



UNIVERSITÉ
DE LORRAINE

IAE METZ
École Universitaire
de Management

wirtschafts
wissenschaften
htw saar

Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes
Fakultät für Wirtschaftswissenschaften
Université de Lorraine
Studiengang: DFHI Management Sciences
Spezialisierung: Supply Chain Management

Technischer, ökonomischer und ökologischer Vergleich von Diesel- und LNG-Fahrzeugen im Straßengüterverkehr

Mathilda Ally
123 chemin de la grand font
34980 Montferrier-sur-lez
m.ally@ei-montpellier.com
Matrikel- Nr.: 3773205

Betreuender Dozent: Dr. Prof. Bousonville
Abgabedatum: 30.09.2019

DANKSAGUNG

Ich möchte mich bei allen bedanken, die mich in diesen letzten Jahren des Master-Studiums und insbesondere beim Schreiben dieser Masterarbeit unterstützt haben.

An erster Stelle möchte ich meinen ganzen Dank meinem Betreuer, Herrn Bousonville, für seine Verfügbarkeit und seine wertvollen Ratschläge ausdrücken.

Gleichzeitig möchte ich mich bei Jerome Schüssler, Geschäftsführer von J.S.Logistics bedanken, der mir vertraut hat, an diesem Projekt zu arbeiten. Weiter gebührt ein großes Dankeschön an Herrn Gross für die sehr angenehme Zusammenarbeit.

Außerdem möchte ich meiner Mutter, meiner Tante Christina und meinen Kommilitonen Erik und Fabienne für das Korrekturlesen meiner Masterarbeit herzlich danken.

Im Übrigen möchte ich mich auf Französisch an folgende Personen wenden, die mich unterstützt haben.

Un grand merci à Joseph Azin et Mandy Garcia de la SAMAT Toulouse, pour m'avoir ouvert les portes de leur entreprise et avoir généreusement partagé avec moi connaissances et expériences.

Je tiens à remercier chaleureusement mes parents pour leur soutien inconditionnel, sans qui mes six années d'études n'auraient pas été possibles. Ainsi que ma sœur Julia, ma plus fidèle supportrice, qui m'a hébergé durant les six mois de mon alternance sur son canapé avec la plus grande générosité et bienveillance.

J'aimerais ensuite remercier Cédric Volle, pour son soutien sans faille, qui a toujours su trouver les mots pour me motiver, ainsi que sa famille qui m'a accueilli et encouragé si souvent.

Pour finir, un grand merci à mes dix camarades franco-allemands de la promotion de Management Sciences de l'ISFATES, pour leur soutien à l'université d'abord, mais surtout pour avoir fait de mes deux années de Master, une expérience incroyablement belle et enrichissante.

I. INHALTSVERZEICHNIS

I. INHALTSVERZEICHNIS

II. ABBILDUNGSVERZEICHNIS

III. TABELLENVERZEICHNIS

IV. ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

1. Einleitung.....	1
1.1 Motivation für das Thema	1
1.2 Präzisierung der Themenstellung.....	1
1.3 Kurze Vorstellung der Spediteure	2
2. LNG-Fahrzeugentwicklung	4
2.1 Energiebedarf im Straßengüterverkehr.....	4
2.1.1 Wachsender Kraftstoffverbrauch	4
2.1.2 Ökologischer Notstand.....	5
2.1.3 Entwicklung von neue Antrieben	8
2.2 Präsentation von flüssigem Erdgas (LNG).....	9
2.2.1 Technische Eigenheiten.....	9
2.2.2 Wachsender Bedarf für flüssiges Erdgas.....	10
2.3 LNG als LKW Antrieb	11
2.3.1 Geschichte von Erdgas in der Automobilindustrie	12
2.3.2 Unterschied zwischen CNG, LNG und Bio-LNG	12
2.4 LNG Lastkraftwagen Marktentwicklung	14
2.4.1 Weltweite Entwicklung.....	14
2.4.2 Entwicklung in der Europäischen Union	15
2.4.3 Entwicklung in Frankreich	16
2.4.4 Entwicklung in Deutschland	16
3. Rechtsrahmen und Förderungen in der Europäische Union	18
3.1 Regulatorisches Umfeld der EU	18
3.1.1 Richtlinie 2014/94/UE – Infrastruktur der Entwicklung	18
3.1.2 Euro-Normen	19
3.2 Nationale Förderungen	20
3.2.1 Frankreich.....	20
3.2.2 Deutschland.....	22
3.3 Einschränkungen in Umweltzonen	23
3.3.1 Funktionsweise.....	23
3.3.2 Deutschland.....	24

3.3.3	<i>Frankreich</i>	25
3.3.4	<i>Vorteil für LNG-Fahrzeuge</i>	26
4.	Ökologischer Vergleich	27
4.1	Treibhausgase	27
4.1.1	<i>Tank-to-Wheels (TTW)</i>	27
4.1.2	<i>Well-to-Wheels (WTW)</i>	28
4.2	Schadstoffemissionen	30
4.2.1	<i>Vergleich von Emission</i>	30
4.2.2	<i>Tests unter reellen Bedingungen</i>	31
4.2.3	<i>Einhaltung der Euronorm VI</i>	34
4.2.4	<i>Auswirkungen auf die Gesundheit</i>	36
4.3	Lärmbelastung	37
4.3.1	<i>Emissionsvergleich und Wirkungen auf die Gesundheit</i>	37
4.3.2	<i>Vorteil für Stadtlieferungen</i>	38
4.3.3	<i>Beispiel von Paris</i>	39
4.4	Bio-LNG Perspektive	40
4.4.1	<i>Eigenschaften</i>	40
4.4.2	<i>Treibstoffemissionen</i>	40
4.4.3	<i>Verfügbarkeit</i>	42
5.	Technischer Vergleich	44
5.1	Tankstellen-Netzwerk	44
5.1.1	<i>Entwicklung europaweit</i>	44
5.1.2	<i>Entwicklung Deutschland</i>	46
5.1.3	<i>Entwicklung Frankreich</i>	47
5.2	Betankungen	48
5.2.1	<i>Tankstellen</i>	48
5.2.2	<i>Betankungsvorgang</i>	49
5.3	Technische Unterschiede bei Fahrzeugen	50
5.3.1	<i>Fahrzeugangebot</i>	50
5.3.2	<i>Fahrerlebnis</i>	51
6.	Wirtschaftlicher Vergleich	53
6.1	Wichtige Kostenarten	53
6.1.1	<i>Fahrzeuge</i>	53
6.1.2	<i>Kraftstoffpreise</i>	54
6.1.3	<i>Rentabilitätsschwelle</i>	55
6.2	Einfluss von Förderungen	56
6.2.1	<i>Förderungen in Frankreich und Deutschland</i>	56
6.2.2	<i>Perspektivische Wirtschaftlichkeit</i>	57

6.3	Interesse der Kunden	58
6.3.1	Spediteure	58
6.3.2	Kunden	59
7.	Fallstudie J.S.Logistics	61
7.1	Anfrage des Spediteurs	61
7.2	Studie der technischen Machbarkeit	61
7.2.1	Definition der Betriebsbedingungen	61
7.2.2	Auswahl der Strecke	62
7.2.3	Auswahl der Tankstellen	63
7.3	Studie der Kosten	65
7.3.2	Diskussion der Ergebnisse	67
7.3.3	Entgangene Gewinne	69
7.4	Studie des ökologischen Unterschieds	70
7.4.1	Methodik	70
7.4.2	Klassifikationsmethode	70
7.4.3	Anwendung auf die Fallstudie	72
7.5	Abschluss der Fallstudie	77
8.	Schlussteil	78
	LITERATURVERZEICHNIS	80
	ANHANG A: Bilder Fahrzeuge SAMAT Toulouse	86
	ANHANG B: Bilder Intermarché Villeneuve-les-Béziers	87
	ANHANG C: Excel Tabellen	89

II. ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Erdölnachfrage nach Sektor in 2015	4
Abbildung 2: Energiekonsum in der Transport Branche	5
Abbildung 3: Bestand, Fahrleistung und CO ₂ -Emissionen von Nutzfahrzeugen in Deutschland im Jahr 2016 nach zulässigem Gesamtgewicht	7
Abbildung 4: Vergleich der molekularen Zusammensetzung zwischen Erdgas und Diesel.....	10
Abbildung 5: Erdgas Endverbrauch nach Sektoren Weltweit in 2015.....	11
Abbildung 6: Einsatzbereich bei LKW und PKW	13
Abbildung 7: Entwicklung von Euro-Normen Einschränkungen für schwerer LKW	20
Abbildung 8: Process „Well-to-Wheels“	28
Abbildung 9: Verschiedene Zusammensetzungen von LNG nach Herkunft.....	29
Abbildung 10: Vergleich von Studien gemäß Treibstoffemissionen Unterschied zwischen LNG und Diesel	30
Abbildung 11: Ergebnisse des ‚Projet Equilibre‘: Vergleich der Treibstoffemissionen (CO ₂) zwischen Diesel- und LNG-Schwerlastkraftwagen (40t)	33
Abbildung 12: Ergebnisse des ‚Projet Equilibre‘: Vergleich der Stickoxid (NO _x) Emissionen zwischen Diesel- und LNG-Schwerlastkraftwagen (40t)	33
Abbildung 13: Vergleich Emissionswerte von Iveco LKW (Cursor 8) im Vergleich mit Euro Normen V und VI	35
Abbildung 14: Lieferungs-Einschränkungen in Paris	39
Abbildung 15: Maximal Bio-Erdgas Herstellung in die Europäische Union in 2030 im Vergleich zu den zukünftigen Bedarf in die Transport Branche	42
Abbildung 16: Anzahl an LNG-Tankstellen in Europa in 2019	44
Abbildung 17: Ergebnisse der ‘LNG Blue Corridor Project’	45
Abbildung 18: Aktuellen LNG-Tankstellen in Deutschland	47
Abbildung 19: Tankstellen in Frankreich	48
Abbildung 20: Betankung eines LNG-Lastfahrzeugs	50
Abbildung 21: Betriebskosten Unterschied zwischen LNG und Diesel in Deutschland und Frankreich (in €)	55
Abbildung 22: Karte Strecke Kitzbühel bis Madrid mit LNG-Fahrzeug	64
Abbildung 23: Vergleich von CO ₂ - und NO _x - Emissionen für die Rundfahrt	76

III. TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Entwicklung der TICPE zwischen 2014 und 2017 für Erdgas und Diesel	21
Tabelle 2: Klassifizierung von Umweltplakette für Busse und LKW (>3,5t)	24
Tabelle 3: Klassifizierung von Umweltplaketten für Busse und LKW (>3,5t)	25
Tabelle 4: Vergleich von Schadstoffausstoß zwischen LNG und Diesel.....	31
Tabelle 5: LNG-Sattelzug Angebot	50
Tabelle 6: Kraftstoffpreise in Deutschland und Frankreich.....	54
Tabelle 7: Kraftstoffpreise in Deutschland und Frankreich für 100 km	54
Tabelle 8: Einschätzung von Kosten Position für LNG und Diesel-LKWS (44t) in Frankreich und Deutschland	56
Tabelle 9: Ausgewählte Strecke mit LNG-Fahrzeug.....	64
Tabelle 10: Vergleich der LNG- und der Diesel-Strecke.....	65
Tabelle 11: Kostenanalyse der Strecke Kirkel bis Madrid mit LNG- und Diesel-Antrieben	67
Tabelle 12: Kostenanalyse Hin- und Rückfahrt zwischen LNG und Diesel.....	68
Tabelle 13: Kostenanalyse der aktuelle Strecke (Kirkel-Schongau) mit LNG und Diesel	69
Tabelle 14: Kilometerzahl nach Straßen Klassifizierung für die Strecke Kirkel/Madrid mit LNG- und Diesel-Fahrzeuge.....	73
Tabelle 15 : CO ₂ -Emissionen für die Strecke Kirkel/Madrid mit LNG- und Diesel-Fahrzeuge	74
Tabelle 16: NO _x -Emissionen für die Strecke Kirkel/Madrid mit LNG- und Diesel-Fahrzeuge	76

IV. ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

<i>Abkürzung</i>	<i>Bedeutung</i>
Bio-LNG	Biologisches flüssiges LNG (aus Bio-Methan)
CNG	Komprimiertes Erdgas (Compressed Natural Gas)
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
EU	Europäische Union
EURO VI	Letzte Abgasnorm für Nutzfahrzeuge ab 3,5 Tonnen
HC	Kohlenwasserstoffe
J.S.L	J.S. Logistics (Spediteur)
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
LKW	Lastkraftwagen
LNG	Verflüssigtes Erdgas (Liquefied Natural Gas)
NGO	Nichtregierungsorganisation (Non-Governmental Organisation)
NGV	Erdgasfahrzeuge (Natural Gas Vehicule)
NH ₃	Ammoniak
NO _x	Stickoxide
OECD	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (Organisation for Economic Cooperation and Development)
PKW	Personenkraftwagen
PM	Feinstaub (Particulate Matter)
PS	Pferdestärke
SO _x	Schwefeloxide
TEN-T	Trans-Europäische-Verkehrsnetze
TICPE	Konsumsteuer für Energien in Frankreich (Taxe Intérieure sur la Consommation de Produits Énergétiques)
TTW	Bilanzierung der Treibhausgase Emissionen von der Tanksäule bis zur Kraftstoffverbrennung (Tank-to-Wheel)
WHO	Weltgesundheitsorganisation (World Health Organization)
WTW	Bilanzierung der Treibhausgase Emissionen von Diesel- oder Gasförderung bis zur Kraftstoffverbrennung (Well-to-Wheel)

1. Einleitung

1.1 Motivation für das Thema

Im letzten Jahr meines deutsch-französischen Masterstudiengangs am DFHI-ISFATES habe ich mich im Bereich Logistik spezialisiert. Ich hatte die Gelegenheit, im Rahmen meines Studiums ein Praktikum bei Daimler in Stuttgart zu absolvieren. Während des Praktikums war ich in der für die Planung des Transports von Ersatzteilen in Europa zuständigen Abteilung eingesetzt.

Basierend auf den positiven Erfahrungen und dem erlernten Wissen, das ich in dieser Branche sammeln konnte, habe mich entschieden meine Masterthesis über ein Thema in diesem Bereich zu schreiben. Durch eine besondere Affinität mit Umweltthemen und ein Interesse an alternativen Antrieben bin ich in Kontakt mit dem deutschen Transportunternehmen J.S.Logistics gekommen. Besonders interessant fand ich die Tatsache, dass J.S. Logistics zwei LNG-Fahrzeuge erworben hat.

Der Transporteur stellt sich Fragen bezüglich der Nutzung und Entwicklung einer Erdgas-Flotte vor dem Hintergrund der weiteren Entwicklung des Wettbewerbs. Er hat Interesse die LNG-Fahrzeuge auf einer neuen Strecke (von Kirkel bis Madrid) zu nutzen. Hierfür benötigt er Informationen über die technische und ökonomische Machbarkeit im Vergleich zu den aktuell genutzten Diesel-Fahrzeugen.

J.S.Logistics möchte sowohl mehr Daten über den relevanten Markt als auch allgemeine Kenntnisse über die Technologie erlangen. Die Datenerhebung ist aufgrund einer mangelhaften Transparenz im Bereich Infrastruktur- und Förderungsentwicklung notwendig, da diese die Wirtschaftlichkeit in den nächsten Jahren bedeutend beeinflussen werden. Es fehlen beispielweise Informationen über die Umweltbelastung von Erdgasen im Vergleich zu Diesel. Denn die wenigen, bereits existierenden Studien und Herstellerinformationen weisen sehr unterschiedliche Ergebnisse auf.

1.2 Präzisierung der Themenstellung

Im Hinblick auf den ökologischen Notstand ist es erforderlich, die Abhängigkeit des Transports von Erdöl zu reduzieren. Durch den Druck der internationalen Gemeinschaft und die Förderung der Europäischen Union hat sich der Markt für alternative Antriebe im Straßengüterverkehr in den letzten Jahren stark vergrößert. Die Schwierigkeit für

Hersteller und Transporteure liegt darin, rechtzeitig in eine Technologie zu investieren, die noch längerfristig tragen wird.

Heute bezeichnen bestimmte Experten flüssiges Erdgas (LNG) als die aktuell einzige ausgereifte und rentable Technologie, die eine echte Alternative zu Diesel für schwere Lastkraftfahrzeuge im Straßengüterverkehr darstellen könnte. Die Frage ist, ob ein Spediteur, der mit den aktuellen schwierigen Marktbedingungen konfrontiert ist, mit der Nutzung eines LNG-Fahrzeuges anstatt eines Diesel-LKWs an Wettbewerbsfähigkeit gewinnen kann.

Infolgedessen habe ich mich entschlossen meine Masterarbeit auf dieses Thema zu fokussieren: ***Technischer, ökonomischer und ökologischer Vergleich von Diesel- und LNG-Fahrzeugen im Straßengüterverkehr.***

Während der Verfassung dieser Arbeit habe ich versucht, die Themen auf die Bedürfnisse der Spediteure zu orientieren. Außerdem habe ich einen besonderen Schwerpunkt auf den deutschen und französischen Markt gelegt, da J.S.Logistics in Frankreich mehrere Kunden hat und diese Vorgehensweise im Rahmen meines deutsch-französischen Studiums besonders interessant ist.

Um die Problematik des Themas darzustellen, werden zuerst die Technologie und die Marktentwicklung beschrieben. Danach werden sowohl den Rechtsrahmen und die Fördermöglichkeiten in der Europäischen Union wie auch innerhalb der Länder erläutert, da sie eine zwingende Voraussetzung der LNG-Entwicklung sind. In allen weiteren Kapiteln werden Diesel und LNG-Technologien unter verschiedenen Aspekt (ökologisch, technisch, wirtschaftlich) miteinander verglichen. Das letzte Kapitel ist der Praxisteil der Arbeit, in dem der Einsatz eines LNG-Fahrzeugs auf einer neuen Route mit einem Dieselfahrzeug verglichen wird.

Diese Studie konzentriert sich auf den Vergleich von schweren Lastkraftwagen, das heißt Fahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht (zGG) von sechzehn Tonnen und mehr. Es wird angenommen, dass LNG nur über diesem Gewicht sinnvoll einsetzbar ist.

1.3 Kurze Vorstellung der Spediteure

J.S. Logistics ist ein saarländisches Familienunternehmen, welches Dienstleistungen in mehreren Gebieten der Logistik anbietet. Das Unternehmen organisiert Transporte in ganz Europa und zählt zu seinen Kunden namhafteste Unternehmen in verschiedenen

Industriebereichen, wie zum Beispiel in der Automobil-, der Chemie- und der Konsumgüterindustrie.

SAMAT Toulouse ist eine Filiale des Spediteurs SAMAT, der im Südwesten Frankreichs präsent ist. Neben den Tätigkeiten in der Automobil- und Lebensmittelindustrie, hat sich SAMAT vor allem auf den Transport von Chemikalien und Kraftstoffen spezialisiert. Der jährliche Umsatz des Unternehmens beträgt ca. 27 Millionen Euro. Des Weiteren beschäftigt der Spediteur insgesamt 210 Fahrer.

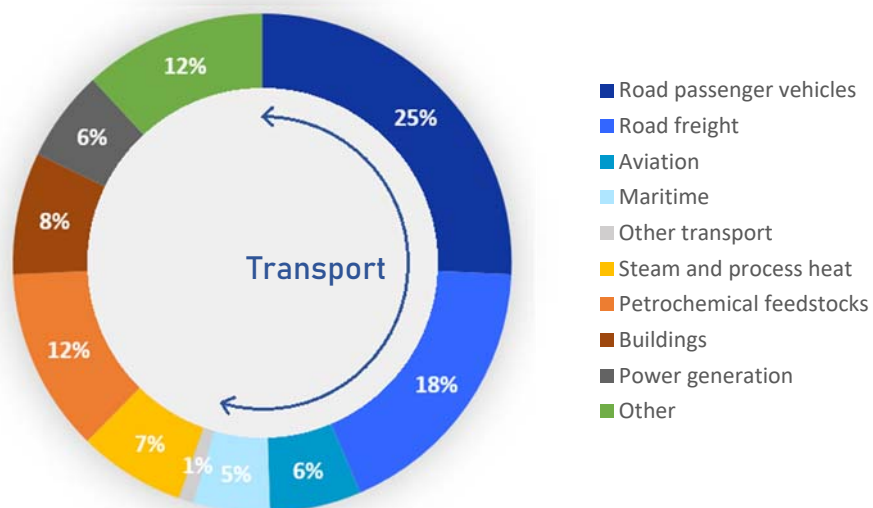
2. LNG-Fahrzeugentwicklung

2.1 Energiebedarf im Straßengüterverkehr

2.1.1 Wachsender Kraftstoffverbrauch

Aufgrund des Energieverbrauchs, der zu 94% von Erdöl dominiert wird, ist der weltweite Transportsektor stark vom Erdöl abhängig.¹ Zusammengefasst verbrauchen die in Abbildung 1 aufgelisteten Transportarten mehr als die Hälfte der weltweiten Nachfrage nach Erdöl. Wird lediglich der Straßengüterverkehr betrachtet, machte die Branche 2015 18%² der globalen Ölnachfrage aus. Dadurch ist der Straßengüterverkehr, mit einer täglichen Nachfrage im Jahr 2015 von 17 Millionen Barrel (im Vergleich 2000: 6 Millionen Barrel), einer der Hauptträger der steigenden Energienachfrage geworden.³

Abbildung 1: Erdölnachfrage nach Sektor in 2015



Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an IEA (2017)

Laut OECD hat sich die politische Förderung zur Reduzierung des Energieverbrauchs fast ausschließlich auf die Personenkraftwagen konzentriert, die weltweit 26% der Erdölnachfrage repräsentieren. In westlichen Ländern hat die Nachfrage für PKWs durch die Anreize der Treibstoffeffizienz angefangen zu sinken. Andererseits haben sich, aufgrund fehlender Förderungen, die LKW-Technologien weniger entwickelt, was zu einer Steigerung der Erdölnachfrage geführt hat. Wenn keine starken politischen

¹ Vgl. BP p.l.c. (o.J.), Onlinequelle.

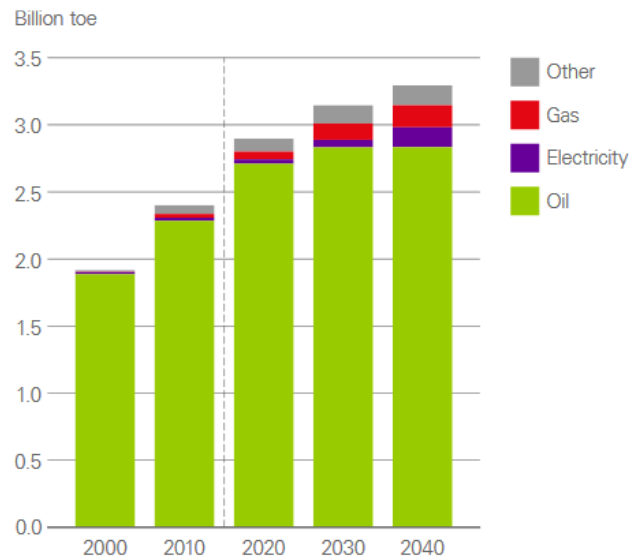
² Vgl. IEA (2017), S.17.

³ Vgl. IEA (2017), S.17.

Maßnahmen durchgesetzt werden, könnte der Straßengüterverkehr in den nächsten Jahren die Nachfrage von PKWs überschreiten und der größte Erdölverbraucher werden.

Trotzt der Dominanz von Erdöl, wächst der Konsum von anderen alternativen Kraftstoffen, wie Erdgas und Elektrizität. Aufgrund dessen werden diese Energien in den nächsten Jahrzehnten auf dem Markt immer mehr an Bedeutung gewinnen.

Abbildung 2: Energiekonsum in der Transport Branche



Quelle: BP p.l.c. (o.J.)

Auch im Straßengütertransport entwickeln sich immer mehr alternative Kraftstoffe. Heute werden bereits 2,2% Biokraftstoff, 1,2% Erdgas und 0,01% Biomethan als alternative Kraftstoffe bei LKWs eingesetzt.

2.1.2 Ökologischer Notstand

Die globale Durchschnittstemperatur ist heute 0,87°C höher als vor der Industrialisierung im neunzehnten Jahrhundert. Dieses Phänomen resultiert aus den gestiegenen Treibstoffemissionen, die von menschlichen Aktivitäten bewirkt worden sind.⁴

Im Jahr 2016 hat sich die internationale Gemeinschaft verpflichtet, das Übereinkommen von Paris zu respektieren. Weltweit haben sich fast alle Länder dazu bereit erklärt das Ziel, die Erhöhung der globalen Durchschnittstemperatur unter 2°C zu halten, zu erreichen, da ansonsten irreversible Folgen entstehen könnten.⁵

Um ihr Engagement zu respektieren, hat die Europäische Union das Ziel gesetzt, die Treibhausemissionen 2030 auf mindestens 40% gegenüber dem Niveau von 1990 zu reduzieren.⁶

Da Transporte von Erdölprodukten abhängig sind und der größte Wachstumstreiber der Erdölnachfrage sind, spielt die Branche aufgrund der hohen Schadstoff- und Treibhausgasemissionen eine zentrale Rolle im Klimawandel. 2015 waren Transporte für 22% der globalen CO₂-Emissionen weltweit verantwortlich. Im Straßengüterverkehr werden 7% der globalen CO₂-Emissionen von Nutzfahrzeugen ausgestoßen.⁷ Trotz einer Verbesserung des Fahrzeugverbrauchs ist die Luftverschmutzung gewachsen. Das resultiert aus dem stetig steigenden Bedarf an Güterverkehr.

Mit 5% der globalen CO₂-Emissionen, die von Lastkraftwagen und Bussen ausgestoßen werden, ist die Situation in Europa ähnlich.⁸ Laut einer Studie der Europäischen Umweltagentur im Jahr 2016 ist der Transport der einzige Sektor, der seit 1990 seine Treibhausemissionen nicht gesenkt hat.⁹

In Deutschland repräsentierten beispielweise die Nutzfahrzeuge (< 3,5 Tonnen) 2018 nur 25%, der im Betrieb befindlichen Fahrzeuge. Obwohl sie für fast 80% des CO₂-Ausstoßes im Straßentransport verantwortlich waren.¹⁰ Es heißt, dass die Erreichung von nationalen und internationalen Klimaschutzzielen, besonders von der Entwicklung der LKWs abhängig ist.

⁴ Vgl. IPCC (2018), S.6.

⁵ Vgl. Sihvonen (2018), S.16.

⁶ Vgl. Sihvonen (2018), S.16.

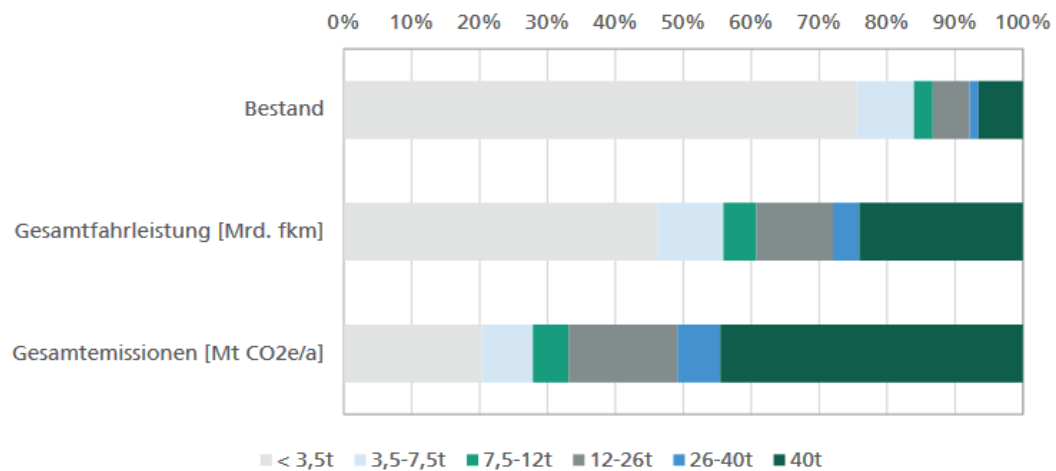
⁷ Vgl. IEA (2017), S.11.

⁸ Vgl. European Commission (o.J.), Onlinequelle.

⁹ Vgl. European Parliament (o.J.), Onlinequelle.

¹⁰ Vgl. Plötz et al (2018), S.2.

Abbildung 3: Bestand, Fahrleistung und CO₂-Emissionen von Nutzfahrzeugen in Deutschland im Jahr 2016 nach zulässigem Gesamtgewicht



Quelle: Plötz (2018)

Obwohl der Straßengüterverkehr für starke Umweltverschmutzung verantwortlich ist, ist der Verkehrssektor für das wirtschaftliche und industrielle Wachstum von grundlegender Bedeutung. Zum Transport von Waren und Passagieren gehören mehr als sechshunderttausend Unternehmen und drei Millionen Mitarbeiter in der Europäischen Union. Diese Branche ermöglicht auch 3,5 Millionen indirekte Arbeitsplätze (LKW-Herstellung, -Reparatur, -Vermietung, -Versicherung, usw.).¹¹ Die Europäische Union hat jahrelang die wirtschaftlichen Interessen priorisiert und versucht, heute ein neues Gleichgewicht zu finden. Ihr Ziel sind daher starke Maßnahmen für Emissionsbegrenzung zu setzen und gleichzeitig die Akteure dieser Branche in der Umstellung zu alternativen Antrieben zu begleiten und zu unterstützen.

Aus diesem Grund hat die Europäische Union im April 2019 zum ersten Mal CO₂ Emissionsgrenzwerte für Lastkraftwagen festgelegt. Neue Lastkraftwagen werden neuen Standards für CO₂-Emissionen unterliegen: -15% Ausstoß in 2025 und -30% Ausstoß in 2030.¹² Um die ökologische Umwandlung des Transports zu unterstützen, muss nicht nur der Verbrauch verbessert werden, sondern die Maßnahmen müssen auch die Verwendung neuer Antriebe fördern. Somit werden die EU Hersteller verpflichtet, in alternative Antriebe zu Diesel zu investieren und mindestens 2% des Verkaufes an neuen Fahrzeugen im Jahr 2025 mit kohlenstoffarmen oder -freien Fahrzeugen zu realisieren. Obwohl es symbolisch einen wichtigen Wendepunkt für die Industrie darstellen würde,

¹¹ Vgl. European Commission (2018a), S.2.

