehr
Lärm	47
Feinstaub	14
Stickoxide	41

Quelle: [18 - 22]

41 Prozent der verkehrsbedingten Emissionen (Tab. 1) verantwortlich ist und dass laut KBA im Januar 2016 ca. 51 Prozent der Lkw und Sattelzüge lediglich Euro-V- bzw. 33 Prozent nur Euro-III-Standard einhielten, kann in erster Näherung mit deutlichen Emissionsminderungspotenzialen von mehr als 37 Prozent für NO<sub>x</sub> und ca. 43 Prozent für Lärm (Lkw und Pkw) gerechnet werden. Beim Feinstaub könnten etwa 14 Prozent der verkehrsbedingten Feinstaub-Emissionen (Lkw und Pkw) vermieden werden.

Diese Vermeidungspotenziale können zukünftig weiter erhöht werden, da das Entwicklungspotenzial von LNG-Motoren deutlich höher ist als das der technisch ausgereiften Dieselmotoren.

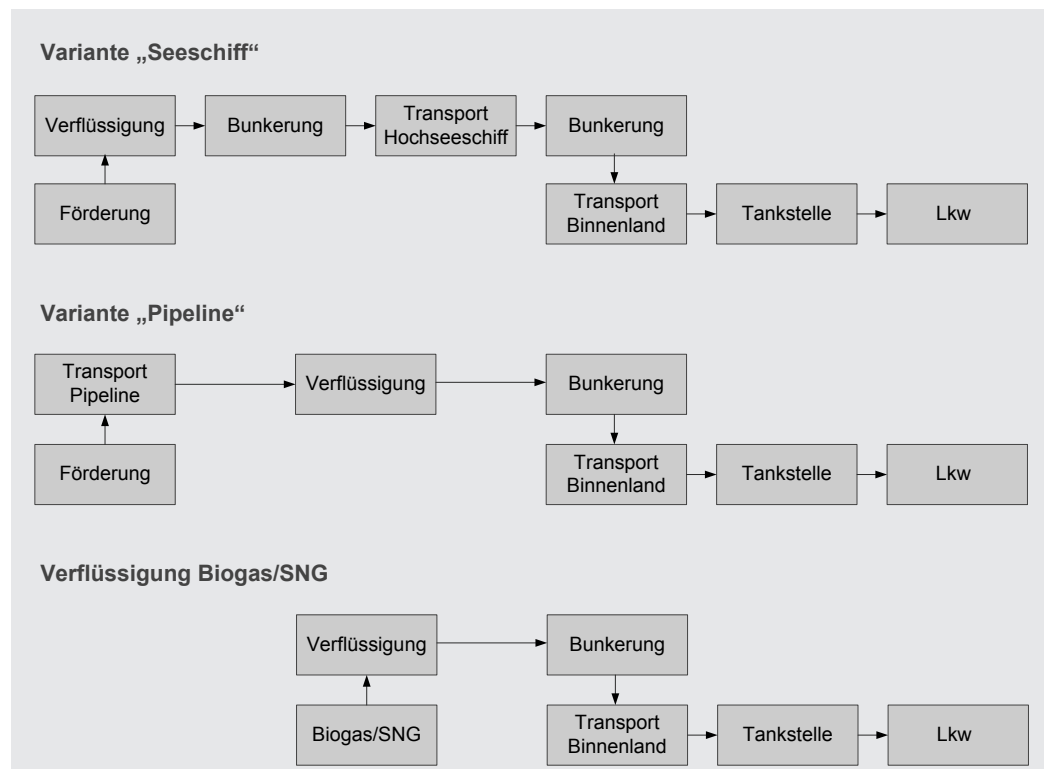
### Fossile Kohlenstoffdioxidemission

Gegenüber Diesel hat LNG (im Wesentlichen Methan) einen ca. 25 Prozent geringeren

Kohlenstoffanteil. Die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen sind somit trotz des heute noch höheren spezifischen Verbrauchs beim LNG-Lkw deutlich geringer. Für eine umfassende Bewertung muss allerdings noch die Vorkette von der Förderung bis zur Kraftstoffbereitstellung an der Tankstelle berücksichtigt werden. Hierbei werden u. a. der Aufwand für den Transport inklusive Förderung und Verflüssigung bzw. Kompression und die freigesetzten Methanemissionen während des Transports einbezogen. Das in Europa benötigte LNG stammt im Wesentlichen aus Katar, Trinidad und Tobago, Norwegen, Algerien und Nigeria. Für Deutschland günstige Terminals sind Rotterdam und Zeebrügge sowie zukünftig Swinemünde.

