



# Technische Universität Wien

## DIPLOMARBEIT

### **Evaluierung des möglichen CO<sub>2</sub>-Einsparpotentials bei gleichzeitiger Optimierung von motor- und kraftstoffseitigen Maßnahmen bei Ottomotoren**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-  
Ingenieurs unter der Leitung von

**Univ. Prof. Dr. techn. Bernhard Geringer**

**und**

**Dr. Josef Graf**

**E315**

**Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik**

eingereicht an der Technischen Universität Wien

**Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften**

von

**Krisztián Gacsai**

**1229541**

**Schäffergasse 2, 1040 Wien**



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN  
Vienna University of Technology



Institut für Fahrzeugantriebe  
& Automobiltechnik

**Institut für Fahrzeugantriebe  
und Automobiltechnik**  
Getreidemarkt 9  
A-1060 Wien  
<http://www.ifa.tuwien.ac.at>

**Univ.-Prof. Dr. Dipl.-Ing.  
Bernhard GERINGER**  
Institutsvorstand  
Tel: +43-1/ 58801-31500  
Fax: +43-1/ 58801-31599  
[bernhard.geringer@tuwien.ac.at](mailto:bernhard.geringer@tuwien.ac.at)

Wien, 27.04.2015

## Diplomaufgabe

Herrn Krisztian GACSAI, Matr. Nr.. 1229541 wird folgende Diplomaufgabe gestellt:

“Evaluierung des möglichen CO<sub>2</sub>-Einsparpotenziales bei  
gleichzeitiger Optimierung von motor- und kraftstoffseitigen  
Maßnahmen“

### Präambel zum Inhalt der Diplomarbeit:

Vor dem Hintergrund der Klimaerwärmung und der damit einhergehenden schrittweisen Absenkung von Emissionsgrenzwerten durch die Gesetzgebung liegt der **Fokus** sowohl von Motorentwicklern als auch von Kraftstoffanbietern gleichermaßen in der **Reduktion von CO<sub>2</sub>** - Emissionen. Anders als bei den Schadstoffkomponenten (CO, HC, NO<sub>x</sub> und Partikel) muss eine derartige Reduktion entweder über eine Steigerung der Effizienz und somit einer Verringerung des Kraftstoffverbrauchs oder über alternative Kraftstoffe mit günstigerem C/H-Verhältnis realisiert werden.

In zahlreichen Veröffentlichungen werden CO<sub>2</sub> Reduktionspotenziale durch unterschiedlichste **motorische Maßnahmen** aufgezeigt. Dies sind etwa Ultra-Downsizing mit extremen Aufladegraden, Hybridisierung, Optimierung von Reibmitteldruck und Komponentengewicht sowie die Entkoppelung von Kompression und Expansion mittels Atkinson Arbeitsweise, um hier nur einige zu nennen.

**Kraftstoffseitig** werden diese Potenziale durch die Verwendung von nachhaltig produzierbaren Komponenten wie etwa **Alkoholen** unter optimaler Ausnutzung der spezifischen Eigenschaften wie in diesem Fall einer hoher **Oktanzahl**, einer **hohen Verdampfungsenthalpie** und **verbesserten Schmiereigenschaften** unterstützt.

Im Rahmen der aufgegebenen Diplomarbeit ist eine **umfangreiche Literaturrecherche** zur strukturierten Erfassung von **motorischen und kraftstoffseitigen CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenzialen** durch unterschiedlichste Maßnahmen und Ansätze durchzuführen. Aufgrund der oftmals stark unterschiedlichen Randbedingungen, unter welchen Motorergebnisse erzielt werden, ist die Literatur kritisch zu betrachten (insbesondere die jeweiligen Randbedingungen). Der Schwerpunkt der Recherche liegt dabei auf der Darstellung kombinierter motorischer und kraftstoffseitiger Potenziale, wobei kraftstoffseitig nur flüssige Kraftstoffe (also nicht Methangas oder Wasserstoff) zu berücksichtigen sind.

Neben der Erhebung der Potenziale für die Anwendung soll auch der Kostenfaktor und das sogenannte Life-Cycle-CO<sub>2</sub> der mobilen Gesamtlösung in allgemeiner Form mit bewertet werden.

**Ziel ist die Evaluierung des maximal möglichen CO<sub>2</sub>-Einsparungspotenziales bei gleichzeitiger Optimierung von motor- und kraftstoffseitigen Maßnahmen.**

Nach erarbeiteter Basis an möglichen kombinierten Maßnahmen soll diejenige Methode zur finalen Ausarbeitung kommen, welche in mit dem Betreuer das größte CO<sub>2</sub>-Einsparungspotenzial aufzeigt.

Im Einzelnen sind folgende Punkte zu bearbeiten:

- Umfangreiche Literaturrecherche zur Evaluierung der motor- und kraftstoffseitigen Verbrauchsverbesserungspotenziale mit Fokus auf Alkohole und Ottomotoren
- Kritische Evaluierung der gefundenen Literaturstellen mit Schwerpunkt der kombinierten Verbesserungspotenziale bei Motor und Kraftstoff
- Einfache Kostenbewertung der unterschiedlichen Kraftstoffmöglichkeiten im Vergleich zu fossilen Kraftstoff
- Life Cycle Betrachtung für CO<sub>2</sub> der alternativen Kraftstoff- und Motorkette im Vergleich zur fossilen Basis.
- Detailauswertung des Lösungsweges mit größtem CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial

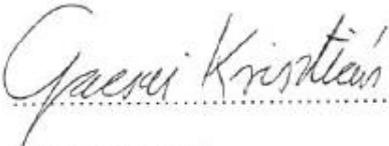
Ein gebundenes Exemplar und eine Version der Diplomarbeit auf Datenträger sind am Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik der Technischen Universität Wien abzugeben.

Dauer: März 2015 – September 2015

Die Ergebnisse der Arbeit sind vertraulich zu behandeln und dürfen nur mit schriftlicher Genehmigung des Institutsvorstandes weitergegeben bzw. veröffentlicht werden.

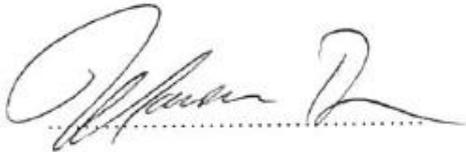
Die Benutzung der Versuchseinrichtungen des Institutes hat in den Dienststunden und unter Anleitung des Betreuers zu erfolgen. Dabei dürfen alle Arbeiten nur unter besonderer Beachtung der geltenden Sicherheitsvorschriften durchgeführt werden.

Einverstanden:



Krisztian Gacsai

Betreuer:



Prof. Dr. Peter Hofmann



Prof. Dr. Bernhard Geringer  
Institutsvorstand

## Eidesstattliche Erklärung

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

### **Evaluierung des möglichen CO<sub>2</sub>-Einsparpotentials bei gleichzeitiger Optimierung von motor- und kraftstoffseitigen Maßnahmen**

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin. Ich erkläre weiters an Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Arbeiten selbständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin/ einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, am 14.02.2015

---

Name

## Kurzfassung

Heutzutage beschäftigen sich weltweit sowohl die Motorkonstrukteure, als auch die Kraftstoffhersteller mit der Verringerung des Kraftstoffverbrauches und die damit einhergehenden Treibhausgasemissionen, die während des Verbrennungsprozesses entstehen. Im Gegensatz zu den gesetzlich eingeschränkten Schadstoffen wie HC, CO, NO<sub>x</sub> sowie PM, die mit Hilfe von entsprechenden Abgasnachbehandlungs- und Motormanagementsystemen erfolgreich limitiert werden können, ist die notwendige Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen mit Hilfe von diesen Maßnahmen nicht machbar. Dies hat zur Folge, dass die Suche nach optimierten Verbrennungskraftmaschinen und alternativen Energieträgern zurzeit im Fokus der Fahrzeugentwicklung steht.

Motorseitige Maßnahmen wie unter anderem Downsizing mit Aufladung sowie der Magerbetrieb bieten sich als angemessene Lösungen, um den CO<sub>2</sub>-Ausstoß insbesondere im Stadtverkehr zu reduzieren. Zusätzlich können ein variables Verdichtungsverhältnis und die Miller- oder Atkinson-Zyklen einen wesentlichen Beitrag zur Erfüllung der strengen Zielwerte leisten. Auf der anderen Seite führt der Ersatz von herkömmlichem Benzin durch vielversprechende gasförmige oder flüssige Treibstoffoptionen zu weiteren Einsparpotentiale an Fremdzündungsmotoren. Aufgrund der erhöhten Klopfestigkeit sowie verbesserten Verdampfungseigenschaften von bestimmten alternativen Kraftstoffen, lassen sich die Treibhausgasemissionen signifikant mildern.

Obwohl die oben aufgeführten einzelnen Alternativen zur Absenkung der CO<sub>2</sub> Emissionen dienen, verspricht die kombinierte Applikation von diversen motor- und kraftstoffseitigen Maßnahmen weitere erhebliche Verbesserungspotentiale. Zukunftsträchtige Kombinationen bei Motor und Kraftstoff können den CO<sub>2</sub>-Ausstoß während des Fahrzeugbetriebs um sogar 40-50 [%] im Vergleich zu konventionellen Benzin-Saugmotoren reduzieren.

Neben den erzielbaren Einsparpotentialen von verschiedenen Kraftstoffoptionen spielen bei der Evaluierung der Endergebnisse der Preis an der Zapfsäule sowie die Ökobilanz über den gesamten Lebensweg eine entscheidende Rolle. Aus diesem Grund müssen solche Faktoren auch betrachtet werden, um eine angemessene Aussage für oder gegen die einzelnen Maßnahmen treffen zu können.

## Abstract

Both engine developers and fuel producers are focussing nowadays on the reduction of the fuel consumption and the greenhouse gas emissions, which are created during the combustion process. The decrease of the law restricted harmful substances like HC, CO, NO<sub>x</sub> and PM is feasible with corresponding exhaust gas after treatment technologies and engine management strategies. In contrast to these measures the required alleviation of the CO<sub>2</sub> emissions with the help of these solutions is not always possible. It results, that the search for optimized combustion engines and alternative energy sources is in the focus of the vehicle development.

On the one hand engine measures like downsizing in combination with turbocharging as well as lean combustion offer the opportunity to lower the CO<sub>2</sub> emissions especially in the urban transport. A variable compression ratio and the Miller- or Atkinson-cycles can make a considerably contribution additionally to fulfil the strictly target values. On the other hand the replacement of conventional gasoline with promising gaseous or liquid fuel options leads to further savings potential of spark ignition engines. Due to the increased knock resistance as well as improved vaporization properties of certain alternative fuels, the greenhouse gas emissions can be mitigated.

Although the above mentioned single alternatives to reduction of the CO<sub>2</sub> emissions serve, the combined use of different engine and fuel measures promises additional improvement potential. Through the simultaneously application of various combination, the greenhouse gas emissions can be decreased by 40-50 [%] in compare to traditionally naturally aspirated gasoline engines.

Besides the achievable savings potential of different fuel options the price at the filling station and the life cycle assessment can play an important role during the evaluation of the final results. For this reason, such factors have to take into account in order to make an appropriate statement for or against the single measures.

## Inhaltsverzeichnis

1. Ermittlung des CO <sub>2</sub> -Ausstoßes von Ottomotoren sowie neue Prüfbedingungen in der Automobilindustrie .....	1
2. Motorseitige CO <sub>2</sub> - Einsparpotentiale an Ottomotoren .....	3
2.1. Downsizing mit Aufladung .....	4
2.2. Zylinderdeaktivierung .....	5
2.3. Strahlgeführtes Magerbrennverfahren .....	7
2.4. Variables Verdichtungsverhältnis .....	8
2.5. Verlängerte Expansion durch die Verwendung von Miller- oder Atkinson-Zyklus .....	10
2.6. Externe gekühlte Abgasrückführung .....	12
2.7. Reduzierung der Motor-Reibungsverluste .....	13
2.8. Thermomanagement .....	14
2.9. Zusammenfassung der Auswirkungen von motorseitigen Maßnahmen auf den CO <sub>2</sub> -Ausstoß .....	14
3. Kraftstoffseitige CO <sub>2</sub> - Einsparpotentiale an Ottomotoren .....	17
3.1. Klopffestigkeit .....	19
3.2. Verhältnis Wasserstoff/Kohlenstoff (H/C) .....	20
3.3. Verdampfungswärme .....	21
3.4. Zündgrenzen .....	23
3.5. Zusammenfassung der Auswirkungen von kraftstoffseitigen Maßnahmen auf den CO <sub>2</sub> -Ausstoß .....	24
4. Kombinierte Verbesserungspotentiale bei Motor und Kraftstoff .....	25
4.1. Effekte von Ethanolkraftstoffen auf den Fahrzeugbetrieb .....	25
4.2. Einfluss von Erdgas auf den Fahrzeugbetrieb .....	32
4.3. Verbesserungen durch die Verwendung von Flüssiggas im Fahrzeugbetrieb .....	37
4.4. Evaluierung der kombinierten Maßnahmen an Ottomotoren .....	39
5. Kostenbewertung der unterschiedlichen Kraftstoffmöglichkeiten im Vergleich zum fossilen Kraftstoff .....	42
5.1. Ermittlung der Preise von Ethanol an der Tankstelle .....	42
5.2. Produktionskosten von Butanol .....	45
5.3. Herstellungskosten von Methanol .....	46
5.4. Erzeugungskosten von Erdgas .....	47
5.5. Gestehungskosten von Flüssiggas (LPG) .....	49
5.6. Zusammenfassung der Ergebnisse bezüglich der Erzeugungskosten von verschiedenen Treibstoffen .....	50
6. Life Cycle Betrachtung für CO <sub>2</sub> der alternativen Kraftstoff- und Motorkette im Vergleich zur fossilen Basis .....	53

6.1. Ökobilanz – Benzin.....	55
6.2. Ökobilanz – Erdgas und Biogas.....	56
6.3. Ökobilanz – Autogas.....	58
6.4. Ökobilanz – Ethanol.....	58
6.5. Ökobilanz – Methanol .....	59
6.6. Ökobilanz – Butanol.....	61
6.7. Zusammenfassung der Lebenszyklusanalysen von untersuchten Kraftstoffen für Ottomotoren.....	61
7. Auswertung des Lösungsweges mit größtem CO <sub>2</sub> -Einsparpotential .....	63
7.1. Eigene Empfehlungen .....	69
8. Zusammenfassung und Ausblick .....	71
9. Literatur- und Quellenverzeichnis .....	75

## 1. Ermittlung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes von Ottomotoren sowie neue Prüfbedingungen in der Automobilindustrie

Die Suche nach neuartigen Lösungen in der Automobilindustrie, um den Kraftstoffverbrauch und die daraus ergebenden CO<sub>2</sub>-Emissionen verringern zu können, spielt derzeit eine wichtige Rolle. Vor dem Hintergrund dieses Strebens liegt einerseits die Knappheit an fossilen Erdölvorräten, andererseits die durch die Gesetzgebung vorgeschriebene Absenkung der Treibhausgasemissionen. Um diese Anforderungen gerecht zu werden, stehen sowohl die verschiedenen motorischen, als auch kraftstoffseitigen Maßnahmen im Fokus der Fahrzeugentwicklung.

Der CO<sub>2</sub>-Ausstoß von Kraftfahrzeugen ist in der heutigen Welt ein bekanntes Merkmal, womit die Umweltfreundlichkeit sowie die Effizienz des Antriebstranges bewertet werden kann. Die Menge an emittiertem Kohlenstoffdioxid in Gramm pro Kilometer hängt mit dem Kraftstoffverbrauch zusammen. Mit ansteigendem Verbrauch nehmen die Emissionen zu und umgekehrt. Die Bestimmung des genauen CO<sub>2</sub>-Ausstoßes ergibt sich aus dem Verbrauch durch Multiplikation mit den entsprechenden Koeffizienten. In Tabelle 1 sind die erzeugten CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Liter verbrannter Kraftstoff angegeben.

<b>Treibstoff</b>	<b>produzierter CO<sub>2</sub>-Ausstoß [kg] pro Liter verbrannter Treibstoff</b>
Benzin	2,35
Superkraftstoff [E5]	2,3
Superbenzin [E10]	2,25
Ethanol	1,52

**Tabelle 1:** erzeugte CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Liter verbrannter Kraftstoff [1, 2]

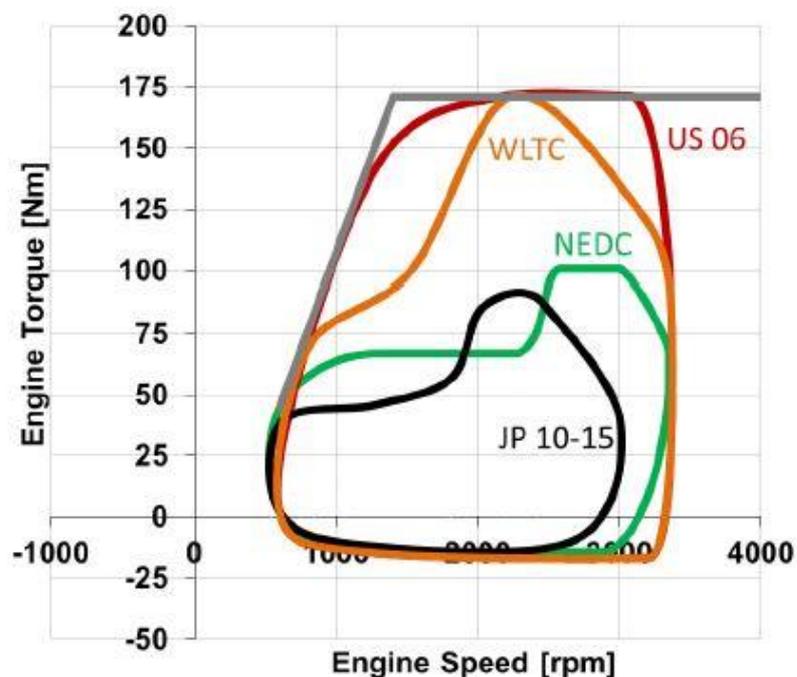
Der Zusammenhang zwischen Kraftstoffverbrauch [l/km] und CO<sub>2</sub>-Ausstoß [g/km] ist wie bereits erwähnt, ein einfacher mathematischer Schritt. Bei normalem Benzin erhalten wir die tatsächlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen in Gramm pro Kilometer durch Multiplikation des Verbrauches pro 100 Kilometer mit einem Faktor, der von der Kraftstoffzusammensetzung abhängt [1].

Die Ermittlung von den CO<sub>2</sub>-Emissionen erfolgt anhand unterschiedlicher Prüfzyklen. In Europa ist heutzutage die bekannteste Variante der sogenannte Neuer Europäische Fahrzyklus (NEFZ). Dieser Zyklus wird in naher Zukunft in der Europäischen Gemeinschaft mit dem neuen WLTC (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle)

ersetzt. Die wichtigsten Abweichungen zwischen diesen Varianten sind hier kurz zusammengefasst [3, 4]:

- die dynamischen Anforderungen sind im WLTC signifikant höher (verstärkte Beschleunigungen)
- zukünftiger WLTC enthält verlängerte Strecken mit deutlich erhöhten Geschwindigkeiten
- verlängerte Dauer des Test (WLTC etwa 1800 [s], NEFZ ca. 1180 [s])
- niedriger Anteil an Fahrzeug-Stopps im WLTC im Vergleich zum NEFZ

In Abbildung 1 sind die Kennfeldbereiche von verschiedenen Fahrzyklen dargestellt [13]. Es ist aus Abbildung 1 gut ablesbar, dass Fahrzyklen wie der Neue Europäische Fahrzyklus (NEDC) oder der japanische Fahrzyklus (JP 10-15) hauptsächlich nur in niedrigen Lastkollektiven betrieben werden. Demgegenüber weisen Fahrzyklen wie der Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle (WLTC) sowie der amerikanische US 06 Fahrzyklus signifikant aggressiveres Fahrverhalten auf.



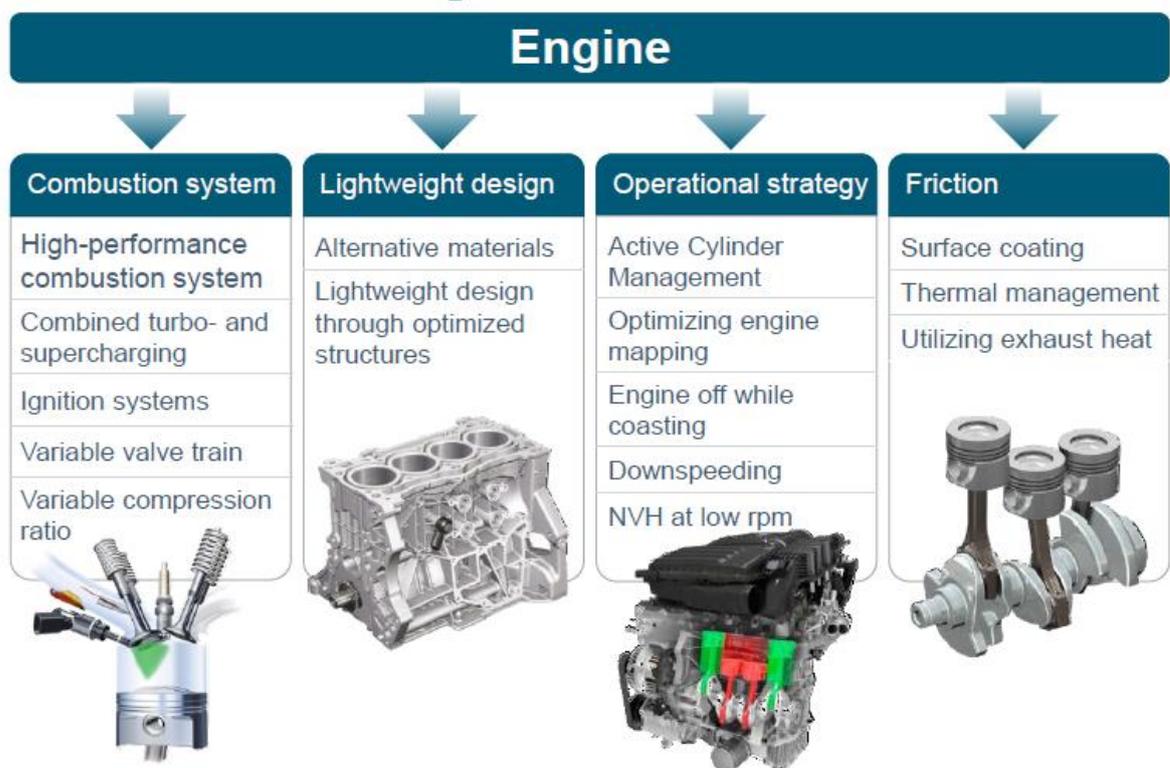
**Abbildung 1:** Kennfeldbereich der unterschiedlichen Fahrzyklen [13]

## 2. Motorseitige CO<sub>2</sub> - Einsparpotentiale an Ottomotoren

Fremdzündungsmotoren sind in der heutigen Welt die an weitesten verbreiteten Antriebslösungen von Kraftfahrzeugen und sie werden ihre entscheidende Rolle in den nächsten Jahrzehnten nicht signifikant verringern. Die stetige Verminderung des Kraftstoffverbrauches und die damit einhergehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen gehören zu den größten Herausforderungen, die die Automobilindustrie in Zukunft überwinden muss. Diese Anforderungen benötigen kontinuierliche und nachhaltige Entwicklungen an heutigen Benzinmotoren. Für einen weiteren Fortschritt in diese Richtung ist der Anstieg des innermotorischen Wirkungsgrades unverzichtbar.

In diesem Teil der Arbeit werden zur Senkung der Treibhausgasemissionen einige ausschließlich durch motorische Verbesserungen realisierbare Maßnahmen kurz vorgestellt und bewertet. Die CO<sub>2</sub>-Verminderungspotentiale der einzelnen Maßnahmen werden immer im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) und in einem anderen Zyklus, der erhöhte Belastungen besitzt, angegeben. Es gibt zahlreiche motorseitige Optionen zurzeit auf dem Markt. Abbildung 2 zeigt einige von den vielversprechenden Maßnahmen zur Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes [73].

### Measures to improve CO<sub>2</sub> efficiency



**Abbildung 2:** Alternativen zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen [73]

## 2.1. Downsizing mit Aufladung

Unter dem Begriff „Downsizing“ versteht man den Ersatz von einem großvolumigen herkömmlichen Saugmotor durch ein aufgeladenes Aggregat mit verkleinertem Hubraum. Durch die Verwendung von einer mehrstufigen Aufladung ist es möglich den Ladedruckaufbau deutlich zu beschleunigen. Aufgrund der Reduzierung des vorhandenen Hubvolumens beim Downsizing wird die Verbrennungskraftmaschine bei thermodynamisch vorteilhaften, hohen effektiven Mitteldrücken betrieben. Dies führt zur Entdrosselung und Lastpunktverschiebung in günstigere Kennfeldbereiche, die positiv auf den CO<sub>2</sub>-Ausstoß auswirken. Grundsätzlich kann man sagen, dass je höher der Downsizing-Grad ist, desto niedriger liegt der Kraftstoffverbrauch des Aggregates [5].

Als Nachteil dieser Technologie kann man die bei hohen Mitteldrücken vorhandene starke Klopfneigung des Verbrennungsmotors benennen. Die Klopfbegrenzung erfordert eine unerwünschte Absenkung des geometrischen Verdichtungsverhältnisses, wodurch der effektive Wirkungsgrad abnimmt. Dies hat zur Folge, dass aufgeladene Ottomotoren heutzutage im Allgemeinen mit Kraftstoffdirekteinspritzung kombiniert werden. Dadurch ermöglicht diese Alternative um etwa eine Einheit höheres Verdichtungsverhältnis im Vergleich zur konventionellen Saugrohrenblasung [6]. In Tabelle 2 sind die CO<sub>2</sub>-Minderungspotentiale des Downsizings in Abhängigkeit von Downsizing-Grad in Prozent [%] dargestellt.

		Testzyklus	
		NEDC	US06
Downsizing-Grad [%]	10	2-3	1
	20	6-7	4
	30	10-12	7-8
	40	13-17	10-11
	50	17-22	13-15

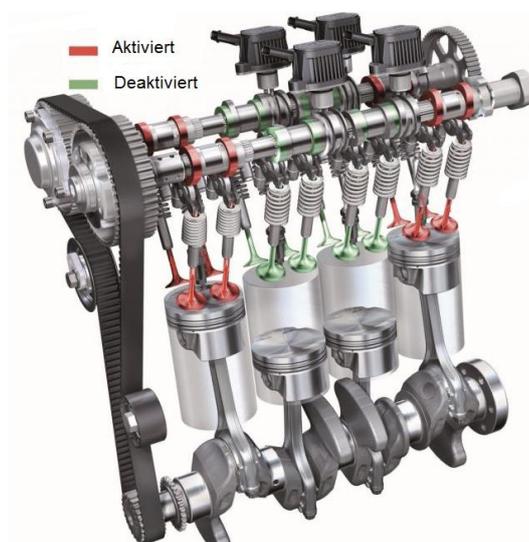
**Tabelle 2:** CO<sub>2</sub>-Minderungspotential [%] des Downsizings [5, 13, 14, 15, 16, 32]

Es ist gut ersichtlich, dass das CO<sub>2</sub>-Verringerungspotential von Downsizing über Lastpunktverschiebung bei niedrigen Motorlasten (also im Teillastbereich des Kennfeldes) die bedeutendste ist. Im Gegensatz dazu ergeben sich unter dynamischen Bedingungen (US06) nur geringere Vorteile in Bezug auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen. Außerdem spielt das Gewicht der untersuchten Fahrzeuge hinsichtlich der erreichbaren CO<sub>2</sub>-Einsparpotentiale bei dieser motorseitigen Maßnahme eine dominierende Rolle. Mit ansteigendem Fahrzeuggewicht nimmt die positive Auswirkung von Downsizing auf die Kohlenstoffdioxid Emissionen zu.

## 2.2. Zylinderdeaktivierung

Die Zylinderabschaltung ist eine bekannte Technologie zur Senkung des Kraftstoffverbrauches an Ottomotoren im unteren Lastbereich. Durch die Deaktivierung von einem oder mehreren Zylindern wird das Hubvolumen der Verbrennungskraftmaschine signifikant vermindert. Gleichzeitig werden die betriebenen Zylinder zur höheren Last und dadurch zum thermodynamisch günstigeren Betriebspunkt verschoben, was die erreichbare Effizienz der Verbrennung positiv beeinflusst. Folglich nehmen die Drosselverluste und die Reibung während der Verbrennung geringfügig ab [7].

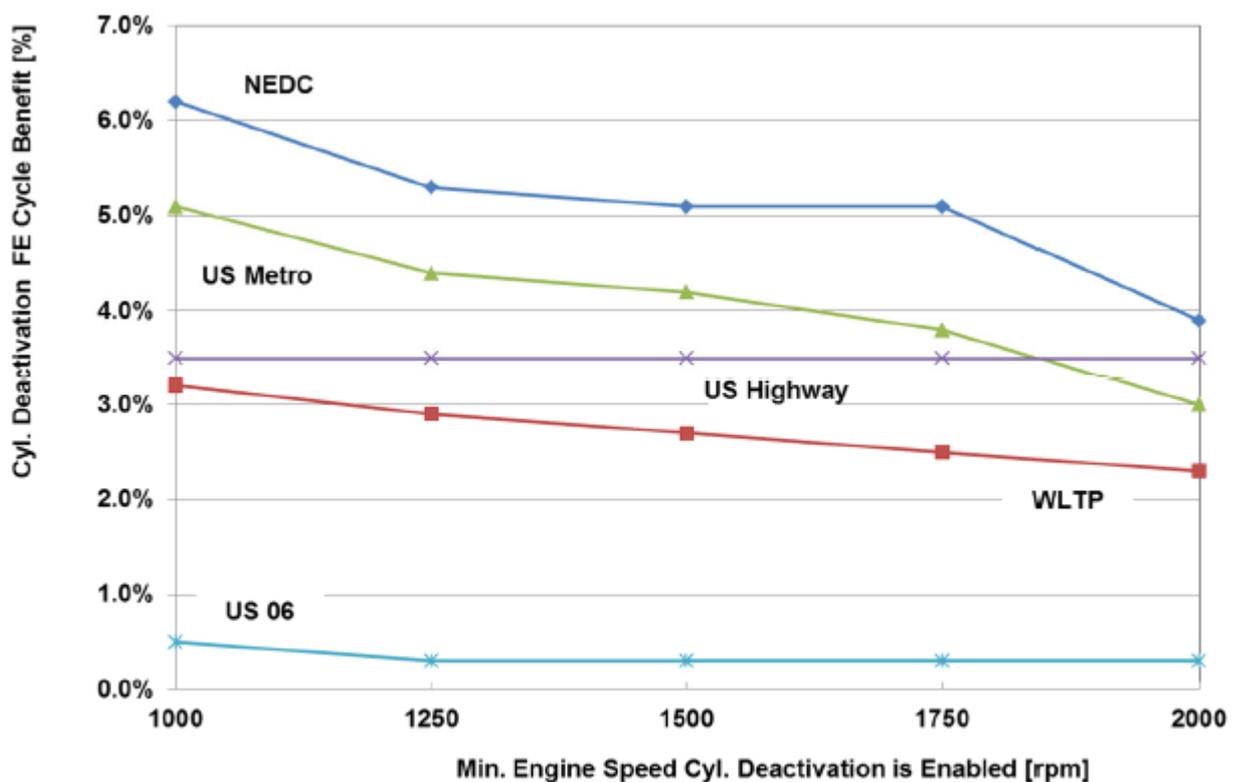
Es sind unterschiedliche Strategien zur Zylinderdeaktivierung auf dem Markt vorhanden. Eine Alternative zur Reduzierung des Hubvolumens kann mit Hilfe von einem geeigneten Ventil-Deaktivierungsmechanismus durchgeführt werden. In diesem Fall werden immer die gleichen Zylinder abgeschaltet (keine Kraftstoffeinspritzung, keine Zündung). Abbildung 3 zeigt die Funktionsprinzip von dieser Alternative.



**Abbildung 3:** Einzelzylinderabschaltung [135]

Eine vielversprechende Ausführung ist eine umlaufende Zylinderdeaktivierung. Diese sogenannte dynamische Abschaltung ermöglicht größere Freiheitsgrade für die Anzahl sowie die Reihenfolge der nicht arbeitenden Zylindern [8].

Die Zylinderabschaltung ist auch eine Technologie, die den höchsten Anteil der erzielbaren CO<sub>2</sub>-Verbesserungspotentiale bei geringeren Lastanforderungen aufweist. In Abbildung 4 sind die möglichen Kraftstoffverbrauchsvorteile und deren Abhängigkeit von der unteren Drehzahlgrenze für unterschiedliche Fahrzyklen dargestellt. Wie bereits erwähnt, bringt bei Zyklen mit niedrigeren Lastanforderungen wie z.B. NEFZ und US Metro den größten Vorteil dieser Technologie. Im Gegensatz dazu sinkt das erreichbare CO<sub>2</sub>-Verringerungspotential bei Hochlastzyklen wie unter anderem WLTP und US 06 wesentlich ab. Dies kann auf die verkürzte Länge der Teillast-Phase während der gesamten Untersuchung zurückgeführt werden. Grundsätzlich kann man sagen, dass die erzielbaren Verbesserungen bezüglich des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes mit ansteigendem Hubvolumen der Kraftmaschine zunehmen.



**Abbildung 4:** Zyklus-Kraftstoffverbrauchsvorteil in Abhängigkeit der unteren Deaktivierungsdrehzahlgrenze [8]

Tabelle 3 zeigt das erzielbare CO<sub>2</sub>-Minderungspotential der Zylinderdeaktivierung in Prozent [%].