¹² Vgl. European Commission (2018c), S.12.

ist das allerdings laut der ONG ‚Transport & Environment‘, bei weitem noch nicht ausreichend, um die Ziele des Übereinkommens von Paris zu erreichen.¹³

2.1.3 Entwicklung von neue Antrieben

Alternative Kraftstoffe sind laut der Definition der EU *„Energiequellen, die zumindest teilweise als Ersatz für Erdöl als Energieträger für den Verkehrssektor dienen und die zur Reduzierung der CO₂-Emissionen beitragen und die Umweltverträglichkeit des Verkehrssektors erhöhen können.“*¹⁴

Um die LNG-Technologie realistisch bewerten zu können, müssen zuerst konkurrierende Technologien, die für schwere Lastkraftfahrzeuge einsetzbar sind, betrachtet werden. Es gibt aktuell mehrere alternative Antriebe, die im Sektor Straßengüterverkehr verwendet werden oder verwendet werden könnten:

- **Erdgas (CNG und LNG):** Flüssige (LNG) und komprimierte (CNG) Erdgase sind fossile Brennstoffe, die zum Großteil aus Methan bestehen. Diese Kraftstoffe ermöglichen eine bedeutende Schadstoff- und Geräuschminderung im Vergleich zu Diesel. Obwohl Erdgas sich für PKWs in eigene EU-Länder nur gering durchsetzen konnte, haben LKW- Hersteller immer mehr Interesse an dieser Technologie. Das Interesse beruht auf der Tatsache, dass LNG für Langstrecken geeignet ist und die Erdgasfahrzeuge ebenfalls mit **Bio-LNG** (Methan aus organischen Abfällen) kompatibel sind. Allerdings sind die Anschaffungskosten höher als bei Diesel und es fehlt noch an Infrastrukturen, die für die Entwicklung erforderlich sind.
- **Wasserstoff-Brennstoffzelle:** Während der Fahrt wird durch die Wasserstoffumwandlung Strom in einer Batterie produziert und direkt verwendet, um den Motor zu versorgen. Durch diese direkte Ladung ist die Batterie viel leichter und die Reichweite viel länger als in einem batteriebasierten Elektroantrieb. Allerdings ist mit Wasserstoff der Verbrauch an elektrischer Energie doppelt so hoch als mit normalen Elektrobatterien. Zusätzlich sind die Produktionskosten aktuell noch sehr hoch und die Infrastruktur ebenfalls unzureichend ausgebaut.

¹³ Vgl. Muzi (2019), Onlinequelle.

¹⁴ Vgl. European Commission (2018d), S.2.

- *Biokraftstoffe (Ethanol, Biodiesel, Bio-Dimethylether)*: Biokraftstoffe sind organische Biomassen, die nachwachsen und sehr wenige Treibhausgas-Emissionen ausstoßen. Diese Treibstoffe erfordern keine Anpassung von Infrastruktur und Verkehrsnetz oder Änderung des Fuhrparks. Dennoch wurde in Europa die Produktion begrenzt, da diese zu Entwaldung führt und mit menschlicher Ernährung konkurriert.
- *LPG-Kraftstoff (Kohlenwasserstoffe)*: diese verflüssigte Mischung von Propan und Butan hat eine viel bessere Bilanz von CO₂ und Schadstoffemissionen als Diesel. Allerdings muss die Infrastruktur und das Verkehrsnetz noch ausgebaut werden. Da LPG viele Gemeinsamkeiten mit Erdgas hat, wurde diese Technologie von Herstellern zugunsten LNG vernachlässigt und wurde nicht im Straßengüterverkehr als interessante Lösung betrachtet.

Durch die Vielfalt von potentiellen alternativen Antrieben haben Akteure Schwierigkeiten sich zu einigen. Für Personenkraftwagen sind sich die meisten Spezialisten einig, dass CNG- und elektrische Fahrzeuge eine plausible Ersatzlösung für die Dekarbonisierung sein könnten. Andererseits gibt es für den Straßengüterverkehr noch zahlreiche Meinungsverschiedenheiten und Unsicherheiten bezüglich Energieverbrauch, Reichweite, Infrastruktur, technischer Durchführbarkeit, Rentabilität, usw.¹⁵

Auch wenn die Europäische Union seit 2014 eine intensive Förderungspolitik für alternative Antriebe führt, wird keine bestimmte Technologie in den Vordergrund gestellt, was zu zerstreuten Recherchen und Investitionen führt. Diese fehlende Leitlinie schreckt die meisten Hersteller ab, da sie sich vor dem Risiko scheuen wichtige Ressourcen wie Kapital und Zeit in die „falsche“ Technologie zu investieren.

2.2 Präsentation von flüssigem Erdgas (LNG)

2.2.1 Technische Eigenheiten

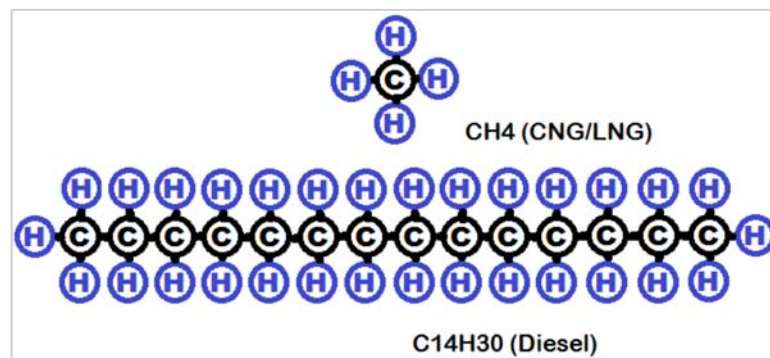
Das Akronym LNG steht für ‚Liquefied Natural Gas‘ und bezeichnet ein natürliches Gas, das im flüssigen Aggregatzustand gehalten wird. Natürliches Gas entsteht aus der Umwandlung von organischen Stoffen und besteht überwiegend aus Methan (der Prozentsatz hängt von der Herkunft ab). Seine Verbrennung ist im Vergleich zu

¹⁵ Vgl. Plötz et al (2018), S.4.

Ölkraftstoffen und anderen Gas Arten sauberer, da durch die Verflüssigung einige Schadstoffe wie CO₂ oder Stickstoffe entfernt werden.¹⁶ Des Weiteren ist LNG farblos, weißt keinen Geruch auf und ist weder giftig noch entflammbar.¹⁷

Dieses natürliche Erdgas wird dann durch Einfrierung bei -162°C verflüssigt und komprimiert.¹⁸ Durch die Verflüssigung schrumpft das Volumen 600-mal, was den Transport und die Lagerung erleichtert.¹⁹

Abbildung 4: Vergleich der molekularen Zusammensetzung zwischen Erdgas und Diesel



Quelle: Lesche (2018)

Dieser Umwandlungsprozess wurde entwickelt, um Erdgas in beträchtlichen Mengen zwischen den größten Gasproduzenten (Katar, Australien und Malaysia) und den Verbraucherländern im Seeverkehr transportieren zu können, falls der Transsport durch Gasfernleitungen nicht möglich ist.²⁰ Nach dem Transport wird das LNG in Wiedervergasungsstationen zurück in den gasförmigen Aggregatzustand transformiert, um anschließend verbraucht werden zu können. Außer seiner Anwendung als Speichermedium kann LNG auch als Kraftstoff für Schiffe und Lastkraftwagen eingesetzt werden. Die Anpassung von LNG an andere Transportarten wie Flugzeuge oder Züge befindet sich noch in der Forschungs- oder Entwicklungsphase.

2.2.2 Wachsender Bedarf für flüssiges Erdgas

¹⁶ Vgl. Shell Deutschland Oil GmbH (2016), S.44.

¹⁷ Vgl. Stefana et al (2016), S.2.

¹⁸ Vgl. Simmer / Aschauer / Schauer (2014), S.2.

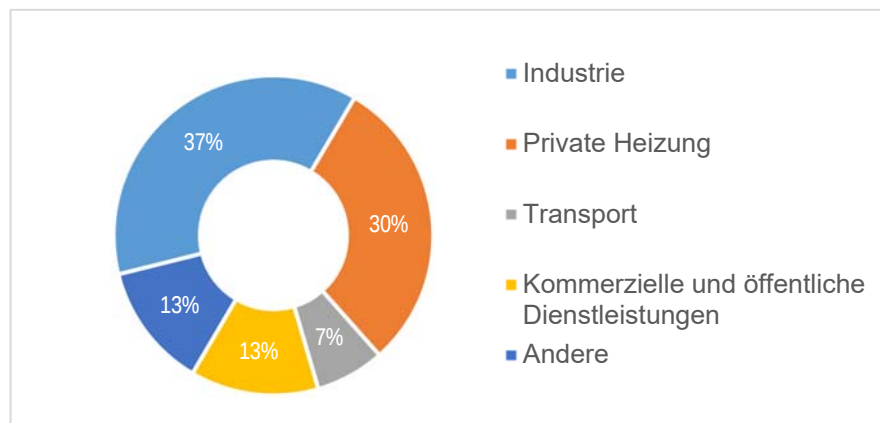
¹⁹ Vgl. Stefana et al (2016), S.2.

²⁰ Vgl. Simmer / Aschauer / Schauer (2014), S.2.

Aufgrund der Entwicklung von Technologien und Infrastrukturen hat sich LNG weltweit verbreitet. In der Tat kann LNG durch seine hohe Dichte einfach gelagert und transportiert werden. Dazu ermöglicht es den Staaten, ihre Beschaffungen zu diversifizieren und weniger von Fernleitungen und geopolitischen Beschränkungen abhängig zu sein. Deshalb ist der LNG-Verbrauch in den letzten Jahren sehr gestiegen und treibt das Wachstum der Erdgasnachfrage an.²¹

Heutzutage spielt der Transport noch eine sehr untergeordnete Rolle beim Erdgasverbrauch. Weltweit wird Erdgas hauptsächlich für die Industrie (37%) und den Hausgebrauch (30%) benutzt. Als Verkehrskraftstoff findet er nur mit rund 7% Verwendung.²² Die Erdgase, die für den Transport benutzt werden, sind zu 90% in Form von LNG oder CNG.

Abbildung 5: Erdgas Endverbrauch nach Sektoren Weltweit in 2015



Quelle: eigene Darstellung in Anlegung von IEA (2017)

Aufgrund der staatlichen Förderungen zur Bekämpfung der Luftverschmutzung nimmt in Entwicklungsländern, wie China oder Indien, Erdgas bei Transporten eine starke und auch zukünftig zunehmende Bedeutung ein. In China, dem größten Importland von Erdgas, ist in den letzten Jahren der Erdgasverbrauch explodiert. China hat einen Konsumwachstum von 15% für Erdgas und 40% für LNG.²³

2.3 LNG als LKW Antrieb

²¹ Vgl. SNAM (2018), S.16.

²² Vgl. IEA (2017), Onlinequelle.

²³ Vgl. SNAM (2018), S.53.

2.3.1 Geschichte von Erdgas in der Automobilindustrie

Gasfahrzeuge wurden Ende des 19. Jahrhunderts erfunden, zur gleichen Zeit wie Verbrennungsmotoren. Im Jahre 1930 wurden mit Biomassevergasung funktionierende Fahrzeuge in Europa häufig benutzt, bis Benzin sich zu einer kostengünstigeren Lösung entwickelte und die Technologie aufgegeben wurde. In Zeiten von fehlenden Ressourcen, wie beispielweise ökonomischen Krisen oder Kriegen, wurden immer wieder Fahrzeuge mit Gassystemen ausgestattet²⁴. Das geschah zum Beispiel in der Zwischenkriegszeit in Deutschland und während der deutschen Besetzung Frankreichs.

Einige Länder haben durch Begünstigungen versucht die Entwicklung von Erdgasverkehr zu fördern. Italien versuchte sowohl in den fünfziger Jahren einen steigenden Energiebedarf auszufüllen als auch in den neunziger Jahren in Schwellenländern, die, gemäß einer Autarkiepolitik, eine Unabhängigkeit von Erdöl zu schaffen suchten.²⁵ Außerdem haben sich die Forschungen nach alternativen Antrieben für Transporte nach der Erdölkrise von 1973 intensiviert.²⁶

Seit dem Abkommen von Kyoto 1997 werden Alternativantriebe mit wenigen Treibstoffemissionen als eine interessante Option für Dekarbonisierung in Industrieländern betrachtet. Seitdem entwickelt sich die Industrie schrittweise durch staatliche Förderung und unternehmerischen Initiativen. Durch den Druck der Europäischen Union und der Entwicklung der LNG-Technologien gibt es heute neue Perspektiven für Erdgasfahrzeuge in Europa. Da sich Erdgas seit über einem Jahrhundert im Transportsektor entwickelt hat, wird es von vielen als die einzige ausgereifte Technologie, die eine Alternative zu Diesel im schweren Straßengütertransport sein könnte, betrachtet.²⁷

2.3.2 Unterschied zwischen CNG, LNG und Bio-LNG

²⁴ Vgl. Van Basshuysen (2015), S.34.

²⁵ Vgl. Osorio-Tejada / Llera / Scarpellini (2015), S.238.

²⁶ Vgl. Osorio-Tejada / Llera / Scarpellini (2015), S.237.

²⁷ Vgl. Pfoser et al (2018), S.1.

Es existieren zwei Typen von Erdgasfahrzeugen: CNG (Compressed Natural Gas) und LNG (Liquefied Natural Gas), die beide Großteils aus Methan bestehen. Komprimiertes Erdgas (CNG) wird durch Hochdruck komprimiert um sein Volumen zu verringern, bleibt aber im Gaszustand. Aus diesem Grund hat es eine geringere Dichte, die seine Reichweite beschränkt. CNG ist optimal für Fahrzeuge, die wenig Kilometer fahren, wie zum Beispiel Stadtautos, Agglomerationsbusse, Mülltransporter oder kleine LKWs mit niedrigerer Laufleistung.

Andererseits hat flüssiges Erdgas (LNG) durch Einfrierung und Verflüssigung doppelt so viel Gasvolumen als CNG.²⁸ Deshalb wird es insbesondere für Lastkraftwagen und Seeverkehr benutzt. Diese Energie ist für schwere Lastkraftfahrzeuge mit hoher Jahreskilometerleistung (mehr als 100.000 km) geeignet.²⁹ Gleichzeitig muss auch berücksichtigt werden, dass LNG-Fahrzeuge sehr regelmäßig gefahren werden sollten um Verdampfungseffekte zu vermeiden.³⁰

Abbildung 6: Einsatzbereich bei LKW und PKW

	Diesel	CNG	LNG	H ₂	Strom
Pkw (kurze Strecken)	++	++	--	+	++
Pkw (lange Strecken)	++	++	--	+	+
Lkw (3,5 – 7,5 t)	++	++	-	+	+
Lkw (7,5 – 18 t)	++	+	+	-	-
Lkw (>18 t)	++	+	++	--	--
++ voll einsetzbar - große Einschränkungen					
+ kleine Einschränkungen -- nicht einsetzbar					

Quelle: Vgl. DVGW (2017)

Heutzutage können bei Lastkraftwagen (18 Tonnen oder mehr Gewicht) durch den Einsatz von LNG-Kraftstoff die gleichen Fahrbedingungen wie mit dem Einsatz von Diesel erzielt werden. Es gibt zwar auch CNG-Schwer-LKWs auf dem Markt, allerdings bieten diese weder Leistung noch Reichweite, die mit Diesel vergleichbar wäre.

²⁸ Vgl. En route avec le gaz naturel (2014), S.2.

²⁹ Vgl. IEA (2017), S.81.

³⁰ Vgl. IEA (2017), S.81.

Die Technologien, die mit anderen Kraftstoffen (zum Beispiel Strom oder Wasserstoff) funktionieren, sind derzeit keine Lösung für schwere Lastkraftfahrzeuge.

Biomethan als Kraftstoff, oder Bio-LNG, ist eine andere Methanvariante, die 100% regenerativ ist. Der Unterschied resultiert aus der Herkunft und der Produktionsmethode von Methan. Im Gegensatz zu importiertem Erdgas, das von natürlichen Quellen extrahiert ist, wird Bio-LNG durch die Umwandlung von Methan in Flüssiggas produziert. Organische Abfälle aus der Nahrungsmittelindustrie, Hausmüll oder Klärschlamm von Abwasser werden gereinigt um Methan zu produzieren, welches dieselben Eigenschaften als Erdgas hat. Aufgrund der äquivalenten Zusammensetzung kann das Biomethan direkt ins Erdgas-Vertriebsnetz eingespeist werden. Es kann auch als Kraftstoff in denselben Fahrzeugen verwendet werden, die mit LNG aus natürlichen Quellen betrieben werden.

2.4 LNG Lastkraftwagen Marktentwicklung

2.4.1 Weltweite Entwicklung

Im Juli 2019 gab es ungefähr 27 Millionen Erdgasfahrzeuge weltweit.³¹ Der Anteil der Fahrzeuge, die für Straßengüterverkehr benutzt werden, liegt allerdings nur bei ungefähr 1%.³²

Je nach Vorkommen der natürlichen Ressourcen und den geopolitischen Situationen haben Staaten unterschiedliche Kraftstoffpolitiken eingeführt. Gemäß politischer Förderungen (Subventionen, Steuern, usw.) haben sich die LNG-Märkte zwischen den verschiedenen Weltregionen sehr unterschiedlich entwickelt. Diese diversen Anreize hatten einen wesentlichen Einfluss auf die Entwicklung von Vertriebsnetzwerken, Infrastruktur- und Tankstellenentwicklung.

In China und der USA sind beispielweise reichlich Mengen an Erdgas vorhanden, woraus im Vergleich zu Diesel und Benzin, ein geringerer und somit vorteilhafter Preis resultiert. Trotz eines vorübergehenden Wachstumsabschwung 2015 nach dem Fall der Erdölpreise hat sich der Markt in beiden Ländern seit 2010 positiv entwickelt. Politische Regierungsprojekte haben die Entwicklungen gefördert.

³¹ Vgl. NGV Global (2019), Onlinequelle.

³² Vgl. IEA (2017), S.82.

Mit den ‚Fixing America's Surface Transportation Act‘ 2015 förderte die US-Regierung den Aufbau von alternativen Kraftstoff-Infrastrukturen auf den Hauptverkehrsachsen. In den Vereinigten Staaten sind Erdgasfahrzeuge meistens Busse, Müllsammelfahrzeuge oder Paketlieferungswagen (CNG und LNG).³³

In China fördert die Regierung den Konsum von Erdgas, um die Luftqualität zu verbessern und die Energiebeschaffung zu sichern.³⁴ Somit ist der Erdgasverbrauch für Transporte zwischen 2010 und 2016 jährlich um 11% gewachsen, was zum Großteil durch den Verkauf von LNG-Lastkraftwagen angetrieben wurde.³⁵ Im Jahr 2017 gab es in China ungefähr 230.000 LNG Lastkraftwagen und 3000 Erdgas-Tankstellen (CNG und LNG). Zusätzlich zu einer stark wachsenden Nachfrage sind die staatlich festgelegten Ziele sehr zielorientiert gestaltet. Bis 2020 sollen ungefähr 12 000 Erdgas-Tankstellen (CNG und LNG) in Betrieb sein.³⁶

2.4.2 Entwicklung in der Europäischen Union

In Vergleich zu anderen Märkten hat Europa einen beträchtlichen Rückstand. Zum einen, da die Erdgaspreise durch den Import weniger attraktiv sind und zum anderen, weil die nationale und regionale politische Förderung in Europa erst vor kurzer Zeit die erforderlichen Anreize gegeben hat.³⁷ In der Europäischen Union fahren heutzutage ungefähr 1,5 Million Erdgasfahrzeuge (CNG und LNG). Davon repräsentieren LNG Lastkraftfahrzeuge mit ungefähr 6.000 Fahrzeugen (4.000 Sattelzugmaschinen und 2.000 Lastwagen) einen sehr geringen Teil. Allerdings müssen diese Statistiken vorsichtig betrachtet werden, da zurzeit nur sehr wenige inländische und regionale Daten verfügbar sind.³⁸

Der Markt für Erdgasfahrzeuge, besonders für LKW- und Nutzfahrzeuge, ist in den letzten Jahren gestiegen. Allerdings haben sich Märkte innerhalb der Union sehr unterschiedlich entwickelt. Italien ist einer der Vorläufer bei Erdgasfahrzeugen, da das Land seine Erdgasinfrastruktur breit ausgebaut hat und den größten Fuhrpark an Erdgasfahrzeugen (CNG und LNG) in Europa vorweisen kann. Neben Italien haben sich CNG-Fahrzeuge vor allem in Deutschland, Schweden und der Schweiz etabliert.

³³ Vgl. IEA (2017), S.82.

³⁴ Vgl. Hao et al. (2013), S.523.

³⁵ Vgl. IEA (2017), S.83.

³⁶ Vgl. Smajla et al. (2019), S.7.

³⁷ Vgl. Smajla et al. (2019), S.7.

³⁸ Vgl. CREG (2019), S.45.

LNG-Fahrzeuge (nur für Straßengüterverkehr), die viel später von Herstellern angeboten worden sind, haben andere Märkte erreicht. Sie haben sich überwiegend in Spanien, Holland und Frankreich etabliert. Im Gegensatz zu den osteuropäischen Ländern hat sich die Technologie in den westeuropäischen Ländern stärker verbreitet.³⁹

2.4.3 Entwicklung in Frankreich

Der Verbrauch von Erdgas als Kraftstoff begann in den neunziger Jahren mit dem Aufkommen von komprimiertem Erdgas (CNG) für Fahrzeuge. Sowohl die beschränkte Reichweite (300 bis 400 km) als auch fehlende Förderung und Kommunikation, seitens der Behörden, bezüglich der Nutzung elektrischer Antriebe verhinderte die Durchsetzung der Technologie bei PKWs, Nutzfahrzeugen und Stadtlieferwagen.⁴⁰

Nach der Verwarnung der EU für Nichteinhaltung der Luftqualitätsrichtlinie 2008 hat die französische Regierung eine Politik für die Entwicklung alternativer Antriebe eingerichtet. Mehrere Maßnahmen sollten den Konsum der LNG-Fahrzeugen fördern.

Der französische Markt bestand 2018 aus ungefähr 13.300 Erdgasfahrzeugen: 2.300 Busse, 1.000 LKWs und 10.000 PKWs. Er repräsentiert nur 0,2% des französischen Fuhrparks. Allerdings unterstützten die Kommunen die Branche mit rund 10% der Busse und Müllwagen, die durch Erdgas betrieben sind.⁴¹

2.4.4 Entwicklung in Deutschland

In Deutschland hat sich der Markt für Erdgas-Personenkraftwagen sehr schnell entwickelt. Der Fuhrpark ist von ungefähr 30.000 PKWs (2006) zu mehr als 80.000 PKWs (2019) angestiegen.⁴² Trotzdem ist Erdgas für den Straßengüterverkehr noch sehr wenig bekannt. Im Gegensatz zu manchen umliegenden Ländern ist Deutschland im Bereich LNG-Lastkraftwagen noch in einer Frühentwicklungsphase.⁴³ Obwohl es schon 846 CNG-Tankstellen gibt, hat Deutschland eine der schwächsten LNG-Infrastrukturen in Westeuropa.

Um die verzögerte Entwicklung in Deutschland aufzuholen, müssen spezifische Maßnahmen umgesetzt werden. Dies sollte von der Fähigkeit der Regierung abhängen,

³⁹ Vgl. NGVA Europe (2019), Onlinequelle.

⁴⁰ Vgl. Adelski (2019), Onlinequelle.

⁴¹ Vgl. Gas-mobilité.fr (o.J.c), Onlinequelle

⁴² Vgl. Ahlswede (2019), Onlinequelle

⁴³ Vgl. Peters-von Rosenstiel (2014), S.14.

Kundeninteresse (attraktive Preise, Kommunikation) zu wecken und private Investitionen zu fördern (Subventionen, Zusammenarbeit).⁴⁴

⁴⁴ Vgl. Peters-von Rosenstiel (2014), S.24.

3. Rechtsrahmen und Förderungen in der Europäische Union

3.1 Regulatorisches Umfeld der EU

Obwohl die Europäische Union zögerlich bezüglich alternativer Kraftstoffe war, zählt sie heute dennoch zu den Haupttreibern und Förderer der Entwicklung von Erdgasfahrzeugen. Die eingeführte Politik hat zwei wesentliche Ziele.⁴⁵ Zum einen soll der Import fossiler Energie verringert werde, da die Handelsbilanz negativ beeinflusst und somit eine wirtschaftliche Abhängigkeit verursacht wird. Zum anderen hat sich die EU ambitionierte Ziele gesteckt, die CO₂ Emissionen zu verringern. Da der Straßentransport fast 21%⁴⁶ der CO₂-Emissionen der Europäischen Union ausmachen, ist das Verbesserungspotenzial dieses Sektors sehr hoch.

3.1.1 Richtlinie 2014/94/UE – Infrastruktur der Entwicklung

Die Richtlinie 2014/94/EU, des Europäischen Parlaments und des Rates für den ‚Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe‘, verpflichtet die Mitgliedstaaten zur Schaffung von Infrastrukturen für alternative Kraftstoffe.⁴⁷ Der dafür erforderliche Kapitalbedarf (bis 2025) wird von der EU auf insgesamt 257 Million € geschätzt.⁴⁸ Jedes Mitgliedsland müsste einen nationalen Strategierahmen festlegen, indem der aktuelle Entwicklungsstand bewertet wird, die nationalen Gesamtziele für den Aufbau beinhaltet sind und indem die dazu erforderlichen Maßnahmen definiert sind. Eine Mindestanzahl von Erdgas-Tankstelle ist bis Ende 2025 vorgeschrieben. Die Mitgliedsstaaten müssen das TEN-T Netz (Transeuropäische Netze) als Grundlage für die Erbauung nutzen. Um die vorgeschriebene Verbesserung und Vereinheitlichung des Netzwerks zu schaffen, muss alle 400 km eine LNG-Tankstelle errichtet werden.⁴⁹

Laut der letzten Studie 2017 der Kommission hat diese Richtlinie zu Investitionen geführt. Im nationalen Strategierahmen haben die Mitgliedstaaten festgelegt zwischen 256 und 431 zusätzliche LNG-Tankstellen bis Ende 2025 zu bauen.⁵⁰ Allerdings bedauert die Union, dass das Engagement und die Konsistenz des Projekts zwischen den Ländern

⁴⁵ Vgl. Le Fevre (2014), S.29.

⁴⁶ Vgl. European Commission (o.J.), Onlinquelle.

⁴⁷ Vgl. European Commission (2014), S.11.

⁴⁸ Vgl. European Commission (2017a), S.4.

⁴⁹ Vgl. European Commission (2014), S.7.

⁵⁰ Vgl. European Commission (2017a), S.4.

sehr unterschiedlich sein können. Manche Zielstellungen und Planungen sind nicht geeignet und werden die Mindestdeckung voraussichtlich nicht erreichen können.

3.1.2 Euro-Normen

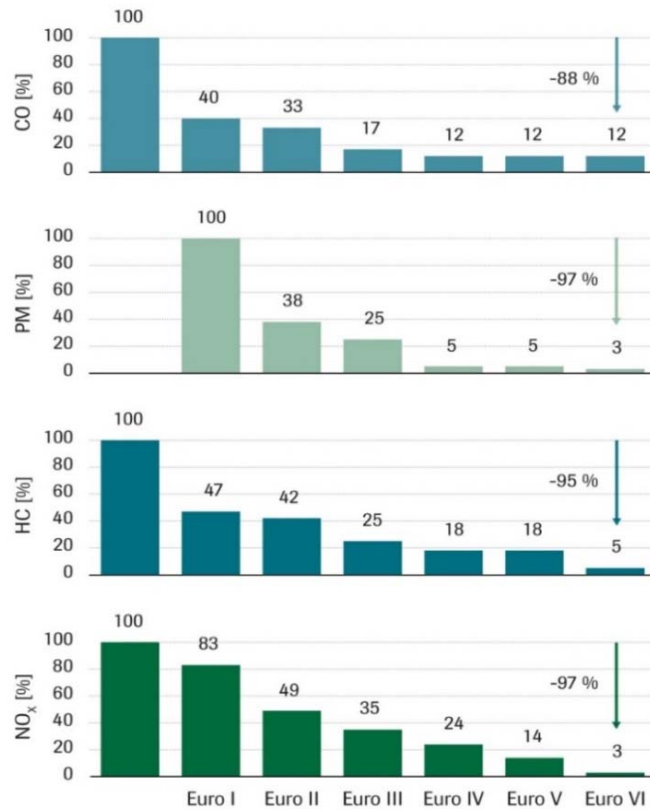
Die Europäische Union definiert Europäische Standards für Emissionen, auch ‘Euro Normen’ genannt, um Grenzwerte beim Schadstoffausstoß für neue Autos festzulegen.

Die Erste Norm (Euro 1) wurde 1992 eingeführt um Luftverschmutzung, die durch den Verkehr verursacht werden, zu verringern. Ungefähr alle fünf Jahre wird eine neue Norm veröffentlicht, die die letzten zulässigen Grenzwerte reduziert. Folglich werden schrittweise immer mehr Schadstoffe berücksichtigt. Außerdem werden Treibstoffemissionen (CO₂) nicht einkalkuliert, da sie der menschlichen Gesundheit nicht direkt schaden.

Die Norm Euro VI für LKWs, die seit Januar 2014 in Anwendung ist, verlangt dreimal weniger Kohlenwasserstoffe (HC) und fast fünfmal weniger Ausstoß von Stickoxiden (NO_x) als die Vorgängernorm. Diese Norm zwingt die Hersteller zur Nutzung neuer innovativer Technologien, die komplexer und teurer sind. Zusätzlich zu der Entwicklung von Partikelfiltern für Dieselmotoren, sollte auch ein Augenmerk auf die Investition in neue Kraftstoffe gelegt werden. Da LNG-Lastkraftwagen die Euro VI Grenzwerte auch ohne Abgasnachbehandlungssysteme nicht überschreiten, könnten diese Antriebe, im Vergleich zum Diesel, an wirtschaftlicher Wettbewerbsfähigkeit gewinnen.⁵¹

⁵¹ Vgl. Peters-von Rosenstiel (2014), S.6.

Abbildung 7: Entwicklung von Euro-Normen Einschränkungen für schwerer LKW



Quelle: Verband der Automobilindustrie e.V. (o.J.).

Das primäre Ziel der Euro-Normen ist die Fahrzeuge nach Umweltauswirkungen zu klassifizieren. Diese Klassifikation könnte jedoch, je nach Land, große wirtschaftliche Auswirkungen haben. In Deutschland definieren die Euro-Normen die Fahrberechtigung in Umweltzonen, die Kraftfahrzeugsteuer und die Mautbeträge.⁵²

3.2 Nationale Förderungen

Zusätzlich zu den durchgeführten Projekten auf EU-Ebene haben einige Mitgliedstaaten Maßnahmen, die zur Entwicklungshilfe beitragen, durchgeführt. Beispielweise wurden in Frankreich und Deutschland mit mehreren finanziellen Förderungen unterstützt.

3.2.1 Frankreich

Es gibt in Frankreich seit 2016 die Möglichkeit, eine Sonderabschreibung zu machen. Die Regelung ermöglicht eine, zu den tatsächlichen Anschaffungskosten eines Erdgas-LKWs (mehr als 16t), buchhalterische Abschreibung von zusätzlich 40% der Kosten.⁵³

⁵² Vgl. Shell Deutschland Oil GmbH (2016), S.26.

⁵³ Vgl. Gaz-mobilité.fr (o.J.a). Onlinequelle

Für einen Erdgas-LKW mit einem Anschaffungspreis von beispielweise 100.000€ kann demzufolge ein Aufwand von bis zu 140.000€ verbucht werden. Auf die 40.000€, die nicht als Gewinn berechnet werden, wird das Unternehmen nicht besteuert, was einem Steuerabzug von 12.000€ entspricht ($40.000 \times 33\%$ Körperschaftsteuer). Diese Förderung ist bis Ende 2021 gültig und erlaubt die Verrechnung der Mehrkosten dieser Technologien, die im Vergleich zu einem Diesel-LKW anfallen würden.

Weitere Förderungen existieren auf regionaler Ebene. Im Pariser Raum kann zum Beispiel ein Unternehmen 9.000€ Subvention für die Neuanschaffung eines Erdgas-Fahrzeug erhalten.⁵⁴ Hinzu kommt, je nach Region, eine Befreiung der Kraftfahrzeugscheingebühren, die entweder vollständig oder teilweise erfolgen kann.