Die Verflüssigung von Erdgas wird üblicherweise in großen Anlagen am Ort der Förderung durchgeführt. Teilweise werden kleine Anlagen am Ort des Verbrauchs aus Pipelinegas, z. B. für Peak-Shaving, eingesetzt. Seit wenigen Jahren werden Kleinanlagen auch für die Verflüssigung von Biogas betrieben. Die Kapazitäten kleiner Anlagen betragen 1 bis 50 Tonnen LNG/Tag. In Deutschland existiert z. B. eine Anlage in Stuttgart aus dem Jahr 1972 mit einer Produktionsleistung von ca. 110 t/d [23]. Die Wirkungsgrade kleiner Anlagen liegen zwischen 74 und 84 Prozent [24-41]. Großanlagen mit Verflüssigungskapazität

**Abb. 3: Betrachtete Prozessketten**



Quelle: die Autoren

**Tabelle 2: Betrachtete Varianten mit und ohne Maßnahmen zur Senkung der CO<sub>2,äqui</sub>-Emissionen, Abwärmenutzung und Einsatz von EE-Strom zur Verflüssigung**

Variante	Bezeichnung	Zusammensetzung LNG	LNG-/LBG- und SNG-Erzeugung in D	Maßnahmen zur Senkung von CO <sub>2,äqui</sub> -Emissionen	
				Anteil der genutzten Abwärme	Verflüssigung mit EE-Strom
„Pipeline“ ohne Maßnahmen zur CO <sub>2,äqui</sub> -Senkung	P0	100 % Erdgas	ja	-	nein
„Pipeline“ mit Maßnahmen zur CO <sub>2,äqui</sub> -Senkung	P1	50 % Erdgas 50 % Biogas	ja	20 %	ja
„Seeschiff“ ohne Maßnahmen zur CO <sub>2,äqui</sub> -Senkung	S0	100 % Erdgas	nein	-	nein
„Seeschiff“ mit Maßnahmen zur CO <sub>2,äqui</sub> -Senkung	S1	50 % Erdgas 50 % Biogas	Erdgas: nein Biogas: ja	Erdgas: nein Biogas: 20 %	Erdgas: nein Biogas: ja
LNG-Referenz [45]	RLNG	100 % Erdgas	nein	-	nein
Diesel-Referenz [45]	RD	100 % Diesel	-	-	-

Quelle: die Autoren

kapazitäten von mehreren 1.000.000 t/a weisen Wirkungsgrade zwischen 87 und 94 Prozent auf [23, 42–44], da optimierte Kälteprozesse eingesetzt werden können, die für Kleinanlagen zu teuer sind.

Für die energetische bzw. klimawirksame Bewertung wurden beispielhaft zwei Pfade zur Bereitstellung von LNG aus Erdgas untersucht (Abb. 3). Bei der Variante „Seeschiff“ wird LNG am Ort der Erdgasförderung hergestellt und per Schifftransport über eine Strecke von 10.000 km (z. B. aus Trinidad oder USA) nach Europa geliefert. Bei der Variante „Pipeline“ wird das Erdgas zunächst per Pipeline vom Ort der Gewinnung über 5.000 km (z. B. Russland) nach Europa transportiert und dann in Europa am Ort der Nutzung verflüssigt. Für beide Varianten werden alle wesentlichen Prozess- und Transportschritte von der Förderung bis hin zur Nutzung des Kraftstoffs im Lkw berücksichtigt.