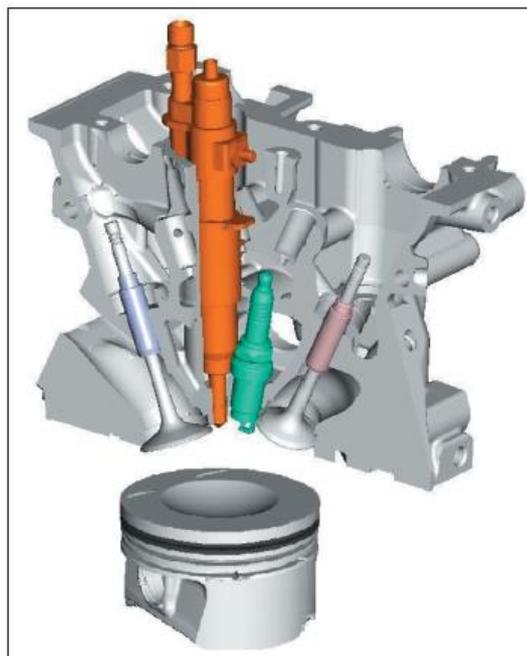
	Testzyklus	
	NEDC	WLTP
<b>Einzelzylinderabschaltung</b>	3-4	2
<b>Umlaufende Abschaltung</b>	4-6	2-3

**Tabelle 3:** CO<sub>2</sub>-Minderungspotential [%] der Zylinderdeaktivierung [7, 8, 15, 17, 19]

Die Recherche in der Literatur hat gezeigt, dass eine umlaufende Deaktivierung im Vergleich zur Einzelzylinderabschaltung zusätzlich um 1-1,5 [%] weniger CO<sub>2</sub>-Ausstoß mit sich bringt.

### 2.3. Strahlgeführtes Magerbrennverfahren

Eine vielversprechende Alternative zur Entdrosselung von Ottomotoren in der Teillast kann durch die Applikation von einem Magerbrennverfahren mit Schichtladung umgesetzt werden. In diesem Fall wird die Ladung im Brennraum mit Frischluft verdünnt, was die erforderliche Menge an eingeführtem Kraftstoff in den niedrigeren Betriebszuständen verringert. Aufgrund des überstöchiometrischen Betriebs der Kraftmaschine sinkt der Kraftstoffverbrauch ab. Dadurch nehmen gleichzeitig die emittierten Kohlenstoffdioxid-Emissionen während der Verbrennung signifikant ab. Die Fahrzeughersteller fokussieren sich heutzutage auf die sogenannte „nahe Anordnung“ von Einspritzdüse und Zündkerze. In Abbildung 5 ist eine mögliche Option von diesem Trend dargestellt [63].



**Abbildung 5:** Strahlgeführtes Brennverfahren bei Ottomotoren [63]

Als Nachteil des Betriebs der Verbrennungskraftmaschine im Kraftstoffmangel kann man die aufwendige Abgasnachbehandlung benennen, da in diesem Bereich ein konventioneller Drei-Wege-Katalysator nicht funktionieren kann. Das CO<sub>2</sub>-Minderungspotential des Magerbrennverfahrens mit Schichtladung in Prozent [%] wird in Tabelle 4 zusammengefasst. Die erzielbaren Potentiale sind durch die Betriebsweise der Verbrennungskraftmaschine im Luftüberschuss ( $\lambda > 1$ ) gültig.

	Testzyklus	
	NEDC	US06
Strahlgeführtes Magerbrennverfahren	14-16	3-4

**Tabelle 4:** CO<sub>2</sub>-Minderungspotential [%] des Magerbrennverfahrens mit Schichtladung [13, 18]

## 2.4. Variables Verdichtungsverhältnis

Ein hohes Verdichtungsverhältnis im nicht klopfbegrenzten Teillastbetrieb führt zu einer verbesserten Verbrennungsstabilität sowie zu einem erhöhten thermodynamischen Wirkungsgrad und damit zur Verringerung des Kraftstoffverbrauches. Die Verminderung des Verdichtungsverhältnisses bei höheren Lastbereichen kann die Neigung zu klopfender oder abnormaler Verbrennung wesentlich reduzieren. Die Verwendung eines variablen Verdichtungsverhältnisses spielt eine große Rolle bei der erfolgreichen Lösung dieses Zielkonflikts. Zur Durchführung einer variablen Verdichtung muss das Kompressionsvolumen variiert werden. Dies kann zurzeit stufenlos (kontinuierlich) oder zweistufig erfolgt werden. Eine stufenlose Anpassung des Verdichtungsverhältnisses hat den Vorteil, dass die Verdichtung in jedem einzelnen Betriebspunkt optimal eingestellt werden kann. In Abbildung 6 wird das Funktionsprinzip des stufenlosen Systems illustriert.

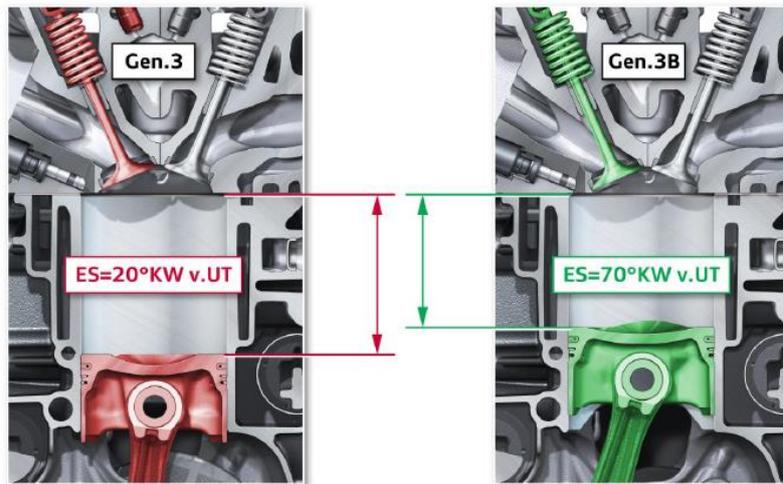


Die bisher vorgestellten motorseitigen Maßnahmen zur Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen erreichen ihr höchstes Potential ohne Zweifel im unteren Lastbereich des Verbrauchskennfeldes. Deshalb ergeben sich bei niedrigen Lasten beinhaltenen Fahrzyklen, verbesserte Werte am CO<sub>2</sub>-Ausstoß. Die zukünftigen Handlungsfelder der Automobilindustrie müssen hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Verminderungen in den praxisrelevanten Betriebsbereichen der Verbrennungskraftmaschine (erhöhte Dynamik mit stärkeren Beschleunigungen sowie verlängerte Strecken mit höheren Geschwindigkeiten) durchgeführt werden. Um die verschärfenden CO<sub>2</sub>-Grenzwerte in Fahrzyklen, die erhöhten Lastkollektiven aufweisen, mit Fremdzündungsmotoren erfolgreich abhaken zu können, sind zusätzliche Technologien erforderlich.

In dem verbleibenden Teil dieser Kapitel der Arbeit werden motorseitige Maßnahmen, die ihren Verbesserungen sowohl unter niedrigen, als auch unter erhöhten Lastbedingungen gewährleisten, kurz zusammengefasst und bezüglich deren CO<sub>2</sub>-Verringerungspotentiale bewertet.

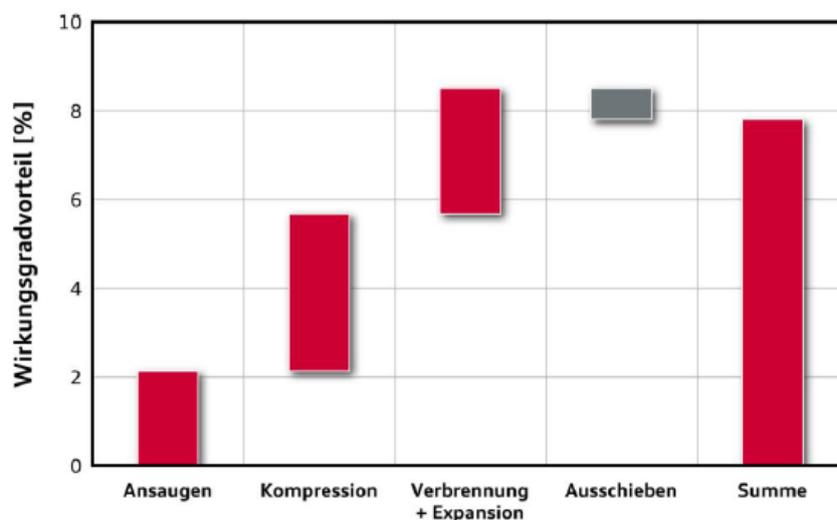
## **2.5. Verlängerte Expansion durch die Verwendung von Miller- oder Atkinson-Zyklus**

Ein hohes geometrisches Verdichtungsverhältnis ist nicht unbedingt erforderlich, um verbesserte Effizienz der Verbrennung sicherzustellen. Vor dem Hintergrund eines erhöhten Verdichtungsverhältnisses liegt das dadurch ergebende ansteigende Expansionsverhältnis. Allein eine verlängerte Expansion führt zur wesentlichen Verringerung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes. Dies kann durch eine verkürzte Kompressionsphase im Vergleich zur Expansionsphase implementiert werden, die wesentliche Wirkungsgradverbesserungen ermöglicht. Auf dem Markt sind derzeit verschiedene einfache technische Maßnahmen vorhanden, die sich eine Möglichkeit zur Erhöhung des Expansionsverhältnisses anbieten. Um nur einige zu nennen, sind die Miller- oder Atkinson-Zyklen bestens dafür geeignet. Bei den Miller-Steuerzeiten werden die Einlassventile schon vor dem unteren Totpunkt geschlossen. Um die erforderliche Frischluftfüllung trotz der verkürzten Ansaugzeit gewährleisten zu können, muss der Druck im Saugrohr erhöht werden. Dies führt zur Entdrosselung sowie zur Reduzierung der Ansaugverluste, die die Treibhausgasemissionen positiv beeinflussen können [74]. In Abbildung 7 wird die Funktionsweise des Miller-Verfahrens anhand von zwei unterschiedlichen Konzepten dargestellt. Es ist gut sichtbar, dass das Einlass Schließen (ES) bei beiden Varianten schon vor dem unteren Totpunkt (v. UT) erfolgt wird.



**Abbildung 7:** Kolbenposition in Abhängigkeit von Einlass Schließen (ES) [74]

Nachdem das Einlassventil vollständig geschlossen ist, wird der Druck im Zylinder während dem verbleibenden Teil der Ansaugphase nicht mehr gesteigert, sondern nur abgesenkt. Da der Druck im Brennraum nach dem Ansaug-Takt im Vergleich zu einem herkömmlichen Brennverfahren niedriger ist, wird ein Großteil der Kompressionsphase bei einem geringeren Druckniveau durchgeführt. Dies hat eine günstige Auswirkung auf die Effizienz der Verdichtung, da die maximalen Temperaturen im Brennraum geringer ausfallen. Da die nachfolgende Verbrennungsphase in einem verkleinerten Brennraumvolumen stattfindet, ergibt sich ein erhöhtes Druckniveau, was einen zusätzlichen Beitrag zur Verbesserung des Wirkungsgrades leistet. Abbildung 8 zeigt die erzielbaren Wirkungsgradgewinne geteilt in vier Arbeitstakten durch den Einsatz von verlängerter Expansion bei einer Drehzahl von  $n = 2000$  [1/min] und einem effektiven Mitteldruck von  $p_{me} = 6$  [bar] [74].



**Abbildung 8:** Wirkungsgradgewinne in den einzelnen Arbeitstakten durch verlängerte Expansion [74]

Im Gegensatz dazu, findet das Schließen der Einlassventile beim Atkinson-Zyklus erst nach dem unteren Totpunkt statt. Beide Variante haben die gleiche Folge, dass die Verdichtung der in Zylinder eingeführten Ladung mit einer gewissen Verzögerung anfängt. Dies führt zu einer verlängerten Expansion im Vergleich zur Verdichtung, welche signifikante Wirkungsgradgewinne und dadurch eine Absenkung der CO<sub>2</sub> Emissionen ergibt [9]. Grundsätzlich kann man sagen, dass das Miller-Verfahren im Vergleich zum Atkinson-Ansatz im Teillastbetrieb verbesserte Wirkungsgrade aufweist. Insbesondere bei aufgeladenen Motoren bietet sich das frühe Schließen der Einlassventile als bevorzugte Maßnahme an, um die Effizienz anzuheben. Demgegenüber ist die Anwendung von Atkinson-Steuerzeiten im unteren Lastbereich bei Saugmotoren vorteilhaft [74]. Das erreichbare CO<sub>2</sub>-Minderungspotential von einer verlängerten Expansion in Prozent wird in Tabelle 6 dargestellt.

	Testzyklus	
	NEDC	US06
<b>Verhältnis von Expansion zur Kompression = 1,2</b>	2-2,5	3-3,5
<b>Verhältnis von Expansion zur Kompression = 1,6</b>	10-12	10-12

**Tabelle 6:** CO<sub>2</sub>-Minderungspotential [%] von verlängerter Expansion [10, 13, 19, 20]

Durch die Verwendung von Miller Steuerzeiten ist es normalerweise möglich, ein Verhältnis von 1,2:1 zwischen Expansion und Verdichtung zu erreichen. Durch eine zusätzliche Erhöhung dieses Verhältnisses werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen wesentlich weiter abgesenkt [10, 19].

Es ist gut sichtbar, dass das CO<sub>2</sub>-Reduktionspotential von verlängerter Expansion durch Miller-oder Atkinson-Steuerzeiten eine weitgehend vom Zyklus unabhängige Wirkung aufweist. Die erzielbaren Absenkungen durch den Einsatz von dieser Technologie liegen in dem gesamten Bereich des Kennfeldes in der gleichen Größenordnung.

## 2.6. Externe gekühlte Abgasrückführung

Wie bereits erwähnt, bieten aufgeladene Ottomotoren durch Downsizing erhebliche Potentiale hauptsächlich im Teillastbereich der Verbrennungskraftmaschine. Aufgrund der verschärfenden Klopfereignisse bei hohen Lasten muss das geometrische Verdichtungsverhältnis bei diesen Motoren absichtlich verringert werden, um die Bauteile von einer Beschädigung zu schonen. Dadurch ergibt sich eine Verschlechterung des thermodynamischen Wirkungsgrades im Bereich der niedrigen Lasten. Als interessante

Alternative zur Vermeidung des Auftretens von Klopfen stellt sich die Verwendung von gekühlter Abgasrückführung (AGR) dar. Durch eine Verdünnung der Ladung mit Abgas werden die Verbrennungstemperaturen und dadurch die Wandwärmeverluste sowie die Abgastemperaturen abgesenkt. Diese Merkmale ergeben sich zusammen eine reduzierte Klopfgefahr sogar im klopfbegrenzten Bereich der Verbrennung (höhere Lastkollektive), die eine Anpassung von einer wirkungsgradoptimalen Verbrennungsschwerpunktlage ermöglicht. Zusätzlich nimmt der Kraftstoffanreicherungsbedarf bei hohen Lasten aufgrund der geringeren Abgastemperaturen signifikant ab, was positiv auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen auswirkt [12]. Tabelle 7 fasst das CO<sub>2</sub>-Minderungspotential von externer Abgasrückführung in Prozent [%] zusammen.

	Testzyklus	
	NEDC	US06
Externe gekühlte Abgasrückführung	1-2	3,5-4,5

**Tabelle 7:** CO<sub>2</sub>-Minderungspotential [%] von externer Abgasrückführung [10, 12, 13, 16, 20, 25, 26, 32]

## 2.7. Reduzierung der Motor-Reibungsverluste

Um die dauernd verschärfenden Effizianzorderungen an den Verbrennungsmotoren in Zukunft erfüllen zu können, ist es notwendig, die Reibungsoptimierung ständig zu verbessern. Die Kolbengruppe, bestehend aus Kolben, Kolbenringen, Kolbenbolzen und Pleuel, ist für bis zu etwa 40 [%] der Gesamtmotorreibung zuständig. Einen weiteren Beitrag zur Motorreibung mit einem Anteil von zirka 15 [%] trägt der Ventiltrieb bei [27]. Bei dem Ventiltrieb sind die bedeutendsten Berührungsflächen die Nockenwellenlager und selbst die einzelnen Nocken. Durch die Optimierung der beiden Kontaktstellen der Oberflächen kann das Reibungsniveau wesentlich verringert werden. Mit Hilfe von weiteren Beschichtungen an den Oberflächen ist es möglich, den Gleitkontakt zwischen den Berührungsflächen signifikant zu optimieren. Außerdem kann durch den Einsatz von Rollenschlepphebel das Reibungsniveau zusätzlich verbessert werden [28]. In Tabelle 8 sind die CO<sub>2</sub>-Minderungspotentiale von Verringerung der Motorreibung in Prozent [%] an Ottomotoren dargestellt.

	CO <sub>2</sub> Vorteil
Reibungsreduzierung im Ottomotor	3-5

**Tabelle 8:** CO<sub>2</sub>-Minderungspotential [%] von Verringerung der Motorreibung [15, 16, 18, 29, 30, 60]

## 2.8. Thermomanagement

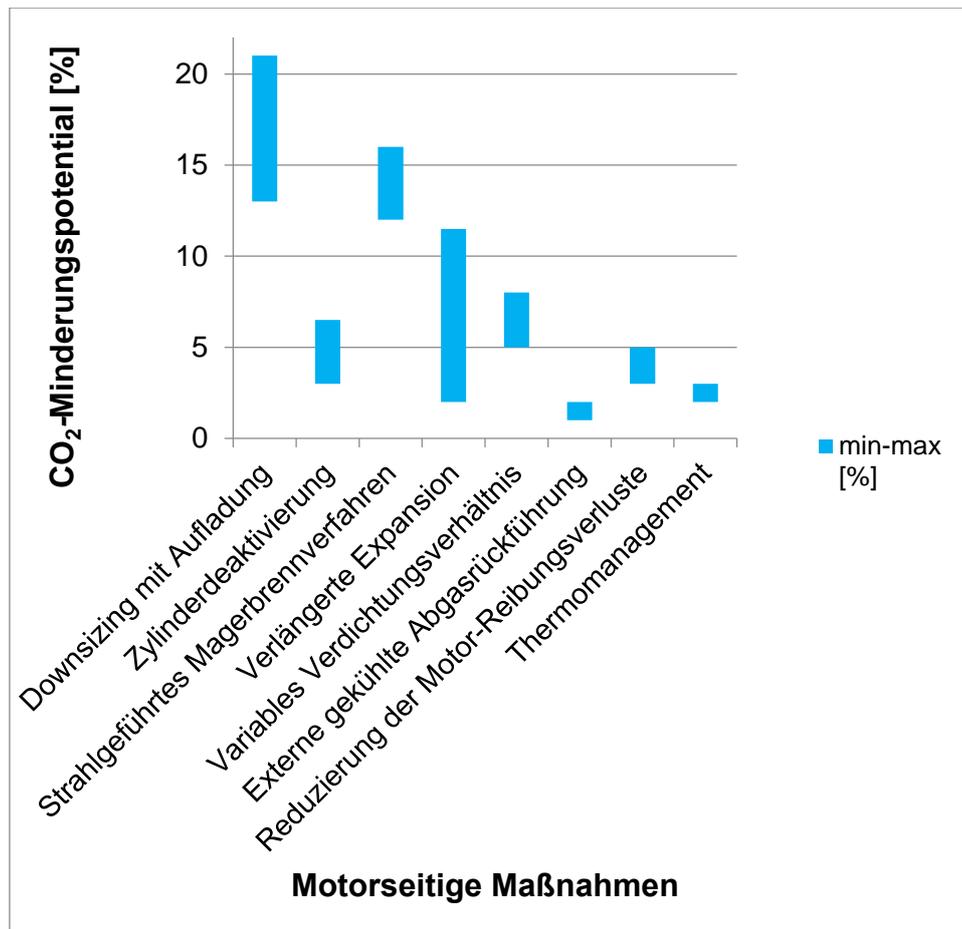
Zusätzliche Effizienzsteigerung der Verbrennungskraftmaschine wird durch einen optimierten Thermomanagement sichergestellt. Untersuchungen haben bewiesen, dass das motormontierte Kapselungskonzept eine signifikante Wärmespeicherung aufweisen kann. Diese Maßnahmen können zu einer Verkürzung der Kaltstartphase führen. Nach einem Motorneustart haben die entsprechenden Isolierungen somit eine Kraftstoffverbrauchsverringerung zur Folge. Infolgedessen ist eine Absenkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen zu erwarten. Um die Wärmeverluste im Antriebsstrang eliminieren zu können, muss ein möglichst hoher Abdeckungsgrad realisiert werden [56]. Tabelle 9 zeigt das durch optimierte Thermomanagement erreichbare CO<sub>2</sub>-Minderungspotential in Prozent [%].

	CO <sub>2</sub> Vorteil
<b>Wärmespeicherung im Ottomotor</b>	2-3

**Tabelle 9:** CO<sub>2</sub>-Minderungspotential [%] von verbesserter Wärmespeicherung [18, 32, 57, 58]

## 2.9. Zusammenfassung der Auswirkungen von motorseitigen Maßnahmen auf den CO<sub>2</sub>-Ausstoß

Schließlich werden die in diesem gesamten Kapitel vorgestellten und untersuchten einzelnen Technologien zur Verringerung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes an Ottomotoren zusammengefasst und anhand deren emittierten Menge an Treibhausgas-Emissionen miteinander verglichen. In Abbildung 9 sind die CO<sub>2</sub>-Minderungspotentiale von unterschiedlichen motorseitigen Maßnahmen im niedrigeren Lastbereich dargestellt. Wie es aus Abbildung 9 gut ersichtlich ist, liegen in der Teillast die größten Verringerungspotentiale des Ottomotors durch den Einsatz von Downsizing durch Aufladung und Hubraumverkleinerung sowie strahlgeführtem Magerbrennverfahren. Zusätzlich bieten sich die Zylinderabschaltung und das variable Verdichtungsverhältnis als wichtige Maßnahmen an, um die CO<sub>2</sub>-Emissionen weiter zu reduzieren. Die deutliche Abweichung der Ergebnisse bei der verlängerten Expansion kann auf das genaue Verhältnis von Verdichtung zu Expansion zurückgeführt werden. Durch die Anpassung von angehobenen Verhältnissen lassen sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen wesentlich absenken.

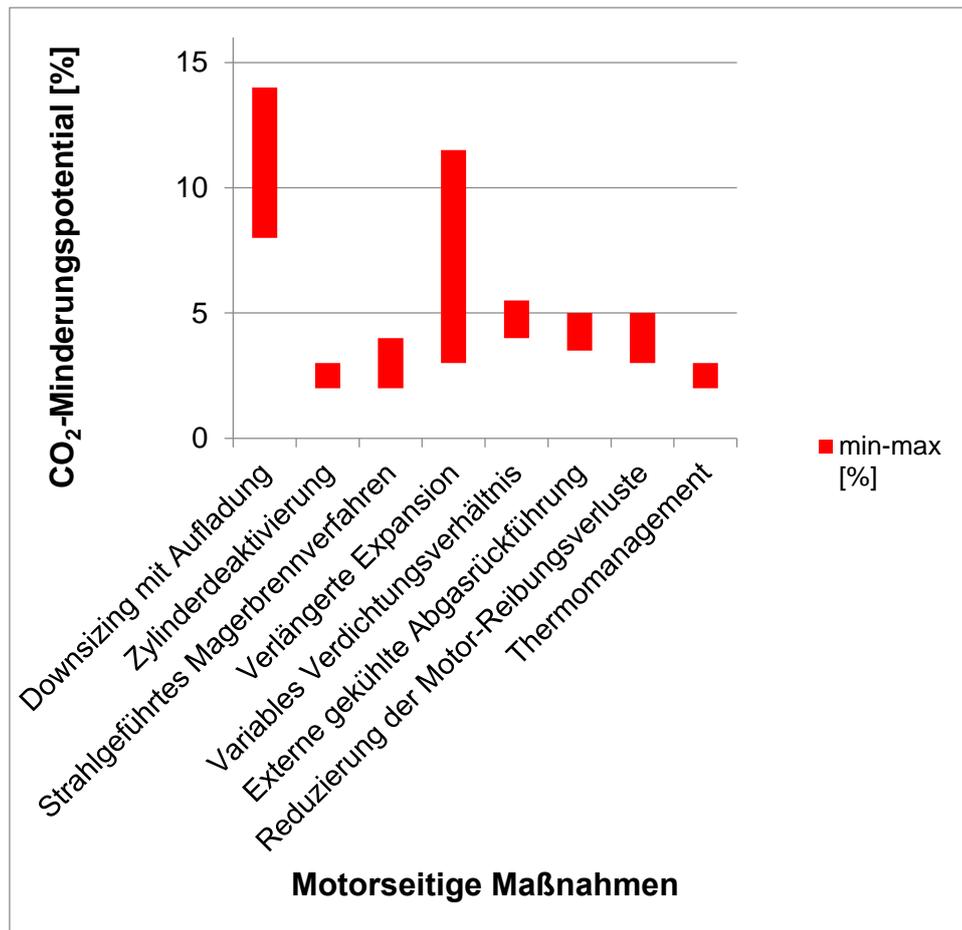


**Abbildung 9:** CO<sub>2</sub>-Minderungspotentiale von verschiedenen motorseitigen Maßnahmen im unteren Lastbereich des Verbrauchskennfeldes

Abbildung 10 zeigt die CO<sub>2</sub>-Minderungspotentiale von unterschiedlichen motorseitigen Maßnahmen bei mittleren bis höheren Lasten. Abbildung 10 macht es deutlich, dass Downsizing unter erhöhten Belastungen auch das größte Minderungspotential aufweist. Im Gegensatz zur geringeren Belastung ergibt in diesem Fall eine Absenkung des Hubvolumens niedrigere Verbesserungen in Bezug auf den CO<sub>2</sub>-Ausstoß. Grund dafür ist, dass die Verbrennungskraftmaschine in diesem Bereich nicht immer im optimalen Betriebspunkt betrieben werden kann. Die Einsparpotentiale des Magerbrennverfahrens und der Zylinderdeaktivierung sind im Vergleich zur niederen Teillast ebenfalls deutlich geringer. Diese Technologien können bei erhöhten Lastkollektiven die Treibhausgasemissionen im Vergleich zu unteren Lasten weniger verbessern. Außerdem leistet eine Variabilität der Verdichtung nur einen gemäßigten Beitrag zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Demgegenüber weist sich die Abgasrückführung in diesem Betriebsbereich des Kennfeldes als interessante Maßnahme auf, da diese Alternative im Vergleich zum niedrigen Lastbereich erhöhte Potentiale besitzt. Der große Unterschied bezüglich der Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes bei der verlängerten Expansion kann

wieder mit dem Einfluss des angepassten Verhältnisses zwischen Verdichtung und Expansion erläutert werden.

Aus Abbildung 10 ist es ersichtlich, dass Absenkungen der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei höheren Lastbereichen der Kraftmaschine auch möglich sind. Nichtsdestotrotz liegt das größte CO<sub>2</sub>-Einsparpotential des Fremdzündungsmotors ohne Zweifel im unteren Lastbereich.



**Abbildung 10:** CO<sub>2</sub>-Minderungspotentiale von verschiedenen motorseitigen Maßnahmen bei höheren Lasten

### 3. Kraftstoffseitige CO<sub>2</sub>-Einsparpotentiale an Ottomotoren

Neben der kontinuierlichen Verbesserung und Optimierung von verschiedenen motorischen Maßnahmen bei Kraftfahrzeugen, spielt die Verwendung von alternativen Kraftstoffen eine zusätzliche entscheidende Rolle zur nachhaltigen Verringerung des Kraftstoffverbrauchs und zu den damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen. Zusätzlich kann der Einsatz von alternativen Kraftstoffen einen wesentlichen Beitrag zur Schonung der fossilen Ressourcen leisten. Die Verwendung von bestimmten alternativen Kraftstoffen kann zur CO<sub>2</sub> Verringerung von Verbrennungskraftmaschinen beitragen. Um nur einige Wege zu nennen, kann die Absenkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen mit Hilfe von alternativen Kraftstoffen durch die positive Beeinflussung des Brennverfahrens sowie das günstige C/H Verhältnis implementiert werden.

Im folgenden Kapitel der Arbeit wird ein derzeitiger Überblick über die Auswirkungen der unterschiedlichen brennverfahrensrelevanten Kraftstoffmerkmalen ausschließlich auf den CO<sub>2</sub>-Ausstoß erläutert und bewertet. Die Recherche fokussiert sich auf die Eigenschaften zukünftiger Treibstoffe der Ottomotoren. Obwohl die Optionen von alternativen Kraftstoffen weltweit breit sind, sind nicht alle Variante, die in dieser Liste stehen gleichzeitig angemessene Treibstoffalternativen für die heutigen Fremdzündungsmotoren. Im Folgenden werden die heutzutage verbreitetsten Kraftstoffalternativen in Europa kurz vorgestellt.

Bei **Ethanol** (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) handelt es sich um einen reinen Stoff mit einer chemischen Verbindung. Ethanol ist ein farbloser und flüssiger Treibstoff und gehört zu der Gruppe der Alkohole. Ethanol besteht neben den Kohlenwasserstoffatomen aus einer Hydroxylgruppe. Diese sogenannte OH-Gruppe definiert die Eigenschaften des Kraftstoffes maßgeblich. Aufgrund der ähnlichen physikalischen und chemischen Eigenschaften von Ethanol zum herkömmlichen Benzin eignet er sich hervorragend als zusätzlicher Kraftstoff für die Kraftfahrzeuge. Heutzutage ist es weltweit der bisher am meisten verbreitete biogene Kraftstoff. Selbst der Einsatz von diesem Treibstoff ist keine neue Idee. Nikolaus August Otto hat schon ihn im Jahre 1860 als Kraftstoff für seinen Prototypen gewählt. Auch Henry Ford dachte anfänglich, dass Ethanol eine geeignete Alternative für das T-Modell sein könnte [33].

Unter **Flüssiggas** (Liquefied Petroleum Gas) versteht man nicht erneuerbare fossile Gase, die heutzutage im Allgemeinen durch Kühlung und Kompression aus Erdöl in Raffinerie verflüssigt werden. Die Herstellung kann außerdem aus Erdgas implementiert

werden. Diese Alternative besteht im Allgemeinen aus mindestens 90 [%] Propan ( $C_3H_8$ ) und etwa 2,5 [%] Butan ( $C_4H_{10}$ ). Die genaue Zusammensetzung des Gases hängt von der Herkunft sowie von der Lieferung ab. Im Gegensatz zum Ethanol befindet sich der Heizwert von Flüssiggas (kurz LPG) höher im Vergleich zum Benzin, was sich positiv auf den Kraftstoffverbrauch auswirkt [34].

In Abhängigkeit von der Herkunft ist der Hauptbestandteil von **Erdgas** hauptsächlich Methan ( $CH_4$ , das einfachste Alkan) und ist dadurch ein fossiler Energieträger mit dem geringsten Kohlenstoffgehalt [52]. Die Qualität des Erdgases hängt in erster Linie von dem Anteil an Methan im Gas ab. Je höher die Menge an Methan ist, desto bessere sind die Merkmale des Treibstoffes. Da der chemische Aufbau dieser Alternative sehr ähnlich zum Wasserstoff ist, bietet sich der Kraftstoff aufgrund seiner ausgezeichneten Eigenschaften einen signifikanten Beitrag zur Verringerung von Treibhausgasemissionen an. Der Treibstoff besitzt gute Voraussetzungen in Bezug auf eine verschärfende Verbreitung in naher Zukunft. Die Speicherung von Erdgas in Kraftfahrzeugen kann entweder unter Hochdruck (komprimiert bei 200 [bar]) als Compressed Natural Gas (CNG) oder verflüssigt bei  $-165$  [°C] als Liquefied Natural Gas (LNG) mit Kryogentechnik erfolgt werden [35,36].

Folglich werden zusätzliche Treibstoffalternativen, die derzeit an den Zapfsäulen noch nicht erhältlich sind, kurz vorgestellt.

**Butanol** ( $C_4H_{10}O$ ) gehört zu der Gruppe der Alkohole und besitzt 4 Isomere (1-Butanol [ $C_4H_{10}O$ ], 2-Butanol, Iso-Butanol und Tertiär Butanol). Die Beimischung mit Wasser ist eingeschränkt. Im Gegensatz dazu ist mit Benzin in jedem Verhältnis problemlos mischbar. Der Grund dafür ist, dass Butanol zum konventionellen Benzin eine sehr ähnliche Struktur aufweist. Die Energiedichte von Butanol liegt im Vergleich zu Benzin niedriger, aber wesentlich höher als von Ethanol [76]. Durch den Einsatz von Butanol-Benzin-Mischungen ist es möglich, einen geringeren Kraftstoffverbrauch als bei Ethanol Blends mit einem vergleichbaren Alkoholanteil zu erreichen. Butanol weist eine Research Oktanzahl von zwischen 94 bis sogar 109 auf in Abhängigkeit von der eingesetzten Isomere und hat einen niedrigeren Dampfdruck als Ethanol. Durch die Beimischung von Butanol in Ethanol Blends können einige Nachteile von Ethanol wie der höhere Dampfdruck sowie die Affinität zu Wasser verbessert werden [75].