Außerdem hat sich die französische Regierung dafür eingesetzt, die Erdgassteuer von 2019 bis 2022 einzufrieren, um die Attraktivität des Kraftstoffes im Vergleich zu Diesel zu fördern⁵⁵. In der Tat kann erhebt die Regierung die TICPE (« Taxe Intérieure sur la Consommation de Produits Énergétiques »), eine Konsumsteuer für Energien, die als Heiz- oder Kraftstoff benutzt wird. Seit 2014 wird die Kohlenstoffemission in der Besteuerung berücksichtigt und ist eine Art Kohlenstoffsteuer geworden. Schrittweise hat die Regierung entschieden, die Steuersätze zu erhöhen, um treibstoffeffiziente Kraftstoffe zu fördern.

Tabelle 1: Entwicklung der TICPE zwischen 2014 und 2017 für Erdgas und Diesel

	2014	2015	2016	2017
Diesel (Cent € / kg)	42,84 €	46,82 €	49,89 €	53,07 €
CNG und LNG (Cent € / L)	1,97 €	4,09 €	5,27 €	7,67 €
Vergleich GNV – Diesel (Cent € kg vs. L)	40,87 €	42,73 €	44,62 €	45,40 €
Vergleich GNV-Diesel nach Rückerstattung (Cent € kg vs. L)	23,12 €	24,98 €	26,87 €	27,65 €

Quelle: eigene Darstellung in Anlegung von Torregrossa (2017)

In der obigen Tabelle ist zu erkennen, dass das Erdgas viel weniger besteuert wird als Diesel. Auch wenn beide TICPE durch die wachsende Berücksichtigung von CO₂-Emissionen steigen, erhöhen sich die Preise für Diesel schneller als für Erdgas, was die

⁵⁴ Vgl. CREG (2019), S.14.

⁵⁵ Vgl. AFGNV (2016), S.25.

preisliche Wettbewerbsfähigkeit von LNG zusätzlich erhöht. Die Regierung ist bestrebt, langfristig eine wesentliche Differenz beizubehalten, um diese Energie zu fördern.

Heutzutage ist es für Unternehmen, die im Güterverkehr tätig sind (mit Fahrzeugen von mehr als 7,5 Tonnen), möglich, einen Teil der Diesel TICPE erstattet zu bekommen (17,75 Cent €/Liter).⁵⁶ Die Ausweitung dieser Rückerstattung auf LNG-Kraftstoff wurde bereits untersucht, jedoch noch nicht eingeführt. Trotz vermindertem Preisvorteil des Erdgases, bleibt es trotzdem sehr attraktiv. Außerdem, beabsichtigt die Regierung, diesen Vorteil für Diesel nach und nach zu reduzieren. Die französische Regierung hat im Juli 2019 angekündigt, dass sich diese Rückerstattung im Jahr 2020 reduzieren wird (von ungefähr 2 Cent pro Liter).⁵⁷

3.2.2 Deutschland

Im Jahre 2016 hat das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie entschieden, dass Erdgas bis 2020 4% des deutschen Energieverbrauchs in der Transportbranche erreichen muss.⁵⁸ Um die wachsenden Anforderungen der EU hinsichtlich der CO₂-Emissionen einhalten zu können, wurden Maßnahmen eingeleitet, die es den Spediteuren ermöglichen den gegebenen Anforderungen gerecht zu werden.

Unter anderem werden 12.000€ von der deutschen Regierung für die Neuanschaffung eines Erdgas LKW subventioniert. Bis Ende 2020 wird jährlich ein Budget von 10 Millionen € eingeräumt werden. Jedes Unternehmen kann jährlich bis zu 500.000€ an Subventionen erhalten. Allerdings dürfen diese nicht mehr als 40% der Mehrkosten betragen, die im Vergleich für die Anschaffung eines Dieselfahrzeug anfallen würden.⁵⁹

Zusätzlich hat sich Deutschland dafür eingesetzt, die Steuererleichterung auf LNG-Kraftstoff bis 2023 zu verlängern, um den Akteuren eine bessere Planbarkeit geben zu können und Investitionen zu fördern. Heute liegt der Steuersatz für LNG bei 0,18€ pro Liter, im Vergleich dazu liegt der Steuersatz für Diesel bei 0,4734€. ⁶⁰ Diese Preisdifferenz kann, über ein ganzes Jahr gesehen, eine wesentliche Einsparung bedeuten.

⁵⁶ Vgl. Torregrossa (2017), Onlinequelle.

⁵⁷ Vgl. Le Parisien (2019), Onlinequelle.

⁵⁸ Vgl. BWE (2016), Onlinequelle.

⁵⁹ Vgl. BMWI (2018), S.1.

⁶⁰ Vgl. CREG (2019), S.15.

Für ein Fahrzeug, das zum Beispiel 140.000 km pro Jahr fährt, macht das einen Unterschied von jährlich 1.555€ aus.⁶¹

Zudem sind Erdgas LKWs und Fahrzeuge mit bivalenten Antrieben (Hybrid mit Erdgas und Diesel) von der LKW-Maut bis Ende 2020 befreit.⁶² Für Dieselfahrzeuge liegt der aktuelle Mautsatz pro Kilometer zwischen 17,30€ und 18,70€.⁶³ Diese Befreiung kann die Betriebskosten der Spediteure erheblich senken. Je nach Fahrten, kann es monatlich einen Unterschied von mehreren tausend Euro pro Fahrzeug ausmachen. Bei der Ankündigung der Umsetzung dieser Maßnahme sind viele Unternehmen zu dem Entschluss gekommen in LNG-Fahrzeuge zu investieren.

3.3 Einschränkungen in Umweltzonen

3.3.1 Funktionsweise

In Gebieten, in denen die Luftqualität durch den Verkehr bedeutend geschadet ist, können Umweltzonen (oder ‚Low Emission Zone‘) eingerichtet werden. Sie regulieren die Luftverschmutzung durch die Beschränkung des Zugangs je nach Emissionsniveau. Nur Fahrzeuge, die bestimmte Abgasemissionen einhalten, dürfen in diese Zonen fahren.

Jede Stadt in der EU kann sich auf die Euronormen stützen, um die Regeln ihrer Umweltzone zu definieren, in Anhängigkeit ihrer lokalen Situation und Problematik. Die meisten Fahrzeuge, die von dem Zugangsverbot betroffen sind, sind Busse und Lastkraftwagen. Leichte Fahrzeuge wie PKWs oder Nutzfahrzeuge sind immer mehr von diesen Einschränkungen betroffen.

Im Jahre 2018 hat die Europäische Kommission gegen mehrere Länder, unter anderem Frankreich und Deutschland, wegen dauerhafter grenzüberschreitender Luftverschmutzung geklagt. Die Länder wurden beschuldigt, zu wenige Maßnahmen getroffen zu haben, besonders in Krisenzeiten, in welchen die Werte außerordentlich hoch waren. Deshalb werden europaweit immer mehr Umweltzonen für Städte eingeführt, um den Zugang zu den Ballungsräumen zu beschränken⁶⁴.

⁶¹ Mit einem Verbrauch von 27kg LNG/100km und 28L Diesel/100km.

⁶² Vgl. Bundesamt für Güterverkehr (2018), Onlinequelle.

⁶³ Vgl. Toll Collect GmbH (2019), Onlinequelle.

⁶⁴ Vgl. AFGNV (2016), S.4.

3.3.2 Deutschland

Deutschland ist eines der europäischen Länder mit der größten Anzahl an Umweltzonen. Die Bundesländer in Deutschland haben die Notwendigkeit ihrer Umsetzung, um die Umweltverschmutzung in den am stärksten betroffenen Gebieten zu verringern, früh erkannt. Seit 2008 wurden 58 Umweltzonen eingerichtet.⁶⁵

In Deutschland müssen alle Fahrzeuge (außer Motorräder) mit einer Plakette fahren, die in allen Umweltzonen in Deutschland anerkannt wird. In jeder Umweltzone kann mit einer grünen Plakette gefahren werden. Es gibt allerdings auch einige ausgewählte Umweltzonen, in denen das Fahren mit einer gelben Plakette erlaubt ist.

Tabelle 2: Klassifizierung von Umweltplakette für Busse und LKW (>3,5t)

				
<i>Diesel</i>	- Euro 4 bis 6 (ab 2006) - Euro 3 mit Partikelfilter (ab 2001)	Euro 3 ab 2001	Euro 2 ab 1996	Euro 0 und 1
<i>Alternative Antrieben</i>	LPG, Erdgas, Wasserstoff Elektro- u. Hybridfahrzeuge	x		

Quelle: eigene Darstellung in Anlegung von Umweltbundesamt (2018a)

Ab dem Zeitpunkt, zu dem die Umweltzonen eingeführt wurden, gab es sehr positive Ergebnisse. Das Deutsche Bundesamt für Umwelt hat die Wirkungen der Umweltzonen in Berlin analysiert. Laut dieser Studie hat sich der Verkehr verringert. Meistens haben sich Dieselfahrer mit Partikelfiltern ausgerüstet, wodurch die Abgaskonzentration gesunken ist. Außerdem erfüllen heute etwa 98% der Autofahrer und 85% der LKW-Fahrer die Abgasstandards für die grüne Plakette (Klasse 4).⁶⁶ Das heißt, dass die zukünftigen Wirkungen nur sehr gering sein können, wenn die Einschränkungen nicht strenger werden.

Aus diesem Grund wurden 2018 Fahrverbotszonen für Dieselfahrzeuge in Deutschland eingeführt, um zusätzlich zu Umweltzonen in sehr verschmutzten Gebieten zu agieren. Diese Maßnahme soll die Einwohner vor Feinstaubemissionen schützen, die von Dieselfahrzeugen aufgestoßen werden. Im Raum Stuttgart zum Beispiel ist die

⁶⁵ Vgl. Umwelt Bundesamt (2018a), Onlinequelle.

⁶⁶ Vgl. Umwelt Bundesamt (2018a), Onlinequelle.

Luftqualität besonders von Luftschadstoffen belastet, mit 45 Tagen im Jahr 2017, an denen die Feinstaub- Grenzwerte (PM10) überschritten wurden.⁶⁷ Deshalb wurde im Januar 2019 ein Dieselverkehrsverbot eingeführt. Die Dieselfahrzeuge mit Abgasnormen Euro 4 oder schlechter (PKW) und Euro IV oder schlechter (LKW) dürfen nicht mehr in Stuttgart fahren oder parken.⁶⁸ Bald werden nur noch die Fahrzeuge mit Euro 6/Euro VI fahren dürfen, was die Menge der Fahrzeuge deutlich reduzieren wird.

3.3.3 Frankreich

In Frankreich heißen diese Zonen „Zones à Circulation Restreinte“ (Verkehrsberuhigte Zonen) oder „Zones à faibles Emissions“ (Zonen mit Emissionsbeschränkung) und funktionieren mit einem ähnlichen System, wie die europäischen Umweltzonen. Jeder Autofahrer muss eine Plakette ‚CritAir‘ auf seinem Auto haben, um eine Zone zu befahren, die auf die Euro-Normen basiert ist.⁶⁹ Allerdings ist das System nur in wenigen Städten eingeführt worden und die Einschränkungen sind zwischen den Zonen sehr unterschiedlich.

Tabelle 3: Klassifizierung von Umweltplaketten für Busse und LKW (>3,5t)

							
<i>Diesel</i>	x		Euro 6 ab 2014	Euro 5 ab 2009	Euro 4 ab 2006	Euro 3 ab 2001	Euro 1/2 vor 2001
<i>Alternative Antrieben</i>	Elektrisch Hydrogen	Erdgas & Hybride	x				

Quelle: eigene Darstellung in Anlegung von Crit'Air.fr (2018)

In Paris dürfen seit 2017 Fahrzeuge der Kategorie 5 nicht mehr im Stadtzentrum fahren. Diese Beschränkungen sollen sich aber in den nächsten Jahren noch sehr verschärfen, um schrittweise die Fahrzeuge in der Kategorie 2 bis 4 auszuschließen. Ähnliche Einschränkungen existieren auch in Lyon und Grenoble an Tagen, an denen die Luftverschmutzung die Grenzwerte überschritten hat.⁷⁰

⁶⁷ Vgl. Stadtklima-Stuttgart.de (2019), Onlinequelle.

⁶⁸ Vgl. ADAC e.V. (2019), Onlinequelle.

⁶⁹ Vgl. ADEME (2018), S.55.

⁷⁰ Vgl. GRDF (2017), Onlinequelle.

Solche Zonen und Einschränkungen werden sich in den nächsten Jahren vervielfältigen, da Frankreich von der Europäischen Union gedrängt wird, seinen Rückstand bezüglich der Umweltzonen aufzuholen. Ungefähr fünfzehn neue Umweltzonen sollen bis Ende 2020 in großen Städten geschaffen werden.⁷¹

3.3.4 Vorteil für LNG-Fahrzeuge

Zusätzlich zu der Verschärfung von Euro-Normen auf EU-Ebene, gibt es immer mehr nationale Beschränkungen wie Umweltzonen oder Dieselfahrverbotszonen. Während die Diesel Lieferfahrzeuge besonders von diesen Nutzungseinschränkungen betroffen sind, sind LNG-Fahrzeuge bei den meisten Klassifikationssystemen in die vorteilhafte Kategorie eingeordnet worden. Es ist noch unbekannt, ob es weitere rechtliche Verschärfungen geben wird. Ein alternativer Antrieb macht trotzdem Sinn, um sich im Vorfeld abzusichern. Dazu werden auch meistens Nutzungsprivilegien für alternative Antrieben vergeben, was den Verkehr erleichtern oder sich auf die Kosten auswirken kann.

⁷¹ Vgl. Mandard (2018), Onlinequelle.

4. Ökologischer Vergleich

Um die Umweltbelastung von Diesel- und LNG-funktionierend Schwerlast-LKWs zu vergleichen, müssen mehrere Arten von Emissionen wie zum Beispiel Treibhausgasen, Schadstoffe oder Lärmbelastigungen untersucht werden.

4.1 Treibhausgase

4.1.1 Tank-to-Wheels (TTW)

In einer Tank-to-Wheels (TTW) Analyse werden die Treibhausgas-Emissionen von der Tanksäule bis hin zur Kraftstoffverbrennung berechnet. Heutzutage stellt die Mehrheit der Studien fest, dass Erdgas, mit seinen chemisch-physikalischen Eigenschaften weniger Kohlenstoff enthält und dadurch ungefähr 20%^{72,73} bis 25%^{74,75} weniger Treibstoffemissionen ausstößt als Diesel. Allerdings, erzielt man diese Ergebnisse nur wenn die Brennstoffeigenschaften verglichen werden.

Tatsächlich ist ein Diesel-Antrieb effizient als der LNG-Antrieb. Es gibt noch keine Datenbank, die umfassend genug ist um den Verbrauch von Diesel und LNG genauer vergleichen zu können. Der Verbrauch kann deutlich variieren, gemäß LKW-Modell, Gas-Komposition, Ladegewicht, Streckentyp, Fahrstil, Wetterbedingungen, usw. Laut reellen Fallstudien und Herstelleranalysen soll ein heutiger LNG-LKW zwischen 10% und 30%^{76,77} mehr Kraftstoff pro Kilometer verbrauchen, als ein neues Diesel-Fahrzeug für dieselbe Strecke benötigt. Hinzu kommt, dass während der Fahrt eines Erdgasfahrzeuges das Methan nicht vollständig verbrannt wird (Methanschlupf).^{78,79}

All diese Effizienzverluste schaden dem Vorteil der CO₂-Emissionsreduktion. Wenn die Motorleistung berücksichtigt wird, ist der Unterschied zwischen Diesel und LNG nicht

⁷² Vgl. IEA (2017), S.85.

⁷³ Vgl. Pfoser et al. (2018), S.259.

⁷⁴ Vgl. Osorio-Tejada / Llera / Scarpellini (2015), S.237.

⁷⁵ Vgl. Peters-von Rosenstiel (2014), S.11.

⁷⁶ Vgl. Sihvonen (2018), S.26.

⁷⁷ Vgl. Peters-von Rosenstiel (2014), S.9.

⁷⁸ Vgl. Sihvonen (2018), S.26.

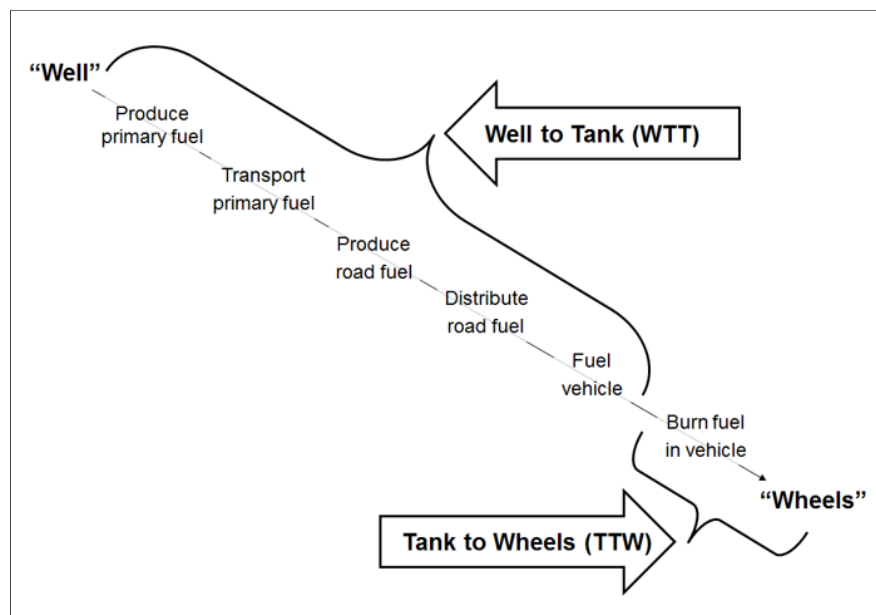
⁷⁹ Vgl. Le Fevre (2014), S.66.

mehr so hoch. Je nach Studien variieren die Ergebnisse der CO₂-Emissionen eines LNG-Fahrzeug im Vergleich mit denen eines Diesels zwischen -14%⁸⁰ bis -20%⁸¹.

4.1.2 Well-to-Wheels (WTW)

Durch eine Well-to-Wheels (WTW) Analyse, kann man einen umfassenderen Vergleich in der gesamten Wirkungskette durchführen. Für jede Stufe des Lebenszyklus (Gasförderung, Transport, Verflüssigung, Vertrieb, etc.) wird der Gesamtenergiebedarf definiert und die Treibhausemission berechnet.

Abbildung 8: Process „Well-to-Wheels“



Quelle: European Commission (2016)

Für LNG weisen die Studien sehr unterschiedliche Ergebnisse auf, da das Erdgas, aus vielfältiger Herkunft, mit unterschiedlichen Produktions- und Transportmethoden analysiert wird.

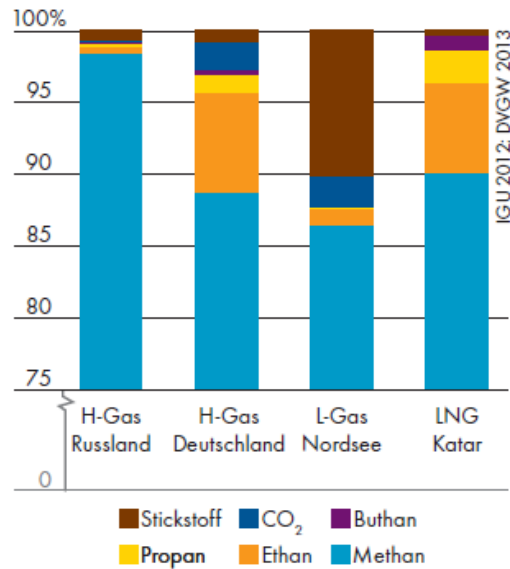
Allein die Herkunft des Erdgases führt zu sehr ungleichen Zusammensetzungen, die den Ausstoß von Emissionen beeinflussen. Zum Beispiel ist der Methangehalt von russischem Erdgas viel höher als der des Erdgases von Katar, das in Europa am meisten für LNG benutzt wird. Da andere chemische Bestandteile keine benötigte Energie enthalten, ist die Erdgasqualität niedriger und die Emissionswerte höher.⁸²

⁸⁰ Vgl. Arteconi et al (2010), S.2011.

⁸¹ Vgl. Osorio-Tejada / Llera / Scarpellini (2015), S.237.

⁸² Vgl. Shell Deutschland Oil GmbH (2016), S.44.

Abbildung 9: Verschiedene Zusammensetzungen von LNG nach Herkunft



Quelle: Shell Deutschland (2016)

Ein weiterer Faktor, der sich negativ auf die CO₂-Emissionen auswirkt, ist der Methanschlupf. Aufgrund des hohen Drucks und der Flüchtigkeit des Gases, neigt es dazu zu entweichen. Dies kann sowohl während der Motorverbrennung als auch während der gesamten Wirkungskette vorkommen (Transport, Betankung, usw.). Einige Studien zeigen, dass im Durchschnitt 2% des produzierten Erdgases entweicht.⁸³ Die Akteure auf dem Gasmarkt haben erst damit begonnen sich an der Prozessoptimierungen, die zu Leckagen Reduktion führen, zu interessieren. Der Raum für Verbesserungen ist aber sehr groß, was die Treibhausbilanz von LNG verbessern würde.

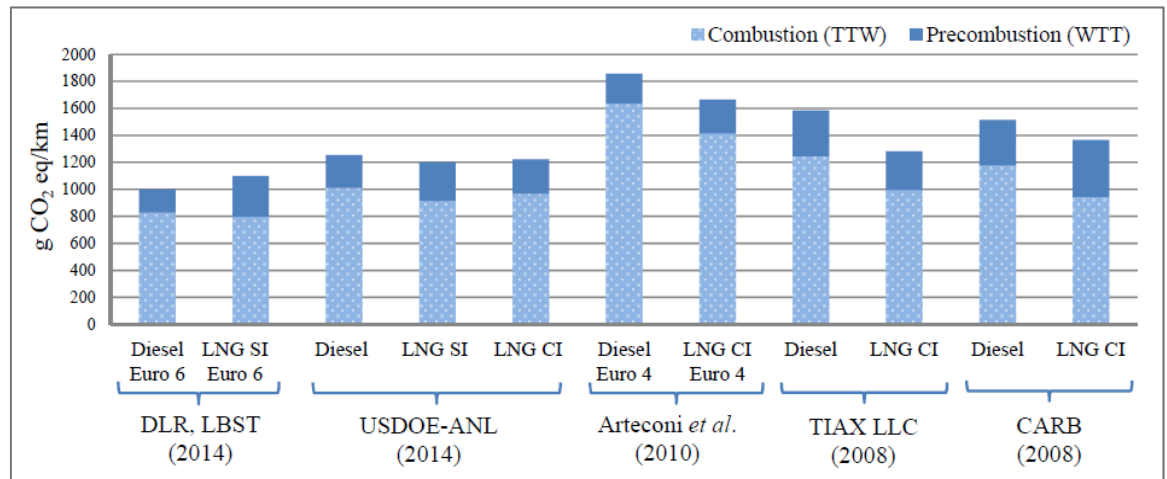
Heutzutage wurden nur wenige Studien durchgeführt, die Treibstoffemissionen von LNG- und Dieselfahrzeugen entlang der gesamten Wirkungskette miteinander vergleichen. Der „Centre of Research for Energy Resources and Consumption“ hat die existierende Studien analysiert und festgestellt, dass in fast allen WTW Analysen, LNG weniger Treibstoff als Diesel ausstößt. Außerdem existieren bedeutende Abweichungen in den Ergebnissen der Studien, da verschiedene Hypothesen und Szenarien berücksichtigt wurden. Von besonderer Bedeutung ist auch der Ort, an dem die Studie durchgeführt wurde. Denn dieser kann unter anderem Auswirkungen auf das Herkunftsland des Gases, den Transport und das Fahrzeugmodell haben.

⁸³ Vgl. Sihvonen (2018), S.3.

Durch den Vergleich der Ergebnisse kann man jedoch einen repräsentativen Durchschnitt definieren. Laut der Mehrheit an Studien befindet sich die Treibstoffreduzierung (WTW) mit LNG zwischen -12% und +10%⁸⁴ pro Kilometer im Vergleich zu Diesel.

Quelle: Osorio-Tejada / Llera / Scarpellini (2015)

Abbildung 10: Vergleich von Studien gemäß Treibstoffemissionen Unterschied zwischen LNG und Diesel



Die Emissionen von LNG neigen dazu in den nächsten Jahren abzunehmen. Falls der Markt sich weiterentwickelt, sollte sich die Technologie verbessern und die Prozesse weiter optimiert werden. Im Gegensatz dazu weißt der Diesel, dessen Markt schon gesättigt ist, nur ein geringes Optimierungspotenzial hinsichtlich der Prozesse auf.

Des Weiteren wird die CO₂-Einsparung von einer Umstellung von Diesel auf LNG-Antriebe nicht ausreichen, um die notwendige Dekarbonisierung des Straßenverkehrssektors der internationalen Gemeinschaft zu erzielen.⁸⁶ In Bezug auf die CO₂-Emissionen können LNG-LKWs nur dann eine Lösung für den dringenden Bedarf an CO₂-Reduzierung sein, wenn alle LNG-Fahrzeuge ausschließlich Bio-Methan verwenden (siehe Kapitel 4.4.2).

4.2 Schadstoffemissionen

4.2.1 Vergleich von Emission

Obwohl die Treibhausemission bei einer Umstellung von Diesel zu Erdgas ziemlich gering ist, sind die Vorteile für die Luftqualität unbestreitbar. Es gibt einen deutlichen

⁸⁴ Vgl. Sihvonen (2018), S.27.

⁸⁵ Vgl. Osorio-Tejada / Llera / Scarpellini (2015), S. 239.

⁸⁶ Vgl. IEA (2017), S.85.

Unterschied zwischen Diesel (ohne Abgasnachbehandlungssystem) und LNG-Fahrzeuge für Schadstoffemissionen, wie KohlenmoNOxid (CO), Stickoxiden (NOx), Schwefeloxide (SOx) und Feinstaub (PM). Dazu gibt es bei LNG-Antrieben noch weitere Vorteile, da im Vergleich zu Diesel, fast kein Rauch und keine krebserregenden Stoffe wie Blei ausgestoßen werden. Erdgas ist dazu nicht korrosiv und belastet im Falle von Leckagen, weder den Boden noch das Grundwasser.⁸⁷

Tabelle 4: Vergleich von Schadstoffausstoß zwischen LNG und Diesel

Schadstoffen		Vergleich mit Diesel	Quellen
CO	KohlenmoNOxid	-70% bis - 80%	88 89
PM	Partikel	-95% bis -99%	90 91 92 93 94
NOx	Stickoxide	-70% bis -90%	95 96 97 98
SOx	Schwefeloxide	-95% bis -99%	99 100 101

Quelle: eigene Darstellung

Zudem ist es wichtig zu beachten, dass der Feinstaub-Partikel ausstoß durch die Abgasnachbehandlungssysteme, beziehungsweise Partikelfilter, auch extrem wenige Partikel emittieren. In den meisten Studien erkennen die Messgeräte fast keinen Unterschied zwischen LNG und Diesel. Allerdings haben Erdgasfahrzeuge im Gegensatz zu den immer komplexeren Filtersystemen von Diesel, sehr einfache oder überhaupt keine Filter nötig.¹⁰²

4.2.2 Tests unter realen Bedingungen

⁸⁷ Vgl. En route avec le gaz naturel (2014), S.1.

⁸⁸ Vgl. Albus et al. (2016), S.4.

⁸⁹ Vgl. Osorio-Tejada / Llera / Scarpellini (2015), S.237.

⁹⁰ Vgl. Lesche (2018), S.7.

⁹¹ Vgl. Osorio-Tejada / Llera / Scarpellini (2015), S.237.

⁹² Vgl. Pfoser et al. (2018), S.259.

⁹³ Vgl. Simmer / Aschauer / Schauer (2014), S.4.

⁹⁴ Vgl. Osorio-Tejada / Llera / Scarpellini (2015), S.237.

⁹⁵ Vgl. Pfoser et al. (2018), S.259.

⁹⁶ Vgl. Lesche (2018), S.7.

⁹⁷ Vgl. Osorio-Tejada / Llera / Scarpellini (2015), S.237.

⁹⁸ Vgl. Albus et al. (2016), S.4.

⁹⁹ Vgl. Simmer / Aschauer / Schauer (2014), S.4.

¹⁰⁰ Vgl. Osorio-Tejada / Llera / Scarpellini (2015), S.237.

¹⁰¹ Vgl. Pfoser et al. (2018), S.259.

¹⁰² Vgl. AFGNV (2015), S.11.

- *Vergleich mit wissenschaftlichen Studien*

Die zuvor beschriebenen Ergebnisse stammen aus zahlreichen wissenschaftlichen Artikeln und Daten von Fahrzeugherstellern. Es zeigt sich jedoch, dass diese nicht genau mit denen von realen Experimenten übereinstimmen. Diese Experimente sind für diese Studie allerdings interessanter. Zum einen, da sie häufig von unabhängigen Forschungseinrichtungen oder von Spediteure selbst durchgeführt werden und zum anderen, da sie unter realen Fahrbedingungen durchgeführt wurden, die glaubwürdiger als die der Hersteller sind.

- *Projet ‚Equilibre‘*

Die französische Studie ‚Projet Equilibre‘, ist von der Vereinigung sechs französischer Transporteure verwirklicht worden, um die Wettbewerbsfähigkeit und Rentabilität von Erdgas für Fahrzeuge zu studieren. Um die fehlenden Datenbanken hinsichtlich Verbrauch (CO₂) und Emissionen (NO_x) zu bekommen, wurden die Leistungen von zwölf LKWs zwischen 19 und 44 Tonnen analysiert. Für die Spediteure war das Ziel, definieren zu können, wie sie die verschiedenen Fahrzeuge (Erdgas oder Diesel) gemäß der Verwendung effektiv benutzen sollen.¹⁰³ Dafür wurden zahlreichen Faktoren berücksichtigt, um die Leistung rechnen zu können:

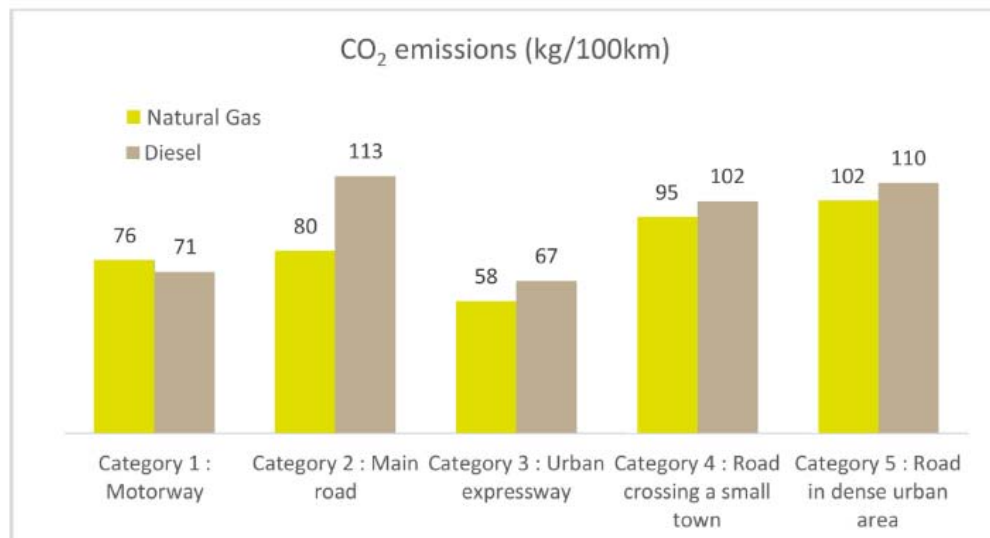
- Infrastruktur (Mautstellen, Baustellen, Ampeln)
- Wetterbedingungen (Wind)
- Verkehrslage (flüssiger Verkehr, Stau)
- Streckentyp
- Höhenunterschied
- Ladegewicht

Um eine zuverlässige Übersicht zu geben, musste eine große Stichprobe analysiert werden. Zwei Jahre lang, zwischen 2016 und 2018, wurden Diesel und Erdgas-Antriebe auf mehr als eine Million Kilometer verglichen.