In beiden Varianten werden modernste Technologien für Verflüssigung und Transport betrachtet, die hohe energetische Wirkungsgrade und geringe Methanschlupfe ermöglichen. In der Variante „Seeschiff“ kommen

große Verflüssigungsanlagen mit mehr als 50.000 t/d zum Einsatz. Dagegen werden bei der Variante „Pipeline“ kleine Verflüssigungsanlagen mit ca. 20.000 t/d für die Erdgasverflüssigung betrachtet. Für den Fall der Beimischung von Biogas (LBG) und PtG-Methan (SNG) sind dezentrale Biogas-/SNG-Verflüssigungsanlagen mit 10 bis 50 t/d vorgesehen. Vorteilhaft ist hierbei, dass LNG, das bis zu 98 Prozent aus Methan besteht und ansonsten nur weitere leichte Kohlenwasserstoffe wie Ethan, Propan und Butan aufweist, ohne Restriktionen durch Biogas und SNG (z. B. über

den Pfad Power-to-Gas) substituiert werden kann. Neben der Beimischung bzw. Substitution von fossilem LNG durch regenerative Gase können zur weiteren Dekarbonisierung von fossilem LNG noch die Nutzung der bei der Kompression anfallenden Abwärme als Prozesswärme oder als Nah-/Fernwärme in angrenzenden Industrien oder Wohngebieten sowie der Einsatz von regenerativem Strom zur Verflüssigung beitragen.

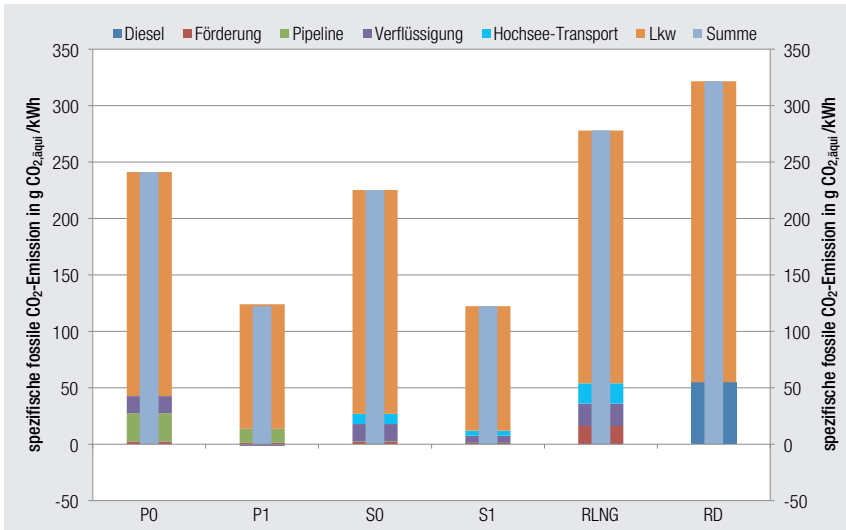
Grundsätzlich sind diese ökologischen Maßnahmen an allen LNG-Produktionsstandorten möglich, werden aber

**Tabelle 3: Spezifische Treibhausgasemission CO<sub>2,äqui</sub> der Prozessschritte [16, 23, 24, 50–64]**

	Bezug auf	Einheit	Wert
Förderung Erdgas	LNG	g/kWh	2,5
Verflüssigung in Großanlagen	LNG	g/kWh	15,2
Seetransport LNG	LNG	g/kWh	9
Pipelinetransport Erdgas	LNG	g/km/kWh	0,005
Verflüssigung in Kleinanlagen	LNG	g/kWh	45
Erzeugung Windstrom	Strom	g/kWh	15
Erzeugung Biogas aus Müll	Biogas	g/kWh	22
PtG aus Wind	SNG	g/kWh	27,3
LNG-Nutzung in Lkw	LNG	g/kWh	198,5
Diesel-Nutzung in Lkw	Diesel	g/kWh	266,7