**Methanol** ( $CH_3OH$ ) gehört auch zu den Alkoholen und ist der einfachste Vertreter dieser Gruppe. Methanol kann als reiner Kraftstoff oder als Kraftstoffadditive in Ottomotoren

verwendet werden. Der Treibstoff hat eine hervorragende Research Oktanzahl, die zu einer hohen Klopfestigkeit führt. Dies hat außerdem zur Folge, dass der erreichbare thermische Wirkungsgrad sowie die Leistung der Verbrennungskraftmaschine im Vergleich zu Benzinmotoren ansteigen. Aus dem niedrigeren Heizwert von Methanol folgt, dass sich der volumetrische Kraftstoffverbrauch im Vergleich zum konventionellen Benzin verschlechtert. Aufgrund des niedrigen Energiegehalts ist die Kundenakzeptanz begrenzt. Die Herstellung von Methanol wird aus unterschiedlichen kohlenstoffhaltigen Rohstoffen durchgeführt. Heutzutage erfolgt die Produktion hauptsächlich aus Erdgas [81]. Eine maximale Zumischung von 3 Volumenprozenten zum konventionellen Benzin ist ohne Anpassung am Verbrennungsmotor erlaubt. Darüber hinaus ist eine entsprechende Umrüstung der Materialien, die sich mit dem Kraftstoff berühren, obligatorisch [82]. Es ist erwähnenswert, dass Methanol im Motorsport als Kraftstoff im leistungsstarken Dragster-Boliden verwendet wird [83].

### **3.1. Klopfestigkeit**

Die Klopfestigkeit eines Kraftstoffes definiert dessen Eignung für die Applikation in Fremdzündungsmotoren. Bei der Auslegung des Verbrennungsvorganges spielt die Klopfestigkeit des eingesetzten Treibstoffes eine dominierende Rolle [42]. Die klopfende Verbrennung und die zusätzlichen unerwünschten Verbrennungserscheinungen hängen von dem thermodynamischen Stand am Ende der Kompressionsphase ab. Die sehr hohe Klopfestigkeit von bestimmten alternativen Kraftstoffen ermöglicht die Anpassung von erhöhten Verdichtungsverhältnissen und wirkungsgradgünstigen Zündbedingungen während der Verbrennung, die positiv auf den motorischen Wirkungsgrad auswirken sowie eine signifikante Reduzierung der Abgastemperaturen ergeben [39]. Unter den untersuchten Kraftstoffen weist Erdgas die höchste Research Oktanzahl (ROZ=130) auf [44]. Dies ermöglicht eine Erhöhung des geometrischen Verdichtungsverhältnisses bis zu sogar  $\epsilon = 14$  bei angemessener Auslegung des Brennverfahrens [42]. Reines Ethanol besitzt eine Research Oktanzahl von 109 [43] und Flüssiggas hat eine ROZ von 105-115 [38] die auch deutlich höher im Vergleich zum herkömmlichen Benzin liegen. Beim Flüssiggas hängt die Research Oktanzahl hauptsächlich von dem Anteil an Butan im Kraftstoff ab. Die Research Oktanzahl von 1-Butanol liegt in gleicher Größenordnung wie beim Benzin [76]. Reines Methanol hat eine Research Oktanzahl von sogar 114, die der beste Wert unter den in dieser Arbeit betrachteten Alkoholen ist [84].

Durch einen Anstieg des geometrischen Verdichtungsverhältnisses aufgrund der geringeren Klopfneigung von einigen Kraftstoffalternativen, wird hauptsächlich der

Teillastwirkungsgrad der Verbrennungskraftmaschine maßgeblich verbessert. Aus diesem Grund bieten die oben erwähnten Kraftstoffoptionen ideale Voraussetzungen für eine Aufladung der Verbrennungskraftmaschine. Diese Maßnahmen führen zusammen zu einer wesentlichen Verminderung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes. Tabelle 10 gibt einen Überblick über das CO<sub>2</sub>-Minderungspotential von der erhöhten Klopfbarkeit in Prozent [%].

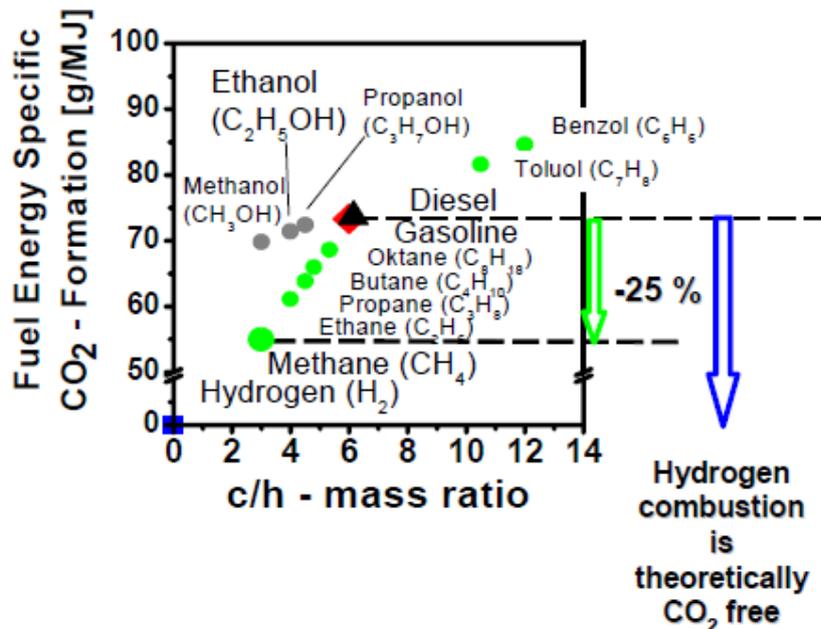
	Benzin	Ethanol	CNG	LPG	1-Butanol	Methanol
ROZ [-]	95	109	130	105-115	94	109-114
CO <sub>2</sub> -Red. [%]	Basis	2-3	5-6	3-4	-	3-4

**Tabelle 10:** CO<sub>2</sub>-Minderungspotential [%] von erhöhter Klopfbarkeit [ 48, 50, 54, 55, 59, 76]

### 3.2. Verhältnis Wasserstoff/Kohlenstoff (H/C)

Bei der Entstehung des gesamten CO<sub>2</sub>-Ausstoßes spielt neben dem motorischen Wirkungsgrad der chemische Aufbau der eingesetzten Kraftstoffe eine wichtige Rolle. Die Verbrennung von flüssigen sowie gasförmigen Kohlenwasserstoffen (C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>) ergibt aufgrund der chemischen Reaktion von Kohlenstoff und Wasserstoff mit dem im Brennraum vorhandenen Sauerstoff immer Kohlenstoffdioxid und Wasser [52]. Mit Hilfe von einer günstigen Bilanz in der chemischen Struktur ergibt sich eine signifikante Verminderung der emittierten Menge an Kohlenstoffdioxid. Das herkömmliche Benzin verfügt mit einem C/H Massenverhältnis von zirka 6 [-], die als Anfangswert dient. Unter den untersuchten Kraftstoffalternativen weisen Erdgas und Methanol das niedrigste Kohlenstoff/ Wasserstoff Gewichtsverhältnis auf. Dieses beträgt nur etwa 3 [-] was die Größe der CO<sub>2</sub>-Minderungspotentiale durch den Einsatz von diesen Treibstoffen maßgeblich verbessert. Aus diesem Grund besitzt Erdgas zwischen den betrachteten gasförmigen Alternativen, sowie Methanol unter den untersuchten flüssigen Kraftstoffen die höchsten Absenkungen [44].

Durch die Betriebsweise der Verbrennungskraftmaschine mit den verbleibenden untersuchten Treibstoffen ergeben sich im Vergleich zu den Vielkomponenten-Kraftstoffen wie Benzin bei allen Varianten ausnahmslose Verbesserungen. Grundsätzlich kann man sagen, dass die gasförmigen Kraftstoffe signifikant günstigere Werte als die flüssigen Wettbewerber aufweisen. Abbildung 11 macht es deutlich, dass das energiespezifische CO<sub>2</sub>-Bildungspotential von dem C/H Massenverhältnis der einzelnen Treibstoffe wesentlich abhängt.



**Abbildung 11:** CO<sub>2</sub>-Bildungspotential über dem atomaren C/H Gewichtsverhältnis [42]

Es ist gut sichtbar, dass Erdgas alleine über den Kraftstoff aufgrund des günstigen C/H-Verhältnisses (niedrigerer Kohlenstoffanteil und erhöhter Wasserstoffanteil) sich das Potential anbietet, den CO<sub>2</sub>-Ausstoß gegenüber dem herkömmlichen Benzin um etwa 25 [%] abzusenken. Aufgrund des verringerten C/H Verhältnisses entsteht während der Verbrennung mehr Wasser (H<sub>2</sub>O) und weniger Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) im Vergleich zu herkömmlichen Kraftstoffen wie unter anderem Benzin. Tabelle 11 zeigt das durch das verbesserte C/H Massenverhältnis von den analysierten Kraftstoffen erreichbare CO<sub>2</sub>-Minderungspotential im Vergleich zu konventionellem Benzin in Prozent [%].

	Benzin	Ethanol	CNG	LPG	1-Butanol	Methanol
<b>C/H Massenverhältnis [-]</b>	6	4	3	4,2	5	3
<b>CO<sub>2</sub>-Red. [%]</b>	Basis	3-4	20-25	9-11	1-2	5-7

**Tabelle 11:** CO<sub>2</sub>-Minderungspotential [%] von diversen Treibstoffen durch geänderte C/H Massenverhältnis [37, 38, 40, 41, 42, 44, 48, 50, 51, 52, 53, 54, 68, 77]

### 3.3. Verdampfungswärme

Die Verdampfungswärme ist die Menge an erforderlicher Energie, die einem Stoff zur Verfügung gestellt muss, um diesen ohne eine Änderung der Temperatur vom flüssigen in gasförmigen Zustand zu ändern. Die hohe Verdampfungswärme von bestimmten flüssigen Kraftstoffen führt während des Verbrennungsvorgangs zu einer merkbaren Abkühlung der im Zylinder vorhandenen Frischluftladung, die positiv auf den motorischen Wirkungsgrad sowie auf die emittierte Menge an Kohlenstoffdioxid auswirkt. Durch die

Verwendung von Kraftstoffdirekteinspritzung absorbiert der flüssige Treibstoff Wärme von der Zylinderladung während der Verdampfung, was zur Abkühlung der Ladung führt.

Je höher der Wert von der Verdampfungswärme liegt, desto höher sind die Temperaturabfälle im Brennraum und dadurch die erzielbaren Verringerungen von CO<sub>2</sub>-Emissionen [40]. Die Gründe dafür sind, dass die Zylinderfüllung und der Liefergrad aufgrund der niedrigeren Temperaturen wesentlich ansteigen. Der konventionelle Benzin-Kraftstoff weist eine Verdampfungswärme von etwa 350 [kJ/kg] auf. Wie bereits erwähnt, sind die Hauptbestandteile von Flüssiggas Propan und Butan, die dessen Eigenschaften bestimmen. Die Verdampfungsenthalpie von LPG besitzt einen Wert von zirka 395 [kJ/kg] falls der Kraftstoff von 90 [%] Propan und 2,5 [%] Butan besteht [78, 79]. Durch die Verwendung von einer flüssigen LPG-Saugrohrein-spritzung oder einer flüssigen LPG-Direkteinspritzung kann die Zylinderladung aufgrund der Expansion des flüssigen LPG-Kraftstoffes im Brennraum abgekühlt werden. Bei gasförmigen LPG-Saugrohreinblasung ist dieser Effekt nicht möglich [41].

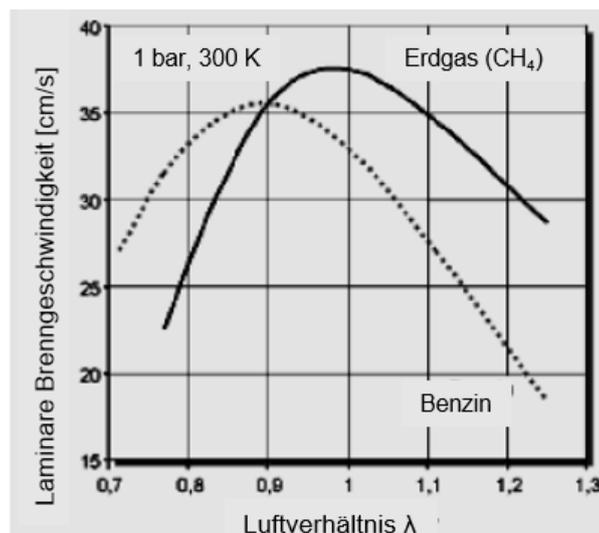
Im Gegensatz dazu hat reines Ethanol eine erheblich höhere Verdampfungswärme von zirka 900 [kJ/kg], die fast dreimal so groß wie beim Benzin ist. Die erhöhte Verdampfungswärme von Ethanol ergibt sich um etwa 250 [%] mehr Kühlung der Zylinderladung im Vergleich zum Benzin [43]. Rein theoretisch kann Ethanol unter stöchiometrischen Bedingungen sowie vollständiger adiabatischen Verdampfung eine Reduzierung der Temperatur von etwa 74 [°C] mit sich bringen [40]. Bei Normalbenzin befindet sich die erreichbare Temperaturminderung nur bei 20 [°C]. Aufgrund der ausgezeichneten Verdampfungswärme von Methanol im Vergleich zu den betrachteten Kraftstoffen verstärkt sich diesen Effekt noch weiter [76]. 1-Butanol weist eine im Vergleich zu Benzin signifikant erhöhte Verdampfungswärme auf, die die Abkühlung des Gemisches im Brennraum verbessert und dadurch positiv auf die erzielbare Absenkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen auswirkt [76]. Die Verdampfungswärme von reinem Methan liegt bei zirka 510 [kJ/kg], die sich im Vergleich zum herkömmlichen Ottokraftstoff höher befindet [47]. Aber wie bereits erwähnt, ist bei gasförmigen Treibstoffen eine Abkühlung des Gemisches durch eine Verdampfung nicht möglich [49]. Aufgrund der fehlenden Verdampfungskühlung ergibt sich durch den Einsatz von Erdgas eine Verringerung des Liefergrades von bis zu 12 [%] im Vergleich zu einer Benzindirekteinspritzung [61]. In Tabelle 12 wird das CO<sub>2</sub>-Minderungspotential basierend auf die Abkühlung des Gemisches mit Hilfe von der Verdampfungsenthalpie der untersuchten Kraftstoffe dargestellt.

	Benzin	Ethanol	LPG	1-Butanol	Methanol
Verdampfungswärme [kJ/kg]	350	904	395	583	1100
CO <sub>2</sub> -Red.	Basis	erheblich	gemäßigt	gut	erheblich

**Tabelle 12:** CO<sub>2</sub>-Minderungspotential durch eine Abkühlung aufgrund der Verdampfungswärme im Vergleich zum Benzin

### 3.4. Zündgrenzen

Unter den Zündgrenzen versteht man ein Intervall von einem Luft-Kraftstoff-Verhältnis, in dem sich das Gemisch entflammen kann. Dieses Intervall wird mit der unteren und der oberen Zündgrenze begrenzt. Der herkömmliche Ottokraftstoff weist einen zündfähigen Bereich zwischen  $\lambda = 0,4$  und  $\lambda = 1,4$  auf. Durch die Verwendung von reinem Ethanol kann die Zündung des Gemisches zwischen  $\lambda = 0,3$  bzw. sogar  $\lambda = 2,1$  erfolgreich durchgeführt werden. Diese verbesserte Magerbrennfähigkeit von Ethanol kann den CO<sub>2</sub>-Ausstoß signifikant beeinflussen. Durch die erhöhten Lambda-Werte findet die Verbrennung im Magerbereich statt, in dem die erreichbare Effizienz im Vergleich zum Luftmangelbereich deutlich höher liegt. Dies ergibt eine zusätzliche Reduzierung der während der Verbrennung entstehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen [40]. Erdgas weist ähnlich wie reines Ethanol eine verbesserte Magerbrennfähigkeit auf. Dies kann wie beim Ethanol auf die höhere laminare Flammgeschwindigkeit in mageren Gemischen zurückgeführt werden [50]. In Abbildung 12 ist die Abhängigkeit der laminaren Brenngeschwindigkeit von der Luftzahl ( $\lambda$ ) illustriert [61].



**Abbildung 12:** Abhängigkeit der laminaren Brenngeschwindigkeit vom Lambda [61]

Die Zündung des Gemisches kann mit Luftverhältnissen zwischen  $\lambda = 0,7$  und  $\lambda = 2,1$  implementiert werden [46]. Obwohl die Eignung von Flüssiggas zum

überstöchiometrischen Betrieb im Vergleich zum Benzin geringfügig besser ist, liegt der erreichbare maximale Wert von dem Luftverhältnis nur bei etwa  $\lambda = 1,7$  [41, 88]. Dies hat zur Folge, dass die erzielbare Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen aufgrund der geänderten Zündgrenzen durch den Einsatz von Flüssiggas im Vergleich zum Ethanol oder Erdgas niedriger ist. Diese gleiche Aussage gilt auch für die Betriebsweise der Verbrennungskraftmaschine mit 1-Butanol, da diese Alternative ähnliche Zündgrenzen besitzt [80]. Demgegenüber ist der Einsatz von Methanol in Bezug auf die Absenkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen aufgrund der hervorragenden Eignung zum Betrieb im Luftüberschuss bemerkenswert [85]. Das CO<sub>2</sub>-Minderungspotential in Abhängigkeit der verbesserten Magerbrennfähigkeit durch die Verwendung von Kraftstoffalternativen wird in Tabelle 13 zusammengefasst.

	Benzin	Ethanol	CNG	LPG	1-Butanol	Methanol
<b>Zündgrenzen <math>\lambda</math></b>	0,4 - 1,4	0,3 - 2,1	0,7 – 2,1	0,4 - 1,7	0,45 – 1,7	0,34 – 2,0
<b>CO<sub>2</sub>-Red.</b>	Basis	erheblich	erheblich	gemäßigt	gemäßigt	erheblich

**Tabelle 13:** CO<sub>2</sub>-Minderungspotential durch verbesserte Magerbrennfähigkeit

### 3.5. Zusammenfassung der Auswirkungen von kraftstoffseitigen Maßnahmen auf den CO<sub>2</sub>-Ausstoß

Schließlich werden die in diesem Kapitel der Arbeit vorgestellten und analysierten Eigenschaften und die daraus ergebenden Auswirkungen auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen von verschiedenen Kraftstoffalternativen für zukünftige Ottomotoren zusammengefasst und basierend auf das erzielbare CO<sub>2</sub>-Minderungspotential miteinander verglichen. In Tabelle 14 ist die Evaluierung des möglichen CO<sub>2</sub>-Einsparpotentials von alternativen Kraftstoffen dargestellt. Dabei beziehen sich die Angaben auf den Vergleich mit dem konventionellen Benzin.

	Ethanol	CNG	LPG	1-Butanol	Methanol
<b>Klopffestigkeit</b>	+	++	++	0	++
<b>H/C Verhältnis</b>	+	++	++	+	++
<b>Verdampfungswärme</b>	++	-	+	+	++
<b>Magerbrennfähigkeit</b>	++	++	+	+	++

**Tabelle 14:** CO<sub>2</sub>-Minderungspotential aufgrund der geänderten Eigenschaften von alternativen Treibstoffen ( ++ deutlich besser, + besser, 0 neutral, - schlechter)

## **4. Kombinierte Verbesserungspotentiale bei Motor und Kraftstoff**

Die Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen stellt nach wie vor die entscheidendste Rolle weltweit bei der Auslegung von zukünftigen Fremdzündungsmotoren in der Automobilindustrie dar. Zentrale Aufgabe der Ingenieure bei der Entwicklung des Antriebstranges ist es, die vorgeschriebenen Vorgaben in Bezug auf die verschärften Zielwerte von Kohlenstoffdioxidemissionen ohne Begrenzung von Fahrspaß sowie Reichweite der Verbrennungskraftmaschine zu erfüllen. Im folgenden Teil der Arbeit wird eine umfangreiche Literaturrecherche hinsichtlich der kombinierten motorseitigen und kraftstoffseitigen Verbesserungspotentiale des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes an Ottomotoren durchgeführt und bewertet.

### **4.1. Effekte von Ethanolkraftstoffen auf den Fahrzeugbetrieb**

#### **Stand der Technik**

Heutige ausgezeichnete Downsizing-Konzepte bei Ottomotoren sind immer mit Kraftstoffdirekteinspritzung und Aufladung kombiniert. Durch die Nutzung dieser Maßnahmen werden optimierte Anpassungsmöglichkeiten bezüglich der Leistung, des Wirkungsgrades sowie der Emissionen der Kraftmaschine erreicht. Wie bereits erwähnt, ist die Verringerung des Hubraums durch Aufrechterhalten der Motorleistung eine gut etablierte Maßnahme zur signifikanten Milderung des Kraftstoffverbrauchs und der daraus ergebenden Emissionen an Kohlenstoffdioxid. Da bei solchen Konzepten das gleiche abgegebene Drehmoment erforderlich ist, wird der Ladedruck angehoben, um den reduzierten Hubraum zu kompensieren. Durch den Einsatz von Downsizing mittels Aufladung wird die Lage der Betriebspunkte von Verbrennungskraftmaschinen in einen günstigeren Bereich des Kennfeldes verschoben. In diesem Bereich erhöht sich der Wirkungsgrad der Verbrennung und gleichzeitig sinken Wärme- sowie Reibungsverluste ab. Simultan kann mit Hilfe von dem sogenannten Downspeeding eine verlängerte Getriebeübersetzung angepasst werden, das den Betrieb meistens bei niedrigen Drehzahlen und damit im verbrauchsgünstigeren Kennfeldbereich ermöglicht. Durch die Verwendung von diesen Maßnahmen ist es möglich, die CO<sub>2</sub>-Emissionen im unteren Lastbereich maßgeblich zu vermindern.

Aber wie bereits in dem ersten Kapitel der Arbeit diskutiert wurde, tritt bei solchen Konzepten häufig eine unerwünschte klopfende Verbrennung besonders in höherlastigen Zyklen auf. Dies führt dazu, dass die Vermeidung von abnormaler Verbrennung mit Hilfe

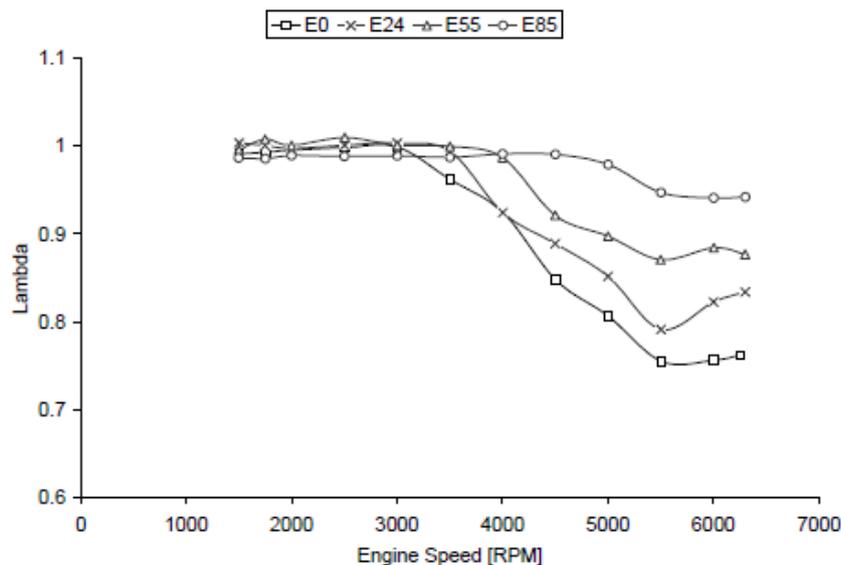
von zusätzlichen Technologien unverzichtbar ist. Zwei bekannte Strategien für Ottomotoren die mit herkömmlichem Benzin betrieben werden, sind vor langer Zeit auf dem Markt vorhanden. Einerseits kann die Verbrennungsschwerpunktlage bewusst nach spät verschoben werden. In diesem Fall muss man auf einer wirkungsgradoptimalen Anpassung der Zündung auch verzichten. Aufgrund dieser Maßnahmen werden sowohl die Effizienz der Verbrennung als auch die CO<sub>2</sub>-Emissionen negativ beeinflusst. Andererseits ist es möglich, durch den Anstieg der Menge an in den Zylinder zugeführten Kraftstoffes die maximale Geschwindigkeit der Verbrennung einzuschränken. Bei aufgeladenen Motoren die mit Benzin betrieben werden, ist im oberen Lastbereich ab einer bestimmten Drehzahl aus Bauteilschutzgründen eine Kraftstoffanreicherung notwendig, um den Turbolader bzw. die Turbine von zu hohen Temperaturen schonen zu können. Durch die Applikation von einer Kraftstoffanreicherung werden die Abgastemperaturen gleichzeitig gesenkt.

Obwohl die oben aufgeführten Maßnahmen zur Verminderung der Klopfneigung führen, ergeben sich eine Erhöhung des Kraftstoffverbrauches und die damit einhergehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen. Diese Nachteile führen dazu, dass weitere Alternativen unbedingt erforderlich sind, um die Klopfneigung zu verringern.

Eine interessante Lösung ist selbst die Betriebsweise der Verbrennungskraftmaschine mit verschiedenen Ethanol Mischungen. Wie bereits erwähnt, erhöhen sich sowohl die Leistung als auch das Drehmoment des Aggregats durch die Beimischung von Ethanol in Ottokraftstoffen. Grund dafür ist einerseits die mit zunehmendem Anteil an Ethanol in Benzin steigende Oktanzahl, die zu einer höheren Klopfestigkeit der eingesetzten Mischung führt. Aufgrund der verbesserten Klopfestigkeit kann die Verbrennungskraftmaschine mit einem drehmomentoptimalen Zündwinkel betrieben werden. Aus diesen Gründen ist es möglich, das geometrische Verdichtungsverhältnis erheblich anzusteigen. Beachtliche Verbesserungen bezüglich der Effizienz der Verbrennung sowie des Kohlenstoffdioxidausstoßes ergeben sich aus dieser Modifikation, da der thermische Wirkungsgrad des Gleichraumprozesses in erster Linie von dem Verdichtungsverhältnis des Verbrennungsmotors abhängt.

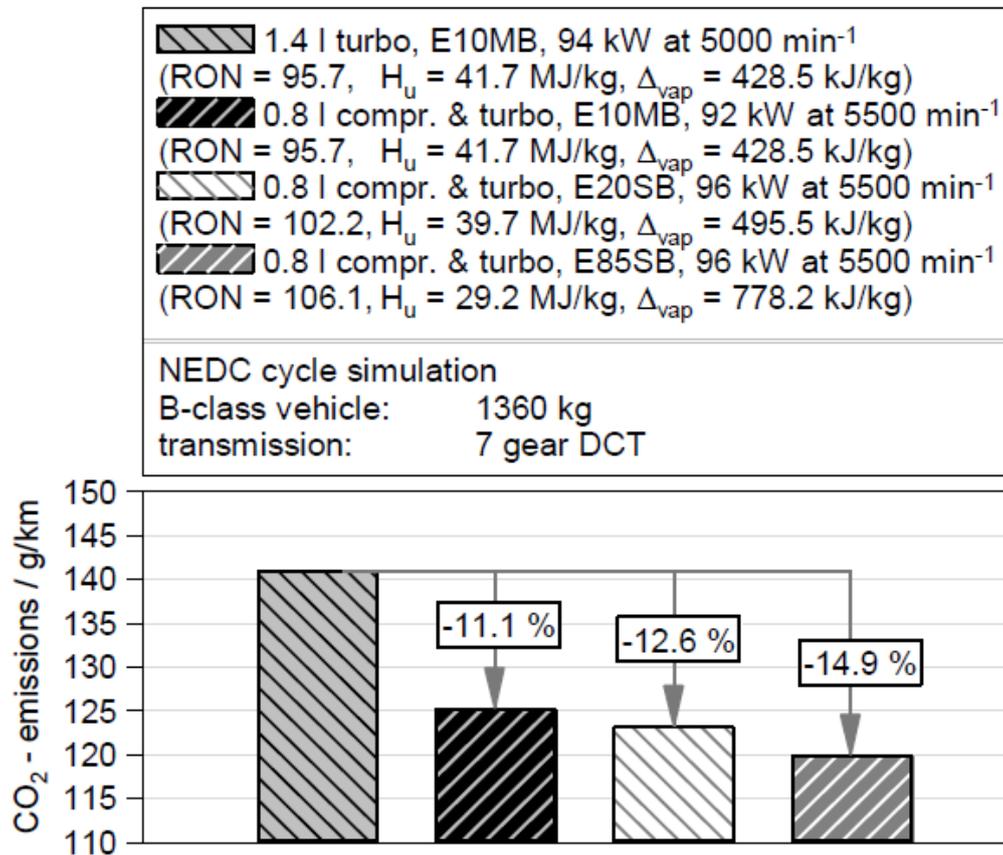
Andererseits ergibt sich durch die höhere Verdampfungsenthalpie von Ethanol im Vergleich zum Benzin eine verbesserte Kühlung des eingesetzten Gemisches. Dies führt zu einem zusätzlichen Anstieg der Dichte des im Brennraum vorhandenen Gemisches, was einen positiven Einfluss auf die Zylinderfüllung aufweist.

Aufgrund der höheren Verdampfungsenthalpie von Ethanol im Vergleich zum Benzin nimmt die Temperatur des Luft-Kraftstoff-Gemisches im Brennraum stärker ab. Besonders bei höheren Lastbereichen ermöglicht der Betrieb mit Ethanol Blends wesentlich verbesserte Charakteristik des Verbrennungsprozesses, da eine wie beim Betrieb mit konventionellem Benzin notwendige Kraftstoffanreicherung meistens gar nicht oder nur geringfügig erforderlich ist. Aus diesem Grund ist eine stöchiometrische Verbrennung über einen vergrößerten Bereich der Motordrehzahl erlaubt. Je höher der Ethanolgehalt im Kraftstoff ist, desto weniger weicht die Luftzahl von dem optimalen Wert ( $\lambda = 1$ ) ab. Bei Mischungen mit sehr hohem Ethanolanteil können Luft/Kraftstoff Verhältnisse bei mittleren bis höheren Lasten fast über den gesamten Drehzahlbereich in der Nähe von dem stöchiometrischen Wert bleiben. In [Abbildung 13](#) ist die Abhängigkeit der Luftzahl an der Vollast vom Ethanolgehalt im Kraftstoff über den gesamten Drehzahlbereich bei einem aufgeladenen, direkteinspritzenden Ottomotor dargestellt [62].



**Abbildung 13:** Abhängigkeit der Luftzahl vom Ethanolanteil [62]

[Abbildung 14](#) zeigt das erreichbare CO<sub>2</sub>-Verminderungspotential durch die Verwendung von unterschiedlichen Ethanol Mischungen an einem extrem „downsized“ Motor mit Aufladung anhand dem Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ). Da der Basismotor einen schon verkleinerten Hubraum sowie Abgasturboaufladung aufweist, sind die ergebenden Verbesserungen hinsichtlich der Treibhausgasemissionen durch die Betriebsweise der Verbrennungskraftmaschine mit Ethanol Blends nicht so spektakulär [39].



**Abbildung 14:** CO<sub>2</sub>-Minderungspotential durch Downsizing und Ethanol Mischungen [39]

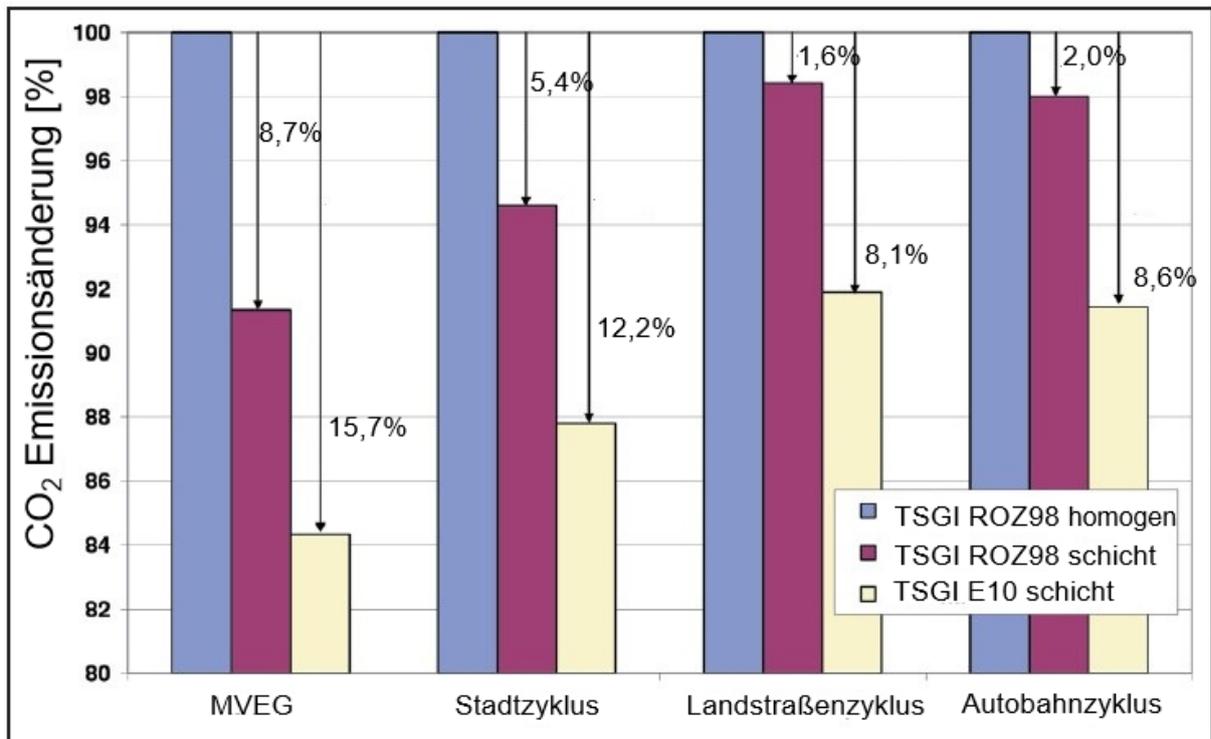
### Zukünftige vielversprechende Konzepte, die sich noch nicht in der Serie befinden

Die bisher kurz vorgestellten kombinierten Maßnahmen um den thermodynamischen Wirkungsgrad und dadurch die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Fahrzeuges mildern zu können, gehören in der heutigen Welt zum Stand der Technik. Um die strengen Abgasgesetzgebungen in den nächsten Jahren reibungslos erfüllen zu können, sind weitere, hochentwickelte motor- und kraftstoffseitige Technologien erforderlich.

