



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN  
Vienna University of Technology



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

## Dissertation

# Der Einfluss von flüssigen und gasförmigen alternativen Kraftstoffen auf die Emissionen von Kraftfahrzeugen bei der ottomotorischen Verbrennung

*ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades  
eines Doktors der technischen Wissenschaften unter der Leitung von*

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Bernhard Geringer

E315

Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik

*eingereicht an der Technischen Universität Wien*

**Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften**

*von*

Dipl.-Ing. Michael M. Urbanek, MBA

Matrikelnummer 9425536

Kurzenkirchnerstraße 16, 3150 Wilhelmsburg

Wien, am 16. August 2010

*„Nicht alles, was zählbar ist, zählt und nicht alles, was zählt, ist zählbar.“*

Albert Einstein, 14.3.1879 bis 18.5.1955, Physiker und Nobelpreisträger

---

## Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Assistent am Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik (IFA) an der Technischen Universität Wien im Rahmen mehrerer Forschungsaufträge.

Dem Institutsvorstand Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Bernhard Geringer möchte ich für die Betreuung der vorliegenden Arbeit sowie für die vielen wertvollen Diskussionen und seine fachlichen Anregungen während der Erstellung meiner Dissertation herzlich danken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. Helmut Tschöke danke ich für das Interesse an dieser Arbeit, die Übernahme des Koreferats und die damit verbundenen Mühen.

Allen Mitarbeitern und Kollegen des Instituts, die mir immer mit Rat und Tat zur Seite standen, will ich hiermit meinen besonderen Dank aussprechen. Ihre Unterstützung in fachlicher aber auch in menschlicher Hinsicht hat wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Im Speziellen gilt mein Dank meinem langjährigen Zimmerkollegen Thomas Lauer, den Kollegen Florian Holub und Heiko Pflaum für die wertvolle Zusammenarbeit bei der Ausarbeitung der Forschungsergebnisse für meine Dissertation sowie Christian Bauer für die Unterstützung bei den Untersuchungen am Rollenprüfstand.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meiner Frau Claudia, bei meinen Eltern und meiner Schwester bedanken. Sie haben mich stets ermutigt und mir Verständnis für die fehlende gemeinsame Zeit entgegengebracht. Durch ihre Mithilfe wurden die notwendigen Voraussetzungen für diese Arbeit erst geschaffen.

Danke auch Claudia für die unermüdliche Suche nach fehlenden Beistrichen und die Korrektur meiner Rechtschreibfehler!

Wien, im August 2010

Michael Urbanek

---

Wesentliche Teile dieser Arbeit wurden bereits als Tagungsbeiträge und Studien veröffentlicht bzw. eingereicht:

LIST, R.; URBANEK, M.; HOFMANN, P.

*„The Effects of Bio-Ethanol Mixtures on the SI-Engine Operation“*

TAE 6<sup>th</sup> International Colloquium Fuels; Stuttgart/Ostfildern (10.-11.01.2007)

HOFMANN, P.; HOLUB, F.; LIST, R.; WINTER, St.; URBANEK, M.; GERINGER, B.

*„Potenzial von Ethanol-Blends in modernen Ottomotoren“*

Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors; Graz (20.-21.09.2007)

GERINGER, B.; HOLUB, F.; URBANEK, M.

*„Bioethanol - Alltagstauglichkeit und weiteres Potenzial im motorischen Einsatz“*

Experten Forum Umwelt – Bioethanol als Kraftstoff; Wien (21.05.2008)

URBANEK, M.; GERINGER, B.

*„Application of Bioethanol-Blends in a Motor Vehicle“*

IEA-Bioenergy Task39; Wien (9.9.2008)

URBANEK, M.; HOLUB, F.; GERINGER, B.; HOFMANN, P.

*„Flottentest- und Prüfstandsuntersuchungen mit Bioethanol verschiedener Konzentrationen – Ergebnisse eines österreichischen Forschungsprogramms“*

6. VDI-Tagung Innovative Fahrzeugantriebe; Dresden (6.-7.11.2008)

URBANEK, M.; GERINGER, B.; HOFMANN, P.

*„Limitierte und nichtlimitierte Schadstoffemissionen beim motorischen Betrieb mit Biokraftstoffen“*

ATZ/MTZ-Konferenz Innovative Kraft- und Schmierstoffe; Stuttgart (11.-12.11.2008)

URBANEK, M.; HOFMANN, P.; GERINGER, B.

*„Emission Performance of Passenger Cars Operated with Ethanol-Blends“*

TAE 7<sup>th</sup> International Colloquium Fuels; Stuttgart/Ostfildern (14.-15.01.2009)

---

URBANEK, M.

*„Auswirkungen von Bioethanolkraftstoffen auf das Emissionsverhalten von Kraftfahrzeugen“*

ForNeBiK Workshop Arbeitskreis Messtechnik; Straubing (05.-06.03.2009)

URBANEK, M.; HOFMANN, P.; GERINGER, B.

*„Vehicle Use with Ethanol-Blends – Emission Performance and Potential for CO<sub>2</sub>-Reduction“*

12<sup>th</sup> EAEC European Automotive Congress; Bratislava (29.06.-01.07.2009)

GERINGER, B.; URBANEK, M.; HOFMANN, P.; HOLUB, F.; PFLAUM, H.

*„Biokraftstoffe – Herausforderung an die Motoren von morgen“*

OTTI 18. Symposium BIOENERGIE; Bad Staffelstein (19.-20.11.2009)

GERINGER, B.; HOFMANN, P.; HOLUB, F.; URBANEK, M.

*„Bioethanol – Potential for Future Engine Developments“*

*Kraftstoffe der Zukunft 2009 – 7. Internationaler Fachkongress für Biokraftstoffe des BBE und der UFOP; Berlin (30.11.-01.12.2009)*

BLASSNEGGER, J.; URBANEK, M.; GERINGER, B.; KNAUER, M.; CARRARA, M.;  
NIESSNER, R.; SCHRAMM, K.-W.; KUNZE, J.; WÖRGETTER, M.

*„Untersuchung: Emissionen bei der motorischen Verbrennung von Biokraftstoffen und Kraftstoffmischungen“*

Bericht für die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.; 2009; 217S.

---

## Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>VI</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>X</b>
<b>Nomenklatur.....</b>	<b>XI</b>
<b>Abkürzungen .....</b>	<b>XI</b>
<b>Physikalische Größen.....</b>	<b>XIV</b>
<b>Kurzfassung.....</b>	<b>XV</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>XVI</b>
<b>1. Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Motivation und Zielsetzung .....</b>	<b>4</b>
<b>1.2. Historische Entwicklung und Einsatz alternativer Ottokraftstoffe....</b>	<b>7</b>
1.2.1. Bioethanol.....	8
1.2.2. Biogas.....	11
<b>1.3. Rahmenbedingungen für die Verwendung biogener Kraftstoffe ....</b>	<b>16</b>
1.3.1. Kyoto-Protokoll .....	16
1.3.2. EU-Biotreibstoffrichtlinie und EU-Strategie zur CO <sub>2</sub> -Absenkung bei Pkws .....	20
1.3.3. ACEA-Selbstverpflichtung .....	24
<b>2. Schadstoffkomponenten aus der motorischen Verbrennung.....</b>	<b>26</b>
<b>2.1. Rechtliche Rahmenbedingungen.....</b>	<b>26</b>
<b>2.2. Relevante Luftschadstoffe und Treibhausgase .....</b>	<b>28</b>
2.2.1. Kohlenmonoxid (CO) .....	29
2.2.2. Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> ).....	29
2.2.3. Kohlenwasserstoffe (C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> ) / Methan (CH <sub>4</sub> ).....	31
2.2.4. Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH) .....	34
2.2.5. Stickoxide (NO <sub>x</sub> ) .....	35
<b>3. Kraftstoffe.....</b>	<b>37</b>
<b>3.1. Herstellung.....</b>	<b>37</b>
3.1.1. Bioethanol.....	37
3.1.2. Biogas.....	43
<b>3.2. Stoffeigenschaften .....</b>	<b>48</b>

---

3.2.1.	Bioethanol.....	48
3.2.2.	Biogas.....	58
<b>3.3.</b>	<b>Berechnete Stoffwerte.....</b>	<b>66</b>
3.3.1.	Stöchiometrischer Luftbedarf.....	66
3.3.2.	Kohlendioxidemissionen bei vollständiger Verbrennung .....	68
<b>4.</b>	<b>Versuchsmethodik.....</b>	<b>70</b>
<b>4.1.</b>	<b>Prüfstandstechnik .....</b>	<b>70</b>
4.1.1.	4-Rad-Rollenprüfstand .....	70
4.1.2.	CVS-Methode .....	70
4.1.3.	Abgasanalysatoren.....	72
<b>4.2.</b>	<b>Berechnungsmethode.....</b>	<b>75</b>
4.2.1.	Ermittlung der Schadstoffemissionen nach der CVS-Methode .....	75
4.2.2.	Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs mittels Kohlenstoffbilanz .....	79
<b>5.</b>	<b>Versuchsumfänge und untersuchte Fahrzeuge .....</b>	<b>83</b>
<b>5.1.</b>	<b>Fahrzyklen.....</b>	<b>83</b>
5.1.1.	NEFZ Typ I .....	84
5.1.2.	NEFZ Typ VI.....	84
5.1.3.	Artemis CADC .....	85
<b>5.2.</b>	<b>Fahrzeuge.....</b>	<b>87</b>
<b>6.</b>	<b>Ergebnisse beim motorischen Betrieb.....</b>	<b>90</b>
<b>6.1.</b>	<b>Bioethanol .....</b>	<b>90</b>
6.1.1.	CO <sub>2</sub> -Emissionen und Wirkungsgrad .....	90
6.1.2.	Volumetrischer Kraftstoffverbrauch .....	99
6.1.3.	Limitierte Abgasemissionen.....	101
6.1.4.	Nicht limitierte Abgasemissionen.....	107
6.1.5.	Kaltstartfähigkeit .....	116
<b>6.2.</b>	<b>Biogas / CNG.....</b>	<b>120</b>
6.2.1.	CO <sub>2</sub> -Emissionen und Wirkungsgrad .....	120
6.2.2.	Limitierte Abgasemissionen.....	122
6.2.3.	Nicht limitierte Abgasemissionen.....	124
<b>7.</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>126</b>
<b>8.</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>130</b>

---

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einteilung der Kraftstoffe des Verkehrssektors [5]	1
Abbildung 2: Übersicht – Biokraftstoffe [3], [7], [8], [9]	2
Abbildung 3: Anzahl der Erdgasfahrzeuge in den verschiedenen Weltregionen [35]	13
Abbildung 4: Kyoto-relevante Treibhausgase – Situation für Österreich im Jahr 2006 [49]	17
Abbildung 5: Anteil (CO <sub>2</sub> -Äquivalente) der einzelnen Treibhausgase an den nationalen THG-Gesamtemissionen für Österreich im Jahr 2006 [49]	18
Abbildung 6: Anteil (CO <sub>2</sub> -Äquivalente) der Sektoren an den gesamten THG-Emissionen für Österreich im Jahr 2006 [49]	18
Abbildung 7: Änderung der Emissionen (CO <sub>2</sub> -Äquivalente) in den Sektoren zwischen 1990 und 2006 für Österreich [49]	19
Abbildung 8: Ziele der Energiepolitik Europas ab dem Jahr 2009 [53], [60], [58], [59]	22
Abbildung 9: Strategie der Europäischen Union zur CO <sub>2</sub> -Absenkung seit 2007 [62]	23
Abbildung 10: CO <sub>2</sub> -Emissionen der durchschnittlichen Neuwagenflotte in der EU-15 und Emissionsziele für 2012 und 2020 [64], [65]	24
Abbildung 11: Anteile der Treibhausgase am Treibhauseffekt [82]	30
Abbildung 12: Stoffliche Zusammensetzung (CO <sub>2</sub> -Äquivalente) der globalen anthropogenen THG-Emissionen für das Jahr 2005 [83]	31
Abbildung 13: Bildung von Acetaldehyd bei der Oxidation von Ethanol [92]	32
Abbildung 14: Strukturformeln der 16 wichtigsten PAH [96]	34
Abbildung 15: Rohstoffe für die Ethanolproduktion [22], [25]	38
Abbildung 16: Vereinfachtes Schema der Ethanolherstellung mit unterschiedlichen Rohstoffen [17], [110], [111]	40
Abbildung 17: Entwässerung des Ethanols – Absolutierungsverfahren [22], [116]	42
Abbildung 18: Verwendung der Nebenprodukte [24]	43
Abbildung 19: Schematische Darstellung des anaeroben Abbaus [117]	44
Abbildung 20: Einteilung der Verfahren zur Biogaserzeugung nach verschiedenen Varianten [123], [124], [125], [126]	45

---

Abbildung 21: Verfahrensschritte einer landwirtschaftlichen Biogasanlage [123]	46
Abbildung 22: Dichte verschiedener Versuchskraftstoffe [131]	49
Abbildung 23: Oktanzahlen verschiedener Versuchskraftstoffe [131]	50
Abbildung 24: Dampfdruck in Abhängigkeit von der Temperatur [131]	52
Abbildung 25: Dampfdruck von Kraftstoffmischungen bei Variation des Ethanolanteils [131]	53
Abbildung 26: Dampfdruck der Versuchskraftstoffe [131]	54
Abbildung 27: Siedeverlauf der Versuchskraftstoffe [131]	55
Abbildung 28: C/H/O-Verhältnis der Versuchskraftstoffe in Sommerqualität [131]	56
Abbildung 29: Heizwert der Versuchskraftstoffe [131]	56
Abbildung 30: Dichte der verschiedenen Gas-Kraftstoffe (bei 0°C, 1013mbar) [149]	61
Abbildung 31: Oktan-/Methanzahl der verschiedenen Gas-Kraftstoffe [149]	62
Abbildung 32: C/H/O-Verhältnis und CO <sub>2</sub> -Anteil der verschiedenen Gas-Kraftstoffe [149]	64
Abbildung 33: Heizwert der verschiedenen Gas-Kraftstoffe [149]	65
Abbildung 34: Masse- bzw. volumenbezogene CO <sub>2</sub> -Emission	68
Abbildung 35: Rollenprüfstand und CVS-Anlage [157]	71
Abbildung 36: Berechnung der korrigierten Schadstoffkonzentration für CO/CO <sub>2</sub> /HC/NO <sub>x</sub> nach ECE-R83 [75]	75
Abbildung 37: Berechnung des Verdünnungsfaktors und Herleitung des stöchiometrischen Faktors	76
Abbildung 38: Berechnung der Emissionswerte in g/km für CO/CO <sub>2</sub> /HC nach ECE-R83 [75]	77
Abbildung 39: Berechnung der Emissionswerte in g/km für NO <sub>x</sub> nach ECE-R83 [75]	78
Abbildung 40: Berechnung der Feuchtekorrektur für NO <sub>x</sub> nach ECE-R83 [75]	78
Abbildung 41: Berechnung des volumetrischen Kraftstoffverbrauchs von ROZ95	79
Abbildung 42: Berechnung des volumetrischen Kraftstoffverbrauchs von CNG	80
Abbildung 43: Berechnung des volumetrischen Kraftstoffverbrauchs von Ethanol	80
Abbildung 44: Berechnung des volumetrischen Kraftstoffverbrauchs von E5	81
Abbildung 45: Berechnung des volumetrischen Kraftstoffverbrauchs von E85	81
Abbildung 46: Kraftstoffmenge (in Masse /Volumen /Energie) der Versuchskraftstoffe für die gleiche CO <sub>2</sub> -Emissionsmenge	82

---

Abbildung 47: Geschwindigkeitsprofil für den NEFZ Typ I [75], [169]	84
Abbildung 48: Geschwindigkeitsprofil für den NEFZ Typ VI [75], [169]	85
Abbildung 49: Geschwindigkeitsprofil den CADC (urban/road/motorway) [169], [171]	86
Abbildung 50: Flottentest Bioethanol-Fahrzeuge	88
Abbildung 51: Messprogramm für die Emissionsuntersuchungen – „1Tag, 1 Kraftstoff“ [97], [131]	90
Abbildung 52: CO <sub>2</sub> -Emissionen beim Betrieb eines konventionellen Fahrzeugs mit verschiedenen Ethanol-Blends	91
Abbildung 53: CO <sub>2</sub> -Emissionen beim Betrieb eines Flexible Fuel Fahrzeuges mit verschiedenen Ethanol-Blends	91
Abbildung 54: Massebezogener Kraftstoffverbrauch über dem Ethanolanteil [166], [31]	93
Abbildung 55: Energiebezogener Kraftstoffverbrauch über dem Ethanolanteil [166], [31]	93
Abbildung 56: Verlustteilung für einen Teillastpunkt (2000min <sup>-1</sup> , 2bar)	95
Abbildung 57: Volllastdrehmoment mit den verschiedenen Versuchskraftstoffen [166], [31]	96
Abbildung 58: Luftzahl bei Volllast mit den verschiedenen Versuchskraftstoffen [166], [31]	97
Abbildung 59: Effektiver Wirkungsgrad bei Volllast [166], [31]	98
Abbildung 60: Verlustteilung für einen Hochlastpunkt (1500min <sup>-1</sup> , Volllast)	99
Abbildung 61: volumetrischer Kraftstoffverbrauch beim Betrieb eines konventionellen Fahrzeugs mit verschiedenen Ethanol-Blends	100
Abbildung 62: volumetrischer Kraftstoffverbrauch beim Betrieb eines Flexible Fuel Fahrzeuges mit verschiedenen Ethanol-Blends	100
Abbildung 63: HC-Emissionen beim Betrieb eines konventionellen Fahrzeugs mit verschiedenen Ethanol-Blends	102
Abbildung 64: HC-Emissionen beim Betrieb eines Flexible Fuel Fahrzeuges mit verschiedenen Ethanol-Blends	102
Abbildung 65: CO-Emissionen beim Betrieb eines konventionellen Fahrzeugs mit verschiedenen Ethanol-Blends	103
Abbildung 66: CO-Emissionen beim Betrieb eines Flexible Fuel Fahrzeuges mit verschiedenen Ethanol-Blends	103

---

Abbildung 67: NO <sub>x</sub> -Emissionen beim Betrieb eines konventionellen Fahrzeugs mit verschiedenen Ethanol-Blends	104
Abbildung 68: NO <sub>x</sub> -Emissionen beim Betrieb eines Flexible Fuel Fahrzeuges mit verschiedenen Ethanol-Blends	104
Abbildung 69: Zeitlicher Verlauf der verdünnten HC-Emissionen beim Betrieb eines Flexible Fuel Fahrzeuges mit verschiedenen Ethanol-Blends	106
Abbildung 70: PAH-Konzentrationen im Abgas des Flexible Fuel Fahrzeuges [97]	107
Abbildung 71: Nitro-PAH-Konzentrationen im Abgas des Flexible Fuel Fahrzeuges [97]	108
Abbildung 72: Carbonylkonzentrationen im Abgas des Flexible Fuel Fahrzeuges [97]	109
Abbildung 73: Aldehyd-Emissionen bei unterschiedlichen Kraftstoffgemischen und Betriebstemperaturen [194]	110
Abbildung 74: Zeitlicher Formaldehydverlauf bei einem NEFZ Typ VI	112
Abbildung 75: Zeitlicher Formaldehydverlauf bei einem NEFZ Typ I	112
Abbildung 76: Zeitlicher Acetaldehydverlauf bei einem NEFZ Typ VI	113
Abbildung 77: Zeitlicher Acetaldehydverlauf bei einem NEFZ Typ I	113
Abbildung 78: Zeitlicher Ethanolverlauf bei einem NEFZ Typ VI	115
Abbildung 79: Zeitlicher Ethanolverlauf bei einem NEFZ Typ I	115
Abbildung 80: Startprozedur „Kaltstartuntersuchungen“	116
Abbildung 81: Messprogramm für den Kaltstarttest – „1Tag, 1 Kraftstoff“	117
Abbildung 82: Zusammenhang zwischen Dampfdruck und der tiefsten noch möglichen Kaltstarttemperatur	118
Abbildung 83: CO <sub>2</sub> -Emissionen beim Betrieb verschiedener Biogas-/CNG-Fahrzeuge	120
Abbildung 84: HC-Emissionen beim Betrieb verschiedener Biogas-/CNG-Fahrzeuge	122
Abbildung 85: CO-Emissionen beim Betrieb verschiedener Biogas-/CNG-Fahrzeuge	123
Abbildung 86: NO <sub>x</sub> -Emissionen beim Betrieb verschiedener Biogas-/CNG-Fahrzeuge	123
Abbildung 87: Zeitlicher Methanverlauf bei einem NEFZ Typ VI	125
Abbildung 88: Zeitlicher Methanverlauf bei einem NEFZ Typ I	125

---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	EU Emissionsstandards für Pkw der Kategorie M1 [67], [68], [69], [70], [71], [72], [73], [74]	26
Tabelle 2:	Die 16 PAHs der US-EPA in der Liste der „Priority Pollutants“ bzw. andere Teilmengen [98]	35
Tabelle 3:	Eigenschaften verschiedener Rohstoffe zur Ethanolgewinnung bezogen auf das Jahr 2007 [24], [103]	38
Tabelle 4:	Übersicht – Biogasertrag verschiedener Substrate [117]	47
Tabelle 5:	Stoffeigenschaften von Benzin und Ethanol [30], [130]	48
Tabelle 6:	Sommer-/Winterottokraftstoff nach DIN EN 228	51
Tabelle 7:	Stoffwerte von verschiedenen Erdgasvorkommen [135], [146], [147]	59
Tabelle 8:	Durchschnittliche Zusammensetzung von Biogas [118]	59
Tabelle 9:	Stoffeigenschaften von Benzin und CNG [30], [130], [148], [149]	60
Tabelle 10:	C/H/O-Verhältnis der Versuchskraftstoffe nach Verordnung 692/2008 [74]	67
Tabelle 11:	Stöchiometrischer Luftbedarf der Versuchskraftstoffe	67
Tabelle 12:	CO <sub>2</sub> -Emission der Versuchskraftstoffe bezogen auf den Energieinhalt	69
Tabelle 13:	Technischen Daten des 4-Rad-Rollenprüfstands	70
Tabelle 14:	Berechnete stöchiometrische Faktoren für die Bezugskraftstoffe nach Verordnung 692/2008 [74]	76
Tabelle 15:	Dichtekoeffizienten für die Kohlenwasserstoffe verschiedener Versuchskraftstoffe (bei 0°C, 1013mbar) [74], [32]	77
Tabelle 16:	Daten der Bioethanol Versuchsfahrzeuge	87
Tabelle 17:	Daten der Biogas/CNG Versuchsfahrzeuge	88
Tabelle 18:	Prüfzyklen Biogas/CNG Versuchsfahrzeuge	89
Tabelle 19:	Sommer-/Winter-E85-Kraftstoff lt. ÖNORM C 1114 [196]	118
Tabelle 20:	Sommer-/Winter-E85-Kraftstoff lt. DIN 51625 [197]	119

---

## Nomenklatur

### Abkürzungen

ACEA	Association des Constructeurs Européens d'Automobiles
AG	Aktiengesellschaft
BaP	Benzo[a]pyren
BGBI	Bundesgesetzblatt
BOB	Basestock for Oxygenates Blending
BTL	Biomass-to-Liquid Verfahren
C	Kohlenstoff
CADC	Common Artemis Driving Cycle
CAFE	Clean Air for Europe
CH <sub>2</sub> O	Formaldehyd
CH <sub>4</sub>	Methan
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O	Acetaldehyd
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	Ethanol
C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	1,3-Butadien
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	Benzol
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>	Glukose
CLD	Chemolumineszenzdetektor
CNG	Compressed Natural Gas
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
CVS	Constant Volume Sampler
DDGS	Dried Distillers Grains with Solubles
DIN	Deutsches Institut für Normung
DNA	Desoxyribonukleinsäure
DNPH	2,4-Dinitrophenylhydrazin
DRP	Deutsches Reichspatentamt
E5	Eurosuper-Kraftstoff mit 5% Ethanolanteil (Volumenanteil)
E10	Eurosuper-Kraftstoff mit 10% Ethanolanteil (Volumenanteil)
E65	Eurosuper-Kraftstoff mit 65% Ethanolanteil (Volumenanteil)
E75	Eurosuper-Kraftstoff mit 75% Ethanolanteil (Volumenanteil)
E85	Eurosuper-Kraftstoff mit 85% Ethanolanteil (Volumenanteil)

---

ECE	Economic Commission for Europe
EG	Europäische Gemeinschaft
EN	Europäische Norm
ENGVA	European Natural Gas Vehicle Association
EPA	Environmental Protection Agency
EPAct	Energy Policy Act
ETBE	Ethyl-tertiär-butylether
EtOH	Ethanol
EU	Europäische Union
EU-25	Mitgliedstaaten der Europäischen Union vor der Erweiterung im Jahr 2007
EUDC	Extra-Urban Driving Cycle
EWG	Europäische Wirtschaftsgemeinschaft
F&E	Forschung und Entwicklung
FAME	Fettsäuremethylester
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoffe
FFV	Flexible Fuel Vehicle
FID	Flammenionisationsdetektor
FKW	Fluorkohlenwasserstoffe
FM	Frischmasse
FTIR	Fourier-Transformations-Infrarot-Spektrometer
FTP	Federal Test Procedure
GTL	Gas-to-Liquid Verfahren
H	Wasserstoff
H <sub>2</sub> S	Schwefelwasserstoff
H <sub>2</sub> O	Wasser
HC	Kohlenwasserstoffe
HFKW	teihalogenierten Fluorkohlenwasserstoffe
HPLC	Hochleistungsflüssigkeitschromatographie (high performance liquid chromatography)
IR	Infrarot
Kfz	Kraftfahrzeug
LNG	Liquefied Natural Gas
MOZ	Motor-Oktanzahl
MTBE	Methyl-Tertiär-Butylether

---

N	Stickstoff
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
Nfz	Nutzfahrzeug
NMHC	Nichtmethankohlenwasserstoffe
NO	Stickstoffmonoxid
NO <sub>2</sub>	Stickstoffdioxid
NO <sub>x</sub>	Summe Stickoxide
N <sub>2</sub> O	Distickstoffoxid (Lachgas)
O	Sauerstoff
OBD	On-Board-Diagnose
OEM	Original Equipment Manufacturer
ÖNORM	österreichische Norm
oTS	organische Trockensubstanz
ROZ95	Eurosuper-Kraftstoff
PAH	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
Pkw	Personenkraftwagen
PM	Particulate matter
RME	Rapsmethylester
ROZ	Research-Oktanzahl
SF <sub>6</sub>	Schwefelhexafluorid
THG	Treibhausgase
TS	Trockensubstanz
ULEV	Ultra Low Emission Vehicle
URAS	Ultrarot Analysator (ultra-red absorption recorder)
US	United States
USA	United States of America
VOC	flüchtige organische Verbindungen (volatile organic compound)
z. B.	zum Beispiel

---

**Physikalische Größen**

Vol.-%	Volumenprozent	[Vol.-%]
c	Massenanteil an Kohlenstoff	[%]
C <sub>e</sub>	gemessene Konzentration des Schadstoffs CO/CO <sub>2</sub> /HC/NO <sub>x</sub> in den verdünnten Abgasen	[ppm]
C <sub>d</sub>	gemessene Konzentration des Schadstoffs CO/CO <sub>2</sub> /HC/NO <sub>x</sub> in der für die Verdünnung verwendeten Luft	[ppm]
d	zurückgelegte Fahrstrecke	[km]
DF	Dilution Factor (Verdünnungsfaktor)	[-]
η <sub>th</sub>	thermische Wirkungsgrad	[%]
F <sub>S</sub>	stöchiometrischer Faktor	[%]
FC	Fuel Consumption (Kraftstoffverbrauch)	[l/100km]
h	Massenanteil an Wasserstoff	[%]
H <sub>u</sub>	unterer Heizwert	[MJ/kg]
k <sub>H</sub>	Feuchtigkeitskorrekturfaktor	[-]
λ	Luftzahl	[-]
L <sub>st</sub>	stöchiometrischer Luftbedarf	[kmol/kg]
o	Massenanteil an Sauerstoff	[%]
O <sub>st</sub>	stöchiometrischer Sauerstoffbedarf	[kmol/kg]
P <sub>B</sub>	Luftdruck im Prüfraum	[kPa%]
Q <sub>HC</sub>	Dichtekoeffizient für Kohlenwasserstoffe	[g/l]
P <sub>d</sub>	Sättigungsdampfdruck bei Umgebungstemperatur	[kPa]
R <sub>a</sub>	relative Feuchte der Umgebungsluft	[%]
RöE	Rohöleinheit	[-]
V <sub>mix</sub>	Volumen der verdünnten Luft	[l]
VP	Vapor Pressure (Dampfdruck)	[kPa]

---

## Kurzfassung

Ethanolkraftstoffe stellen eine geeignete flüssige Bio-Alternative zu fossilen Benzinkraftstoffen dar. In ähnlicher Weise lässt sich aufbereitetes Biogas zum Erdgas beimischen oder auch als Erdgasersatz verwenden. Aus diesem Grund werden weltweit verschiedenste Konzepte für alternative Kraftstoffe und deren Beimischung am Markt angeboten. In der vorliegenden Arbeit werden die Tank-to-Wheel Auswirkungen und Potenziale der alternativen Kraftstoffe Bioethanol und Biogas auf Betriebs- und Emissionsverhalten eines Ottomotors ausführlich beleuchtet.

Aufgrund der Zusammensetzung des Kraftstoffes ergibt sich im Vergleich zu Eurosuper bei einem Kraftstoff mit 85% Ethanolanteil ein CO<sub>2</sub>-Minderungspotenzial von etwa 4% im Vergleich und bei dem gasförmigen Kraftstoff Erdgas von 23%. Die derzeitigen Mess- und Berechnungsmethoden für die Emissions- und Verbrauchsberechnung nach der Constant Volume Sampling Methode bezogen sich bisher ausschließlich auf fossilen Kraftstoff ohne biogenen Anteil. Anpassungen beim rechtlichen Regelwerk bzw. bei den Berechnungsformeln werden durch die neuen Kraftstoffe dringend notwendig. Fahrzeuguntersuchungen am Rollenprüfstand bestätigen die theoretischen Betrachtungen. Für die limitierten Schadstoffemissionen (HC, CO, NO<sub>x</sub>) sind aus den Ergebnissen des Fahrzeugtests keine signifikanten Auswirkungen bei geringen Ethanol-Beimischungen bis 10% während der verschiedenen Fahrzyklen zu erkennen. Für die Kraftstoffmischung mit 85% Ethanolanteil ergeben sich im Fahrzyklus besonders beim Start bei tiefen Temperaturen deutliche Verschlechterungen bei den CO- und den HC-Emissionen. Diese Erkenntnis legt die Einführung eines speziellen Winterkraftstoffes mit abgesenktem Ethanolanteil (z. B. 75%) nahe.

Für die mit Biogas/CNG betriebenen Fahrzeug ergibt sich bei den HC- Emissionen eine leichte, bei den CO- und NO<sub>x</sub>-Emissionen eine deutliche Absenkung. Bei den untersuchten nichtlimitierten Schadstoffemissionen gibt es deutliche Anstiege während des Kaltstarts die jedoch nach dem Katalysator light-off gut konvertiert werden.

## Abstract

Ethanol fuel is liquid bio-fuel and therefore an appropriate alternative or admixture to fossil fuels. Similarly, processed biogas can be added to natural gas or can even be used as a substitute natural gas. For this reason, there are various alternative fuels and different concepts to introduce these fuels into the market worldwide. This paper presents the tank-to-wheel effects and potentials of the alternative fuels bioethanol and biogas on the operating as well as emission characteristics of a gasoline engine in detail.

Because of the composition of different fuels there is a potential of reducing the CO<sub>2</sub>-emissions by 4% when using a fuel with an amount of 85% Ethanol and by 23% when using a the gaseous fuel like natural gas in comparison to conventional Eurosuper. The existing measuring methods and calculation models (Constant Volume Sampling) for the calculation of vehicle emissions and fuel consumption up to now exclusively related to the operation of fossil fuel without biogenic portion. Due to these new fuels, adaptations within the juridical set of rules and even within the calculation formulas become urgently necessary.