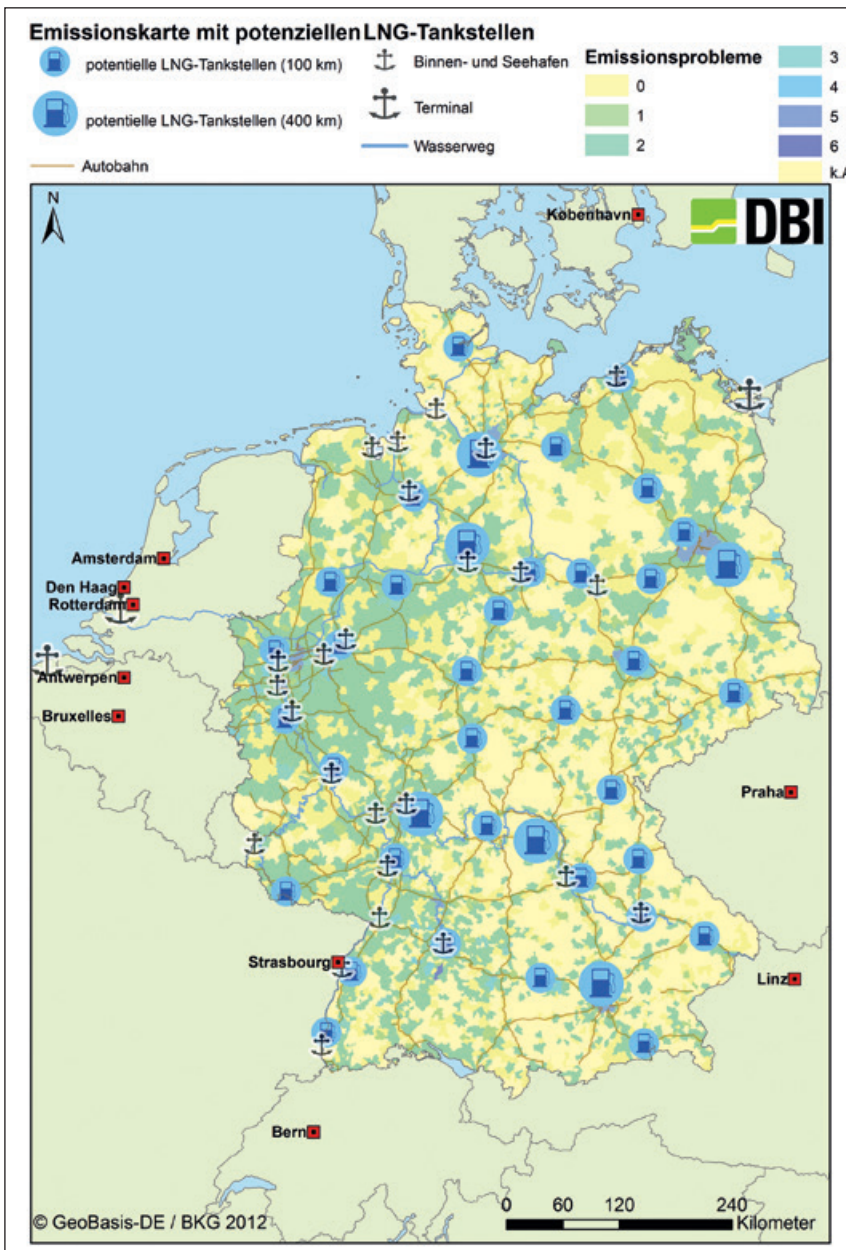
Quelle: die Autoren





Quelle: [16, 23, 24, 45–49, 50–64] und eigene Rechnungen

Abb. 4: Spezifische Treibhausgasemissionen für die untersuchten Prozessketten



Quelle: die Autoren

Abb. 5: Identifizierte Standorte für potenzielle LNG-Tankstellen in Deutschland

voraussichtlich zuerst in Europa umgesetzt. Daher wird nur für die Variante „Pipeline“ eine Betrachtung aller drei Maßnahmen zur Dekarbonisierung von LNG und bei der Variante „Seeschiff“ nur die partielle Substitution durch Biogas in Deutschland betrachtet (Tab. 2). Zu Vergleichszwecken werden aus [45] eine konventionelle LNG-Kette entsprechend Variante „Seeschiff“ und eine Diesel-Prozesskette herangezogen.