Die finalen Ergebnisse für 44 Tonnen LKW zeigen, dass der Energieverbrauch (Abrechnungseinheit in Kg oder Liter) für beide Antriebe sehr ähnlich ist. Die Tank-to-Wheel (TTW) Analyse betont eine limitierte CO₂-Einsparung mit LNG in Vergleich zu Diesel. Der Unterschied befindet sich zwischen +7% und -20% je nach Strecken Typ.

¹⁰³ Vgl. Projet Equilibre (2018), S.2.

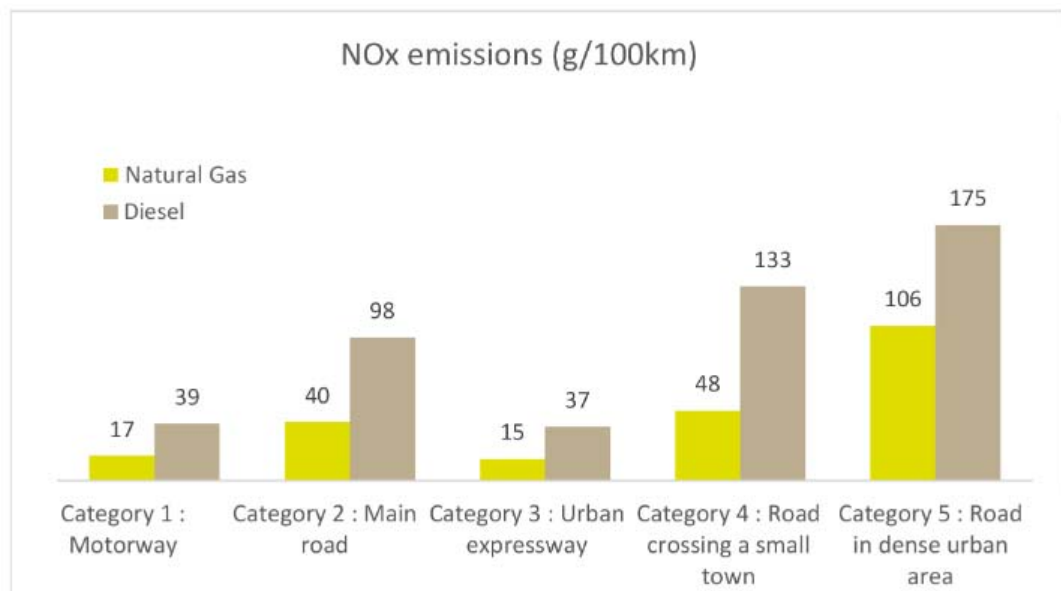
Abbildung 11: Ergebnisse des ‚Projet Equilibre‘: Vergleich der Treibstoffemissionen (CO₂) zwischen Diesel- und LNG-Schwerlastkraftwagen (40t)



Quelle: Projet Equilibre (2018)

Für die Stickoxide (NO_x) ist die Bilanz sehr positiv und die Einsparung variiert je nach Streckentyp zwischen -40% und -62%.¹⁰⁴ Beide Fahrzeugtypen waren mit den üblichen Abgasnachbehandlungssystemen ausgestattet (‚einfache‘ Systeme für LNG-Fahrzeuge und ‚komplexe‘ Systeme für den LNG-Diesel).

Abbildung 12: Ergebnisse des ‚Projet Equilibre‘: Vergleich der Stickoxid (NO_x) Emissionen zwischen Diesel- und LNG-Schwerlastkraftwagen (40t)



Quelle: Projet Equilibre (2018)

¹⁰⁴ Vgl. Projet Equilibre (2018), S.15.

- *Weitere Fallstudien*

Eine ähnliche Vergleichsstudie ‚LNG Motion‘, wurde 2015 von mehreren französischen Akteuren aus der Transportbranche geführt. Auf verschiedenen Fahrten wurden zwei IVECO Lastkraftwagen verglichen: den Stralis GNL 330PS und den Stralis Euro VI 460PS (Diesel, ohne Partikelfilter). Die Ergebnisse dieser Studie stimmen mit den Ergebnissen vom ‚Projet Equilibre‘ überein. Es gab mit dem LNG-Fahrzeug zwischen -4% bis -16% weniger Treibstoffemissionen und zwischen -30% und -70% weniger Stickoxide (NOx) im Vergleich zum Diesel Pendant.¹⁰⁵

Die neueste Studie dieser Art wurde im September 2019 von der niederländischen Regierung beantragt und von der NGO "Transport&Environment" veröffentlicht. Die Ausstöße von drei LNG-Schwerlastfahrzeugen (Iveco, Scania, Volvo) wurden mit einem Diesel-Fahrzeug verglichen. Aus dieser Studie ging hervor, dass die getesteten LNG-LKWs bis zu fünfmal mehr NOx als Diesel-LKWs und genau so viel Feinstaubemission im Stadtverkehr ausstoßen.¹⁰⁶

Die Ergebnisse in Bezug auf die CO₂-Emissionen stimmen mit den meisten durchgeführten Experimenten überein. Allerdings stehen für Stickoxyd-Ausstöße diese Ergebnisse im extremen Widerspruch zu den anderen Experimenten und den meisten aktuellen wissenschaftlichen Studien. In den anderen Experimenten wurden die Feinstaubpartikel nicht berechnet, sodass ein Vergleich schwierig ist. Es gilt jedoch zu berücksichtigen, dass mit den verwendeten Geräten nur Feinstaubpartikel mit einer Größe von über 23 Nanometern erfasst werden können, was die feinsten Partikel, die am gefährlichsten sind, ausschließt.¹⁰⁷ Darüber hinaus, hat sich das Experiment nur auf eine einzelne Fahrt (mit unterschiedlichen Straßentypen) beschränkt.¹⁰⁸

Die Ergebnisse unterscheiden sich daher zwischen den wissenschaftlichen Studien und den durchgeführten Experimenten. Selbst wenn die aktuellen Studien tendenziell eine Abnahme der Schadstoffe bei LNG nachweisen, werden die tatsächlichen Auswirkungen von LNG nur durch weitere Forschungen bestimmen werden können.

4.2.3 Einhaltung der Euronorm VI

¹⁰⁵ Vgl. AFGNV (2015), S.2.

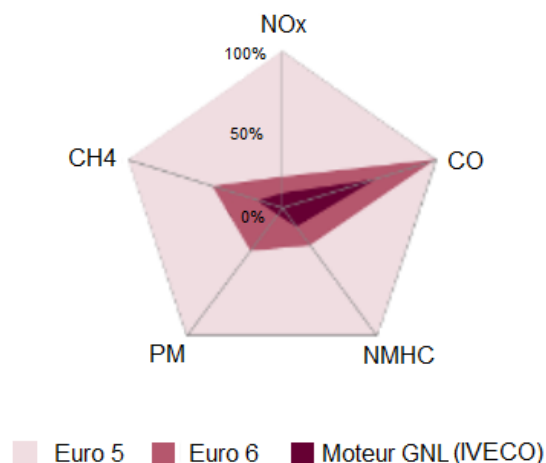
¹⁰⁶ Vgl. Transport&Environment (2019), S.3-4.

¹⁰⁷ Vgl. Transport&Environment (2019), S.10.

¹⁰⁸ Vgl. Vermeulen (2019), S.17.

Die aktuellen LNG-Ausstöße unterschreiten schon deutlich die Grenzwerte der letzten Euro-Norm VI aus dem Jahr 2014. Obwohl die Euro-Norm noch deutlich strenger als die vorherige geworden ist, produziert LNG ungefähr -42% NOx und 95% weniger als die erlaubten Grenzwerte.¹⁰⁹ Auch wenn die neueste Generation von Diesel Schwerlastfahrzeugen diese Grenzen auch einhalten können, erlaubt LNG bessere Ergebnisse mit wenig technischem Aufwand.¹¹⁰

Abbildung 13: Vergleich Emissionswerte von Iveco LKW (Cursor 8) im Vergleich mit Euro Normen V und VI



Quelle: Sia Partners (2014)

Angeht die Dringlichkeit der Lage bezüglich der Luftqualität in ganz Europa, werden die neuen Normen immer restriktiver werden.

In Deutschland beispielweise führte 2014 der Straßenverkehr zu 40% der Stickoxide (NOx) und 13% der Feinstaub Emissionen.¹¹¹ Durch die Optimierung der Motoren und durch den Druck von EU-Politiken ist die Feinstaub-Konzentration deutlich gesunken. Laut einer Studie des Umweltbundesamtes aus dem Jahr 2018 hat sich das Feinstaubniveau (PM10) seit 1995 annähernd halbiert. Allerdings ist die Feinstaubverschmutzung in Ballungsräumen immer noch zu hoch, um die Jahres-Grenzwerte der EU einzuhalten.¹¹²

In Deutschland haben 2018 mehr als 35 Städte die EU-Stickoxidgrenzwerte überschritten.¹¹³ Die Einführung von LNG- Lastfahrzeugen in Städten, in denen die

¹⁰⁹ Vgl. Koeppel et al. (2017), S.49.

¹¹⁰ Vgl. Koeppel et al. (2017), S.49.

¹¹¹ Vgl. DVGW (2017), S.3.

¹¹² Vgl. Umweltbundesamt (2018), Onlinequelle.

¹¹³ Vgl. Spiegel Online GmbH & Co. KG (2019), Onlinequelle.

Emissionen von Partikeln und Stickoxiden besonders kritisch sind, könnte schnell zu einer Verbesserung der Luftqualität führen.

4.2.4 Auswirkungen auf die Gesundheit

Feinstaub-Partikel sind von der WHO seit 2012 als toxisch und krebserregend eingestuft.¹¹⁴ Stickoxide und Feinstaub sind beide für das kardiovaskuläre System sehr schädlich und fördern Herzinfarkte. Sie verursachen auch Lungenentzündungen und Lungenkrebs, besonders für Menschen die Allergien haben oder Asthmatiker sind.

Zusätzlich zu den hohen Mengen an Schadstoffen, die von Diesel-Fahrzeuge ausgestoßen werden, bringen Diesel-Ausrüstungen neue Arten von Emissionen, die für die Gesundheit besonders schädlich sind.

- *Partikelfilter*

Trotz der Ausrüstung neuer Dieselfahrzeuge mit Partikelfilter, die die Feinstaub-Emissionen deutlich verringern, werden Nanopartikel ausgestoßen, die deutlich gefährlicher für die Gesundheit sind. Diese Partikel sind viel kleiner als die ‚normalen‘ Partikel (PM10 oder PM2,5), die viel breiter sind und deren Aufnahme vom menschlichen Körper einfacher verhindert werden kann. Diese würden nicht mehr nur die Bronchien erreichen, sondern auch weitere Organe, wie zum Beispiel dem Gehirn schaden. Das könnte zu neurodegenerativen Erkrankungen führen.¹¹⁵ Zudem führen, laut der Weltgesundheitsorganisation (WHO)¹¹⁶, Partikelfilter, die in der EU seit 2015 in Dieselfahrzeugen (Euro VI) eingebaut sein müssen, indirekt zu einer Steigerung von Ammoniak-Emissionen (NH₃). Einmal in die Atmosphäre ausgestrahlt, findet eine chemische Reaktion statt, die zu einer neuen Partikelbindung führen kann.¹¹⁷ Allerdings tragen manche Filter-Typen auch zum Anstoß von Stickstoffdioxid (NO₂) bei.

- *Selektive katalytische Reduktion*

Selektive katalytische Reduktion bezeichnet eine Technik, die seit 2004 in LKWs verwendet wird, um Stickoxide zu filtern. Wenn der Motor eine bestimmte Temperatur erreicht, gibt es eine Reaktion von Ammoniak mit CO₂, die das Umwandeln vom

¹¹⁴ Vgl. Centre International de Recherche sur le Cancer (2012), S.1.

¹¹⁵ Vgl. Bourdel et al (2017), S.4.

¹¹⁶ Vgl. Henschel/Chan (2013), S.13.

¹¹⁷ Vgl. Ministère des Solidarités et de la Santé (2018), Onlinequelle.

schädlichen NO_x ermöglicht. Allerdings haben nicht alle Fahrzeuge, die in Städten fahren, genügend Zeit die erforderlichen Temperaturen zu erreichen, um diese Emissionen zu vermeiden. Deshalb wird zusätzlich zu Stickoxiden auch Ammoniumnitratpartikel durch die chemische Reaktion im Katalysator ausgestoßen.¹¹⁸

Selbst wenn die neuen Diesel-LKW die Euro IV Emissionsgrenzen einhalten, werden diese nur aufgrund der Partikelfilter und Stickoxid-Katalysatoren eingehalten. Diese führen zur Produktion von neuen Schadstoffen, die in der Euro-Norm noch nicht berücksichtigt werden.

4.3 Lärmbelastung

4.3.1 Emissionsvergleich und Wirkungen auf die Gesundheit

Eine andere Art von Umweltverschmutzung, die vom Verkehr angetrieben wird, ist die Lärmbelastung. In ländlichen Gebieten wie im Stadtgebiet, sind Fahrzeuge und insbesondere Lastkraftwagen für die Verschlechterung der Lebensbedingungen verantwortlich.

Dadurch sind auch die Wildtierarten betroffen. Durch die Störung ihres Lebensraumes, Stress und der Lautstärke bedingten Unterbindung ihrer Kommunikation, können sie keine Geräusche mehr von sich geben, die für das Überleben der Arten (Jagd, Erkennung von Fressfeinden, usw.) notwendig sind.¹¹⁹

Zudem hat chronische Lärmexposition auch psychische und körperliche Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit. Laut der Weltgesundheitsorganisation ist Verkehrslärm der zweite gesundheitsschädliche Umweltstressor nach Luftverschmutzung. Die Hauptauswirkungen gehen von Hörminderung, Hormonstörung und Schlafstörungen bis zu Herzkrankheiten in den schlimmsten Fällen.¹²⁰ Gemäß einer Studie von „Transport & Environment“ aus dem Jahr 2008 war Lärmbelästigung verursacht durch Transport für 50.000 tödliche Herzinfarkte, 200.000 kardiovaskuläre Krankheiten und 5% der Schlaganfälle in Europa verantwortlich.¹²¹

¹¹⁸ Vgl. Franceinfo (2018), Onlinequelle.

¹¹⁹ Vgl. Buxton (2017), Onlinequelle.

¹²⁰ Vgl. WHO European Centre for Environment and Health (2011), S.22.

¹²¹ Vgl. European Federation for Transport and Environment (2008), S.6.

Die heutigen Erdgas-Fahrzeuge verursachen zwei Mal weniger Lärm als Dieselfahrzeuge. Es kann für Spediteure ein Wettbewerbsvorsprung für Stadtlieferungen sein, da Reglementierungen immer strenger werden und die Kunden mehr Interesse an Gesundheitsfragen haben. Besonders für schwere Fahrzeuge und ‚letzten Meilen‘ Lieferungen könnte LNG eine vorteilhafte Lösung werden.¹²²

Mit geräuscharmen Motoren erfüllen LNG-Lastfahrzeuge Schallschutznormen, wie PIEK, im Gegensatz zu Standard Diesel-Lastkraftwagen. Die « Piek Zertifizierung » ist eine niederländische Zertifizierung, die zum Standard für die Kontrolle von Fahrzeuggeräuschen in Europa geworden ist.¹²³ Diese Garantie stellt eine Dezibel Höchstgrenze auf, die während Nachtlieferungen in Städten eingehalten werden muss, um die Nachtruhe der Einwohner zu gewährleisten:

- zwischen 19h und 23h: Maximum 65 Dezibel
- zwischen 23h und 7h: Maximum 60 Dezibel

4.3.2 Vorteil für Stadtlieferungen

Obwohl die Schwerlastkraftwagen nur 10% der Fahrzeuge, die in Stadtgebiete fahren ausmachen, sind sie für 40% der Umweltverschmutzung und Lärm verantwortlich.¹²⁴ Außerdem führen Lastfahrzeuge zu einer Auslastung des Verkehrs. Tatsächlich sind 10% des Straßennetzes der Europäischen Union von Stau betroffen, was den Kraftstoffverbrauch deutlich erhöht.¹²⁵ Um diese Belastungen zu vermeiden und den Verkehrsfluss in Städten zu verbessern, errichten europäische Städte immer mehr Restriktionen für Lieferungen am Tag.

Durch Nachtspeedition ist es möglich, produktiver zu werden, da durch einen optimalen Verkehr weniger Zeit und Benzin verbraucht werden, was auch eine bessere Luftqualität und weniger Straßenüberlastung impliziert. Allerdings können die nächtlichen Fahrzeuggeräusche die Gesundheit der Einwohner belasten. Aus diesem Grund gibt es in bestimmten Europäischen Regionen (Deutschland, Österreich, Schweiz, Spanien) Nachtfahrverbote. Mit niedrigen Schadstoffen und niedriger Lärmbelastung ist LNG für Nachtbelieferungen in Städten optimal.

¹²² Vgl. AFGNV (2016), S.11.

¹²³ Vgl. Piek-Cemafroid (o.J), Onlinequelle.

¹²⁴ Vgl. Zunder/Ibanez (2004), S.78.

¹²⁵ Vgl. European Commission (2010), S.11.

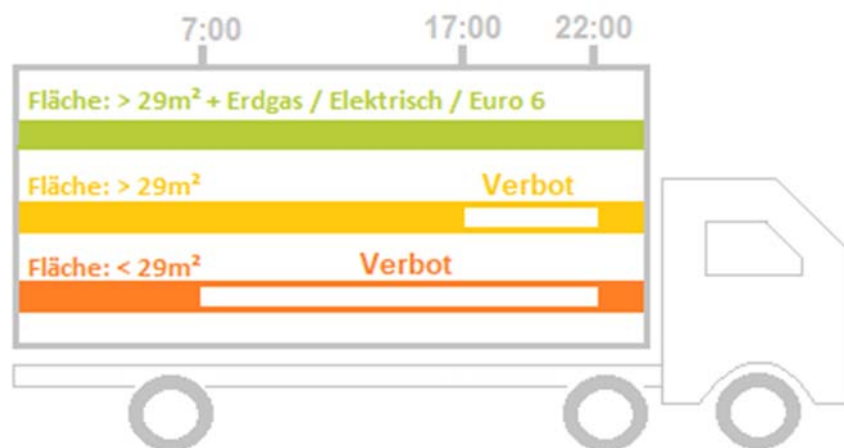
Deswegen sind Verkehr und Lieferung ein komplexes Problem für Stadtgemeinden geworden. Es wird versucht, eine Regelung zu finden, die ein Gleichgewicht zwischen einem flüssigen und einem ruhigen Verkehr erlaubt. In verschiedenen Fällen, könnte LNG als interessante Lösung betrachtet werden.

4.3.3 Beispiel von Paris

Seit 2007 gibt es in der Stadt Paris eine neue Regelung für den Verkehr und die Lieferung von Gütern.¹²⁶ Kleine Fahrzeuge (mit eine Fläche von maximal 29m²) können nur noch von 22 Uhr bis 7 Uhr in die Stadt fahren. Zusätzlich sind kleine LKWs, die mit Erdgas und Elektrizität fahren oder die, die letzte Euro-Norm (aktuell: Euro 6) erfüllen, die einzigen Fahrzeuge, die 24h beliefern dürfen.

Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 14: Lieferungs-Einschränkungen in Paris



In dieser Situation gibt es mehrere Schwierigkeiten:

- Tagsüber (7 Uhr bis 22 Uhr) ist die Effizienz wegen der hohen Verkehrsdichte gering. Demzufolge werden für jede Lieferung mehr Zeit und Schadstoffe verbraucht. Außerdem können durch die maximale LKW-Fläche von 29m² nur kleineren Mengen geliefert werden. Um große Läden oder Supermärkte zu beliefern, müssen mehrere Fahrzeuge mobilisiert werden, was wiederum negative Auswirkung auf die Verkehrsüberlastung, die Umwelt und die Kosten hat (mehr Personal muss mobilisiert werden).
- Nachts (22 Uhr bis 7 Uhr) ist die Effizienz durch den flüssigen Verkehr (weniger Stopps und Bremsungen) und die Möglichkeit mit höherem Ladegewicht (mehr

¹²⁶ Vgl. Paris.fr (o.J), Onlinequelle.

als 29m² erlaubt) zu fahren höher. Allerdings ist es schwierig Fahrzeuge zu benutzen, die die Nachtruhe beeinträchtigen.

Mit einem LNG-Fahrzeug werden viele von diesen Nachteilen vermieden:

- Für kleine oder dringende Lieferungen, oder auf Wunsch der Kunden, können kleine LNG-Fahrzeuge (> 29m²) den ganzen Tag uneingeschränkt in die Stadt liefern.
- Für größere Mengen können größere LNG-Fahrzeuge (< 29m²) benutzt werden, da sie zweimal weniger Lärm erzeugen als Standard Diesel-LKW und die Pick Zertifizierung erfüllen.

4.4 Bio-LNG Perspektive

Es wurde in dem vorigen Kapitel demonstriert, dass fossile LNG ein limitiertes Dekarbonisierungspotential für die Transportbranche hat. Die Erdgaslobbys und die Erdgasfahrzeughersteller behaupten, dass die Ökobilanz sich, durch den Einsatz von nachhaltigem LNG, in den nächsten Jahren sehr verbessern wird. In diesem Kapitel werden die Eigenschaften, die Emissionen als auch die Verfügbarkeit des nachhaltigsten Biogases berücksichtigt.

4.4.1 Eigenschaften

Biomethan als Kraftstoff, oder auch Bio-LNG, ist eine nachhaltige Erdgasvariante, die 100% regenerativ ist. Der Unterschied zu Erdgas basiert auf der Herkunft und der Produktionsmethode. Im Gegensatz zu fossilen LNG, der aus natürlichen Quellen extrahiert wird, wird Bio-LNG durch die Umwandlung von Methan in Flüssiggas erzeugt. Organische Abfälle der Nahrungsmittelindustrie, Hausmüll oder Klärschlamm von Abwasser, produzieren durch einen Fermentationprozess Biogas. Dieses Biogas besteht zu 50% bis 75% aus Methan, was für Fahrzeuge nicht rein genug ist. Sobald Biogas gereinigt ist, bekommt es eine hohe Methankonzentration, ähnlich wie Erdgas. Deshalb kann organisches Erdgas direkt durch Kryogenisierung in LNG umgewandelt werden, in das Vertriebsnetz eingespeist werden und in demselben Lastkraftwagen als fossiles LNG verwendet werden.

4.4.2 Treibstoffemissionen

Laut wissenschaftlichen Studien sollten, wie auch bei fossilen LNG, während der Fahrt nur sehr geringe NOx- und Partikelemissionen ausgestoßen werden. Zusätzlich dazu ist bei Bio-LNG Fahrzeugen die CO2-Bilanz nahezu neutral.

Eine ‚Well-to-Wheel‘ (WTW) Analyse, in der die Emissionen entlang der gesamten Wirkungskette berücksichtigt werden, ist für Biomethan noch komplexer als für Erdgas. In der Tat hängen die Treibhausemissionen des Biomethans von der Art der umgewandelten Ressourcen und der Umwandlungstechnologie ab.

Die Emissionsminderungen bei Energiepflanzen werden im Vergleich zu Diesel bei 60% liegen.¹²⁷ Dabei wird berücksichtigt, dass diese Landwirtschaft, wie auch für Biofuel, keine negativen sozialen (Wettbewerb mit der Lebensmittelwirtschaft) und ökologischen Auswirkungen (Entwaldung, Monokultur) aufweist. Mit anderen Arten von Abfällen, wie zum Beispiel Siedlungsabfällen, kann eine CO2-Reduktion von 80% gegenüber Diesel erreicht werden¹²⁸, weil es keine andere Verwendung für die Abfälle gibt. Des Weiteren werden durch den Prozess Emissionen ausgeschieden, die auch ohne die Biogasproduktion entstanden wären.¹²⁹

In die WTW-Analyse hat der Standort der Produktion einen riesigen Einfluss. Allerdings kann Biogas überall dort produziert werden, wo sich die Abfälle befinden. Deshalb können in dieser Studie die exakten Treibhausemissionen nicht einschätzen werden. Es kann lediglich davon ausgegangen werden, dass lokale Bio-Gas Produktionen den CO2-Fußabdruck deutlich reduzieren können. In abgelegenen Gebieten oder Regionen, die von Treibstoffexporten abhängig sind, wird der ökologische Gewinn besonders hoch sein.

Die fossilen Erdgastankstellen werden heute durch das Erdgasnetz versorgt. Um die Tankstellen mit Bio-Erdgas zu versorgen, gibt es mehrere Möglichkeiten:

- Der Anteil an Bio-Erdgas muss im Erdgasnetz erhöht werden (heute 0,5% in EU¹³⁰)
- Bio-Erdgas muss mit Tank-Lastfahrzeugen angeliefert werden
- Fahrzeuge müssen sich direkt in Bio-Erdgas Produktionsstätten versorgen

Die aktuellen Tankstellen, die Bio-LNG anbieten, transportieren den Kraftstoff mit Tankwagen. Diese Lösung ist allerdings die teuerste und die am wenigsten

¹²⁷ Vgl. Nicolle (2009), S.20.

¹²⁸ Vgl. Nicolle (2009), S.20.

¹²⁹ Vgl. Sihvonen (2018), S.38.

¹³⁰ Vgl. Sihvonen (2018), S.41.

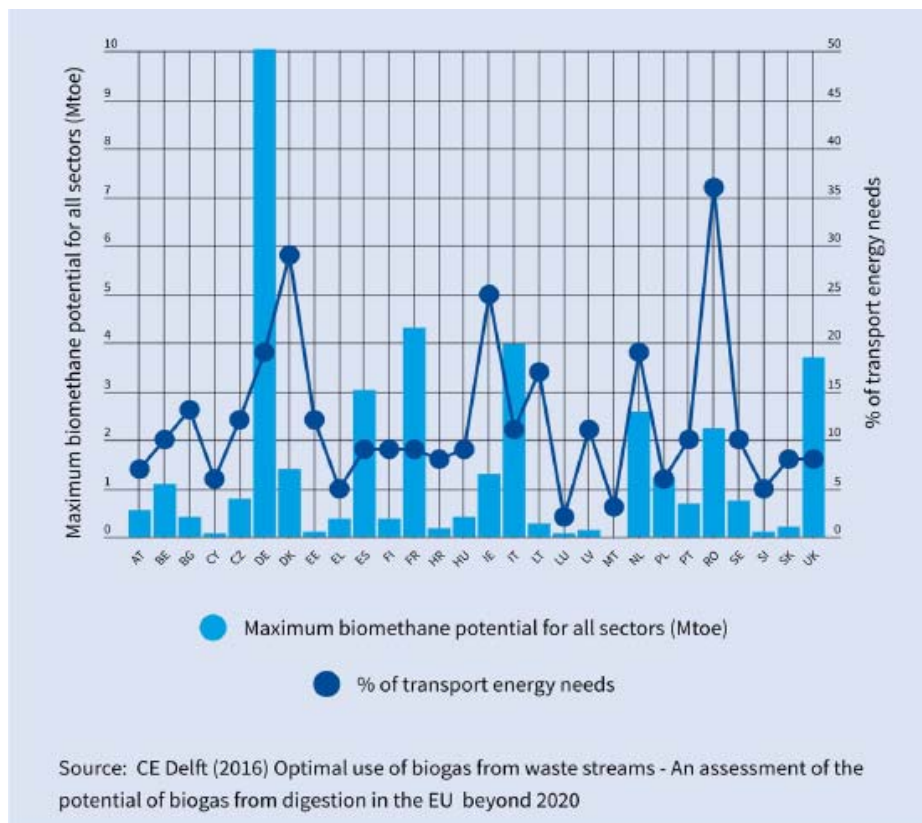
umweltfreundliche Alternative. Die ökologisch und ökonomisch beste Lösung ist eine lokale Versorgung auf dem Biogas-Produktionsstandort.

4.4.3 Verfügbarkeit

In der Europäischen Union repräsentiert Bio-LNG ungefähr 3% des Methans¹³¹, das in der Transportbranche verwendet wird. Fast die Hälfte der europäischen Bio-Methanherstellung befindet sich in Deutschland, gefolgt von Italien und England, da die Herstellung in diesen Ländern vom Staat gefördert wurde.¹³² Ein Großteil der produzierten Menge besteht aus verarbeiteten Nahrungspflanzen (Mais), was viele Spezialisten als nicht nachhaltig betrachten.

Laut einer Studie von Transport & Environment kann Bio-LNG keine Lösung zur Dekarbonisierung im Straßengüterverkehr sein, da die Verfügbarkeit von nachhaltigem Erdgas zurzeit zu limitiert ist. Mit den Herstellungskapazitäten in der EU, die für das Jahr 2030 geschätzt werden, könnte der Energiebedarf in der Transportbranche nicht gedeckt werden.

Abbildung 15: Maximal Bio-Erdgas Herstellung in die Europäische Union in 2030 im Vergleich zu den zukünftigen Bedarf in die Transport Branche



¹³¹ Vgl. Sihvonen (2018), S.41.

¹³² Vgl. Sihvonen (2018), S.42.

Es muss allerdings auch berücksichtigt werden, dass das produzierte Bio-Erdgas auch in anderen Branchen benutzt wird, wie für Heizung, Elektrizitätsherstellung oder in der Industrie. Die Frage ist, ob Bio-Methan im Verkehrssektor verwendet werden sollte, wenn andere Branchen über bessere Infrastrukturen verfügen und mit deutlich weniger Kosten zu Bio-Methan umwandeln können.

Da es in der Transportbranche andere alternative Antriebe gibt, die Infrastrukturen fehlen und die Umwandlungskosten (Tankstellen, Fahrzeuge) hoch sind, ist es sehr unwahrscheinlich, dass die limitierte Bio-Gasproduktion in diesem Sektor genutzt wird.¹³³

Für das Transportunternehmen bedeutet das allerdings nicht, dass Bio-LNG keine interessante Lösung ist. Große Konzerne, wie Ikea¹³⁴, haben begonnen, in LNG-Fahrzeuge zu investieren, um ausschließlich Bio-Methan nutzen zu können. Die Carrefour Group, einer der weltweit führenden Anbieter in Verbrauchermarktketten, hat das Konzept weiterentwickelt. Die ‚Carrefour Group‘ hat Partnerschaften mit Dienstleistern geschlossen, die die Abfälle von seinen Supermärkten (Obst, Gemüse, Blumen, Fleisch, usw.) in Methan transformieren. Carrefour behauptet, dass 50% der Fahrzeuge, die in Stadtzentren liefern, mit Biomethan fahren.