Vehicle tests on the chassis dynamometer test bench confirm the theoretical considerations. The results of the vehicle tests did not show any significant effects for the limited pollutants (HC, CO, NO<sub>x</sub>) during the different driving cycles for the low ethanol admixtures up to 10%. A clear deterioration of the CO-emissions and the HC-emissions arises in the driving cycles for the fuel mixture with a fraction of 85% ethanol particularly during the cold start at deep temperatures. This result suggests the introduction of a special winter fuel with lowered ethanol fraction (e.g. 75%).

For vehicles operated with fermentation gas/CNG a slight improvement arises for the CO-emission and the NO<sub>x</sub>-emission, with the HC-emission a clear reduction is found. The investigated non-limited pollutants increase during cold start, nevertheless, after the catalyst light-off they are converted well.

## 1. Einleitung

Der weltweit steigende Bedarf an Kraftstoffen sowie die begrenzte Verfügbarkeit von fossilen Energieträgern führen dazu, dass verstärkt nach alternativen Kraftstoffen gesucht wird. Im Kontext der prognostizierten Knappheit und der damit verbundenen Verteuerung fossiler Brennstoffe, des Klimawandels durch die steigenden Treibhausgasemissionen sowie der Notwendigkeit, Wertschöpfung und Beschäftigung in ländlichen Räumen zu stabilisieren, sind Biokraftstoffe zu einem zentralen Thema in der politischen Diskussion geworden. Diese Kraftstoffe besitzen das Potenzial, die konventionellen Reserven entsprechend zu strecken [1], [2].

Die Nutzung alternativer Kraftstoffe hängt außer von ihrer Verfügbarkeit, von den Umweltaspekten, von der technischen Basis ihrer Herstellung und auch von ihren Eigenschaften beim Einsatz im Fahrzeug ab.

Vorweg ist jedoch die Definition der oftmals uneinheitlich verwendeten Begriffe „Biokraftstoffe“, „andere erneuerbare Kraftstoffe“ und „Alternative Kraftstoffe“ erforderlich. Zur Vermeidung von Widersprüchlichkeiten werden die Wortbedeutungen erläutert und in Abbildung 1 in Zusammenhang gebracht [3], [4].

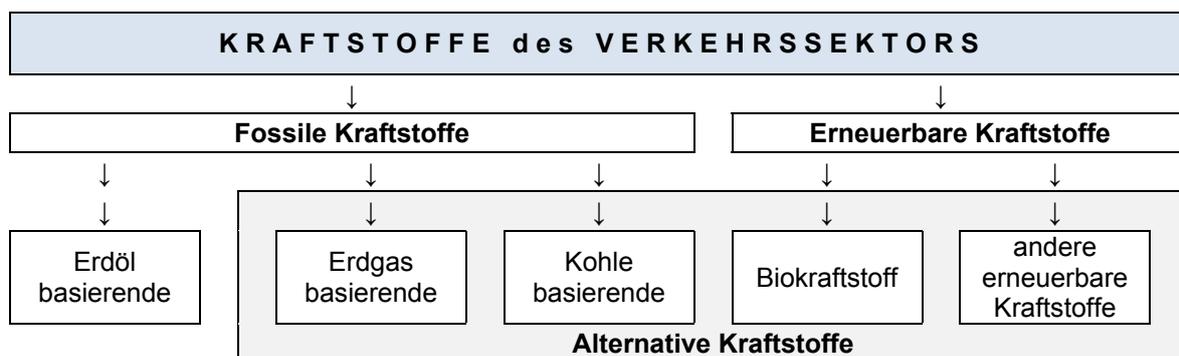


Abbildung 1: Einteilung der Kraftstoffe des Verkehrssektors [5]

Die Gruppe der „Alternativen Kraftstoffe“ umfasst Biokraftstoffe, andere erneuerbare Kraftstoffe und Kraftstoffe, welche aus anderen fossilen Energieträgern als Erdöl gewonnen werden.

Unter Biokraftstoffe werden flüssige oder gasförmige Kraftstoffe des Verkehrssektors verstanden, welche aus Biomasse hergestellt werden. Unter dem Begriff „andere erneuerbare Kraftstoffe“ fallen Kraftstoffe des Verkehrssektors, die aus erneuerbaren Energiequellen – wie z. B. Wind, Sonne, Erdwärme, Wasserkraft, usw. – hergestellt werden [6].

Als Biokraftstoffe (Abbildung 2) werden zumindest folgende Produkte, sofern sie zum Betrieb von Verbrennungskraftmotoren in Kraftfahrzeugen verwendet werden, gesehen:

Kraftstoff	Beschreibung
<ul style="list-style-type: none"> <li>Bioethanol</li> </ul>	aus Biomasse und/oder biologisch abbaubaren Teilen von Abfällen hergestelltes Ethanol mit einem Alkoholanteil von mindestens 99 Volumsprozent
<ul style="list-style-type: none"> <li>Fettsäuremethylester (FAME, Biodiesel)</li> </ul>	aus pflanzlichen oder tierischen Ölen oder Fetten hergestelltes Methylester
<ul style="list-style-type: none"> <li>Biogas</li> </ul>	aus Biomasse und/oder aus biologisch abbaubaren Teilen von Abfällen mittels Pyrolyse oder Gärung hergestelltes und mit dem Ziel, Erdgasqualität zu erreichen, gereinigtes Gas
<ul style="list-style-type: none"> <li>Biomethanol</li> </ul>	aus Biomasse und/oder biologisch abbaubaren Teilen von Abfällen hergestelltes Methanol
<ul style="list-style-type: none"> <li>Biodimethylether</li> </ul>	aus Biomasse hergestellter Dimethylether; Bio-ETBE (Ethyl-Tertiär-Butylether), das ist ein auf der Grundlage von Bioethanol hergestellter ETBE mit einem anrechenbaren Biokraftstoffvolumenprozentanteil von 47%
<ul style="list-style-type: none"> <li>Bio-MTBE (Methyl-Tertiär-Butylether)</li> </ul>	auf der Grundlage von Biomethanol hergestellter MTBE mit einem anrechenbaren Biokraftstoffvolumenprozentanteil von 36%
<ul style="list-style-type: none"> <li>Synthetische Biokraftstoffe (BTL)</li> </ul>	aus Biomasse gewonnene synthetische Kohlenwasserstoffe oder synthetische Kohlenwasserstoffgemische
<ul style="list-style-type: none"> <li>Biowasserstoff</li> </ul>	aus Biomasse und/oder biologisch abbaubaren Teilen von Abfällen hergestellter Wasserstoff
<ul style="list-style-type: none"> <li>reines Pflanzenöl</li> </ul>	ein durch Auspressen, Extraktion oder vergleichbare Verfahren aus Ölsaaten gewonnenes, chemisch unverändertes Öl in roher oder raffinierter Form

Abbildung 2: Übersicht – Biokraftstoffe [3], [7], [8], [9]

Niemals zuvor wurde so viel Biodiesel und -ethanol produziert und verbraucht wie heute und auch andere flüssige und gasförmige alternative Kraftstoffe – wie CNG, BTL, GTL – gewinnen immer stärker an Bedeutung. Biodieseleinsatz ist bekannt und Stand der Technik; biogene Ottokraftstoffe wie beispielsweise Bioethanol oder

Biogas befinden sich in Europa erst am Beginn einer breiteren Verwendung [10], [11], [12].

Als alternativer Energieträger für Kraftfahrzeuge hat Ethanol den eindeutigen Vorteil, weitgehend ähnliche Eigenschaften zu jenen von Benzin zu besitzen, was seinen breiten und zügigen Einsatz begünstigt. Die Substitution von Benzin durch Ethanol wird dabei auf zwei Arten umgesetzt: Zum einen erfolgt eine geringfügige Beimischung von Ethanol zum Benzin, die in den nächsten Jahren schrittweise angehoben werden soll (EU-Biokraftstoffrichtlinie siehe Kapitel 1.3.2) und zum anderen sind Flexible Fuel Fahrzeuge (FFV) auf den Markt gebracht worden, die sowohl mit E85 (85% Ethanol + 15% Benzin) als auch mit reinem Benzin bzw. beliebigen Mischungsverhältnissen betrieben werden können.

Der Einsatz von Biogas als Kraftstoff ist aus technischer Sicht problemlos möglich. Soll Biogas als Treibstoff für Fahrzeuge eingesetzt werden, muss es auf eine für den Einsatz in derzeit üblichen Kfz-Motoren akzeptable Qualität aufbereitet werden. Da es sich bei den angebotenen Fahrzeugen meist um Erdgasfahrzeuge handelt, ist diese Aufbereitung des Biogases auf Erdgasqualität erforderlich. Es besteht die Notwendigkeit der Reinigung bzw. Aufbereitung des Biogases auf Erdgasqualität gemäß Norm DIN 51624 [13]. Um die geforderten Kennwerte zu erreichen ist eine Trennung von Methan ( $\text{CH}_4$ ) und Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) durchzuführen. Außerdem müssen die auf den Motor korrosiv wirkenden Stoffen wie z. B. Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ) sowie Wasserdampf aus dem Biogas entfernt werden. Aufbereitetes Biogas unterscheidet sich in der chemischen Zusammensetzung nicht von Erdgas und weist somit ebenso gute Voraussetzungen für den Einsatz im Fahrzeugsektor auf wie Erdgas. Bedingung für eine Markteinführung von Biogas im Verkehrssektor ist die Schaffung einer Erdgasinfrastruktur mit einem ausreichend dichtem Tankstellennetz und der entsprechenden Verfügbarkeit von Erdgasfahrzeugen.

## 1.1. Motivation und Zielsetzung

Die Motivation der vorliegenden Arbeit besteht darin, die Auswirkungen von alternativen Kraftstoffen auf den Betrieb eines Ottomotors sowie auf die Treibhausgasemissionen darzustellen. Nachdem lange Zeit ausschließlich fossile Brennstoffe im motorischen Betrieb eine breite Anwendung fanden, werden heute einerseits mehr und mehr biogene Kraftstoffe dem fossilen Kraftstoff als Blend-Komponente in niedrigen Anteilen beigemischt und andererseits auch Kraftstoffe mit hohen und höchstem Biokraftstoffanteil in den Markt eingeführt.

Das Ziel dieser Arbeit besteht also in einem Erkenntnisgewinn in folgenden Themenbereichen:

- *Welche Chancen und welche möglichen Probleme entstehen durch die geänderte chemische Zusammensetzung bzw. durch die veränderten Kraftstoffeigenschaften der Kraftstoffe mit biogenem Anteil im Vergleich zu den bekannten fossilen Kraftstoffen?*
- *Zu welchen Veränderungen im Emissionsverhalten von verschiedenen „Stand der Technik“-Motorkonzepten kommt es bei der Verwendung der „neuen“ flüssigen Kraftstoffe (E5-Kraftstoff mit 5%, E10-Kraftstoff mit 10%, E85-Kraftstoff mit 85% Ethanolbeimischung) bzw. bei gasförmigen alternativen Treibstoffen (Biogas/CNG)? Welche Auswirkungen gibt es auf die bekannten limitierten und die relevanten nicht limitierten Schadstoffe auch in Hinblick auf einen breiten Einsatz in der Fahrzeugflotte (E10-Kraftstoff)?*
- *Wie stellen sich die gesetzlichen Rahmenbedingungen für den Einsatz der Kraftstoffe mit biogenem Anteil dar und gibt es Hinweise für notwendige neue sowie noch nicht berücksichtigte Parameter und Grenzwerte für zukünftige Kraftstoffnormen?*
- *In den bisherigen relevanten Mess- und Berechnungsmethoden zur Bestimmung der Emissionen und des Verbrauchs eines Gesamtfahrzeuges (z. B. auch im Rahmen der Fahrzeugtypisierung) wurde auf die Verfügbarkeit von alternativen biogenen Kraftstoffen nicht eingegangen. Welcher Handlungsbedarf entsteht hier durch die veränderten Kraftstoffeigenschaften bzw. durch die neuen Kraftstoffnormen?*

Die vorliegende Arbeit geht auf die formulierten Fragen Schritt für Schritt ein. In der Einleitung (Kapitel 1) wird nach einem Rückblick auf die Geschichte alternativer Kraftstoffe für den ottomotorischen Betrieb ein Überblick über den Stand der Technik gegeben und auf die politischen bzw. gesetzlichen Rahmenbedingungen eingegangen. Diese haben jeweils großen Einfluss auf deren Entwicklung sowie deren Verwendung.

Die für den motorischen Betrieb relevanten Luftschadstoffe bzw. Treibhausgase werden in Kapitel 2 beschrieben. In weiterer Folge werden die rechtlichen Regeln und Rahmenbedingungen, die die Emissionen von Kraftfahrzeugen betreffen beleuchtet.

Im Anschluss daran wird in Kapitel 3 eine Übersicht über die gegenwärtigen Herstellungsprozesse gegeben und es werden die wesentlichen Stoffeigenschaften auf Basis von Kraftstoffanalysen, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, berechnet und erläutert. Zu Vergleichszwecken werden dabei auch Literaturwerte herangezogen. Verschiedene Arten und Mischungen von Kraftstoffen beeinflussen durch unterschiedliche Heizwerte, Oktanzahlen, Verdampfungsenthalpien und Siedeeigenschaften den Betrieb eines Motors maßgeblich. Mittels einer Tank-to-Wheel Betrachtung wird eine detaillierte Analyse der anfallenden CO<sub>2</sub>-Emissionen und das mögliche Einsparungspotenzial eines Alternativkraftstoffes gegenüber Benzin im direkten Fahrzeugbetrieb gezeigt.

Die für die Fahrzeuguntersuchungen verwendete Versuchsmethodik bzw. die in weiterer Folge benötigte Berechnungsmethodik wird in Kapitel 4 vorgestellt. Außerdem wird die Herleitung der für die fossilen Kraftstoffe bekannten und gesetzlich festgelegten Berechnungsformeln diskutiert und eine zweckmäßige Anpassung an die untersuchten alternativen Kraftstoffe vorgenommen.

In Kapitel 5 werden die Versuchsumfänge sowie die untersuchten Fahrzeuge vorgestellt. Es werden die am Fahrzeug notwendigen Modifikationen für die Möglichkeit von Mischbetankungen beschrieben und die Fahrzyklen, die zu den Emissions- und Verbrauchsmessungen herangezogen wurden, detailliert dargestellt.

---

Die Ergebnisse dieser Versuche werden schließlich in Kapitel 6 dargestellt und anhand der schon beschriebenen Kraftstoffeigenschaften erklärt. Es wird ein aktueller Überblick über die Auswirkungen und Herausforderungen bei der Beimischung von Ethanol zu fossilem Ottokraftstoff bzw. von gasförmigen Kraftstoffen im Motorbetrieb gegeben. Hier werden die Auswirkungen auf den motorischen Wirkungsgrad genauso betrachtet wie die Veränderungen des Emissionsverhaltens der Versuchsfahrzeuge. Es werden außerdem praxisrelevante Parameter wie das Kaltstartverhalten oder der Zusammenhang zwischen CO<sub>2</sub>-Emission und volumetrischem Kraftstoffverbrauch angegeben.

Kapitel 7 fasst die Arbeit zusammen und bietet einen Ausblick auf weitere Entwicklungsmöglichkeiten und zukünftige Potenziale, welche durch Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse aus den durchgeführten Untersuchungen in modernen Motorkonzepten noch zu erwarten sind.

## 1.2. Historische Entwicklung und Einsatz alternativer Ottokraftstoffe

In der Historie und Bedeutung der Verbrennungskraftmaschine nimmt der Ottomotor weltweit eine herausragende, zumeist sogar eine dominante Rolle ein. Diese Motortechnik wurde durch ein am 6. Juni 1876 von der Gasmotorenfabrik Deutz AG eingereichtes und nach dem Erfinder Nikolaus August Otto benanntes Patent begründet. Inspiriert durch den Gasmotor von Étienne Lenoir begann Otto mit seinen Versuchen an einer kleinen Modellmaschine des Lenoirmotors.

Unter dem Titel „Gasmotor“ wurde 1876 das entscheidende Patent DRP 532, das einen Viertakt-Motor mit Fremdzündung beschreibt, geschützt. Für Otto war das Verbrennungsverfahren der Kern seiner Entwicklung, der wie folgt beschrieben wird [14]:

*„Der Kolben saugt (zunächst) Luft und auf dem weiteren Weg ein inniges Gemisch von Luft und Gas in den Zylinder. Dieses Gemisch hat eine solche Zusammensetzung, dass es bei seiner Entzündung selbstständig brennbar ist. Die Entzündung teilt sich den folgenden Gemischkörperchen mit und schreitet umso langsamer fort, je weiter diese Körperchen voneinander entfernt sind, je mehr sich also die Verbrennung dem Kolben nähert. Die verbrennenden Gemischkörperchen erzeugen eine Spannung, welche auf den Kolben treibend wirkt ... sie ist in ihrer Wirkung nicht gleich der Wirkung einer durch Explosion eines Gasgemisches erzeugten Spannung und deshalb auch nicht begleitet von den bei Explosionsmaschinen unvermeidlichen Stößen und Wärmeverlusten.“*

Mit extrem hoher Entwicklungsgeschwindigkeit wurde diese Technologie immer weiterentwickelt, sodass beim Ottomotor nach seiner hundertjährigen Geschichte noch keine Stagnation oder ein Ende des Lebenszyklus abzusehen ist. Die Entwicklung des Ottomotors wurde in den letzten Jahren von weiterer Emissionsminderung und Vollaststeigerung, aber vor allem von der CO<sub>2</sub>-Emissions- und der damit verbundenen Verbrauchsminderung vorangetrieben. Die Einführung alternativer biogener Kraftstoffe führt beispielsweise zu Herausforderungen aber auch zu einem weiteren Entwicklungspotenzial und festigt somit auch in der Zukunft die Position des Ottomotors in seiner dominanten Rolle [14].

### 1.2.1. Bioethanol

Die Verwendung von Ethanol als Kraftstoff ist beinahe so alt wie der Ottomotor selbst, da Otto seinen ersten Motor mit reinem Alkohol betrieb. Auch Henry Ford plante ursprünglich, das erste Ford T-Modell im Jahre 1908 mit Ethanol zu betreiben. Er entwarf es für die Nutzung mit diesem Kraftstoff, da er bereits die Vision einer nachhaltigen Einbeziehung der Landwirtschaft als Kraftstofflieferant hatte. In den folgenden Jahrzehnten nahm das Interesse zu, bis zum zweiten Weltkrieg hatten bereits über vierzig Länder weltweit den konventionellen Kraftstoffen Alkohol (üblicherweise im Bereich von 10-25%) beigemischt. Während des zweiten Weltkrieges spielten Alkoholkraftstoffe ebenfalls eine große Rolle und wurden zudem in Flugzeugen eingesetzt. Nach dem Krieg ging das Interesse an dem alternativen Kraftstoff verloren, vor allem wegen des niedrigen Ölpreises [15], [16].

1973 drosselten die arabischen Länder aufgrund des Krieges im Nahen Osten ihre Erdölförderung und es kam somit zur ersten weltweiten Energiekrise sowie in der Folge zu massiv steigenden Ölpreisen. Weltweit wurde nach Alternativen zu den konventionellen Kraftstoffen gesucht. Der große Vorteil von Alkoholen ist, dass sie flüssig sind und als Mischkomponente zu Benzin zum Einsatz kommen können. Entscheidend für den großen Aufschwung in den Jahren nach der ersten Energiekrise war auch die Möglichkeit zur Herstellung im eigenen Land. In Ländern mit vorwiegend landwirtschaftlicher Struktur, in denen ausreichend Pflanzen und Biomasse vorhanden waren, wurde Ethanol im großen Rahmen produziert [17].

Eine Vorreiterrolle bei der Verwendung von Ethanolkraftstoff besitzt Brasilien bedingt durch das heimische Zuckerrohr. Dieser ertragreiche Rohstoff zur Ethanolerzeugung ist vor allem der Grund, weshalb derzeit nur in Brasilien die Produktion im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen absolut wettbewerbsfähig ist. Bereits Mitte der 1970er-Jahre wurde ein breit angelegtes Programm zur Nutzung regenerativer Energieträger im Kfz-Verkehr erstellt und konsequent umgesetzt. Bis zur zweiten Ölkrise 1979 wurde die Beimischung von wasserfreiem Ethanol auf 22% beschränkt. Durch die Beimischung von Alkohol zum normalen Benzin konnte bereits früh auf den Bleizusatz als Antiklopfmittel verzichtet werden. Die Automobilindustrie zog nach anfänglichem Zögern mit und begann mit der Entwicklung und Produktion von Fahrzeugen und Motoren, die mit reinem, nicht wasserfreiem Ethylalkohol betrieben werden konnten. Dieses Ethanol ist mit 7 Vol.-% Wasser versetzt, was aus Kosten-

und Produktionsgründen zweckmäßig ist, jedoch intensive Maßnahmen zur Gemischheizung verlangt. Aufgrund des erneut steigenden Ölpreises internationaler Umweltabkommen und technischer Innovationen, kam es im Jahr 2003 zu einem zweiten Ethanolboom in Brasilien. Während reine Alkoholfahrzeuge kaum noch hergestellt werden, gewinnen so genannte Flexible Fuel Fahrzeuge (FFV, Flex Fuel Vehicles) immer mehr an Bedeutung. Diese Fahrzeuge können mit wasserhaltigem Ethanol (E100), Gasohol (bzw. Gasolina Typ C – Benzin mit 20-26% Ethanolanteil) und mit jeder Mischung dieser beiden Kraftstoffe betrieben werden [18], [19], [20].

Die Anzahl an Förderprogrammen für Biokraftstoffe hat weltweit betrachtet in den letzten Jahren stark zugenommen. Die Ausgestaltung reicht dabei von der Unterstützung von Pilotprojekten sowie von Forschung und Entwicklung über Mindestverwendungsquoten bis hin zu Steuerbefreiungen und -ermäßigungen, Investitionsförderungen für Produktionsanlagen und Subventionen in der Landwirtschaft. Im Jahre 1978 verabschiedete der US-Kongress den National Energy Act, der eine steuerliche Förderung von Kraftstoffen mit 10% Ethanolanteil ermöglichte. Die Förderung betrug US\$ 0,40 pro Gallone Ethanol um die Wettbewerbsfähigkeit gegenüber herkömmlichem Benzin herzustellen. Für eine Gallone E10-Kraftstoff ergibt das eine Subvention von US\$ 0,04, was bei einem durchschnittlichen Benzinpreis von damals ca. US\$ 0,63 pro Gallone fast 6,5% entspricht. Ethanol stellte sich dabei wegen seiner hohen Oktanzahl und des hohen Sauerstoffgehalts, als ideales Substitut für den Ersatz von Bleiadditiven heraus. Dies kam auch der Environmental Protection Agency (EPA) zugute, die damals auf der Suche nach einem anderen Antiklopfmittel war [21], [22].

Seit Einführung der ersten Flexible Fuel Fahrzeuge (FFV) Mitte der 1990er-Jahre hat sich in den USA E85-Kraftstoff (85% Ethanol und 15% Benzinkraftstoff) durchgesetzt. Durch die Förderung von Investitionen für Ethanolanlagen und die Produktion von technisch geeigneten Autos stieg der Bestand an E85-Tankstellen in den USA von ca. 200 im Jahr 2003 auf rund 1200 im Jahr 2006 (das entspricht einer Steigerung von 500%) an [23].

China hat aufgrund des enormen Bedarfs an Energie und einer Getreideüberproduktion Beimischungsprogramme eingeführt und ist weltweit der

drittgrößte Ethanolproduzent. Bereits in neun Provinzen wird dort dem Benzin-Kraftstoff 10% Bioethanol beigemischt und seit kurzem wird in der Provinz Jilin die weltgrößte Bioethanolproduktionsanlage betrieben. Indien ist der zweitgrößte Bioethanolproduzent Asiens und in Zukunft soll landesweit eine 10%-Beimischungsquote erreicht werden. Mit dem Förderprogramm sollen die nationale Zuckerindustrie unterstützt und Ölimporte reduziert werden. In Japan war die Einführung einer 10%-Beimischung von Ethanol bis zum Jahr 2008 aus umweltpolitischen Gründen geplant, jedoch bestehen keine Überschüsse aus der landwirtschaftlichen Produktion, so dass für eine Umsetzung dieser Strategie Importe notwendig sind [19].

Da der Anteil an Fahrzeugen mit Dieselmotoren in vielen EU-Ländern im weltweiten Vergleich verhältnismäßig hoch ist und mehr Diesel- als Ottokraftstoff verbraucht wird hat in der Europäischen Union die Biodieselproduktion eine lange Tradition. In Spanien, dem derzeit größten Bioethanolproduzenten in der EU, und in Frankreich wird bereits seit über 10 Jahren Bioethanol hergestellt. Das gewonnene Ethanol wurde aber beinahe ausschließlich zu ETBE, welches nach und nach MTBE als Kraftstoffzusatz ersetzt, weiterverarbeitet. In Frankreich ist mit einer Charta zur Entwicklung des Kraftstoffs Superethanol E85 im Jahre 2006 eine wesentliche Steigerung der Verwendung von Bioethanol vereinbart worden. Eine Vorreiterrolle in der Beimischung von Ethanol in Europa spielt Schweden. Dort wird wie in den USA der Treibstoff E85 für Flexible Fuel Fahrzeuge mittlerweile bei über 400 Tankstellen angeboten und zudem wird seit 2003 allen Ottokraftstoffen 5% Ethanol (E5) beigemischt [24], [25], [26].

Bei den FFVs sind gegenüber Fahrzeugen mit konventionellem Ottomotor an verschiedenen Komponenten Adaptierungen vorzunehmen.

- *Kraftstoffführende Komponenten*

Ethanol bindet Wasser, Salze und Säuren und führt somit zu Korrosion. Bei Verwendung der konventionellen Materialien werden Bauteile durch diese aggressive Wirkung des Alkohols zerstört, durch Ablagerungen verunreinigt oder Injektornadeln durch kleine, gelöste Metallteilchen blockiert. Die richtige Materialwahl bzw. Beschichtung ist bei den kraftstoffführenden Komponenten (Tank, Pumpe, Filter, Injektoren, Leitungen) daher wichtig. Im Kraftstoffsystem

kommen als Metall Edelstahl und als Kunststoffe Teflon, Polypropylen oder Viton zum Einsatz. Durch den geringeren Heizwert von Ethanol und den damit verbundenen höheren volumetrischen Verbrauch kann das Tankvolumen vergrößert werden. Der statische Durchsatz der Injektoren bzw. der Einspritzdruck muss entsprechend erhöht werden [27].

- *Zündkerzen und Ventile*

Aufgrund des möglichen höheren Zylinderdrucks und daraus resultierenden hohen Verbrennungstemperaturen werden „kältere“ Zündkerzen mit einem höheren Wärmewert eingesetzt. Um dieser großen thermischen und mechanischen Beanspruchung Stand zu halten, werden Kolben und Kolbenringe modifiziert und für Ventile und Ventilsitze gehärtete Materialien verwendet, da speziell in diesem Bereich Korrosion sowie Ablagerungen auftreten [28], [29].

- *Motorsteuerung*

In der Motorsteuerung sind vor allem Anpassungen der Einspritz- und Zündwinkelfelder über dem Ethanolanteil notwendig [30], [31].

- *Kaltstartsystem*

Hohe Ethanolkonzentrationen im Kraftstoff weisen speziell bei tiefen Umgebungstemperaturen ein schlechtes Siedeverhalten auf. Deshalb kann in Abhängigkeit des Fahrzeugeinsatzes in entsprechenden Klimazonen bereits bei Kraftstoffen mit einem Ethanolanteil kleiner als E85 ein entsprechendes Kaltstartsystem notwendig werden. Durch höhere Einspritzmengen und eine schlechtere Kaltstartfähigkeit beim Einsatz von hohen Ethanol-Blends steigt die Gefahr der Schmierölverdünnung. Vor allem bei Kurzstreckenfahrten kann die während des Starts über die Zylinderwände eingetragene Kraftstoffmenge im Öl über die Kurbelgehäuseentlüftung nicht (vollständig) ausdampfen. Deshalb werden von den Automobilherstellern die Ölwechselintervalle verkürzt bzw. spezielle Öladditivierungen für Flexible Fuel Motoren angeboten [32].

### **1.2.2. Biogas**

Die Geschichte der Erdgasfahrzeuge reicht – wie ja schon eingangs erwähnt – weiter zurück, als die von Fahrzeugen mit Benzinmotoren. Bereits im Jahr 1862 baute Lenoir ein Gasmotorenfahrzeug und erst 14 Jahre später lief der erste Viertakt-Ottomotor. Bis zum Ende des zweiten Weltkriegs wurden im Lauf der Zeit immer

mehr Fahrzeuge mit verschiedenen anderen Gasen (Holzgas-, Stadtgas- oder Koksgasbetrieb) neben Compressed Natural Gas (CNG) betrieben. Dennoch konnten sich die Gasmotoren nicht durchsetzen. Mehr als 100 Jahre lang beherrschten Benzinmotoren ganz eindeutig das Geschehen. Einzig in den südamerikanischen Ländern und in Italien kamen Erdgasfahrzeuge und Erdgasautos aus Umweltschutzgründen zum Zuge. Auf Erdgas adaptierte Benzinmotoren bringen es ohne weiteres auf die strengen, von der amerikanischen Gesetzgebung verlangten Werte der ULEVS (Ultra Low Emission Vehicles). In Italien Mitte der 1930er-Jahre wurden zunächst CNG-Fahrzeuge am Markt eingeführt und erregten während der Ölkrise größere internationale Aufmerksamkeit. Die Bemühungen diese Fahrzeuge zu fördern waren – abgesehen von einigen wenigen Ländern wie Italien – aber nur von kurzer Dauer. Erst ab Mitte der 1990er-Jahre erfuhr CNG als Fahrzeugtreibstoff eine neue Welle staatlicher Unterstützung, um sowohl die Luftverschmutzung als auch die Abhängigkeit von Erdöl-Einfuhren zu verringern [33], [34].

Da Erdgas als Kraftstoff für herkömmliche Ottomotoren geeignet ist, können CNG-Fahrzeuge wahlweise mit Erdgas oder Benzin oder ausschließlich mit Erdgas betrieben werden. Der Motor entspricht einem herkömmlichen Ottomotor. Anstatt eines Benzin-Luft-Gemisches wird ein aufbereitetes Erdgas-Luft-Gemisch in den Zylindern verbrannt.

- *Bivalente Ausführung*

Bivalente Fahrzeuge können sowohl mit dem Treibstoff Erdgas als auch mit Benzin fahren. Die gewünschte Kraftstoffart lässt sich jederzeit, auch während der Fahrt, durch Umschalten vom Armaturenbrett aus wählen. Die Mehrzahl der zurzeit im Einsatz stehenden Erdgasfahrzeuge wird bivalent betrieben. Bei umgerüsteten Fahrzeugen stellt der bivalente Betrieb einen guten Kompromiss zwischen Umweltentlastung und Kostenersparnis einerseits und Reichweite andererseits dar. Vor allem überregional erweisen sich bivalente Fahrzeuge derzeit noch als vorteilhaft, da bei Bedarf (z. B. schlecht ausgebautes Erdgas-Tankstellennetz) auf Benzinbetrieb umgeschaltet werden kann.

- *Monovalente Ausführung*

Monovalente Fahrzeuge werden nur mit komprimiertem Erdgas betrieben oder haben einen zusätzlichen Nottank für maximal 15 Liter Benzin. Der Platzgewinn wird für die Unterbringung zusätzlicher Gastanks genutzt.