Mit den Daten aus Tabelle 3, die die in dieser Studie auf Basis der Literatur [16, 23, 24, 50–64] angenommenen spezifischen Treibhausgasemissionen auflistet, und den angenommenen spezifischen Verbräuchen von LNG- und Diesel-Lkw von 0,29 kg LNG/km und 0,3 l Diesel/km [46–49] werden die spezifischen Treibhausgasemissionen für die untersuchten Prozessketten bestimmt (Abb. 4). Zu erkennen ist, dass die optimierten Prozessketten P0 bzw. S0 verglichen mit RLNG [45] ca. 13 Prozent bzw. ca. 19 Prozent weniger CO<sub>2,äqui</sub> emittieren. Die Vorteile generieren sich im Wesentlichen aus der Annahme, dass moderne und effiziente Anlagen und Schiffe eingesetzt werden. Gegenüber Diesel (Variante RD [45]) steigt der Vorteil auf max. 30 Prozent an. Selbst in der Referenz [45] weist das LNG (Variante RLNG) einen CO<sub>2,äqui</sub>-Emissionsvorteil von ca. 14 Prozent gegenüber RD [45] auf.

Wenn zusätzlich eine Beimischung von 50 Prozent LBG zur Senkung der CO<sub>2,äqui</sub>-Emissionen realisiert wird (Varianten P1 und S1), lassen sich Emissionsenkungen bis zu 64 Prozent erzielen. Zudem wäre der sukzessive Austausch von fossilem LNG durch biogenes oder strombasiertes LNG ohne Verteilinfrastrukturmaßnahmen und ohne Änderung der Fahrzeugantriebe und somit ohne weitere Kosten in der Verteilung und Nutzung möglich.

### Infrastruktur

Die Infrastruktur gilt als eine wesentliche Voraussetzung zum Gelingen einer Markteinführung. Hierzu wurde in

der Studie eine Untersuchung der minimal notwendigen Standorte für LNG-Tankstellen in Deutschland durchgeführt. Hierfür wurden relevante Daten zu Logistikzentren, Auto- und Rastplätzen, Verkehrsströmen sowie LNG-Transportwegen georeferenziert und anschließend potenzielle Tankstellenstandorte identifiziert. In einem weiteren Schritt wurden die folgenden Randbedingungen mit den potenziellen Standorten verglichen und bewertet, sodass ein minimal notwendiges Tankstellennetz definiert werden konnte:

- Tankstellenentfernung möglichst gering zu Transportrouten und -zentren (maximale Entfernung Luftlinie 5 km)
- Tankstellen im nahen Ausland werden mit einbezogen
- maximaler Abstand von Tankstellen für den Fernlastverkehr im In- und Ausland darf 400 km nicht überschreiten
- maximaler Abstand von Tankstellen für den regionalen Transport im In- und Ausland darf 100 km nicht überschreiten
- Einbindung der Häfen der Binnenschifffahrt

Im Ergebnis werden mindestens sechs Tankstellen für den Fernlastverkehr benötigt. Wenn auch der regionale Transport bedient werden soll, sind insgesamt 40 Tankstellen erforderlich (Abb. 5).

Deutlich wird bei einer zweistufigen Vorgehensweise, dass die erste Stufe mit sechs Tankstellen sehr schnell und auch relativ kostengünstig umgesetzt werden kann. Hierbei ist wichtig, dass dieses Konzept im europäischen Kontext geplant wird. Die zweite Stufe der regionalen LNG-Versorgung ist mit vergleichsweise geringerem Aufwand und Kosten verbunden. Dies bedeutet, dass eine Umsetzung kurzfristig erfolgen kann. Die geringen Kosten und die Möglichkeit des stufenweisen Ausbaus haben zudem den Vorteil, dass die Kosten in der Anfangszeit überschaubar bleiben, obwohl paral-