Die Verwendung von Bio-LNG scheint sich für schwere Lastfahrzeuge weiterzuentwickeln. Wenn in einem geografischen Gebiet Methanisierungszentren von Gemeinden oder Unternehmen gebaut werden, kann es mit sehr positiven Effekten im Straßengüterverkehr eingesetzt werden.

Auf einer Europaweiten-Ebene kann Biomethan noch nicht als wirksame Lösung für die Dekarbonisierung des Verkehrs fungieren. Wenn der Fuhrpark an LNG-Fahrzeugen kräftig steigen sollte, wird Europa mit LNG Preiserhöhungen oder Versorgungsproblemen konfrontiert werden.

¹³³ Vgl. Sihvonen (2018), S.48.

¹³⁴ Vgl. Torregrossa (2015), Onlinquelle.

5. Technischer Vergleich

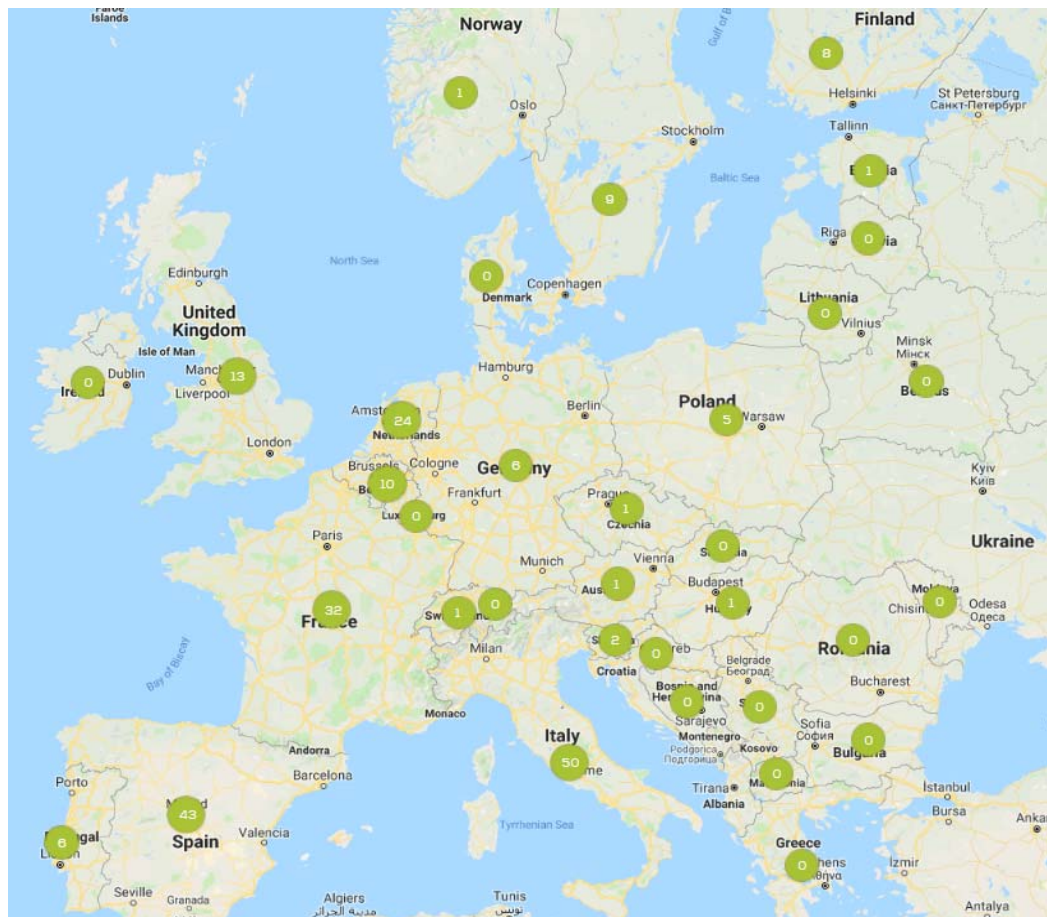
5.1 Tankstellen-Netzwerk

5.1.1 Entwicklung europaweit

Die weitere Entwicklung der LNG-Fahrzeuge wird von der Fähigkeit der Akteure abhängen sein, das Henne-Ei-Problem der Infrastrukturen lösen zu können. Tatsächlich hat sich, aufgrund der fehlenden Infrastrukturen, die Nachfrage geringfügig entwickelt. Infolge der schwachen Nachfrage wurde der Ausbau der Infrastruktur nicht ausreichend unterstützt und somit wurden auch nicht genügend Investitionen getätigt.¹³⁵

Laut der Vereinigung Europäisches Erdgas (NGVA Europe) gibt es heutzutage 214 Tankstellen europaweit. Davon gibt es 70% der LNG-Tankstellen europaweit in diesen vier Ländern: Italien (50), Spanien (43), Frankreich (32) und Holland (24).

Abbildung 16: Anzahl an LNG-Tankstellen in Europa in 2019



Quelle: NGVA Europe (o.J.)

¹³⁵ Vgl. Pfoser et al. (2018), S.260.

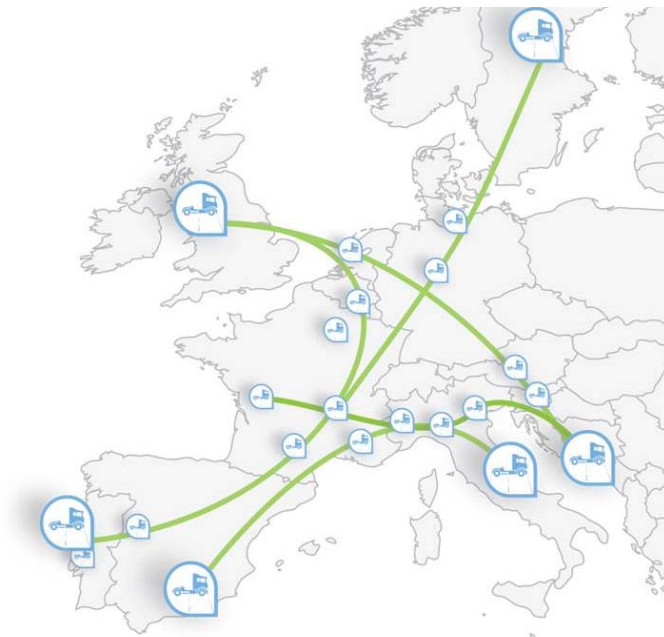
Um diesen Mangel an Homogenität zu überbrücken, hat die Union eine Richtlinie für alternative Antriebe (2014/94/EU) erlassen. Länder werden dazu gezwungen, LNG-Tankstellen auf dem Transeuropäischen Netz (TEN-T) zu errichten (siehe 3.1.1).

Mit dem TEN-T will die EU ein gemeinsames Netzwerk erbauen, um den Warenfluss zu vereinfachen. Denn früher wurden die meisten Straßennetze und Infrastrukturen in Europa auf nationaler Ebene entworfen und waren demzufolge für einen internationalen Markt nicht geeignet. Das Ziel ist es, die Versorgung der LNG-LKWs auf allen Hauptverkehrsstraßen, die Europa durchqueren, zu sichern.

Im Jahr 2013 wurde das Projekt ‚LNG Blue Corridors‘ mit der Unterstützung der EU-Kommission gegründet. In einem Zeitraum von drei Jahren sind hunderte LNG-LKWs durch Europa gefahren, nur um zu beweisen, dass LNG, sowohl für mittlere als auch für lange Strecken, eine echte Alternative zu Diesel sein kann. Die verschiedenen Akteure der Branche wurden zusammengebracht und haben neue LNG-Tankstellen an strategischen Stellen der TEN-T gebaut.

Das Projekt wurde 2018 nach einem großen Erfolg geschlossen. Insgesamt wurden 14 Tankstellen gebaut und der Transport von Straßengütern auf vier Verkehrsachsen ermöglicht.¹³⁶

Abbildung 17: Ergebnisse der ‘LNG Blue Corridor Project’



¹³⁶ Vgl. lngbc.eu (o.J.), Onlinequelle.

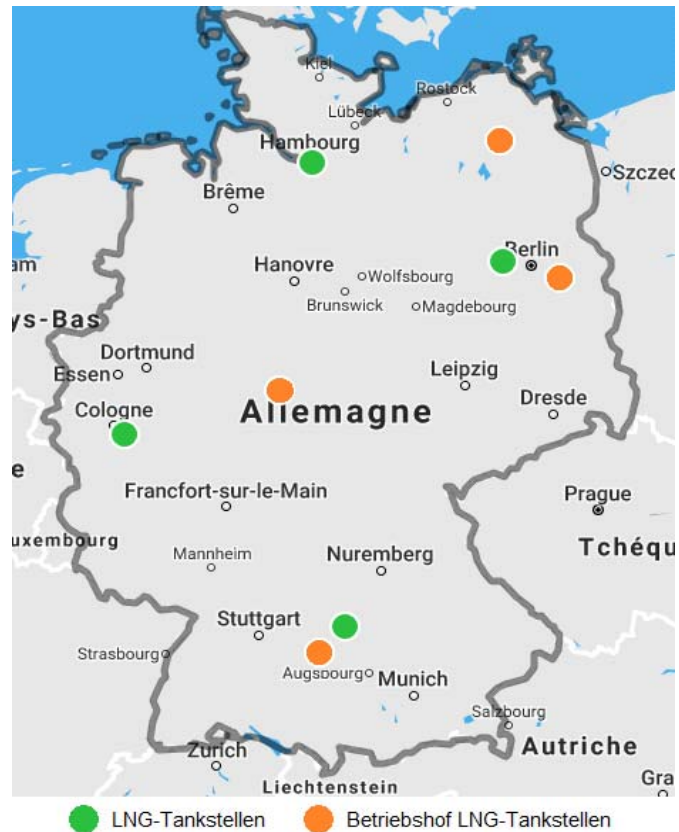
5.1.2 Entwicklung Deutschland

Die erste LNG-Tankstelle wurde erst im September 2018 in Hamburg geöffnet. Seitdem gibt es fünf neue LNG-Tankstellen und sieben, die aktuell geplant oder gebaut werden. Allerdings, sind die Hälfte der aktuellen Standorte keine richtigen Tankstellen, sondern „Betriebshoftankstellen“. Zum Beispiel befindet sich die Tankstelle von Kassel bei dem Händler Iveco und die Tankstelle von Stavenhagen auf dem Grundstück eines Spediteurs. Um diese Art von Tankstellen benutzen zu dürfen, muss man sich meistens registrieren lassen. In der Stadt Ulm, in der der Spediteur J.S.Logistics seine Kraftstoffe bezieht, gibt es keine öffentliche Tankstelle. Die Kunden können sich bei Iveco versorgen. Mit nur vier „konventionellen“ Stationen ist die Infrastruktur in Deutschland wirklich unterentwickelt, was offensichtlich die Verbreitung der LNG-Technologie verlangsamen wird.

Das LNG-Tankstelleninfrastrukturnetz soll sich aber in den nächsten Jahren stark entwickeln. Laut Deutsche Energie-Agentur (DENA), werden bis Ende 2020 ungefähr 40 LNG-Tankstellen in Betrieb sein.¹³⁷ Wenn alle diese Bauprojekte realisiert werden, wird das Netzwerk eine gute nationale LNG-Versorgung ermöglichen. Ein solches Wachstum erscheint jedoch etwas unplausibel.

¹³⁷ Vgl. DENA (2019), Onlinequelle.

Abbildung 18: Aktuelle LNG-Tankstellen in Deutschland



Quelle: eigene Darstellung in Anlegung von DENA (2019)

5.1.3 Entwicklung Frankreich

Frankreich ist eines der europäischen Länder mit der am weitesten entwickelten LNG-Infrastruktur. Es gibt ungefähr 32 Tankstellen, von denen die überwiegende Mehrheit CNG und LNG anbieten. Während in Deutschland bereits seit Jahren ein breites Netzwerk an CNG-Tankstellen gebaut wurde, war das CNG-Netzwerk in Frankreich fast nicht vorhanden. Die Gelegenheit wurde genutzt, ein Netzwerk mit beiden Erdgasen gleichzeitig zu entwickeln.

Eine weitere Besonderheit in Frankreich ist, dass die LNG-Tankstellen meistens von Großunternehmen entwickelt wurden, die sich auf Gas spezialisiert haben (Airliquide, GNVert, Primagaz, usw.). In Belgien zum Beispiel wurden die meisten Tankstellen von den Marktführern der konventionellen Tankstellen gebaut (Shell, Esso usw.). Da der Gasmarkt in Frankreich sehr wettbewerbsintensiv ist, haben sehr wahrscheinlich alle Unternehmen gleichzeitig versucht sich auf diesem Markt zu diversifizieren und neue Marktanteile zu gewinnen.

Abbildung 19: Tankstellen in Frankreich



Quelle: eigene Darstellung in Anlegung von Gaz-mobilité.fr (o.J.d)

5.2 Betankungen

5.2.1 Tankstellen

Die Betankung von Erdgas muss in dedizierten Tankstellen gemacht werden. Es existieren Tankstellen die nur auf CNG oder LNG spezialisiert sind (häufig in Deutschland) oder Tankstellen die beide Erdgasformen anbieten (häufig in Frankreich).

Im Gegensatz zu Diesel und Erdöl, die in Tankwagen geliefert werden, gelangt Erdgas meistens durch das existierende Leitungsnetz zu den Tankstellen. Dies ermöglicht neben der Entlastung der Verkehrsströme vor allem eine gewisse Versorgungssicherheit.¹³⁸ Zum Beispiel werden in Frankreich häufig Raffinerien während Protestbewegungen blockiert, was die Versorgung verhindert. Für die Gasverteilerstationen, die an dem Erdgas Netzwerk nicht angeschlossen sind, wird das GNL, wie auch für Diesel, in Tankfahrzeugen geliefert.

¹³⁸ Vgl. CREG (2019), S.34.

In Tankstellen ist der Erdgasanschluss mit einem Kompressor verknüpft. Je nach gewünschter Abfüllungsmethode, kann auch einen Pufferspeicher dazu addiert werden¹³⁹:

- Mit Pufferspeicher wird das transformierte Gas vom Kompressor gelagert, was eine schnelle Abfüllung ermöglicht. Die Füllungszeit dauert ein paar Minuten, fast so schnell wie mit Diesel. Diese Tankstellen werden meistens von Fahrzeugen benutzt, die auf stark frequentierten Straßen fahren und schnell tanken müssen.
- Ohne Pufferspeicher gelangt das Gas direkt vom Kompressor, was die Abfüllung verlängert (zwischen 5 und 10 Stunden). Da die Füllung mehrere Stunden dauert, wird es oft über Nacht gemacht. Dieser Art von Tankstellen sind oft für Fuhrparke, die jede Nacht an einem zentralen Standort betankt werden.

5.2.2 Betankungsvorgang

Zusätzlich zu den üblichen Anweisungen, Motorstopps und dem Rauchverbot, ist beim Betanken eine besondere Vorsicht notwendig. Das LNG wandelt sich während der Betankung vom flüssigen in seinen ursprünglich gasförmigen Zustand um. Das ist besonders gefährlich, da LNG giftige und entzündliche Eigenschaften aufweist. Durch seine farb- und geruchlose Eigenschaft wird des Weiteren das Auffinden von Leckage erschwert.

Da LNG durch Kryotechnik flüssig gehalten wird, sind sowohl der Kraftstoff als auch ein Teil der Anlagen sehr kalt. Der geringste Kontakt mit ungeschützter Haut kann zu starken Verbrennungen oder Erfrierungen führen. Deswegen muss während der LNG-Betankung Schutzausrüstung getragen werden: spezielle Handschuhe, Gesichtsschutz (oder Brillen), Sicherheitsschuhe und Kleidung, die den ganzen Körper bedecken.¹⁴⁰ Darüber hinaus muss das Personal geschult werden, um die Sicherheitsvorkehrungen und das spezifische Betankungsverfahren zu lernen.

¹³⁹ Vgl. AFGNV (o.J.), Onlinequelle.

¹⁴⁰ Vgl. Gaz-mobilité.fr (o.J.b), Onlinequelle.

Abbildung 20: Betankung eines LNG-Lastfahrzeugs



Quelle: Gaz-mobilité.fr (o.J.b)

5.3 Technische Unterschiede bei Fahrzeugen

5.3.1 Fahrzeugangebot

Der italienische Hersteller IVECO positioniert sich in den meisten europäischen Ländern als Marktführer für LNG-Schwerlastfahrzeuge von 16 Tonnen oder mehr. IVECO entwickelte bereits seit Ende der 90er-Jahre Erdgas-Fahrzeuge, was ihm heutzutage einen enormen Wettbewerbsvorsprung einbringt. Aktuell repräsentieren die LNG-Fahrzeuge rund 30% aller verkauften Lastkraftwagen von IVECO (mehr als 16t).¹⁴¹ Auf dem französischen Markt teilt der Hersteller sich (75%) zusammen mit Scania (13%) den LNG-LKWs Markt.

Da die Sichtweise für alternative Antriebe in der Transportbranche sehr unsicher ist, haben sich LKW-Hersteller heterogen auf unterschiedlichen Märkten spezialisiert.¹⁴² Obwohl das Angebot der CNG-Fahrzeuge differenziert ist, wird der Markt für LNG in Europa nur von drei Herstellern geführt (IVECO, Scania, Volvo). Nachstehend das aktuelle Marktangebot in Europa:

Tabelle 5: LNG-Sattelzug Angebot

Marke	Modell	Leistung (PS)	Gesamtgewicht	Tank (kg)	Max. Reichweite
Iveco	Stralis NP	400-460	19-50	195 / 390	1600 km

¹⁴¹ Vgl. Torregrossa (2019), Onlinquelle.

¹⁴² Vgl. Bünger et al (2016) S.40

Iveco	Stralis NP (LNG+CNG)	400-460	19-50	75 + 185	280 + 800 km
Iveco	S-Way NP	270-420	19-50	195 / 390	1600 km
Scania	L/P	280-340	15-44	297	1000 -1600 km
Scania	G/R	280-340-410	15-44	297	1000 -1600 km
Volvo	FM-FH	420-460	19-50	205	1000 km

Quelle : eigene Darstellung in Anlegung von CREG (2019)

In kurzer Zeit haben es Hersteller durch Forschung und Investitionen ermöglicht, LNG-Fahrzeuge zu bauen, die ähnliche Leistungen wie Diesel-Fahrzeuge für lange Strecken haben. IVECO und Volvo bieten heute Fahrzeuge bis zu 460 PS an. Hinsichtlich der potentiellen, maximalen Reichweite, ist das Angebot von Diesel-Fahrzeuge allerdings offensichtlich viel effizienter. Während die Reichweite für Erdgas-Fahrzeuge auf 1.600 km beschränkt ist, kann mit den aktuellsten Diesel-Fahrzeugen mehr als 4.000 km mit einer Betankung gefahren werden. Angesichts der Geschwindigkeit, mit der sich die LNG-Technologie zu diesem Zeitpunkt weiterentwickelt, ist es wahrscheinlich, dass sich die Reichweite in den nächsten Jahren sehr vergrößern wird.

5.3.2 Fahrerlebnis

Während meines Treffens mit der SAMAT Toulouse hatte ich die Gelegenheit mich mit den zehn Fahrern, die täglich LNG-LKWs für Intermarché fahren, zu unterhalten. Die Fahrzeuge sind alle von IVECO (Stralis NP) und haben verschiedenen Kapazitäten (400 oder 460 PS). Alle Fahrzeuge sind auf der linken Seite mit einem CNG-Tank (115 Liter) und auf der rechten Seite mit einem LNG-Tank (538 Liter) ausgestattet. Letzteren nutzen sie jedoch nur, da eine Betankung direkt am Verteilungsort möglich ist.

Ich habe mir diese Fahrzeuge angesehen und die Fahrer nach ihren Fahrerfahrungen mit LNG im Vergleich zu gleichwertigen Dieselfahrzeugen befragt. Hier sind einige Eindrücke, die sie mir mitgeteilt haben:

- *Leistung*: Bei den 400 PS-Modellen mangelt es, laut der Fahrer, an Leistung und Drehmoment. Sie brauchen länger für dieselbe Distanz, besonders bei Routen mit bedeutenden Steigungen. Bei den 460PS-Modellen gibt es unterschiedliche Meinungen. Einige finden die Leistung stärker als mit Diesel und behaupten sogar, auf den Fahrten Zeit zu sparen. Andere waren viel skeptischer und sagten, dass die Leistung niedriger ist als die der Dieselmotoren.

- *Geräusche*: Das Motorengeräusch ist leiser, was den Fahrkomfort in der Kabine erhöht und die Außenbelästigung verringert.
- *Wartung*: Laut der Fahrer sind die LNG-Fahrzeuge aufgrund verschiedener Pannen häufiger in der Werkstatt. Die Tatsache, dass es sich um Neufahrzeuge handelt, an denen die Hersteller bereits seit kurzer Zeit arbeiten, scheint für diese Nutzer der Hauptgrund für den Unterschied zu sein.
- *Reichweite*: Mit dem LNG-Tank von 540L sollte die Autonomie nach Angaben des Herstellers 800km erreichen. Nach Angaben der Fahrer weicht die tatsächliche Autonomie der Fahrzeuge stark von der angekündigten Autonomie ab. Im Durchschnitt schätzten sie die Autonomie auf ebenen Straßen auf rund 600 km. Darüber hinaus bestätigten sie die Tatsache, dass Kraftstoffanzeigen weniger zuverlässig sind als bei Dieselmotoren. Kein Fahrzeug ist jedoch jemals wegen Kraftstoffmangels liegengeblieben.
- *Betankung*: Nach Angaben des Transportleiters von Intermarché besteht kaum ein Unterschied in der Betankungszeit. Es dauert nur einige Minuten, bis das Gerät neu gestartet wird, wenn es einige Stunden nicht benutzt wurde (häufig am Montagmorgen). Die Fahrer teilen diese Ansicht aber nicht und empfinden die Betankung als langwieriger und anstrengender als für Diesel.
- *Sicherheit*: Der Spediteur wurde bereits mit einem Belüftungsproblem an einem Fahrzeuge konfrontiert, das sich entzündet hatte. Ein Feuer brach aus und griff auf zwei LNG-Fahrzeuge und ein Dieselfahrzeug über, die daneben geparkt waren. An den LNG-Fahrzeugen wurde ein Sicherheitssystem automatisch gestartet, was im Tank das Sicherheitsventil geöffnet hat, um den Druck zu entlasten. Das evakuierte Gas erzeugte große Flammen, aber es gab keine Explosion.

6. Wirtschaftlicher Vergleich

6.1 Wichtige Kostenarten

Die Wirtschaftlichkeit eines LNG-Schwerlastwagen wird von dem Kompromiss zwischen höheren Fahrzeugkosten und der Preisdifferenz von Benzin und Diesel abhängen.

6.1.1 Fahrzeuge

Die Umwandlung von Diesel zu Erdgas verursacht höhere Anschaffungskosten. Falls das Fahrzeug durch Fremdfinanzierung gekauft werden muss, müssen der Fahrzeugpreis, der Restwert und die Finanzierungskosten betrachtet werden.

Erstens sind die **Fahrzeugkosten** für einen schweren Lastkraftwagen viel höher als für ein Dieselfahrzeug, aufgrund des geringen Produktionsvolumens. Diese Mehrkosten können je nach Hersteller zwischen 25% bis 40% liegen. Für einen LNG-Sattelzug von 44 Tonnen (4x2), liegen sie ungefähr um 40.000€ höher als für einen Diesel. Der höhere Fahrzeugpreis führt logischerweise auch zu höheren Finanzierungskosten. Diese Kosten sind derzeit relativ gering aufgrund der besonders niedrigen Raten in den letzten Jahren. Aufgrund ihrer Variabilität, werden diese Finanzierungskosten in diesem Bericht nicht berücksichtigt.

Der **Restwert** definiert den Wert des Fahrzeuges nach den ersten fünf Jahren der Benutzung. Dieser Wert ist von großer Bedeutung, da der Kauf eines neuen Fahrzeugs meist von der Höhe des Restwerts abhängig ist. Da der LNG-Markt noch klein ist, existiert kein richtiger Gebrauchtmärkte. Deshalb ist es sehr schwierig, den zukünftigen Restwert zu schätzen. Heute wird der Restwert von Herstellern definiert. Laut der CREG, kann man berechnen, dass der Restwert von LNG-LKWs ungefähr bei 12,5% des Gesamtpreises liegt, dagegen bei rund 25% für Diesel-LKWs.¹⁴³ Allerdings sollten die Restwerte mit der wachsenden Nachfrage für Erdgas-Fahrzeuge schrittweise steigen.

Zu den Anschaffungskosten kommen noch Reparaturen und **Wartungskosten** hinzu, die für LNG auch deutlich höher sind als für Diesel. Allerdings ist es schwierig, den Kostenunterschied zu schätzen, da die Verhandlungsmarge für Wartungsverträge sehr

¹⁴³ Vgl. CREG (2019), S.31.

hoch ist. Die Mehrkosten erklären sich durch den Mangel an Skaleneffekt im Vergleich zu Dieselmodellen.¹⁴⁴

6.1.2 Kraftstoffpreise

Der Kraftstoffpreis ist einer der Hauptgründe für den Umstieg auf LNG-Fahrzeuge. Die Preisdifferenz ist sehr vorteilhaft und kann eine schnellere Amortisierung der fahrzeugbezogenen Mehrkosten ermöglichen.

Um die Analyse zu vereinfachen, werden Preise von öffentlichen Tankstellen benutzt. Allerdings ist es auch für Spediteure möglich, sich Tankcontainer anzuschaffen und günstigere Preise aufgrund einer größeren Einkaufsmenge zu erhalten. Die nachstehenden Preise sind Nettopreise und berücksichtigen die Energiesteuer-Rückerstattung für Diesel (0,1775€/l) in Frankreich.

Tabelle 6: Kraftstoffpreise in Deutschland und Frankreich

	<i>LNG (kg)</i>	<i>Diesel (l)</i>
Deutschland	0,7€	1,05€
Frankreich	0,808€	0,998€

Um Kraftstoffe mit unterschiedlichen Energiegehalte fair vergleichen zu können, muss der Preis für 100 km berechnet werden (Kraftstoff Preis x Kraftstoffverbrauch pro 100km). Diese Methode berücksichtigt sowohl den Energiegehalt der Kraftstoffe als auch die Energieeffizienz des Motors.¹⁴⁵ Für dies Rechnung wurden Durchschnittsverbrauche verwendet: 27kg/100km für LNG und 30l/100km für Diesel.¹⁴⁶

Tabelle 7: Kraftstoffpreise in Deutschland und Frankreich für 100 km

	<i>LNG (€/100km)</i>	<i>Diesel (€/100km)</i>
Deutschland	18,9 €	31,5 €
Frankreich	21,8 €	29,9 €

¹⁴⁴ Vgl. AFGNV (2016), S.24.

¹⁴⁵ Vgl. European Commission (2017b), S.24.

¹⁴⁶ Vgl. CREG (2019), S.31.

6.1.3 Rentabilitätsschwelle

Anhand eines Beispiels soll die Rentabilitätsschwelle bei der Umwandlung von Diesel- zu einem LNG-Sattelzug (44 Tonnen) prognostiziert werden. Folgenden Hypothesen werden dabei berücksichtigt:

- LNG-Fahrzeug: 120.000€ (30.000€ Mehrkosten im Vergleich mit Diesel-LKW)
- LNG-Wartungsverträge: +25% als Diesel (0,03€/km für Diesel)
- Restwert: 12,5% des Anschaffungspreises (statt 25% für Diesel)
- Fahrzeugbetrieb: 12000 km monatlich

Unter Berücksichtigung der Unterschiede zwischen den Hauptbetriebskosten, kann abgeleitet werden, dass die Fahrzeug-Mehrkosten nach drei oder vier Jahren durch die Einsparung von Kraftstoffkosten rentabel sein können. Die erforderte Gesamtleistung für ein LNG-Fahrzeug, um im Vergleich zu Diesel wettbewerbsfähig zu sein, liegt in Deutschland ungefähr bei 380.000km (2,6 Jahre) und in Frankreich bei 610.000km (4,3 Jahre). In Frankreich erklärt sich die spätere Rentabilitätsschwelle durch einen attraktiven Dieselpreis für den gewerblichen Einsatz.

Abbildung 21: Betriebskosten Unterschied zwischen LNG und Diesel in Deutschland und Frankreich (in €)



6.2 Einfluss von Förderungen

6.2.1 Förderungen in Frankreich und Deutschland

In den meisten europäischen Ländern, in denen LNG-Technologie vorhanden ist, hat die Politik den ersten Impuls zur Entwicklung gegeben. Förderungen wirken auf Fahrzeugkosten und Kraftstoffkosten, da die beiden Kostenstellen die Kaufentscheidung am meisten beeinflussen werden. Behörden ermöglichen durch unterschiedliche Förderung, wie Subventionen oder Steuervorteile, mehr wirtschaftliche Attraktivität.

Durch das folgende Beispiel (siehe Tabelle) können die Auswirkungen von Förderungen auf den Preis besser dargestellt werden. Eine Kostanalyse von J.S. Logistics für einen LNG-Sattelzug (44t) wurde an französischen Bedingungen angepasst, um beide Länder vergleichen zu können.

Tabelle 8: Einschätzung von Kosten Position für LNG und Diesel-LKWS (44t) in Frankreich und Deutschland

DEUTSCHLAND			FRANKREICH	
Informationen				
	GNL	DIESEL	GNL	DIESEL
Kilometer pro Monat	12000	12000	12000	12000
Laufzeit in Monaten	60	36	60	36
Anschaffungskosten				
	GNL	DIESEL	GNL	DIESEL
Anschaffungskosten (neu)	138 900,00 €	90 500,00 €	138 900,00 €	90 500,00 €
Subvention	12 000,00 €	- €	18 334,80 €	- €
Preis nach Subvention	126 900,00 €	90 500,00 €	120 565,20 €	90 500,00 €
Restwert	28 000,00 €	49 300,00 €	28 000,00 €	49 300,00 €
Total nach Restwert	98 900,00 €	41 200,00 €	92 565,20 €	41 200,00 €
Total (monatlich)	1 648,33 €	1 144,44 €	1 542,75 €	1 144,44 €
Wartungskosten				
	GNL	DIESEL	GNL	DIESEL
Wartungsvertrag (Monat)	454,39 €	360,00 €	454,39 €	360,00 €
Kraftstoffkosten				

	GNL	DIESEL
Verbrauch (pro 100 km)	27 kg	28 L
Preis Diesel (Netto)		1,05 €
Preis Diesel nach TICPE (c/l)		
Preis GNL (Netto)	0,70 €	
TOTAL Kraftstoffkosten	2 268,00 €	3 528,00 €
TOTAL (monatlich)	4 370,72 €	5 032,44 €

GNL	DIESEL
27 kg	28 L
	1,175 €
	0,998 €
0,808 €	
2 617,92 €	3 352,61 €
4 615,06 €	4 857,05 €

Mautkosten (ausschließlich für inländische Verwendung)

	GNL	DIESEL
Mautkosten (€ pro km)	- €	0,187 €
Total für 12000km	- €	2 244,00 €
TOTAL mit Maut (monatlich)	4 370,72 €	7 276,44 €

6.2.2 Perspektivische Wirtschaftlichkeit

In beiden Ländern ist der wirtschaftliche Vorteil von LNG-Fahrzeugen momentan nur durch Begünstigungen möglich. In Frankreich durch die Sonderabschreibung von 40% und in Deutschland durch die 12.000€ Subvention und die Mautbefreiung. In der Tat ist die Fahrzeugproduktion zu limitiert, um einen Skaleneffekt auf Beschaffungspreise zu ermöglichen.