Das monovalente Antriebssystem wird sich in absehbarer Zeit durchsetzen. Da mit dem fortgeschrittenen Tankstellenausbau die letzte Hürde für einen breiteren Einsatz beseitigt wurde, werden die überzeugenden Vorteile des Kraftstoffs Erdgas uneingeschränkt wirksam: Die Motoren bei monovalenten Fahrzeugen sind auf den Erdgasbetrieb beispielsweise durch eine höhere Verdichtung technisch besser abgestimmt. Daraus resultieren ein besserer Wirkungsgrad, geringerer Verbrauch und geringere Schadstoffemissionen.

In der Regel sind derzeit Erdgasfahrzeuge bivalent ausgeführt, sie können also jederzeit auch auf Benzinbetrieb umgeschaltet werden. Die geringe Energiedichte von Erdgas macht das Mitführen in entweder tiefgekühlt-flüssiger Form (-162°C) als Liquefied Natural Gas (LNG) oder in hochkomprimierter Form (200 bar) als Compressed Natural Gas (CNG) notwendig. Beide Möglichkeiten sind mit erheblichem Aufwand und Gewicht verbunden. Die Kosten für die bivalente Ausführung des Fahrzeuges sowie die verringerte Reichweite wegen des sonst großen Platzbedarfs der Tanks verhinderten bisher die größere Verbreitung. Insgesamt steigt in vielen Ländern die Anzahl von CNG-Fahrzeugen (Abbildung 3) nun stärker als in früheren Jahren.

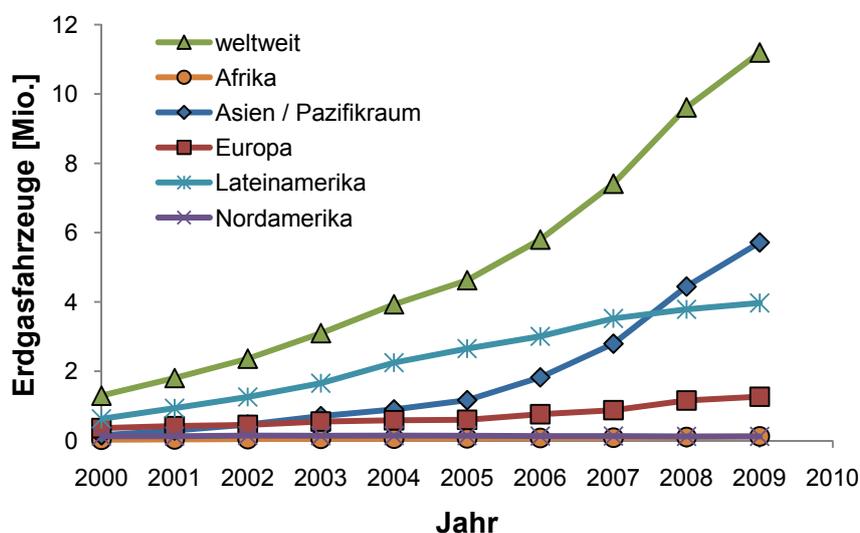


Abbildung 3: Anzahl der Erdgasfahrzeuge in den verschiedenen Weltregionen [35]

Voraussetzung für einen vernünftigen und rentablen Einsatz ist die Verfügbarkeit eines entsprechenden Netzes von Erdgastankstellen [33].

Am amerikanischen Markt waren ab 1969 CNG-Fahrzeuge in einem sehr geringen Umfang vertreten. Sie wurden in erster Linie mit Nachrüstsets von kleinen Erdgas-Versorgungsunternehmen verkauft. In den USA begann schließlich Ford in den späten 1980er-Jahren als erster OEM mit der Produktion von eigenen CNG-Fahrzeugen. Als Folge des Energy Policy Act (EPAct) von 1992 wuchs vor allem der Marktanteil der gasbetriebenen leichten Nutzfahrzeugflotte [34] [36].

In den lateinamerikanischen Ländern, an erster Stelle in Brasilien und Argentinien, betrieben die Regierungen die starke Förderung von Erdgas, um einerseits die Luftverschmutzung in den Städten und andererseits die Abhängigkeit von Benzin und Diesel zu verringern. Dies hat wesentlich zum raschen Wachstum der Erdgasverwendung beigetragen. 2006 hatten diese beiden Länder zusammen mehr als die Hälfte der gesamten CNG-Fahrzeuge der Welt [37].

Auch mehrere asiatische Länder, insbesondere Indien, China und Pakistan, hatten ein erhebliches Wachstum an Erdgasfahrzeugen seit den späten 1990er-Jahren. Die bekannteste Erfolgsgeschichte fand in Indien als Reaktion auf eine Klage statt, die ein Bürger im Jahr 1985 wegen der schlechten Luftqualität in Delhi initiierte. Der Oberste Gerichtshof erließ eine Reihe von Anweisungen an die Regierung, die besagten, dass alle öffentlichen Verkehrsmittel (Busse, Taxis und Auto-Rikschas) mit sauberem alternativen Kraftstoff zu betreiben sind. Die Resolution von 1998 bezog sich auf die CNG-Verwendung in Delhi und die nachfolgende Resolution von 2003 auf 11 weitere Städte. Trotz mehrerer Pannen (Versorgungsengpässe und lange Warteschlangen an Tankstellen) waren in Delhi bis Ende 2003 mehr als 87.000 CNG-Fahrzeuge – vor allem öffentliche Transit-Fahrzeuge und Taxis – im Einsatz. Bis heute hat sich diese Zahl auf mehr als 204.000 Fahrzeuge in Indien erhöht [38].

In China sind Umweltbelange und Energiesicherheit die Hauptgründe für den Übergang zu einem größeren Erdgasmarkt. Chinas wachsende Nachfrage nach Benzin zeigte sich deutlich im Jahr 2003, als es erstmals bei den Ölimporten Japan übertraf und zum weltweit zweitgrößten Verbraucher (nach den USA) wurde. Aus

diesem Grund stellt die Förderung von Flüssiggas- (LPG) und Erdgasbrennstoff (CNG) in den öffentlichen Verkehrsmitteln – in Form von verschiedenen F&E-Programmen, direkten Investitionen und Anreizprogrammen – ein wichtiges Ziel der chinesischen Regierung dar. Die öffentlichen Verkehrsbetriebe von Beijing haben sich verpflichtet 90% der 18.000 Stadtbusse vor den Olympischen Spiele 2008 durch Erdgas-Busse zu ersetzen. Andere chinesische Städte gehen für derartige Großveranstaltungen ähnliche Verpflichtungen ein [39], [40].

Neuseeland stellt einen Sonderfall dar und hatte in Folge staatlicher Anreize, Förderungen und Darlehens-Programme (z. B. 100%ige Finanzierung für Fahrzeug-Konvertierung) schon während der Mitte der 1980er-Jahre einen sehr erfolgreichen Markt für Erdgasfahrzeuge. Bis 1985 hatte CNG-Fahrzeuge in Neuseeland etwas mehr als 10% des Marktanteils. OEM-Fahrzeuge wurden aus Japan, Australien und Europa eingeführt. Nach politischen Veränderungen trat die Regierung im Jahr 1985 von den günstigen Darlehen zurück und der CNG-Markt verschwand schließlich [40].

In Europa dauerte es bis in die 1980er-Jahre, bis sich der schwedische Automobilbauer Volvo dazu entschloss, erdgasbetriebene Fahrzeuge zu entwickeln und es vergingen fast wieder 10 Jahre bis dieser Trend auch Deutschland erreichte. Im Jahr 1994 bildete eine Koalition von Erdgasversorgern, Fahrzeuglieferanten, Umwelt-Gruppen und Einzelpersonen aus 17 Ländern die Europäische Natural Gas Vehicle Association (ENGVA), um Pilot-Programme, internationale Kodizes und Standards zu koordinieren. Erst dann gingen die ersten Erdgasfahrzeuge von Ford (Transit) und BMW (316g und 518g) in Serie, ein Jahr später folgten Mercedes-Benz, Citroën, Opel, Peugeot und Volkswagen mit ihren ersten Erdgasautos. Erster japanischer Hersteller in Deutschland war 1997 Honda mit dem Civic GX. In Schweden und der Schweiz wird Biogas schon seit längerer Zeit als Treibstoff für Busse und Lastkraftwagen eingesetzt. Die Hersteller Mercedes Benz, MAN, Renault, Volvo und IVECO bieten Lkws und Busse basierend auf Ottomotoren an. Kenworth verfügt über den Dual-Fuel Erdgas-Diesel Motor, den auch Volvo bereits testet. Auch in Deutschland wurden hierzu mehrere Projekte durchgeführt, eine breite Umsetzung hat die Technologie allerdings noch nicht gefunden [41], [42], [43], [44].

### 1.3. Rahmenbedingungen für die Verwendung biogener Kraftstoffe

Der Straßenverkehr verursacht etwa ein Fünftel der CO<sub>2</sub>-Emissionen der EU, wobei etwa 12% auf Personenkraftwagen entfallen. Damit ist der Verkehrsbereich mit seinem prognostizierten Wachstum der Verkehrsleistungen einer der zentralen Sektoren für eine CO<sub>2</sub>-Minderungsstrategie [45].

Hinzu kommt, dass die Abhängigkeit von fossilen Kraftstoffen mit rund 95% am Gesamtkraftstoffumfang im Angesicht der steigenden Rohölpreise und des stagnierenden Angebotes zu einem Wandel hin zu anderen Kraftstoffen und neuen Technologien drängen. Als Treiber für die Veränderungen im Verkehrsbereich können folgende Einflüsse genannt werden:

- *demographische Einflüsse (z. B. Alterung, Bevölkerungsrückgang)*
- *technologische Einflüsse (z. B. Effizienzsteigerung der Antriebe)*
- *raumstrukturelle Einflüsse (z. B. EU-Osterweiterung)*
- *organisatorische Einflüsse (z. B. Just-in-time Produktion)*

Während die EU-25 die Gesamtemissionen von Treibhausgasen zwischen 1990 und 2004 um fast 5% gesenkt hat, stiegen die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Straßenverkehr um 26%. In der Fahrzeugtechnologie wurden zwar riesige Fortschritte erzielt – insbesondere geringere CO<sub>2</sub>-Emissionen durch höhere Kraftstoffeffizienz – doch diese reichen nicht aus, um die Folgen des zunehmenden Verkehrs, immer größerer Autos und einer steigenden Verkehrsleistung zu neutralisieren. Neben den genannten Entwicklungen lässt sich eine Reihe von politischen Maßnahmen der letzten fünf Jahre identifizieren, die direkt oder indirekt eine mobilitätssteuernde Wirkung bzw. eine CO<sub>2</sub>-Emissionen senkende Wirkung zur Folge hatten. Hier seien besonders die Beimischungspflicht von Biokraftstoffen zu Benzin (Ethanol) und Diesel (RME, BTL) sowie die ACEA-Selbstverpflichtung genannt [46].

#### 1.3.1. Kyoto-Protokoll

Im Protokoll von Kyoto vom Dezember 1997 haben sich die großen Industrieländer der Welt – mit Ausnahme der USA und China – und jene osteuropäischen Länder, die sich damals im Übergang zur Marktwirtschaft befanden, zu quantifizierten Emissionsbegrenzungen und -reduktion verpflichtet. Im Kyoto-Protokoll sind sechs Treibhausgase (THG) reglementiert (Abbildung 4), deren Ausstoß entsprechend

ihres Treibhausgaspotenzials gewichtet und als CO<sub>2</sub>-Äquivalente ausgedrückt wird [47].

KYOTO-relevante TREIBHAUSGASE	<b>1</b>	<b>Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)</b>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>- entsteht bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe wie Erdgas, Erdöl und Kohle und damit hauptsächlich in den Sektoren Verkehr, Energieaufbringung und Industrie sowie produzierendes Gewerbe</li> <li>- 84,8% der gesamten Treibhausgasemissionen im Jahr 2006</li> <li>- im Zeitraum 1990 bis 2006 sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen um 24,5% gestiegen</li> <li>- Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) hat ein Treibhauspotenzial von 1 [48]</li> </ul>
	<b>2</b>	<b>Methan (CH<sub>4</sub>)</b>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>- entsteht in erster Linie bei mikrobiologischen Gärungsprozessen, die zum Beispiel auf Deponien, aber auch in Mägen von Wiederkäuern stattfinden; außerdem wird im Landwirtschaftssektor Methan bei der Lagerung von organischem Dünger freigesetzt</li> <li>- 7,6% der gesamten Treibhausgasemissionen im Jahr 2006</li> <li>- im Zeitraum 1990 und 2006 sind die CH<sub>4</sub>-Emissionen um 24,5% gesunken</li> <li>- Methan (CH<sub>4</sub>) hat ein Treibhauspotenzial von 21<sup>1</sup> [48]</li> </ul>
	<b>3</b>	<b>Lachgas (N<sub>2</sub>O)</b>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>- entsteht beim biologischen Abbau stickstoffhaltiger Verbindungen (zum Beispiel Dünger), in Abgaskatalysatoren, beim nicht biologischen Abbau von Stickoxiden und in der chemischen Industrie</li> <li>- 5,9% der gesamten Treibhausgasemissionen im Jahr 2006</li> <li>- im Zeitraum 1990 und 2006 sind die N<sub>2</sub>O-Emissionen um 14,3% gesunken</li> <li>- Lachgas (N<sub>2</sub>O) hat ein Treibhauspotenzial von 310<sup>1</sup> [48]</li> </ul>
	<b>4</b>	<b>Gruppe der fluorierten Gase (F-Gase)</b>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>- umfassen die teilfluorierten (HFKW) und die vollfluorierten Kohlenwasserstoffe (FKW) sowie Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>); die wichtigsten Emissionsquellen sind Kühltechnik und Klimaanlage sowie die Industrie</li> <li>- 1,6% der gesamten Treibhausgasemissionen im Jahr 2006</li> <li>- im Zeitraum 1990 und 2006 sind die F-Gas-Emissionen um 8,2% gesunken</li> <li>- F-Gase haben ein Treibhausgaspotenzial von 140 bis zu 23.900<sup>1</sup> [48]</li> </ul>

Abbildung 4: Kyoto-relevante Treibhausgase – Situation für Österreich im Jahr 2006 [49]

Das Treibhauspotenzial ist ein zeitabhängiger Index, mit dem der Strahlungsantrieb auf Massebasis eines bestimmten Treibhausgases in Relation zu dem Strahlungsantrieb von CO<sub>2</sub> gesetzt wird.

<sup>1</sup> Wert entstammt dem aktuellsten „Fourth Assessment Report“ und bezieht sich auf einen Zeithorizont von 100 Jahren.

Die Emissionen dieser Kyoto-relevanten Treibhausgase (Abbildung 5) stellten sich 2006 in Österreich wie folgt dar [49]:

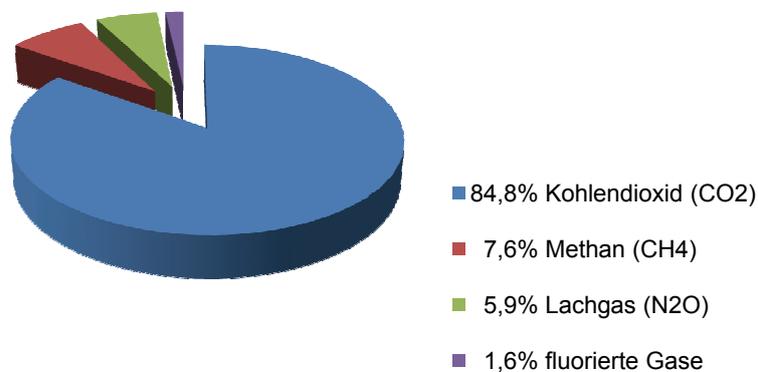


Abbildung 5: Anteil (CO<sub>2</sub>-Äquivalente) der einzelnen Treibhausgase an den nationalen THG-Gesamtemissionen für Österreich im Jahr 2006 [49]

Die Europäische Union hat sich zu einer Reduktion der Treibhausgasemissionen um 8%, ausgehend vom Ausstoß im Jahre 1990, innerhalb des Zeitraumes 2008 bis 2012, verpflichtet. Österreich hat innerhalb der EU einer Reduktion von 13% zugestimmt, hat jedoch derzeit einen Ausstoß von rund 10% über dem Referenzwert von 1990. Das ist vor allem auf den starken Anstieg der vom Verkehr verursachten Emissionen zurückzuführen. In Österreich sind die Bereiche mit der größten Zielabweichung die Sektoren Verkehr, Raumwärme und sonstige Kleinverbraucher sowie der nicht vom Emissionshandel betroffene Teil des Sektors Industrie und produzierendes Gewerbe (Abbildung 6).

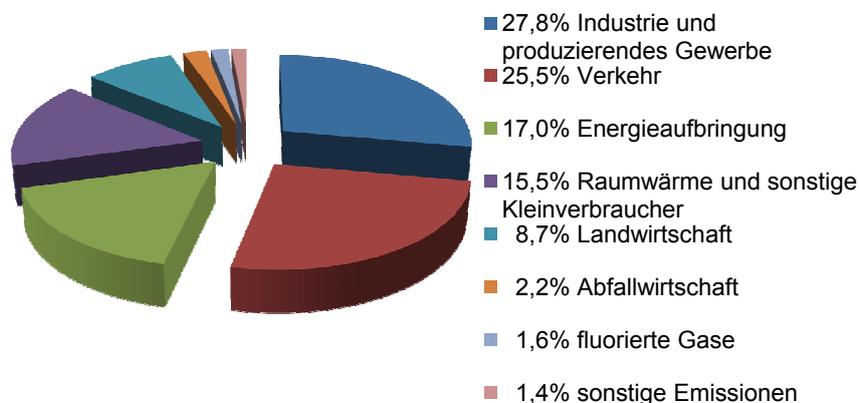


Abbildung 6: Anteil (CO<sub>2</sub>-Äquivalente) der Sektoren an den gesamten THG-Emissionen für Österreich im Jahr 2006 [49]

Den stärksten Anstieg der THG-Emissionen seit 1990 (Abbildung 7) verzeichnet dabei der Sektor Verkehr mit einem Plus von 10,6 Mio. Tonnen Kohlendioxid-Äquivalente bzw. 83,0% gefolgt von den Sektoren Industrie und produzierendes Gewerbe bzw. Energieaufbringung mit einem Anstieg von 3,2 Mio. Tonnen (+14,3%) bzw. 1,7 Mio. Tonnen (+12%) CO<sub>2</sub>-Äquivalente im betrachteten Zeitraum [11], [49].

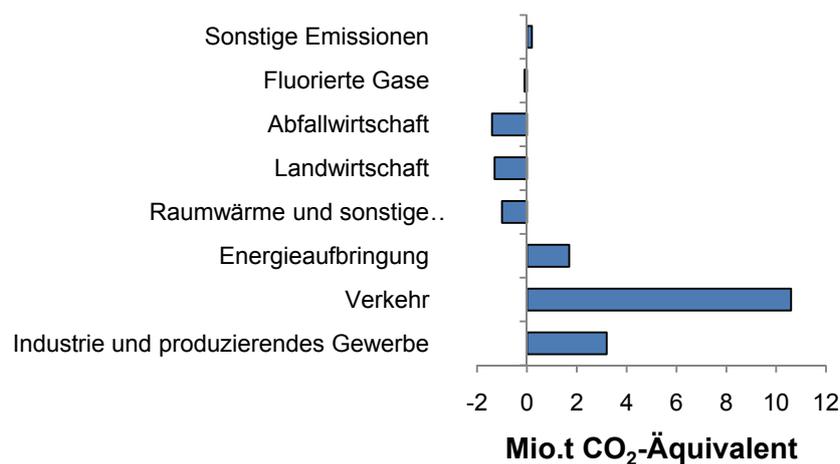


Abbildung 7: Änderung der Emissionen (CO<sub>2</sub>-Äquivalente) in den Sektoren zwischen 1990 und 2006 für Österreich [49]

In Anbetracht der Entwicklung der österreichischen Emissionen aus dem Verkehrssektor und der Diskussion um den so genannten Tanktourismus ist die Entwicklung der entsprechenden Emissionen in Deutschland als Ausgangsstaat des Tanktourismus und Tschechien (als weiteres Zielland des Tanktourismus) näher zu betrachten. Die Emissionen Deutschlands aus dem Verkehrssektor weichen von der allgemeinen Entwicklung in den EU-15 ab. In Deutschland sinken seit 1999 die Emissionen parallel zur Erhöhung der Mineralölsteuer (Ökosteuer) kontinuierlich. Der Absatzrückgang bei Ottokraftstoffen ist dabei signifikant, während bei Diesel im Wesentlichen eine Stabilisierung erreicht wurde. Im europäischen Vergleich stiegen vor allem in Österreich und auch in Tschechien die Emissionen während dem gleichen Zeitraum überproportional an. Es zeigt sich also, dass die Veränderungen in Deutschland zeitlich mit der Beschleunigung des Anstiegs der Emissionen in Österreich und Tschechien zusammenfallen. Während für Tschechien aufgrund des derzeitigen Emissionsniveaus weit unter dem Kyoto-Ziel keine Konsequenzen außer einem höheren Steueraufkommen resultieren, führen die steigenden Emissionen aus dem Verkehrssektor in Österreich zu einer stetigen Entfernung vom Kyoto-Ziel [50].

Folgende Verpflichtungen im Rahmen des Kyoto-Protokolls sind besonders in Bezug auf die Erzeugung von alternativen Kraftstoffen wie Bioethanol und Biogas relevant [25]:

- *Förderung nachhaltiger landwirtschaftlicher Bewirtschaftungsformen unter Berücksichtigung von Überlegungen zu Klimaänderungen;*
- *Erforschung und Förderung, Entwicklung und vermehrte Nutzung von neuen und erneuerbaren Energieformen, Technologien zur Bindung von Kohlendioxid und von fortschrittlichen und innovativen umweltverträglichen Technologien*
- *Verringerung oder schrittweise Abschaffung von Marktverzerrungen, steuerlichen Anreizen, Steuer- und Zollbefreiungen und Subventionen, die im Widerspruch zum Ziel des Übereinkommens stehen, in allen Treibhausgase emittierenden Sektoren und Anwendung von Marktinstrumenten;*
- *Maßnahmen zur Begrenzung und/oder Reduktion von Emissionen von nicht durch das Montrealer Protokoll<sup>2</sup> [51] geregelten Treibhausgasen im Verkehrsbereich*

Die USA sind am 29. März 2001 aus dem Vertrag ausgestiegen. Sie sind der Ansicht, dass das Kyoto-Protokoll schwerwiegende Mängel aufweist, und langfristig keine geeignete Strategie darstellt, das Problem der globalen Klimaerwärmung zu lösen [52].

### **1.3.2. EU-Biotreibstoffrichtlinie und EU-Strategie zur CO<sub>2</sub>-Absenkung bei Pkws**

Durch die Biokraftstoffrichtlinie (Richtlinie 2003/30/EG [5]) wurde Anfang Mai 2003 die rechtliche Rahmenbedingung für die vermehrte Verwendung von Biokraftstoffen geschaffen. Es handelt sich hierbei jedoch um eine Soll-Bestimmung und bei den vorgeschlagenen Werten handelt es sich daher nur um Richtwerte, die nicht eingeklagt werden können. Das Europäische Parlament versuchte zwar, eine rechtlich verpflichtende Richtlinie zustande zu bringen, dies scheiterte jedoch am Einspruch des Rates durch die Finanzminister [25].

---

<sup>2</sup> Völkerrechtlicher Vertrag des Umweltrechts über Stoffe, die zum Abbau der Ozonschicht führen

Zielsetzung der Richtlinie ist es, dass bis Ende 2005 ein energetischer Mindestanteil von 2% an Biokraftstoffen oder anderen erneuerbaren Kraftstoffen an den gesamten für Transportzwecke verwendeten Otto- und Dieselmotorkraftstoffen eingesetzt wird, bis Ende 2010 soll sich dieser Anteil auf 5,75% erhöhen. Dazu zählen Bioethanol, Biodiesel, Biogas, Biomethanol, Biodimethylether, Bio-ETBE, Bio-MTBE, Biowasserstoff und reines Pflanzenöl. Die Richtlinie war bis 31.12.2004 in nationales Recht umzusetzen, was in Österreich im Rahmen einer Novelle der Kraftstoffverordnung (BGBl. II Nr. 417/2004) im November 2004 geschah [5], [8].

Die aktuellste, im Juni 2009 veröffentlichte europäische „Richtlinie zur Förderung von Energie aus erneuerbaren Quellen“ definiert mit der Realisierung eines Anteiles an Energie aus erneuerbaren Quellen von mindestens 20% des Bruttoendenergieverbrauchs der europäischen Gemeinschaft bis zum Jahr 2020 ein anspruchsvolles Ziel. Für den Verkehrssektor wird ein Teilziel vorgegeben, welches bestimmt, dass im Jahr 2020 der Endenergieverbrauch des Verkehrssektors zu mindestens 10% mit Energie aus erneuerbaren Quellen gedeckt werden muss [7], [53].

Im Grünbuch<sup>3</sup> „Hin zu einer europäischen Strategie für Energieversorgungssicherheit“ schlägt die Europäische Kommission einen Anteil von 20% alternativen Kraftstoffen am Gesamtkraftstoffverbrauch des Verkehrssektors vor [54], [55], [56].

Der Vorschlag wurde bis dato nicht in einer Richtlinie als verbindliche Vorgabe festgelegt. Aus österreichischer Sicht ist daher bis 2010 ein Anteil alternativer Kraftstoffe von 10% zu erreichen, von dem mindestens 5,75% Biokraftstoffe darstellen. Für das Jahr 2020 ergibt sich ein Anteil von 20% alternativer Kraftstoffe, wovon dann mindestens 10% Biokraftstoffe sind [8], [57].

---

<sup>3</sup> „Grünbücher sind von der Kommission veröffentlichte Mitteilungen, die zur Diskussion über einen bestimmten Politikbereich dienen. Sie richten sich vor allem an interessierte Dritte, Organisationen und Einzelpersonen, die dadurch die Möglichkeit erhalten, an der jeweiligen Konsultation und Beratung teilzunehmen. In bestimmten Fällen ergeben sich daraus legislative Maßnahmen. Solche Konsultationen sind auf der Homepage der Europäischen Kommission „Ihre Stimme in Europa“ ([http://ec.europa.eu/yourvoice/index\\_de.htm](http://ec.europa.eu/yourvoice/index_de.htm)) zusammengestellt.“

Neben diesen beiden Zielen stellt die Europäische Kommission in der „Mitteilung der Kommission – Aktionsplan für Energieeffizienz: Das Potenzial ausschöpfen“ fest, dass das Energieeinsparungspotenzial des Verkehrssektors bis zum Jahr 2020 (bei „business as usual“ 405 Mio.t RÖE) im Vergleich zu 2005 (332 Mio.t RÖE) mit 26% (105 Mio.t RÖE) zu bewerten ist. Als vorrangige Maßnahme wird daher die Erhöhung der Kraftstoffeffizienz gesehen [58].

Eine indirekte Umsetzung erfährt diese geplante Maßnahme durch die jüngst veröffentlichte „Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen“. Darin wird ab 2012 eine durchschnittliche CO<sub>2</sub> Emission der Neuwagenflotte von 130 g/km (zusätzlichen Maßnahmen soll eine Reduzierung um weitere 10 g/km bringen) festgelegt. Ab dem Jahr 2020 wird der Zielwert auf 95 g/km herabgesetzt [59].

Abbildung 8 fasst die beschriebenen Ziele und Potenziale zusammen [4]

<b>SCHWERPUNKTE der EUROPÄISCHEN ENERGIEPOLITIK</b>			
	<b>Substitution fossiler durch erneuerbare Energiequellen</b>	<b>Reduktion der Treibhausgas-emissionen</b>	<b>Erhöhung der Energieeffizienz (Potenzial)</b>
<b>GESAMT</b>	20% bis 2020	30% im Jahr 2020 gegenüber 1990	20% bis 2020
<b>VERKEHR</b>	10% bis 2020	Zielwerte CO <sub>2</sub> pro Neu-Pkw im Mittel: 120 g/km bis 2020 95 g/km ab 2020	26% bis 2020

Abbildung 8: Ziele der Energiepolitik Europas ab dem Jahr 2009 [53], [60], [58], [59]

Erklärtes politisches Ziel der Europäischen Union ist die weitere Absenkung der CO<sub>2</sub> nach einer überarbeiteten Strategie (Abbildung 9), in der auch die Beimischung von Biokraftstoffen einen wichtigen Beitrag leisten soll. Aus diesem Grund wurde auch

über den Einsatz alternativer Kraftstoffe diskutiert, die ein günstigeres Kohlenstoff/Wasserstoff-Verhältnis aufweisen als die gebräuchlichen Benzin- und Dieselmotoren [46], [61].

<b>HAUPTMASSNAHMEN ZUR CO<sub>2</sub>-ABSSENKUNG</b>	<b>1</b>	<b>Rechtsrahmen zur Verringerung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes</b>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>- für neue Pkws und Kleintransporter;</li> <li>- ausreichend lange Übergangszeit und Rechtssicherheit für die Automobilindustrie;</li> </ul>
	<b>2</b>	<b>Ziel für die durchschnittlichen Emissionen</b>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>- es wird vorgeschrieben, dass die in der EU-27 verkaufte Neuwagenflotte bis 2012 das Ziel einer CO<sub>2</sub>-Emission von 130 g/km erfüllen müssen;</li> <li>- Verbesserungen bei der Fahrzeugtechnologie sollen die durchschnittlichen Emissionen auf 120 g/km senken;</li> <li>- durch zusätzliche Maßnahmen soll eine Reduzierung um weitere 10 g/km erreicht werden, so dass insgesamt eine Verringerung der Emissionen auf 120 g/km erzielt wird;</li> <li>- Zu diesen ergänzenden Maßnahmen gehören Effizienzverbesserungen bei den Fahrzeugkomponenten, die den Kraftstoffverbrauch am stärksten beeinflussen;             <ul style="list-style-type: none"> <li>o Reifen (Obergrenzen für den Rollwiderstand, verpflichtender Einsatz von Reifendrucküberwachungssystemen)</li> <li>o Mindeststandards für die Effizienz von Klimaanlage</li> <li>o Gangwechselanzeigen</li> <li>o Beimischung von Biokraftstoffen</li> </ul> </li> <li>- für Fahrzeugkomponenten werden Effizienzanforderungen eingeführt;</li> </ul>
	<b>3</b>	<b>Emissionsziele für Kleintransporter</b>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Absenkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber 201 g/km im Jahr 2002;</li> <li>- bis 2012 auf 175 g/km</li> <li>- bis 2015 auf 160 g/km</li> </ul>
<b>4</b>	<b>Unterstützung von Forschungsarbeiten</b>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Forschung, die auf eine weitere Senkung der Emissionen von Treibhausgasen abzielt;</li> </ul>	
<b>5</b>	<b>Förderung des Erwerbs von kraftstoffeffizienten Fahrzeugen</b>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maßnahmen, wie etwa die bessere Fahrzeugkennzeichnung;</li> <li>- Aufforderung an die Mitgliedstaaten, Kraftfahrzeuge auf der Grundlage ihrer CO<sub>2</sub>-Emissionen zu besteuern;</li> </ul>	
<b>6</b>	<b>EU-Verhaltenskodex</b>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- im Bereich des Marketings und der Werbung für Kraftfahrzeuge, um ein nachhaltigeres Verbraucherverhalten zu fördern;</li> <li>- die Kommission forderte die Automobilhersteller auf, diesen Kodex bis Mitte 2007 zu unterzeichnen;</li> </ul>	

Abbildung 9: Strategie der Europäischen Union zur CO<sub>2</sub>-Absenkung seit 2007 [62]

### 1.3.3. ACEA-Selbstverpflichtung

1998 verpflichtete sich die Vereinigung Europäischer Automobilhersteller ACEA (Association des Constructeurs Européennes d'Automobil) freiwillig gegenüber der Europäischen Kommission, die CO<sub>2</sub>-Emissionen von in der EU verkauften Neuwagen bis 2008 auf durchschnittlich 140 g/km zu senken; die japanische und die koreanische Automobilindustrie wollen dieses Ziel bis 2009 erreichen. Das entspricht im Vergleich zum Basisjahr 1995 einer Absenkung um 25%. Als Indikator für den Fortschritt wurde ein Zwischenziel von durchschnittlich 165-170 g/km im Jahr 2003 vereinbart. Weiterhin sagte die Autoindustrie zu bis zum Jahr 2000 Automodelle, die 120 g/km oder weniger CO<sub>2</sub> emittieren, auf den Markt zu bringen. Erklärtes Ziel ist die Absenkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen auf einen Wert von 120 g/km im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) bis zum Jahr 2012 [46], [63].