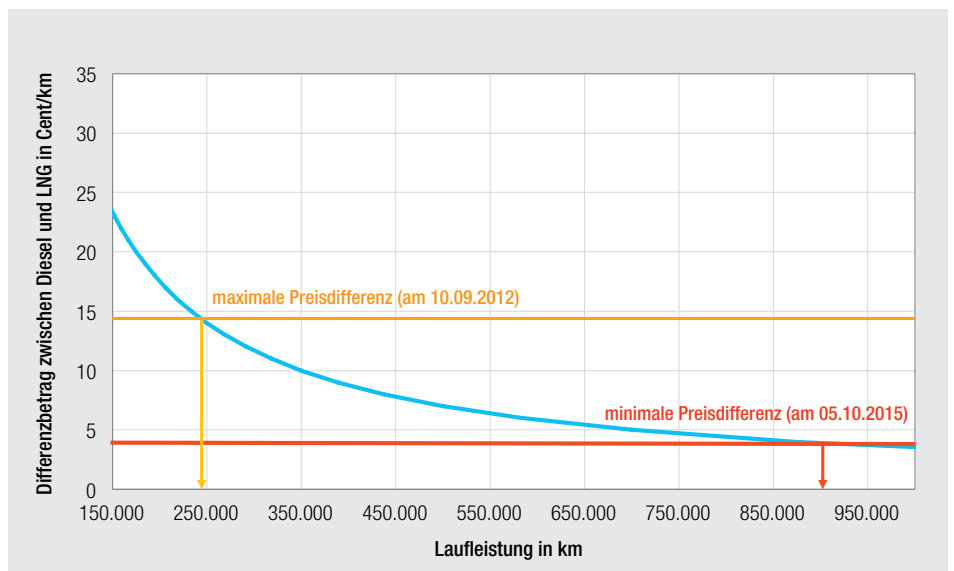


Abb. 6: Kostendifferenz Diesel – LNG

Quelle: [66, 67]