### Optionen im unteren Lastbereich

Die strahlgeführte Ethanol-Direkteinspritzung ist eine geeignete Maßnahme zur signifikanten Milderung des Kraftstoffverbrauchs sowie des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes in unteren Lastkollektiven. Besonders attraktiv ist die Kombination von strahlgeführtem Brennverfahren mit Schichtladung und Downsizing durch Aufladung. Wie bereits erwähnt, bringt den größten Vorteil der Ladungsschichtung unter Teillastbedingungen. Bei Fahrzyklen, die niedrigeren Belastungen beinhalten, wie z.B. das ehemalige Motor Vehicle Emissions Group (MVEG) oder ein durchschnittlicher Stadtzyklus sind die Verbesserungen an erzielten CO<sub>2</sub>-Emissionen wesentlich größer. Im Gegensatz dazu, ist die Anpassung von einer Ladungsschichtung bei höheren Lasten nicht mehr möglich.

Aus diesem Grund nimmt der Vorteil der Schichtladung unter anderem auf der Autobahn ab, da die Anforderungen an Energie nur durch stöchiometrischem Betrieb erfüllt werden können. Abbildung 15 zeigt das erreichbare CO<sub>2</sub>-Verminderungspotential von der Ladungsschichtung in Kombination mit Aufladung und diversen Kraftstoffen an einem 2,0l TSGI Verbrennungsmotor bei verschiedenen Lastbedingungen [63].



**Abbildung 15:** CO<sub>2</sub>-Minderungspotential durch Ladungsschichtung in Kombination mit Aufladung und diversen Kraftstoffen [63]

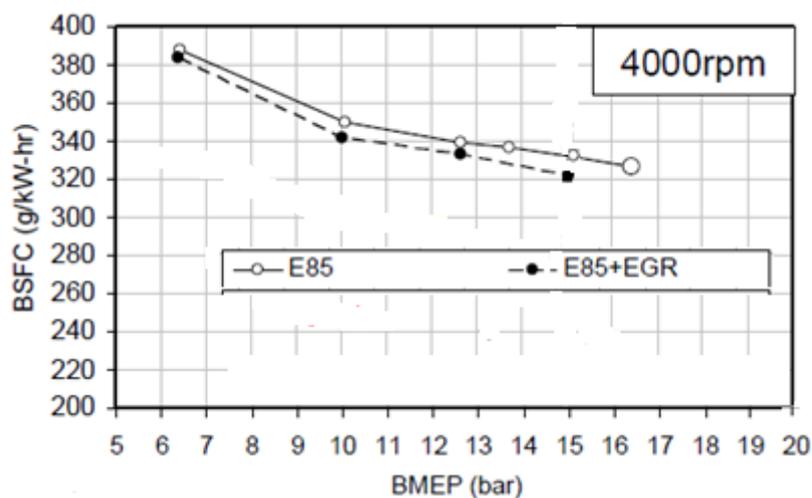
Es ist gut sichtbar, dass durch den Einsatz von einer Ethanol Mischung, die nur einen niedrigen Anteil an Ethanol besitzt (10 [%] Ethanol, 90 [%] Normalbenzin) zusammen mit einer Ladungsschichtung signifikante Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Vergleich zum homogenen Betrieb an dem gleichen aufgeladenen Motor möglich ist. Das Minderungspotential von diesen kombinierten Technologien würde mit zunehmendem Prozent an Alkohol in der Kraftstoffmischung weiter ansteigen.

### Alternativen im höheren Lastbereich

Insbesondere unter erhöhten Belastungen bietet sich die gleichzeitige Verwendung von gekühlter Abgasrückführung und Ethanol-Mischungen eine interessante Maßnahme an, um die CO<sub>2</sub>-Emissionen weiter zu reduzieren. Die Gründe dafür sind einerseits, dass Ethanol-Mischungen im Vergleich zum Normalbenzin höhere Research Oktanzahl aufweisen und zur Verminderung der Abgastemperaturen führen. Wie bereits in dem ersten Kapitel der Arbeit diskutiert wurde, führt der Einsatz von gekühlter

Abgasrückführung (AGR) zusätzlich zur Verbesserung der Klopfestigkeit des Treibstoffes. Mit Hilfe von einer gekühlten AGR kann die Klopf tendenz aufgrund einer Ladungsverdünnung und einer erhöhten Wärmekapazität der eingeführten Ladung deutlich verbessert werden. Die erhöhte Wärmekapazität der Abgas-Luft-Mischung im Vergleich zur reinen Luft führt zur Absenkung der Spitztemperatur des Verbrennungsvorganges und des Abgases. Dies hat zur Folge, dass sich die Klopfneigung mit erhöhter Abgasrückführ rate signifikant verringert. Außerdem sind die Wandwärmeverluste aufgrund der niedrigeren Temperaturen überall im Zylinder geringer, was einen positiven Einfluss auf den Wirkungsgrad mit sich bringt [64].

Abbildung 16 illustriert, wie die kombinierte Applikation von Abgasrückführung mit Ethanol Mischungen den Kraftstoffverbrauch beeinflusst. Es ist aus dem Bild gut ablesbar, dass die simultane Nutzung von beiden Alternativen den Kraftstoffverbrauch und dadurch die damit einhergehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen weiter reduzieren kann [66].



**Abbildung 16:** Der Einfluss von E85 und Abgasrückführung auf den Kraftstoffverbrauch [66 (leicht modifiziert)]

Aufgrund der gerade aufgeführten Vorteile der gleichzeitigen Betriebsweise der Verbrennungskraftmaschine mit Abgasrückführung und Ethanol Mischungen ist es möglich, das geometrische Verdichtungsverhältnis signifikant anzuheben. Dadurch erreicht die analysierte aufgeladene Verbrennungskraftmaschine ein Verdichtungsverhältnis von  $\epsilon=11,5$ , was dem heutigen Stand der Technik bei konventionellen Saugmotoren entspricht. Diese Erhöhung der Verdichtung ergibt hohe Potentiale in Bezug auf die Effizienz des Verbrennungsvorganges bei Ottomotoren die mit Aufladung ausgestattet sind. Tabelle 15 demonstriert die günstige Auswirkung von dem kombinierten Einsatz dieser Technologien auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) an einem aufgeladenen 2,0 l Ottomotor im Vergleich

zur Basisvariante [65]. Der aufgeladene Referenzmotor der vorgestellten Untersuchung besitzt den gleichen Hubraum sowie einen Verdichtungsverhältnis von 9,5, und wird mit Normalbenzin anstelle einer Ethanol-Mischung betrieben.

	AGR + $\epsilon=11,5$ + ROZ95	AGR + $\epsilon=11,5$ + E85
<b>Simulation</b>	6,7	16,7
<b>Prüfstand</b>	7,1	16,1

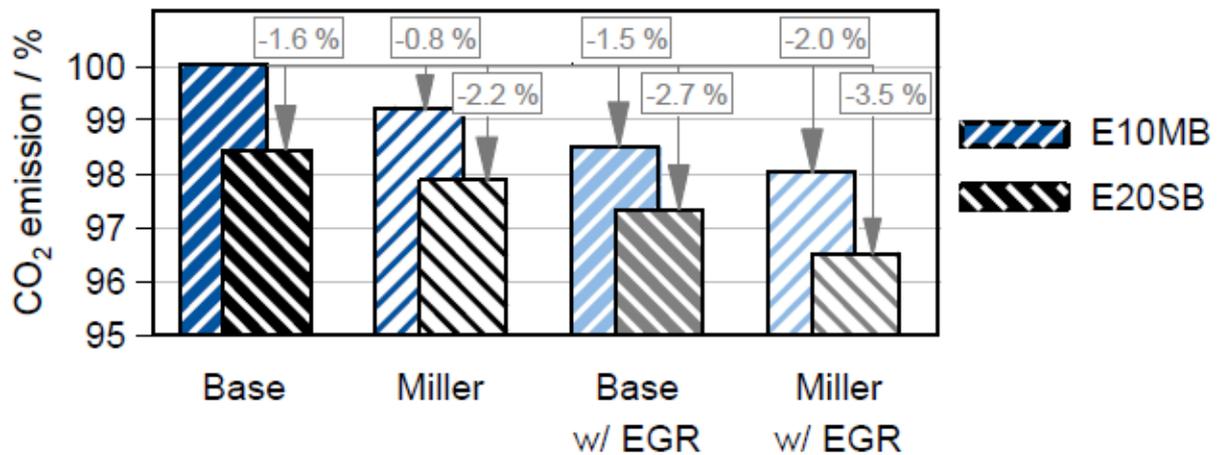
**Tabelle 15:** CO<sub>2</sub>-Minderungspotential [%] durch AGR in Kombination mit Aufladung und erhöhtem Verdichtungsverhältnis für diversen Kraftstoffen [65]

Tabelle 15 macht es deutlich, dass sich durch den Einsatz von E85 (85 [%] Ethanol und 15 [%] Normalbenzin) an einem aufgeladenen Motor, der zusätzlich mit Abgasrückführung ausgerüstet ist, an CO<sub>2</sub>-Emissionen signifikante Verminderungen ergeben. Durch den Betrieb der modifizierten Verbrennungskraftmaschine mit herkömmlichem Benzin (ROZ95) anstelle E85, liegt die mögliche Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes um etwa 10 [%] niedriger im Vergleich zum Betrieb mit Alkohol. Diese Resultate betonen, dass die kombinierte Verwendung von Abgasrückführung und Ethanol Mischungen an einem für den Betrieb mit ethanolhaltigen Kraftstoffen ausgelegten Motor eine zukunftssträchtige Technologie ist, womit der CO<sub>2</sub>-Ausstoß weiter zu verbessern ist.

Eine weitere vielversprechende Kombination ist die Applikation vom Miller-Zyklus zusammen mit Abgasrückführung und Ethanol-Mischungen an einer hochaufgeladenen Verbrennungskraftmaschine. Das Miller Verfahren kann durch eine Verringerung des Verdichtungsverhältnisses die Klopfempfindlichkeit vermindern. Die endgültige Kompressionstemperatur sowie die Temperatur während des gesamten Zyklus können bei dieser Variante dadurch wesentlich abgesenkt werden. Grund dafür ist die Ableitung der während der Kompressionsarbeit entstehenden Wärme in die Ladeluftkühler. Die Ausführung dieser Technologie wird durch ein vergrößertes Expansionsverhältnis im Vergleich zum Verdichtungsverhältnis implementiert. Dies kann entweder durch ein frühes Schließen des Einlassventils (EIVC) oder ein spätes Schließen des Einlassventils (LIVC) erfolgt werden [64].

Die verbesserte Klopfestigkeit durch die gleichzeitige Verwendung vom Miller-Zyklus und Abgasrückführung sowie Ethanol-Mischungen erlaubt eine wirkungsgradoptimale Anpassung des Zündzeitpunktes. Die frühere Zündung führt zur Steigerung des thermodynamischen Wirkungsgrades und dadurch zur Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes. Abbildung 17 zeigt das CO<sub>2</sub>-Minderungspotential von unterschiedlichen Kombinationen

der oben erwähnten Maßnahmen im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) an einem aufgeladenen Ottomotor [64]. Die Auswirkungen der verschiedenen Ethanol-Mischungen (E10MB und E20SB) sowohl mit und ohne Abgasrückführung, beziehungsweise Miller-Zyklus, als auch die Kombination mit Miller-Zyklus und AGR, hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Emissionen werden ohne Anhebung des Verdichtungsverhältnisses miteinander verglichen. Durch den Einsatz von E20SB ergeben sich aufgrund der verbesserten Kraftstoffigenschaften stetig günstigere Werte im Vergleich zum E10MB Kraftstoff.



**Abbildung 17:** CO<sub>2</sub>-Minderungspotential [%] der unterschiedlichen Kombinationen [64]

Das höhere Maß der Entdrosselung durch den Betrieb der Verbrennungskraftmaschine mit gekühlter Abgasrückführung führt im untersuchten Testzyklus (NEFZ) zur erhöhten Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Vergleich zum Miller-Zyklus. Es wird erwartet, dass durch eine Verschiebung der Betriebspunkte in Richtung erhöhte Belastungen, der Vorteil von Abgasrückführung im Vergleich zum Miller-Zyklus zunehmend schwinden würde. Die Kombination beider Technologien (Abgasrückführung und Miller Steuerzeiten) kann die Vorteile der einzelnen motorseitigen Maßnahmen nicht summieren, trotzdem bringt sie eine weitere Reduzierung der Treibhausgasemissionen mit sich. Wie bereits erwähnt, wurde das geometrische Verdichtungsverhältnis bei diesem Test nicht angehoben. Aus diesem Grund sind die erzielbaren Verbesserungen in Bezug auf den CO<sub>2</sub>-Ausstoß gemäßigt. Man kann davon ausgehen, dass durch eine angemessene Anpassung des Verdichtungsverhältnisses zusätzliche Reduzierungen von Treibhausgasemissionen realisierbar wären.

## 4.2. Einfluss von Erdgas auf den Fahrzeugbetrieb

Wie bereits erwähnt, ist Erdgas (CNG) eine besonders attraktive Kraftstoffalternative, die hohes Potential zur CO<sub>2</sub>-Absenkung aufweist. Die Gründe dafür sind einerseits das im

Vergleich zum Benzin signifikant günstige H/C Verhältnis. Dadurch lassen sich die Treibhausgasemissionen selbst aufgrund der vorteilhaften Kraftstoffeigenschaften um sogar 25 [%] reduzieren. Andererseits spielt die verbesserte Klopffestigkeit von Erdgas (ROZ=130) eine bemerkenswerte Rolle bei dem weiteren Erreichen einer Milderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Dadurch ist es möglich, das geometrische Verdichtungsverhältnis der Verbrennungskraftmaschine erheblich zu erhöhen. Verdichtungsverhältnisse von  $\epsilon=14$  sind für Erdgasmotoren, die mit Saugrohreinspritzung ausgestattet sind, sogar möglich [42]. Diese Merkmale führen zur beachtlichen Steigerung des thermodynamischen Wirkungsgrades, die dementsprechend den CO<sub>2</sub>-Ausstoß positiv beeinflusst. Mit einem aufgeladenen Erdgasmotor, der einen Hubraum von 1,0 [L] besitzt, lässt sich eine um etwa 30 [%] niedrigere Menge an emittiertem CO<sub>2</sub> im Vergleich zu einem herkömmlichen 1,4 [L] Benzin-Saugmotor im Neuen Europäischen Fahrzyklus erreichen [67]. Im Vergleich zu großvolumigen, konventionellen Benzin-Saugmotoren können aufgeladene Erdgasmotoren um sogar 40 [%] CO<sub>2</sub>-Absenkungen mit sich bringen [68, 70]. Diese deutlichen Verbesserungen ergeben sich durch den Einsatz von Downsizing mit Aufladung zusammen mit Erdgas-Saugrohreinspritzung, ohne Kombination mit zusätzlichen motorseitigen Maßnahmen. Im Folgenden wird die erzielbare Reduzierung von Treibhausgasemissionen an aufgeladenen Erdgasmotoren mit Hilfe von vielversprechenden motorseitigen Technologien bewertet.

### **Optionen bei niedrigeren Lasten**

Da die Zündgrenzen von Erdgas im Vergleich zum Normalbenzin viel weiter sind, bietet sich das strahlgeführte Magerbrennverfahren für Erdgasmotoren zur weiteren Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen als eine interessante Alternative an. Durch die Betriebsweise der Verbrennungskraftmaschine mit Luftüberschuss wird die Ladung verdünnt, was insbesondere bei geringeren Lasten zu erheblichen Potentialen führt. Dies ergibt unter anderem eine Absenkung der Ladungswechselverluste, die besonders in der Teillast ein Schlüsselfaktor sind. Aufgrund der verbesserten Fähigkeit von Erdgas zur Homogenisierung des Gemisches im Vergleich zum konventionellen Ottokraftstoff, bringt die Betriebsweise der Verbrennungskraftmaschine mit CNG hinsichtlich der Reduzierung der Treibhausgasemissionen zusätzlich weitere Vorteile mit sich [42].

Zur erfolgreichen Durchführung eines strahlgeführten Magerbrennverfahrens ist es notwendig, den Kraftstoff direkt in den Brennraum einzuführen. Dadurch ist es möglich, die gewünschte Ladungsschichtung bei geringeren Belastungen im Zylinder sicherzustellen. Bei dieser Technologie wird ein zündfähiges Gemisch nur um die

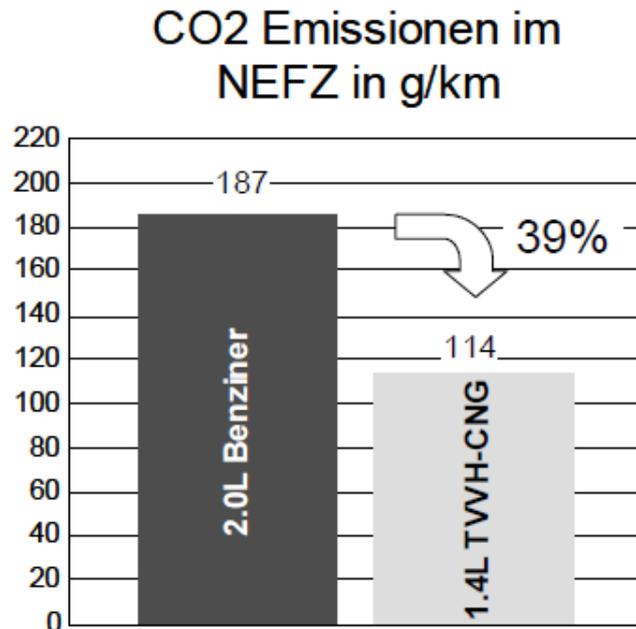
Zündkerze gewährleistet. Im Gegensatz dazu befindet sich im verbleibenden Teil des Brennraums Luftüberschuss also Kraftstoffmangel, was zur geringeren Wandwärmeverluste führt. Durch den Ersatz von aktuellen Saugrohrenblasung mit Direkteinspritzung bei Erdgasmotoren nimmt die Effizienz der Verbrennung um 0,5 bis 1 [%] über einen großen Teil des Drehzahlbereiches zu. Grund dafür ist hauptsächlich die durch den Übergang von Saugrohrenblasung auf Direkteinspritzung ergebende Erhöhung des Liefergrades und der Zylinderfüllung [32]. Dies ermöglicht einen thermodynamischen Wirkungsgrad von zirka 35,5 [%], was um 3,5 [%] höher im Vergleich zur heutigen Benzindirekteinspritzung liegt. Basierend auf der verbesserten Effizienz der Verbrennung durch den Einsatz von Erdgasdirekteinspritzung verringert sich dementsprechend der CO<sub>2</sub>-Ausstoß geringfügig [69].

Durch den Betrieb der Verbrennungskraftmaschine mit der strahlgeführten Erdgasdirekteinspritzung in Kombination mit Aufladung lassen sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen um sogar 40 [%] im Vergleich zu den stöchiometrischen Saugrohr-Ottomotoren reduzieren [68]. Grundsätzlich kann man sagen, dass ein strahlgeführtes Erdgasbrennverfahren im Vergleich zum stöchiometrischen Erdgasbetrieb einen CO<sub>2</sub>-Vorteil von 8-10 [%] aufweist [42, 70, 71].

Um das volle Potential von einem strahlgeführten Erdgasbrennverfahren mit Aufladung in Bezug auf die erzielbare CO<sub>2</sub>-Einsparung im unteren Lastbereich auszuschöpfen, bietet sich die Kombination von einem entdrosselten Motorbetrieb durch Verdünnung der Ladung und von einer Anhebung des geometrischen Verdichtungsverhältnisses als eine insbesondere attraktive Lösung an. Mit Hilfe von solchen Konzepten lassen sich die CO<sub>2</sub>-Verminderungen um etwa 35-45 [%] in Abhängigkeit von der Fahrzeuggröße im Vergleich zu einem stöchiometrischen Betrieb mit Normalbenzin im Neuen Europäischen Fahrzyklus ergeben [42, 68, 70, 124].

Eine zusätzliche zukunftssträchtige Technik-Kombination im Hinblick auf die Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen ist die Ausrüstung eines aufgeladenen Erdgasmotors mit vollvariabler Ventilhubsteuerung. Diese Erweiterung bringt zur Verbesserung des Wirkungsgrades und damit der Treibhausgasemissionen in erster Linie in der Teillast erhöhte Potentiale, da die Aufladung in diesem Betriebsbereich deren größte Vorteile aufweist. Die Applikation von einer vollvariablen Ventilhubsteuerung führt zur drosselfreien Laststeuerung und zu niedrigeren Ladungswechselverlusten in dem betrachteten Kennfeldbereich. Bei diesem Konzept wird der effektive Wirkungsgrad des untersuchten Fahrzeuges einen maximalen Wert von 39 [%] erreichen, welcher im

Vergleich zur direkteinspritzenden Selbstzündungsmotoren nur geringfügig niedriger liegt. Die positiven Auswirkungen von diesen Merkmalen bei einem 1,4 [L] „downsized“ Erdgasmotor mit hohem Verdichtungsverhältnis ergeben sich eine Absenkung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes um zirka 40 [%] im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) für ein Fahrzeug der Kompaktklasse, im Vergleich zu einem derzeitigen 2,0 [L] Ottomotor ähnlicher Leistung sowie ohne Aufladung [72]. Abbildung 18 zeigt einen Vergleich der Ergebnisse im NEFZ.



**Abbildung 18:** CO<sub>2</sub>-Minderungspotential [%] von Downsizing durch Kombination vom Erdgasbetrieb und von variabler Ventilhubsteuerung [72]

Da das Tankstellennetz von Erdgas zurzeit in Europa noch nicht völlig abgedeckt ist, bieten die verschiedenen Fahrzeughersteller für die Kunden meistens nur Bivalent-Konzepte an, die den Betrieb der Verbrennungskraftmaschine sowohl mit Benzin als auch mit Erdgas erlauben. Aus diesem Grund können normalerweise die Ingenieure die ausgezeichneten Eigenschaften von CNG bei der Auslegung des Antriebsaggregates nicht so vollständig ausschöpfen, wie es bei einem Monovalent-Konzept möglich wäre. Eine attraktive Alternative an diesen Motoren gerade im Hinblick auf Bivalenten-Anwendungen ist die Applikation von einer vollvariablen Verdichtung. Diese Technologie bietet die Gelegenheit zur individuellen Anpassung von Verdichtungsverhältnissen bei allen Belastungen für jeden verwendeten Kraftstoff an, sei es Benzin oder Erdgas. Dadurch ist es möglich, das Verdichtungsverhältnis bei nicht klopfbegrenzten niedrigen Lastbereichen signifikant anzuheben, um die CO<sub>2</sub>-Emissionen verringern zu können. Diese Maßnahme scheint aufgrund der verbesserten Kraftstoffeigenschaften von Erdgas

besonders bei dem CNG Betrieb die attraktivste Option zu sein. Wie bereits gesehen, nimmt der CO<sub>2</sub>-Ausstoß von einem aufgeladenen Erdgasmotor im Vergleich zu Saugrohr-Benzinmotoren sogar um zirka 30-35 [%] ab. Die Verwendung von einem variablen Verdichtungsverhältnis an einem aufgeladenen Erdgasmotor bietet noch deutlich höheres Potential zur CO<sub>2</sub>-Absenkung an. Dieser Vorteil würde sich mit ansteigenden Lastkollektiven z.B. im WLTC voraussichtlich schmälern, da sich die Klopfneigung der Kraftmaschine im mittleren und höheren Lastbereich verschlechtert, was eine Reduzierung des Verdichtungsverhältnisses erfordert.

### **Alternativen bei höheren Lasten**

Wie gerade gesehen, verringert sich die Menge an emittiertem CO<sub>2</sub> maßgeblich durch den Betrieb der Verbrennungskraftmaschine im strahlgeführten Brennverfahren. Diese Aussage gilt aber nur unter niedrigen Lasten, da sich die Vorteile einer Schichtladung mit erhöhten Belastungen signifikant verringern. Außerdem kann die Abgasnachbehandlung von diesen Motoren heutzutage nur mit teuren Maßnahmen vollständig erfüllt werden. Diese Hindernisse führen zusammen zu solchen Optionen, die ihre CO<sub>2</sub>-Absenkung unter stöchiometrischen Bedingungen auch sicherstellen können. Da eine stöchiometrische Verbrennung im Vergleich zum Magerkonzept normalerweise geringere Wirkungsgrade und höhere Abgastemperaturen mit sich bringt, stellt die Suche nach Technologien, die diese Nachteile verbessern können, neue Herausforderungen für die Automobilindustrie dar.

Bei höheren Lastkollektiven bietet sich zur Milderung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes die Kombination von Aufladung und einem variablen Ventiltrieb bei Erdgasmotoren auch als eine Alternative an. Aber die erzielbaren Verbesserungen sind im Vergleich zur Teillast niedriger. In diesem Fall können die Treibhausgasemissionen um 30-40 [%] am Motorprüfstand im Vergleich zur Basisvariante reduziert werden [72].

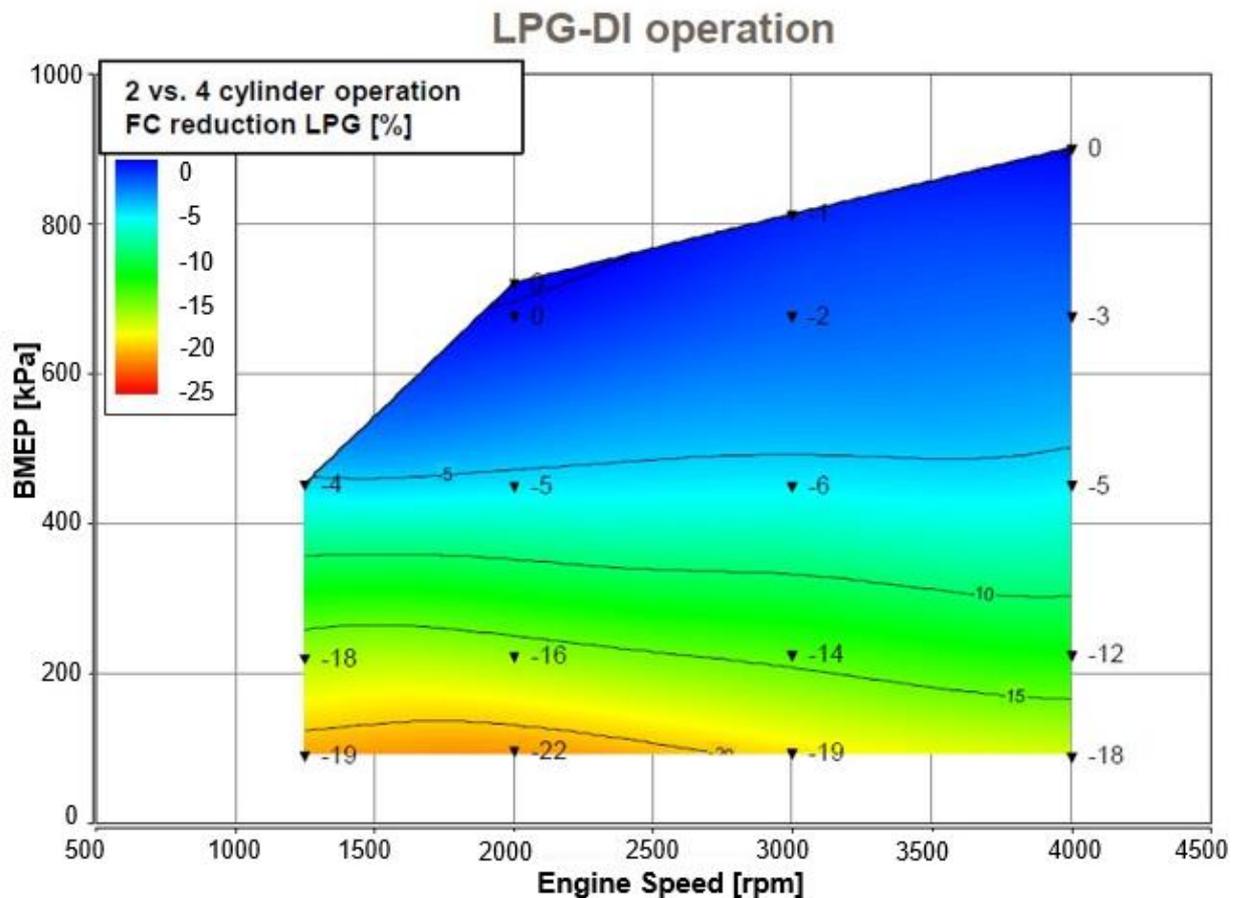
Eine interessante Option bei Erdgasmotoren in höherlastigen Zyklen ist die Anwendung von gekühlter Abgasrückführung (AGR). Durch die Variation der AGR-Rate kann der Zündzeitpunkt und damit die Schwerpunktfrage optimal angepasst werden, die bei herkömmlichen Ottomotoren insbesondere unter erhöhten Belastungen die einschränkenden Faktoren sind. Dies führt zu einem Anstieg des Wirkungsgrades, was den Kraftstoffverbrauch und die damit einhergehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen positiv beeinflusst. Gleichzeitig nehmen die Abgastemperaturen mit erhöhter AGR-Rate ab, die die Treibhausgasemission ebenfalls mildern. Diese Effekte bieten insbesondere bei

Gasmotoren erweiterte Möglichkeiten an, um die vorgeschriebenen Zielwerte erreichen zu können. Der Grund dafür ist wie bereits erwähnt, dass dieser Treibstoff verbesserte Klopfestigkeit im Vergleich zum herkömmlichen Benzin besitzt. Durch die Applikation von gekühlter Abgasrückführung an einem „downsized“ Erdgasmotor lässt sich unter stöchiometrischen Bedingungen eine CO<sub>2</sub>-Absenkung im Vergleich zu dem gleichen aufgeladenen Erdgasmotor um etwa 6-8 [%] zu erzielen [71]. Das CO<sub>2</sub>-Minderungspotential von einem gut ausgelegten  $\lambda=1$  Konzept mit gekühlter Abgasrückführung liegt gegenüber einem strahlgeführten Erdgasbrennverfahren, welches derzeit das höchste Potential aufweist, nur geringfügig niedriger [61].

#### **4.3. Verbesserungen durch die Verwendung von Flüssiggas im Fahrzeugbetrieb**

Eine vielversprechende Option in Bezug auf die Weiterentwicklung von Fahrzeugen mit Ottomotoren stellt Liquefied Petroleum Gas (LPG) dar. Heutige moderne Downsizing-Konzepte in Kombination mit Aufladung eignen sich hervorragend für den Einsatz von Betrieb mit Flüssiggas. Wie bereits erwähnt, ist der Hauptbestandteil von LPG das Propan, was im Vergleich zum herkömmlichen Benzin eine signifikant erhöhte Klopfestigkeit aufweist. Dies ergibt Potential, um den Kraftstoffverbrauch zu verringern. Dies erfolgt, einerseits durch die Anhebung des Verdichtungsverhältnisses, andererseits durch die Anpassung einer wirkungsgradoptimalen Schwerpunktlage des Verbrennungsmotors. Zusätzlich führt das erhöhte H/C-Verhältnis von LPG zu einer Reduzierung der emittierten CO<sub>2</sub>-Menge. Weiterer Vorteil von gasförmigen Kraftstoffen ist die verbesserte Gemischaufbereitung wegen der guten Verdampfungseigenschaften, die zur besseren Homogenisierung des Gemisches führt [86]. Die flüssige LPG-Direkteinspritzung ermöglicht die stöchiometrische Betriebsweise der Kraftmaschine sowie im mittleren als auch im höheren Lastbereich, die den Kraftstoffverbrauch und die CO<sub>2</sub>-Emissionen positiv beeinflusst. Dies kann hauptsächlich auf die verbesserte Reduzierung der Temperaturen im Brennraum mit LPG-Direkteinspritzung zurückgeführt werden. Außerdem ist es möglich, bei zukünftigen Ottomotoren mit Flüssiggas-Direkteinspritzung den kritischen Partikelaustritt signifikant zu verringern. Durch den Einsatz von LPG an einem aufgeladenen direkteinspritzenden Ottomotor wird der CO<sub>2</sub>-Ausstoß im NEFZ um etwa 24-27 [%] im Vergleich zu der Verwendung von Benzin reduziert [87].

Zusätzliche Verbesserungen der Treibhausgasemissionen können durch die Applikation von einer Zylinderabschaltung erreicht werden. Wie bereits erwähnt, bringt diese Technologie ihren größten Vorteil in der Teillast, da in diesem Bereich des Kennfeldes nicht die ganze Leistung des Aggregates erforderlich ist. Abbildung 19 zeigt das Kraftstoffverbrauchsverringierungspotential von oben genannten Kombinationen mit Zylinderabschaltung in Abhängigkeit von der Belastung.