Die erreichte CO<sub>2</sub>-Absenkung der Fahrzeugflotte war jedoch bei weitem nicht stark genug, um das für 2008 gesetzte Ziel der ACEA-Selbstverpflichtung zu erreichen (Abbildung 10). Interessant ist hier auch die unterschiedliche Entwicklung bei diesel- und benzinbetriebenen Pkws.

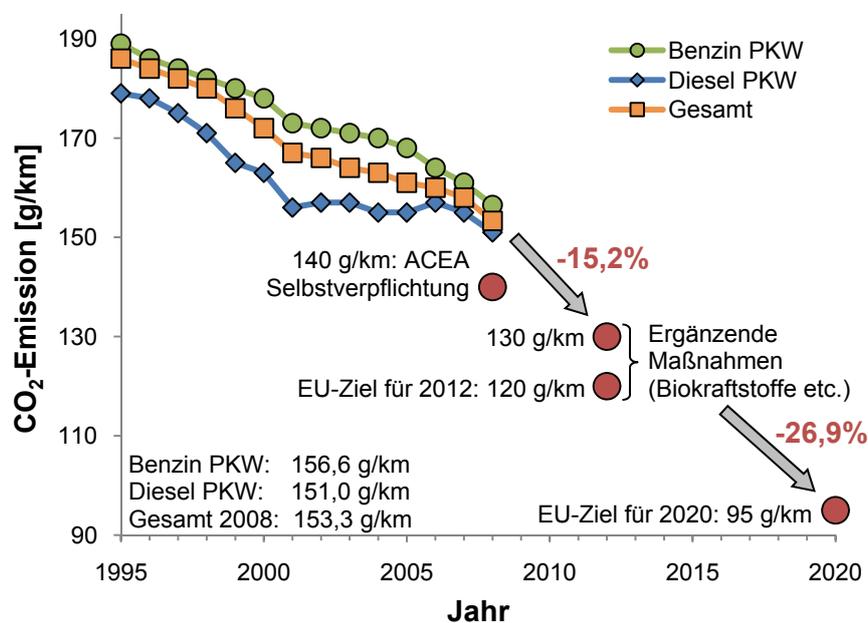


Abbildung 10: CO<sub>2</sub>-Emissionen der durchschnittlichen Neuwagenflotte in der EU-15 und Emissionsziele für 2012 und 2020 [64], [65]

Während für Benziner eine kontinuierliche aber hinter der Zielentwicklung zurückbleibende Abnahme beobachtet wird, lagen die Diesel-Pkws in den ersten Jahren der Selbstverpflichtung im Rahmen der geforderten Zielentwicklung und zeigten dann ab 2001 sogar wieder einen Anstieg der spezifischen Emissionen bis 2005. Hier scheint der Trend zunehmend Oberklasse-Pkws mit Dieselmotoren auszustatten der Abnahme entgegengewirkt zu haben.

Die ACEA gab unter anderem an, dass die Erreichbarkeit der Ziele von „ungehinderter Ausbreitung CO<sub>2</sub>-effizienter Technologien“ abhängig wäre. Insbesondere die Erhöhung der Besteuerung sowie die Verschärfung der Grenzwerte für die Emissionen von Dieselfahrzeugen erschwerten die Einhaltung der Selbstverpflichtung. Wegen dieser Einwände kam – wie bereits zuvor beschrieben – die EU der Industrie schließlich entgegen und es besteht derzeit die Einigung für einen neuen Wert von 130 g/km bis 2012, der durch zusätzliche Maßnahmen um weitere 10 g/km auf die genannten 120 g/km reduziert werden.

## 2. Schadstoffkomponenten aus der motorischen Verbrennung

### 2.1. Rechtliche Rahmenbedingungen

Um die infolge steigender Verkehrsnachfrage zunehmende Luftbelastung durch den Verkehr zu reduzieren, wurden in der EU seit Beginn der 70er Jahre Emissionsgrenzwerte eingeführt. Seit 1992 sind die „EURO Emissionsklassen“ definiert. Dabei wird zwischen Pkw und Nutzfahrzeugen (Nfz) unterschieden. In der von der Europäischen Union verabschiedete Richtlinie 70/220/ EWG [66] werden die zulässigen Abgasemissionen der Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeuge geregelt. Aufbauend auf diese grundlegende Richtlinie erfolgten entsprechende Überarbeitungen:

- *EURO 1:* Richtlinie 91/441/EWG [67], bzw. 93/59/EWG [68]
- *EURO 2:* Richtlinie 94/12/EG [69], bzw. 96/69/EG [70]
- *EURO 3:* Richtlinie 98/69/EG [71]
- *EURO 4:* Richtlinie 2002/80/EG [72]
- *EURO 5 und 6:* Verordnung 715/2007 [73], bzw. Verordnung 692/2008 [74]

Die untenstehenden Grenzwerte (Tabelle 1) gelten für die im Rahmen eines standardisierten Prüfverfahrens ermittelten Werte (siehe [66] einschließlich aller Änderungen).

Tabelle 1: EU Emissionsstandards für Pkw der Kategorie M1 [67], [68], [69], [70], [71], [72], [73], [74]

Gesetzgebung	CO [g/km]		HC [g/km]	NMHC [g/km]	NOx [g/km]		HC+NOx [g/km]		Partikel [g/km]	
	Otto	Diesel	Otto	Otto	Otto	Diesel	Otto	Diesel	Otto <sup>4</sup>	Diesel
EURO 1 (1992)	2,72	2,72	-	-	-	-	0,97	0,97	-	0,140
EURO 2 (1996)	2,20	1,00	-	-	-	-	0,50	0,70	-	0,080
EURO 3 (2000)	2,30	0,64	0,2	-	0,15	0,50	0,35	0,56	-	0,050
EURO 4 (2005)	1,00	0,50	0,1	-	0,08	0,25	0,18	0,30	-	0,025
EURO 5 (2009)	1,00	0,50	0,1	0,068	0,06	0,18	-	0,23	0,005	
EURO 6 (2014)	1,00	0,50	0,1	0,068	0,06	0,08	-	0,17	0,005	

<sup>4</sup> Die Grenzwerte für die Partikelmasse von Ottomotoren gelten nur für Kraftfahrzeuge mit Direkteinspritzung.

Die darin limitierten Emissionskomponenten sind Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (HC), Stickoxide (NO<sub>x</sub>) und die Partikelmasse (PM). Bei den Pkw ist derzeit die Emissionsklasse EURO 5 gültig. Ab dem Jahr 2014 erfolgt eine weitere Absenkung der Grenzwerte auf die EURO 6 Norm.

Seit der Gesetzgebungsstufe EURO 1 ist dabei der Neue Europäische Fahrzyklus (NEFZ) zu absolvieren. Die Durchführung des Prüfzyklus sowie die Prüfbedingungen des Prüffahrzeuges, des Kraftstoffes und der Prüfeinrichtungen sind in der ECE-Regelung Nr. 83 [75] beschrieben. In Anhang 4 (NEFZ Typ I, siehe auch Kapitel 5.1.1) wird darin genau auf die Messung der Emissionen nach einem Kaltstart eines Versuchsfahrzeuges bei einer Umgebungstemperatur von 20°C eingegangen.

Für Ottofahrzeuge hat seit 1. Jänner 2002 zusätzlich der Test als Kaltstart mit einer Umgebungstemperatur von -7°C zu erfolgen. Auf die Durchführung dieser Prüfprozedur (NEFZ Typ VI, siehe auch Kapitel 5.1.2) wird in Anhang 8 der ECE-Regelung Nr. 83 [75] eingegangen.

Neben der Durchführung der Emissionsprüfung wird ebenso auf die Konditionierung – d. h. die Temperaturangleichung des Prüflings an die Umgebung – eingegangen und ein entsprechendes Regelwerk dafür angegeben.

Mit der Emissionsstufe EURO 6 werden in Europa die Limits für Diesel-Pkws und Benzin-Pkw weitgehend angeglichen (NO<sub>x</sub> und PM).

Die Berechnung des Kraftstoffverbrauches aus den ermittelten gasförmigen Abgasbestandteilen (CO<sub>2</sub>, CO, HC) ist in der ECE-Regelung Nr. 101 [76] festgelegt.

Für die genannten Prüfverfahren war in den angeführten Regelungen bis zur Einführung der EURO 5 Gesetzgebung ein Normkraftstoff (Otto- und Dieselmotorkraftstoff) ohne Biokomponentenbeimengung vorgeschrieben.

## 2.2. Relevante Luftschadstoffe und Treibhausgase

Unter Abgas im Zusammenhang mit der motorischen Verbrennung versteht man die Stoffe, die während dieser direkt entstehen oder im Auspufftrakt gebildet werden. Bei der vollständigen Verbrennung von Kohlenwasserstoffen (Benzin, Diesel, Ethanol, Gas) wird Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) und Wasserdampf ( $\text{H}_2\text{O}$ ) gebildet. Stickstoff ( $\text{N}_2$ ) und der überflüssige Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ) bleiben unverändert.

Unter realen Bedingungen entstehen aufgrund einer unvollständigen Verbrennung auch Schadstoffe. Die wesentlichen daraus entstehenden Komponenten sind:

- *Kohlenmonoxid ( $\text{CO}$ )*
- *unverbrannte Kohlenwasserstoffe ( $\text{HC}$ )*
- *Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe ( $\text{PAH}$ )*
- *Stickstoffoxide ( $\text{NO}_x$ )*
- *Ruß bzw. Partikel ( $\text{PM}$ )*

Für eine Bewertung der Ozonreaktivität muss die Gruppe der Kohlenwasserstoffe zumindest in ozonreaktive Nichtmethan-Kohlenwasserstoffe (NMHC) und in die klimarelevanten Methanemissionen ( $\text{CH}_4$ ) unterteilt werden. Die Nichtmethan-Kohlenwasserstoffe sind zusammen mit den Stickoxiden und Kohlenmonoxid an der Bindung von Ozon und Oxidantien in der Atmosphäre beteiligt und werden unter dem Begriff „Ozonvorläufersubstanzen“ zusammengefasst.

Auf Ruß bzw. Partikelemissionen wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen, da sie für die untersuchten Motorenkonzepte aufgrund des überaus geringen Ausstoßes nicht relevant sind.

Im eigentlichen Sinn unschädlich, allerdings als Treibhausgas wirksam sind:

- *Wasserdampf ( $\text{H}_2\text{O}$ )*
- *Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ )*
- *Methan ( $\text{CH}_4$ )*

Im Folgenden sollen diese Komponenten und ihrer Wirkung auf Mensch und Umwelt kurz beschrieben werden.

### 2.2.1. Kohlenmonoxid (CO)

Kohlenmonoxid ist ein sehr giftiges, farbloses und geruchloses Gas. Es besetzt die Bindungsplätze für Sauerstoff im Hämoglobin wodurch die Sauerstoffversorgung des Körpers beeinträchtigt wird. Diese Vergiftung kann zur „inneren Erstickung“ führen. In großen Höhen (sinkender Sauerstoffpartialdruck) wird der Effekt verstärkt, daher ist die zulässige CO-Konzentration in der Höhe geringer.

Kohlenmonoxid entsteht bei Sauerstoffmangel ( $\lambda < 1$ ) durch die unvollständige Verbrennung des Kohlenstoffes. Beim Vorhandensein von genügend Sauerstoff wird die Verbrennung bis zur Umwandlung in  $\text{CO}_2$  fortgesetzt und bei Luftüberschuss ( $\lambda > 1$ ) geht der CO-Anteil drastisch zurück. Es kann aber auch dann durch den instationären Charakter der Verbrennung, bei Inhomogenität der Ladung und durch den Wandfilmeffekt zu einer CO-Bildung kommen [77].

Während der Expansionsphase und im Auspuff wird ein Teil von CO unter Reduktion von Wasserdampf zu  $\text{CO}_2$  oxidiert. Es gilt hier die folgende Formel (Gl.1):

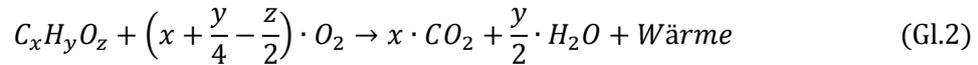


Benzinmotoren ohne Katalysator sind wesentliche Emittenten dieses farb- und geruchlosen Gases. Heute sind die CO-Emissionen durch die Einführung des geregelten Dreiwegekatalysators an Pkw jedoch so weit gesunken, dass sie kein wesentliches Luftgüteproblem mehr darstellen [78], [79].

### 2.2.2. Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)

Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) ist bekanntlich für den Menschen selbst nicht giftig. Es kann sich jedoch – da es schwerer als Sauerstoff ist – an tiefen Stellen sammeln und zum Erstickungstod führen. Ab einer Konzentration von 6% in der Atemluft sind erste Auswirkungen auf den menschlichen Körper zu erwarten und ab einem Wert von 10% kann es zum Erstickungstod kommen [80], [81].

Bei der Verbrennung eines Kohlenwasserstoffes mit der chemischen Struktur  $C_xH_yO_z$  entsteht im Idealfall nach Formel (Gl.2) bei stöchiometrischen Verhältnissen nur Kohlendioxid ( $CO_2$ ) und Wasser ( $H_2O$ ) sowie Wärme.



Die eigentliche Problematik der immer größer werdenden Emissionsmenge liegt in der Treibhauseigenschaft. Die Einschätzung über die Höhe des Anteils der einzelnen Gase am Treibhauseffekt differiert in der Fachliteratur stark. Die [Abbildung 11](#) zeigt, dass nicht nur  $CO_2$ , sondern in deutlich größerem Masse Wasserdampf das wichtigste natürliche Treibhausgas darstellt. Ebenso haben noch andere Emittenten einen merklichen Einfluss auf die Klimawirkung. Wie sich das Klima durch den Treibhauseffekt ändern wird, ist derzeit nicht sicher abzusehen. Wie sich der Anstieg von  $CO_2$  in der Atmosphäre bemerkbar macht, war schon zu sehen. Dieser Anstieg wird von vielen Fachleuten als sehr bedenklich angesehen [48].

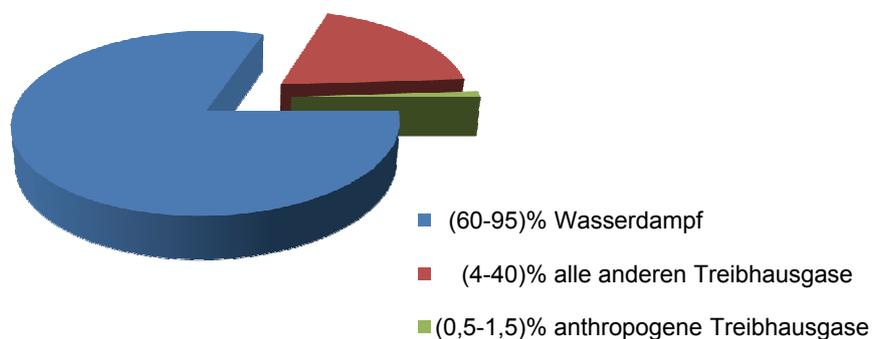


Abbildung 11: Anteile der Treibhausgase am Treibhauseffekt [82]

Eine genaue Bilanzierung aller natürlichen und anthropogenen Treibhausgasquellen ist äußerst schwierig und in der Literatur sind die Bandbreiten dafür sehr groß. In [Abbildung 12](#) ist der anthropogene (durch den Menschen verursachte) Treibhauseffekt, der mit einem Anteil von 0,5% bis 1,5% angegeben wird, genauer aufgeschlüsselt. Auch hier gehen die Meinungen über die Höhe der Anteile einzelner Treibhausgase weit auseinander. Es erhärtet sich jedoch zunehmend der Verdacht, dass die anthropogenen Treibhausgasemissionen das natürliche Gleichgewicht stören und dadurch eine überdurchschnittliche Temperaturerhöhung der Erdatmosphäre bewirkt wird [78].

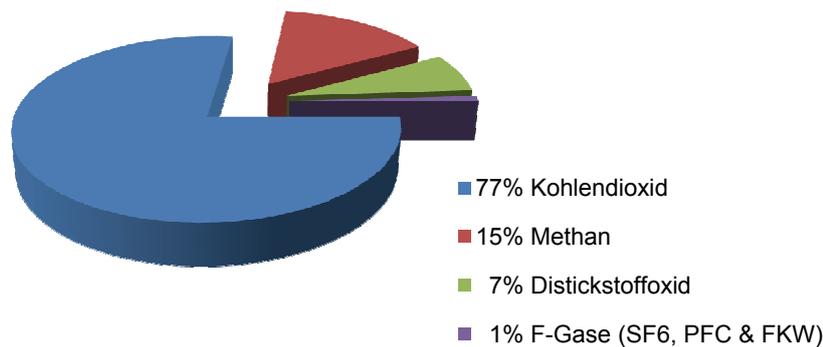


Abbildung 12: Stoffliche Zusammensetzung ( $\text{CO}_2$ -Äquivalente) der globalen anthropogenen THG-Emissionen für das Jahr 2005 [83]

### 2.2.3. Kohlenwasserstoffe ( $\text{C}_x\text{H}_y$ ) / Methan ( $\text{CH}_4$ )

Die unverbrannten Kohlenwasserstoffe (als Sammelbegriff für eine Vielfalt an chemischen Verbindungen) bestehen ähnlich wie der Kraftstoff aus einer großen Zahl verschiedenartiger Moleküle. Bei einer unvollständig ablaufenden Verbrennung werden mehr als 1000 verschiedene Kohlenwasserstoffverbindungen emittiert. Diese große Zahl verschiedener Verbindungen ist auf das Vermögen des Kohlenstoffatoms zurückzuführen, Ketten und Ringe zu bilden. Von der Vielfalt der Kohlenwasserstoffe mit jeweils sehr unterschiedlichen Eigenschaften soll nur ein relativ geringer Teil schädliche Auswirkungen auf Mensch und Umwelt haben [84].

Nach strenger chemischer Definition bestehen Kohlenwasserstoffe nur aus Kohlenstoff und Wasserstoff. In der Regel werden unter diesem Begriff nicht nur die „reinen“ Kohlenwasserstoffe, sondern auch andere organische Verbindungen verstanden, bei denen es sich auch um nicht flüchtige (normalerweise flüssige oder feste Verbindungen) handeln kann und damit in der Regel keine Luftschadstoffe sein können. Die United States-Environmental Protection Agency (US-EPA) gibt ein sehr exaktes Kriterium für die Flüchtigkeit – nämlich einen Dampfdruck von über 0,13Pa bei 20°C und 1013hPa – an [85], [86].

Die Schädlichkeit dieser Verbindungen ist sehr unterschiedlich und reicht von ungiftigen Stoffen (z. B.  $\text{CH}_4$ , Methan) über Reizstoffe bis zu krebserregenden Substanzen (z. B.  $\text{C}_6\text{H}_6$ , Benzol). Die EPA konzentriert sich in ihren Untersuchungen auf die Stoffe, denen die größte Gefahr für die menschliche Gesundheit zugemessen

wird bzw. mit denen in dieser Hinsicht die größte Unsicherheit verbunden ist. Dazu gehören beispielsweise Formaldehyd (CH<sub>2</sub>O), Acetaldehyd (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O), 1,3-Butadien (C<sub>4</sub>H<sub>6</sub>) und Benzol (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>). [87].

Formaldehyd wird seit langem in der Medizin zur Desinfektion von Gegenständen verwendet. Aufgrund der hohen Reaktivität der Carbonylgruppe, reagiert Formaldehyd mit freien Aminogruppen und zeigt somit denaturierende Wirkung auf Proteine. Deshalb ist Formaldehyd für den Menschen als toxisch eingestuft. Da Formaldehyd gasförmig und gut wasserlöslich ist, werden Augen und Atemtrakt angegriffen. Dies kann asthmatische Anfälle oder allergische Hautreaktionen auslösen. Bei oraler Aufnahme treten schwere innere Verletzungen auf. Acetaldehyd wirkt ähnlich wie sein niedrigeres Homologes<sup>5</sup>, das Formaldehyd. Es zählt ebenfalls zu den als krebserzeugend verdächtig eingestuften Stoffen. Die höheren Homologen der Aldehyde sind nur noch in sehr hohen Dosen toxisch. Lediglich Acrolein wird ebenfalls als sehr toxisch und mit kanzerogenem Potenzial eingestuft. In den USA ist Formaldehyd als Einzelkomponente im Abgas im Gegensatz zu den anderen Aldehyden, die in einem Summenwert erfasst werden, limitiert [88], [89], [90].

Bei der unvollständigen Verbrennung von Ethanol können die genannten Aldehyde als Verbrennungszwischenprodukte entstehen. Besonders erhöhte Emissionen von Acetaldehyd sind die mögliche Folge bei einer motorischen Verwendung von Alkoholkraftstoffen und somit ist die Messung der Aldehyd-Emissionen unerlässlich. Die Bildung von Aldehyden bei der Oxidation von Ethanol ist eine typische Reaktion, nachfolgend gezeigt am Beispiel von Acetaldehyd (Abbildung 13) [91].

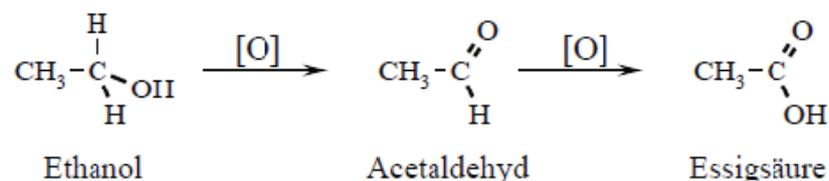


Abbildung 13: Bildung von Acetaldehyd bei der Oxidation von Ethanol [92]

<sup>5</sup> Eine Homologe Reihe ist eine Reihe von Stoffen, die sich über eine allgemeine Summenformel darstellen lassen und bei der ein Stoff dieser Reihe aus dem vorherigen Stoff durch „Hinzufügen“ eines weiteren „Kettengliedes“ gebildet wird.

Methan ( $\text{CH}_4$ ) kommt – wie bereits erwähnt – eine Sonderstellung zu, da es luftchemisch wenig reaktiv und nicht toxisch ist. Es stammt sowohl aus natürlichen Emissionsquellen und ebenso ist es anthropogenen Ursprungs. Anthropogene Quellen sind hauptsächlich die Landwirtschaft und unsere Abfälle. Kühe gasen beim Wiederkäuen Methan aus, aber auch Düngung führt zu Methan-Emissionen und in Klärwerken, auf Mülldeponien und im Kohlebergbau entsteht Methan. Außerdem enthalten die Permafrostböden (Dauerfrostböden) große Mengen des Gases. Durch die Klimaerwärmung könnten die Böden langsam auftauen und das über Jahrtausende gebundene Gas freisetzen. Da CNG bzw. Biogas zu einem hohen Anteil aus Methan bestehen, kann es auch hier unter bestimmten motorischen Betriebsbedingungen zu einer Erhöhung der Emissionen kommen [78].

Weil Methanmoleküle viel Wärme speichern können, wirken sich schon geringe Konzentrationen stark auf das Klima aus. Ihr Treibhaus-Potenzial ist deshalb 21 Mal höher als das von  $\text{CO}_2$  (Abbildung 4) [93].

Den zyklischen Kohlenwasserstoffen BTX (Benzol, Toluol, Xylol) und PAH (Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe) kommt eine besondere Schadstoffbedeutung zu. Wie beim Benzol sind die eigentlich krebserregenden Stoffe Metabolite<sup>6</sup>. Eine genaue Beschreibung der PAHs findet sich unter Kapitel 2.2.4. [88].

Die Entstehung von unverbrannten Kohlenwasserstoffen ist auf eine unvollständige Verbrennung des Kraftstoffes der Kraftstoffmoleküle zurückzuführen. Unabhängig vom Luftverhältnis entstehen durch das Erlöschen der Flamme an der Brennraumwand HC-Emissionen. Dieser Effekt findet auch in den Quetschspalten und Feuerstegen statt, d. h. die in der Grenzschicht befindlichen Gemischteile werden bis auf die Wandtemperatur abgekühlt und sind somit nicht mehr reaktionsfähig. Weiterhin werden Verbrennungsreaktionen durch die Wand selbst abgebrochen. Die Flamme im Zylinder kann auch durch starke Turbulenz lokal gelöscht werden und die Kohlenwasserstoffe werden unverbrannt emittiert. Bei genügend hoher Temperatur reagieren die im Brennraum entstandenen unverbrannten Kohlenwasserstoffe in der Auspuffphase im Auspuff nach [94].

---

<sup>6</sup> Der Metabolit ist ein Zwischenprodukt (Intermediat) in einem meist biochemischen Stoffwechselfvorgang.

### 2.2.4. Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH)

Als Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH) bezeichnet man unsubstituierte, mehrkernige Aromaten ohne Heteroatom (Abbildung 14), die aus zwei oder mehr kondensierten Ringen bestehen. Sie stellen eine in der Umwelt weit verbreitete Substanzklasse dar. Die Hauptquelle für PAHs ist anthropogenen Ursprungs, da diese durch unvollständige Verbrennung fossiler Brennstoffe und Biomasse entstehen [95].

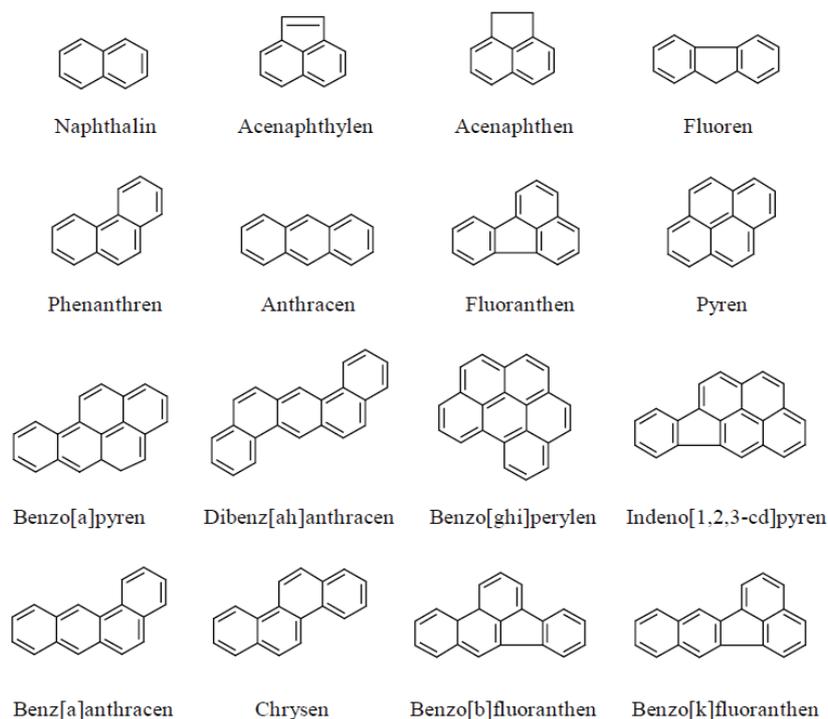


Abbildung 14: Strukturformeln der 16 wichtigsten PAH [96]

Eine besondere Bedeutung kommt dabei den Kohlekraftwerken und Müllverbrennungsanlagen sowie auch den Kraftfahrzeugen zu. Nicht zu unterschätzen sind auch die durch Tabakrauch emittierten Mengen an PAHs, wo mehr als 150 verschiedene PAHs identifiziert werden konnten. Zahlreiche PAHs sind nachweislich karzinogen, da sie bei der Metabolisierung<sup>7</sup> im Körper epoxidiert (zu Epoxiden oxidiert) werden und diese Epoxide in einer nucleophilen<sup>8</sup>

<sup>7</sup> Metabolisierung bezeichnet in der Medizin den biochemischen Um- bzw. Abbau einer Substanz durch körpereigene Enzymsysteme. Das Ergebnis einer Metabolisierung ist ein chemisch veränderter Metabolit der Substanz.

<sup>8</sup> Als nucleophil werden Teilchen bzw. Atome bezeichnet, die von positiven Ladungen angezogen werden. Sie selbst sind negativ geladen oder negativ polarisiert und besitzen mindestens ein freies Elektronenpaar, mit dessen Hilfe sie mit positiv geladenen oder polarisierten Teilchen (Elektrophilen) reagieren können. Typische

Ringöffnungsreaktion mit der DNA reagieren können. Insbesondere Benzo[a]pyren (BaP) wird als äußerst potentes Kanzerogen beschrieben. Wegen der unterschiedlichen toxikologischen und physikalisch-chemischen Eigenschaften erfolgt eine Einteilung in niedermolekulare PAH (2–3 Ringe) und höhermolekulare PAH (4–6 Ringe) [97].

Auch wenn die PAH im Kollektiv als gefährlich eingestuft werden, sind nicht alle Vertreter toxisch. Da die Gruppe der PAH aus mehreren hundert verschiedenen Molekülen besteht, die sich in ihren Eigenschaften und ihrer Wirkung auf den Menschen unterscheiden, wird meist Benzo[a]pyren wegen seiner nachgewiesenen Kanzerogenität als Leitsubstanz ausgewählt (Tabelle 2).

Tabelle 2: Die 16 PAHs der US-EPA in der Liste der „Priority Pollutants“ bzw. andere Teilmengen [98]

PAH compound	No. of rings	USEPA 16 PAHs priority pollutants	IARC 6 PAHs probable/ possible human cancer.	Borneff 6 PAHs WHO resp. TVO	UN-ECE 4 PAHs emission inventories
(1) Naphtalene	2	+			
(2) Acenaphthylene	3	+			
(3) Acenaphthene	3	+			
(4) Fluorene	3	+			
(5) Phenanthrene	3	+			
(6) Anthracene	3	+			
(7) Fluoranthene	4	+		+	
(8) Pyrene	4	+			
(9) Benz[a]anthracene	4	+	+		
(10) Chrysene	4	+			
(11) Benzo[b]fluoranthene	5	+	+	+	+
(12) Benzo[k]fluoranthene	5	+	+	+	+
(13) Benzo[a]pyrene	5	+	+	+	+
(14) Indeno[1,2,3-cd]pyrene	6	+	+	+	+
(15) Dibenz[a,c,h]anthracene	5	+	+		
(16) Benzo[ghi]perylene	6	+		+	

### 2.2.5. Stickoxide (NO<sub>x</sub>)

Der Ausdruck Stickstoffoxide ist ein Sammelbegriff für die gasförmigen Oxide des Stickstoffs (N). Die aus verbrennungsmotorischer Sicht wichtigsten Vertreter dieser Gruppe sind Stickstoffmonoxid (NO), Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) und Lachgas (N<sub>2</sub>O). Stickoxide entstehen primär durch Oxidation von Stickstoff bei sehr hohen

Temperaturen. Im Motor entsteht überwiegend das Atem- und Reizgift NO, das in der Atmosphäre bei Sonnenlicht zu Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) oxidiert. Dieser Effekt führt in Straßennähe zu einem Anstieg der NO<sub>2</sub>-Konzentration. Bei Motoren mit katalytisch beschichteter Abgasnachbehandlung kann ein großer Anteil der NO-Rohemissionen zu NO<sub>2</sub> oxidiert werden. In der Emissionsgesetzgebung für Kfz wird für Grenzwertangaben die Summe aus NO und NO<sub>2</sub> als NO<sub>x</sub> limitiert. Es existiert emissionsseitig keine Limitierung des NO<sub>2</sub>-Anteiles an den gesamten Stickoxidemissionen (NO<sub>x</sub>). Da NO<sub>2</sub> im Immissionsschutzgesetz Luft limitiert ist, ist ein Anstieg der NO<sub>2</sub>-Rohemissionen unerwünscht [78], [88].