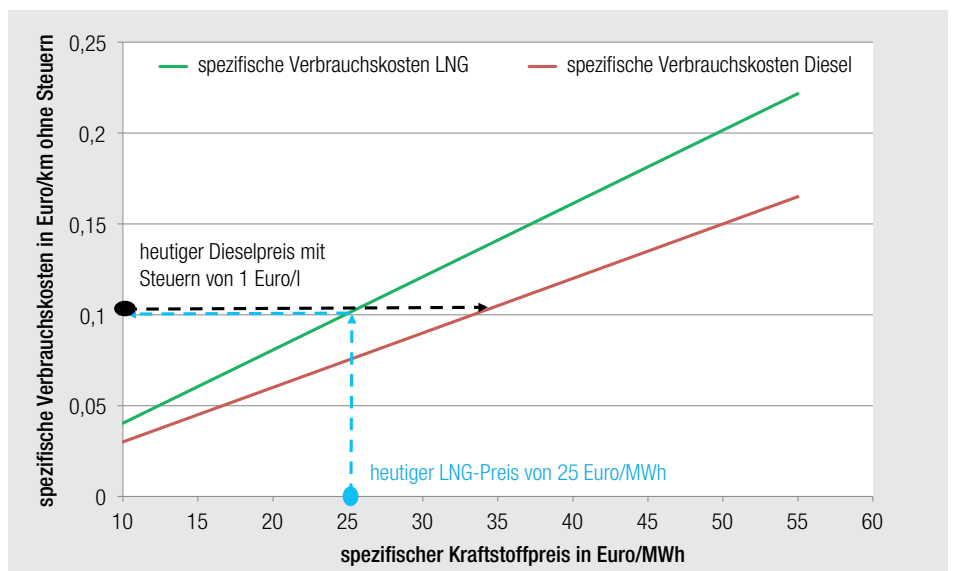


Abb. 7: Kostenvergleich von LNG und Diesel zu heutigen Kraftstoffkosten

Quelle: die Autoren

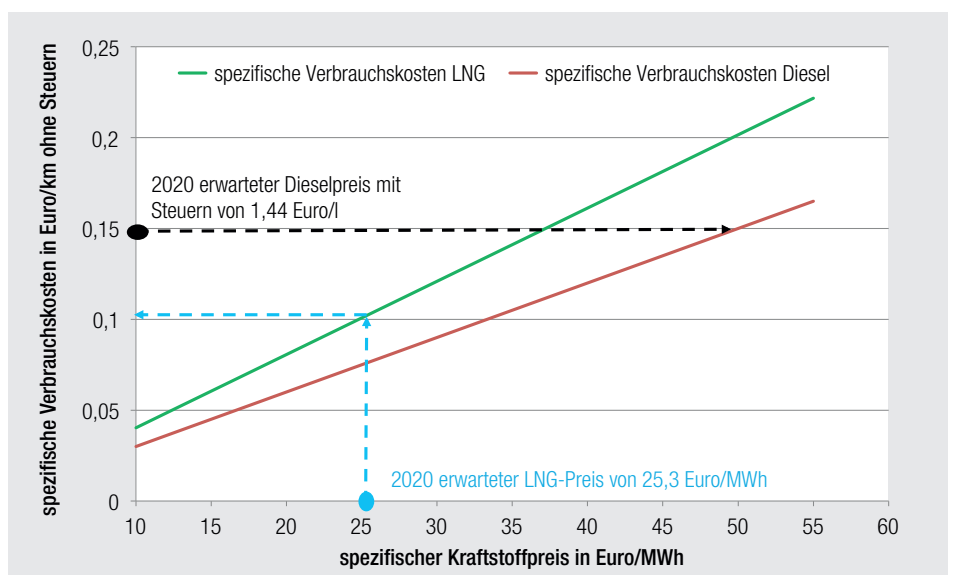


Abb. 8: Kostenvergleich von LNG und Diesel zu erwarteten Kraftstoffkosten 2020

Quelle: die Autoren

lele Systeme benötigt werden und zu Beginn eine geringe Auslastung der Tankstellen zu erwarten ist.

### Kosten

Aufgrund des starken internationalen Konkurrenzdruckes agieren Spediteure äußerst kostenoptimiert, sodass die höheren Anschaffungskosten von LNG-Lkw durch geringere Kraftstoffkosten kompensiert werden müssen. In **Abbildung 6** ist die Kostendifferenz Diesel – LNG über der Laufleistung aufgetragen. Zu erkennen ist, dass heute aufgrund der niedrigen Dieselpreise sehr hohe Laufleistungen von über 900.000 km zur Amortisation benötigt werden. Hohe Dieselpreise bei gleichzeitig niedrigen LNG-Preisen, wie sie z. B. 2012 vorlagen, benötigen eine moderate Laufleistung von ca. 250.000 km, welche in der Regel nach ca. drei Jahren erreicht wird [65].

Die heutige Situation ist in der Kostenanalyse zum Verbrauch in **Abbildung 7** dargestellt. Der Unterschied der spezifischen Kraftstoffverbrauchskosten zeigt deutlich, dass kaum Spielraum für erhöhte Fahrzeugkosten zur Verfügung steht. Im Jahr 2020 bei einem prognostizierten steigenden Dieselpreis und einem nahezu gleichbleibenden LNG-Preis zeigt sich eine positive Situation für das LNG (**Abb.8**). Der LNG-Preis kann als relativ konstant betrachtet werden, da sich in den letzten Jahren durch Inbetriebnahme von neuen Verflüssigungsanlagen mit einer jährlichen Produktionskapazität von jeweils mehreren Millionen Tonnen LNG ein Überangebot an LNG entwickelt hat. 2020 würden schon ca. 650.000 km Laufleistung ausreichen, um eine Kompensation innerhalb von ca. 6,5 Jahren zu erreichen. Zu beachten ist jedoch, dass die LNG-Motoren bis dahin weiter entwickelt werden und einen geringeren Verbrauch aufweisen können. Somit würde sich die für eine Kompensation benötigte Laufleistung verringern. Ferner ist davon auszugehen, dass bei höheren Lkw-Verkaufszahlen die Preise fallen werden, sodass die hier dargestellte Kostenrechnung sehr kon-

servativ ist und in der Zukunft sogar deutlich positiver ausfallen dürfte.