Im Kapitel 6.1.3 wurde aufgezeigt, dass LNG-Fahrzeuge nach einigen Jahren durch niedrige Kraftstoffkosten rentabler als das Dieseläquivalent werden können. Dabei muss aber festgestellt werden, dass die Treibstoff-Kostenabweichung von Staaten aufrechterhalten wird, indem Steuern besonders niedrig beibehalten werden.

Dazu kommt, dass diese Förderungen nur für kurze Zeiträume bewilligt werden, daher ist es unmöglich, die Kosten der Spediteure in den nächsten zwei oder drei Jahren abzuschätzen. Es ist noch nicht bekannt, ob und unter welchen Bedingungen diese Förderungen erneuert werden.

Allerdings sind die meisten Komponenten, die LNG im Vergleich zu Diesel einen wirtschaftlich Nachteil aufweisen, variablen Kosten, (die sich mit dem Volumen der Produktion entwickeln werden) die schrittweise reduziert werden könnten.

Ein Anstieg der Produktionsmengen könnte die Beschaffungspreise und die Preise der Wartungsverträge minimieren. Ein Gebrauchtmärkte würde sich entwickeln und der Wiederverkaufspreis würde sich erhöhen. Des Weiteren könnte die Verschärfung der europäischen Emissionen-Normen zu einer Erhöhung der Kosten für Diesel-Fahrzeuge führen, da sie eine immer komplexere Technologie benötigen werden um die Normen einhalten zu können.¹⁴⁷

Mehrere Faktoren könnten mittelfristig die Kostenabweichung zwischen LNG- und Diesel-Lastkraftwagen umkehren. Die Entwicklung des Marktes, bis zu einer unabhängigen Wirtschaftlichkeit, hängt von der Fähigkeit der Politik ab, die Branche zu fördern und den Kunden eine gewisse Sicherheit zu geben, damit Vertrauen geschaffen werden kann.

6.3 Interesse der Kunden

6.3.1 Spediteure

Im Rahmen dieser Arbeit hatte ich die Möglichkeit, mit zwei Spediteuren zusammen zu arbeiten: J.S.Logistics in Deutschland und SAMAT in Frankreich. Beide haben mit dem Einsatz von LNG begonnen, um auf Kundenanforderung reagieren zu können. In den allermeisten Fällen scheint das der Hauptgrund zu sein, warum Spediteure in diese Technologie investieren.

Es ist wichtig zu spezifizieren, dass der Zweck der Spediteure nicht darin besteht, den Preis der Dienstleistung für den Kunden zu erhöhen. Ziel ist es, durch die LNG-Technologie die Kosten zu reduzieren um wettbewerbsfähiger und rentabler zu werden. Im Fall der beiden Spediteure wird die Dienstleistung mit einem LNG-Fahrzeug nicht teurer abgerechnet.

- *J.S.Logistics:*

Der Spediteur J.S.Logistics zählt den Fahrzeughersteller IVECO zu seinen Kunden. Letzterer förderte den Kauf von zwei LNG-Fahrzeugen für die Lieferungen ihrer Produkte. Heute scheint der Spediteur wegen der Kostensenkungen mit diesem Kauf zufrieden zu sein. Die Fahrzeuge werden jedoch heute nur in Deutschland verwendet.

¹⁴⁷ Vgl. AFGNV (2016), S.24.

IVECO möchte, dass sie zukünftig auch außerhalb genutzt werden, um einen spanischen Kunden in Madrid zu beliefern. Der Impuls geht dabei vom Kunden aus, der den Transportunternehmer dazu ermutigt, seine LNG-Flotte zu entwickeln. Auf diese Weise kann der Kunde, als Hauptproduzent von Gasfahrzeugen, seinen Absatz steigern.

- *SAMAT Toulouse:*

Der Spediteur SAMAT Toulouse hat im Jahr 2017 vier LNG-Fahrzeuge gekauft, die exklusiv für den Transport der Nahrungsmittel von Intermarché benutzen werden. Während eines Interviews mit dem General Manager von der SAMAT Toulouse, Joseph Azin, sagte dieser, er habe zum Zeitpunkt der Ausschreibung für Intermarché nicht an die LNG-Umwandlung im Straßengüterverkehr geglaubt. Dieser Übergang fand nur statt, um einen neuen Kunden zu gewinnen und seinen Markt zu entwickeln.

Heute ist er in Verhandlungen mit einigen seinen aktuellen Kunden, die LNG auf bestimmten neuen Märkten implementieren möchten. Zum Beispiel hat die Unternehmensgruppe TOTAL Interesse LNG-Tankfahrzeuge einzusetzen, um Tankstellen mit Erdöl zu liefern. Durch die vermehrte Begrenzung von Emissionen und Lärm städtischen Gebieten ist es möglich, dass das Unternehmen sein Image verbessern kann. Im aktuellen Kontext der Infragestellung von Erdölkraftstoffen könnte es für TOTAL möglich sein, einen ersten Schritt in Richtung einer Diversifizierung zu tätigen.

Heute steht Herr Azin durch die steigende Kundenachfrage und die Betriebsvorteile (Kraftstoff Kosten, Lärmreduzierung, usw.) der LNG-Technologie offener gegenüber. Allerdings ist dieser Wandel nicht ganz freiwillig, da auf die veränderten Kundenwünsche reagiert werden muss, um keine Verträge zu verlieren. Im Vergleich zu großen Wettbewerbern, die immer weniger zögern, auf diesem Markt zu investieren, muss er sich positionieren, um Marktanteile zu behalten.

6.3.2 Kunden

Dank meines Kontakts bei der SAMAT Toulouse konnte ich mit seinem Kunden Intermarché in Kontakt treten. Ich hatte das Privileg, bei einer Führung in einer der neusten und größten Vertriebszentralen der Gruppe teilzunehmen zu dürfen. Von diesem Logistikzentrum aus werden alle Supermärkte der Gruppe im Süden und Südosten Frankreichs mit trockenen, frischen und tiefgefrorenen Lebensmitteln beliefert. Das

77.000 m² große Logistikgelände beschäftigt in der Hochsaison mehr als 500 Mitarbeiter und beliefert die Geschäfte der Marke täglich durch mehr als 200 Transporte.

Ich konnte mich mit Herrn Blondeau, einem der Transportmanager, über die Entwicklung von LNG-Transporten in der Gruppe unterhalten. Er erklärte mir, dass kurz nach der Einrichtung des Standorts beschlossen wurde, die Entwicklung des LNG zu fördern. In der Transportausschreibung wurde der Einsatz von LNG-LKWs explizit verlangt. Um Spediteure zu ermutigen, in kostenaufwendige Fahrzeuge zu investieren und auf einen unsicheren Markt zu setzen, hat Intermarché vorteilhafte Vertragsbedingungen angeboten. Im Vergleich mit einer Vertragsdauer von ein oder zwei Jahren für Dieselfahrzeuge, verpflichtet sich die Unternehmensgruppe für LNG-Fahrzeuge auf eine Vertragslaufzeit von fünf Jahren. Für den Fall, dass Intermarché den Vertrag vor dem Ende der Laufzeit kündigen möchte, hat sich die Gruppe verpflichtet, dem Spediteur die Fahrzeuge zum Neupreis abzukaufen. Dank der günstigen Vertragsbedingungen gibt es heute insgesamt, alle Dienstleistungsunternehmen zusammengenommen, vierzig LNG-Fahrzeuge, die ausschließlich von der Zentrale eingesetzt werden.

Die Hauptmotivationen der Gruppe sind neben ökologischer Aspekte und dem Image, auch die Vermittlung der Marke an die Konsumenten. Es wird jedoch wenig über die Wahl des Transportmittels kommuniziert. Es wird lediglich auf den Planen einiger LNG-Lastkraftwagen Werbung gemacht. Andere Wettbewerber wie Carrefour, Monoprix oder Biocoop, die ähnliche Maßnahmen ergriffen haben, scheinen jedoch ebenfalls wenig über diese Projekte zu berichten. Da ich auf die Frage, bezüglich des geringen Vorhandenseins an Daten, keine Antwort bekommen habe, gehe ich davon aus, dass sich diese Projekte noch in der Entwicklungsphase befinden. Heute machen LNG-Fahrzeuge nur einen kleinen Teil der Flotten aus, deshalb zögern die Unternehmen möglicherweise, über dieses Thema zu kommunizieren.

Um den ganzen Fuhrpark mit LNG versorgen zu können, wurde zu Beginn eine mobile Tankstelle am Standort eingesetzt, die, aufgrund der limitierten Lagerkapazität, täglich beliefert werden musste. Die mobile Tankstelle war allerdings nur eine vorübergehende Lösung. Im Anschluss dran wurde eine autonome Station erbaut, die mehr als 26.000kg LNG speichert und dreimal pro Woche mit Tankwagen (aus Spanien) versorgt wird.

7. Fallstudie J.S.Logistics

7.1 Anfrage des Spediteurs

Der Spediteur J.S.Logistics hat sich infolge eines Kundenauftrags zwei LNG-Schwerlastwagen angeschafft. Seitdem fahren diese Fahrzeuge ausschließlich von Kirkel (Saarland) bis Schongau (Oberbayern) und zurück. Der Spediteur bevorzugt Inlandsfahrten, da er in Deutschland keine Maut bezahlen muss und die LNG-Preise besonders attraktiv sind.

Derselbe Kunde arbeitet mit J.S.L zusammen, um Lieferungen nach Madrid durchzuführen. Der Kunde möchte, dass bei den aktuellen Lieferungen die Diesel-LKWs zukünftig durch LNG-LKWs ersetzt werden. Allerdings unterscheiden sich bei internationalen Reisen sowohl die Kostenstrukturen als auch die Einschränkungen. Der Spediteur plant aktuell die Umsetzung einer Testreise und benötigt infolgedessen zusätzliche Informationen.

Die Anfragen des Spediteurs für diese Strecke sind:

- die Machbarkeit bezüglich LNG-Tankstellen zu analysieren
- die unterschiedlichen Kosten zwischen LNG- und Diesel-Getriebe zu vergleichen
- eine ökologische Bewertung für beide Typen von Fahrzeuge durchzuführen

7.2 Studie der technischen Machbarkeit

7.2.1 Definition der Betriebsbedingungen

Starten wird die Reise in Kirkel, wo sich der Sitz von J.S.L befindet. Der Kunde, der beliefert werden muss, befindet sich in einem Vorort von Madrid.

Die Hinfahrt wird aufgrund der Rückfrachten nicht mit der Rückfahrt übereinstimmen. Die Rückfrachten stehen nicht im Voraus fest, weshalb für die Berechnungen eine identische Strecke betrachtet wird. Zusätzlich wird davon ausgegangen, dass es sich bei der gefahrenen Strecke um eine Rundfahrt handelt. Aufgrund des regionalen Mangels an LNG-Tankstellen muss durch akribische Berechnungen gewährleistet werden, dass das Fahrzeug in Kirkel mit ausreichend Treibstoff ausgestattet ist, um die nächste Station zu erreichen.

Durch die geringe Verbreitung des LNG fehlen noch wissenschaftliche Studien und Erfahrungswerte. Die Dauer einer vollen LNG-Betankung scheint, im Vergleich zu Diesel, für Transporteure ein erhebliches Risiko darzustellen. Das liegt zum einen an der Zusammensetzung des Erdgases. Sie ist nicht international genormt und kann sich, je nach Herkunft, wesentlich unterscheiden. Der Motor reagiert sehr empfindlich auf den Konzentrationsgrad des Methans (77% bis 92%)¹⁴⁸, was den Verbrauch beeinflusst. Des Weiteren sind sowohl die Treibstoffanzeige als auch der Durchflusssensor unzuverlässiger als bei Diesel-Fahrzeugen. Das führt zu einem erhöhten Pannen-Risiko und erfordert demzufolge eine bessere und genauere Routenplanung.

Für die zwei verschiedenen Fahrzeugtypen wurde die maximale Transporter Reichweite geschätzt:

- LNG-Lastkraftwagen (Iveco Stralis NP): 900 km Reichweite
- Diesel-Lastkraftwagen (Iveco Hi-Way): 3.500 km Reichweite

Der durchschnittliche Verbrauch eines LNG-Lastkraftwagens beträgt 27 kg LNG pro 100 km. Bei einer vom Spediteur geschätzte Reichweite von 900 km wird demzufolge ein Verbrauch von 243 kg LNG erwartet. Im Gegensatz zu Dieselfahrzeugen, die während einer Strecke von ungefähr 3.350 km lediglich einmal betankt werden müssen, müssen LNG-Fahrzeuge für dieselbe Fahrt mindestens viermal betankt werden.

7.2.2 Auswahl der Strecke

Als erstes muss die Route für die Strecke definiert werden. Dem Spediteur stehen mehrere Routen durch Frankreich zur Auswahl. Für Lieferungen nach Madrid nimmt der Spediteur im Normalfall die Route durch Chalon-sur-Saône. Diese Strecke ist länger, allerdings sind die Mautgebühren im Vergleich zu anderen Routen weitaus niedriger. Im Gegensatz zu Strecken, die durch Paris oder Lyon führen, weist diese Strecke weniger Verkehrsprobleme auf.

Die Zeit ist in diesem Fall kein limitierender Faktor. Die Fahrer werden auf internationalen Strecken pauschal vergütet. Solange die gesetzlichen Lenk- und Arbeitszeiten nicht überschritten werden, ist es nicht erforderlich die kürzeste Strecke auszuwählen. Die beste Route ist in diesem Fall die Strecke mit der geringsten Laufleistung und den geringsten Mautkosten.

¹⁴⁸ Vgl. Projet Equilibre (2019) S.13

7.2.3 Auswahl der Tankstellen

Wie bereits in dem vorherigen Kapitel über Infrastrukturen erwähnt, behindert der Mangel an Tankstellen die Entwicklung von LNG in einigen Regionen. Das Unternehmen J.S.Logistics ist von diesem Problem besonders betroffen, da es sich in Deutschland befindet, eines der Länder mit der schwächsten LNG-Infrastruktur in Westeuropa. Für die aktuelle Fahrt hat der Spediteur keine Versorgungsschwierigkeiten, da er in Ulm täglich an dem ‚Betriebshof‘ Tankcontainer von IVECO tanken kann. Allerdings könnte es für die neue Strecke zu Umstellungsaufwand kommen. Die Entfernung bis zur nächsten öffentlichen LNG-Tankstelle beträgt von Frankreich (Strasbourg oder in die Umgebung von Nancy) aus 130 km und von Deutschland (Köln) aus 250 km.

Mithilfe eines Planungs-Tools der NGVA¹⁴⁹, indem alle LNG-Tankstellen europaweit registriert sind, wurden auf der Strecke insgesamt drei öffentlichen Tankstellen ausgewählt, die keine großen Umwege verursachen (insgesamt 22 km für den Hinweg).

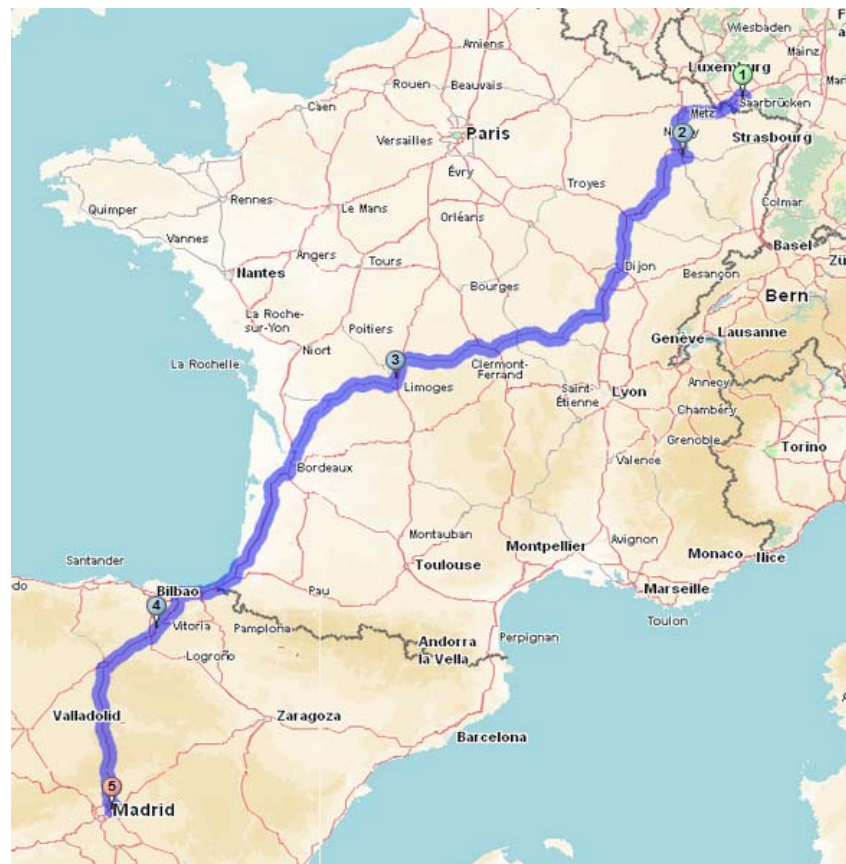
Auf der Strecke zwischen Kirkel und Bordeaux kann es durch die limitierte Anzahl an LNG-Tankstellen zu Versorgungsschwierigkeiten kommen. Im Gegensatz dazu gibt es von Bordeaux bis Madrid zahlreiche Stationen mit geringer Entfernung zueinander. Aus diesem Grund ist es möglich die Route zu ändern, um die Strecke für die Rückfrachten anzupassen.

7.2.1 Endgültige Strecke

Es wurden mehrere Szenarien simuliert um den Kilometeraufwand der Strecke zu optimieren. Außerdem wurde versucht die Anzahl der notwendigen Stopps an den definierten Tankstellen zu minimieren. Nach Absprache mit dem Spediteur wurde vereinbart folgende Strecke auszuwählen.

¹⁴⁹ Vgl. NGVA-Europe (2019) Onlinequelle

Abbildung 22: Karte Strecke Kirdel bis Madrid mit LNG-Fahrzeug



Quelle: Eigene Darstellung mit PTV Maps&Guide

Tabelle 9: Ausgewählte Strecke mit LNG-Fahrzeug

	Abfahrt	km	Ankunft	km	Distanz (km)	Reichweite am Abfahrt (km)	Reichweite am Ankunft (km)
	J.S.L (Kirdel)	0	Air Liquide (Fléville)	153	153	747	594
1	Air Liquide (Fléville)	153	AVIA (Limoges)	786	633	900	267
2	AVIA (Limoges)	786	Naturgy (Nanclares)	1361	575	900	325
3	Naturgy (Nanclares)	1361	Kunde (Madrid)	1703	342	900	558
4	Kunde (Madrid)	0	Naturgy (Nanclares)	342	342	558	216
5	Naturgy (Nanclares)	342	AVIA (Limoges)	917	575	900	325
6	AVIA (Limoges)	917	Air Liquide (Fléville)	1550	633	900	267

7.2.2 Vergleich mit Diesel-Strecke

Die definierte Strecke ist an den Versorgungsbedarf des LNG-Fahrzeugs angepasst. Mit einem Diesel-Fahrzeug könnte dieselbe Strecke ohne Umwege gefahren werden. Dadurch ist es möglich die Laufleistung und die Laufdauer beider Fahrzeuge miteinander zu vergleichen.

Tabelle 10: Vergleich der LNG- und der Diesel-Strecke

	LNG	Diesel	Unterschied
Kilometer (Hinweg)	1727 km	1705 km	22 km
Kilometer (Rückweg)	1720 km	1700 km	20 km
Total Kilometer	3447 km	3405 km	42 km

Fahrzeit (Hinweg) in Stunden	24:17	23:36	1:03
Fahrzeit (Rückweg) in Stunden	24:17	23:38	1:03
Dauer Betankungen in Stunden	02:00	0:15	1:45
Total Dauer (Stunden)	50:34	47:14	3:20

Im Gegensatz zum Diesel-Fahrzeug muss, bei der Nutzung eines LNG-Fahrzeugs, eine zusätzliche Strecke von 42 km und ein zeitlicher Mehraufwand von insgesamt 3:20 eingeplant werden. Die zusätzlichen Kilometer repräsentieren 1% der Gesamtstrecke, was nicht erheblich ist. Die Zeitunterschiede sind jedoch bedeutender, da ein LNG-Fahrzeug 6-mal betankt werden muss (jeweils 20 Minuten).¹⁵⁰ Das Diesel-Fahrzeug hingegen wird lediglich einmal betankt (15 Minuten).¹⁵¹ Wie bereits erläutert, ist in diesem Fall die Zeit jedoch kein wichtiger Faktor.

Es kann daher der Schluss gezogen werden, dass die Fahrt mit einem LNG-Fahrzeug technisch machbar ist und es im Vergleich zu einem Dieselfahrzeug nur einer kleinen Anpassung bedarf. Es muss jedoch untersucht werden, welche Auswirkungen die unterschiedlichen Fahrten auf die Kosten haben können.

7.3 Studie der Kosten

7.3.1 Analyse der Kostendifferenz

¹⁵⁰ Vgl. Projet Equilibre (2019), S.15.

¹⁵¹ Schätzung der Fahrer von SAMAT Toulouse

Um die Kostenunterschiede zwischen LNG und Diesel für die Strecke Kitzbühel bis Madrid (hin und zurück) zu vergleichen, wurde eine Analyse geführt. Es wurden nur die Kostenstellen berücksichtigt, bei denen der Wechsel des Motortyps einen Einfluss auf die Kosten hat. Andere Kosten, wie Reifenkosten, Preis der Trailer, Versicherungskosten, usw., die für LNG- und Dieselfahrzeuge identisch sind, werden in dieser Analyse nicht betrachtet. Die Personalkosten werden ebenfalls nicht berücksichtigt, da die Fahrer internationaler Strecken monatlich bezahlt werden. Diese werden, unabhängig davon ob sie die tatsächlich gearbeitet haben, für 160 Stunden pro Monat bezahlt.

Tabelle 11: Kostenanalyse der Strecke (Hinweg) mit LNG- und Diesel-Antrieben

FAHRZEUG	LNG	DIESEL
Fahrzeugkosten (monat)	1 648,33 €	1 144,44 €
Fahrzeugkosten (pro km)	0,12 €	0,08 €
Fahrzeugkosten (pro Fahrt)	206,47 €	143,27 €
Wartungsvertrag (pro km)	0,04 €	0,03 €
Wartungsvertrag (pro Fahrt)	65,39 €	51,15 €
Total Fahrzeug	271,86 €	194,43 €

KRAFTSTOFF	LNG		DIESEL	
	Betankung (km)	Betankung (kg)	Strecke (km)	Betankung (km)
Airliquide (Nancy)	348	90,25 €		
Aria (Limoges)	637	173,44 €		
Naturgy (Nanclares)	574	105,04 €		
Madrid (Diesel Station)			1705	473,53 €
Total Strecke		368,73 €		473,53 €

MAUT	LNG		DIESEL	
	Maut Sektion (km)	Maut Kosten (Netto)	Maut Sektion (km)	Maut Kosten (Netto)
Deutschland	25,5	0 €	25,5	5,05 €
Frankreich	417,07	128,09 €	427,46	134,67 €
Spanien	196,36	35,62 €	196,36	35,62 €
Total Strecke (km)	638,93		649,32	
Total Maut		163,71 €		175,34 €

7.3.2 Diskussion der Ergebnisse

- *Fahrzeugkosten*: Die Fahrzeugkosten sind mit +40% die höchsten Mehrkosten gegenüber Dieselfahrzeugen. Sie umfassen sowohl die Anschaffungskosten als auch die Wartungskosten.

Nach Angaben des Spediteurs, sollte ein Fahrzeug ausschließlich für die Fahrt (Kirkel-Madrid) benutzt werden. Des Weiteren wird nur ein Fahrer mobilisiert, wodurch vier Rundfahrten monatlich möglich wären. Die monatlichen Kosten des Sattelzugs wurden durch vier geteilt, wobei die unterschiedlichen Laufleistungen zum und vom Fahrzeug berücksichtigt wurden.

Die monatlich anfallenden Wartungskosten basieren auf den aktuellen Kosten von J.S.Logistics. Die Kosten pro Monat wurden durch die Anzahl an gefahrenen Kilometern geteilt.

- **Kraftstoffkosten:** Die Entfernung zwischen den Tankstellen (in Kilometern) wurde berechnet. Basierend auf dem Kraftstoffverbrauch pro Kilometer und dem Preis an jeder Tankstelle wurden die Kraftstoffkosten geschätzt. Die Berechnungen wurden durchgeführt, um die kostengünstigste Versorgung zu ermöglichen. Für die Fahrt mit dem Dieselfahrzeug ist nur eine Betankung notwendig. In diesem Fall wurde entschieden, die Betankung in Spanien durchzuführen, da die Preise in Spanien günstiger als in Deutschland oder Frankreich sind.

Die LNG-Rundfahrt hingegen ermöglicht eine Reduktion der Kraftstoffkosten um 14% gegenüber Diesel. Obwohl dadurch Einsparungen generiert werden können, bleibt der Gewinn, aufgrund des geringen Preisunterschieds zwischen LNG und Diesel in Frankreich, begrenzt. Jedoch ist der Kraftstoff die einzige Kostenstelle die LNG gegenüber Diesel begünstigt. Damit sich die Reise rentiert, müssen die Kraftstoffeinsparungen mindestens die Mehrkosten abdecken.

- **Mautkosten:** Die Laufleistung in der Maut-Zone und die Gebühren wurden mit einem TMS berechnet. Da Kinkel nah an der französischen Grenze liegt, werden nur wenige Kilometer in Deutschland gefahren. Die Mautbefreiung hat somit auf dieser Reise fast keine Kostenfolgen: circa 10€ für die Hin- und Rückfahrt. Die Reduzierung der Mautgebühren von 7% für LNG-Fahrzeuge ist auf einen bestimmten Grund zurückzuführen. Trotz längerer Fahrten ist die Laufleistung in der Maut-Zone reduziert. Die längeren Fahrten lassen sich durch die Anfahrt einiger LNG-Tankstellen außerhalb der Autobahnen begründen.

In der obigen Tabelle werden die Kosten für die Hinfahrt berechnet. Der Rückweg stimmt nicht exakt mit dem Hinweg überein, woraus nicht nur unterschiedliche Strecken, sondern auch Kosten resultieren (siehe Anhang). Nachfolgend befindet sich eine Tabelle, in der alle Kosten für die Hin- und Rückreise zusammengefasst sind:

Tabelle 12: Kostenanalyse Hin- und Rückfahrt zwischen LNG und Diesel

	LNG	DIESEL	VERGLEICH
Fahrzeugkosten	542,59 €	388,26 €	+40%
Kraftstoffkosten	816,26 €	945,68 €	-14%

Mautkosten	329,44 €	352,70 €	-7%
Gesamtkosten	1 688,29 €	1 686,64 €	0%

Für die Kostenposition, die berücksichtigt wurden, sollten die Kosten für LNG- und Diesel-Fahrzeuge identisch sein (1,35€ mehr für den LNG-Fahrzeug). Tatsächlich reichen die Kraftstoff- und Mautreduzierungen nur aus, um die Kosten des Fahrzeugs auszugleichen. Der Wechsel von Diesel auf LNG wirkt dadurch nicht attraktiv.

7.3.3 Entgangene Gewinne

In diesem Stadium der Analyse kann davon ausgegangen werden, dass trotz des Ausbleibens von Kostensenkungen, durch den Einsatz von LNG-Fahrzeugen, kein Geld verloren geht. Aus diesem Grund könnte dennoch auf LNG umgestellt werden, um die Umweltbelastung zu reduzieren und den Kunden zufriedenzustellen.

Es ist jedoch wichtig, die Kostendifferenz auf dieser Route mit der Kostendifferenz auf der aktuellen Route zu vergleichen. Daher wurde eine ähnliche Analyse für die Strecke (Kirkel-Schongau) durchgeführt:

Tabelle 13: Kostenanalyse der aktuelle Strecke (Kirkel-Schongau) mit LNG und Diesel

	LNG	DIESEL	VERGLEICH
Fahrzeugkosten	2 102,72 €	1 504,44 €	+40%
Kraftstoffkosten	3 266 €	5 080 €	-36%
Mautkosten	0 €	3 156,56 €	-100%
Gesamtkosten	5 368,64 €	9 741,32 €	-45%

Für diese Strecke stimmen die Fahrzeug-Mehrkosten überein. Jedoch profitiert Deutschland von einem günstigeren Kostenunterschied und einer Mautbefreiung. Deshalb sind die Kosten für LNG-Fahrzeuge vorteilhafter im Vergleich zu Diesel: Es ergibt sich eine Ersparnis von 4373€ pro Monat.

Daraus kann der Schluss gezogen werden, dass die Nutzung des Fahrzeugs für die Fahrt nach Madrid einen enormen entgangenen wirtschaftlichen Gewinn für den Spediteur bedeuten würde. In einem vorherigen Kapitel (siehe 6.3) wurde jedoch erwähnt, dass der Hauptgrund für einen Wechsel zu LNG-Fahrzeugen die Kundennachfrage ist, die durch

den Umweltaspekt motiviert ist. Wenn die Änderung in diesem Fall wirtschaftlich nicht vorteilhaft ist, kann dies umweltbezogen sein.

7.4 Studie des ökologischen Unterschieds

7.4.1 Methodik

Aufgrund der Untersuchung der Ergebnisse einer großen Stichprobe ist es möglich, für die Fahrten Durchschnittswerte zu definieren und diese auf den gewünschten Weg anzuwenden. Da der Spediteur nur zwei LNG-Fahrzeuge hat, die immer dieselbe Strecke fahren, stellt dies keine ausreichend große Stichprobe dar, um sich rein auf die Fahrtberichte (Iveco Smart Report) verlassen zu können.

Daher werden die Ergebnisse des ‚Projet Equilibre‘ zur Vorhersage des Verbrauchs für die Fahrt verwendet. Obwohl es sich ursprünglich um eine unabhängige Studie handelte, die von vier Spediteuren (KMU) durchgeführt wurde, beteiligten sich weitere Akteure während des Projekts: große Unternehmen und Spediteure, Forschungszentren, staatliche Institutionen und auch Konzerne, die in der Gasbranche tätig sind (GNVert, GRT-Gas). Es ist eine der aktuellsten und umfangreichsten Studien über LNG-LKWs in Europa. Die Ergebnisse scheinen zuverlässig und dienen bereits als Referenz für andere Studien.

Es ist jedoch zu beachten, dass die Rahmenbedingungen der Studie nicht mit denen bei J.S.L. übereinstimmen, und dass es andere Studien gibt, deren Ergebnisse von diesen abweichen.

Die Fahrzeuge, die für die Studie benutzt wurden, unterscheiden sich von den J.S.L.-Fahrzeugen. Sie weisen allerdings genug Gemeinsamkeiten auf (44 Tonnen Fahrzeuge, Mehrheit von Iveco Fahrzeugen, selbe Euro-Klasse), um als Referenz benutzt zu werden. Das Ziel besteht nicht darin ein genaues Ergebnis zu erhalten, sondern lediglich eine Größenordnung zu gewährleisten.