Bodennahes Ozon (O<sub>3</sub>) wird unter Einwirkung von Sonnenlicht aus Stickoxiden (NO<sub>x</sub>) und flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) gebildet. Auch Kohlenmonoxid (CO) fungiert als Ozonvorläufersubstanz. Aufgrund seiner chemischen Reaktionsträgheit in der Luft ist es für die Bildung bodennahen Ozons weniger bedeutend [89].

Die Stickstoffoxide gelten als außerordentlich giftig und schon in geringen Konzentrationen (200 ppm) unmittelbar lebensgefährlich. Die säurebildenden Eigenschaften von Stickstoffoxiden (ausgenommen N<sub>2</sub>O; insbesondere NO<sub>2</sub>) sind für den Menschen giftig und führen zur Reizung der Schleimhäuten. Bei langandauernder erhöhter NO<sub>2</sub>-Belastung werden Lunge, Milz, Leber und Blut beeinträchtigt [78], [99], [100].

Lachgas (N<sub>2</sub>O) zählt zu den Treibhausgasen und ist 310 Mal so wirksam wie CO<sub>2</sub> (Abbildung 4) [48].

### 3. Kraftstoffe

In diesem Kapitel werden Herstellung und Rohstoffe der verschiedenen alternativen Ottokraftstoffe beschrieben. Dann wird anhand von Kraftstoffanalysedaten, ergänzt durch Werte aus den entsprechenden Literaturquellen, auf die Eigenschaften von Bioethanol und Biogas im Vergleich zum Referenzkraftstoff Eurosuper ROZ95 eingegangen. Dabei wird der Einfluss von wesentlichen Kenngrößen (Dichte, Oktanzahl, Methanzahl, Dampfdruck, usw.) auf den motorischen Betrieb ausführlich behandelt.

#### 3.1. Herstellung

##### 3.1.1. Bioethanol

Bereits vor neun Jahrtausenden wusste man in China über den Prozess der Fermentierung Bescheid und stellte aus Reis, Honig und Früchten eine Art Wein her. Das stellt wohl den Ursprung der Herstellung von alkoholischen Produkten dar. Anfang des 20. Jahrhunderts wurde Alkohol aus Kartoffeln, Rüben und Mais hergestellt und mit Benzin oder Benzol zu einem Kraftstoff vermischt. Die Petrochemie, die ebenfalls zu dieser Zeit entstand, ermöglichte eine synthetische Herstellung von Ethanol aus Ethylen, welches in Raffinerien anfiel. Bis zur ersten Ölkrise 1973 wurde die fermentative Ethanolproduktion sehr stark von der synthetischen Herstellung aus Ethylen ersetzt, da der Rohstoff Öl billiger war [25].

Heutzutage dienen stärke-, zucker- und lignozellulosehaltige Rohstoffe als Basis für die Ethanolkraftstoffproduktion (Abbildung 15). Lignozellulose ist ein zentraler Bestandteil von agrarischen Produkten und Abfallstoffen wie Stroh oder sonstiges Halmgut, Energiepflanzen (z. B. Miscanthus), Blätter usw. und stellt sicherlich die kostengünstigste und am häufigsten vorkommende Biomasse dar. Derzeit erfolgt die Produktion von Biotreibstoffen in großtechnischem Maßstab aus Stärke- und Zuckerrohstoffen. Dabei müssen ca. 40 bis 70% der Produktionskosten für die Rohstoffe aufgewendet werden. Bei der Ethanolherstellung aus Mais werden nur 46% der Biomasse genutzt, die verbleibenden 54% in Form von Kolben, Stängel usw. erfahren derzeit keine Nutzung [101], [102].

Zucker- und stärkehaltige Rohstoffe	Lignozellulosehaltige Rohstoffe
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zuckerrohr</li> <li>- Zuckerhirse</li> <li>- Zuckerrüben</li> <li>- Weizen</li> <li>- Roggen</li> <li>- Triticale</li> <li>- Kartoffel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Holz (z. B. schnellwachsende Baumarten wie Pappeln und Weiden)</li> <li>- einjährige Grünpflanzen (Hanf oder Kenaf)</li> <li>- landwirtschaftliche Rückstände (Bagasse, Stroh, Hülsen oder Schalen)</li> <li>- kommunale Abfälle (Altpapier oder Holzreste).</li> </ul>

Abbildung 15: Rohstoffe für die Ethanolproduktion [22], [25]

In Tabelle 3 sind Vergleichsdaten für die unterschiedlichen Rohstoffe zur Gewinnung von Ethanol angeführt. Dabei zeigt sich, dass der Flächenertrag bzw. der Bruttokraftstofftertrag von zuckerhaltigen Rohstoffen am höchsten ist und sich die Zuckerrübe und das (brasilianische) Zuckerrohr diesbezüglich nur geringfügig voneinander unterscheiden.

Tabelle 3: Eigenschaften verschiedener Rohstoffe zur Ethanolgewinnung bezogen auf das Jahr 2007 [24], [103]

Rohstoffe	Biomasse	Kraftstoff	Energieertrag		Kraftstoffkosten	
	[t/ha]	[l/ha]	Brutto [GJ/ha]	Netto [GJ/ha]	[€/GJ]	[€/l] <sup>9</sup>
Getreide	7	2.531	55	52	0,55	0,84
Zuckerrübe	58	6.252	132	120	0,53	0,81
Zuckerrohr	73	6.381	135	116	0,20	0,31
Mais	9	3.740	79	40	0,34	0,52
Cassava	19	3.700	78	k.A.	0,40	0,61
Lignozellulose						
Stroh <sup>10</sup>	3	985	21	18	0,64	0,98
Restströme <sup>10</sup>	1	223	5	k.A.	0,67	1,03

Das Einsparungspotenzial an Primärenergie und somit von Kohlendioxid ist jedoch bei der Produktion über Zuckerrübe und Zuckerrohr wesentlich höher als bei Getreide, was anhand des Nettoenergieertrags zu erkennen ist. Dieser gibt die durch die Verwendung von Biokraftstoffen eingesparte nicht erneuerbare Energie an. Er ergibt sich aus der Differenz des ersetzten fossilen Kraftstoffes (plus Energieaufwand für die Erzeugung) und der in der Biokraftstoffproduktion eingesetzten Energie, wobei

<sup>9</sup> Preis je Liter Kraftstoffäquivalent

<sup>10</sup> Beim Rohstoffanbau für die Produktion von Bioethanol aus Lignozellulose fallen auf der Fläche zusätzlich Produkte an, die in der Nahrungsmittel- oder Ethanolproduktion verwendet werden können.

Kuppelprodukte wie Distillers Dried Grains with Solubles (DDGS) berücksichtigt und gutgeschrieben sind [24].

Die Energie- und Treibhausgasbilanz der Ethanolproduktion aus Zuckerrohr ist günstiger als die der Produktion aus Getreide und Zuckerrüben. Dies liegt an der Vorteilhaftigkeit des Zuckerrohrs als Rohstoff und am geringen Einsatz fossiler Energie in der Konversion, in der die anfallende Bagasse energetisch genutzt wird. Die Kosten der Treibhausgasvermeidung durch Bioethanol sind in Brasilien aufgrund der guten Treibhausgasbilanz und der geringen Produktionskosten negativ [24].

Das Aufkommen der Lignozellulose-Restbiomasse aus der Landwirtschaft hängt direkt – als ein sogenanntes Koppelprodukt – mit der Nahrungs- und Futtermittelproduktion zusammen. Beispielsweise wurden als Durchschnitt der letzten vier Jahre in Österreich auf einer Fläche von ca. 600.000ha Getreide verschiedener Sorten, wobei den größten Anteil Weizen und Gerste ausmachen, mit einem Ertrag von durchschnittlich 47,5 t/ha kultiviert. Der jährliche Getreideertrag (ohne Körnermais) lag bei 2,9 Mio.t/a. Die Aufzeichnungen zeigen einen durchschnittlichen Ertrag von 30,4 t/ha an Getreidestroh und damit eine ungefähre jährliche Getreidestrohernte von 1,8 Mio.t/a für Österreich. Aufgrund von Erfahrungen wird aber nur die Hälfte des Strohs als Streu, Raufutter oder Humusbildner gebraucht, das Überschussstroh könnte energetisch genutzt werden. Diese Lignozellulose-Restbiomasse ist als automatisches Koppelprodukt mit geringeren Anbau- und Erntekosten als z. B. speziell angebaute Energiepflanzen belastet und steht im Gegensatz zu den zucker- und stärkehaltigen Rohstoffen nicht in Konkurrenz zur Lebensmittelproduktion [104], [105], [106].

Die Herstellung von Ethanol aus lignozellulosehaltigen Rohstoffen ist weltweit von steigendem Interesse. Diese Rohstoffe sind mittel- bis langfristig besonders vielversprechend, weil sie einerseits in sehr großer Menge und andererseits im Vergleich zu bekannten stärke- bzw. zuckerhaltigen Rohstoffen (mit großer Wahrscheinlichkeit) zu wesentlich niedrigeren Einstandspreisen verfügbar sein könnten. Während die Gewinnung der Glukose, dem Ausgangsstoff für die Fermentation, bei zuckerhaltigen Rohstoffen einfach ist, erweist sich diese bei den stärkehaltigen als aufwändig und bei zellulosehaltigen als schwierig und daher

unterscheidet sich dieser Prozessschritt für die verschiedenen Ausgangsrohstoffe deutlich (Abbildung 16). Bislang bestehen noch erhebliche technische Schwierigkeiten, Ethanol auf dem Wege der Fermentation aus zellulosehaltigen Rohstoffen zu gewinnen. Dieser Prozess ist somit derzeit noch nicht industriell nutzbar sondern Forschungsthema. Die Problemfelder bei der Erzeugung von Ethanol auf Basis von lignozellulosehaltigen Rohstoffen sind die bisher noch deutlich zu hohen Konversionskosten um entsprechend wirtschaftlich produzieren zu können und außerdem die ungelöste Probleme bei der Handhabung des Abwassers [22], [107], [108], [109].

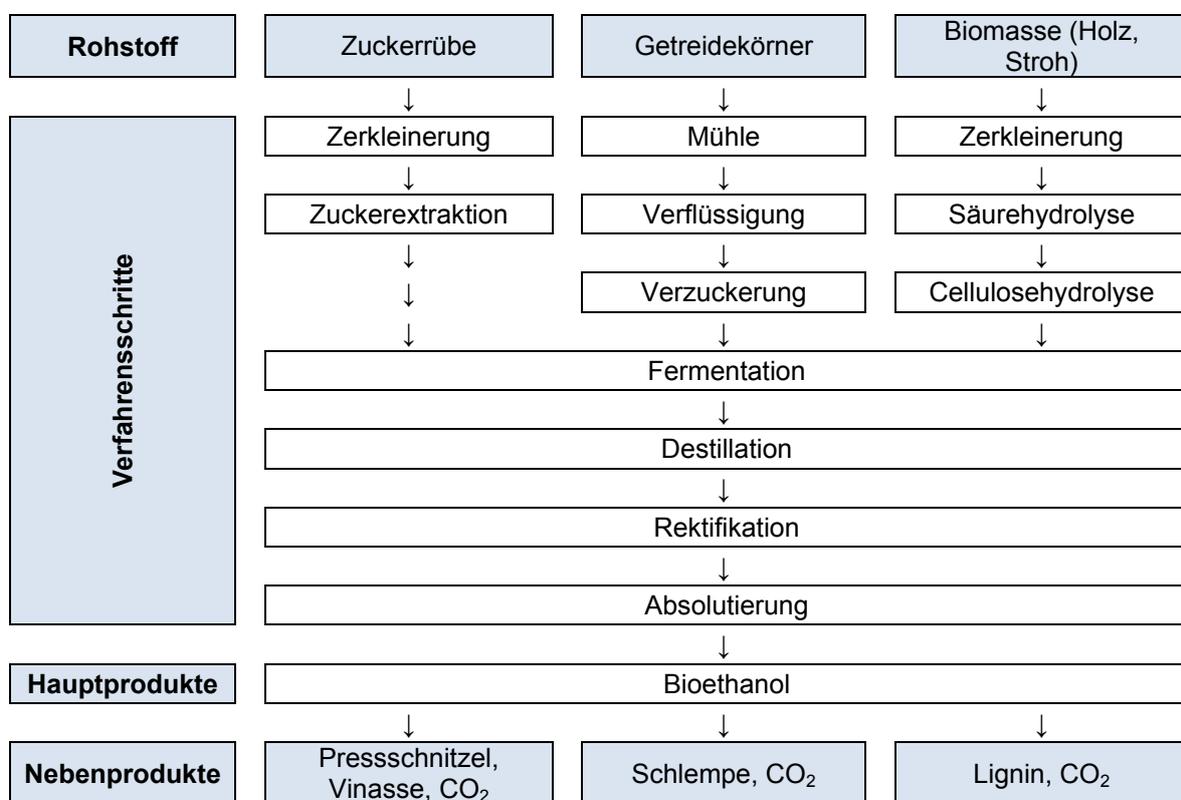


Abbildung 16: Vereinfachtes Schema der Ethanolherstellung mit unterschiedlichen Rohstoffen [17], [110], [111]

Bei der Zuckerrübe werden die Zellen für die Extraktion mit mechanischen und thermischen Verfahren aufgeschlossen. Dabei wird der in der Wurzel gespeicherte Zucker mit Wasserdampf herausgelöst. Bei den Getreidearten kommt es nach Schrotung der Körner zu einer Verflüssigung mit Enzymen, in der der Abbau von hochmolekularer Stärke erfolgt und anschließend zu einer Verzuckerung.

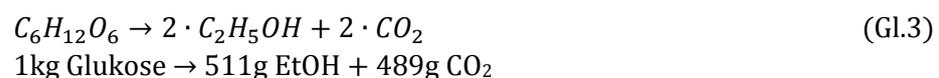
Für die zellulosehaltigen Ausgangsstoffe kann nach dem sehr feinen Vermahlen der Aufschluss bzw. die Hydrolyse der Zellulose grundsätzlich auf drei verschiedenen Wegen erfolgen:

- *konzentrierter Säureaufschluss*
- *verdünnter Säureaufschluss*
- *enzymatischer Aufschluss*

Konzentrierter und verdünnter Säureaufschluss sind relativ alte und bekannte Verfahren zur Verarbeitung von Lignin und Zellulose innerhalb der Holzverarbeitenden Industrie. Dabei wird Schwefelsäure oder Salzsäure, seltener auch Fluorwasserstoff, verwendet. Bei der konzentrierten Säurehydrolyse wird häufig zweistufig verfahren, wobei die Zellulose im ersten Schritt durch konzentrierte Schwefelsäure und im zweiten Schritt durch verdünnte Säurehydrolyse aufgeschlossen wird. Ein kritischer Punkt im Prozess ist dabei die Trennung der Zucker von der sauren Mutterlauge sowie die Säurerückgewinnung und Aufkonzentration der recycelten Säure. Die neueren Forschungen gehen eher in die Richtung eines enzymatischen Zelluloseaufschlusses. Allerdings sind bis heute keine Verfahren mit befriedigenden wirtschaftlichen Ergebnissen ohne vorherige Säurebehandlung bekannt. Das liegt hauptsächlich daran, dass die für die Zerlegung der Zelluloseketten notwendigen Enzyme sich selbst durch ihre Reaktionsprodukte hemmen [22].

Durch die Enzyme von Mikroorganismen und Hefen kommt es bei der alkoholischen Gärung zur Umsetzung von Glukose in Alkohol und Kohlendioxid nach Formel (Gl.3). Bei diesem exothermen Vorgang werden je Mol Ethanol 117,5 kJ/mol Energie freigesetzt [22], [112].

Aus 1kg Glukose entstehen ca. 0,5 kg Ethanol und 0,5 kg CO<sub>2</sub>:



Durch die konventionelle Gärung (Fermentation) erhält man maximal eine Lösung von 18% Ethanol im Wasser, bei höheren Konzentrationen geht die Hefe zugrunde. Mittlerweile ist es jedoch gelungen mit gentechnischen Mitteln Hefe- und

Bakterienstämme zu erzeugen, die auch noch bei einer wesentlich höheren Ethanolkonzentration stabil bleiben und somit kann der Energieaufwand für das Destillieren reduziert werden [113].

Bei der anschließenden Destillation kommt es zu einer thermischen Abtrennung und der Alkohol erreicht eine Konzentration von 82% bis 87%. Mit einem weiteren Reinigungsprozess, der Rektifikation, wird der Alkohol von Begleitstoffen befreit und erlangt eine Konzentration von 96%. Höhere Konzentrationen sind durch atmosphärische Destillations-/ Rektifikationsverfahren nicht zu erreichen. Durch die abschließende Absolutierung wird der Wassergehalt weiter verringert und das Ethanol bis zu 99,9% aufkonzentriert. Dies ist destillativ nicht ohne Zusätze möglich und erfolgt mittels verschiedener Verfahren (Abbildung 17) [114].

ABSOLUTIERUNG	<b>1</b>	<b>Schleppmittelverfahren</b>
		- Dem Ethanol wird ein weiterer Stoff zugegeben und so entsteht ein Drei-Stoff-Gemisch, das destillativ zu trennen ist [115].
	<b>2</b>	<b>Membran-Verfahren</b> (Pervaporation)
		- Unter Pervaporation wird die Verdampfung durch eine Membran verstanden.
<b>3</b>	<b>Molekularsiebverfahren</b>	
		- Ethanol wird im dampfförmigen Zustand komprimiert und durch das Molekularsiebbett gedrückt, wo sich die Wassermoleküle in den Poren durch Adsorption anlagern während die Ethanolmoleküle ungehindert durchgehen.

Abbildung 17: Entwässerung des Ethanols – Absolutierungsverfahren [22], [116]

Während der Alkoholgewinnung fallen außer dem Kohlendioxid je nach Art des Rohstoffes weitere Nebenprodukte an, die ebenfalls einer weiteren Verwendung zugeführt werden können (Abbildung 18):

Rohstoff	Nebenprodukte und Verwendung
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zuckerrübe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pressschnitzel aus dem Zerkleinerungsprozess als Futtermittel verwendbar;</li> <li>- Vinasse aus dem Destilationsprozess ist als Futter- und Düngemittel einsetzbar;</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Getreideproduktion</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Schlempe bezeichnet alle Inhaltsstoffe des Rohstoffes außer Zucker oder Stärke;</li> <li>- im flüssigen Zustand als Dünger oder innerhalb von wenigen Tagen als Futter verwendbar;</li> <li>- um das mögliche Futtermittel länger haltbar zu machen, wird die Schlempe sehr oft energieintensiv zu proteinreichem DDGS getrocknet und pelletiert;</li> <li>- besteht keine Möglichkeit zur Schlempeverfütterung, kann die eingedickte Schlempe verbrannt werden, wodurch zumindest der Prozessenergiebedarf der Schlempeindampfung abgedeckt wird;</li> </ul>

Abbildung 18: Verwendung der Nebenprodukte [24]

Der Weg der Verbrennung der Nebenprodukte bietet sich für Verfahren auf Basis zellulosehaltiger Rohstoffe an. Die nicht aufgeschlossene Zellulose, Lignin und ungelöste Reststoffe aus den Hydrolysereaktoren werden aus dem Produktstrom entfernt und zum Zwecke der Erzeugung von Prozesswärme gemeinsam mit der Schlempe verbrannt. Dadurch können Effizienz der Produktionsanlagen und die CO<sub>2</sub>-Bilanz verbessert werden [24].

### 3.1.2. Biogas

Aus organischer Masse entsteht durch Vergärung in einem biologischen Prozess unter Abschluss von Sauerstoff (anaerobe Fermentation) ein Gasgemisch, das sogenannte Biogas. Dieser in der Natur weit verbreitete Prozess findet beispielsweise in Mooren, auf dem Grund von Seen, in der Güllegrube sowie im Pansen von Wiederkäuern statt. Hierbei wird die organische Masse fast vollständig zu Biogas umgewandelt und es entstehen nur geringe Mengen an neuer Biomasse oder Wärme [117].

Um den Entstehungsprozess des Biogases (Abbildung 19) deutlich zu machen, kann dieser in mehrere Teilschritte unterteilt werden [118], [119], [120], [121].

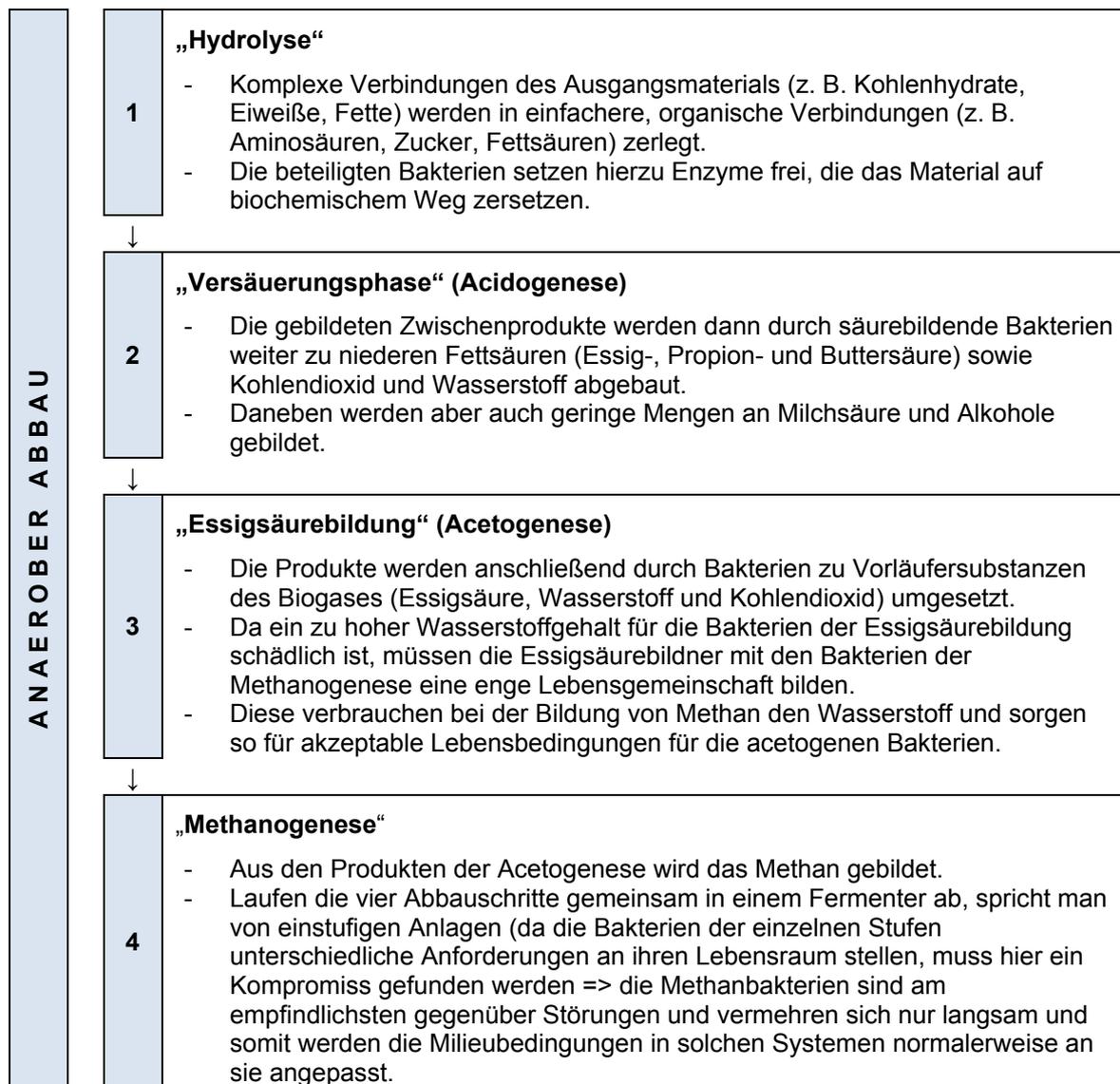


Abbildung 19: Schematische Darstellung des anaeroben Abbaus [117]

Das gebildete Gasmisch besteht zu ca. zwei Dritteln aus Methan ( $\text{CH}_4$ ) und ca. einem Drittel aus Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ). Die Abtrennung von Kohlendioxid aus dem Biogas – auch als Methananreicherung bezeichnet – stellt den wesentlichsten Aufbereitungsschritt für die Nutzung von Biogas als Erdgassubstitut bzw. als Kraftstoff dar. Hierfür bieten sich mehrere Verfahren an [9], [117], [41], [122].

Typische Varianten für die Erzeugung von Biogas durch anaerobe Fermentation zeigt Abbildung 20 [123].

Kriterium	Unterscheidungsmerkmale
<ul style="list-style-type: none"> <li>Anzahl der Prozessstufen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- einstufig</li> <li>- zweistufig</li> <li>- mehrstufig</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Prozesstemperatur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- psychrophil (bis ca. 25°C)</li> <li>- mesophil (zwischen 32 und 42°C)</li> <li>- thermophil (ab ca. 55°C)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Art der Beschickung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- diskontinuierlich</li> <li>- quasikontinuierlich</li> <li>- kontinuierlich</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Trockensubstanzgehalt der Substrate</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nassvergärung</li> <li>- Trockenvergärung</li> </ul>

Abbildung 20: Einteilung der Verfahren zur Biogaserzeugung nach verschiedenen Varianten [123], [124], [125], [126]

Daneben befinden sich im Biogas noch geringe Mengen an Wasserstoff, Schwefelwasserstoff, Ammoniak und anderen Spurengasen. Interessant für den Betreiber einer Biogasanlage ist in erster Linie der Methangehalt, also der prozentuale Anteil des Methans am Gasgemisch, da hieraus die zu gewinnende Energie resultiert. Es kann zwar die Zusammensetzung des Biogases nur begrenzt beeinflusst werden, jedoch hängt der Gehalt von Methan im Biogas von mehreren Faktoren wie Wassergehalt des Substrates, Gärtemperatur, Verweilzeit sowie Substrataufbereitung und dem Grad des Substratsaufschlusses ab [118].

Auch die Zusammensetzung des eingesetzten Substrates (Anteil an Fetten, Proteinen bzw. Kohlenhydraten) bestimmt die Ausbeute an Methan dabei wesentlich. Hierbei nimmt die spezifische Methanausbeute der eben genannten Stoffgruppen in dieser Reihenfolge ab. Bezogen auf die Masse lässt sich mit Fetten also eine höhere Methanausbeute erreichen als mit Kohlenhydraten. Im Hinblick auf die Reinheit des Gasgemisches ist die Konzentration des Spurengases Schwefelwasserstoff (H<sub>2</sub>S) wichtig. Diese sollte nicht zu hoch sein, da Schwefelwasserstoff schon in geringen Konzentrationen hemmend auf den Abbauprozess wirkt [118].

Welche verfahrenstechnische Ausrüstung für die Anlage gewählt wird, ist in erster Linie von den zur Verfügung stehenden Substraten abhängig. Die Menge der

Substrate bestimmt die Dimensionierung aller Aggregate und der Behältervolumina. Die Qualität der Substrate (Trockensubstanz-Gehalt, Struktur, Herkunft usw.) bestimmt die Auslegung der Verfahrenstechnik. Grundsätzlich können landwirtschaftliche Biogasanlagen unabhängig von der Betriebsweise in vier verschiedene Verfahrensschritte (Abbildung 21) unterteilt werden [123].

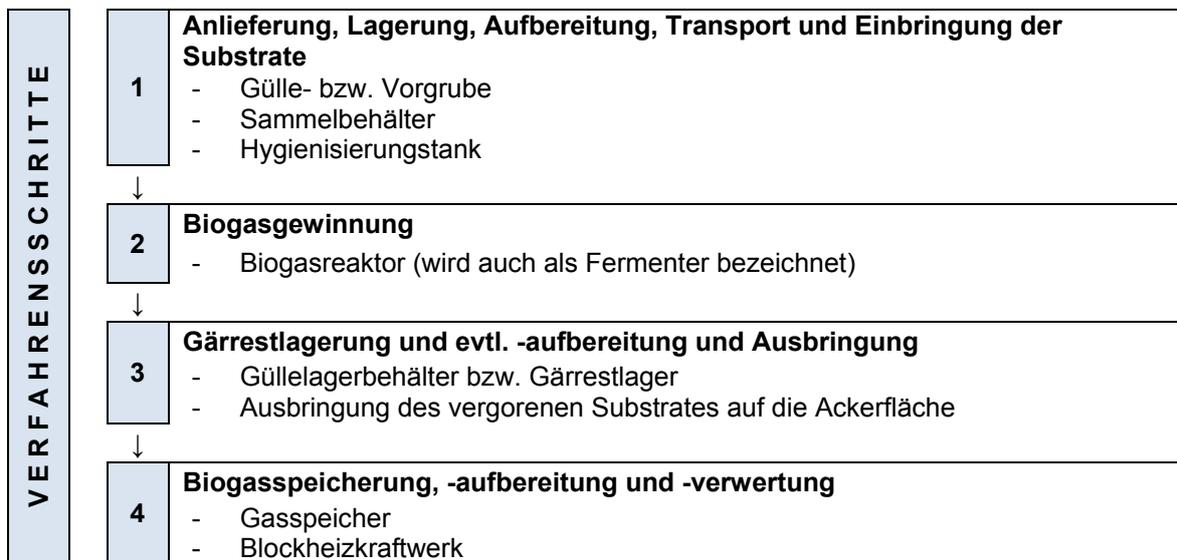


Abbildung 21: Verfahrensschritte einer landwirtschaftlichen Biogasanlage [123]

In Tabelle 4 sind die mögliche Herkunft der Substrate, die Biogasausbeute und der Methangehalt angeführt. Die in diesem Kapitel aufgeführten Stoffdaten stellen keine absoluten Werte dar, weil die Substrate jährlichen Qualitätsschwankungen unterliegen. Außerdem wird hier nur ein Auszug aus der Bandbreite der möglichen Substrate beschrieben [127], [128].

Tabelle 4: Übersicht – Biogasertrag verschiedener Substrate [117]

Substrat	Biogasertrag		CH <sub>4</sub> -Gehalt [Vol.-%]
	[m <sup>3</sup> /t FM] <sup>11</sup>	[m <sup>3</sup> /t oTS] <sup>12</sup>	
<b>Wirtschaftsdünger</b>			
Rindergülle	20-30	200-500	60
Schweinegülle	20-35	300-700	60-70
Rindermist	40-50	210-300	60
Schweinemist	55-65	270-450	60
Hühnermist	70-90	250-450	60
<b>Nachwachsende Rohstoffe</b>			
Maissilage	170-200	450-700	50-55
Roggen-Ganzpflanzensilage	170-220	550-680	ca. 55
Zuckerrübe	170-180	800-860	53-54
Masserübe	75-100	620-850	53-54
Gehaltsrübe	75-100	620-850	53-54
Rübenblatt	ca. 70	550-600	54-55
Grassilage	170-200	550-620	54-55
<b>Substrate der weiterverarbeitenden Industrie</b>			
Biertreber	105-130	580-750	59-60
Getreideschlempe	30-50	430-700	58-65
Kartoffelschlempe	36-42	400-700	58-65
Obstschlempe	10-20	300-650	58-65
Pülpe (frisch)	80-90	650-750	52-65
Fruchtwasser	50-56	1500-2000	50-60
Prozesswasser	55-65	3000-4500	50-60
Pressschnitzel	60-75	250-350	70-75
Melasse	290-340	360-460	70-75
Apfeltrester	145-150	660-680	65-70
Obsttrester	250-280	590-660	65-70
Rebentrester	250-270	640-690	65-70
<b>Organische Reststoffe/Schlachtrückstände</b>			
Biotonne	80-120	150-600	58-65
Speisereste und überlagerte Lebensmittel	50-480	200-500	45-61
Marktabfälle	45-110	400-600	60-65
Fett aus Fettabscheidern	11-450	ca. 700	60-72
Mageninhalt (Schwein)	20-60	250-450	60-70
Panseninhalt	20-60	200-400	58-62
Flotatschlamm	35-280	900-1200	60-72
<b>Grün- und Schnitt</b>			
Grünschnitt	150-200	550-680	55-65

<sup>11</sup> Frischmasse (FM): Masse des gewogenen Ertrags von land- und forstwirtschaftliche Erzeugnisse

<sup>12</sup> Organische Trockensubstanz (oTS): Anteil der organischen Bestandteile eines Stoffes, nach vollständigem Wasserentzug

## 3.2. Stoffeigenschaften

### 3.2.1. Bioethanol

Handelsübliche Ottokraftstoffe bestehen aus einer Vielzahl von Kohlenwasserstoffen, die als Grundbenzin in Raffinerien mittels verschiedener Verarbeitungsverfahren aus Erdöl der verschiedensten Provenienzen gewonnen werden. Daneben enthalten sie geringe Mengen von anderen organischen Verbindungen und Additive. Die genaue Zusammensetzung ist also orts-, hersteller-, saison- und auch chargenabhängig. Im Gegensatz zu Benzin handelt es sich bei Ethanol ( $C_2H_5OH$ ) um einen reinen Stoff mit einer chemischen Verbindung. Dieser Stoff besteht – wie alle Alkohole – neben den Kohlenwasserstoffatomen aus einer Hydroxylgruppe (OH-Gruppe), die dessen Eigenschaften entscheidend bestimmt. Die nachfolgende Tabelle 5 zeigt eine Zusammenstellung der wichtigsten Stoffeigenschaften von Ethanol im Vergleich zu herkömmlichem Ottokraftstoff [20], [129].