**Abbildung 19:** Kraftstoffverbrauchsverringierungspotential in [%] der Zylinderdeaktivierung an einem aufgeladenen LPG-DI-Motor [48]

Wie bereits gesehen, ist der Einsatz von strahlgeführtem Magerbrennverfahren eine weitere interessante Maßnahme, die ihren größten Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Absenkung insbesondere im unteren Lastbereich anbietet. Aufgrund der verbesserten Magerbrennfähigkeit von Flüssiggas ist diese Technologie auch eine zukunftssträchtige Alternative bei Ottomotoren. Durch den Betrieb des Aggregates mit einer maximalen Zündgrenze von sogar  $\lambda = 1,7$  ist es möglich, die Effizienz der Verbrennung ansteigen und die damit einhergehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen maßgeblich zu mildern. Im Vergleich zu einem stöchiometrischen Benzin-Saugmotor wird der CO<sub>2</sub>-Ausstoß im NEFZ um 27 [%] verringert [88].

#### 4.4. Evaluierung der kombinierten Maßnahmen an Ottomotoren

Bis zu diesem Punkt der Arbeit werden kombinierte Alternativen bei Motor und Kraftstoff sowohl bei niedrigeren als auch bei höheren Lasten untersucht und basierend auf deren CO<sub>2</sub>-Minderungspotential kurz bewertet. Die Evaluierung des möglichen CO<sub>2</sub>-Einsparpotentials fokussiert sich im verbleibenden Teil der Arbeit nur auf die Bereiche des Verbrauchskennfeldes, die niedrige Lastkollektive erfordern. Der Grund dafür ist, dass die Automobilhersteller in Europa die emittierte Menge an CO<sub>2</sub> der einzelnen Fahrzeugvarianten in erster Linie anhand des Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) ermitteln und bekannt geben. In Tabelle 16 sind die erzielbaren CO<sub>2</sub>-Reduktionspotentiale von ausgewählten motor- und kraftstoffseitig kombinierten Maßnahmen für ein Kraftfahrzeug der Mittelklasse im Vergleich zu einem konventionellen Benzin-Saugmotor auf gleichem Leistungsniveau dargestellt.

		Kraftstoffoptionen					
		Ethanol	Erdgas	Flüssiggas	1-Butanol	Methanol	
Motorseitige Alternativen	Einzelmaßnahmen	Downsizing mit Aufladung	20-25	35-40	24-27	15-20	22-27
		Zylinderdeaktivierung	7-9	30-32	15-17	4-6	12-14
		Strahlgeführtes Magerbrennverfahren	17-22	37-40	26-28	13-16	18-23
		Verlängerte Expansion	6-8	29-31	14-16	3-5	11-13
		Variables Verdichtungsverhältnis (VCR)	9-11	32-34	17-19	6-8	13-15
		Externe gekühlte Abgasrückführung	6-7	28-29	13-14	2-3	10-11
		Reduzierung der Motor-Reibungsverluste	7-9	30-32	15-17	4-6	12-14
	Kombinationen	Thermomanagement	6-8	29-30	14-15	3-4	10-11
		Downsizing mit Aufladung + VCR	24-29	39-44	28-31	19-24	26-31
		Downsizing mit Aufladung + Verlängerte Expansion	22-27	37-40	26-29	17-22	24-29
		Downsizing mit Aufladung + Strahlgeführtes Magerbrennverfahren	30-35	45-50	34-37	25-30	32-37
		Strahlgeführtes Magerbrennverfahren + VCR	21-26	41-44	30-32	17-20	22-27
		Externe gekühlte Abgasrückführung + VCR	10-12	33-35	18-20	7-9	14-16
Externe gekühlte Abgasrückführung + Verlängerte Expansion	9-10	31-32	16-17	5-6	13-14		

**Tabelle 16:** Evaluierung des möglichen CO<sub>2</sub>-Einsparpotentials [%] bei Motor und Kraftstoff im NEFZ

Neben den positiven Auswirkungen von einzelnen motorseitigen Maßnahmen und alternativen Kraftstoffen auf die Treibhausgasemissionen, wird der Einfluss von bestimmten Motorenkombinationen durch den Betrieb mit verschiedenen Treibstoffoptionen auch bewertet.

Bei der Ermittlung der CO<sub>2</sub>-Minderungspotentiale von den in Tabelle 16 aufgeführten kombinierten motor- und kraftstoffseitigen Alternativen wurde die folgende Vorgehensweise in Betracht genommen:

- Die erzielbaren Potentiale von diversen Maßnahmen ergeben sich bei monovalenten Fahrzeugen (geeignet nur für den Betrieb mit dem jeweiligen alternativen Kraftstoff). Der Grund dafür ist, dass das volle Potential nur durch wirkungsgradoptimale Auslegung der Verbrennungskraftmaschine erreicht werden kann. Demgegenüber verringern sich die gegebenen Werte bei bivalenten Fahrzeugen (geeignet sowohl für den Betrieb mit Benzin als auch alternativem Treibstoff) geringfügig, da diese das theoretische Potential nicht vollständig ausschöpfen können.
- Basierend auf den Eigenschaften von diversen Treibstoffalternativen wie unter anderem die Klopfestigkeit und das H/C Verhältnis, wurde unter den untersuchten Kraftstoffen hinsichtlich der erzielbaren Absenkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen eine Reihenfolge aufgestellt.
- Unter der Zugrundelegung von im Neuen Europäischen Fahrzyklus auftretenden niedrigen Lastkollektiven, wurde der Einfluss von motorseitigen Maßnahmen auf den CO<sub>2</sub>-Ausstoß ausschließlich in diesem Bereich des Verbrauchskennfeldes analysiert. Die vorgestellten Technologien wurden dementsprechend eingestuft.
- Schließlich wurde die Eignung der verschiedenen Kraftstoffe bei den einzelnen motorseitigen Optionen berücksichtigt. Um nur einige zu nennen, spielte dabei die Klopfneigung oder die Magerbrennfähigkeit der untersuchten Treibstoffe eine dominierende Rolle.

Die folgenden Schlussfolgerungen lassen sich aus den Analysen ableiten:

- Es ist gut sichtbar, dass Erdgas allein aufgrund der ausgezeichneten Eigenschaften einen signifikanten Vorteil in Bezug auf Verminderungspotential im Vergleich zu den anderen Kraftstoffen aufweist. Dies führt dazu, dass durch die Verwendung von monovalenten CNG-Konzepten die höchsten Absenkungen des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes erreichbar sind.

- Das erhöhte H/C Verhältnis von Flüssiggas im Vergleich zum Methanol sowie Ethanol ergibt zusammen mit den ausgewählten motorseitigen Maßnahmen immer einen etwas größeren Beitrag zur Reduktion der unerwünschten CO<sub>2</sub>-Emissionen.
- Da die wichtigsten Kraftstoffeigenschaften von 1-Butanol im Vergleich zum Benzin nur geringfügig besser oder damit nur identisch sind, führt die Verwendung von dieser Alternative nur zu eingeschränkten Verbesserungen.
- Da die Verbrennungskraftmaschine meistens nur bei unteren Lasten betrieben wird, führt der Einsatz von motorseitigen Maßnahmen, die ihre größten Potentiale im unteren Lastbereich aufweisen, zu den besten Ergebnissen. Aus diesem Grund ist die Applikation von Downsizing-Konzepten sowie Schichtladungen an Ottomotoren eine vielversprechende Lösung, um die vorgeschriebenen Zielwerte erfüllen zu können. Zusätzlich besitzt ein variables Verdichtungsverhältnis insbesondere in dem nicht klopfbegrenzten Bereich des Kennfeldes ein hohes Potential.
- Durch die Kombination von den oben erwähnten Technologien mit zusätzlichen motorseitigen Maßnahmen, ergeben sich die größten Reduzierungen der CO<sub>2</sub>-Emissionen im NEFZ.

## **5. Kostenbewertung der unterschiedlichen Kraftstoffmöglichkeiten im Vergleich zum fossilen Kraftstoff**

Die Bewertungskriterien für die verschiedenen Treibstoffe sind aus Sicht der Autofahrer vielfältig. Der Ersatz von herkömmlichem Benzin an Ottomotoren durch alternative Kraftstoffe darf unter anderem keine Begrenzung bezüglich der Reichweite oder der Motorleistung des Fahrzeugs sowie keine Erhöhung der Kraftstoffpreise ergeben. Ausschlaggebend für die Verwendung alternativer Treibstoffe ist es also, dass die Kosten für deren Beschaffung im Vergleich zum herkömmlichen Benzin wettbewerbsfähig sind. Dies führt dazu, dass die heutigen Kraftstoffoptionen zahlreiche weitere Kriterien, wie z.B. wettbewerbsfähige Herstellungskosten, niedrige weitere finanzielle Investition in vorhandenes Infrastruktur oder reibungslose Beimischung zu konventionellen Kraftstoffarten auch gewährleisten sollen. Grundsätzlich kann man sagen, dass sich für die Kunden in Bezug auf die Nutzung und Kosten im Vergleich zu fossilen Treibstoffen nichts ändern darf, um das volle Potential zur kontinuierlichen Verbreitung auf dem Markt aufrechterhalten zu können [90]. In diesem Kapitel der Arbeit findet man eine einfache Kostenbewertung der diversen Kraftstoffmöglichkeiten bezüglich der Herstellungskosten im Vergleich zum konventionellen Benzin.

### **5.1. Ermittlung der Preise von Ethanol an der Tankstelle**

Zuallererst wird ein kurzer Überblick über die Gestaltung der einzelnen Treibstoffpreise an der Zapfsäule gezeigt, damit die Auswirkungen der relevanten Faktoren auf die endgültigen Kraftstoffpreise besser zu verstehen sind. Die Konsumpreise der alternativen Kraftstoffe hängen hauptsächlich von den Herstellungsländern und dem eingesetzten Herstellungsverfahren ab:

- Herstellungsverfahren
  - Rohmaterial
  - Technologie
  - Anlagengröße
- Herstellungsländer
  - Klimabedingungen
  - Besteuerung
  - Lohnpreise
  - staatliche Förderung
  - Transportkosten sowie Gebühren

Das eingesetzte Rohmaterial kann die Kosten signifikant beeinflussen. Die Herstellung von Ethanol (häufig als Bioethanol genannt) kann entweder durch die Verwendung von Biokraftstoffen der ersten oder Biokraftstoffen der zweiten Generation erfolgen. Bei den Biokraftstoffen der ersten Generation wird das Ethanol aus zucker- oder stärkehaltigen Pflanzen sowie Früchten gewonnen. In diesem Fall werden die applizierten Rohstoffe gleichzeitig zur Produktion von Nahrungsmitteln genutzt. Die großtechnische Produktion von Ethanol erfolgt heutzutage durch den Einsatz von Biokraftstoffen der ersten Generation, da die verwendete Technologie ausgereift ist.

Im Gegensatz dazu wird bei Biokraftstoffen der zweiten Generation nur solches Ausgangsmaterial appliziert, welches nicht auch zur Herstellung von Nahrungsmitteln verwendet wird. Dies ergibt sich, dass diese Kraftstoffe keine Konkurrenz für die Nahrungsmittelindustrie sind. Diese Technologie basiert auf der Umwandlung von Biomasse durch Hydrolyse und Fermentation zu Ethanol. Als Rohmaterial geht es in diesem Fall im Allgemeinen um zellulose- und lignozellulosehaltige Materialien. Dazu gehören unter anderem Stroh, Holz oder Grünabfälle.

Außerdem spielt die Größe der Anlage eine dominierende Rolle bei der Bestimmung von Kraftstoffkosten. Grundsätzlich kann man sagen, dass je größer die Kapazität des Betriebs ist, desto günstiger sind die Kosten der hergestellten Treibstoffe.

Wie bereits erwähnt, besitzt selbst das Herstellungsland einen signifikanten Einfluss auf die endgültigen Preise der Kraftstoffe. Wenn man die Produktionskosten von Ethanol unter Europa, Brasilien und den Vereinigten Staaten vergleicht, ist es gut sichtbar, dass Ethanol weltweit eine enorme Abweichung bezüglich der Herstellungskosten unter den verschiedenen Ländern aufweist. Die Produktion von Bioethanol erfolgt zurzeit in Europa meistens durch die Verwendung von Weizen oder Zuckerrüben als Ausgangsmaterial. Da die Flächenproduktivität von Zuckerrüben im Vergleich zum Weizen höher ist, entstehen geringfügig günstigere Entstehungskosten. Die Herstellungskosten für Bioethanol auf dem alten Kontinent werden in der Literatur mit etwa 45-55 Eurocent pro Liter angegeben.

Im Gegensatz dazu wird die Fertigung von Bioethanol in Brasilien im Allgemeinen aus Zuckerrohr durchgeführt. Die Produktionskosten für Ethanol aus Zuckerrohr im südamerikanischen Land betragen zirka 18-23 Eurocent pro Liter. Es ist ersichtlich, dass Brasilien allein aufgrund der günstigen Herstellungskosten enormes Potential im Vergleich zu den Wettbewerbern aufweist. Gründe dafür sind einerseits die jahrelange

Erfahrung in der Bioethanolproduktion, andererseits die signifikante Unterstützung seitens der Regierung. Zusätzlich wird die Bagasse als Energieträger eingesetzt, was die notwendigen Energiekosten während der Fertigung deutlich reduziert. Außerdem sind selbst die Rohstoffpreise im Vergleich zu den anderen Ländern niedriger. Die hervorragenden vorhandenen Bedingungen in der Herstellung von Bioethanol, wie die vorteilhafte klimatische sowie ökonomische Situation, gewährleisten in Brasilien weitere außergewöhnliche Kostenvorteile, mit den die anderen Ländern zurzeit nur geringfügig wettbewerbsfähig sind.

Die Produktion von Bioethanol erfolgt in den USA mit 30-35 Eurocent pro Liter auf Basis von Körnermais. Aufgrund unterschiedlicher staatlichen Förderung der Herstellungs- und Verarbeitungsprozesse sind die USA seit 2005 vor Brasilien der weltweit bedeutendste Bioethanolhersteller auf der Welt. Im Kontrast zu Brasilien spielt in den USA nicht der Export des Kraftstoffes, sondern der Ersatz des vorhandenen Oktanzahlverbessers die entscheidendste Rolle.

Die Besteuerung von Biokraftstoffen leistet einen zusätzlichen wichtigen Beitrag zur Bestimmung der endgültigen Kraftstoffpreise. In Deutschland waren diese Alternativen bis 2007 unbesteuert und damit wettbewerbsfähig gegenüber den herkömmlichen fossilen Kraftstoffen. In diesem Jahr wurde aber eine Mineralölbesteuerung vorgeschrieben. Um Bioethanol weiterhin konkurrenzfähig verkaufen zu können, wurde von der Regierung ein obligatorischer Beimischungsanteil zum Ottokraftstoff eingeführt. Falls die Hersteller diese minimale Pflichtbeimischung nicht vollständig erfüllen, wird in Abhängigkeit von der fehlenden Menge eine Strafe von 90 [EUR/hl] für Bioethanol ausgegeben.

Außerdem nehmen die Kraftstoffkosten von günstigem Bioethanol aus Brasilien an den Tankstellen in Europa wegen der vorgeschriebenen Importpreise zu. Wie bereits gesehen, liegen die Netto-Produktionskosten von diesem Treibstoff bei einem Wert von etwa 20 [EUR/hl]. Dazu werden während des Transportes nach Europa verschiedene Gebühren, die diesen wettbewerbsfähigen Wert signifikant erhöhen, hinzuaddiert. Einerseits bekommt der Staat Brasilien als Transportkosten zum Hafen von der Hersteller zirka 2 [EUR/hl]. Andererseits wird der Preis an der Tankstelle aufgrund der zusätzlichen Transportkosten sowie Hafengebühren von etwa 8 [EUR/hl] drastisch angehoben. Grund dafür ist es, dass Bioethanol ein explosionsfähiger Kraftstoff ist, der vorbeugenden Maßnahmen benötigt, um Unfälle während des Transportes zu vermeiden. Dies ergibt sich ein EU-Importpreis von zirka 30 [EUR/hl]. Zum Schluss wird dazu noch ein Zollsatz

hinzuaddiert, was die endgültigen durchschnittlichen Kosten des brasilianischen Bioethanols auf etwa 40-45 [EUR/hl] steigen lässt. In der Raffinerie in Europa könnten noch weitere Verfahren, wie z.B. Dehydrierung stattfinden, die den Preis an der Zapfsäule noch geringfügig erhöhen können. Diese Analyse macht es deutlich, dass trotz der niedrigen Herstellkosten des in Brasilien erzeugten Bioethanols im Vergleich zu den Herstellpreisen in Deutschland schon nicht mehr so wettbewerbsfähig sind. Dies kann auf die Kosten für Lagerung/Transport sowie auf die Aufwände von zusätzlichen Mineralölsteuern einschließlich die Mehrwertsteuer zurückgeführt werden [91].

Da die vorhandene Technologie zur Ethanol Produktion durch die Verwendung von Biokraftstoffen der ersten Generation schon ziemlich ausgereift ist, werden die Kosten in Zukunft nur geringfügig verringern. Durch den Einsatz von Biokraftstoffen der zweiten Generation sind die Aufwände derzeit noch höher im Vergleich zum in Brasilien oder in den USA erzeugten Bioethanol, aber die Herstellung von Bioethanol aus Zellulose weist in Bezug auf die Produktionskosten noch erhebliche Potentiale auf. Durch die Optimierung der Verarbeitungsprozesse können die Kosten der Produktion wesentlich vermindert werden und dadurch wettbewerbsfähige Preise anbieten. Die Herstellungskosten können durch die Reduzierung der eingesetzten Energie sowie der Enzymkosten signifikant abgesenkt werden. In Tabelle 17 sind die Ethanol-Produktionskosten der unterschiedlichen Verfahren dargestellt.

Rohmaterial	Generation	Herstellungsland	Rohmaterialkosten [EUR/l]	Netto-Produktionskosten [EUR/l]
Zuckerrüben	1. Gen.	Europa	0,25-0,35	0,45-0,5
Weizen	1. Gen.	Europa	0,2-0,3	0,5-0,55
Mais	1. Gen.	USA	0,1-0,15	0,3-0,35
Zuckerrohr	1. Gen.	Brasilien	0,05-0,1	0,18-0,23
Zellulose (Stroh)	2. Gen.	Europa	0,04-0,06	0,45-0,7
Zellulose (Stroh)	2. Gen. langfristig	Europa	0,04-0,06	0,15-0,25

**Tabelle 17:** Ethanol-Produktionskosten von diversen Verfahren in unterschiedlichen Ländern [90, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 105, 108]

## 5.2. Produktionskosten von Butanol

Neben Ethanol wurden im früheren Teil der Arbeit zusätzliche Alkohole auch untersucht. Eines von diesen ist Butanol, welches im Vergleich zum Ethanol eine um etwa 30 [%] höhere Energiedichte besitzt. Dies entspricht fast dem gleichen Niveau von Benzin. Da

die Energiedichte von Ethanol im Vergleich zum Benzin deutlich niedriger ist, müssen die Produktionskosten von diesem Treibstoff mit einem Faktor von zirka 1,5 multipliziert werden, um das gleiche Benzinäquivalent zu erhalten. Dadurch erhöhen sich die in Tabelle 17 zusammengefassten Netto-Produktionskosten signifikant. Im Gegensatz dazu kann ein Liter reines Butanol, basierend auf der Energiedichte, 0,9 [L] Benzin ersetzen. Die Herstellung von Butanol kann ähnlich wie beim Ethanol, aus der Biomasse implementiert werden. In diesem Fall wird der produzierte Treibstoff als Biobutanol bezeichnet. Als Rohstoffe dienen im Allgemeinen Zucker, Mais, Getreide, Holz oder Stroh in Abhängigkeit davon, wo die Produktion stattfindet [99].

Die Produktionskosten von der Biobutanol-Erzeugung befinden sich nah zu den Erzeugungskosten von Bioethanol. Aufgrund der geringeren Ausbeute bei Biobutanol im Vergleich zu Bioethanol verschlechtern sich geringfügig die Gestehungskosten. Tabelle 18 zeigt die Herstellungskosten von Biobutanol.

Rohmaterial	Generation	Herstellungsland	Netto-Produktionskosten [EUR/l]
Mais	1. Gen.	USA	0,35-0,4
Getreide	1. Gen.	Europa	0,4-0,45
Zucker	1. Gen.	USA	0,2-0,4
Zellulose (Stroh)	2. Gen.	USA	0,45-0,65

**Tabelle 18:** Butanol-Produktionskosten von diversen Verfahren in unterschiedlichen Ländern [90, 100, 101, 102, 103, 104, 131]

### 5.3. Herstellungskosten von Methanol

Ein weiterer Kraftstoff, der zur Gruppe Alkohole gehört, ist Methanol. Die Methanol-Produktion basiert heutzutage meistens an fossilen Energieträgern wie Erdgas oder Kohle. In diesem Fall erfolgt die Erzeugung des Treibstoffes aus Synthesegas, welches über die Vergasung von kohlenstoffhaltigen fossilen Energieträgern gewonnen wird. Jedoch kann Methanol aus der Biomasse oder anderen biologisch abbaubaren Teilen von organischen Abfällen hergestellt werden, falls der Anteil von Kohlenstoff in diesen Ausgangsmaterialien genügend hoch ist. Außerdem kann zur Produktion von Biomethanol CO<sub>2</sub> verwendet werden. Das so erzeugte Methanol wird Biomethanol genannt und kann als nachwachsender Kraftstoff betrachtet werden. Die chemischen Eigenschaften von Biomethanol sind identisch mit dem konventionellen Methanol. Der größte Vorteil von Biomethanol ist die Absenkung der Menge an eingesetzten fossilen

Energieträgern sowie die Verringerung der Treibhausgasemissionen im Vergleich zur herkömmlichen Methanol-Erzeugung. Im Gegensatz dazu sind die Produktionskosten von erneuerbarem Biomethanol im Vergleich zum fossilen Methanol 2- und 3-mal höher. Grundsätzlich kann man sagen, dass die Herstellungskosten von Biomethanol signifikant von den Preisen der Rohstoffe, dem Aufbau der Anlage sowie den Standortbedingungen abhängen [106].

In Tabelle 19 sind die Herstellungskosten von Methanol durch den Einsatz von unterschiedlichen Rohstoffen und Verarbeitungstechnologien zusammengefasst. Aufgrund des geringen Heizwertes von Methanol im Vergleich zum konventionellen Benzin kann 1 Liter Methanol zirka 0,48 Liter Benzin ersetzen [107]. Dies ergibt, dass sich die dargestellten Produktionskosten wesentlich erhöhen, wenn die Werte in Benzin-äquivalent ausgedrückt werden.

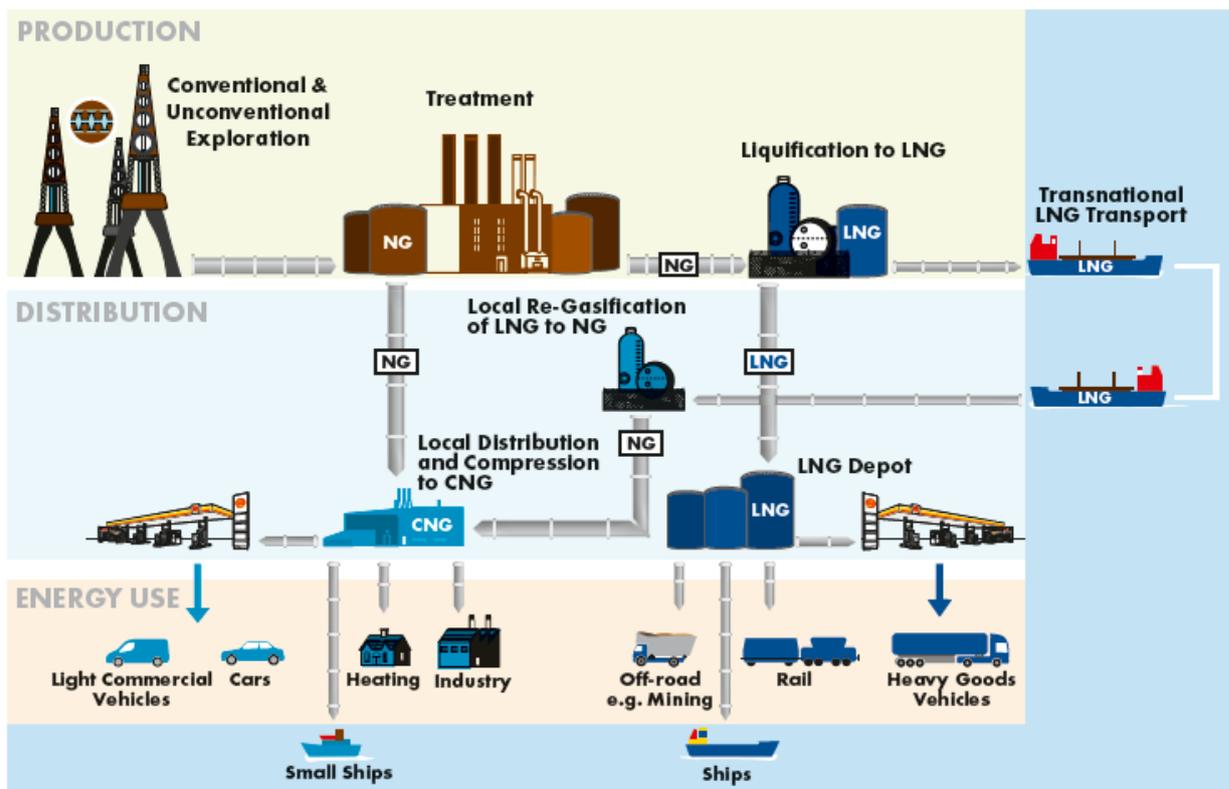
Rohmaterial	Herstellungsland	Netto-Produktionskosten [EUR/l]
Kohle	China	0,12-0,25
Erdgas	Trinidad und Tobago	0,15-0,2
CO <sub>2</sub>	Island	0,4-0,7
Zellulose	Europa	0,3-0,6
Zellulose langfristig	Europa	0,15-0,25

**Tabelle 19:** Methanol-Herstellungskosten von diversen Verfahren in unterschiedlichen Ländern [105, 106, 107, 116]

#### 5.4. Erzeugungskosten von Erdgas

In erster Linie bietet sich als angemessene Alternative für Verbrennungsmotoren Erdgas an. Erdgas wird an den Zapfsäulen anstatt in [Euro/Liter] wie bei flüssigen Kraftstoffen gewöhnt, in [Euro/kg] verkauft. 1 [kg] Erdgas ersetzt (basierend auf dem Energieinhalt) zirka 1,5 [Liter] Benzin. Wie bereits erwähnt, ist Erdgas ähnlich wie Erdöl eine konventionelle fossile Energiequelle, die begrenzte Verfügbarkeit besitzt, da die Vorräte weltweit endlich sind. Aufgrund der ziemlich gleichmäßigen geographischen Verteilung von Erdgas, ergibt sich im Vergleich zum Benzin ein leichter Kosten-Vorteil. Der Abbau des fossilen Erdgases erfolgt meistens durch Bohren ins Gestein. Das gefundene Natural Gas wird entweder verdichtet und im gasförmigen Zustand gelagert (CNG) oder zu LNG verflüssigt. Der erzeugte gasförmige Energieträger wird in langen Pipelines transportiert. Dies betrifft etwa zwei Drittel der internationalen Gaslieferung. Für die verbleibenden

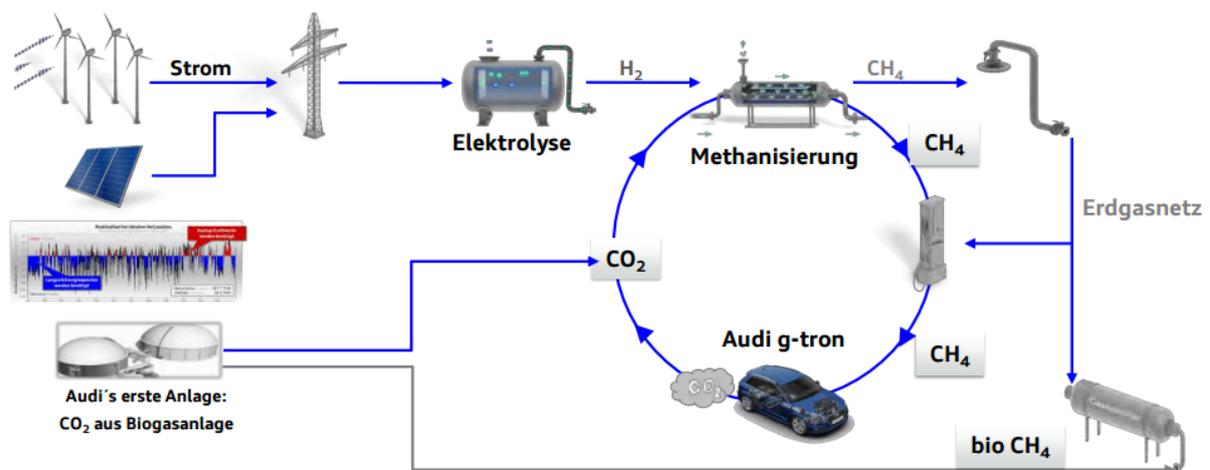
Märkte, die nicht per Rohrleitungen erreichbar sind, wird Erdgas als LNG in speziellen LNG-Schiffen transportiert. Abbildung 20 zeigt die Wertschöpfungskette von Erdgaskraftstoffe.



**Abbildung 20:** Wertschöpfungskette von Erdgas [52]

Im Gegensatz dazu kann durch Vergärung von Biomasse sogenanntes Biogas (Biomethan) hergestellt werden. Bei dieser Treibstoffoption kommen regenerative Rohstoffe wie Energiepflanzen oder Agrarabfälle zum Einsatz. In diesem Fall weist Biogas einen Methan-Anteil von etwa 60 [%] auf. Außerdem enthält der so erzeugte Kraftstoff Kohlenstoffdioxid sowie Spuren an weiteren Gasen und anderen Verunreinigungen. Um der Eignung dieser Treibstoff-Variante als Ersatz für konventionelles Erdgas zu entsprechen, muss die Menge an Methan in der Kraftstoffzusammensetzung angehoben werden. Dies bedeutet, dass der Kraftstoff von unerwünschten Zutaten „gereinigt“ werden muss. Mit Hilfe von angemessenen Verarbeitungsprozessen kann Biogas einen Methan-Anteil von etwa 95 [%] erreichen. Dadurch ist der Einsatz von gereinigtem Biogas in Erdgasfahrzeugen ohne Anpassung der Verbrennungskraftmaschine erlaubt. Reines Biogas können die Kunden an der Tankstellen zurzeit nicht betanken, da dies nur ins Erdgasnetz eingemischt wird [109, 110].

Eine zusätzliche erneuerbare Treibstoff-Variante, welche auf Methan basiert, ist das sogenannte „Power-to-gas“ oder „e-gas“. Bei dieser Alternative wird aus Wind- und Sonnenenergie Strom erzeugt, welcher durch Elektrolyse Wasserstoff produziert. Gleichzeitig wird CO<sub>2</sub> aus Biogasanlagen hergestellt. Das aus CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> erzeugte Synthesegas wird durch Methanisierung in Methangas umgewandelt. Durch die Verwendung von dieser erneuerbaren Treibstoffalternative können Erdgasfahrzeuge problemlos betrieben werden. Das Funktionsprinzip des „Power-to-gas“ Projektes wird in Abbildung 21 dargestellt.



**Abbildung 21:** Funktionsweise Audi „e-gas“ [111]

Die Herstellungskosten von Erdgas hängen wesentlich von der eingesetzten Energiequelle ab. Fossiles Erdgas weist im Vergleich zum Benzin günstigere Produktionskosten auf. Demgegenüber sind die Kosten für die Erzeugung von Biomethan derzeit signifikant höher. Tabelle 20 gibt einen Überblick über die Herstellungskosten von fossilem sowie regenerativem Erdgas.

Kraftstoff	Netto-Produktionskosten [EUR/kg]
Erdgas	0,25-0,35
Biogas (Biomethan)	0,7-0,95

**Tabelle 20:** Herstellungskosten [EUR/kg] von diversen Treibstoffen, die auf Methan basieren [112, 113, 114, 115]

## 5.5. Gestehungskosten von Flüssiggas (LPG)

Wie bereits erwähnt, Flüssiggas setzt sich hauptsächlich aus Propan und Butan zusammen. Zusätzlich enthält der Treibstoff in kleinem Prozentsatz Propen und Butylene. Ein Liter LPG entspricht energetisch etwa 0,8 Liter Benzin. Die Herstellung von Autogas

erfolgt zurzeit in fast allen Fällen als Nebenprodukt durch die Verarbeitung von Erdgas oder Erdöl in der Raffinerie. Dies ergibt, dass einerseits die aktuellen Kosten von verwendeten Energiequellen die Produktionskosten von LPG wesentlich beeinflussen. Andererseits nehmen die Aufwände der Erzeugung von Flüssiggas drastisch zu, falls der Bedarf an Erdöl oder Erdgas höher im Vergleich zu der produzierten Menge an diesen fossilen Energieträgern ist. Außerdem schwankt der Preis der Herstellung von LPG je nach dem Standort weltweit. Diese aufgelisteten Faktoren führen zusammen dazu, dass die Gestehungskosten von Autogas ähnlich zum konventionellen Benzin sind [117, 118]. In Tabelle 21 sind die Herstellungskosten von Flüssiggas gezeigt.