7.4.2 Klassifikationsmethode

Spediteure sind, aufgrund ihrer Erfahrung, in der Regel in der Lage den durchschnittlichen Verbrauch ihrer Fahrzeuge für etablierte Fahrten zu prognostizieren. Für neue Strecken können sie keinen Verbrauch vorhersagen.

Die große Anzahl an Faktoren, die den Verbrauch beeinflussen und die komplexen Korrelationen zwischen diesen Faktoren, macht eine Vorhersage sehr schwierig. Obwohl

ein Teil der Variablen im Voraus bekannt ist (Straßen typ, Höhenprofil, Gesamtgewicht), sind andere Variablen unvorhersehbar (Verkehr, Wetterbedingungen).

- *Verbrauch*

In der Studie wurden die Fahrzeugdaten auf mehr als eine Million Kilometer registriert. Um den Verbrauch besser analysieren zu können, wurde eine Klassifizierung nach Routen-Typ verwendet: Autobahn¹⁵², Landesstraße, Schnellstraße, Ballungsraum und dichte Stadtgebiete.¹⁵³ Durch das Kategorisieren von Straßentypen ist es möglich den Verbrauch und die Emissionen besser prognostizieren zu können.

Es existiert eine starke Korrelation zwischen dem Treibstoffverbrauch und dem Routen-Typ. Je höher der Urbanisierungsgrad, desto:

- höher wird die Anzahl an Beschleunigungsphasen und Haltestellen (Ampeln, Stoppschild)
- dichter ist die Straßen-Infrastruktur (Kreisverkehre, Bremsschwellen, Kreuzungen)
- dichter wird der Verkehrsfluss
- niedriger ist die durchschnittliche Geschwindigkeit

Um die Methodologie und die anzuwendende Klassifizierungsmethode zu verstehen, ist es wichtig die Hauptfaktoren des Verbrauchs zu erläutern. Der Verbrauch entsteht bei der Leistungserzeugung durch die Betätigung des Gaspedals. Unabhängig ob mit LNG oder Diesel, der Treibstoffverbrauch resultiert aus den Beschleunigungsphasen. Je unregelmäßiger die Geschwindigkeit auf einem kurzen Zeitraum, desto größer ist der Verbrauch. Zusätzlich korreliert für Schwerlastfahrzeuge (LNG und Diesel) die Durchschnittsgeschwindigkeit negativ mit dem Treibstoffverbrauch. Es heißt, dass der Konsum tendenziell steigt, wenn die Geschwindigkeit sich reduziert.

Die Faktoren, die eine hohe Geschwindigkeit verhindert und signifikante Beschleunigungsphasen verursachen, sind diejenigen, die den meisten Verbrauch erzeugen. Diese Fahrtbedingungen treten in Stadtgebieten und Ballungsräumen häufiger auf als auf der Autobahn oder auf Landstraßen. Zum Beispiel verbrauchen Diesel und LNG Schwerlastfahrzeuge, die auf überlasteten Straßen fahren, ungefähr 10% mehr Kraftstoff als bei flüssigem Verkehr. Der höchste Verbrauch entsteht durch den Stopp

¹⁵² In den Fall ist mit Autobahn eine Straße die an Autoverkehr reserviert ist, ohne Kreuzung und wo man in normalen Verkehr mit einer stabilen Geschwindigkeit fahren kann verstanden.

¹⁵³ Vgl. Projet Equilibre (2019), S.28

eines Fahrzeugs (Lieferung, Ampel, Stau, etc.). Einmal angehalten, erfordert ein Neustart des Fahrzeugs viel Energie.

Da diese Faktoren sich stärker auf städtische Gebiete konzentrieren, ist es sinnvoll den Verbrauch mit einer Routen-Klassifizierung zu studieren. Es ist jedoch zu beachten, dass andere Einflussfaktoren (wie Ladegewicht, Wetterbedingungen, Höhendifferenz, usw.) bei dieser Klassifizierung nicht berücksichtigt werden können.

- *NOx-Emissionen*

Die Analyse vom Stickoxiden-Ausstoß ist noch komplexer als für den Verbrauch. Stickoxide hängen mit dem Verbrauch zusammen, da sie produziert werden, wenn Leistung erzeugt wird. Allerdings ist die Produktion auch von der Wirksamkeit des Abgasnachbehandlungssystems abhängig. Wenn der Motor kalt ist oder während Beschleunigungsphasen, reduziert sich die Effizienz der Behandlungs-Systeme.¹⁵⁴

Die Klassifizierung nach Routen-Typ ist deshalb anpassungsfähiger für die NOx-Emissionen. In städtischen Gebieten werden Faktoren wie Geschwindigkeitsbegrenzung oder Infrastrukturen (Ampeln, Kreisverkehre, usw.) zu hohen Beschleunigungsphasen führen. Da die Abgasnachbehandlungssysteme in diesen Zuständen weniger wirksam sind, erhöht dies wesentlich die Produktion. Zum Beispiel stoßen Schwerlastfahrzeuge wesentlich mehr NOx-Emission auf überlasteten Straßen als auf fließenden Straßen aus: 200% mehr für LNG-LKWs und 800% mehr für Diesel-LKWs.¹⁵⁵

7.4.3 Anwendung auf die Fallstudie

- *Verbrauch*

Während der Zusammenarbeit mit dem Spediteur J.S.Logistics wurden mehrere Verbrauchberichte bereitgestellt. Dazu gehören zahlreichen Daten (Gesamtgewicht, Geschwindigkeit, Anzahl an Stopps, usw.) für zwei LNG-Fahrzeuge (Iveco Stralis NP) und sieben äquivalente Diesel-Fahrzeuge (Iveco Hi-Way).

Die größte Schwierigkeit bestand darin, eine ausreichend große Stichprobe zu verwenden. Der Verbrauch muss auf zahlreichen unterschiedlichen Strecken berechnet werden, um die Wirkung verschiedener Faktoren definieren zu können. Da die LNG-Fahrzeuge von J.S.L immer dieselbe Strecke fahren, ist dies nicht der Fall. Zweitens müssen LNG- und

¹⁵⁴ Vgl. Projet Equilibre (2019) S.38

¹⁵⁵ Vgl. Projet Equilibre (2018) S.5

Dieselfahrzeuge bei denselben Bedingungen gefahren sein (Strecke, Ladungsgewicht, Verkehr, usw.), um eine Vergleichbarkeit zu schaffen.

Deshalb wurden die Daten des ‚Projet Equilibre‘, die nach Routen-Typ klassifiziert sind, als Basis verwendet um den Verbrauch für die Strecke Kirkel/Madrid berechnen zu können:

Tabelle 14: Kilometerzahl nach Straßen Klassifizierung für die Strecke Kirkel/Madrid mit LNG- und Diesel-Fahrzeuge

	LNG		DIESEL	
	Kg/100km (Projet Equilibre)	Km (Kirkel bis Madrid)	L/100km (Projet Equilibre)	Km (Kirkel bis Madrid)
Autobahn	25,8	1677,55	26,4	1688,6
Landstraße	31,5	14,31	34,7	9,28
Schnellstraße	21,0	25,03	24,6	0
Ballungsraum	34,5	7,3	37,2	0,9
Dichte Stadtgebiete	37,2	2,67	43,1	6,28
Total Strecke (km)		1726,86		1705,06

Insgesamt wurden zwei Strecken berechnet, da die LNG-Strecke aufgrund der Tankstellen länger ist. Beide wurden mit Hilfe einer Software (PTV Maps&Guide) nach Straßen-Kategorien abgeschnitten.

Mit den Verbrauchswerten pro Straßen-Typ des ‚Projet Equilibre‘ und der Unterteilung der Strecke Kirkel/Madrid wurden die Durchschnittsverbräuche berechnet. Im Durchschnitt sollte der Verbrauch **25,8 kg/100 km** für LNG-Fahrzeuge und **26,5 l/100km** für Diesel-Fahrzeuge betragen.

Diese Zahlen liegen leicht unter dem Durchschnittsverbrauch von J.S.L. Allerdings scheinen die Ergebnisse für eine Route, die hauptsächlich aus Autobahnstrecken besteht, plausibel zu sein. Zudem stimmt der Verbrauchsunterschied zwischen Diesel und LNG mit den Ergebnissen von J.S.L. überein.

- *CO2-Emissionen*

Die CO2-Emissionen wurden direkt mit dem Treibstoffverbrauch berechnet. Durch die Analyse der verschiedenen Fahrten, die von J.S.Logistics durchgeführt wurden, konnten folgende Ergebnisse festgehalten werden:

- Pro Liter Diesel wird 2,65 kg CO2 emittiert
- Pro Kilogramm LNG wird 2,8 kg CO2 emittiert

Im Gegensatz zu den Verbrauchsdaten, die für jede Fahrt variieren und von mehreren Faktoren beeinflusst werden, sind die CO2-Emissionen pro Kilogramm LNG und Liter Diesel konstant und nur von dem Verbrauch abhängig (siehe Anhang). Deshalb werden diese Daten für die neue Strecke nach Madrid verwendet. Um die CO2-Emission pro Routen-Kategorie zu berechnen, wird der CO2-Emissionskoeffizient von J.S.Logistics mit dem Durchschnittsverbrauch von „Projet Equilibre“ multipliziert:

Tabelle 15 : CO2-Emissionen für die Strecke Kirel/Madrid mit LNG- und Diesel-Fahrzeuge

	LNG		DIESEL	
	CO2 Kg/100km (Projet Equilibre)	CO2 (kg) (Kirel bis Madrid)	CO2 Kg/100km (Projet Equilibre)	CO2 (kg) (Kirel bis Madrid)
Autobahn	72,2	1211,9	70,0	1181,3
Landstraße	88,2	12,6	92,0	8,5
Schnellstraße	58,8	14,7	65,2	0,0
Ballungsraum	96,7	7,1	98,6	0,9
Dichte Stadtgebiete	104,2	2,8	114,2	7,2
Total Strecke CO2 (kg)		1249,0		1197,9

Die CO2-Emissionen wurden für die Hin- und Rückfahrt sowohl für Diesel- als auch LNG-Fahrzeuge berechnet. Für die Rundfahrt sollte ungefähr 4% mehr CO2 durch LNG-Fahrzeuge als durch Diesel-Fahrzeuge ausgestoßen werden.

Dieser Unterschied erklärt sich zum Teil durch die kürzere Fahrt mit dem Diesel (da kein Umweg für die Tankstellen notwendig ist). Mit derselben Berechnungsmethode, unter der Annahme, dass die beiden Fahrzeuge genau die gleiche Strecke fahren¹⁵⁶, würde das LNG-Fahrzeug trotzdem 3% mehr CO2 als der Diesel ausstoßen.

¹⁵⁶ Wenn der LNG- und der Dieselfahrzeug beide die LNG-Route oder die Diesel-Route fahren

Der hohe CO₂-Ausstoß erklärt sich größtenteils dadurch, dass mehr als 95% der Strecke auf der Autobahn gefahren wird. Zudem ist die Autobahn der einzige Routen-Typ auf dem LNG mehr CO₂ als Diesel ausstößt. Um ein besseres Verständnis darüber zu erhalten, warum LNG-Fahrzeuge auf der Autobahn umweltschädlicher sind, wurde der Projektkoordinator des Projekts „Equilibre“ kontaktiert. Ihm zufolge kann dieser Unterschied durch drei Phänomene erklärt werden:

- Die Mehrheit der LNG-Motoren sind mit Fremdzündungsmotoren (Ottomotor) ausgestattet, die in gleichförmiger Geschwindigkeit mehr als Diesel verbrauchen.
- Der aktuelle Diesel ist für Autobahnfahrten optimal und damit sehr energieeffizient.
- Im Gegensatz dazu sind LNG-Motoren bei ‚Übergangsphasen‘ (Veränderung der Fahrgeschwindigkeit) viel sparsamer.

In dem Projekt „Equilibre“ wurden andere CO₂-Emissionen Koeffizienten verwendet (2,7kg CO₂ pro Liter Diesel und 2,75kg CO₂ pro kg LNG). Deren Diesel-Fahrzeuge stoßen mehr CO₂ und die LNG-Fahrzeuge weniger CO₂ aus, als die von J.S.L. Wenn die CO₂-Koeffizienten der Studie auf die Route Kitzbühel/Madrid angewendet werden, emittierten LNG-Fahrzeuge 0,4% mehr CO₂ als Diesel-Fahrzeuge.

Ob mit den CO₂-Koeffizienten von J.S.L oder denen des Projekts „Equilibre“ kann geschlussfolgert werden, dass es zwischen beiden Antrieben fast kein CO₂-Unterschied existiert. Das LNG-Fahrzeug würde auf dieser Strecke marginal mehr CO₂ als das Dieselfahrzeug ausstoßen.

- *NO_x-Emissionen*

In den Verbrauchsberichten von J.S.Logistics werden die NO_x-Emissionen nicht berücksichtigt. Deshalb werden für die Strecke Kitzbühel/Madrid, die Ergebnisse der Studie ‚Projet Equilibre‘ mit der gleichen Methode wie zuvor benutzt.

NO_x-Emissionen müssen mit mehr Vorsicht behandelt werden, als bei den anderen Ergebnissen. Die NO_x-Emissions-Unterschiede sind zwischen den Fahrzeugen sehr hoch, da das Abgasnachbehandlungssystem für jedes Fahrzeug individuell eingestellt wird.¹⁵⁷ Demzufolge können die Ergebnisse als Referenz verwendet werden. Für die J.S.Logistics Fahrzeuge können sie allerdings weniger repräsentativ sein.

¹⁵⁷ Vgl. Projet Equilibre (2019) S.107

Tabelle 16: NOx-Emissionen für die Strecke Kirkel/Madrid mit LNG- und Diesel-Fahrzeuge

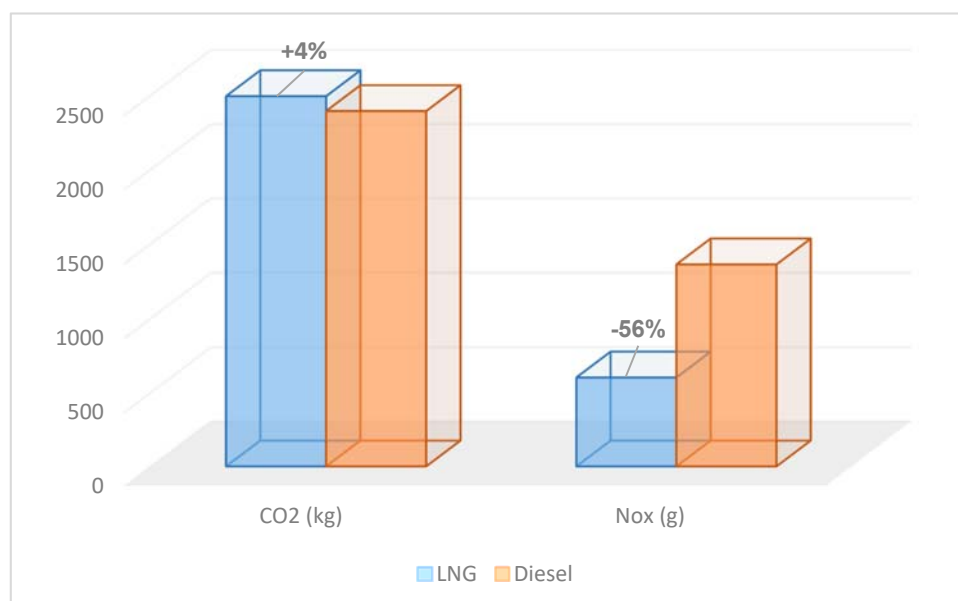
	LNG		DIESEL	
	NOx (g/100km) (Projet Equilibre)	NOx (g) (Kirkel bis Madrid)	NOx (g/100km) (Projet Equilibre)	NOx (g) (Kirkel bis Madrid)
Autobahn	17	285,2	39	658,6
Landstraße	40	5,7	98	9,1
Schnellstraße	15	3,8	37	0,0
Ballungsraum	48	3,5	133	1,2
Dichte Stadtgebiete	106	2,8	175	11,0
Total Strecke NOx (g)		301,0		679,8

Die Ergebnisse zeigen einen signifikanten Unterschied zwischen LNG und Diesel Stickoxiden-Emissionen. Mit LNG-Fahrzeugen werden circa 56% weniger NOx ausgestoßen als mit Diesel, obwohl ein Großteil der Strecke auf der Autobahn gefahren wird. In Ballungsräumen und Stadtgebieten sind diese Unterschiede noch viel deutlicher.

- Bilanz

Egal ob auf dem Hin- oder Rückweg, die Ergebnisse dieser Analyse zeigen, dass zwischen beiden Fahrzeugtypen fast kein Unterschied bezüglich den CO₂-Emmisionen vorhanden ist (sehr kleiner Nachteil von LNG). Die Stickoxid-Emissionen (NOx) eines Diesel-Fahrzeugs sind jedoch beträchtlich höher, als mit einem LNG-Fahrzeug. Alle detaillierten Berechnungen befinden sich im Anhang.

Abbildung 23: Vergleich von CO₂- und NOx- Emissionen für die Rundfahrt



7.5 Abschluss der Fallstudie

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Einsatz eines LNG-Fahrzeugs für diese Fahrt technisch machbar ist und keine zusätzlichen Kosten verursacht. In Deutschland würde das LNG-Fahrzeug jedoch erhebliche Einsparungen bringen. Wenn auch seine Verwendung keine Reduzierung der Treibstoffemissionen erbringt (oder sogar eine leichte Erhöhung), ist die Einsparung an Stickoxiden beträchtlich. Die Entscheidung für die Umsetzung des Projekts hängt von der Priorisierung des Spediteurs, zwischen dem wirtschaftlichen und ökologischen Aspekt, sowie der Beziehung zu dem Kunden ab.

Es muss berücksichtigt werden, dass die Kostenanalyse nur zum Zeitpunkt der Studie genau ist. Die Kraftstoffpreise fluktuieren jeden Tag und sind zeitlich limitiert. Wenn sich die Kosten von LNG und Diesel zum jetzigen Zeitpunkt für die Strecke kaum unterscheiden, könnten andere Faktoren diese in Zukunft positiv oder negativ beeinflussen, wie zum Beispiel der Technologiestand, die Infrastruktur, die Kraftstoffpreise, die Staatförderungen, die Marktentwicklung, usw.

Der ökologische Vergleich der Studie basiert auf den Ergebnissen des Projekts „Equilibre“. Es gibt jedoch andere Studien, die sehr unterschiedliche Ergebnisse gefunden haben. Wie zum Beispiel die letzte veröffentlichte Studie von "Transport & Environment" (siehe 4.2.2). Deshalb werden erst zukünftige Forschungen es ermöglichen die genauen Emissionen besser ermitteln zu können, um ähnliche Vergleiche machen zu können.

8. Schlussteil

In den letzten Jahrzehnten trug die Abhängigkeit des Erdöls in der Transportbranche in hohem Maße zur Erhöhung der CO₂-Emissionen bei. Der Straßengüterverkehr ist einer der Sektoren mit der größten Verantwortung für den Klimawandel. Da unsere Wirtschaft jedoch auf Transporte angewiesen ist, hat die Europäische Union mehrere alternative Antriebe, unter anderen auch Erdgas, gefördert. Für schwere Lastkraftwagen ist heute LNG die einzige alternative Technologie, die mit Diesel vergleichbar ist. Die Entwicklung von Umweltzonen und die Verschärfung der Euro-Normen in Europa sollten aus diesem Grund eine zusätzliche Förderung für die Nutzung von LNG anbieten.

Ziel dieser Studie war es, LNG- und Dieselfahrzeuge in verschiedenen Bereichen zu vergleichen. Die Arbeit besteht sowohl aus einem theoretischen als auch einem praktischen Teil. Es zeigt sich, dass die Ergebnisse der Fallstudie mit denen der Forschung übereinstimmen. Die Vergleiche führen zu folgenden Ergebnissen:

- **Umweltbilanz:** Heute geben die wenigen verfügbaren Studien abweichende Ergebnisse, was einen exakten Vergleich zwischen LNG- und Diesel-Fahrzeuge verhindert. Die Mehrheit der Studien favorisiert jedoch die Nutzung von LNG Fahrzeugen hinsichtlich ihrer Umweltbilanz: mit einer kleinen Differenz der CO₂-Emissionen und einem deutlichen Vorzug für Schadstoffe (NO_x, Partikeln, usw.). Bio-LNG kann auch zur Reduzierung der Kohlenstoffbelastung eingesetzt werden. Es wird den beträchtlichen Bedarf an Kraftstoffen allerdings nicht befriedigen können, da es auf europäischer Ebene nicht in ausreichender Menge verfügbar ist. Die Analyse der Umweltbelastung bezüglich der Rundfahrt Kitzbühel-Madrid zeigt, dass mit LNG-Fahrzeugen eine geringere Steigerung von CO₂-Emissionen (wegen der Autobahnstrecke) und eine Reduzierung des NO_x-Ausstoßes stattfindet.

- **Infrastrukturen:** Europaweit gibt es einen erheblichen Mangel an LNG-Infrastruktur im Vergleich zu Diesel. In den nächsten Jahren sollte, bedingt durch den Druck der EU, eine starke Entwicklung der LNG-Infrastruktur stattfinden. Das Angebot an LNG-Fahrzeug ist heutzutage limitiert, obwohl die Fahrzeugeigenschaften, mit Ausnahme der Reichweite, denen eines Diesels vergleichbar sind. Das Beispiel von J.S.Logistics, zeigt, dass die Fahrt mit einem LNG-Fahrzeug machbar ist, aber eine Anpassung der Planung bezüglich der Entfernung und Dauer erforderlich ist (längere Strecke und Zeit).

- **Wirtschaftlichkeit:** Die Kostenvorteile variieren deutlich zwischen den Ländern. Meistens reicht die Einsparung auf Kraftstoffpreise nicht, um die Mehrkosten der Fahrzeuganschaffung auszugleichen. Deshalb haben viele Länder Förderungen eingeführt, um die Umstellung voranzutreiben. In Frankreich, aber vor allem in Deutschland, ist diese Technologie daher attraktiv geworden. Jedoch ist die Wirtschaftlichkeit künstlich und stark von Förderungen abhängig. Das Beispiel von J.S.L. stützt diese Hypothese. Die Umstellung ermöglicht eine bedeutende Einsparung, wenn Fahrzeuge in Deutschland benutzt werden, aber nicht auf internationalen Strecken, da es im Ausland keine Mautbefreiung gibt.

Die Untersuchung zeigt, dass LNG eine echte Alternative zu Dieselkraftstoff im Straßengüterverkehr sein kann. Der wirtschaftliche und ökologische Vorteil eines LNG-Fahrzeugs hängt jedoch stark von der Region (Infrastruktur, Förderung) und der Nutzung des Fahrzeuges ab. Das derzeitige Interesse einiger Staaten und privater Unternehmen fördert eine schnellere Entwicklung dieser Rahmenbedingungen. Angesichts des Mangels an mittelfristiger Zukunftsperspektive, bleibt der Markt allerdings fragil. Die Präzisierung der tatsächlichen ökologischen Auswirkungen von flüssigem Erdgas und die Entwicklung konkurrierender alternativer Antriebe werden zukünftig einen wesentlichen Einfluss (positiv oder negativ) auf die Investitionsentscheidung der Spediteure haben.

LITERATURVERZEICHNIS

ADAC e.V. (2019). Onlinequelle. Dieselfahrverbot: Alle Fragen und Antworten. Erreichbar unter: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/abgas-diesel-fahrverbote/fahrverbote/dieselfahrverbot-faq/>. Abruf am: 29.08.2019.

Adelski, A. (2019). Onlinequelle. Près de 2 millions de véhicules GNV en France d'ici 2035 ?. Erreichbar unter: <https://www.gaz-mobilite.fr/actus/pres-2-millions-vehicule-gnv-france-2035-2212.html>. Abruf am: 29.08.2019.

ADEME (2018). Les zones à faibles émissions (Low Emission Zones) à travers l'Europe : déploiement, retours d'expériences, évaluation d'impacts et efficacité du système. Rapport, 112 pages.

AFGNV (2015). Onlinequelle. Essais comparatifs GNL et Diesel : avantage au Gaz Naturel. Erreichbar unter: <https://www.afgnv.info/attachment/564706/>. Abruf am: 29.08.2019.

AFGNV (2016). Infrastructure GNV - France – 2020 / 2025. Mars 2016.

AFGNV (o.J.) Onlinequelle. Faire le plein. Erreichbar um : <https://www.afgnv.org/stations/>. Abruf am: 29.08.2019.

Ahlswede, A. (2019). Onlinequelle. Anzahl der Erdgas-Pkw in Deutschland bis 2019. Erreichbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/150913/umfrage/erdgas-pkw-in-deutschland/>. Abruf am: 29.08.2019.

Albus, R. et al. (2016). Studie Potenzialanalyse LNG Einsatz von LNG in der Mobilität, Schwerpunkte und Handlungsempfehlungen für die technische Umsetzung. DVGW Deutscher Verein des Gas und Wasserfaches e. V.

Arteconi, A. et al. (2010). Life-cycle greenhouse gas analysis of LNG as a heavy vehicle fuel in Europe. Applied Energy 87 (2010) 2005–2013

BMW (2018). Richtlinie über die Förderung von energieeffizienten und/oder CO₂-armen schweren Nutzfahrzeugen in Unternehmen des Güterkraftverkehrs. Berlin, den 22. Mai 2018

Bourdrel, T. et al. (2017). Cardio vascular effects of air pollution. Arch Cardiovasc Dis. Revised in May 2017.

BP p.l.c (o.J.). Onlinequelle. BP Energy Outlook 2019: Transport. Erreichbar unter: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook/demand-by-sector/transport.html>. Abruf am: 29.08.2019.

Bundesamt für Güterverkehr (2018). Onlinequelle. Änderungen bei der Lkw-Maut und im Güterkraftverkehrsgesetz zum 1. Januar 2019. Erreichbar unter: https://www.bag.bund.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2018/2018_12_17.html. Abruf am: 29.08.2019.

Bünger, U. et al. (2016). Vergleich von Cng und Lng zum Einsatz in Lkw im Fernverkehr. Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH.

Buxton, R. (2017). Onlinequelle. Human noise pollution is disrupting parks and wild places. Erreichbar unter: <http://theconversation.com/human-noise-pollution-is-disrupting-parks-and-wild-places-78074>. Abruf am: 29.08.2019.

BWE (2016). Onlinequelle. Vier Prozent bis 2020. Erreichbar unter: <https://www.bmwi-energiewende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2016/16/Meldung/erdgas.html>. Abruf am: 29.08.2019.

Centre International de Recherche sur le Cancer (2012). Onlinequelle. Communiqué de presse n°213 : Les gaz d'échappement des moteurs diesel cancerogènes. Erreichbar unter: https://www.iarc.fr/wp-content/uploads/2018/07/pr213_F.pdf. Abruf am: 29.08.2019.

CREG (2019). Etude sur la compétitivité du gaz naturel utilisé en tant que carburant CNG (compressed natural gas) et LNG (liquefied natural gas) pour divers types de véhicules.

Crit-Air.fr (2018). Onlinequelle. Classification Crit'Air. Erreichbar unter: <https://www.crit-air.fr/fr/informations-sur-la-vignette-critair/la-vignette-critair/qui-recoit-quelle-couleur-critair.html>. Abruf am: 29.08.2019.

DENA (2019). Onlinequelle. Onlinequelle. LNG-Tankstellen: Neue Karte zeigt Standorte. Erreichbar unter: <https://www.dena.de/newsroom/meldungen/2019/lng-tankstellen-neue-karte-zeigt-standorte/>. Pressemitteilung, Berlin. Abruf an: 20.09.2019.

DVGW (2017). Zukunft LNG Flüssiges Erdgas als sauberer Kraftstoff für schwere Lkw und Flottenfahrzeuge.

En route avec le gaz naturel (2014). Le gaz naturel comme carburant pour véhicule - GNC ET GNL. Novembre 2014.

European Commission (2010). White Paper — European transport policy for 2010: time to decide. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities

European Commission (2014). Directive 2014/94/EU of the European Parliament and of the Council of 22 October 2014 on the deployment of alternative fuels infrastructure. Off. J. Eur. Union L 307, 1–20

European Commission (2016). Onlinequelle. Well-to-Wheels Analyses. Erreichbar unter: <https://ec.europa.eu/jrc/en/jec/activities/wtw>. Abruf am: 29.08.2019.

European Commission (2017a). Communication de la commission au parlement européen, au conseil, au comité économique et social européen et au comité des régions. COM(2017) 652 final, Bruxelles, le 8.11.2017

European Commission (2017b). Onlinequelle. Final Report - Fuel Price Comparison. Erreichbar unter: <https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/2017-01-fuel-price-comparison.pdf>. Abruf an: 12.09.2019

European Commission (2018a). Onlinequelle. EU-Kommission verklagt Deutschland und fünf weitere Mitgliedsstaaten wegen Luftverschmutzung. Erreichbar unter: https://ec.europa.eu/germany/news/20180517-luftverschmutzung-klage_de. Abruf am: 29.08.2019.

European Commission (2018b). Regulation of the European parliament and of the council. COM (2018) 284 final of 17.05.2018.

European Commission (2018c). Etablissant des normes de performance en matière d'émissions de CO2 pour les nouveaux véhicules lourds. COM(2018) 284 final/2. 2018/0143 (COD)

European Commission (2018d). Neue EU-Kraftstoff-Kennzeichnung: Fragen und Antworten. Brüssel: 12. Oktober 2018.

- European Commission (2019). Onlinequelle. Weekly Oil Bulletin (35° Week, 2019). Erreichbar unter: <https://ec.europa.eu/energy/en/data-analysis/weekly-oil-bulletin>. Abruf an: 03.09.2019
- European Commission (o.J.). Onlinequelle. Road transport: Reducing CO2 emissions from vehicles. Erreichbar unter: https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles_en. Abruf am: 29.08.2019.
- European Federation for Transport and Environment (2008). Can you hear us? Why it is finally time for the EU to tackle the problem of noise from road and rail traffic. Brussels: T&E publication.
- European Parliament (2019). Onlinequelle. CO2 emissions from cars: facts and figures (infographics). Erreichbar unter: <http://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20190313STO31218/co2-emissions-from-cars-facts-and-figures-infographics>. Abruf am: 29.08.2019.
- Franceinfo (2018). Onlinequelle. Pollution : pourquoi les voitures les plus récentes sont-elles les plus polluantes ?. Erreichbar unter: https://www.francetvinfo.fr/sante/environnement-et-sante/pourquoi-les-voitures-les-plus-recentes-sont-elles-les-plus-polluantes_2680058.html. Abruf am: 29.08.2019.
- Gaz-mobilité.fr (o.J.a). Onlinequelle. GNV et dispositif de suramortissement. Erreichbar unter : <https://www.gaz-mobilite.fr/dossiers/autocars-camions-gnv-suramortissement/>. Abruf am: 29.08.2019.
- Gaz-mobilité.fr (o.J.b). Onlinequelle. Faire le plein d'un camion GNL : procédures, risques et sécurité. Erreichbar unter: <https://www.gaz-mobilite.fr/dossiers/faire-le-plein-camion-gnl-procedure-risques-securite/>. Abruf am: 31.08.2019.
- Gaz-mobilité.fr (o.J.c). Onlinequelle. Le marché du véhicule GNV en France, en Europe et dans le monde. Erreichbar unter : <https://www.gaz-mobilite.fr/dossiers/marche-vehicule-gnv-france-europe-monde/>. Abruf am: 29.08.2019.
- Gaz-mobilité.fr (o.J.d). Onlinequelle. Carte des stations GNV France. Erreichbar unter : <https://www.gaz-mobilite.fr/stations-gnv-france/>. Abruf am: 29.08.2019.
- GRDF (2017). Onlinequelle. GNV/ BioGNV. Erreichbar unter: https://www.sdec-energie.fr/sites/sdec.createurdimage.fr/files/pdf/jerome_loquet_grdf_21062017_gnv_aitf.pdf. Abruf an: 03.09.2019
- Hao, H. et al. (2016). Natural gas as vehicle fuel in China: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 62(2016)521–533, 2016
- Henschel, S. / Chan, G. (2013). Health risks of air pollution in Europe - HRAPIE project: New emerging risks to health from air pollution – results from the survey of experts. WHO Regional Office for Europe.
- IEA (2017). Onlinequelle. Key World Energy Statistics. Erreichbar unter: <https://www.iea.org/statistics/kwes/consumption/>. Abruf am: 29.08.2019.
- IPCC (2018). Global warming of 1.5°C. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Koepfel, W. et al (2017). LNG im Schwerlastverkehr - eine Alternative!. Energie wasser-praxis 5/2017.
- Le Fevre, C. (2014). The Prospects for Natural Gas as a Transportation Fuel in Europe. Oxford Institute for Energy Studies: Oxford, UK, 2014.