Tabelle 5: Stoffeigenschaften von Benzin und Ethanol [30], [130]

	Einheit	Benzin ROZ95	Ethanol
Dampfdruck bei 38°C	kPa	45-60 (Sommer) 60-90 (Winter)	16
Dichte	kg/m <sup>3</sup>	742,0	788,0
Flammpunkt	°C	-45	11
Mittlere Molmasse	kg/mol	~ 98	46,1
Heizwert (gravimetrisch)	MJ/kg	42,6	26,9
Heizwert (volumetrisch)	MJ/l	31,6	21,2
Gemischheizwert (gemischsaugend)	MJ/m <sup>3</sup>	3,5	3,4
Gemischheizwert (luftsaugend)	MJ/m <sup>3</sup>	3,6	3,6
Masseanteil Kohlenstoff C	%M	86,4	52,1
Masseanteil Wasserstoff H	%M	13,1	13,1
Masseanteil Sauerstoff O	%M	0,5	34,8
Research Oktanzahl	ROZ	95,3	111,0
Motor Oktanzahl	MOZ	84,4	94,0
Siedetemperatur	°C	30-195	78,3
Stöchiometrischer Luftbedarf	kg/kg	14,3	8,9
Verdampfungswärme bei 1,013bar	kJ/kg	380-500	904
Viskosität	μ Pa·s	0,42	1,2
Wasserlöslichkeit bei 20°C	Vol.-%	vernachl.	100
Zündgrenze obere/untere	λ	0,4 / 1,4	0,3 / 2,1
Zündtemperatur	°C	200-300	420

- *Dichte*

Dichte von reinem Ethanol ist im Vergleich zum Bezugskraftstoff (ROZ95) um ca. 6% (Tabelle 5) höher. In Abbildung 22 sind die Analysedaten verschiedener Versuchskraftstoffe angeführt.

	Einheit	ROZ95	E5	E10	E65	E75	E85
Dichte (S)	kg/m <sup>3</sup>	753,2	753,8	757,8	778,7	783,0	787,4
Dichte (W)	kg/m <sup>3</sup>	737,5	743,7	746,1	777,0	785,1	786,5

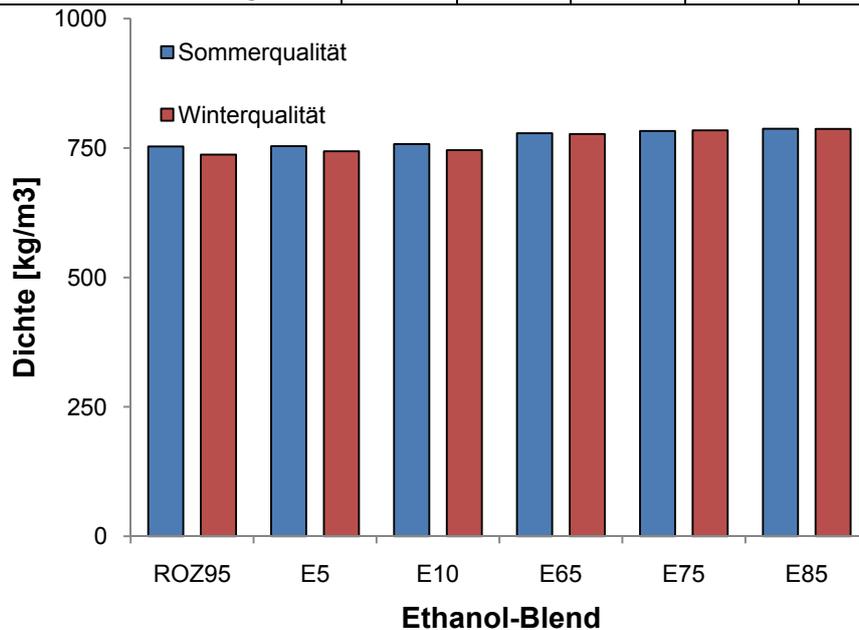


Abbildung 22: Dichte verschiedener Versuchskraftstoffe [131]

- *Oktanzahl*

Eine wichtige Eigenschaft der Ethanol-Blends ist die mit zunehmendem Ethanolanteil steigende Oktanzahl. Ethanol besitzt zufolge des kompakten Molekularaufbaus eine Research-Oktananzahl (ROZ) von etwa 111 und einer Motor-Oktananzahl (MOZ) von ca. 94, welche deutlich über den handelsüblichen Ottokraftstoffen liegt. Bei Kraftstoffen mit niedrigem Ethanolanteil ist allerdings darauf zu achten, dass kein Wasser enthalten ist. Schon bei E5-Kraftstoff wurde festgestellt, dass bei Vorhandensein von 1% Wasser 30-40% des Ethanols aus der Kraftstoff- in eine separate Wasserphase übergehen. Daraus ergibt sich ein Oktanzahlverlust für die ROZ von etwa 1. Bei einer Erhöhung der Wasserphase auf 5% gehen bereits 65-78% Ethanol in die Wasserphase über und die ROZ senkt sich um bis zu 2 Einheiten ab [132], [133].

Kraftstoffe, die eine geringe Zündwilligkeit und damit eine höhere Klopfestigkeit besitzen, führen bei entsprechender Motorsteuerungsapplikation sowie bei einer entsprechenden Abstimmung zu einer höheren Leistung an der Vollast. Die höhere Klopfestigkeit von Ethanolkraftstoffen gegenüber Benzin wirkt sich auch zusätzlich positiv aus, da die Motoren in Bereichen besseren Wirkungsgrades betrieben werden. In Abbildung 23 sind die Analysen für die beiden Oktanzahlen für verschiedene Versuchskraftstoffe angeführt. Dabei steigt die MOZ nicht in der gleichen Größenordnung wie die ROZ mit zunehmendem Ethanolanteil an [29], [134].

	Einheit	ROZ95	E5	E10	E65	E75	E85
Research Oktanzahl (S)	ROZ	95,9	97,4	98,7	106,8	106,8	107,2
Research Oktanzahl (W)	ROZ	96,2	97,3	98,6	106,7	106,8	106,8
Motor Oktanzahl (S)	MOZ	85,4	86,2	86,7	88,5	89,9	89,1
Motor Oktanzahl (W)	MOZ	85,4	85,8	86,5	89,3	89,3	89,4

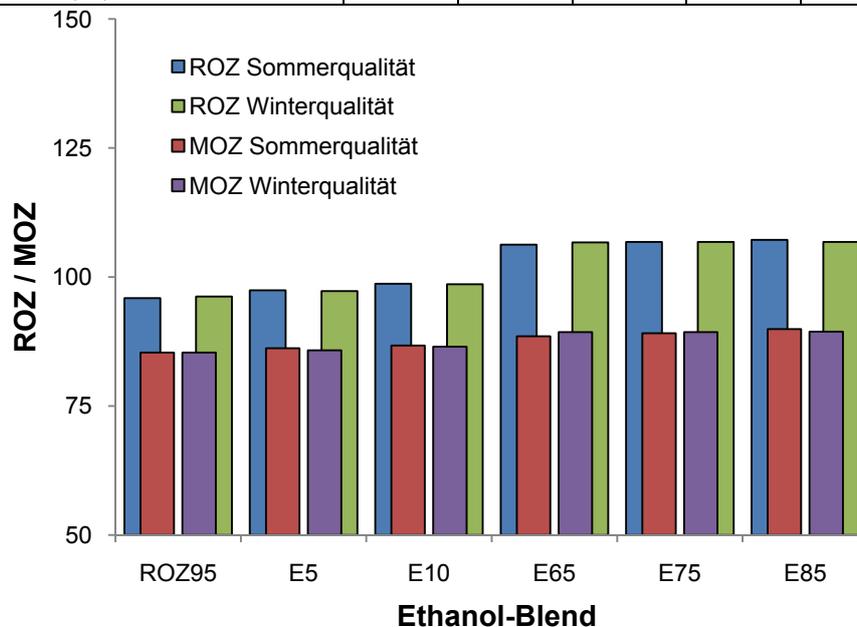


Abbildung 23: Oktanzahlen verschiedener Versuchskraftstoffe [131]

Die Differenz von ROZ und MOZ wird als die sogenannte Sensitivität bezeichnet. Je empfindlicher Kraftstoffe gegenüber thermischer Beanspruchung sind, umso größer ist auch die Sensitivität. Sie hängt stark von der chemischen Zusammensetzung der Kraftstoffe ab. Diese beträgt bei ROZ95 ca. 10 Oktanzahlen (ROZ=95,3 / MOZ=85,4) während sie sich bei E85 die ROZ und die MOZ um ca. 16 Einheiten (ROZ=108,2 / MOZ=92,2) unterscheiden [135].

In Untersuchungen wurde festgestellt, dass in modernen aufgeladenen Ottomotoren die eingesetzten Kraftstoffe mit kleiner werdender Motor-Oktananzahl – bei vorgegebener Research-Oktananzahl – einen niedrigeren Energieaufwand im Motorprozess ergeben. Die Lage des 50%-Umsatzpunktes wandert also bei sinkender Sensitivität weg vom thermodynamischen Optimum. Bei Vollastbetriebspunkten im Saugbetrieb ist diese Tendenz nicht zu beobachten [136].

Aus den Veröffentlichungen der letzten Jahre geht somit hervor, dass sich das Klopfverhalten heutiger Ottomotoren mit Aufladung und Kraftstoffdirekteinspritzung von jenem mit Vergasern früherer Jahre unterscheidet. Ein weiterer Aspekt zukünftiger Ottokraftstoffe mit biogenem Anteil ist die kühlende Wirkung (durch Verdampfung) des Alkohols auf die Zylinderladung und dadurch resultierendes vermindertes Klopfverhalten [137], [138], [139].

- *Dampfdruck*

Der Dampfdruck resultiert aus den Kraftstoffkomponenten, die bei einer definierten Temperatur in einem geschlossenen Behälter aus der Flüssigphase in die Dampfphase übergehen. Der Kraftstoffdampfdruck beeinflusst, teilweise in Kombination mit anderen Kraftstoff-Flüchtigkeitskriterien, Kalt- und Heißstartverhalten des Motors, besonders das Kaltfahrverhalten bei niedrigen Temperaturen und die Verdampfungsverluste.

In der Kraftstoffnorm DIN EN 228 [140] ist unter anderem der Dampfdruck eine entscheidende Größe. Diese ist entsprechend der Jahreszeit als Sommer- bzw. Winterqualität nach oben limitiert (siehe Tabelle 6):

Tabelle 6: Sommer-/Winterottokraftstoff nach DIN EN 228

	Einheiten	Grenzwerte	
		Klasse A (Sommer)	Klasse D/D1 (Winter)
Dampfdruck (VP)	kPa, min.	45	60
	kPa, max.	60	90

- *Sommerqualität (Klasse A):*

Der Grenzwert für den Dampfdruck beträgt im Sommer 60kPa, um auch bei extremen Fahrzuständen in Mittelgebirgslagen im Hochsommer Störungen zu verhindern. Solche Fahrzustände können z. B. durch Dampfblasenbildung im Kraftstoffsystem den ruhigen Motorlauf beeinträchtigen.

- *Winterqualität (Klasse D/D1):*

Im Winter wird diese Schwelle auf max. 90kPa angehoben und zudem die Flüchtigkeit des Ottokraftstoffs den niedrigen Temperaturen angepasst. Der höhere Dampfdruck kombiniert mit einer niedrigeren Siedelage gegenüber der Sommerqualität erleichtern das Starten und Warmlaufen des Motors.

Der Dampfdruck von Alkoholen ist im Vergleich zu Benzin sehr niedrig. Das ist auf die Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den OH-Gruppen der Alkohole zurückzuführen. Diese Bindungen verkoppeln die Alkoholmoleküle miteinander zu größeren Einheiten und erschweren die Verdampfung, weil diese Brücken vor dem Übergang von der flüssigen in die gasförmige Phase gelöst werden müssen. Dies führt bei reinem Ethanol zu einer negativen Beeinflussung des Startverhaltens und einer minimalen Kaltstarttemperatur von etwa 10-15°C (Abbildung 24) [129], [134].

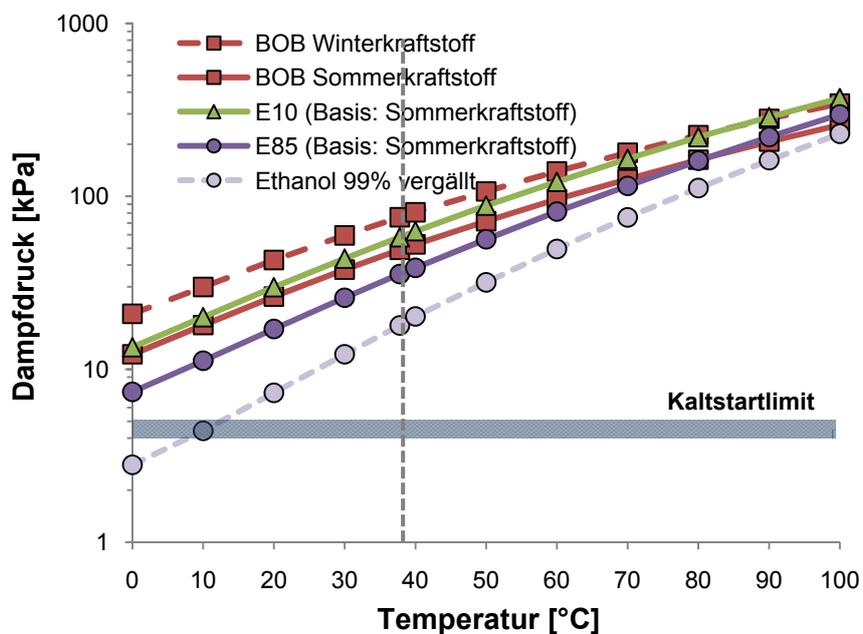


Abbildung 24: Dampfdruck in Abhängigkeit von der Temperatur [131]

Der gezeigte Basestock for Oxygenates Blending (BOB) ist eine Superbenzinbasis, die für die nachträgliche Zumischung von Ethanol optimiert ist und nicht den Anforderungen der DIN EN 228 [140] entsprechen muss. Es muss jedoch sichergestellt sein, dass durch die nachträgliche Zugabe von Ethanol ein spezifikationsgerechtes Produkt entsteht. Im optimierten Fall sind bei einem BOB der Dampfdruck und die Oktanzahl soweit abgesenkt, dass durch die geplante Ethanolzumischung die Dampfdruckgrenzen nicht überschritten und die Mindestoktanzahlen eingehalten werden [131].

Bei der Zumischung von Ethanol zu Benzin wird nämlich der Dampfdruck des Mischkraftstoffes durch den niedrigen Wert von reinem Ethanol (16kPa) herabgesetzt. Eine Ausnahme stellen die sogenannte Dampfdruckanomalie bei niedrigen Beimischraten bis ca. 10% Ethanolanteil dar (Abbildung 25).

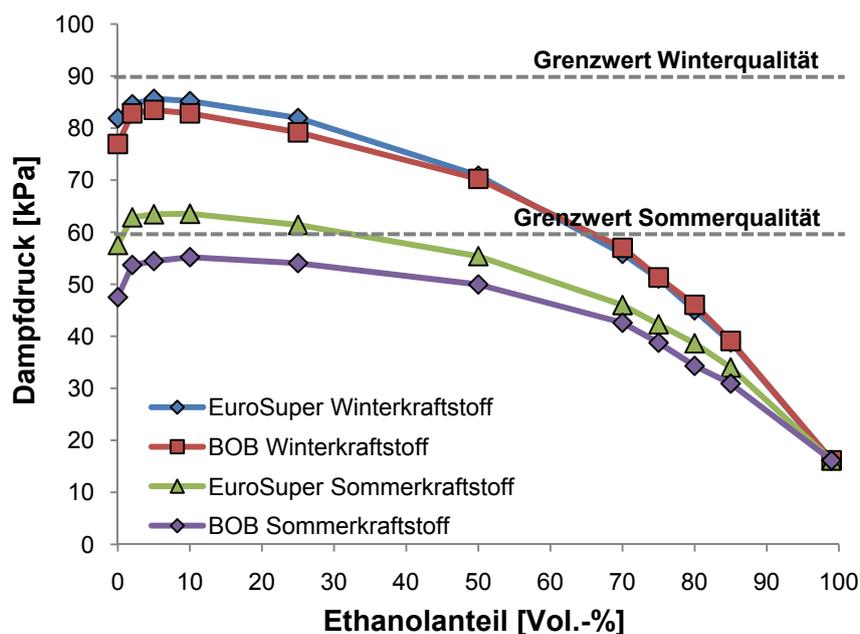


Abbildung 25: Dampfdruck von Kraftstoffmischungen bei Variation des Ethanolanteils [131]

Dies bedeutet, dass sich der Dampfdruck des Gemisches nicht einem dem Mischungsverhältnis entsprechenden Mittelwert annähert, sondern sogar leicht ansteigt. Um trotzdem die Dampfdruckgrenzwerte für Sommer- bzw. Winterqualität zu erfüllen, ist die Benzinbasis für die Herstellung der E5- bzw. E10-

Kraftstoffmischungen mit einem entsprechenden Dampfdruckvorhaltewert<sup>13</sup> versehen. ROZ95 ist in weiterer Folge die Bezeichnung für den Referenzkraftstoff, der einem ethanolfreien Eurosuper Ottokraftstoff in Sommer- bzw. Winterqualität (BOB Sommer / Winter) entspricht.

Bei der Herstellung von E85 ist die Dampfdruckanomalie kein Thema, da sich bei höheren Mischungsverhältnissen der Dampfdruck annähernd linear entsprechend den Anteilen der Komponenten ändert. Hier muss eher darauf geachtet werden, dass der Dampfdruck der Benzinbasis hoch genug ist, um in der Mischung mit Ethanol den geforderten Mindestdampfdruck für E85 (entsprechend den Anforderungen in ÖNORM EN 15293 [141]) zu erreichen.

In Abbildung 26 sind die Analysen für den Dampfdruck verschiedener Versuchskraftstoffe angeführt. Die schon zuvor beschriebene Dampfdruckanomalie wird bei geringen Beimischungsraten von Ethanol dabei deutlich sichtbar.

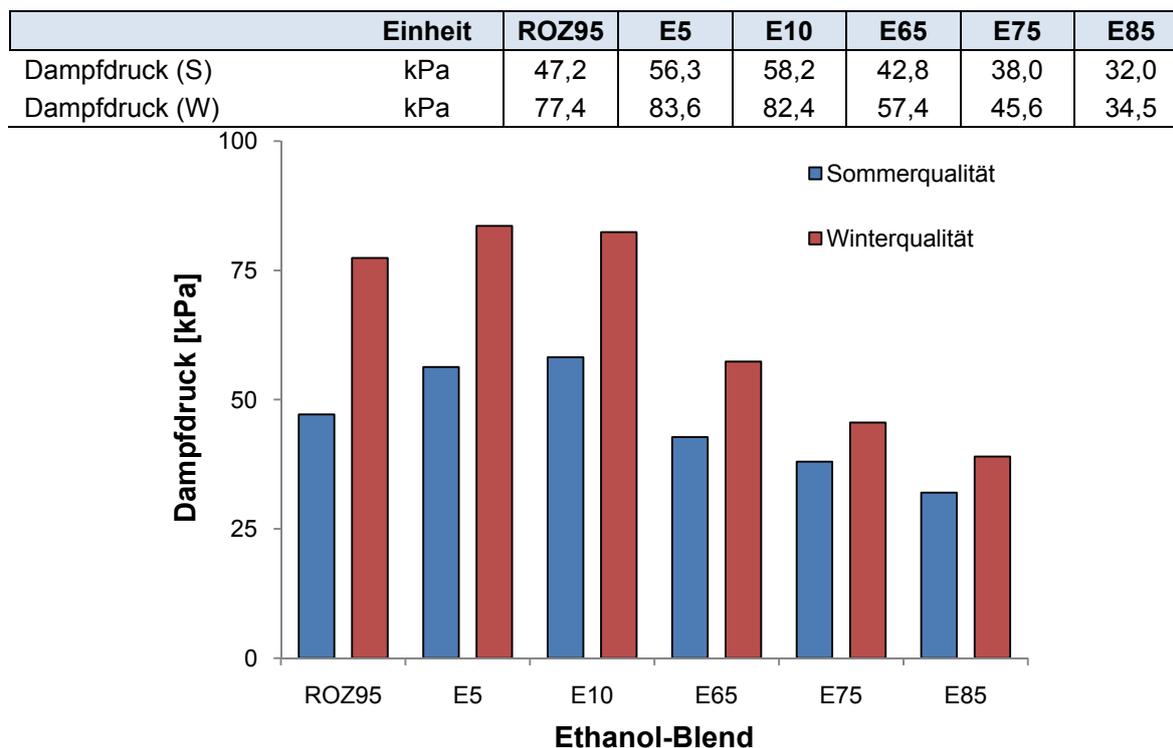


Abbildung 26: Dampfdruck der Versuchskraftstoffe [131]

<sup>13</sup> Basis des Dampfdruckvorhaltewerts für die Herstellung von E5 ist die Dampfdruckanomalie. Entsprechend den Erfahrungen kann es, je nach Ottokraftstoff-Basisqualität bei einer Ethanolanteil von 5 Vol.-% zu einer Erhöhung des Dampfdrucks um mehr als 6kPa kommen.

- *Siedeverhalten*

Benzin weist durch die stoffliche Zusammensetzung von leicht- und schwerflüchtigen Kohlenwasserstoffen bekanntlich einen Siedeverlauf auf. Da Ethanol ein Reinstoff mit einem Siedepunkt ist, bildet der Mischkraftstoff aus Benzin und Ethanol bei höheren Ethanolanteilen ein ausgeprägtes Zwischenplateau aus. Dies ist in Abbildung 27 deutlich zu erkennen.

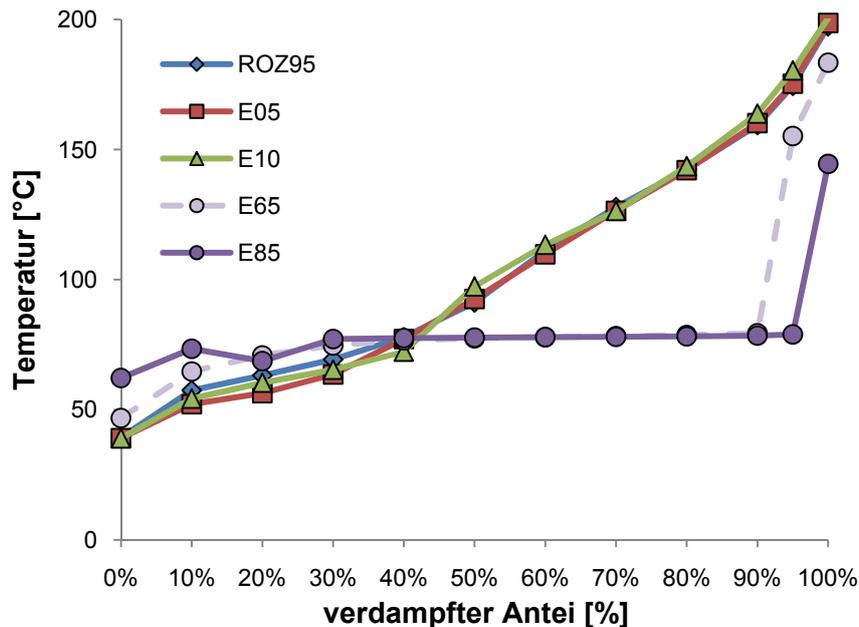


Abbildung 27: Siedeverlauf der Versuchskraftstoffe [131]

- *Kohlenstoff/Wasserstoff-Verhältnis und Heizwert*

Ethanol zeichnet sich im Vergleich zu Benzin durch einen deutlich niedrigeren Kohlenstoff-Anteil zugunsten eines im gleichen Maße erhöhten Sauerstoff-Anteils aus (Abbildung 28). Im Falle des analysierten Ethanols (Tabelle 5) ist das C/H-Verhältnis von 3,98 deutlich geringer als jenes von dem ROZ95-Kraftstoff mit einem C/H-Verhältnis von 6,67. Der Wasserstoffgehalt von Ethanol ist weitgehend gleich wie der von Benzin.

Daraus ergibt sich einerseits ein geringerer Heizwert (Abbildung 29), andererseits ergibt sich aufgrund des hohen Anteiles gebundenen Sauerstoffs ein geringerer stöchiometrischer Luftbedarf von Ethanol (Kapitel 3.3.1).

	Einheit	ROZ95	E5	E10	E65	E75	E85
Kohlenstoffgehalt (S)	%M	86,4	85,6	82,5	63,8	60,5	57,0
Wasserstoffgehalt (S)	%M	13,1	12,7	12,5	13,4	13,7	13,1
Sauerstoffgehalt (S)	%M	0,5	1,7	5,0	22,8	25,8	29,9

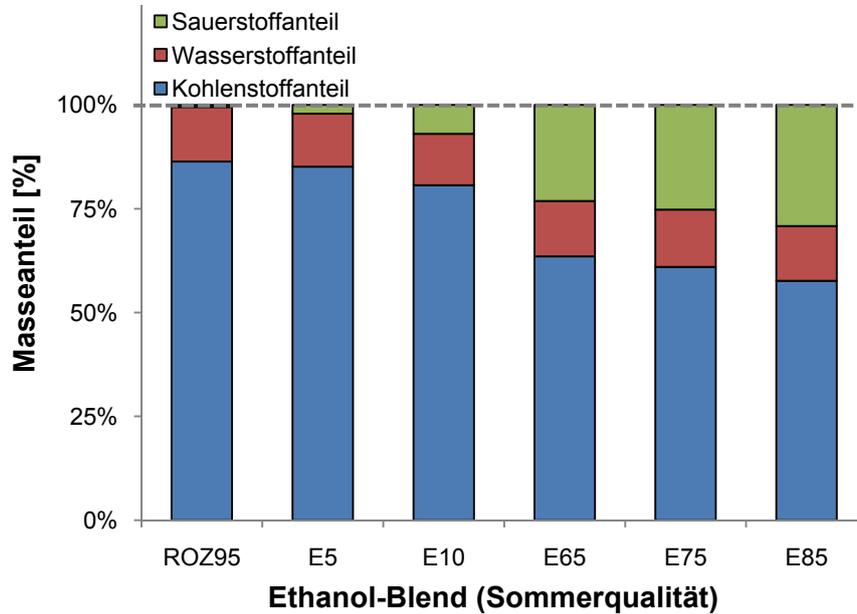


Abbildung 28: C/H/O-Verhältnis der Versuchskraftstoffe in Sommerqualität<sup>14</sup> [131]

	Einheit	ROZ95	E5	E10	E65	E75	E85
Dampfdruck (S)	kPa	42,1	41,4	40,9	31,0	30,0	29,1
Dampfdruck (W)	kPa	42,1	41,5	40,7	31,2	29,5	28,8

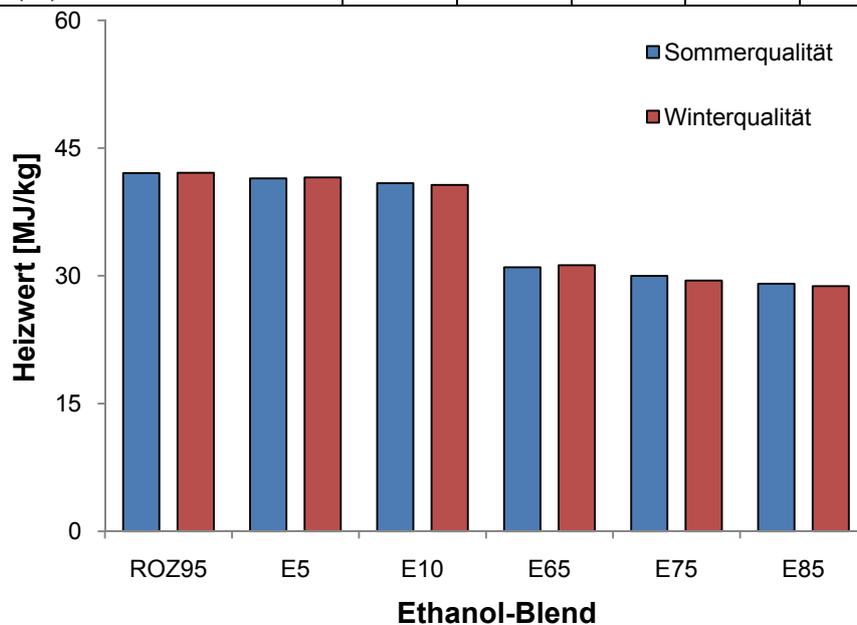


Abbildung 29: Heizwert der Versuchskraftstoffe [131]

<sup>14</sup> Die Werte für die Winterqualitäten der entsprechenden Versuchskraftstoffe weichen nur minimal ab.

Durch das geänderte C/H/O-Verhältnis wird außerdem bei gleicher Energieumsetzung weniger CO<sub>2</sub> emittiert – im Fall von E85 ca. 3% weniger als bei ROZ95 (Kapitel 3.3.2). Diese Erkenntnis ist wesentlich, um das CO<sub>2</sub>-Absenkungspotenzial von Bioethanol in der Tank-to-Wheel Betrachtung richtig zu interpretieren.

- *Verdampfungswärme*

Die Verdampfungswärme ist die Energie, die einem Stoff zugeführt werden muss, um diesen bei konstanter Temperatur vom flüssigen in den gasförmigen Zustand zu überführen. Alkoholkraftstoffe sind durch eine besonders hohe Verdampfungswärme charakterisiert (Tabelle 5). Dadurch kommt es zu einer Abkühlung des Kraftstoff-Luftgemisches, was Vor- und Nachteile im Motorbetrieb mit sich bringt. Beträgt der Temperaturabfall bei stöchiometrischem Luftgemisch und vollständiger adiabatischer Verdampfung von Benzin etwa 20°C, so liegt dieser bei Ethanol schon bei etwa 70°C [133].

An der Volllast wirkt sich die Absenkung der Temperatur – in Abhängigkeit von Motorkonzept und Motorparametern – positiv auf Leistung und Drehmoment aus, weil die höhere Gemischdichte die Zylinderfüllung und den Liefergrad anhebt. Diese Temperaturabsenkung aufgrund der Verdampfungswärme kann mit einem vereinfachten Ansatz berechnet werden [17], [142].