### Fazit

LNG wird als Alternative im Schwerlastverkehr diskutiert. LNG weist ohne Beimischung regenerativer Gase nach den Ergebnissen der „Potenzialanalyse LNG“ gegenüber Diesel bis zu 30 Prozent weniger CO<sub>2,äqui</sub> auf. Dies bedeutet, dass bei einer vollständigen Umstellung des Schwerlastverkehrs (N3) auf LNG in erster Näherung ca. 14 Mio. Tonnen fossiles CO<sub>2</sub> eingespart werden könnten. Zusätzlich kann LNG relativ einfach und kurzfristig durch Biogas und mittel- bis langfristig durch PtG-Methan komplett substituiert und somit CO<sub>2</sub>-neutral werden.

Ein weiterer positiver Effekt von LNG sind die kurzfristig zu erreichenden Emissionsminderungen des verkehrsbedingten Feinstaubes um ca. 14 Prozent, der verkehrsbedingten NO<sub>x</sub> um ca. 37 Prozent und der verkehrsbedingten Lärmemissionen um ca. 43 Prozent im Vergleich zu Diesel. Um diese Vorteile heben zu können, werden für den Fernschwerlasttransport in Deutschland nur sechs Tankstellen an den Fernstraßen benötigt. Weitere 34 Tankstellen sind für eine flächendeckende Mindestversorgung des regionalen Transportverkehrs ausreichend, was zu einer zeitnahen Umsetzung der politischen Forderung zur Dekarbonisierung des Mobilitätssektors beiträgt.

Die ökonomische Analyse ergab, dass eine Kompensation der höheren Lkw-Investition beim heutigen Preisgefüge nicht innerhalb der üblichen Laufzeiten der Lkw möglich ist. Erst in naher Zukunft und bei steigenden Dieselpreisen kann der LNG-Lkw kostengünstiger als der Diesel-Lkw sein. Die dabei zu erwartenden fallenden Lkw-Preise sowie verbesserte LNG-Motoren würden die Situation weiter verbessern.

In der Studie konnte somit gezeigt werden, dass LNG eine schnell umsetzbare Alternative zu Diesel mit einem ge-

ringen Infrastrukturaufwand und mit einem hohen CO<sub>2</sub>-, NO<sub>x</sub>- und Lärm-Minderungspotenzial ist. Ebenfalls wurde gezeigt, dass LNG durch die Möglichkeit der vollständigen Substitution des Erdgases durch SNG/Biogas einen wichtigen Beitrag zur Dekarbonisierung leisten kann und damit eine zukunftsfähige Option darstellt.

Die Literatur zu diesem Beitrag steht auf [www.energie-wasser-praxis.de](http://www.energie-wasser-praxis.de) zum Download zur Verfügung. ■

### Die Autoren

Kontakt:  
Wolfgang Köppel  
DVGW-Forschungsstelle am  
Engler-Bunte-Institut des Karlsruher  
Instituts für Technologie  
Gastechnologie  
Engler-Bunte-Ring 3  
76131 Karlsruhe  
Tel.: 0721 9640-223  
E-Mail: [koeppel@dvwg-ebi.de](mailto:koeppel@dvwg-ebi.de)  
Internet: [www.dvbw-ebi.de](http://www.dvbw-ebi.de)

Alexey Mozgovoy  
Gas- und Wärme-Institut Essen e. V.  
Hafenstr. 101  
45356 Essen  
Tel.: 0201 3618-250  
E-Mail: [mozgovoy@gwi-essen.de](mailto:mozgovoy@gwi-essen.de)  
Internet: [www.gwi-essen.de](http://www.gwi-essen.de)

Ronny Erler  
DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH  
Karl-Heine-Str. 109/111  
04229 Leipzig  
Tel.: 03731 4195-328  
E-Mail: [ronny.erler@dbi-gruppe.de](mailto:ronny.erler@dbi-gruppe.de)  
Internet: [www.dbi-gut.de](http://www.dbi-gut.de)