Le Parisien (2019). Onlinequelle. Transport routier : le gouvernement réduit le remboursement de la taxe sur le gazole. Erreichbar unter : <http://www.leparisien.fr/economie/transport-routier-le-gouvernement-reduit-le-remboursement-de-la-taxe-sur-le-gazole-09-07-2019-8112885.php>. Abruf am: 29.08.2019.

Leproges.fr (2019). Onlinequelle. Comment Carrefour méthanise ses biodéchets et roule plus vert. Erreichbar unter: <https://www.leprogres.fr/france-monde/2019/04/09/comment-carrefour-methanise-ses-biodechets-et-roule-plus-vert>. Abruf an: 20.09.2019.

Lesche, F. (2018). Natural Power – Driving The Future: Die alternative Antriebsstrategie – Heute bereits eingesetzt. Präsentation Iveco. Ulm: Okt. 2018.

lngbc.eu (o.J.). Onlinequelle. LNG Blue Corridors - LNG stations in europe. Erreichbar unter: <http://lngbc.eu/>. Abruf am: 30.08.2019.

Mandard, S. (2018). Onlinequelle. Pollution : quinze agglomérations s’engagent à déployer des « zones à faibles émissions ». Erreichbar unter: https://www.lemonde.fr/pollution/article/2018/10/09/pollution-quinze-agglomerations-s-engagent-a-deployer-des-zones-a-faibles-emissions_5366797_1652666.html. Abruf am: 29.08.2019.

Ministère des Solidarités et de la Santé (2018). Onlinequelle. Qualité de l’air : Sources de pollution et effets sur la santé. Erreichbar unter: <https://solidarites-sante.gouv.fr/sante-et-environnement/air-exterieur/qualite-de-l-air-exterieur-10984/article/sources-de-pollution-et-effets-sur-la-sante>. Abruf am: 29.08.2019.

Muzi, N. (2019). Onlinquelle. EU agrees first-ever CO2 targets for trucks, delivering a 30% cut in fuel burnt and kick-starting zero-emission vehicles. Erreichbar unter: <https://www.transportenvironment.org/press/eu-agrees-first-ever-co2-targets-trucks-delivering-30-cut-fuel-burnt-and-kick-starting-zero>. Abruf am: 29.08.2019.

NFV Global (2017). Onlinequelle. Natural gas vehicle knowledge base. Erreichbar unter: www.iangv.org/. Abruf am: 29.08.2019.

NGV Global (2019). Onlinequelle. Current Natural Gas Vehicle Statistics. Erreichbar unter : <http://www.iangv.org/current-ngv-stats/>. Abruf am: 29.08.2019.

NGVA Europe (2018). Onlinequelle. Natural gas infrastructure and outlook towards 2030. Erreichbar unter: <https://www.ngva.eu/medias/natural-gas-infrastructure-and-outlook-towards-2030/>. Abruf am: 29.08.2019.

NGVA Europe (2019). Onlinequelle. Stations Map. Erreichbar unter: <https://www.ngva.eu/stations-map/>. Abruf am: 29.08.2019.

Nicolle, J.M. (2009). Les perspectives du GNV dans le monde, en Europe et en France. Réalités industrielles - Août 2009.

Osorio-Tejada, J. / Llera, E. / Scarpellini, S. (2015). LNG: an alternative fuel for road freight transport in Europe. WIT Press. Sustainable Development, Vol. 1

Paris.fr (o.J.). Onlinequelle. Logistique, marchandises, livraisons. Erreichbar unter : <https://www.paris.fr/pages/logistique-marchandises-livraisons-4738/>. Abruf am: 29.08.2019.

Peters-von Rosenstiel, D. (2014). LNG in Germany: Liquefied Natural Gas and Renewable Methane in Heavy-Duty Road Transport. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Berlin, September 2014

Pfoser, S. et al. (2018). Acceptance of LNG as an alternative fuel: Determinants and policy Implications. Elsevier Ltd. Energy Policy 120 (2018) 259–267

Piek-Cemafröid (o.J.). Onlinequelle. Présentation de la marque. Erreichbar unter : <http://piek.cemafröid.fr/>. Abruf am: 29.08.2019.

Plötz, P. et al. (2018). Alternative Antriebe und Kraftstoffe im Straßengüterverkehr – Handlungsempfehlungen für Deutschland. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Projet Equilibre (2018). Analyse des consommations et émissions de CO₂ et NO_x sur des poids-lourds GNV et Diesel. Avril 2018.

Projet Equilibre (2019) Analyse des consommations et émissions de véhicules Gaz et Diesel. PROJET Equilibre. Livrable final. May 2019.

Romac Fuels (o.J.). Onlinequelle. Romac Fuels – Implantations. Erreichbar unter: <http://www.romacfuels.com/fr/locaties.php>. Abruf am: 29.08.2019.

Shell Deutschland Oil GmbH (2016). Shell Nutzfahrzeug-Studie: Diesel oder alternative Antriebe. Womit fahren Lkw und Bus morgen? Fakten, Trends und Perspektiven bis 2040. Hamburg 2016.

Sia Partners (2014). Onlinequelle. Le GNL comme carburant routier, quel potentiel pour la France ?. Erreichbar unter: <http://www.energie.sia-partners.com/le-gnl-comme-carburant-routier-quel-potentiel-pour-la-france>. Abruf am: 29.08.2019.

Sihvonen, J. (2018). CNG and LNG for vehicles and ships - the facts. Transport&Environment, Bruxelles, Oktober 2018

Simmer, L. / Aschauer, G. / Schauer, O. (2014). LNG (Flüssigerdgas) – Einsatzmöglichkeiten und Potentiale zur Erhöhung der Flexibilität in Österreich und Zentraleuropa. Graz (Austria): 13. Symposium Energieinnovation, -12.-14.2.2014

Smajla, I. et al (2019). Fuel Switch to LNG in Heavy Truck Traffic. MDPI. Basel, 2019. Energies 2019, 12, 515.

SNAM (2018). Global gas report 2018. International Gas Union and Boston consulting Group. June 2018.

Spiegel Online GmbH & Co. KG (2019). Onlinequelle. Interaktiver Abgas-Atlas 2018: In diesen Städten war die Stickoxidbelastung zu hoch. Erreichbar unter: <https://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/stickoxid-grenzwerte-in-diesen-35-staedten-sind-sie-ueberschritten-a-1250872.html>. Abruf am: 29.08.2019.

Stadtklima-Stuttgart.de (2019). Onlinequelle. Anzahl der Überschreitungsstunden von NO₂ > 200 µg/m³. Erreichbar unter: https://www.stadtklima-stuttgart.de/index.php?luft_messdaten_ueberschreitungen#. Abruf am: 29.08.2019.

Stefana, E. et al. (2016). Qualitative risk assessment of a Dual Fuel (LNG-Diesel) system for heavy-duty trucks. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 39 (2016) 39-58.

Toll Collect GmbH (2019). Onlinequelle. Maut-Tarife. Erreichbar unter: https://www.toll-collect.de/de/toll_collect/bezahlen/maut_tarife/maut_tarife.html. Abruf am: 29.08.2019.

- Torregrossa, M. (2015). Onlinequelle. Ikea lance une flotte de camions biométhane à Paris. Erreichbar unter: <https://www.gaz-mobilite.fr/actus/ikea-lance-une-flotte-de-camions-biomethane-a-paris-845.html>. Abruf an: 20.09.2019.
- Torregrossa, M. (2017). Onlinequelle. Véhicules GNV et fiscalité : quelles aides en France en 2017 ? Erreichbar unter: <https://www.gaz-mobilite.fr/actus/aides-fiscalite-vehicules-gnv-2017-france-1503.html>. Abruf am: 29.08.2019.
- Torregrossa, M. (2019). Onlinequelle. Iveco : « en poids-lourds de plus de 16 tonnes, 30 % de nos ventes sont au gaz ». Erreichbar unter : <https://www.gaz-mobilite.fr/actus/iveco-en-poids-lourds-plus-16-tonnes-30-pourcents-ventes-gaz-naturel-gnv-2318.html>. Abruf am: 30.08.2019.
- Transport&Environment (2019) Do gas trucks reduce emissions?. 2019 European Federation for Transport and Environment AISBL
- Umweltbundesamt (2018a). Onlinequelle. Umweltzonen in Deutschland. Erreichbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe/feinstaub/umweltzonen-in-deutschland#textpart-10>. Abruf am: 29.08.2019.
- Umweltbundesamt (2018b). Onlinequelle. Feinstaub-Belastung. Erreichbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/feinstaub-belastung#textpart-1>. Abruf am: 29.08.2019.
- Umwelt-Plakette.de (o.J.). Onlinequelle. Umweltplakette – Klassifizierung. Erreichbar unter: www.umwelt-plakette.de/de/info-zur-deutschen-umwelt-plakette/die-deutsche-umwelt-plakette/wer-bekommt-die-deutsche-umwelt-plakette.html. Abruf am: 29.08.2019.
- Van Basshuysen, R. (2015). Erdgas und erneuerbares Methan für den Fahrzeugantrieb in H. List: Der Fahrzeugantrieb (Hrsg.). Spring. Graz : Springer Vieweg.
- Verband der Automobilindustrie e.V. (o.J.). Onlinequelle. Abgasemissionen. Erreichbar unter: <https://www.vda.de/de/themen/umwelt-und-klima/abgasemissionen/abgasgesetzgebung-europa.html>. Abruf am: 29.08.2019.
- Vermeulen, R.J. (2019). TNO 2019 R10193 - Emissions testing of a Euro VI LNG-diesel dual fuel truck in the Netherlands. TNO.
- V-gas.fr (2019). Onlinequelle. Nos stations. Erreichbar unter: <https://www.v-gas.fr/nos-stations/>. Abruf an: 03.09.2019
- WHO European Centre for Environment and Health (2011). Burden of disease from environmental noise. World Health Organization.
- Zunder, T. H. / Ibanez J. N. (2004). Urban freight logistics in the European Union. European Transport \ Trasporti Europei n. 28 (2004): 77-84.
- .

ANHANG A: Bilder Fahrzeuge SAMAT Toulouse

Abbildung 1: LNG-Fahrzeuge der SAMAT Toulouse (Quelle: eigene Aufnahme)



Abbildung 2: LNG-Tank (540L) von IVECO Fahrzeug (Quelle: eigene Aufnahme)



ANHANG B: Bilder Intermarché Villeneuve-les-Béziers

*Abbildung 3: Besichtigung der Vertriebszentrale von Intermarché in Béziers
(Quelle: eigene Aufnahme)*



Abbildung 4: Ladezone Intermarché in Beziers 1 (Quelle: eigene Aufnahme)



Abbildung 5: Ladezone Intermarché Béziers 2 (Quelle: Nicolas Posédero)



ANHANG C: Excel Tabellen

Analyse der Machbarkeit für die Strecke (Kirkel bis Madrid) bezüglich LNG-Tankstellen

Adressen:

	Unternehmen	Stadt	Adresse	Land	Umweg (km)
1	J.S.Logistics	66449 Kirkel	Am Tannenwald	Deutschland	
2	Air Liquide LNG	54710 Fléville-devant-Nancy	Rue Jean Prouvé - ZI Fleville Sud	Frankreich	21 km
3	AVIA L-CNG	87000 Limoges	Aire de Beaune Les Mines	Frankreich	0 km
4	Naturgy LNG	01230 Nanclares de la Oca	Tratado de Paris Kalea, 6	Spanien	1 km
5	Kunde	28022 Madrid	Av. de Aragón, 402	Spanien	
					22 km

Hypothesen:

- Reichweite: 900 km (Daten von J.S.Logistics) und 243 kg (weil Verbrauch von 27km/100km).
- Verbrauch von 27kg pro km (Durchschnitt von aktuelle J.S.Logistics Strecken).
- Hin und zurück wird die Strecke dieselbe sein, da wir noch nicht wissen wo die Rückladung stattfinden wird.
- Wir werden zwei möglichen Szenarien analysieren:
 - (1) Das LNG-Fahrzeug ist für diese Strecke dediziert (ausschließlich für die Strecke benutzt).
 - (2) Das LNG-Fahrzeug macht verschiedene Strecken und das Fahrzeug muss nach der Ankunft in Kirkel, ohne zusätzliche Betankung Ulm erreichen können.

Ergebnisse Rundfahrt

	LNG	Diesel	Unterschied
Kilometer (Hinweg)	1727	1705	22
Kilometer (Rückweg)	1720	1700	20
Total Kilometer	3447	3405	42

Fahrzeit (Hinweg) in Stunden	24:17	23:36	1:03
Fahrzeit (Rückweg) in Stunden	24:17	23:38	1:03
Dauer Betankungen* in Stunden	02:00	0:15	1:45
Total Dauer (Stunden)	50:34	47:14	3:20

*Dauer Betankung: 20min für LNG und 15min für Diesel

SZENARIO 1 : Rundfahrt von Kirkel bis Madrid

Abfahrt	Km	Ankunft	Km	Distanz	Reichweite am Abfahrt (km)	Reichweite am Ankunft (km)	Reichweite am Abfahrt (kg)	Reichweite am Ankunft (kg)
J.S.L (Kirkel)	0	Air Liquide (Nancy)	169	169	721	552	195	149
Air Liquide (Nancy)	169	AVIA (Limoges)	806	637	900	263	243	71
AVIA (Limoges)	806	Naturgy (Nanclares)	1380	574	900	326	243	88
Naturgy (Nanclares)	1361	Kunde (Madrid)	1727	366	900	534	243	144
Kunde (Madrid)	0	Naturgy (Nanclares)	343	343	534	191	144	52
Naturgy (Nanclares)	343	AVIA (Limoges)	917	574	900	326	243	88
AVIA (Limoges)	917	Air Liquide (Nancy)	1540	623	900	277	243	75
Air Liquide (Nancy)	1540	J.S.L (Kirkel)	1720	179	900	721	243	195

SZENARIO 2 : Testfahrt von Kirkel bis Madrid

Abfahrt	Km	Ankunft	Km	Distanz	Reichweite am Abfahrt (km)	Reichweite am Ankunft (km)	Reichweite am Abfahrt (kg)	Reichweite am Ankunft (kg)
J.S.L (Kirkel)	0	Air Liquide (Nancy)	169	169	?	-169	?	-46
Air Liquide (Nancy)	169	AVIA (Limoges)	806	637	900	263	243	71
AVIA (Limoges)	806	Naturgy (Nanclares)	1380	574	900	326	243	88
Naturgy (Nanclares)	1361	Kunde (Madrid)	1727	366	900	534	243	144
Kunde (Madrid)	0	Naturgy (Nanclares)	343	343	534	191	144	52
Naturgy (Nanclares)	343	AVIA (Limoges)	917	574	900	326	243	88
AVIA (Limoges)	917	Air Liquide (Nancy)	1540	623	900	277	243	75
Air Liquide (Nancy)	1540	J.S.L (Kirkel)	1720	179	900	721	243	195
J.S.L (Kirkel)	1723	Iveco (Ulm)	2004	281	721	440	195	119

Analyse der Kosten zwischen LNG und Diesel für die Strecke Kirkel-Madrid (Hinweg)

	LNG	DIESEL	Vergleich
Fahrzeugkosten	271,86 €	194,43 €	39,8%
Kraftstoffkosten	368,73 €	473,53 €	-22,1%
Mautkosten	163,71 €	175,34 €	-6,6%
TOTAL	804,31 €	843,30 €	-4,6%

FAHRZEUG	LNG	DIESEL
Fahrzeug kosten (monat)	1 648,33 €	1 144,44 €
Fahrzeug kosten (pro km)	0,12 €	0,08 €
Fahrzeug kosten (pro Fahrt)	206,47 €	143,27 €
Wartungsverträge /km	0,04 €	0,03 €
Wartungsverträge (pro Fahrt)	65,39 €	51,15 €
Total Fahrzeug	271,86 €	194,43 €

KRAFTSTOFF	LNG	DIESEL		
	Betankung (km)	Betankung (kg)	Strecke (km)	Betankung (km)
Kirkel				
Airliquide (Nancy)	348	90,25 €		
Aria (Limoges)	637	173,44 €		
Naturgy (Nanclares)	574	105,04 €		
Madrid (Diesel Station)			1705	473,53 €
Madrid				

Total Strecke 368,73 € 473,53 €

MAUT	LNG	DIESEL		
	Maut Sektion (km)	Maut Kosten (Netto)	Maut Sektion (km)	Maut Kosten (Netto)
Deutschland	25,5	0	25,5	5,05
Frankreich	417,07	128,09	427,46	134,67
Spanien	196,36	35,62	196,36	35,62
Total Strecke (km)	638,93		649,32	
Total Maut		163,71 €		175,34 €

Analyse der Kosten zwischen LNG und Diesel für die Strecke Kirkel-Madrid (Rückweg)

	LNG	DIESEL	VERGLEICH
Fahrzeugkosten	270,73 €	193,83 €	40%
Kraftstoffkosten	447,52 €	472,14 €	-5%
Mautkosten	165,73 €	177,36 €	-7%
TOTAL	883,98 €	843,34 €	5%

FAHRZEUG	LNG	DIESEL
Fahrzeugkosten (monat)	1 648,33 €	1 144,44 €
Fahrzeugkosten (pro km)	0,12 €	0,08 €
Fahrzeugkosten (pro Fahrt)	205,61 €	142,83 €
Wartungsvertrag (pro km)	0,04 €	0,03 €
Wartungsvertrag (pro Fahrt)	65,12 €	51,00 €
Total Fahrzeug	270,73 €	193,83 €

KRAFTSTOFF	LNG		DIESEL	
	Betankung (km)	Betankung (kg)	Betankung (km)	Betankung (l)
Madrid				
Madrid (Diesel Station)			1700	472,14 €
Naturgy (Nanclares)	709	129,79 €		
Aria (Limoges)	574	156,25 €		
Airliquide (Nancy)	623	161,48 €		
Kirkel				
Total Strecke (km)		447,52 €		472,14 €

MAUT	LNG		DIESEL	
	Maut Sektion (km)	Maut Kosten (Netto)	Maut Sektion (km)	Maut Kosten (Netto)
Spanien	196,01	37,64 €	196,36	37,64 €
Frankreich	415,54	128,09 €	426,34	134,67 €
Deutschland	25,5	0 €	25,5	5,05 €
Total Strecke (km)	637,05		648,2	
Total Maut		165,73 €		177,36 €

Analyse der Kosten zwischen LNG und Diesel (Kirkel>Schongau):

2Fahrzeuge/2Fahrer

Information Strecke		
	GNL	DIESEL
Wegstrecke pro Fahrzeug (km)	432	
Mautstrecke pro Fahrzeug (km)	422	
Fahrt pro Monat (Tage)	20	
Fahrzeugskosten		
	GNL	DIESEL
Anschaffungskosten Sattelzug	277 800 €	181 000 €
Subvention	24 000 €	- €
Restwert	56 000 €	98 600 €
Laufzeit in Monaten	60	36
Total Sattelzug (monatlich)	3 296,67 €	2 288,89 €
Total Trailer (monatlich)	1 300,00 €	1 300,00 €
Total Fahrzeug (monatlich)	4 596,67 €	3 588,89 €
Wartungskosten		
	GNL	DIESEL
Wartungsvertrag (monatlich)	909 €	720 €
Reifen (monatlich)	346 €	346 €
Total Wartungskosten (monatlich)	1 254 €	1 066 €
Kraftstoffkosten		
	GNL	DIESEL
Treibstoffverbrauch 100 km (kg;l)	27	28
Preis Diesel (Netto)		1,05 €
Preis GNL (Netto)	0,7 €	
Total Kraftstoffkosten (monatlich)	3 266 €	5 080 €
Mautkosten		
	GNL	DIESEL
Mautkosten (€ pro km)	- €	0,187 €
Total Mautkosten (monatlich)	- €	3 156,56 €
Personalkosten		
	GNL	DIESEL
Personalkosten (monatlich)	7 600 €	7 600 €
Verwaltungskosten		
	GNL	DIESEL
Verwaltungskosten (monatlich)	2 400 €	2 400 €
TOTAL (monatlich)	19 116,97 €	22 891,37 €
Unterschied (monatlich)	-3 774,40 €	
TOTAL (jährlich)	229 404 €	274 696 €
Unterschied (jährlich)	-45 292,83 €	

1Fahrzeuge/2Fahrer

GNL	DIESEL
864	
844	
20	
GNL	DIESEL
138 900 €	90 500 €
12 000 €	- €
28 000 €	49 300 €
60	36
1 648,33 €	1 144,44 €
650,00 €	650,00 €
2 298,33 €	1 794,44 €
GNL	DIESEL
454 €	360 €
346 €	346 €
800 €	706 €
GNL	DIESEL
27	28
	1,05 €
0,7 €	
3 266 €	5 080 €
GNL	DIESEL
- €	0,187 €
- €	3 156,56 €
GNL	DIESEL
7 600 €	7 600 €
GNL	DIESEL
1 200 €	1 200 €
15 164,24 €	19 536,92 €
-4 372,68 €	
181 971 €	234 443 €
-52 472,17 €	

Analyse der Straßentypologie für die Strecke Kirel-Madrid:

HINWEG

City Road	2,67
Country Road	14,31
Highway	512,45
Motorway	1165,1
Residential road	7,3
Trunk Road	25,03
TOTAL	1726,86

Autobahn	1677,55
Landestrassse	14,31
Schnellstrasse	25,03
Ballungsraum	7,3
Dichte Stadtgebiete	2,67
TOTAL	1726,86

LNG-STRECKE

DIESEL-STRECKE

	HINWEG	RÜCKWEG	HINWEG	RÜCKWEG
City Road	2,67	2,67	6,28	6,28
Country Road	14,31	16,59	9,28	11,94
Highway	512,45	513,09	512,11	511,92
Motorway	1165,1	1153,3	1176,49	1168,82
Residential road	7,3	7,3	0,9	0,9
Trunk Road	25,03	26,75	0	0
TOTAL	1726,86	1719,7	1705,06	1699,86

Autobahn	1677,55	1666,39	1688,6	1680,74
Landestrassse	14,31	16,59	9,28	11,94
Schnellstrasse	25,03	26,75	0	0
Ballungsraum	7,3	7,3	0,9	0,9
Dichte Stadtgebiete	2,67	2,67	6,28	6,28
TOTAL	1726,86	1719,7	1705,06	1699,86

HINWEG

City Road	2,67
Country Road	14,31
Highway	512,45
Motorway	1165,1
Residential road	7,3

Trunk Road	25,03
TOTAL	1726,86

Autobahn	1677,55
Landestrasse	14,31
Schnellstrasse	25,03
Ballungsraum	7,3
Dichte Stadtgebiete	2,67
TOTAL	1726,86

Analyse der Emissionen (CO2 und NOx) – mit CO2 Daten von J.S.L.:

		LNG	Diesel
Verbrauch (kg oder L /100km)	Autobahn	25,8	26,4
	Landestrasse	31,5	34,7
	Schnellstrasse	21,0	24,6
	Ballungsraum	34,5	37,2
	Dichte Stadtgebiete	37,2	43,1
CO2 Emissionen (kg/100km)	Autobahn	72	70
	Landestrasse	88	92
	Schnellstrasse	59	65
	Ballungsraum	97	99
	Dichte Stadtgebiete	104	114
Nox (g/100km)	Autobahn	17	39
	Landestrasse	40	98
	Schnellstrasse	15	37
	Ballungsraum	48	133
	Dichte Stadtgebiete	106	175

HINWEG	LNG			Diesel		
	<i>Kilometer</i>	<i>CO2</i>	<i>NoX</i>	<i>Kilometer</i>	<i>CO2</i>	<i>NoX</i>
Autobahn	1677,6	1211,9	285,2	1688,6	1181,3	658,6
Landestrasse	14,3	12,6	5,7	9,28	8,5	9,1
Schnellstrasse	25,0	14,7	3,8	0	0,0	0,0
Ballungsraum	7,3	7,1	3,5	0,9	0,9	1,2
Dichte Stadtgebiete	2,7	2,8	2,8	6,28	7,2	11,0
TOTAL	1726,9	1249,0	301,0	1705,1	1197,9	679,8

RUCKWEG	LNG			Diesel		
	<i>Kilometer</i>	<i>CO2</i>	<i>NoX</i>	<i>Kilometer</i>	<i>CO2</i>	<i>NoX</i>
Autobahn	1666,4	1203,8	283,3	1680,74	1175,8	655,5
Landestrasse	16,6	14,6	6,6	11,94	11,0	11,7
Schnellstrasse	26,8	15,7	4,0	0	0,0	0,0
Ballungsraum	7,3	7,1	3,5	0,9	0,9	1,2
Dichte Stadtgebiete	2,7	2,8	2,8	6,28	7,2	11,0
TOTAL	1719,7	1244,0	300,3	1699,9	1194,9	679,4

HIN UND ZURUCK

		LNG	Diesel	Vergleich
	CO2 (kg)	2493	2393	4%
	Nox (kg)	601	1359	-56%

Analyse der Emissionen (CO2 und NOx) – mit CO2 Daten von Projet Equilibre:

		LNG	Diesel
Verbrauch (kg oder L /100km)	Autobahn	25,8	26,4
	Landestrasse	31,5	34,7
	Schnellstrasse	21,0	24,6
	Ballungsraum	34,5	37,2
	Dichte Stadtgebiete	37,2	43,1
CO2 Emissionen (kg/100km)	Autobahn	71	71
	Landestrasse	87	94
	Schnellstrasse	58	66
	Ballungsraum	95	100
	Dichte Stadtgebiete	102	116
Nox (g/100km)	Autobahn	17	39
	Landestrasse	40	98
	Schnellstrasse	15	37
	Ballungsraum	48	133
	Dichte Stadtgebiete	106	175

HINWEG	LNG			Diesel		
	Kilometer	CO2	NoX	Kilometer	CO2	NoX
Autobahn	1677,6	1190,2	285,2	1688,6	1203,6	658,6
Landestrasse	14,3	12,4	5,7	9,28	8,7	9,1
Schnellstrasse	25,0	14,5	3,8	0	0,0	0,0
Ballungsraum	7,3	6,9	3,5	0,9	0,9	1,2
Dichte Stadtgebiete	2,7	2,7	2,8	6,28	7,3	11,0
TOTAL	1726,9	1226,7	301,0	1705,06	1220,5	679,8

RUCKWEG	LNG			Diesel		
	Kilometer	CO2	NoX	Kilometer	CO2	NoX
Autobahn	1666,4	1182,3	283,3	1680,74	1198,0	655,5
Landestrasse	16,6	14,4	6,6	11,94	11,2	11,7
Schnellstrasse	26,8	15,4	4,0	0	0,0	0,0
Ballungsraum	7,3	6,9	3,5	0,9	0,9	1,2
Dichte Stadtgebiete	2,7	2,7	2,8	6,28	7,3	11,0
TOTAL	1719,7	1221,8	300,3	1699,86	1217,4	679,4

HIN UND ZURÜCK

	LNG	Diesel	Vergleich
--	-----	--------	-----------

	CO2 (kg)	2449	2438	0,4%
	Nox (kg)	601	1359	-56%

Analyse von J.S.Logistics Smart Reports:

LNG Fahrzeuge

Smart Report	Kennzeichen	Verbrauch	CO2	Verbrauch pro km	CO2 für 1kg verbrauch
		<i>Kg/100 Km</i>	<i>g/km</i>	<i>L/km</i>	<i>kg</i>
Woche 16/2019	HOM-JS 603	27,80	778,27	0,278	2,7995
Woche 16/2019	HOM-JS 602	26,90	753,26	0,269	2,8002
Monat 8/2019	HOM-JS 603	25,62	717,40	0,2562	2,8002
Monat 8/2019	HOM-JS 602	25,83	723,10	0,2583	2,7995
				Durschnitt:	2,80

Diesel Fahrzeuge

Smart Report	Kennzeichen	Verbrauch	CO2	Verbrauch pro km	CO2 für 1L verbrauch
		<i>L/100 Km</i>	<i>g/km</i>	<i>L/km</i>	<i>kg</i>
Woche 16/2019	HOM-JS 591	28,58	757,40	0,286	2,6501
Woche 16/2019	HOM-JS 594	26,74	708,56	0,267	2,6498
Woche 16/2019	HOM-JS 593	30,39	805,37	0,304	2,6501
Woche 16/2019	HOM-JS 595	27,28	722,84	0,273	2,6497
Woche 16/2019	HOM-JS 599	23,21	615,04	0,232	2,6499
Woche 16/2019	HOM-JS 590	28,12	745,05	0,281	2,6495
Woche 16/2019	HOM-JS 597	26,24	695,40	0,262	2,6502
Monat 8/2019	HOM-JS 597	24,12	639,10	0,241	2,6497
Monat 8/2019	HOM-JS 595	26,52	702,7	0,265	2,6497
Monat 8/2019	HOM-JS 599	27,44	727,1	0,274	2,6498

Monat 8/2019	HOM-JS 590	28,63	758,7	0,286	2,6500	
Monat 8/2019	HOM-JS 594	29,95	793,8	0,300	2,6504	
Monat 8/2019	HOM-JS 591	30,2	800,4	0,302	2,6503	
Monat 8/2019	HOM-JS 598	31,03	822,3	0,310	2,6500	
Monat 8/2019	HOM-JS 593	31,75	841,5	0,3175	2,6504	
					Durschnitt:	2,65

ERKLÄRUNG

Ich versichere, dass ich die Master-Thesis selbstständig verfasst habe und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt wurden. Diese Arbeit oder eine Arbeit mit gleichem oder ähnlichem Thema wurde nicht bereits an anderer Stelle vorgelegt.

Die/der betreuende Dozentin/Dozent erhält die Arbeit zusätzlich in einer elektronischen Form, die eine Plagiatüberprüfung ermöglicht. Ich bin damit einverstanden, dass die Arbeit mit Plagiarismus-Software überprüft wird. Ich weiß, dass bei der Überprüfung die Arbeit möglicherweise der Plagiarismus-Software hinzugefügt wird.

Saarbrücken, den 27.09.2019

in Montferrier-sur-lez (Frankreich)