Rohmaterial	Netto-Produktionskosten [Euro pro Liter]
Erdöl/Erdgas	0,18-0,25

**Tabelle 21:** Die Produktionskosten von Flüssiggas [116]

## 5.6. Zusammenfassung der Ergebnisse bezüglich der Erzeugungskosten von verschiedenen Treibstoffen

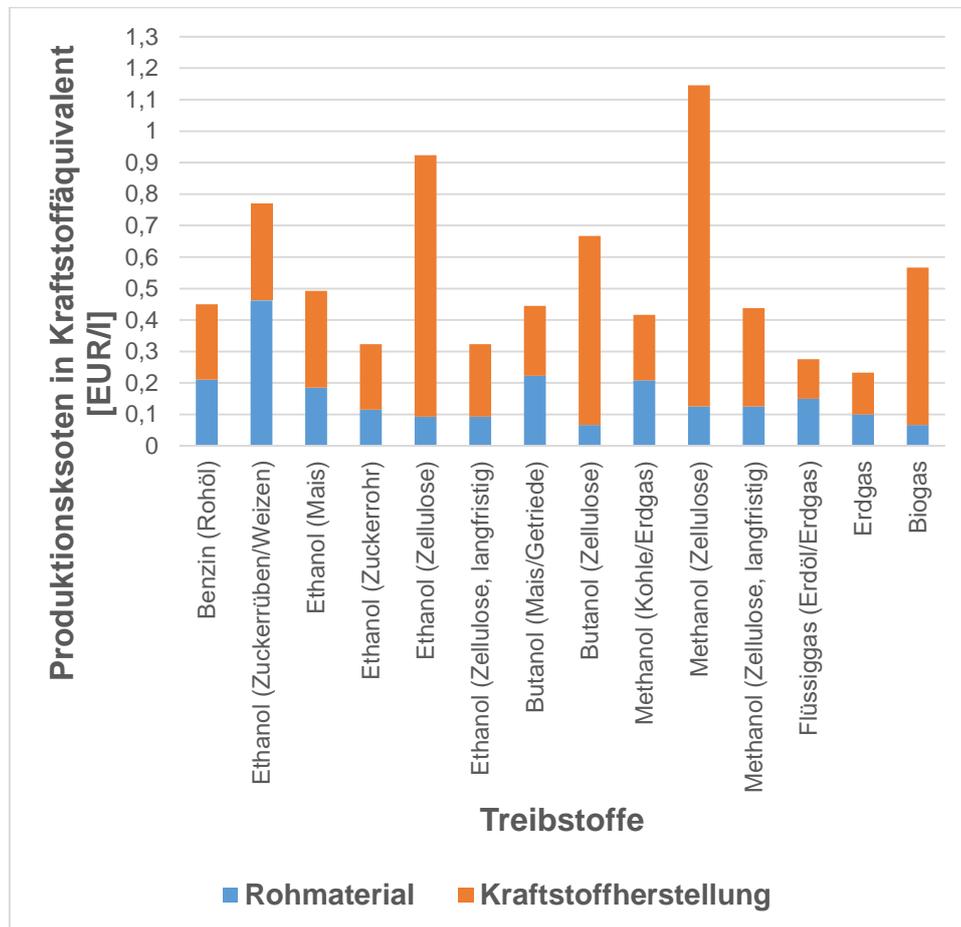
Schließlich werden die in der Literatur gefundenen Resultate miteinander verglichen. Grundsätzlich kann man sagen, dass die genaue Ermittlung der Produktionskosten von diversen Kraftstoffen ziemlich kompliziert ist, da sich die Randbedingungen hinsichtlich der Herstellung kontinuierlich ändern. Aufgrund der starken Schwankungen von Rohmaterialkosten sowie der raschen Entwicklung von Herstellungstechnologien werden die Gestehungskosten von unterschiedlichen Kraftstoffen maßgeblich beeinflusst.

Als Basis für den Vergleich wurde ein aktueller Rohölpreis von 37 [USD/Barrel] zugrunde gelegt [119]. Dies ergibt einen Rohölpreis von etwa 0,21 [EUR/l], was zu Produktionskosten von Benzin von zirka 0,45 [EUR/l] führt [108]. Die Bewertung der Herstellungskosten wurde in Benzinäquivalent durchgeführt, um plausible Ergebnisse zu erhalten. Die verschiedenen Werte beziehen sich also auf den Energiegehalt von 1 [l] Benzin. Die Kraftstoffäquivalent-Faktoren von untersuchten Treibstoffen sind in Tabelle 22 zusammengefasst.

	Benzin	Ethanol	Butanol	Methanol	Erdgas	Autogas
Benzinäquivalent [l]	1	1,53	1,11	2,08	0,66 [kg]	1,25

**Tabelle 22:** Kraftstoffäquivalente von diversen Treibstoff-Alternativen

In Abbildung 22 ist die Evaluierung der Produktionskosten von ausgewählten Kraftstoffen dargestellt. Es ist gut sichtbar, dass sich die Ergebnisse für den gleichen Treibstoff in Abhängigkeit von den applizierten Ausgangsmaterialien sowie von dem Herstellungsland signifikant variieren.



**Abbildung 22:** Evaluierung der Produktionskosten von diversen Treibstoffen in Kraftstoffäquivalent

Es ergeben sich die folgenden Aussagen hinsichtlich der Kostenbewertung von verschiedenen Kraftstoffalternativen:

- Preislich können Ethanol aus Weizen oder Zuckerrüben nicht mit auf Basis von Zuckerrohr oder Mais erzeugtem Ethanol mithalten.
- Da die Verarbeitung von Lignozellulosen komplizierter als von Stärke oder Zucker ist, weist Ethanol der 2. Generation zurzeit höhere Produktionskosten auf. Durch angemessene Optimierungen der Herstellungsvorgänge können die Kosten mittel- bis langfristig sogar mit den fossilen Treibstoffen konkurrieren.
- Obwohl die durchschnittliche Ausbeute von Butanol im Vergleich zum Ethanol niedriger ausfällt, ergeben sich günstigere Herstellungskosten pro

Benzinäquivalent als bei Ethanol. Dies kann auf die erhöhte Energiedichte des Kraftstoffes zurückgeführt werden.

- Die Erzeugungskosten von Methanol aus fossilen Energieträgern sind trotz des niedrigen Energiegehaltes des Treibstoffes mit den Produktionskosten von Benzin wettbewerbsfähig. Demgegenüber kann die Herstellung von Methanol aus erneuerbaren Ausgangsmaterialien heutzutage nicht ökonomisch durchgeführt werden.
- Da die Produktionskosten von Autogas im Vergleich zum Benzin niedriger liegen, bietet der Einsatz von LPG zurzeit eine interessante Alternative.
- Aufgrund der geringen Herstellungskosten von Erdgas, stellt die Betriebsweise der Verbrennungskraftmaschine mit konventionellem Erdgas eine wettbewerbsfähige Option auf dem Markt dar. Im Gegensatz dazu weist die Erzeugung von Biomethan höhere Produktionskosten auf.

## 6. Life Cycle Betrachtung für CO<sub>2</sub> der alternativen Kraftstoff- und Motorkette im Vergleich zur fossilen Basis

In diesem Kapitel der Arbeit werden die Auswirkungen eingesetzter Kraftstoffe auf die Umwelt über den gesamten Lebenszyklus zusammengefasst. Die ersten Untersuchungen von unterschiedlichen Treibstoffen in Bezug auf Effizienz der Herstellung sowie die CO<sub>2</sub>-Emissionen wurden schon bereits am Anfang der neunziger Jahre erfolgreich durchgeführt. Darin wurden sowohl herkömmliche fossile Kraftstoffe mit Bioenergieträger als auch Biokraftstoffe untereinander verglichen, um die ökologischen Vor- und Nachteile von den einzelnen Treibstoffen bewerten zu können. Im Laufe der Zeit wurde die Anzahl der verfügbaren Bioenergieträger kontinuierlich angehoben. Außerdem wurde die Vorgehensweise der implementierten Untersuchungen signifikant verbessert. Ein objektiver Vergleich der Treibstoffe benötigt eine umfassende Beurteilung aller Prozessschritte der ganzen Wertschöpfungskette entlang, von der Erzeugung der Rohstoffe bis zur Verwendung des Kraftstoffes im Kraftfahrzeug. Man nennt diese Analyse Ökobilanz oder Life Cycle Assessment (LCA) [120].

Bei heutigen Kraftstoff-Ökobilanzen werden hauptsächlich die Treibhausgasemissionen, die durch die treibhausgaswirksamen Gase über den gesamten Lebensweg eines Produktes entstehen, untersucht und bewertet. Die wichtigsten Gase hinsichtlich der Treibhausgasemission sind Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>), Methan (CH<sub>4</sub>) und Lachgas (N<sub>2</sub>O). Deren Treibhausgaspotentiale sind in Tabelle 23 als CO<sub>2</sub>-Äquivalent zu entnehmen.

Treibhausgas	Summenformel	Treibhausgaspotential als CO <sub>2</sub> -Äquivalent
Kohlenstoffdioxid	CO <sub>2</sub>	1
Methan	CH <sub>4</sub>	25
Distickstoffoxid (Lachgas)	N <sub>2</sub> O	298

**Tabelle 23:** Treibhausgaspotentiale als CO<sub>2</sub>-Äquivalent (Zeithorizont 100 Jahre) [121]

Unter dem Ausdruck „Ökobilanz“ wird darin die „Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Outputflüsse und der potentiellen Umweltwirkungen eines Produktionssystems im Verlauf seines Lebensweges“ verstanden [122]. Die Stufen dieser ganzheitlichen Lebenszyklusanalyse enthalten eine Vielzahl von verschiedenen Prozessen. Diese sind die folgenden:

- die Gewinnung bzw. Herstellung der eingesetzten Ausgangsmaterialien

- die Rohstoffkonversion
- die Verteilung bzw. Lieferung des Rohstoffes zur Raffinerie
- der Herstellungsprozess des Treibstoffes
- Transport des Kraftstoffes zur Zapfsäule
- die Nutzung des Kraftstoffes in Kraftfahrzeugen

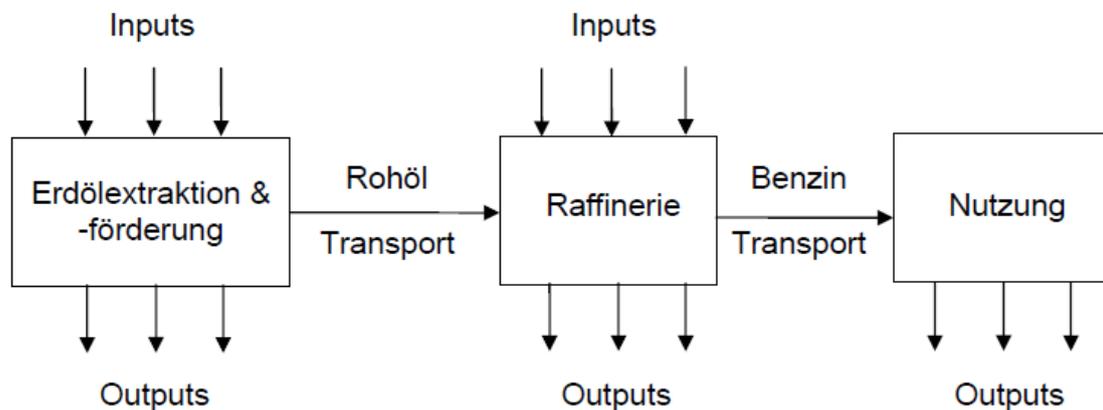
Die ersten fünf Schritte aus dieser Liste gehören zu der Gruppe „Well-to-Tank“ Phase (WTT), wobei der Energieaufwand bei der Versorgung der Treibstoffe näher berücksichtigt wird. Dieser Teil der Analyse beschäftigt sich hauptsächlich mit den Umweltauswirkungen des ganzen Produktionsprozesses sowie des Transports und der Speicherung der verwendeten Kraftstoffe [122]. Welchen Einfluss der Herstellungsprozess mit sich bringt, hängt in der Regel davon ab, wie die Erzeugung des Kraftstoffes implementiert wird. Neben der Behandlung mit den Rückständen, die während der Produktion entstehen, spielt selbst die Größe der Anlage zur Herstellung von Biokraftstoffen eine entscheidende Rolle. Grundsätzlich kann man z.B. sagen, dass Anlagen, die Biokraftstoffe der ersten Generation produzieren, hohen Bedarf an Wasser erfordern. Dies hat zur Folge, dass solche Werke dementsprechend große Mengen an Abwasser mit organischen Stoffen und Chemikalien produzieren, die die Umwelt schädlich belasten. Die Luftverschmutzung durch Partikel und Stickoxide aufgrund Wärmekraft- sowie Elektrizitätswerke ist auch ausschlaggebend. Zusätzlich soll man die, während des Herstellungsverfahrens erstellte Verunreinigung des Bodens auch näher analysieren. Der Transport von Biokraftstoffen erfolgt in der heutigen Welt meistens über die Straße, den Seeweg oder die Rohrleitungen (Pipelines). Selbstverständlich bedeutet der Transport von Treibstoffen auf der Straße größere Auswirkungen auf die Umwelt als die Lieferung in Pipelines [123]. Im Gegensatz dazu, gehört der letzte Schritt zur Gruppe „Tank-to-Wheels“ Betrachtung (TTW), wobei die Effizienz des Antriebsstrangs bewertet wird. Diese zwei Gruppen sind zusammen die sogenannte „Well-to-Wheels“ Phase (WTW), die sich dem vollständigen Lebensweg des untersuchten Kraftstoffes widmet [122].

Im Folgenden werden die ökologischen Auswirkungen von alternativen Biokraftstoffen und herkömmlichen fossilen Treibstoffen mit Hilfe von Ökobilanzen miteinander verglichen. Bei einer solchen Untersuchung ist es erforderlich, dass die zugrunde gelegten Annahmen wie z.B. das Bezugsjahr und die Systemgrenzen übereinstimmen sollen. Wie bei Kraftstoff-Ökobilanzen heutzutage üblich ist, werden hier die Treibhausgasemissionen (THG) die Wertschöpfungskette entlang betrachtet. Das

Treibhausgaspotential wird dann als CO<sub>2</sub>-Äquivalent (gewichtete Summe von CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O) ermittelt. Die Ergebnisse der Lebenszyklusanalysen von untersuchten Treibstoffen werden in der Einheit [g/km] ausgedrückt.

## 6.1. Ökobilanz – Benzin

Zuallererst wird die Treibhausgasbilanz des bekannten fossilen Kraftstoffes für Ottomotoren während seiner gesamten Lebensdauer bewertet. Nach der Ölgewinnung erfolgt der Transport der Ausgangsmaterialie zur Raffinerie, wo die Herstellung von Benzin implementiert wird. Danach wird das Endprodukt an die unterschiedlichen Tankstellen geliefert und für die Verbraucher zur Verfügung gestellt. Anschließend wird der Treibstoff zur Erzeugung von Energie im Kraftfahrzeug verwendet. In Abbildung 23 wird der ganze Prozess illustriert.



**Abbildung 23:** Lebenswegmodell – Benzin [124]

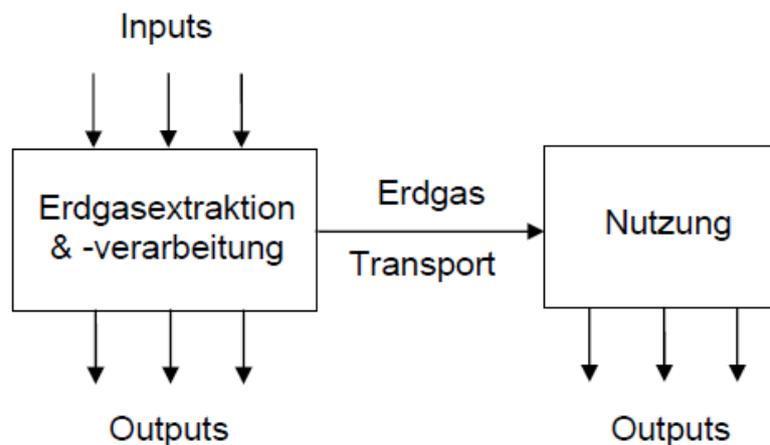
In Tabelle 24 sind die Ergebnisse von diversen LCA-Analysen für Benzin dargestellt. Es ist gut ersichtlich, dass der Beitrag der WTT-Treibhausgasemissionen etwa 15-20 [%] der gesamten Treibhausgasemissionen beträgt. Der genaue Anteil hängt von der Primärenergie, der Verarbeitung sowie von den eingesetzten Energieträgern maßgeblich ab. Der größte Teil der WTW-Treibhausgasemissionen entsteht durch die direkte Nutzung von Benzin in der Verbrennungskraftmaschine. Dies beträgt üblicherweise 75-80 [%] des gesamten WTW-Ausstoßes. Der Kraftstoffverbrauch des hier betrachteten Durchschnitts-Personenkraftwagen beträgt 6,6 [l/100km].

	Well-to-Tank	Tank-to-Wheels	Well-to-Wheels
<b>Treibhausgasemissionen [g CO<sub>2</sub>-Äq. / km]</b>	30	155	185

**Tabelle 24:** Ökobilanz für Benzinkraftstoff [124, 125, 126]

## 6.2. Ökobilanz – Erdgas und Biogas

Wie bereits erwähnt, ist Erdgas ein fossiler Energieträger der eine angemessene Alternative für Ottomotoren ist. Die Herstellung von Erdgas fängt mit der Extraktion an. Nach der Gewinnung erfolgt die Verarbeitung des Rohstoffes. Dies enthält die Produktionsschritte Trocknung, Entschwefelung und Reinigung. Danach wird der Transport des gefertigten Produkts zur Tankstelle durchgeführt. Schließlich wird mit der Verbrennung des Kraftstoffes im Fahrzeug sein Lebensweg beendet. Abbildung 24 fasst die aufgelisteten Schritte zusammen.



**Abbildung 24:** Lebenswegmodell – Erdgas [124]

Bei der Ermittlung der WTT-Emissionen des Treibstoffes spielen die Herkunft des Gases sowie der Transportweg eine dominierende Rolle. Die Lieferung über lange Rohrleitungen führt zu verschärften Pipelineverlusten, die auf die WTT-Emissionen negativ auswirken. Dies führt dazu, dass durch eine lokale Verarbeitung von Erdgas die Treibhausgasemissionen verbessert werden können. Aufgrund einer Vielzahl von erforderlichen Produktionswegen bei Erdgas ergibt sich ein im Vergleich zum Benzin signifikant höherer Anteil an WTT-Treibhausgasemissionen in der gesamten WTW-Treibhausgasbilanz. Dies beträgt von 15 bis sogar 30 [%] des gesamten Treibhausgas-Ausstoßes in Abhängigkeit davon, um was für eine Fahrzeugklasse es sich handelt. In Tabelle 25 sind die Resultate von verschiedenen Lebensweganalysen für herkömmliches Erdgas dargestellt. Die Menge an emittierten Treibhausgasemissionen als CO<sub>2</sub>-Äquivalent während der TTW-Phase bezieht sich auf einen durchschnittlichen Kraftstoffverbrauch von 6,2 [l/100km] des hier betrachteten bivalenten PKWs der Mittelklasse. Aufgrund des erhöhten Wasserstoff/Kohlenstoff (H/C) Verhältnisses von Erdgas, ergeben sich deutlich verbesserte Werte bei der TTW-Betrachtung als beim Benzin.

	Well-to-Tank	Tank-to-Wheels	Well-to-Wheels
<b>Treibhausgasemissionen [g CO<sub>2</sub>-Äq. / km]</b>	30	115	145

**Tabelle 25:** Ökobilanz für Erdgas [52, 123, 124, 125, 126]

Eine vielversprechende Alternative hinsichtlich der Verringerung des Treibhausgasausstoßes ist die Nutzung von Biogas. Durch die Einspeisung von Biomethan ins weltweite Erdgasnetz, lässt sich das Treibhausgaspotential in der WTT-Betrachtung erheblich reduzieren. Der PKW mit Biogas verursacht während des Lebensweges des Treibstoffes in Abhängigkeit vom eingesetzten biogenen Ausgangsmaterial wesentliche Abweichungen in Bezug auf die emittierten CO<sub>2</sub>-Äquivalente. Die Erzeugung von Biomethan aus Rest- und Abfallstoffen (unter anderem aus tierischer Exkremente/Gülle oder aus Holz) führt zu bemerkenswerten Vorteilen im Vergleich zum aus nachwachsenden Ausgangsstoffen hergestellten Biogas. Der Grund dafür ist es, dass der landwirtschaftliche Anbau der Rohstoffe in einigen Fällen negative Umweltauswirkungen mit sich bringt. Demgegenüber sind bei aus Düngen hergestelltem Biomethan bei der WTT-Phase deutlich geringere Werte als Null erreichbar, da die Methan-Emission während der üblichen Zerlegung von Gülle verhindert wird. Der nachstehenden Tabelle 26 sind die theoretischen Treibhausgasemissionen durch den Einsatz von reinem Biogas aus unterschiedlichen Ausgangsstoffen zu entnehmen. Selbstverständlich sind diese ausgezeichneten Werte derzeit noch nicht realisierbar, da reines Biogas an den Zapfsäulen noch nicht erhältlich ist.

	Well-to-Tank	Tank-to-Wheels	Well-to-Wheels
<b>Treibhausgasemissionen [g CO<sub>2</sub>-Äq. / km]</b>	-280 bis -50	115	-165 bis 65

**Tabelle 26:** Ökobilanz für reines Biogas [125, 126, 127, 128]

Wie bereits erwähnt, wird Biogas in einigen fortgeschrittenen Ländern ins konventionelle Erdgasnetz eingemischt. Dadurch ist es möglich, einen Biogasanteil von etwa 20-30 [%] im Erdgasbehälter an den Tankstellen sicherzustellen. Durch die Betriebsweise der Kraftmaschine mit einer Kraftstoff-Mischung (20 [%] Biogas aus Gülle und 80 [%] fossiles Erdgas) würde während der WTT-Phase etwa –32 [g CO<sub>2</sub>-Äq. / km] Treibhausgasausstoß emittiert. Dies könnte eine gesamte Treibhausgasemission von nur 83 [g CO<sub>2</sub>-Äq. / km] ergeben.

### 6.3. Ökobilanz – Autogas

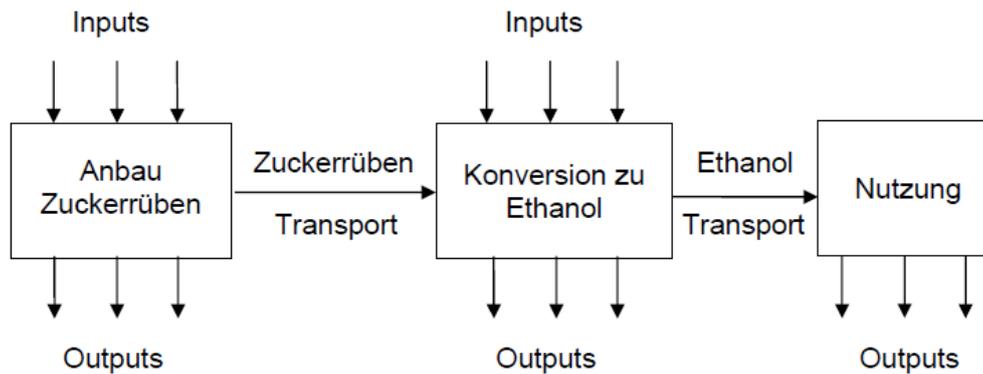
In Bezug auf die Verminderung von Treibhausgasemissionen stellt nach wie vor Flüssiggas eine interessante Alternative für Ottomotoren dar. Durch angemessene Auslegung von Verbrennungsmotoren für den Betrieb mit Autogas lassen sich die Treibhausgasemissionen in der TTW-Phase im Vergleich zu herkömmlichen Fremdzündungsmotoren um sogar 13 [%] senken. Dies kann hauptsächlich auf das günstige H/C Verhältnis von Autogas zurückgeführt werden. Zusätzlich können die Treibhausgasemissionen in der WTT-Betrachtung im Vergleich zum Benzin auch geringfügig reduziert werden. Tabelle 27 gibt einen Überblick über die gesamten Treibhausgasemissionen für Autogas.

	Well-to-Tank	Tank-to-Wheels	Well-to-Wheels
<b>Treibhausgasemissionen [g CO<sub>2</sub>-Äq. / km]</b>	23	135	158

**Tabelle 27:** Ökobilanz für Autogas [125, 129]

### 6.4. Ökobilanz – Ethanol

Die eingesetzten Rohstoffe bei der Herstellung von Ethanol beeinflussen maßgeblich die Treibhausgasemissionen, die über den Lebensweg der Produkte entstehen. Wie bereits gesehen, erfolgt die Erzeugung von Ethanol zurzeit in erster Linie durch Herstellungsverfahren von Biokraftstoffen der 1. Generation. Demgegenüber befinden sich die Konzepte auf Basis von Lignozellulosen (2.Generation) nur in der Forschungs- und Entwicklungsphase, da die Technologie noch nicht serienreif ist. In Abbildung 25 ist das Lebenswegmodell für Ethanol der 1. Generation dargestellt. Als Ausgangsmaterial handelt es sich bei dieser Betrachtung um Zuckerrüben. Der Prozess in der Landwirtschaft fängt mit dem Pflanzenanbau an und wird mit der Ernte des Rohstoffes abgeschlossen. Hinterher wird die Zuckerrübe zur Anlage transportiert, wo die Konversion zu Ethanol stattfindet. Anschließend wird das hergestellte Ethanol auf das Tankstellennetz verteilt. Zum Schluss wird der Lebensweg des Treibstoffs durch die Verbrennung in Kraftfahrzeugen beendet.



**Abbildung 25:** Lebenswegmodell – Ethanol der ersten Generation [124]

Die Lebenswegbilanz von reinem Ethanol ist in Tabelle 28 als CO<sub>2</sub>-Äquivalent ausgedrückt. Die beachtliche Abweichung der Treibhausgasemissionen während der WTT-Betrachtung kann auf die verwendeten Rohstoffe, Nebenprodukte sowie Herstellungsverfahren zurückgeführt werden. Die größte Verminderung der Treibhausgasemissionen bei der WTT-Phase ist vor allem durch den Einsatz von Biokraftstoffen der 2. Generation erreichbar. Im Gegensatz dazu sind für Biokraftstoffe der 1. Generation gemäßigte Reduzierungen realisierbar. Durch die Verwertung der während der Anbau-Phase gewonnenen Nebenprodukte zur Erzeugung der erforderlichen Prozesswärme bei der Herstellung von Ethanol, ergibt sich eine CO<sub>2</sub>-Gutschrift des Pflanzenwachstums, die sich auf die Ökobilanz positiv auswirkt. Durch die Betriebsweise der Verbrennungskraftmaschine mit reinem Ethanol, ergibt sich ein Treibhausgas-Einsparpotential von zirka 5 [%] im Vergleich zum Benzin. Dies würde zu einem durchschnittlichen Kraftstoffverbrauch des hier betrachteten PKW von zirka 9,5 [l/100km] führen, da der Heizwert von reinem Ethanol signifikant weniger als der Heizwert von Benzin ist. Der Betrieb des Verbrennungsmotors mit Benzin-Ethanol Mischungen würde die erzielbaren Treibhausgasvorteile während der TTW-Phase selbstverständlich mildern.

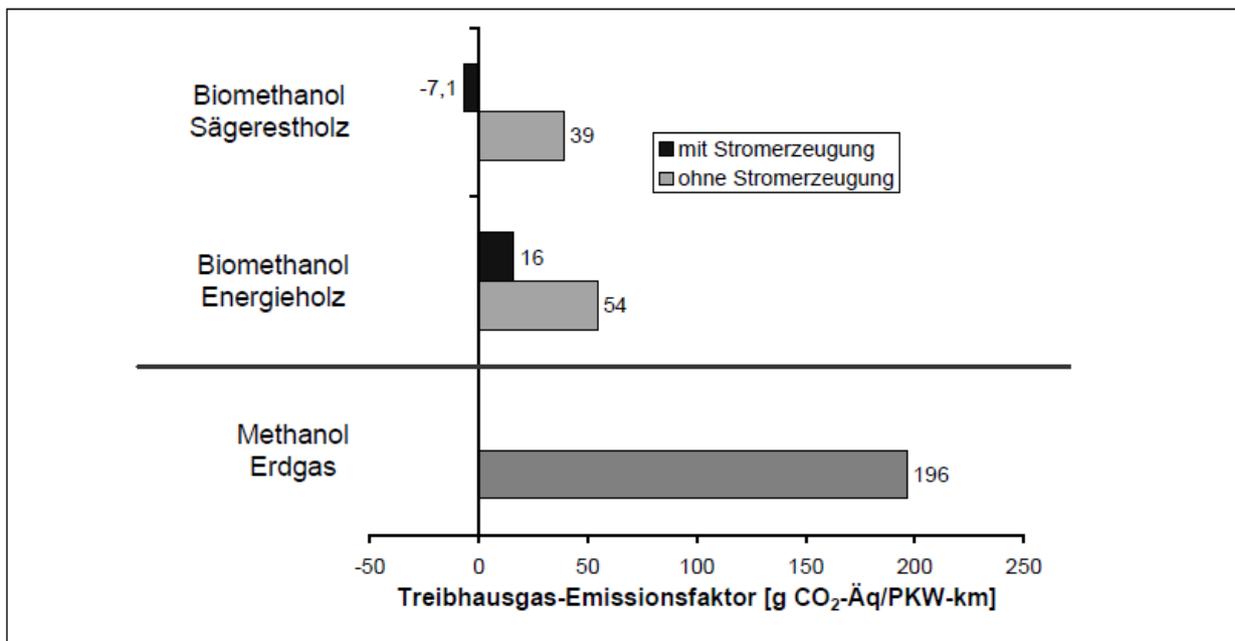
	Well-to-Tank	Tank-to-Wheels	Well-to-Wheels
<b>Treibhausgasemissionen [g CO<sub>2</sub>-Äq. / km]</b>	-118 bis -28	148	30 bis 120

**Tabelle 28:** Ökobilanz für reines Ethanol [124, 125, 126, 127, 130]

## 6.5. Ökobilanz – Methanol

Die gesamten Treibhausgasemissionen von Methanol werden durch die Herkunft der applizierten Rohmaterialien zur Kraftstoffherstellung signifikant beeinflusst. Die

Gestehung von Methanol kann entweder aus regenerativen Ausgangsmaterialien oder aus fossilen Energieträgern wie Erdgas oder Kohle implementiert werden. Die Treibhausgasemissionen von Biomethanol über dem Lebensweg hängen zusätzlich wesentlich davon ab, ob Strom als Nebenprodukt bei der Herstellung entsteht. Durch einen Verzicht auf bereitgestellten Strom aus dem öffentlichen Stromnetz, wird die Ökobilanz günstig beeinflusst. Als Nachteil einer gekoppelten Stromerzeugung bei der Biomethanol-Produktion kann die verringerte Menge an Ausbeute erwähnt werden. In Abbildung 26 wird der Treibhausgas-Ausstoß von der Methanol-Erzeugung als CO<sub>2</sub>-Äquivalent dargestellt. Es ist gut ersichtlich, dass die Verwendung von Biomethanol in Verbrennungsmotoren eine im Vergleich zum Benzin maßgeblich verbesserte Ökobilanz aufweist. Demgegenüber ergeben sich bei der Produktion von Methanol aus Erdgas zurzeit schlimmere Treibhausgasemissionen als beim Betrieb der Kraftmaschine mit fossilem Benzin oder Erdgas.



**Abbildung 26:** Well-to-Wheels-Betrachtung für Methanol [126]

In Tabelle 29 ist die gesamte Ökobilanz von reinem Methanol zusammengefasst. Das günstigere C/H Verhältnis von Methanol sowie die hohe ROZ von sogar 114 [-] führt zu niedrigsten TTW-Emissionen unter den untersuchten Alkoholen.

	Well-to-Tank	Tank-to-Wheels	Well-to-Wheels
<b>Treibhausgasemissionen [g CO<sub>2</sub>-Äq. / km]</b>	-100 bis 61	135	35 bis 196

**Tabelle 29:** Ökobilanz für Methanol [126]

## 6.6. Ökobilanz – Butanol

Das Interesse an Butanol, aus regenerativen Rohstoffen, hat heutzutage begonnen wesentlich zu wachsen. Als Ausgangsmaterial zur Butanol-Herstellung kommen hauptsächlich Mais oder zuckerhaltige Pflanzen wie Zuckerrüben zum Einsatz. Die Technologie zur Butanol-Erzeugung wurde am Anfang des 20. Jahrhunderts etabliert. Das Aceton-Butanol-Ethanol (ABE) – Verfahren verwendet bakterielle Fermentation von landwirtschaftlichen Rohstoffen, um Aceton, Butanol und Ethanol zu produzieren. Die Verwendung von Nebenprodukt Aceton ist ein entscheidender Faktor bei der Lebenszyklusanalyse von Butanol [131, 132]. Die TTW-Betrachtung von Butanol bei Verbrennungskraftmaschinen ergibt eine Treibhausgasreduktion um etwa 2 [%] im Vergleich zum Benzin. In Tabelle 30 ist die Lebenszyklusanalyse von Butanol über den gesamten Lebensweg als CO<sub>2</sub>-Äquivalent zusammengefasst.