Die hohe Verdampfungswärme wirkt sich allerdings in Kombination mit dem schlechten Siedeverhalten von Alkoholen – speziell bei tiefen Temperaturen – negativ auf das Kaltstartverhalten aus. Dabei bringt die Direkteinspritzung gegenüber der Saugrohreinspritzung gewisses Potenzial zur Verbesserung. Durch die Verschiebung des Einspritzzeitpunktes in Richtung spät und damit durch die Einspritzung in die bereits verdichtete und erwärmte Ansaugluft kann die Kaltstarttemperatur abgesenkt werden [143], [144].

### 3.2.2. Biogas

Biogas wird laut Biokraftstoffrichtlinie (Richtlinie 2003/30/EG, [5]) als Brenngas bezeichnet, das aus Biomasse und/oder aus dem biologisch abbaubaren Teil von Abfällen hergestellt wird, durch Reinigung auf Erdgasqualität erreichen kann und für die Verwendung als Biokraftstoff bestimmt ist.

Bereits Erdgas in Form von CNG (Compressed Natural Gas) als Fahrzeugtreibstoff bietet die Möglichkeit, den CO<sub>2</sub>-Ausstoß um 20% bis 25% zu senken. Dies wird aufgrund des im Vergleich zu herkömmlichem Ottokraftstoff günstigeren C/H/O-Verhältnis von Methan, dem Hauptbestandteil von Erdgas, erreicht.

Die Erdgasqualität selbst stellt ein wichtiges Kriterium für den Verarbeitungsaufwand dar [145].

- *Erdgas besteht hauptsächlich aus Methan (CH<sub>4</sub>), so liegt der Methananteil von hochqualitativem Gas bei 99% und bei Gas von geringer Qualität hat Methan einen Anteil von nur 84%.*
- *Je nach Qualität findet man auch größere Mengen der Kohlenwasserstoffe Butan, Ethan und Propan. Diese werden normalerweise bei der Förderung vom Erdgas getrennt und anderweitig genutzt.*
- *Außerdem findet man auch CO<sub>2</sub> in geringen Mengen. In einigen wenigen Ländern ist der CO<sub>2</sub>-Gehalt im Roherdgas höher, wodurch der Heizwert sinkt.*

Erdgas wird in Abhängigkeit des unteren Heizwertes H<sub>u</sub> in die zwei Kategorien eingeteilt [13]:

- *L (low = niedrig) H<sub>u</sub> von 39 MJ/kg bis 46 MJ/kg*
- *H (high = hoch) H<sub>u</sub> von mindestens 46 MJ/kg*

Je nach Schwefelgehalt spricht man auch von:

- *Süßgas ist relativ frei von Verunreinigungen*
- *Sauergas weist einen hohen Anteil an Schwefelwasserstoff auf.*

Einen Überblick über die durchschnittliche Zusammensetzung von verschiedenen Erdgas-Qualitäten gibt die nachfolgende Tabelle 7.

Tabelle 7: Stoffwerte von verschiedenen Erdgasvorkommen [135], [146], [147]

		H1-Gas Russland	H2-Gas Nordsee	L-Gas Holland
Dichte bei 0°C, 1013mbar	kg/m <sup>3</sup>	0,73	0,83	0,83
Methan	%	98,3	86,5	84,4
Kohlendioxid	%	-	2	2
Stickstoff	%	1	1	10
Heizwert	MJ/m <sup>3</sup>	35,9	38,8	33,4
Oktanzahl	ROZ	130	130	115
Methanzahl	-	95	72	88
Stöch. Luftbedarf	kg/kg	16,88	16,01	13,93

Wird das Gas wie im Fall von Biogas nicht aus fossilen Quellen, sondern aus Biomasse gewonnen, so besteht – genau wie bei Bioethanol – durch den geschlossenen CO<sub>2</sub>-Kreislauf zusätzlich Potenzial, die CO<sub>2</sub>-Bilanz weiter zu verbessern. Wie CNG besteht Biogas zum Großteil aus Methan (Tabelle 8).

Tabelle 8: Durchschnittliche Zusammensetzung von Biogas [118]

Bestandteil	Konzentration
Methan (CH <sub>4</sub> )	50-75 Vol.-%
Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )	25-45 Vol.-%
Wasser (H <sub>2</sub> O)	2-7 Vol.-% (20-40°C)
Schwefelwasserstoff (H <sub>2</sub> S)	20-20000 ppm
Stickstoff (N <sub>2</sub> )	< 2 Vol.-%
Sauerstoff (O <sub>2</sub> )	< 2 Vol.-%
Wasserstoff (H <sub>2</sub> )	< 1 Vol.-%

Um das Biogas als Treibstoff im Verkehrsbereich nutzen zu können, ist eine Aufbereitung notwendig. Diverse im Gas enthaltenen Elemente müssen dabei entfernt und der Methangehalt muss erhöht werden [9], [41].

- *Entschwefelung*

Schwefelwasserstoff (H<sub>2</sub>S) ist ein Nebenprodukt, das bei der Vergasung im Fermenter entsteht. Es ist giftig und wirkt stark korrosiv auf Leitungen und Anlagen. Bei der Verbrennung wird es zu Schwefeldioxid umgewandelt. Der H<sub>2</sub>S-Gehalt ist sehr stark vom verwendeten Substrat abhängig.

- *Kohlendioxidabtrennung*

Der entscheidende Schritt zur Erhöhung des Methangehaltes ist die Kohlendioxidabtrennung. Unaufbereitetes Biogas hat einen Methangehalt zwischen 40% und 75%, der entsprechend erhöht werden muss, um das Gas als Treibstoff (gemäß Norm DIN 51624 [13]) verwenden zu können [122].

Die nachfolgenden Tabelle 9 zeigt eine Zusammenstellung der wichtigsten Stoffeigenschaften von CNG (H-Gas) und Biogas 97 (Biogas in Erdgas-H-Qualität mit 97% Methan) im Vergleich zu herkömmlichem Ottokraftstoff ROZ95 [30], [130], [148], [149].

Tabelle 9: Stoffeigenschaften von Benzin und CNG [30], [130], [148], [149]

		<b>Benzin ROZ95</b>	<b>CNG (H-Gas)</b>	<b>Biogas 97</b>
Dampfdruck bei 38°C	kPa	45-60 (S) 60-90 (W)	-	-
Dichte	kg/m <sup>3</sup>	742,0	0,753	0,752
Flammpunkt	°C	-45	-	-
Mittlere Molmasse	kg/mol	~ 98	-	-
Heizwert (gravimetrisch)	MJ/kg	42,6	47,4	46,4
Heizwert (volumetrisch)	MJ/l	31,6	-	-
Gemischheizwert (gemischsaugend)	MJ/ m <sup>3</sup>	3,52	3,32	3,37
Gemischheizwert (luftsaugend)	MJ/ m <sup>3</sup>	3,58	-	-
Masseanteil Kohlenstoff C	%M	86,4	74,9	74,9
Masseanteil Wasserstoff H	%M	13,1	25,1	25,1
Masseanteil Sauerstoff O	%M	0,5	0,00	0,0
Research Oktanzahl	ROZ	95,3	>130	<130
Motor Oktanzahl	MOZ	84,4	-	-
Methanzahl	-	-	-	102,2
Methangehalt	Vol.-%	-	97,0	95,8
Siedetemperatur	°C	30-195	-	-
Stöchiometrischer Luftbedarf	kg/kg	14,3	16,7	16,0
Verdampfungswärme bei 1,013bar	kJ/kg	380-500	-	-
Viskosität	μPa·s	0,42	-	-
Wasserlöslichkeit bei 20°C	Vol.-%	vernachl.	-	-
Zündgrenze obere/untere	λ	0,4 / 1,4	0,7 / 2,1	0,7 / 2,1
Zündtemperatur	°C	200-300	-	-

Um den Einfluss des Aufbereitungsgrades von Biogas auf die Kraftstoffparameter zu zeigen, wird nachfolgend der CO<sub>2</sub>-Gehalt in zwei Aufbereitungsstufen von 84% und 80% Methananteil mit dem Biogas in Erdgas-H-Qualität mit 97% Methan verglichen.

- *Dichte*

Ein weiterer signifikanter Unterschied zeigt sich in der Dichte der Kraftstoffe. So fällt diese im Falle der gasförmigen Kraftstoffe um den Faktor 1000 niedriger aus als für den Flüssigbrennstoff ROZ95 (Abbildung 30). Diese niedrige Kraftstoffdichte hat neben einem höheren stöchiometrischen Luftbedarf der gasförmigen Kraftstoffe einen deutlichen Einfluss auf den Gemischheizwert. So reduziert sich dieser merkbar um über 10%, was sich im Vollastverhalten ungünstig bemerkbar macht.

In der Teillast hingegen kann der Dichteunterschied der Kraftstoffe zu einem Vorteil bei Gasbetrieb führen. Durch das größere Gemischvolumen findet eine Entdrosselung des Motors statt, was aufgrund der geringeren Drosselverluste zu einer Steigerung des effektiven Wirkungsgrades führen kann.

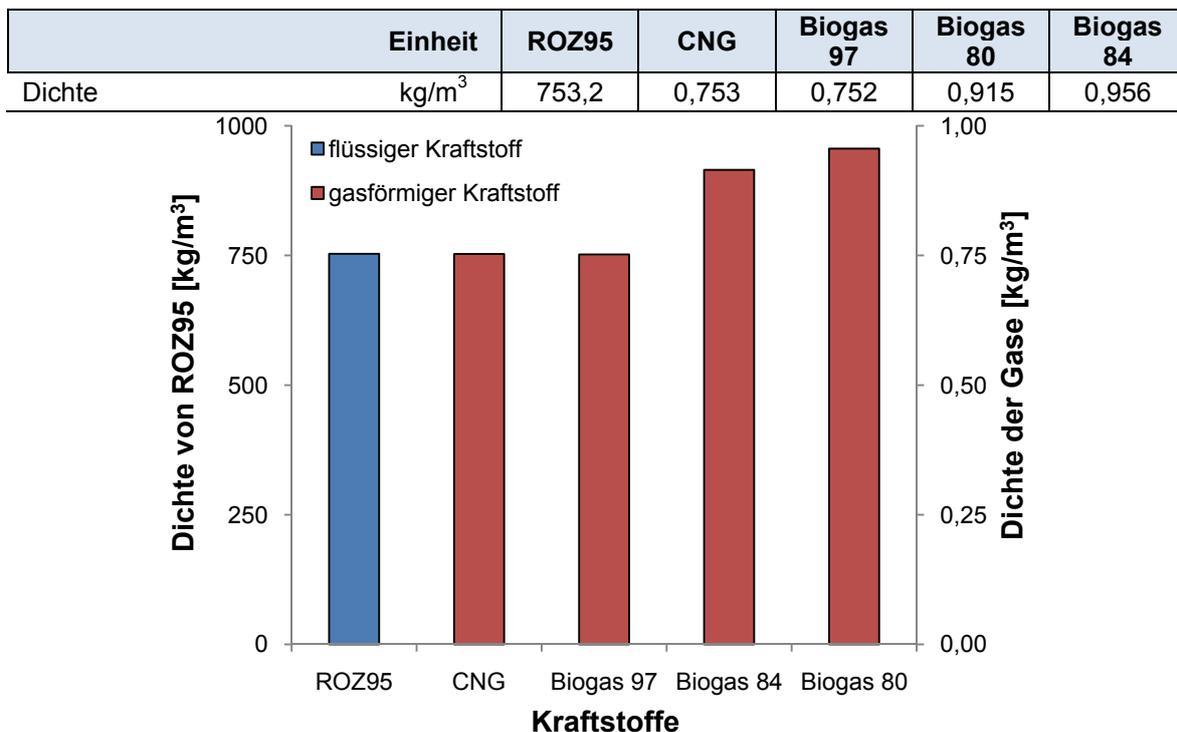


Abbildung 30: Dichte der verschiedenen Gas-Kraftstoffe (bei 0°C, 1013mbar) [149]

- *Oktan- / Methanzahl*

Die Oktanzahl ist hier nochmals höher als bei Ethanol und auch deutlich höher als beim Basiskraftstoff ROZ95. Die Tabelle 7 zeigte bereits für verschiedene Erdgasqualitäten entsprechende Oktanzahlen in einem Bereich von 115 bis 135. Die Klopfestigkeit eines Erdgases ändert sich stark mit dessen Zusammensetzung.

Methan, der Hauptbestandteil von Erdgas, besitzt eine sehr hohe Klopfestigkeit von über 140. Die erhöhten Mengenanteile schwererer Kohlenwasserstoffe, wie Ethan und Propan, verringern die Klopfestigkeit des Kraftstoffes. Daraus ist die Methanzahl als Kriterium entstanden, die aus der Analyse der Gaszusammensetzung berechnet werden kann. Die Methanzahl ist die Maßzahl für Klopfestigkeit bei der Verbrennung von Gasgemischen, analog zur Oktanzahl für flüssige Kraftstoffe. Eine hohe Methanzahl bedeutet eine geringere Zündwilligkeit. Bei niedriger Methanzahl steigen die Gefahr der Selbstentzündung und damit die Klopfgefahr im Motor [150], [151], [152].

Biogas besitzt eine höhere Methanzahl als Erdgas. Für den Einsatz in Motoren kann sich deshalb eine die Klopfestigkeit steigernde Wirkung ergeben. Wie in der nachfolgenden Abbildung 31 ersichtlich ist, steigt die Methanzahl bei Biogas mit höherem CO<sub>2</sub>-Anteil noch weiter an, was auf die Wirkung als Inertgas zurückzuführen ist.

	Einheit	ROZ95	CNG	Biogas 97	Biogas 84	Biogas 80
Research Oktanzahl	ROZ	95,9	>130	>130	>130	>130
Methanzahl	-	-	98	102,2	115,5	117,0

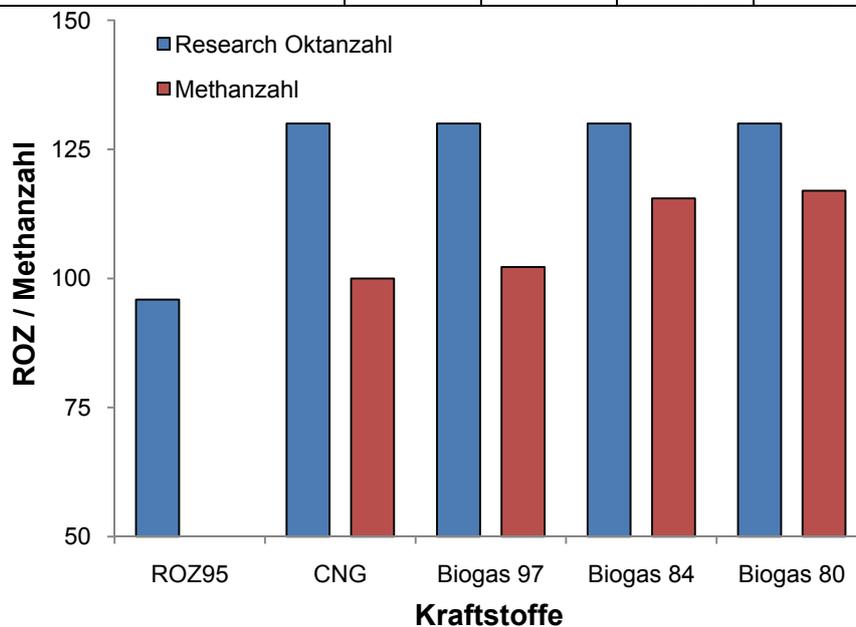


Abbildung 31: Oktan-/Methanzahl der verschiedenen Gas-Kraftstoffe [149]

Die hohe Klopfestigkeit stellt einen wesentlichen Vorteil für die innermotorische Optimierung der ottomotorischen Verbrennung dar. So kann vor allem bei höheren Lasten im Vergleich zu herkömmlichen weniger klopfesten Kraftstoffen der Verbrennungsschwerpunkt dahingehend eingestellt werden, und der Wirkungsgrad im Gasbetrieb kann im Vergleich zum Betrieb mit ROZ95 auf einem wesentlich höheren Niveau gehalten werden. Hier macht sich die hohe Klopfestigkeit aufgrund der Methanzahl von über 100 und somit einer Oktanzahl größer 130 deutlich bemerkbar [149], [153].

Zukünftig kann darüber hinaus bei monovalent ausgelegten Biogasmotoren die geometrische Verdichtung weiter erhöht und somit der Wirkungsgrad auch in der Teillast weiter verbessert werden. Dadurch kann zusätzlich Primärenergie gespart werden [149].

- *Kohlenstoff/Wasserstoff-Verhältnis und Heizwert*

Die gasförmigen Kraftstoffe zeichnen sich im Vergleich zu Benzin durch einen niedrigeren Kohlenstoff-Anteil zugunsten eines im gleichen Maße erhöhten Wasserstoff-Anteils aus. Im Falle des analysierten CNG ist das C/H-Verhältnis von 2,98 deutlich geringer als jenes von dem ROZ95-Kraftstoff mit einem C/H-Verhältnis von 6,67 (siehe Tabelle 9). Der Wasserstoffgehalt von CNG ist annähernd doppelt so hoch wie der von Benzin.

Bei Biogas mit CO<sub>2</sub>-Gehalt in zwei Aufbereitungsstufen von 84% und 80% Methananteil werden in Abbildung 32 nur die C/H/O-Teile des brennbaren Anteils dargestellt.

	Einheit	ROZ95	CNG	Biogas 97	Biogas 84	Biogas 80
CO <sub>2</sub> -Anteil	%M	-	-	3,0	16,0	20,0
Kohlenstoffanteil (brennbar)	%M	86,4	74,9	74,9	74,8	74,9
Wasserstoffanteil (brennbar)	%M	13,1	25,1	25,1	25,1	25,1
Sauerstoffanteil (brennbar)	%M	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0

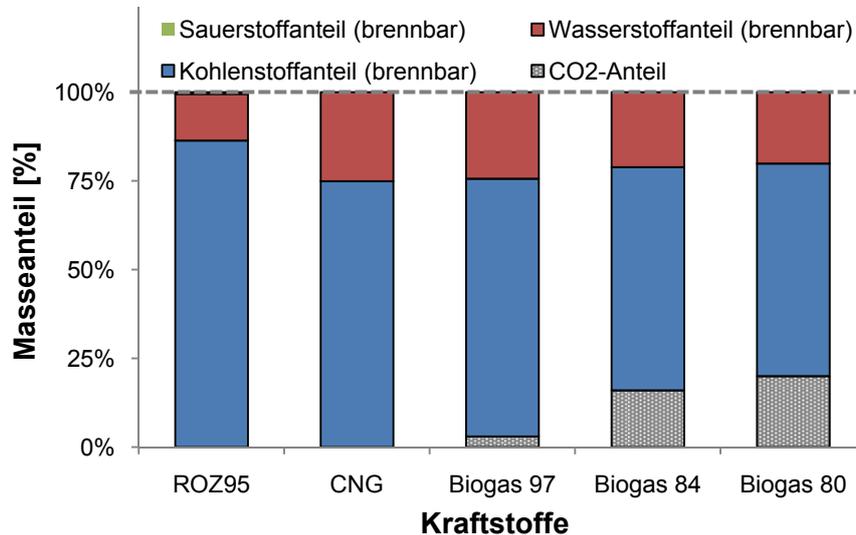


Abbildung 32: C/H/O-Verhältnis und CO<sub>2</sub>-Anteil der verschiedenen Gas-Kraftstoffe [149]

Der CO<sub>2</sub>-Gehalt im Gas, welcher bei der höchsten Qualitäts- bzw. Aufbereitungsstufe bereits während der Biogasherstellung an die Umgebung abgegeben wurde, ist bei schlechteren Gasqualitäten im Kraftstoff enthalten und wird bei der Verbrennung emittiert und damit im Motorabgas gemessen. Für den zu erwartenden gemessene CO<sub>2</sub>-Ausstoß muss der CO<sub>2</sub>-Anteil des jeweiligen Kraftstoffes wie in der gezeigten Formel (Gl.4) berechnet werden [149].

$$CO_{2,Masse} = \frac{3,664 \cdot C_{\%}}{100} + CO_{2,Brennstoff} \quad (Gl.4)$$

Durch den niedrigeren Kohlenstoffanteil und das Fehlen des Sauerstoffanteils sowie durch den höheren Wasserstoffanteil resultieren vergleichsweise höhere Werte beim stöchiometrischen Luftbedarf (siehe auch Kapitel 3.3.1) und beim Heizwert (Abbildung 33). Im motorischen Betrieb stellt das niedrigere C/H/O-Verhältnis einen der Hauptvorteile dar. Es führt zu einem wesentlich niedrigeren CO<sub>2</sub>-Ausstoß dieser Kraftstoffe im Vergleich zu herkömmlichem ROZ95-Kraftstoff (etwa 25%, siehe Kapitel 3.3.2).

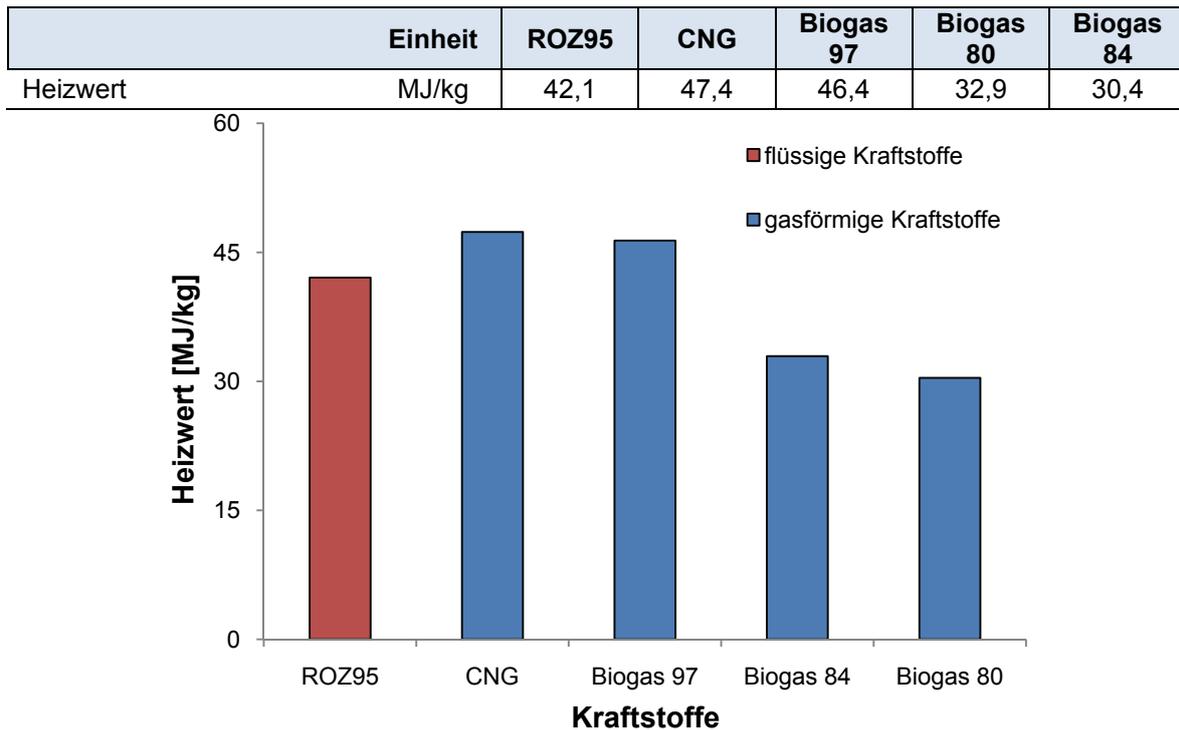


Abbildung 33: Heizwert der verschiedenen Gas-Kraftstoffe [149]

Für Biogas 97 zeigen die Ergebnisse der Analyse einen marginal geringeren Heizwert im Vergleich zu Erdgas. Beide Gaskraftstoffe entsprechen damit der für den Fahrzeugeinsatz geforderten H-Qualität ( $H_u$  von mindestens 46 MJ/kg). Der flüssige Ottokraftstoff ROZ95 weist einen etwas geringeren Heizwert auf und die beiden niedrigeren Aufbereitungsstufen – Biogas 84 und Biogas 80 – unterschreiten die geforderte L-Qualität ( $H_u$  zwischen 39 MJ/kg und 46 MJ/kg).

### 3.3. Berechnete Stoffwerte

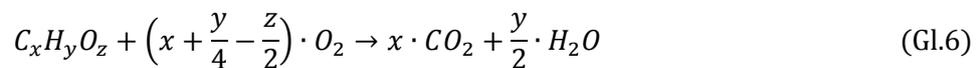
#### 3.3.1. Stöchiometrischer Luftbedarf

Der stöchiometrische Luftbedarf  $L_{st}$  kann aus dem stöchiometrischen Sauerstoffbedarf und der Zusammensetzung der Luft ( $N_2/O_2=0,79/0,21$ ) nach folgender Formel (Gl.5) errechnet werden:

$$L_{st} = \frac{1}{0,21} \cdot O_{2\ st} = 4,76 \cdot O_{2\ st} \quad (\text{Gl.5})$$

$L_{st}$ ... stöchiometrischer Luftbedarf in kmol je kg Brennstoff  
 $O_{2st}$ ... stöchiometrischer Sauerstoffbedarf in kmol  $O_2$  je kg Brennstoff

Die betrachteten flüssigen Kraftstoffe Benzin, Ethanol und deren Mischungen sowie die gasförmigen Kraftstoffe CNG und Biogas unterscheiden sich in Bezug auf ihr C/H/O-Verhältnis recht deutlich (siehe auch Tabelle 9). Aus der Verbrennung eines Kohlenwasserstoffes mit der chemischen Struktur  $C_xH_yO_z$  entsteht im Idealfall bei stöchiometrischen Verhältnissen nur Kohlendioxid und Wasser (Gl.6), sowie Wärme und mechanische Arbeit.



Der Sauerstoffbedarf für die stöchiometrische Verbrennung (Gl.7) beträgt daher:

$$O_{2\ st} = \left(x + \frac{y}{4} - \frac{z}{2}\right) \frac{\text{kmol } O_2}{\text{kmol } B} \quad (\text{Gl.7})$$

Der Luftbedarf für die stöchiometrische Verbrennung (Gl.8) lässt sich folgendermaßen berechnen:

$$L_{st} = 4,76 \cdot \left(x + \frac{y}{4} - \frac{z}{2}\right) \frac{\text{kmol } L}{\text{kmol } B} \quad (\text{Gl.8})$$

Da die Verbrennung nicht ideal abläuft, entstehen jedoch auch Schadstoffe wie  $CO$ ,  $C_xH_y$ ,  $NO_x$ , Ruß, Partikel usw., welche etwa 1% der gesamten Abgasmenge ausmachen. Sie werden im Rahmen dieser Betrachtung vernachlässigt.

Für reine Stoffe wie Ethanol oder Methan ist diese Gleichung einfach zu lösen. Benzin besteht dahingegen aus vielen verschiedenen Kohlenwasserstoffgruppen, weshalb für die Verbrennungsgleichung eine durchschnittliche Formel angenommen werden muss. In der Literatur wird von einer durchschnittlichen Zusammensetzung der flüssigen Ottokraftstoff mit der chemischen Formel  $C_nH_{1,87n}$  ( $C_{8,26}H_{15,44}$ ) ausgegangen. Für gasförmige Kraftstoffe wird  $C_nH_{3,8n}N_{0,1n}$  als Durchschnittswert angegeben. Es wird allerdings in weiterer Folge CNG wegen der Verwendung hochaufbereiteter Gasqualitäten als reines Methan ( $CH_4$ ) abgebildet [154].

Für die Ethanol-Blends können ebenfalls entsprechende chemische Formeln angegeben werden (Tabelle 10). In Kapitel 4.2.2 wird später mittels einer Kohlenstoffbilanz gezeigt, dass die Werte der Mischungen von E5 ( $CH_{1,89}O_{0,016}$ ) und E85 ( $CH_{2,74}O_{0,385}$ ) über die Ausgangsstoffe ROZ95 und Ethanol berechnet werden und somit die Literaturwerte bestätigt werden können [74], [155].

Tabelle 10: C/H/O-Verhältnis der Versuchskraftstoffe nach Verordnung 692/2008 [74]

Kraftstoff	Kohlenwasserstoffe
ROZ95	$C_{8,26}H_{15,44}$
Ethanol	$C_2H_5OH$
E5 (ROZ95 + 5% Ethanol)	$C_1H_{1,89}O_{0,016}$
E85 (ROZ95 + 85% Ethanol)	$C_1H_{2,74}O_{0,385}$
Erdgas (CNG) und Biomethan	$CH_4$

Aus Formel (Gl.8) und mit der daraus folgenden Formel (Gl.9) lässt sich nun leicht der stöchiometrische Luftbedarf (Tabelle 11) für die Versuchskraftstoffe berechnen:

$$L_{st} = 137,8 \cdot \left( \frac{c}{12,01} + \frac{h}{4,032} - \frac{o}{32} \right) \frac{kg L}{kg B} \quad (Gl.9)$$

$c, h, o$  ... Massenanteile an Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff

Tabelle 11: Stöchiometrischer Luftbedarf der Versuchskraftstoffe

Kraftstoff	Luftbedarf
ROZ95	14,51
Ethanol	8,94
E5 (ROZ95 + 5% Ethanol)	14,20
E85 (ROZ95 + 85% Ethanol)	9,79
Erdgas (CNG) und Biomethan	17,11

### 3.3.2. Kohlendioxidemissionen bei vollständiger Verbrennung

Aus den Molgewichten und Verhältniszahlen der Gleichungen ergibt sich, dass bei der Verbrennung von einem Kilogramm bzw. von einem Liter für die verschiedenen Kraftstoffe unterschiedliche Mengen an Kohlendioxid entstehen (Abbildung 34).

<b>ROZ95</b>	$C_{8,26}H_{15,44} + 12,12 \cdot O_2 \rightarrow 8,26 \cdot CO_2 + 7,72 \cdot H_2O \quad (\text{Gl.10})$ $8,26 \cdot 12 + 15,44 \cdot 1 \text{ (ROZ95)} \rightarrow 8,26 \cdot (12 + 2 \cdot 16) \text{ (CO}_2\text{)}$ $114,56 \text{ g/mol (ROZ95)} \rightarrow 363,44 \text{ g/mol (CO}_2\text{)}$ $1 \text{ g (ROZ95)} \rightarrow \frac{363,44}{114,56} \text{ g (CO}_2\text{)}$ 1kg $\Rightarrow$ 3,17kg CO <sub>2</sub> 1l $\Rightarrow$ 2,35kg CO <sub>2</sub> (für eine Dichte von 742,0 kg/m <sup>3</sup> bei 15°C)
<b>Ethanol</b>	$C_2H_5OH + 3 \cdot O_2 \rightarrow 2 \cdot CO_2 + 3 \cdot H_2O \quad (\text{Gl.11})$ $46 \text{ g/mol (EtOH)} \rightarrow 88 \text{ g/mol (CO}_2\text{)}$ 1kg $\Rightarrow$ 1,91kg CO <sub>2</sub> 1l $\Rightarrow$ 1,52kg CO <sub>2</sub> (für eine Dichte von 788,0 kg/m <sup>3</sup> bei 15°C)
<b>E5</b>	$CH_{1,89}O_{0,016} + 1,4645 \cdot O_2 \rightarrow CO_2 + 0,945 \cdot H_2O \quad (\text{Gl.12})$ $13,92 \text{ g/mol (E5)} \rightarrow 44 \text{ g/mol (CO}_2\text{)}$ 1kg $\Rightarrow$ 3,16kg CO <sub>2</sub> 1l $\Rightarrow$ 2,35kg CO <sub>2</sub> (für eine Dichte von 753,8 kg/m <sup>3</sup> bei 15°C)
<b>E85</b>	$CH_{2,74}O_{0,385} + 1,4925 \cdot O_2 \rightarrow CO_2 + 1,37 \cdot H_2O \quad (\text{Gl.13})$ $20,9 \text{ g/mol (E85)} \rightarrow 44 \text{ g/mol (CO}_2\text{)}$ 1kg $\Rightarrow$ 2,11kg CO <sub>2</sub> 1l $\Rightarrow$ 1,66kg CO <sub>2</sub> (für eine Dichte von 787,4 kg/m <sup>3</sup> bei 15°C)
<b>CNG</b>	$CH_4 + 2 \cdot O_2 \rightarrow CO_2 + 2 \cdot H_2O \quad (\text{Gl.14})$ $16 \text{ g/mol (CNG)} \rightarrow 44 \text{ g/mol (CO}_2\text{)}$ 1kg $\Rightarrow$ 2,75kg CO <sub>2</sub>

Abbildung 34: Masse- bzw. volumenbezogene CO<sub>2</sub>-Emission

Die auf diese Weise und unter diesen Randbedingungen berechneten Werte für Benzin stimmen genau mit den aus der Literatur bekannten Werten (3,17kg CO<sub>2</sub>/kg Benzin) überein [156].