	Well-to-Tank	Tank-to-Wheels	Well-to-Wheels
<b>Treibhausgasemissionen [g CO<sub>2</sub>-Äq. / km]</b>	-56 bis -26	152	96 bis 126

**Tabelle 30:** Ökobilanz für Butanol [99, 133, 134]

## 6.7. Zusammenfassung der Lebenszyklusanalysen von untersuchten Kraftstoffen für Ottomotoren

Zum Abschluss des Kapitels lassen sich die folgenden Schlussfolgerungen in Bezug auf Lebenszyklusanalysen aus den Untersuchungen ableiten:

- Zuallererst darf man nicht vergessen, dass sich die erzielbaren Potentiale aufgrund diverser Randbedingungen (Stand der Technologieentwicklung, zugrunde gelegte Annahmen usw.) hinsichtlich der Absenkung von Treibhausgasemissionen der unterschiedlichen Treibstoffalternativen kontinuierlich ändern. Trotzdem können Trendaussagen getroffen werden.
- Durch die Betriebsweise der Verbrennungskraftmaschine mit Erdgas (CNG, LNG) wird der gesamte Treibhausgasausstoß im Vergleich zum Benzin reduziert. Dies kann auf das hervorragende H/C-Verhältnis von Erdgas zurückgeführt werden, was die THG-Emissionen bei der TTW-Betrachtung maßgeblich vermindert.
- Reines Biogas (insbesondere mit Gülleverwertung) weist unter den alternativen Treibstoffen für Ottomotoren zurzeit die beste Ökobilanz auf.

- Demgegenüber sind die THG-Einsparpotentiale von Autogas (LPG) im Vergleich zu herkömmlichem Benzin verhältnismäßig niedrig.
- Der gesamte THG-Ausstoß von Bioethanol aus Zuckerrohr, Mais oder Zuckerrüben ist deutlich günstiger als beim Benzin. Durch die Erzeugung von Ethanol aus Weizen schwindet der Vorteil bei heutiger Produktionstechnologie über den Lebensweg zunehmend. Durch die Verwendung von Ethanol in Verbrennungsmotoren ergeben sich die besten Ergebnisse bei Biokraftstoffen der 2. Generation. Die Bedeutung dieser Alternativen wird in Zukunft signifikant ansteigen.
- Biomethanol besitzt eine gegenüber Benzin wesentlich verbesserte Ökobilanz. Im Gegensatz dazu führt der Einsatz von Methanol aus fossilen Energieträgern zu nicht wettbewerbsfähigen Resultaten.
- Die gesamte Lebenszyklusanalyse von Biobutanol weist im Kontrast zum Benzin geringere THG-Emissionen auf. Aufgrund der unaufhörlichen Technologieentwicklung zeigt der Treibstoff noch zusätzliche Potentiale auf.

## 7. Auswertung des Lösungsweges mit größtem CO<sub>2</sub>-Einsparpotential

Wie bereits erwähnt, muss eine Vielzahl von unterschiedlichen Aspekten gründlich berücksichtigt werden, um eine angemessene Aussage hinsichtlich des möglichen Treibhausgasverminderungspotentials der einzelnen kombinierten Verbesserungsmaßnahmen bei Motor und Kraftstoff treffen zu können. Dabei werden neben den technologischen Fortschritten in Bezug auf die Kraftstoffverbrauchsverringerung und die daraus ergebenden CO<sub>2</sub>-Emissionen, sowohl die Herstellungskosten der eingesetzten Treibstoffe, als auch die Ökobilanzierung des gesamten Lebenswegs von diversen Kraftstoffen gründlich bewertet. In Tabelle 31 sind die in der Arbeit berücksichtigten Aspekte und deren Gewichtung für die finale Evaluierung der gefundenen Ergebnisse in Bezug auf das größte CO<sub>2</sub>-Einsparpotential dargestellt.

	Kombinierte Verbesserungspotentiale bei Motor und Kraftstoff	Life Cycle Assessment (Well-to-Tank)	Cost (Raw Material & Production)
Weight	5	3	2
$\Sigma 10$			

**Tabelle 31:** Aspekte der Evaluierung sowie deren Gewichtung

In den folgenden Seiten wird die Vorgehensweise der durchgeführten Bewertungen von den verschiedenen Aspekten anhand Tabellen erläutert und kurz zusammengefasst. Die Einordnung der einzelnen Resultate wurde in fünf Klassen eingeteilt und dementsprechend wie folgt einheitlich klassifiziert:

Rating based on:	1 (worst)	5 (best)
------------------	-----------	----------

Bei der Ermittlung der Auswertung von kombinierten Verbesserungspotentialen bei Motor und Kraftstoff wurde die Tabelle 16 zugrunde gelegt. Die in Tabelle 16 ausgedrückten CO<sub>2</sub>-Verminderungspotentiale (in Prozent) durch den gleichzeitigen Einsatz von unterschiedlichen motor- und kraftstoffseitigen Maßnahmen an Ottomotoren wurden für eine bessere Weiterverarbeitung bei der nachfolgenden Evaluierung eingestuft. Wie aus Tabelle 32 ersichtlich ist, wurden die Ergebnisse folgendermaßen eingeordnet:

CO <sub>2</sub> -Einsparpotential [%]	Ranking
40 <	5
30-39	4

20-29	3
10-19	2
0-9	1

**Tabelle 32:** Klassifizierung der erzielbaren CO<sub>2</sub>-Reduktionspotentiale von kombinierten Maßnahmen bei Motor und Kraftstoff

In Tabelle 33 sind die oben erwähnten Modifikationen implementiert. Es ist gut ersichtlich, dass sich die größte Absenkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen an Ottomotoren bei niedrigen Lasten durch die gleichzeitige Verwendung von Downsizing mit Aufladung und strahlgeführten Magerbrennverfahren ergeben.

		Kraftstoffoptionen					
		Ethanol	Erdgas	Flüssiggas	1-Butanol	Methanol	
<b>Motorseitige Alternativen</b>	<b>Einzelmaßnahmen</b>	Downsizing mit Aufladung	3	4	3	2	3
		Zylinderdeaktivierung	1	4	2	1	2
		Strahlgeführtes Magerbrennverfahren	2,5	4	3	2	2,5
		Verlängerte Expansion	1	3	2	1	2
		Variables Verdichtungsverhältnis (VCR)	1,5	4	2	1	2
		Externe gekühlte Abgasrückführung	1	3	2	1	2
		Reduzierung der Motor-Reibungsverluste	1	4	2	1	2
		Thermomanagement	1	3	2	1	2
	<b>Kombinationen</b>	Downsizing mit Aufladung + VCR	3	5	3,5	3	3
		Downsizing mit Aufladung + Verlängerte Expansion	3	4	3	2,5	3
		Downsizing mit Aufladung + Strahlgeführtes Magerbrennverfahren	4	5	4	3	4
		Strahlgeführtes Magerbrennverfahren + VCR	3	5	4	2	3
		Externe gekühlte Abgasrückführung + VCR	2	4	2	1	2
		Externe gekühlte Abgasrückführung + Verlängerte Expansion	1	4	2	1	2

**Tabelle 33:** Einstufung von kombinierten Maßnahmen

Basierend auf diesen Kenntnissen wurde Tabelle 34 hergestellt. Die Bewertung des ersten Aspekts (Kombinierte Verbesserungspotentiale bei Motor und Kraftstoff) führt zu den folgenden Ergebnissen:

Aspect	Factor	Weight	Rating	Score = Weight × Rating
<b>Kombinierte Verbesserungspotentiale bei Motor und Kraftstoff</b>	Downsizing mit Aufladung + Strahlgeführtes Magerbrennverfahren & Benzin	5	3	<b>15</b>
	Downsizing mit Aufladung + Strahlgeführtes Magerbrennverfahren & Ethanol	5	4	<b>20</b>
	Downsizing mit Aufladung + Strahlgeführtes Magerbrennverfahren & Erdgas	5	5	<b>25</b>
	Downsizing mit Aufladung + Strahlgeführtes Magerbrennverfahren & Autogas	5	4	<b>20</b>
	Downsizing mit Aufladung + Strahlgeführtes Magerbrennverfahren & Butanol	5	3	<b>15</b>
	Downsizing mit Aufladung + Strahlgeführtes Magerbrennverfahren & Methanol	5	4	<b>20</b>

**Tabelle 34:** Evaluierung der kombinierten Verbesserungspotentiale bei Motor und Kraftstoff

In dem zweiten Schritt der Detailauswertung des Lösungsweges mit größtem CO<sub>2</sub>-Einsparpotential wurde die Beurteilung des zweiten Gesichtspunktes (Life Cycle Assessment) durchgeführt. Im Gegensatz zu der Evaluierung des ersten Aspekts (Kombinierte Verbesserungspotentiale bei Motor und Kraftstoff) wurden bei dieser Analyse die Auswirkungen von verwendeten Ausgangsmaterialien sowie Produktionsverfahren von verschiedenen Kraftstoffen auf die Treibhausgasemissionen in Betracht gezogen. Da die in Tabelle 33 zusammengefassten Werte sich schon auf den Tank-to-Wheels-Zeitabschnitt der eingesetzten Treibstoffe beziehen, wurde bei dieser

Auswertung nur die Well-to-Tank-Phase des gesamten Lebensweges von diversen Kraftstoffen untersucht. Tabelle 35 zeigt die Bewertung der Lebenszyklusanalysen von verschiedenen Treibstoffen.

Aspect	Factor	Weight	Rating	Score = Weight × Rating
Life Cycle Assessment (Well-to-Tank)	Benzin	3	2	6
	Erdgas	3	2	6
	Biogas	3	5	15
	LPG	3	2	6
	Ethanol (Gen. 1)	3	3	9
	Ethanol (Gen. 2)	3	4	12
	Methanol (Fossil)	3	1	3
	Methanol (Zellulose)	3	4	12
	Butanol (Gen. 1)	3	3	9
	Butanol (Gen. 2)	3	3	9

**Tabelle 35:** Evaluierung der Ökobilanz von diversen Treibstoff-Alternativen

Anschließend wurde im letzten Schritt der Detailauswertung der Einfluss der Herstellungskosten auf die Wirtschaftlichkeit näher erörtert. Bei dieser Betrachtung wurden die derzeitigen Produktionskosten von ausgewählten Treibstoffen in Benzinäquivalent eingesetzt. Diese Randbedingung birgt selbstverständlich die Gefahr, dass die zukünftig erwarteten Verbesserungen in Bezug auf Herstellverfahren von Biokraftstoffen der zweiten Generation nicht berücksichtigt wurden. Tabelle 36 gibt einen Überblick über die ausgewerteten Erzeugungskosten von untersuchten Kraftstoffen für Ottomotoren.

Aspect	Factor	Weight	Rating	Score = Weight × Rating
Cost (Raw Material & Production)	Benzin	2	4	8
	Erdgas	2	5	10
	Biogas	2	3	6
	LPG	2	5	10
	Ethanol (Gen. 1)	2	3	6
	Ethanol (Gen. 2)	2	2	4
	Methanol (Fossil)	2	4	8
	Methanol (Zellulose)	2	1	2
	Butanol (Gen. 1)	2	4	8
	Butanol (Gen. 2)	2	3	6

**Tabelle 36:** Evaluierung der Gestehungskosten von unterschiedlichen Kraftstoffen

Zum Schluss der Evaluierung des größten CO<sub>2</sub>-Einsparpotentials wurden die in diesem Kapitel ausgewerteten Ergebnisse zusammengeführt und anhand einer Tabelle illustriert. In Tabelle 37 sind die endgültigen Resultate der Arbeit dargestellt.

	Score = Weight × Rating			Total Score	Rank
	Kombinierte Verbesserungspotentiale bei Motor und Kraftstoff [Downsizing mit Aufladung & Strahlgeführtes Magerbrennverfahren]	Life Cycle Assessment (Well-to-Tank)	Cost (Raw Material & Production)		
Benzin	15	6	8	29	9
Erdgas	25	6	10	41	2
Biogas	25	15	6	46	1
LPG	20	6	10	36	3
Ethanol (Gen. 1)	20	9	6	35	4
Ethanol (Gen. 2)	20	12	4	36	3
Methanol (Fossil)	20	3	8	31	7
Methanol (Zellulose)	20	12	2	34	5
Butanol (Gen. 1)	15	9	8	32	6
Butanol (Gen. 2)	15	9	6	30	8

**Tabelle 37:** Bewertung der erzielbaren CO<sub>2</sub>-Einsparpotentiale an Ottomotoren

Zusammenfassend lassen sich die folgenden Rückschlüsse auf die erreichbaren CO<sub>2</sub>-Verminderungspotentiale ziehen:

- Die Recherche hat bewiesen, dass die Kombination von Downsizing durch Hubraumverkleinerung mit Aufladung und einem strahlgeführten Magerbrennverfahren bei niedrigeren Lasten an Ottomotoren zur beachtlichen Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes führt. In Abhängigkeit von den Eigenschaften des eingesetzten Kraftstoffes variiert das Maß der erzielbaren Verbesserungspotentiale.
- Biogas hat das Rennen um die maximal mögliche Absenkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen mit bedeutungsvoller Überlegenheit gewonnen. Die enorme Verringerung der Treibhausgasemissionen über den gesamten Lebenszyklus ergaben sich zusammen mit den hervorragenden Eigenschaften des erneuerbaren Kraftstoffes Vorteile bei der motorischen Verbrennung, mit denen die anderen Wettbewerber zurzeit nicht konkurrieren können.
- Aufgrund der bereits erwähnten ausgezeichneten Charakteristik der auf Methan basierten Treibstoffe, bietet sich der Einsatz von konventionellem Erdgas als die beste fossile Alternative zum Benzin auf dem Markt an. In bestimmten Ländern der Welt, wo die staatliche Förderung von Biokraftstoffen durch Steuerbegünstigungen oder selbst die Effizienz der Biogas-Herstellung nicht so hoch ist, schwindet der Vorteil von Biogas im Vergleich zum herkömmlichen Erdgas zunehmend.
- Der dritte Platz wurde zwischen einem fossilen und einem regenerativen Kraftstoff aufgeteilt. Obwohl LPG bei der Erzeugung und Transport des Treibstoffes zur Tankstelle ähnliche Ökobilanz und Produktionskosten wie Erdgas aufweist, konnte dieser nicht erneuerbare Treibstoff aufgrund der im Vergleich zum Erdgas nur gemäßigten Verbesserungen des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes im Verbrennungsprozess insgesamt weniger Punkte erhalten. Als beste flüssige Biokraftstoff-Option in Fremdzündungsmotoren hat Bioethanol der 2. Generation die Untersuchung beendet. Durch die Verwendung von aus Zellulose hergestelltem Ethanol lassen sich die Treibhausgasemissionen über den gesamten Lebensweg des Kraftstoffes im Vergleich zu den fossilen Treibstoffen signifikant verringern. Aufgrund der derzeit noch unökonomischen Produktion von Biokraftstoffen der 2. Generation konnte diese Alternative ihr maximales Potential nicht vollständig ausschöpfen.

- Trotz der niedrigen Gestehungskosten von herkömmlichem Benzin, konnte der Referenz-Kraftstoff nur den letzten Platz erreichen. Dies kann auf die ungünstige Ökobilanz sowie den eingeschränkten Wirkungsgrad der Verbrennung durch die Betriebsweise der Verbrennungskraftmaschine mit Benzin zurückgeführt werden.

## 7.1. Eigene Empfehlungen

Schließlich werden meine eigenen Empfehlungen speziell auf den europäischen Markt kurz vorgestellt. Als Basis der Vorschläge dient die in Tabelle 37 dargestellte Gesamtbewertung der Ergebnisse, jedoch wird der Einfluss von bestimmten zusätzlichen Faktoren berücksichtigt. Für die weitere Entwicklung von motorseitigen und kraftstoffseitigen Maßnahmen wird die Einwilligung der Kunden entscheidend sein. Diese alternativen Lösungen sollen im Vergleich zu den herkömmlichen Antriebssträngen in Bezug auf Fahrspaß, erreichbare Reichweite und Kaufpreis wettbewerbsfähig sein. Ohne die Erfüllung von diesen wichtigen Kriterien können solche technischen Möglichkeiten nicht marktführend sein. Aufgrund dieser weiteren Faktoren musste die oben durchgeführte Gesamtbewertung noch einmal überlegt werden. In Tabelle 38 sind zwei verschiedene Lösungen dargestellt, wobei kraftstoffseitig sowohl eine gasförmige als auch eine flüssige Alternative ausgewählt wurde.

<b>Kombinierte Maßnahmen bei Motor und Kraftstoff</b>			
	<b>Kraftstoff</b>	<b>Technologie 1</b>	<b>Technologie 2</b>
<b>Variante A</b>	Ethanol / 2.Generation	Downsizing mit Aufladung	Variables Verdichtungsverhältnis (VCR)
<b>Variante B</b>	Biogas	Downsizing mit Aufladung	Strahlgeführtes Magerbrennverfahren

**Tabelle 38:** Eigene Empfehlungen

Durch die Abwägung der Pro- und Kontra Argumente, basierend auf der vorhandenen Literatur, bin ich auf die folgende Meinung gekommen:

- Obwohl konventionelles Erdgas aufgrund der hervorragenden Kraftstoffeigenschaften eine geeignete Wahl an Ottomotoren sein könnte, würde ich diesen fossilen Treibstoff in Zukunft nicht als umweltschonende Alternative vorstellen.
- Bioethanol aus zellulose- und lignozellulosen Rohstoffen sowie Biogas aus Rest- und Abfallstoffen sind derzeit die attraktivsten Kraftstoffalternativen in Europa. Durch die Verwendung von diesen Biokraftstoffen können im Vergleich zu den herkömmlichen Optionen die Treibhausgasemissionen im gesamten

Lebenszyklus des Treibstoffes wesentlich verringert werden. Außerdem ist es möglich, die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern signifikant zu mildern.

- Wie bereits gesehen, bietet die Kombination von Downsizing mit Aufladung und strahlgeführtem Magerbrennverfahren durch den Betrieb mit Biomethan das größte CO<sub>2</sub>-Einsparpotential an. Aus diesem Grund würde ich diese Zusammenstellung noch immer als die beste gasförmige Option bezüglich der Absenkung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes vorschlagen.
- Demgegenüber besitzen derzeit Gasfahrzeuge einige bekannte Nachteile wie das eingeschränkte Tankstellennetz sowie die Verringerung des Kofferraumvolumens aufgrund der erforderlichen Gasbehälter. Zusätzlich führt die Speicherung des Gases in schweren Behältern zur unerwünschten Erhöhung des Fahrzeuggewichtes, was den Kraftstoffverbrauch und die damit einhergehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen verschlechtert. Deswegen würde ich eine flüssige Kraftstoffalternative anstelle Gas bevorzugen.
- Basierend auf der Gesamtbewertung der Ergebnisse hat zwischen den erneuerbaren flüssigen Treibstoffen Ethanol der 2. Generation den besten Platz erreicht. Aufgrund der im Vergleich zur Biogasherstellung zurzeit aufwendigen Produktionskosten von Ethanol aus Zellulose würde ich versuchen die gesamten Systemkosten zu reduzieren. Aus diesem Grund würde ich den Verzicht auf kostspieliges Magerbrennverfahren (unter anderem komplizierte Abgasnachbehandlung) vorschlagen. Wie aus der Tabelle 16 ersichtlich ist, weist durch den Betrieb mit Ethanol die Kombination von Downsizing mit Aufladung und einem variablen Verdichtungsverhältnis (VCR) innerhalb der ausgewählten motorseitigen Kombinationen im untersuchten Fahrzyklus (NEFZ) die zweite größte Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen auf. Da die Mehrkosten von einem variablen Verdichtungsverhältnis im Vergleich zur Schichtladung niedriger sind, würde ich diese motorseitige Maßnahme vorziehen.

## 8. Zusammenfassung und Ausblick

Die Suche nach fortschrittlichen Alternativen in der Automobilindustrie, um den Kraftstoffverbrauch und die daraus ergebenden CO<sub>2</sub>-Emissionen absenken zu können, spielt in der heutigen Welt eine dominierende Rolle. Vor dem Hintergrund dieses Strebens liegt einerseits die Knappheit an fossilen Erdölvorräten, andererseits die durch die Gesetzgebung vorgeschriebene Reduzierung der Treibhausgasemissionen. Um diese Anforderungen gerecht zu werden, stehen sowohl die unterschiedlichen motorischen, als auch kraftstoffseitigen Maßnahmen im Fokus der Fahrzeugentwicklung. Die vorherigen Seiten geben einen Überblick über die möglichen CO<sub>2</sub>-Einsparpotentiale durch den Einsatz von kombinierten Verbesserungspotentialen bei Motor und Kraftstoff. Ziel dieser Recherche war hauptsächlich die Evaluierung der heutzutage auf dem Markt verfügbaren Lösungen und einen kurzen Einblick in Bezug auf die Kostenbewertung sowie Ökobilanzierung der verschiedenen Kraftstoffmöglichkeiten zu bekommen.

Im ersten Teil der Arbeit sind zunächst die ausschließlich durch motorischen Maßnahmen erreichbaren CO<sub>2</sub>-Reduktionspotentiale von diversen Technologien vorgestellt. Um einen glaubwürdigen Eindruck erhalten zu können, wurde die Auswirkung von ausgewählten Maßnahmen sowohl bei niedrigen, als auch bei erhöhten Lasten analysiert. Die erzielbaren Verbesserungspotentiale beziehen sich auf einen nicht aufgeladenen Benzin-Saugmotor, der Stand der Technik ist. Die höchsten Absenkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im unteren Lastbereich weisen Downsizing mit Aufladung (15-20 [%]), strahlgeführtes Magerbrennverfahren (12-15 [%]), variables Verdichtungsverhältnis (5-8 [%]) sowie die Zylinderabschaltung (3-7 [%]) auf. Demgegenüber können Maßnahmen an Fremdzündungsmotoren bei mittleren bis höheren Lasten nur gemäßigte Verbesserungen mit sich bringen. Neben Downsizing mit Aufladung (8-14 [%]) oder gekühlter Abgasrückführung (3,5-6 [%]) kann eine verlängerte Expansion durch Miller-Steuerzeiten (3-5 [%]) die CO<sub>2</sub>-Emissionen in diesem Betriebsbereich am besten vermindern.

In dem nächsten Kapitel werden zunächst die im verbleibenden Teil der gesamten Arbeit untersuchten alternativen Kraftstoffmöglichkeiten kurz vorgestellt. Danach fokussiert sich die Recherche auf die durch die Anwendung von diversen Kraftstoff-Optionen ergebende Einflüsse von verschiedenen brennverfahrensrelevanten Treibstoffmerkmalen auf den CO<sub>2</sub>-Ausstoß. Als Basis im Vergleich dient immer das herkömmliche Benzin (ROZ=95). Um nur einige Merkmale zu nennen, führt eine erhöhte Klopfestigkeit zum Anstieg des geometrischen Verdichtungsverhältnisses, was den Wirkungsgrad der Verbrennung

sowie die Menge an emittiertem CO<sub>2</sub> im niedrigeren Lastbereich signifikant verbessert. In Abhängigkeit von der Größe der Research Oktanzahl der verschiedenen Kraftstoffe, lassen sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen um etwa 2-6 [%] reduzieren. Außerdem leistet der chemische Aufbau von diversen Kraftstoffen einen relevanten Beitrag hinsichtlich der Absenkung der während des Motorbetriebs auftauchenden CO<sub>2</sub>-Emissionen, da ein günstiges H/C-Verhältnis zur Entstehung von mehr Wasser und weniger Kohlenstoffdioxid führt. Dadurch ist es möglich, die Treibhausgasbilanz um zirka 5 bis sogar 25 [%] zu verbessern. Weiterhin kann die im Brennraum vorhandene Frischluftladung durch eine hohe Verdampfungswärme von einigen Treibstoffen besser abgekühlt werden, die den motorischen Wirkungsgrad sowie den CO<sub>2</sub>-Ausstoß ebenfalls positiv beeinflusst.

Der folgende Teil der Arbeit fasst die kombinierten Verbesserungsmöglichkeiten bei Motor und Kraftstoff an Ottomotoren zusammen. Bei den motorseitigen Alternativen werden neben den einzelnen Maßnahmen bestimmte Kombinationen von unterschiedlichen Optionen auch bewertet. Da in Europa die als verbreitetste Prüfmethode zur Ermittlung der CO<sub>2</sub>-Emissionen der Neue Europäische Fahrzyklus (NEFZ) dient (welcher überwiegend niedrigere Lasten aufweist), konzentrieren sich die Ergebnisse der Recherche am Ende des Kapitels ausschließlich auf diesem Bereich des Verbrauchskennfeldes. Aus diesem Grund können motorseitige Maßnahmen wie die Anwendung von Downsizing-Konzepten, Schichtladungen sowie variablem Verdichtungsverhältnis das Interesse von Ingenieuren am besten wecken. Die höchste Absenkung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes (sogar 40-50 [%]) an solchen Motoren ergibt sich durch den Betrieb der Kraftmaschine mit Erdgas. Antriebsstränge, die auf Flüssiggas (LPG) ausgelegt sind, können Einsparungen um maximal 30-35 [%] erreichen. Durch die Betriebsweise von zukunftsrichtigen Ottomotoren mit Alkoholen wie Ethanol oder Methanol, befinden sich die erzielbaren Verbesserungen nur etwas weniger als beim LPG. Demgegenüber weist 1-Butanol im Vergleich zum Benzin nur geringfügig günstigere Werte auf.

Auf den folgenden Seiten wird eine kurze Kostenbewertung der unterschiedlichen Kraftstoffmöglichkeiten im Vergleich zum herkömmlichen Benzin aufgezeigt. Da die staatliche Unterstützung sowie Besteuerung von diversen Treibstoff-Alternativen weltweit eine wesentliche Abweichung aufweisen, beschäftigt sich die Evaluierung ausschließlich mit den Rohmaterial- und Produktionskosten. Diese betragen beim Benzin insgesamt 0,45 [EUR/l]. Zusätzlich beziehen sich die Resultate am Ende des Kapitels auf den

Energiegehalt von 1 [l] Benzin, um die Heizwert-Unterschiede von diversen Treibstoffen zu kompensieren. Durch die Verwendung von Ethanol der 1. Generation ist zurzeit der aus Zuckerrohr (~0,3 [EUR/l]) oder Mais (~0,5 [EUR/l]) erzeugte Biokraftstoff die günstigste Alternative. Demgegenüber kann die Herstellung aus Zuckerrübe oder Weizen nicht so wettbewerbsfähig implementiert werden (~0,75 [EUR/l]). Bioethanol der 2. Generation weist noch höhere Produktionskosten auf (~0,95 [EUR/l]), jedoch besitzt diese Technologie noch signifikantes Zukunftspotential. Die Herstellung von Butanol in Benzinäquivalent erfolgt aufgrund der im Vergleich zum Ethanol erhöhten Energiedichte leicht billiger. Die derzeit übliche Erzeugung von Methanol aus Erdgas kann mit den Kosten von Benzin konkurrieren. Im Gegensatz dazu kann die Herstellung von Biomethanol aus Zellulose zurzeit nur unökonomisch implementiert werden (~1,1 [EUR/l]). Da die Gestehungskosten von fossilem Flüssiggas (~0,3 [EUR/l]) sowie Erdgas (~0,25 [EUR/kg]) im Vergleich zum Benzin günstiger sind, bieten sich diese Treibstoffe als angemessene Alternative für Ottomotoren an. Die Produktion von Biogas aus Biomasse beträgt derzeit höhere Kosten (~0,55 [EUR/kg]).

Im Folgenden wird eine gesamte Lebenszyklusanalyse für die Treibhausgasemissionen der ausgewählten Kraftstoffe implementiert. Dabei werden die Gewinnung bzw. Erzeugung der Ausgangsmaterialien, die Rohstoffverarbeitung sowie Lieferung zur Raffinerie, der Fertigungsprozess des Kraftstoffes, der Transport des Treibstoffes zur Tankstelle und die Applikation im Kraftfahrzeug gründlich bewertet. Unter den fossilen Kraftstoffalternativen weist Erdgas aufgrund des ausgezeichneten H/C Verhältnisses die größte Verringerung der gesamten Treibhausgasemissionen im Vergleich zum Benzin (~20-25 [%]) auf. Durch den Einsatz von Flüssiggas kann die Umweltbilanz geringfügig verbessert werden (~15 [%]). Demgegenüber führt die Verwendung von Methanol aus Erdgas zum Anstieg der Menge an emittierten Treibhausgasen (Verschlechterung ~5 [%]). Die analysierten Biokraftstoffe besitzen ausnahmslos signifikantes Einsparpotential im Vergleich zum Benzin. Durch eine Einspeisung von Biogas ins Erdgasnetz reduzieren sich die Treibhausgasemissionen am bedeutendsten (~75-85 [%]). Die Verwendung von flüssigen Biokraftstoff-Blends der 2. Generation hat ebenfalls signifikanten Einfluss auf die Verbesserung der gesamten Ökobilanz (~55-65 [%]). Obwohl die Nutzung von Biotreibstoff-Mischungen der 1. Generation zur geringeren Absenkung der Treibhausgasemissionen führt, leisten diese Alternative genauso einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung der Ökobilanz (~35-45 [%]).

Abschließend wird die Evaluierung des größten CO<sub>2</sub>-Einsparpotentials an Ottomotoren durchgeführt. Zwischen den analysierten motorseitigen Maßnahmen weist im untersuchten Betriebsbereich des Verbrauchskennfeldes (NEFZ) die Kombination von Downsizing mit Aufladung und strahlgeführtem Magerbrennverfahren die höchste Absenkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen auf. Basierend auf den ausgezeichneten Eigenschaften von Erdgas sowie Biogas im Verbrennungsprozess, lassen sich die größten Verbesserungen durch die Betriebsweise von Kraftmaschinen mit diesen Treibstoffen zu erzielen. Trotz der zurzeit im Vergleich zum Erdgas unwirtschaftlichen Produktionskosten von Biogas, wird dieser Nachteil aufgrund der signifikant günstigen Ökobilanz der Bioalternative kompensiert. Aus diesem Grund ist Biogas als vielversprechendste Kraftstoffalternative die Bewertung am ersten Platz beendet (46 Punkte). Erdgas holt den 2. Platz, und zeigt sich als beste fossile Treibstoffoption auf dem Markt (41 Punkte). Flüssiggas (LPG) und Bioethanol der 2. Generation sicherten sich den 3. Platz auf dem Gesamtpodium (36 Punkte).

Als Ausblick auf die Zukunft wird bei motorseitigen Maßnahmen grundsätzlich die gezielte Auslegung von zukünftigen Verbrennungsmotoren auf den Betrieb mit vielversprechenden Treibstoffoptionen, die erhöhte Klopfestigkeit sowie verbesserte Magerbrennfähigkeit aufweisen, eine dominierende Rolle spielen. Dadurch wäre es möglich, die maximalen Potentiale von alternativen Kraftstoffen vollständig auszuschöpfen.

Die kontinuierliche Verbreitung von optimierten Hybridantriebssträngen, die die für den Betrieb mit alternativen Treibstoffen angepassten Verbrennungskraftmaschinen unterstützen, kann einen zusätzlichen Beitrag zur weiteren Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen leisten. Um nur einige Vorteile zu nennen, kann die Abhängigkeit von konventionellen Energiequellen weiter reduziert werden sowie die fahrdynamischen Eigenschaften des Fahrzeuges deutlich verbessert werden. Mit Hilfe von Elektromotoren wäre es zusätzlich möglich, die verschlechterte Kaltstartfähigkeit von einigen biogenen Treibstoffen vollständig zu eliminieren.

Kraftstoffseitig wird die Wettbewerbsfähigkeit der diversen alternativen Treibstoffe auch von den kommenden Rohölpreisen stark beeinflusst. Gleichzeitig ist die Automobilindustrie auf der Suche nach verbesserten Erzeugungsprozessen von Biokraftstoffen der 2. Generation, um die Produktionskosten verringern zu können. Zusätzlich ist die Erweiterung der Tankstelleninfrastruktur insbesondere für Biogas ausschlaggebend, um die Kundenakzeptanz zu verbessern.

## 9. Literatur- und Quellenverzeichnis

[1]: U. Spicher, T. Matousek: Energiebedarf und CO<sub>2</sub>-Emissionen von konventionellen und neuen Kraftfahrzeugantrieben unter Alltagsbedingungen, MOT GmbH, 9. MTZ-Fachtagung „Der Antrieb von morgen“, Wolfsburg, 28.& 29.1.2014.

[2]: H. S. Lee: Hyundai-Kia's Powertrain Strategy for Green and Sustainable Mobility, Hyundai-Kia Motor Company, 30. Internationales Wiener Motorensymposium, 2009.

[3]: H. Zhang, E. Achleitner, J. Beer, F. Kapphan, W. Klügl, O. Maiwald, G. Rösel, J. Ehrhard: Die Zukunft der Benzin-Motoren. Continental, 36. Internationales Wiener Motorensymposium, 2015.

[4]: R. Weinowski, K. Wittek, B. Haake, C. Dieterich, J. Seibel, M. Schwaderlapp, D. Tomazic: CO<sub>2</sub> – potential of a two-stage VCR system in combination with future gasoline powertrains, FEV GbmH, 33. Internationales Wiener Motorensymposium, 2012.

[5]: E. Curtis, O. Kunde, T. McCarthy, P. Philips, A. Schamel, C. Weber, M. Wirth: EcoBoost: Downsized Gasoline DI Turbo Engines as the Backbone of Ford's CO<sub>2</sub> and Fuel Economy Product Strategy, F2010A130, Fisita 2010.30.5, Budapest, 4.6.2010.

[6]: R. Weinowski, K. Wittek, B. Haake, C. Dieterich, J. Seibel, M. Schwaderlapp, D. Tomazic: CO<sub>2</sub> – potential of a two-stage VCR system in combination with future gasoline powertrains, FEV GbmH, 33. Internationales Wiener Motorensymposium, 2012.

[7]: C. Ernst, I. Olschewski, N. R. Neumann, C. Harter, L. Eckstein: Supplier Strategies 2025 – Winning Technologies for the CO<sub>2</sub> Challenge, 24th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, 2015.

[8]: A. Schamel, M. Scheidt, C. Weber, H. Faust: Zylinderabschaltung für aufgeladene 3-Zylinder-Motoren – machbar und sinnvoll?, 36. Wiener Motorensymposium, Wien, 07.-08.05.2015.

[9]: G. Fraidl, P. Kapus, M. Neubauer, M. Certic: Gasoline Engines 2020 Challenges and Solutions, AVL List GmbH, 26<sup>th</sup> International AVL Conference “Engine & Environment”, Graz, Austria, 11<sup>th</sup>-12<sup>th</sup>. September 2014.

[10]: P. Kapus, K. Prevedel, J. Wolkerstorfer, M. Neubauer: 200 g/kWh – Can The Stoichiometric Gasoline Engine Beat The Diesel?, 22<sup>nd</sup> Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, AVL List GmbH, 7.-9.10.2013.

- [11]: S. Pischinger, K. Wittek, C. Tiemann: Zweistufiges variables Verdichtungsverhältnis durch exzentrische Kolbenbolzenlagerung, Springer Verlag, MTZ (Motorentechnische Zeitschrift) 02.2009.
- [12]: L. K. Cloos, C. Glahn, A. Königstein, S. Shin: Externe Abgasrückführung am aufgeladenen Ottomotor - Eine Technologiebewertung im Fahrzeug, Adam Opel AG, 36. Internationales Wiener Motorensymposium, 2015.
- [13]: M. Wirth, B. Pinggen, R. Friedfeldt, C. Weber: Wege zur CO<sub>2</sub>-Absenkung für den Ottomotor: Zukünftige Anforderungen durch Kundenerwartungen und Fahrzyklen, Ford Werke GmbH, VDI-Tagung Innovative Fahrzeugantriebe, Dresden, 6.-7.11.2012.
- [14]: S. Schmuck-Soldan, A. Koenigstein, F. Westin: 2-stufige Aufladung von Ottomotoren, General Motors Powertrain, 32. Internationales Wiener Motorensymposium, 2011.
- [15]: S. Schilling: Roadmap for a Global Supplier to Reduce Future Emissions for Gasoline Engines, 26<sup>th</sup> International AVL Conference "Engine & Environment", Graz, Austria, September 11<sup>th</sup> – 12<sup>th</sup>, 2014.
- [16]: M. Wittler, P. Glusk, A. Nase, M. Daniel: Future Engine Strategies – Survival of the ICE Beyond 2025?, 24<sup>th</sup> Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, 2015.
- [17]: D. Pagliari, M. Cecur: Dynamic Cylinder De-Activation: System Approach and Performance Potential, 24<sup>th</sup> Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, 2015.
- [18]: R. Velusamy: Gasoline vs. Diesel – Market Demands and Technology Drivers for the Indian PC Market, Mahindra & Mahindra Ltd., 26<sup>th</sup> International AVL Conference "Engine & Environment", Graz, Austria, September 11<sup>th</sup>-12<sup>th</sup>, 2014.
- [19]: T. Sato, H. Grassberger, P. Pertl, A. Trattner, S. Schmidt, R. Kirchberger, H. Eichlseder: Expansion to higher efficiency – requirements on valve actuation for Atkinson cycle-based engines, 13th Stuttgart International Symposium Automotive and Engine Technology, 26. & 27.2.2013.
- [20]: P. Kapus, K. Prevedel, J. Wolkerstorfer, M. Neubauer: Magerbetrieb, Hoch-AGR, neue Kurbeltriebe – Wohin bewegt sich der Ottomotor der Zukunft? 14. Tagung „Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors“, AVL List GmbH, Graz, 24/25. September 2013.

- [21]: O. Lang: „Downsizing mit variabler Verdichtung“ – Alternative oder Ergänzung zur Hbyridisierung?, Beitrag zur 16. Internationalen AVL-Konferenz „Motor & Umwelt“, Graz, 2004.
- [22]: K. Habermann: Demonstrationsfahrzeug mit kontinuierlich variabler Verdichtung (VCR), FEV Engine Technology, <http://www.fev.com/content/public/default.aspx?id=740> Zugriff am 11. Oktober 2015.
- [23]: G. Karl, F. Otto, R. Herweg, N. Freisinger, S. Weber, M. Bechtold: Future Potential of Gasoline Engines, 2nd International Conference on Ignition Systems for Gasoline Engines Berlin, Session 1: Development trends, 24. & 25.11.2014.
- [24]: E. Rau, H. Kohler, G. Karl, K. Fieweger, J. Betsch, B. Krutzsch: Zukunftspotentiale durch Variabilitäten am Ottomotor, 35. Wiener Motorensymposium, Daimler AG, 2014.
- [25]: M. Winkler, J. Grimm, H. Lenga, R. Hartmann, H. Min: Low Pressure EGR for Downsized Gasoline Engines, Hyundai Motor Europe Technical Center GmbH, 23rd Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, 2014.
- [26]: M. Thewes, H. Baumgarten, J. Dohmen, T. Uhlmann, J. Seibel, A. Balazs, F. Hoppe, M. S. Kriek, P. Hoppe: Gasoline Combustion System Beyond 2020, 23rd Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, FEV GmbH, 2014.
- [27]: J. Rückauf, B. Lerch: Verbrauch und Emissionen senken, Reibungsreduktion bei Ottomotoren, Springer Verlag, Sonderausgabe von ATZ (Automobiltechnische Zeitschrift) und MTZ (Motorentechnische Zeitschrift), Juni 2008.
- [28]: ThyssenKrupp InCar plus: Reibungsreduzierung bei Nockenwellen, Springer Verlag, ATZ (Automobiltechnische Zeitschrift) extra, 10. 2014.
- [29]: C. Tiemann: Wälzlagerung im Verbrennungsmotor. Ein effektiver Weg zur Verbrauchreduktion, FEV Motorentechnik GmbH, Springer, MTZ (Motorentechnische Zeitschrift), April 2007.
- [30]: TNO/IEEP/LAT: „Review and analysis of the reduction potential and costs of technological and other measures to reduce CO<sub>2</sub>-Emissions from passenger cars“, Delft, 2006.
- [31]: O. Lang, K. Habermann, S. Pischinger, F. Fricke: Ottomotorisches Brennverfahren zum Einsatz zukünftiger Kraftstoffe, FEV Motorentechnik GmbH, 26. Internationales Wiener Motorensymposium, 2005.

- [32]: G. K. Fraidl, P.E. Kapus, K. Prevedel, A. Fürhapter: DI Turbo: Die nächsten Schritte, Wiener Motorensymposium 2007, 2007.
- [33]: G. Eckhard: Potential von Bioethanol als Kraftstoff für PKW-DI-Motoren, Diplomarbeit, Graz, 2009.
- [34]: M. Günther, M. Nijs, S. Pischinger, U. Kramer: Effects of LPG Fuel Formulations and Mixture Formation Systems on the Combustion System of a Boosted SI Engine, 22<sup>nd</sup> Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, 1071, 2013.
- [35]: J. Förster, P. Bäuerle, K. Kröger, W. Langer, J. Thurso: Erdgas Bifuel-Motronic für zukunftsorientierte CNG-Fahrzeugkonzepte, Robert Bosch GmbH, Gasoline Systems, Stuttgart, 13.Aachener Kolloquium Fahrzeug. und Motorentchnik, 2004.
- [36]: B. Witschen, K. Lehrhoff, D. Göbel, M. Dienhart: Alternative Kraftstoffe im Verkehr – Die Bedeutung von Erdgas in der zukünftigen Mobilität, RheinEnergie AG, Köln, 14. Aachener Kolloquium Fahrzeug. und Motorentchnik, 2005.
- [37]: M. Günther, U. Kramer: Vergleich des thermodynamischen Potentials, des Oktanbedarfs, der Starteigenschaften und der Verschmutzungsneigung zweier bivalenter LPG-Konzepte an einem Turbo-DI-Ottomotor: LPG-DI und LPG-PFI, Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen, Aachen, Informationstagung Motoren, Frühjahr 2013, Leipzig, Zwischenbericht über das Vorhaben Nr. 1069, 2013.
- [38]: D. Ceratto, S. Ravina, A. Bianco, E. Delogu, F. Millo: A numerical 1D-3D investigation on different LPG injection strategies and engine concepts with experimental verifications, 7<sup>th</sup> IAV Conference Gas-Powered Vehicles – The Logical Approach to CO<sub>2</sub> Reduction, Potsdam, 24-25 September 2012.
- [39]: B. Lehrheuer, P. Hoppe, M. Günther, S. Pischinger, U. Kramer: Downsizing with Biofuels: Combustion System Development for a 0.8 l 3-Cylinder Engine with High Specific Power, Institute for Combustion Engines, RWTH Aachen University, 23<sup>rd</sup> Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, 2014.
- [40]: G. Eckhard: Potential von Bioethanol als Kraftstoff für PKW-DI-Motoren, Diplomarbeit, Technische Universität Graz, 2009.
- [41]: I. Avramopoulos, M. Günther, M. Kratzsch: Ottomotor mit Flüssiggas-Direkteinspritzung – Eine Chance zur besseren Nutzung eines Erdöl-Begleitgases?, iav automotive engineering, 6. Tagung Gasfahrzeuge – Die ehrliche und wirtschaftliche CO<sub>2</sub> – Alternative, Stuttgart, 26. und 27. Oktober 2011.

- [42]: F. Fricke, O. Lang, K. Habermann, O. Rütten: Brennverfahrenskonzepte zur Darstellung von CNG-Antrieben, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, Technische Universität Graz, Large Engines Competence Center (LEC), 10. Tagung „Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors“, 23.-23. September 2005.
- [43]: K. Bergström, S. A. Melin, C. Coleman Jones: Der neue ECOTEC Turbo BioPower Motor von GM Powertrain – Nutzen der Energieressourcen der Natur, General Motors Powertrain, 28. Internationales Wiener Motorensymposium 2007, Wien, 2007.
- [44]: T. Allgeier, M. Klenk, T. Landenfeld: Bewertung alternativer Kraftstoffe für den Einsatz im Kraftfahrzeug, Robert Bosch GmbH, Schwieberdingen, 2012.
- [45]: K. Bergström, H. Nordin, A. Königstein, C. D. Marriott, M. A. Wiles: ABC – Brennverfahren für Alkoholkraftstoffe – Herausforderungen und Möglichkeiten, GM Powertrain, 16. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen, 2007.
- [46]: O. Lang, K. Habermann, S. Pischinger, F. Fricke: Ottomotorisches Brennverfahren zum Einsatz zukünftiger Kraftstoffe, FEV Motorentechnik GmbH, Aachen, 26. Internationales Wiener Motorensymposium, Wien, 2005.
- [47]: Industriegase Lexikon: <http://www.unternehmensberatung-babel.de/industriegaselexikon/kohlenwasserstoffe/methan/>. Zugriff am 27.11.2015.
- [48]: J. Aríztegui (Repsol), A. Fürhapter (AVL): LPG fuel and advanced downsized turbo DISI engines: The optimum combination, 9<sup>th</sup> Conference on Gas-Powered Vehicles, The Future is Coming, Potsdam, September 29-30, 2014.
- [49]: U. Thien (MAGNA STEYER Fahrzeugtechnik), K. Schaffer, H. Eichlseder (Technische Universität Graz): 1,6 l Kompressormotor für CNG Motorisierung eines Sportfahrzeuges, 27. Internationales Wiener Motorensymposium, Wien, 2006.
- [50]: O. Dingel: Besonderheiten der motorischen Verbrennung von gasförmigen Kraftstoffen, IAV GmbH, MTZ-Konferenz „Kraft- und Schmierstoffe“, Hamburg, 15. November 2007.
- [51]: M. Günther, M. Nijs, S. Pischinger (Institute for Combustion Engines, RWTH Aachen University, Germany), U. Kramer (Ford-Werke GmbH, Cologne, Germany): Effects of LPG Fuel Formulations and Mixture Formation Systems on the Combustion System of a Boosted SI Engine, 22<sup>nd</sup> Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, Aachen, 2013.

- [52]: W. Warnecke, J. Karanikas, B. Levell, C. Mesters, J. Schreckenberger, J. Adolf: Gas – a bridging technology for future mobility?, Shell Deutschland, 34. Internationales Wiener Motorensymposium, Wien, 2013.
- [53]: P. E. Kapus: Ethanol Direct Injection on Turbocharged SI Engines – Potential and Challenges, AVL-List GmbH, SAE World Congress 2007.
- [54]: M. Urbanek, P. Hofmann, B. Geringer: Emission Performance of Passenger Cars Operated with Ethanol Blends, Institute of Internal Combustion Engines and Automotive Engineering, University of Technology Vienna, “7<sup>th</sup> International Colloquium Fuels”, Ostfildern, Germany, 2009.
- [55]: P. Hofmann, T. Hofherr, M. Damböck (Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik Technische Universität Wien), W. Fritz, F. Kampelmühler (Magna Steyr Fahrzeugtechnik AG & Co. KG Graz): Der CULT Antrieb: Hocheffizienter CNG Motor mit Direkteinblasung, 34. Internationales Wiener Motorensymposium, Wien, 2013.
- [56]: T. Bürgin, C. Bertolini, D. Caprioli, C. Müller: Motorkapselung zur CO<sub>2</sub>- und Lärmreduktion, Springer Verlag, ATZ (Automobiltechnische Zeitschrift), 03.2014.
- [57]: M. Espig: Technische Möglichkeiten zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen am Beispiel Golf 1.4 I TSI, Ergebnisse der Verbrauchsmessungen am ika (Verbrauchseinfluss Wärmespeicher & Schaltanzeige), Institut für Kraftfahrwesen Aachen (ika), im Auftrag des UBA, Aachen, September 2007.
- [58]: S. Mokhtari, P. Souhaité, A. Tellier: Combustion System Design of the New PSA Peugeot Citroen PureTech 1.2 e-THP Engine, PSA Peugeot Citroen, 23<sup>rd</sup> Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, Aachen, 2014.
- [59]: A. Schamel, M. Wirth, L. Bartsch, S. Ploumen: Gasoline and Diesel Engines in the Era of Advanced Technologies and New Fuels: What will be their Individual Roles?, Ford Research & Advanced Engineering Europe, 26<sup>th</sup> International AVL Conference “Engine & Environment”, Graz, Austria, September 11<sup>th</sup>-12<sup>th</sup>, 2014.
- [60]: H. Baumgarten, W. Bick, J. Dohmen, T. Uhlmann, M. Thewes, M. Schwaderlapp, D. Tomazic: Design im Grenzbereich: CO<sub>2</sub>-Potentiale konventioneller Technologien beim Otto- und Dieselmotor, FEV GmbH, Aachen, 35. Internationales Wiener Motorensymposium, Wien, 2014.
- [61]: F. Otto, K. Rößler, C. Bertram (Daimler Chrysler AG, Stuttgart), A. Fürhapter (AVL List GmbH, Graz): Potentiale des aufgeladenen monovalenten Erdgasmotors beim PKW,

11. Tagung „Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors“, Graz, 20./21. September 2007.

[62]: L. Jiang, H. Yilmaz, M. Christie, K. Ahn, A. Stefanopoulou: Optimally Controlled Flexible Fuel Vehicle, Stuttgarter Symposium 2010.

[63]: K. Schintzel, J. Willand, H. Hoffmeyer: Der Einfluss alternativer Kraftstoffe auf die strahlgeführte Benzin-Direkteinspritzung, Volkswagen AG, Konzernforschung Antriebe Ottomotoren, 8. Internationales Symposium für Verbrennungsdagnostik, Kurhaus Baden-Baden, 10./11. Juni 2008.

[64]: P. Hoppe, B. Lehrheuer: CO<sub>2</sub>-Potential an einem hochaufgeladenen Otto-DI Motor optimiert für hochoktanige Biokraftstoffblends unter Berücksichtigung von Notlaufstrategien für ROZ95-Kraftstoffe, Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen (VKA), RWTH Aachen, Informationstagung Motoren, Heft R570, Bad Neuenahr, Frühjahr 2015.

[65]: S. Potteau, P. Lutz, J.B. Vogel, K. Surbled, F. David, C. Corniglion, J. Quincerot, A. Richert, JF Duguey (Valeo Engine & Electrical System), J.S. Bernard, J.C. Le Prigent (Valeo Engine Cooling): Fuel Eco Project: -25% of CO<sub>2</sub> Saving, 19. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen, 2010.

[66]: J. Gingrich, T. Alger, B. Sullivan: Ethanol Flex-fuel Engine Improvements with Gas Recirculation and Hydrogen Enrichment, Southwest Research Institute, SAE International J. Fuels Lubr., Volume 2, Issue 1, 01. 2009.

[67]: C. Friedrich, U. Grebe: Effiziente Ottomotoren durch Erdgas und Aufladung, Opel Powertrain GmbH, 9. Tagung „Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors“, Graz, September 2003.

[68]: R. Herynek, T. Raatz, H. Kaiser, F. Miller, W. Langer: Zukünftige Motorsteuerungen für den CNG-Ottomotor – Anforderungen und Lösungen -, Robert Bosch GmbH, Springer Verlag, Motortechnische Zeitschrift (MTZ), Juni 2012.

[69]: H. Husted, G. Karl, S. Schilling, C. Weber: Direct Injection of CNG for Driving Performance with Low CO<sub>2</sub>, Delphi Powertrain Systems, 23<sup>rd</sup> Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, Aachen, 2014.

[70]: H.J. Berner, S. Bohatsch, B. Hofmann, A. Ferrari, M. Bargende: Strahlgeführte Erdgas-Direkteinblasung zur Erzielung höchster Wirkungsgrade, Gasfahrzeuge 3, Die

Schlüsseltechnologie auf dem Weg zum emissionsfreien Antrieb?, Haus der Technik, Essen, 2008.

[71]: P. Heuser, J. Geiger, S. Lauer, H. Sankhla, (FEV GmbH, Aachen), A. Dhongde, P. Simm (Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen, RWTH Aachen University): Der Erdgasmotor im Nutzfahrzeug als Dieselmotor-Derivat, 35. Internationales Wiener Motorensymposium, Wien, 2014.

[72]: C. Fettes, U. Peter, R. Bey: Potentiale von Gasmotoren mit vollvariablem Ventiltrieb, Meta GmbH, Herzogenrath, HDT-Fachbuch, Band 1, Variable Ventilsteuerung, Konzepte zur Drehmomentverbesserung und zur Reduzierung von Kraftstoffverbrauch und Emissionen, Shaker Verlag, Aachen, 2007.

[73]: S. Schmerbeck: Clean Vehicle Development at VW, Volkswagen AG, Eco-Mobility 2014, Wien, Austria, 2014.

[74]: R. Wurms, R. Budack, M. Grigo, G. Mendl, T. Heiduk, S. Knirsch: Der neue Audi 2,0l Motor mit innovativem Rightsizing – ein weiterer Meilenstein der TFSI-Technologie, Audi AG, 36. Internationales Wiener Motorensymposium, Wien, 2015.

[75]: N. Neumann: Die Entwicklung der Kraftstoffe von heute und morgen aus der Sicht der BP, BP Global Fuels Technology, ATZ/MTZ Konferenz Motor, Hamburg, November 2007.

[76]: P. Dedl, P. Hofmann, B. Geringer (Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik, Technische Universität Wien), D. Karner (OMV Refining and Marketing GmbH), M. Lohrmann (Volkswagen Aktiengesellschaft): Untersuchung des Volllastpotentials unterschiedlicher Alkoholkraftstoffe für den ottomotorischen Einsatz im MPFI Saugmotor und DI Turbomotor, 13. Tagung „Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors“, Graz, 23./23. September 2011.

[77]: BASF SE: n-Butanol, BASF The Chemical Company, Technische Information, Petrochemikalien, Ludwigshafen, Juli 2014.

[78]: Messer: Butan C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>, Physikalische Eigenschaften, Version 1.0, Messer Schweiz AG, Lenzburg.

[79]: Messer: Propan C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, Physikalische Eigenschaften, Version 1.0, Messer Schweiz AG, Lenzburg.

- [80]: M. Baerns, A. Behr, A. Brehm, J. Gmehling, K. O. Hinrichsen, H. Hofmann, R. Palkovits, U. Onken, A. Renken: Technische Chemie, Verlag GmbH & Co. KGaA, WILEY-VCH, Zweite, erweiterte Auflage, Weinheim, Germany, 2013.
- [81]: Mineralölwirtschaftsverband e.V. : Kraftstoffe der Zukunft, Hamburg, 2000.
- [82]: B. Geringer, P. Hofmann: Alternative Antriebe, Skriptum, Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik, Technische Universität Wien, Wien, Jänner 2015.
- [83]: Chemie.de: <http://www.chemie.de/lexikon/Methanol.html>. Zugriff am 13.12.2015.
- [84]: R. Paschotta: RP-Energie-Lexikon: <https://www.energie-lexikon.info/methanol.html>. Zugriff am 16.01.2016.
- [85]: H. Menrad, A. König: Alkoholkraftstoffe, Volkswagen AG, Springer Verlag Wien NewYork, Innovative Energietechnik, Wien, 1982.
- [86]: M. Günther, U. Kramer: Vergleich des thermodynamischen Potentials, des Oktanbedarfs, der Starteigenschaften und der Verschmutzungsneigung zweier bivalenter LPG-Konzepte an einem Turbo-DI-Ottomotor: LPG-DI und LPG-PFI, Zwischenbericht über das Vorhaben Nr. 1069, Aachen, 2013.
- [87]: J. Ariztegui, J. Gutierrez (Repsol S. A., Mostoles), A. Fürhapter, H. Friedl (AVL List GmbH, Graz): LPG Fuel Direct Injection for Turbocharged Gasoline Engines, Springer Verlag, Motortechnische Zeitschrift (MTZ), 10.2015.
- [88]: Y. Y. Wu, B. C. Chen, A. T. Tran: Pollutant Emission Reduction and Engine Performance Improvement by Using a Semi-Direct Injection Spark Ignition Engine Fuelled by LPG, Department of Vehicle Engineering National Taipei University of Technology, Aerosol and Air Quality Research, 12: 1289-1297, Taipei, Taiwan, 2012.
- [89]: G. Fraidl, P. Kapus: The future of gasoline engines, AVL LIST GmbH, 15<sup>th</sup> Stuttgart International Symposium, Automotive and Engine Technology, Volume 2, Stuttgart, 2015.
- [90]: Dr. Gunter Festel: Biokraftstoffe der 2. Generation, Bewertungskriterien und Produktionskosten, Report, Hünenberg, 11. 2006.
- [91]: O. Henniges: Wirtschaftlichkeit von Bioethanol – Produktion und Produktionskosten im nationalen und internationalen Vergleich, Agrarwirtschaft 56, Heft 5/6, Universität Hohenheim, Hohenheim, Deutschland, 2007.

- [92]: F. Gattermayer: Ethanol – Ein weltweiter Überblick, Erschienen in: I. Darnhofer, C. Walla und K.K. Wytrzens: Alternative Strategien für die Landwirtschaft, S. 145-164., Wien, 2006.
- [93]: Dr. Gunter Festel: Biokraftstoffe der 2. Generation, Bewertungskriterien und Produktionskosten, Report, Hünenberg, 11. 2006.
- [94]: W. Böhme: Fuels and Alternative Fuels in Europe and OMV Position, OMV Aktiengesellschaft, Wien, 2006.
- [95]: T. Senn: Neue Wege der Bioethanolgewinnung. Kleine Anlagen – große Effizienz, Universität Hohenheim, Institut für Lebensmitteltechnologie, Nachwachsende Rohstoffe für Baden-Württemberg – Forschungsprojekte für den Ländlichen Raum, Tagung vom 14. Oktober 2004, Universität Hohenheim, Aula im Schloss, Hohenheim, Deutschland, 2004.
- [96]: M. Weitz: Biokraftstoffe – Potential, Zukunftsszenarien und Herstellungsverfahren im wirtschaftlichen Vergleich, Diplomarbeit, Universität – Gesamthochschule Kassel, Fachbereich Ökologische Agrarwissenschaften, Kassel, Deutschland, September 2003.
- [97]: G. Maihold, J. Husar: Energie und Integration in Nord- und Südamerika, Verlag Barbara Budrich, Opladen & Farmington Hills, MI, 2010.
- [98]: T. von Ungern-Sternberg: Protektionismus schadet der Umwelt: Der Markt für Bioethanol sollte liberalisiert werden, Université de Lausanne, Faculté des HEC, DEEP, Schweiz, November 2004.
- [99]: H. Schnell, L. Tönskötter: Biotechnologische Energieumwandlung in Deutschland, Stand, Kontext, Perspektiven, acatech (Deutsche Akademie der Technikwissenschaften) POSITION, München, Juni 2012.
- [100]: R. Janssens: Butanol scoping study: opportunities and threats for developing countries, InnoPartner for FACT, December 2011.
- [101]: W. Kempkens, D. Dürand: Wirtschafts Woche:  
<http://www.wiwo.de/technologie/oekologische-treibstoffe-biosprit-holz-fuer-den-motor/5359798.html>. März 2008, Zugriff am 30.12. 2015.
- [102]: L. Grooms: Farm Industry News Blog: <http://farmindustrynews.com/blog/bio-butanol-can-be-produced-about-same-cost-ethanol-optinol-reports>. August 2013, Zugriff am 30.12. 2015.

[103]: R. Rapier: EnergyTrends Insider:

<http://www.energytrendsinsider.com/2006/05/01/bio-butanol/>. on May 1 2006, Zugriff am 30.12. 2015.

[104]: C. Burgess Clifford: Economics of Butanol Production, <https://www.e-education.psu.edu/egee439/node/721>. Zugriff am 30.12. 2015.

[105]: S. Leduc, J. Lundgren, O. Franklin, E. Schmid, E. Dotzauer: Optimal location for a biomass based methanol production plant: Case study in Northern Sweden, From Research to Market Deployment: 15<sup>th</sup> European Biomass Conference & Exhibition: proceedings of the international conference held in Berlin, Berlin, Germany, 7-11. May 2007.

[106]: M. Broeren: Production of Bio-Methanol, Utrecht University, IEA-Energy Technology System Analysis Programme and Internal Renewable Energy Agency Technology-Policy Brief 108, Utrecht, Netherlands, January 2013.

[107]: S. Arning: Die Zeit nach dem Öl, Mögliche Kraftstoffquellen für die Landwirtschaft der Zukunft, Bachelor-Studienarbeit, Hochschule Neubrandenburg, University of Applied Sciences, Fachbereich Agrarwirtschaft und Landschaftsarchitektur, Fachgebiet erneuerbare Energien, Neubrandenburg, Deutschland, September 2009.

[108]: H. L. Wakeley, W. M. Griffin, C. Hendrickson, H. S. Matthews: Alternative Transportation Fuels: Distribution Infrastructure for Hydrogen and Ethanol in Iowa, ASCE, Journal of Infrastructure Systems ASCE, Pittsburgh PA, United States, September 2008.

[109]: E. Schwizer, R. Löhner: Alternative Treibstoffe und Antriebe, Touring Club Schweiz, suisse schweiz svizzero, Nr. 51\_2, Emmen/Luzern, Schweiz, Juni 2009.

[110]: K. Pabst, G. Schaub (Engler-Bunte-Institut), M. Lüft, A. Velji (Institut für Kolbenmaschinen): Neuartige Kraftstoffe und zukünftige Abgasemissionen bei Kraftfahrzeugen – eine Übersicht, Universität Karlsruhe (TH), Bericht, erstellt im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), Karlsruhe, Deutschland, Oktober 2007.

[111]: R. Otten: Alternative Kraftstoffe der 3. Generation: Audi e-fuels, Nachhaltige Produktentwicklung, AUDI AG, Forschungsnetzwerk Biogene Kraftstoffe, Fachgespräch 19. September 2013, Kompetenzzentrum für Nawaros, Straubing, Deutschland, 2013.

[112]: M. Weitz: Biokraftstoffe – Potential, Zukunftsszenarien und Herstellungsverfahren im wirtschaftlichen Vergleich, Wissenschaftliche Studie, Hamburg, Februar 2007.

- [113]: P. Cazzola, G. Morrison, H. Kaneko, F. Cuenot, A. Ghandi, L. Fulton: Production cost of alternative transportation fuels, Influence of Crude Oil Price and Technology Maturity, International Energy Agency (IEA), Paris, France, 2013.
- [114]: M. Blesl, U. Fahl, U. Remme, B. Rühle: Energiewirtschaftliche Langfristszenarien für Alternative Kraftstoffe und Antriebskonzepte, Teil 1, Springer Verlag, ATZ (Automobiltechnische Zeitschrift), Forschung Kraftstoffe, Mai 2005.
- [115]: V. Grimm, H. Eickenbusch: Rohstoffquelle Biomasse - Stand und Perspektiven, VDI Technologiezentrum GmbH, VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 1, Berlin, Deutschland, Dezember 2012.
- [116]: K. Heinloth: Die Energiefrage – Bedarf und Potentiale, Nutzung, Risiken und Kosten, 2. Auflage, Vieweg Verlag, Braunschweig, Deutschland, 2003.
- [117]: Autogas Incentive Policies, A Country-by-Country Analysis of Why and How Governments Encourage Autogas and What Works, The World LPG Association (WLPGA), Neuilly-sur-Seine, France, 2015.
- [118]: Shell Autogas Pricing: <http://www.shell.com.au/products-services/on-the-road/fuels/lpg/pricing.html>. Zugriff am 01.01.2016.
- [119]: Ölpreis: <http://www.finanzen.net/rohstoffe/oelpreis>. Zugriff am 01.01.2016.
- [120]: G. A. Reinhardt, H. Helms: Wie nachhaltig sind Biokraftstoffe? (How sustainable are biofuels?), Industrial Ecology: Erfolgreiche Wege zu nachhaltigen industriellen Systemen. A. v. Gleich, S. Gößling-Reisemann (Hrsg.), Kap. 7, Kraftstoffe der Zukunft, S. 78 - 87, Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden 2008.
- [121]: IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change): Climate Change 2007 – The Physical Science Basis, Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the IPCC. New York: Cambridge University Press, ISBN 978 0521 88009-1, New York, 2008.
- [122]: B. Geringer, M. Urbanek, F. Holub, H. Pflaum: „Biokraftstoffe – Herausforderung an die Motoren von morgen“, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Kraftfahrzeugbau der Technischen Universität Wien, 18. Symposium Bioenergie; OTTI e.V., Kloster Banz, Bad Staffelstein, Deutschland, 18/19. November 2009.

- [123]: D. Gartlgruber: Potentiale und Kontroversen bei biogenen Treibstoffen, Masterarbeit, Karl-Franzens-Universität Graz, Sozial- und Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät, Institut für Volkswirtschaftslehre, Graz, Österreich, Juni 2009.
- [124]: Kraftstoffe: Österreichischer Verein für Kraftfahrzeugtechnik (ÖVK), Wien, 2010.
- [125]: State of the Art on Alternative Fuels Transport Systems in the European Union, Final Report, DG MOVE – Expert group on future transport fuels, COWI, July 2015.
- [126]: G. Jungmeier, S. Hausberger, S. Hausberger, K. Könighofer, A. Wenzel: Treibhausgas-Emissionen und Kosten von Transportsystemen mit zukünftigen Biotreibstoffen in Österreich, TU Graz, Joanneum Research, Institut für Energieforschung, VDI-Bericht Nr. 1852, Graz, 2004.
- [127]: G. Lichtblau, W. Pölz, S. Stix, R. Winter: Ökobilanz ausgewählter Biotreibstoffe, Umweltbundesamt GmbH, Erstellt im Rahmen des Projekts „Biokraftstoffe – Potentiale, Risiken, Zukunftsszenarien“, Report REP-0360, Wien, 2012.
- [128]: Autosieger: <http://www.autosieger.de/Biogas-hat-die-beste-Oekobilanz-unter-den-alternativen-Kraftstoffen-article12861.html>. Zugriff am 09.01.2016.
- [129]: J. Adolf, C. Balzer, A. Joedicke, U. Schabla, (Shell Deutschland, Hamburg), S. Staßburg (Prognos AG, Basel), B. Gnörich, M. Thoennes (fka mbH, Aachen), M. Ehring, W. Koch, K. Lucka (OWI, Aachen): Shell LPG Study, LPG as energy carrier and fuel, English summary, Hamburg, 2015.
- [130]: H. Eichlseder, P. Grabner, G. Eckhard: Potential of E85 Direct Injection for Passenger Car Application, Institute for Internal Combustion Engines and Thermodynamics, Graz University of Technology, Bad Neuenahr, 03. 2012.
- [131]: B. R. Wigg: A study on the emissions of Butanol using a spark ignition engine and their reduction using electrostatically assisted injection, Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois, United States, 2011.
- [132]: M. Wang: Updated Well-to-Wheels Results of Fuel Ethanol With The GREET Model, Center for Transportation Research Argonne National Laboratory, Presentation to the Biomass R&D Technical Advisory Committee, Detroit, United States, September 2007.
- [133]: M. Wu, M. Wang, J. Liu, H. Huo: Assessment of potential life-cycle energy and greenhouse gas emission effects from using corn-based butanol as a transportation fuel,

Center for Transportation Research, Energy System Division, Argonne National Laboratory, Argonna, United States, November 2008.

[134]: B. E. Laing: Ecologically-based Life Cycle Assessment of corn Stover biofuels, Undergraduate honors research thesis, The Ohio State University, Ohio, United States, 2012.

[135]: Die Rückkehr der Zylinderabschaltung – Zeitarbeit im Motorblock: <http://www.auto.de/magazin/die-rueckkehr-der-zyylinderabschaltung-zeitarbeit-im-motorblock/>, Zugriff am 09.01.2016.