Für eine objektive Betrachtung des tatsächlichen Potenzials sollte die energiebezogene CO<sub>2</sub>-Emission eines Kraftstoffes herangezogen werden. Der aus dem Kraftstoff nutzbare Energieinhalt – also die Wärmemenge, die tatsächlich gewonnen werden kann – wird durch den Heizwert ausgedrückt. Wie bereits gezeigt, besitzt Ethanol auf gravimetrischer Basis im Vergleich zu Benzin einen um etwa 37% niedrigeren Heizwert. Das ist durch den geringeren Kohlenstoffanteil zu Lasten des höheren Sauerstoff-Anteils bedingt. Wegen der etwas höheren Dichte des Alkohols fällt diese Differenz bei volumetrischer Betrachtung mit 33% etwas geringer aus (Tabelle 12). Für die Berechnung dieser Werte wurden Heizwerte sowie Dichten aus Tabelle 5 und Tabelle 9 herangezogen.

Tabelle 12: CO<sub>2</sub>-Emission der Versuchskraftstoffe bezogen auf den Energieinhalt

	Einheit	ROZ95	Ethanol	E5	E85	CNG
Dichte	kg/m <sup>3</sup>	742,0	788,0	753,8	787,4	0,753
stöch. Luftbedarf	kg/kg	14,51	8,94	14,2	9,79	17,11
Heizwert						
gravimetrisch	MJ/kg	42,06	26,86	41,44	29,07	47,37
bezogen auf ROZ95	%	100,0	63,9	98,5	69,1	112,6
volumetrisch	MJ/l	31,21	21,17	31,24	22,89	-
bezogen auf ROZ95	%	100,0	67,8	100,1	73,3	-
Masse CO <sub>2</sub> je kg Kraftstoff	kg/kg	3,17	1,91	3,16	2,11	2,75
Masse CO <sub>2</sub>						
je MJ Kraftstoff	g/MJ	75,37	71,11	76,25	72,58	58,05
bezogen ROZ95	%	100,0	94,3	101,2	96,3	77,0

Bei diesem Vergleich entsteht bei Verbrennung des konventionellen ROZ95-Kraftstoffs 75,4 g/MJ CO<sub>2</sub> gegenüber 71,1 g/MJ beim reinen Ethanol bzw. 72,6 g/MJ CO<sub>2</sub> beim alternativen Kraftstoff E85. Bei CNG beträgt die CO<sub>2</sub>-Emission sogar nur 58,1 g/MJ. Damit ergibt sich bei E85 ein maximales CO<sub>2</sub>-Minderungspotenzial – rein aufgrund der Zusammensetzung des Kraftstoffes – von etwa 4% im Vergleich und bei CNG von 23% im Vergleich zu Benzin.

## 4. Versuchsmethodik

### 4.1. Prüfstandstechnik

#### 4.1.1. 4-Rad-Rollenprüfstand

Die Untersuchungen wurden auf einem klimatisierten 4-Rad-Rollenprüfstand (Tabelle 13) durchgeführt. Dieser Prüfstand erlaubt Kaltstarttemperaturen von bis zu  $-35^{\circ}\text{C}$  und ist für die Durchführung von beliebigen bzw. frei parametrierbaren Fahrzyklen geeignet. Abbildung 35 zeigt eine Übersicht über das Messprinzip. Eine genaue Beschreibung der einzelnen eingesetzten Abgasanalytoren findet sich in Kapitel 4.1.3.

Tabelle 13: Technischen Daten des 4-Rad-Rollenprüfstands

Technische Daten – 4-Rad-Rollenprüfstand	
Rollenprüfstand	Schenck / Kristl&Seibt
Antriebs- bzw. Bremsleistung	90kW
Maximale Geschwindigkeit	160km/h
Maximale Schwungmasse	3500kg
Klimatisierung	YORK
Kälteleistung	100kW
Umluftmenge	80.000m <sup>3</sup> /h
Constant Volume Sampler (CVS)	HORIBA CVS-9430T
Motor Exhaust Gas Analyzer (MEXA)	HORIBA MEXA-9230D
CO-Analysator (URAS)	HORIBA AIA 310/320
CO <sub>2</sub> -Analysator (URAS)	HORIBA AIA 310/320
HC-Analysator (FID)	HORIBA FIA 325/326
NO <sub>x</sub> -Analysator (CLD)	HORIBA CLA 350/360
Partikel	NOVA Partikelmessanlage

#### 4.1.2. CVS-Methode

In den CVS-Anlagen wird das vom zu untersuchenden Motor während des Testzyklus ausgestoßene Abgas mit Umgebungsluft verdünnt und über eine spezielle Pumpenanordnung so abgesaugt, dass der Volumenstrom aus Abgas und Verdünnungsluft konstant ist, d. h. die Luftzumischung richtet sich nach dem momentanen Abgasausstoß. Der Volumenstrom aus Abgas und Verdünnungsluft wird dabei mit Hilfe von Venturi Düsen konstant gehalten. Dem verdünnten Abgasstrom wird während der gesamten Testdauer eine konstante Teilmenge entnommen und in mehreren Beuteln gesammelt. In einem separaten Beutel wird gleichzeitig eine entsprechende Probenmenge der Raumlufte gesammelt. Das

Funktionsprinzip ist dabei unabhängig vom Prüfstand (Rollen- oder Motorprüfstand) immer gleich (Abbildung 35).

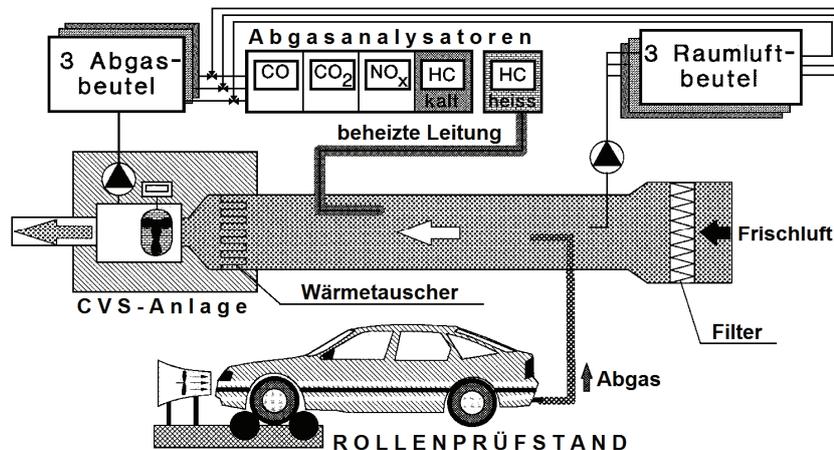


Abbildung 35: Rollenprüfstand und CVS-Anlage [157]

Durch die Verdünnung des Abgases mit Luft werden einerseits störende chemische Reaktionen von Kohlenwasserstoffen, andererseits die wegen der Stickstoffoxidabscheidung unerwünschte Wasserdampfkondensation im System vermieden. In einem Wärmetauscher wird das Gasgemisch auf ein einheitliches Temperaturniveau gebracht.

Die Konzentrationen der Beutelmengen werden nach Testende gemessen. Die Konzentration der einzelnen Komponenten der Raumluft wird von der Messmenge gemäß dem Verdünnungsfaktor abgezogen, um den Einfluss der Umgebungsluft auszuschließen, der bei den niedrigen Grenzwerten schon erheblich sein kann. Um die Massenemission zu errechnen, ermittelt man mit dem zeitlich bekannten Normfördervolumen des Gebläses und der Konzentration bzw. der Norm-Dichte der jeweiligen Abgaskomponente das während des Tests geförderte Gewicht dieser Abgaskomponente. Bei der Berechnung der Stickstoffoxid-Emission wird außerdem noch die Luftfeuchtigkeit berücksichtigt.

Der Ergebniswerte der untersuchten Komponenten werden in g/km angegeben. In Kapitel 4.2. wird diese Berechnungsmethode nochmals genauer vorgestellt, es werden Probleme, die sich für alternative Kraftstoffe ergeben, aufgezeigt und die Lösungen dargestellt.

### 4.1.3. Abgasanalytoren

Die Analytoren zur Messung der CO, CO<sub>2</sub>, HC und NO<sub>x</sub>-Emissionen arbeiten bei allen eingesetzten Analysesystemen nach den gleichen Messprinzipien. Nachfolgend sind diese sowie die Methoden zur Messung der nicht limitierten Schadstoffe näher beschrieben.

- *Messung der limitierten Abgasbestandteile*

Für die Messung der limitierten Abgasbestandteile (CO, HC und NO<sub>x</sub>-Emissionen) sowie CO<sub>2</sub>-Emissionen kommt die aus der Literatur bekannte Standardmesstechnik zum Einsatz [157]:

- *Infrarot-Analysator (URAS) => CO- und CO<sub>2</sub>-Messung*
- *Flammenionisationsdetektor (FID) => HC- und CH<sub>4</sub>-Messung*
- *Chemolumineszenzdetektor (CLD) => NO<sub>x</sub>-Messung*

- *Messung der nicht limitierten Abgasbestandteile*

- *Quarzfaserfilter-Methode – PAH- und Nitro-PAH-Emissionen*

Die PAH-Probenahme erfolgt durch Entnahme eines bereits luftverdünnten Teilvolumenstroms am Ende eines Verdünnungstunnels (CVS-Tunnel). Für die Sammlung der partikelgebundenen polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAH) und ihrer nitrierten Derivate (Nitro-PAH) kommen Quarzfaserfilter zum Einsatz. Die Filter werden im Muffelofen ausgeheizt und bis zur Verwendung in einem Exsikkator gelagert. Nach dem Filterhalter sind die Gasvolumenmessung, die Temperaturmessung und eine Pumpe angeordnet.

Die beladenen Filter werden im Labor aufgearbeitet und zu PAH- und Nitro-PAH-Proben extrahiert. Für die Analytik der Proben kommt ein Hochleistungsflüssigkeitschromatographie-System (HPLC) mit einem Fluoreszenzdetektor zum Einsatz. Die PAH können bei der jeweiligen Fluoreszenzwellenlänge nachgewiesen werden. Nitro-PAH können ebenfalls durch Fluoreszenzdetektion bestimmt werden, wenn vorher die Nitrogruppen zu Aminogruppen reduziert werden [97], [158], [159].

- *Dinitrophenylhydrazin-Methode (DNPH) – Aldehyd-Emissionen*

Die Aldehydprobenahme erfolgt durch Entnahme eines bereits luftverdünnten Teilvolumenstroms am Ende eines Verdünnungstunnels (CVS-Tunnel). Die

Sammelapparatur besteht aus zwei hintereinander geschalteten Frittengaswaschflaschen, die mit der Reaktions-/Absorptionslösung gefüllt sind. Nach der Gastrocknung (mittels Kieselgelpatrone) und einer Aktivkohlepatrone sind die Gasvolumenmessung, die Temperaturmessung und eine Pumpe angeordnet. Die in der Gasphase befindlichen Aldehyde und Ketone werden mit Hilfe einer Lösung von 2,4-Dinitrophenylhydrazin (DNPH-Mix) in den Gasabsorberflaschen gesammelt.

Das Verfahren basiert auf der Tatsache, dass 2,4-Dinitrophenylhydrazin (DNPH) im sauren Medium mit Carbonylverbindungen zu den entsprechenden Dinitrophenylhydrazonen reagiert, welche durch ihre unterschiedlichen Retentionszeiten in der Hochleistungsflüssigkeitschromatographie (HPLC) voneinander getrennt werden können [97], [160], [161].

Diese Methode wird üblicherweise herangezogen um die Expositionen an Aldehyden am Arbeitsplatz (z. B. in Räumen) oder auch in der Umwelt zu ermitteln. Die Versuchsmethodik wird hier auf die CVS-Messung adaptiert [162], [163].

- *Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskopie (FTIR)*

Mittels FTIR-Messgerät werden Messungen aus dem unverdünnten Abgas durchgeführt, um die nicht limitierten Abgasbestandteile auch zeitaufgelöst darstellen zu können. Unter den dynamischen Multikomponenten-Messmethoden hat sich in den letzten Jahren verstärkt die FTIR-Spektrometrie an Motoren- und Rollenprüfständen etabliert. Mit dieser Methode können über 20 Einzelkomponenten mit einer Messfrequenz im Bereich bis zu 5Hz im unverdünnten Abgas analysiert werden.

Ein FTIR nutzt die Eigenschaft von Molekülen jeweils durch spezielle Frequenzen im IR-Bereich (800-500.000nm) zum Schwingen angeregt zu werden. Das führt im IR-Strahl zu einer Energieabsorption. Es kann also grundsätzlich aus den absorbierten IR-Frequenzen auf das Molekül und aus der Energieabnahme auf die Konzentration des Moleküls geschlossen werden.

Diese Eigenschaft weisen allerdings nicht alle Moleküle auf. Eine Absorption von IR-Strahlung und dem Molekül kann nur auftreten, wenn im Molekül bewegte elektrische Ladung zur Verfügung steht. Das ist nur dann der Fall, wenn das Molekül entweder ein veränderbares oder ein induzierbares

---

Dipolmoment hat, d. h. wenn der Schwerpunkt der negativen Ladungen (Elektronen) und der Schwerpunkt der positiven Ladungen (Atomkerne) nicht zusammenfallen. Solche Moleküle nennt man IR-aktiv. Eine weitere Einschränkung ist, dass verschiedene mehratomige Moleküle IR-Strahlung in überlappenden oder knapp benachbarten Frequenzen absorbieren und daher aus dem gemessenen Signal nicht exakt getrennt werden können. Diese Moleküle haben im FTIR eine gegenseitige Querempfindlichkeit [89].

## 4.2. Berechnungsmethode

### 4.2.1. Ermittlung der Schadstoffemissionen nach der CVS-Methode

Wie bereits in Kapitel 4.1.2 beschrieben, wird während der CVS-Messung sowohl eine Abgas- als auch eine Umgebungsluftprobe genommen. Die Differenz der beiden Proben ergibt die vom Fahrzeug emittierten Emissionen.

Dieser erste Berechnungsschritt ist in Abbildung 36 (Gl.15) angeführt.

$C_{CO/CO_2/HC/NO_x}$	$C_{CO/CO_2/HC/NO_x} = C_e - C_d \cdot \left(1 - \frac{1}{DF}\right)$	(Gl.15)
$C_{CO/CO_2/HC/NO_x}$ ...	Konzentration des Schadstoffs CO/CO <sub>2</sub> /HC/NO <sub>x</sub> in den verdünnten Abgasen und korrigiert durch die Konzentration des Schadstoffs CO/CO <sub>2</sub> /HC/NO <sub>x</sub> in der Verdünnungsluft (*)	
$C_e$ ...	gemessene Konzentration des Schadstoffs CO/CO <sub>2</sub> /HC/NO <sub>x</sub> in den verdünnten Abgasen (*)	
$C_d$ ...	gemessene Konzentration des Schadstoffs CO/CO <sub>2</sub> /HC/NO <sub>x</sub> in der für die Verdünnung verwendeten Luft (*)	
$DF$ ...	Verdünnungsfaktor	
	(*) jeweils ausgedrückt in [Vol.-%] bzw. [ppm]	

Abbildung 36: Berechnung der korrigierten Schadstoffkonzentration für CO/CO<sub>2</sub>/HC/NO<sub>x</sub> nach ECE-R83 [75]

Um die tatsächlich vom Fahrzeug emittierte Konzentration der Abgasbestandteile zu berechnen wird die gemessene Konzentration der Schadstoffe in den verdünnten Abgasen um die gemessene Konzentration der Schadstoffe in der Verdünnungsluft – unter Berücksichtigung des Verdünnungsfaktors (DF) – reduziert.

Der Verdünnungsfaktor wird mit dem stöchiometrischen Faktor  $F_s$  (Abbildung 37) berechnet und variiert je nach eingesetztem Kraftstoff. Dieser ist für ROZ95 ( $F_s=13,4$ ) und CNG ( $F_s=9,5$ ) in der entsprechenden Richtlinie 2004/3/EG (80/1268/EWG) [164] definiert. Aus den Formeln (Gl.5), (Gl.6) und (Gl.7) lässt sich dieser stöchiometrische Faktor für die Verbrennung eines Kraftstoffs mit beliebiger Zusammensetzung  $C_xH_yO_z$  ableiten [164].

Das Ergebnis dieser Ableitung (Gl.18) ist in Abbildung 37 zusammengefasst.

<b>DF</b>	$DF = \frac{F_s}{C_{CO_2} + C_{HC} + C_{CO}} \quad (Gl.16)$
	$C_x H_y O_z + \left(x + \frac{y}{4} - \frac{z}{2}\right) \cdot (O_2 + 3,76 \cdot N_2) \rightarrow x \cdot CO_2 + \frac{y}{2} \cdot H_2O + 3,76 \cdot \left(x + \frac{y}{4} - \frac{z}{2}\right) \cdot N_2 \quad (Gl.17)$
	$F_s = \frac{x}{x + \frac{y}{2} + 3,76 \cdot \left(x + \frac{y}{4} - \frac{z}{2}\right)} \quad (Gl.18)$
<i>DF</i> ...	Verdünnungsfaktor
$C_{CO/CO_2/HC/O_x}$ ...	Konzentration des Schadstoffs CO/CO <sub>2</sub> /HC/NO <sub>x</sub> in den verdünnten Abgasen und korrigiert durch die Konzentration des Schadstoffs CO/CO <sub>2</sub> /HC/ NO <sub>x</sub> in der Verdünnungsluft <sup>(*)</sup>
$F_s$ ...	Stöchiometrischer Faktor [%]
	<sup>(*)</sup> jeweils ausgedrückt in [Vol.-%]

Abbildung 37: Berechnung des Verdünnungsfaktors und Herleitung des stöchiometrischen Faktors

In Tabelle 14 sind für die verwendeten Versuchskraftstoffe die Zahlenwerte der zugehörigen stöchiometrischen Faktoren angegeben um die Unterschiede zu verdeutlichen.

Tabelle 14: Berechnete stöchiometrische Faktoren für die Bezugskraftstoffe nach Verordnung 692/2008 [74]

Kraftstoff	Stöchiometrischer Faktor $F_s$ [%]
ROZ95	13,42
Ethanol	12,29
E5 (ROZ95 + 5% Ethanol)	13,42
E85 (ROZ95 + 85% Ethanol)	12,53
Erdgas (CNG) und Biomethan	9,51

Die emittierte Menge der gasförmigen Schadstoffe – Kohlenmonoxid (CO) bzw. Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und der unverbrannten Kohlenwasserstoffe (HC) – wird dann, wie in der nachstehenden Abbildung 38 (Gl.19) dargestellt, aus den gemessenen Konzentrationswerten [ppm] in eine Massenemission pro Kilometer [g/km] umgerechnet [155]:

<b>CO, CO<sub>2</sub>, HC</b>	$M_{CO/CO_2/HC} = \frac{V_{mix} \cdot Q_{CO/CO_2/HC} \cdot C_{CO/CO_2/HC} \cdot 10^{-6}}{d} \quad (Gl.19)$
$M_{CO/CO_2/HC}$ ...	emittierte Schadstoffmenge CO/CO <sub>2</sub> /HC [g/km]
$V_{mix}$ ...	Volumen der verdünnten Abgase ausgedrückt in l/Prüfung (*)
$Q_{CO/CO_2/HC}$ ...	Dichte des Schadstoffs CO/CO <sub>2</sub> /HC [g/l] (*)
$C_{CO/CO_2/HC}$ ...	Konzentration des Schadstoffs CO/CO <sub>2</sub> /HC in den verdünnten Abgasen und korrigiert durch die Schadstoffkonzentration in der Verdünnungsluft [ppm]
$d$ ...	zurückgelegte Fahrstrecke [km]
	(*) jeweils bei Normaltemperatur (273,15K) und Normaldruck (101,33kPa)

Abbildung 38: Berechnung der Emissionswerte in g/km für CO/CO<sub>2</sub>/HC nach ECE-R83 [75]

Aus der unterschiedlichen Zusammensetzung (C/H/O-Verhältnis) der verschiedenen Kraftstoffe (Tabelle 5 und Tabelle 9) ergeben sich in weiterer Folge unterschiedliche Dichtekoeffizienten ( $Q_{HC}$ ) für die HC-Emissionen. Diese sind in der Literatur beschrieben, wurden in der Verordnung 692/2008 [74] umgesetzt und in Tabelle 15 zusammengefasst [32].

Tabelle 15: Dichtekoeffizienten für die Kohlenwasserstoffe verschiedener Versuchskraftstoffe (bei 0°C, 1013mbar) [74], [32]

Kraftstoff	Dichtekoeffizient
ROZ95	0,619 g/l
E5 (ROZ95 + 5% Ethanol)	0,631 g/l
E85 (ROZ95 + 85% Ethanol)	0,932 g/l
Erdgas (CNG) und Biomethan	0,714 g/l

Für die Berechnung der Stickoxidemissionen (NO<sub>x</sub>) muss noch zusätzlich eine entsprechende Korrektur für die Luftfeuchtigkeit berücksichtigt werden (Abbildung 39). Bei dieser Umrechnung der gemessenen Abgasgrößen in die tatsächlich vorhandenen Abgaswerte handelt es sich um in der Abgasgesetzgebung (ECE-R83 [75]) festgesetzte Formel, die aus Zahlenwertgleichungen mit einigen physikalisch basierten Zusatztermen bestehen [165].

<b>NO<sub>x</sub></b>	$M_{NOx} = \frac{V_{mix} \cdot Q_{NOx} \cdot k_H \cdot C_{NOx} \cdot 10^{-6}}{d}$	(Gl.20)
<i>M<sub>NOx</sub></i> ...	emittierte Schadstoffmenge NO <sub>x</sub> [g/km]	
<i>V<sub>mix</sub></i> ...	Volumen der verdünnten Abgase ausgedrückt in l/Prüfung (*)	
<i>Q<sub>NOx</sub></i> ...	Dichte des Schadstoffs NO <sub>x</sub> [g/l] (*)	
<i>k<sub>H</sub></i> ...	Feuchtigkeitskorrekturfaktor für die Berechnung der emittierten Stickoxidemengen	
<i>C<sub>NOx</sub></i> ...	Konzentration des Schadstoffs NO <sub>x</sub> in den verdünnten Abgasen und korrigiert durch die Schadstoffkonzentration in der Verdünnungsluft [ppm]	
<i>d</i> ...	zurückgelegte Fahrstrecke [km]	
	(*) jeweils bei Normaltemperatur (273,15K) und Normaldruck (101,33kPa)	

Abbildung 39: Berechnung der Emissionswerte in g/km für NO<sub>x</sub> nach ECE-R83 [75]

Die Formel (Gl.19) wird dabei um den Faktor *k<sub>H</sub>* (ca. 0,8-1,2) ergänzt. Die Berechnung dieses Faktors aus den Umgebungsbedingungen während des Prüfzyklus ist in Abbildung 40 mit der Formel (Gl.21) dargestellt.

<b>k<sub>H</sub></b>	$k_H = \frac{1}{1 - 0,329 \cdot (H - 10,71)}$	(Gl.21)
	$H = \frac{6,211 \cdot R_a \cdot P_d}{P_B - P_d \cdot R_a \cdot 10^{-2}}$	(Gl.22)
<i>H</i> ...	absolute Feuchte, ausgedrückt in Gramm Wasser pro Kilogramm trockener Luft	
<i>R<sub>a</sub></i> ...	relative Feuchte der Umgebungsluft [%]	
<i>P<sub>d</sub></i> ...	Sättigungsdampfdruck bei Umgebungstemperatur [kPa]	
<i>P<sub>B</sub></i> ...	Luftdruck im Prüfraum [kPa]	

Abbildung 40: Berechnung der Feuchtekorrektur für NO<sub>x</sub> nach ECE-R83 [75]

#### 4.2.2. Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs mittels Kohlenstoffbilanz

Bei der Berechnung des Verbrauchs aus den Werten der gasförmigen Emissionen ist das geänderte C/H/O-Verhältnis der eingesetzten alternativen Kraftstoffe ebenso zu berücksichtigen. Abbildung 41 und Abbildung 42 zeigen die Ableitung der volumetrischen Verbrauchsberechnung für ROZ95 und CNG gemäß der relevanten Richtlinie 80/1268EG. Für ROZ95 wird, wie schon früher in Kapitel 3.3 beschrieben, ein Kohlenwasserstoff mit der Formel  $C_{8,26}H_{15,44}$  und für Erdgas reines Methan ( $CH_4$ ) verwendet [164], [166].

ROZ95	$FC = \frac{0,1154}{D} \cdot [0,866 \cdot THC + 0,429 \cdot CO + 0,273 \cdot CO_2] \quad (Gl.23)$
$FC$ ...	Kraftstoffverbrauch in l/100 km
$D$ ...	Dichte des Prüfkraftstoffs bei 15°C [kg/l]
$THC$ ...	gemessene Kohlenwasserstoffemission [g/km]
$CO$ ...	gemessene Kohlenmonoxidemission [g/km]
$CO_2$ ...	gemessene Kohlendioxidemission [g/km]
$CO \Rightarrow$	$\frac{1 \cdot 12}{1 \cdot 12 + 1 \cdot 16} \approx 0,429 \quad (Gl.24)$
$CO_2 \Rightarrow$	$\frac{1 \cdot 12}{1 \cdot 12 + 2 \cdot 16} \approx 0,273 \quad (Gl.25)$
$C_{8,26}H_{15,44} \Rightarrow$	$\frac{8,26 \cdot 12}{8,26 \cdot 12 + 15,44 \cdot 1} \approx 0,866 \quad (Gl.26)$
	$\frac{1}{ROZ95} = \frac{1}{C_{8,26}H_{15,44}} \approx 1,154 \quad (Gl.27)$
	$\rightarrow \cdot \frac{1}{10}$ wegen $\frac{\frac{l}{km} \rightarrow \frac{l}{100 km} (100)}{kg \rightarrow g (1000)} = 0,1154$

Abbildung 41: Berechnung des volumetrischen Kraftstoffverbrauchs von ROZ95

<b>CNG</b>	$FC = \frac{0,1336}{0,654} \cdot [0,749 \cdot THC + 0,429 \cdot CO + 0,273 \cdot CO_2]$	(Gl.28)
	<i>FC</i> ... Kraftstoffverbrauch in m <sup>3</sup> /100 km	
	0,654 ( <i>D</i> ) ... Dichte des Prüfkraftstoffs bei 15°C [kg/m <sup>3</sup> ]	
	<i>THC</i> ... gemessene Kohlenwasserstoffemission [g/km]	
	<i>CO</i> ... gemessene Kohlenmonoxidemission [g/km]	
	<i>CO<sub>2</sub></i> ... gemessene Kohlendioxidemission [g/km]	
	$CH_4 \Rightarrow \frac{1 \cdot 12}{\frac{1 \cdot 12 + 4 \cdot 1}{1}} \approx 0,749$	(Gl.29)
	$\frac{CNG}{CH_4} = \frac{1}{1} \approx 1,336$	(Gl.30)

Abbildung 42: Berechnung des volumetrischen Kraftstoffverbrauchs von CNG

Für den Reinstoff Ethanol (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) lässt sich die Kohlenstoffbilanz und somit die Formel für den volumetrischen Kraftstoffverbrauch in gleicher Weise errechnen (Abbildung 43).

<b>Ethanol</b>	$FC = \frac{0,1916}{0,789} \cdot [0,522 \cdot THC + 0,429 \cdot CO + 0,273 \cdot CO_2]$	(Gl.31)
	<i>FC</i> ... Kraftstoffverbrauch in l/100 km	
	0,789 ( <i>D</i> ) ... Dichte des Prüfkraftstoffs bei 15°C [kg/l]	
	<i>THC</i> ... gemessene Kohlenwasserstoffemission [g/km]	
	<i>CO</i> ... gemessene Kohlenmonoxidemission [g/km]	
	<i>CO<sub>2</sub></i> ... gemessene Kohlendioxidemission [g/km]	
	$C_2H_5OH \Rightarrow \frac{2 \cdot 12}{\frac{2 \cdot 12 + 6 \cdot 1 + 1 \cdot 16}{1}} \approx 0,522$	(Gl.32)
	$\frac{EtOH}{C_2H_5OH} = \frac{1}{1} \approx 1,916$	(Gl.33)

Abbildung 43: Berechnung des volumetrischen Kraftstoffverbrauchs von Ethanol

In gleicher Weise sind in Abbildung 44 und Abbildung 45 als Berechnungsbeispiele die volumetrischen Verbrauchsformeln für die Ethanol-Blends E5 und E85 hergeleitet. Für die Ethanol-Blends werden zu diesem Zweck in den Formeln (Gl.35) und (Gl.36) bzw. (Gl.39) und (Gl.40) eine entsprechende Mischung aus ROZ95 und Ethanol gebildet.

<b>E5</b>	$FC = \frac{0,1179}{D} \cdot [0,848 \cdot THC + 0,429 \cdot CO + 0,273 \cdot CO_2]$	(Gl.34)
	<p><i>FC</i> ... Kraftstoffverbrauch in l/100 km  <i>D</i> ... Dichte des Prüfkraftstoffs bei 15°C [kg/l]  <i>THC</i> ... gemessene Kohlenwasserstoffemission [g/km]  <i>CO</i> ... gemessene Kohlenmonoxidemission [g/km]  <i>CO<sub>2</sub></i> ... gemessene Kohlendioxidemission [g/km]</p>	
	<p><i>E5</i> ⇒ 95 Vol.-% = 94,58% ⇒ C<sub>8,26</sub>H<sub>15,44</sub> (≈0,866)          5 Vol.-% = 5,42% ⇒ C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH (≈0,522)          0,9458 · 0,866 + 0,0542 · 0,522 ≈ 0,848</p>	(Gl.35)
	$C_1H_{1,89}O_{0,016} \Rightarrow \frac{12}{1 \cdot 12 + 1,89 \cdot 1 + 0,016 \cdot 16} \approx 0,848$	(Gl.36)
	$\frac{1}{E5} = \frac{1}{CH_{1,89}O_{0,016}} \approx 1,179$	(Gl.37)

Abbildung 44: Berechnung des volumetrischen Kraftstoffverbrauchs von E5

<b>E85</b>	$FC = \frac{0,1742}{D} \cdot [0,574 \cdot THC + 0,429 \cdot CO + 0,273 \cdot CO_2]$	(Gl.38)
	<p><i>FC</i> ... Kraftstoffverbrauch in l/100 km  <i>D</i> ... Dichte des Prüfkraftstoffs bei 15°C [kg/l]  <i>THC</i> ... gemessene Kohlenwasserstoffemission [g/km]  <i>CO</i> ... gemessene Kohlenmonoxidemission [g/km]  <i>CO<sub>2</sub></i> ... gemessene Kohlendioxidemission [g/km]</p>	
	<p><i>E85</i> ⇒ 15 Vol.-% = 14,25% ⇒ C<sub>8,26</sub>H<sub>15,44</sub> (≈0,866)          85 Vol.-% = 85,75% ⇒ C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH (≈0,522)          0,1425 · 0,866 + 0,8575 · 0,522 ≈ 0,574</p>	(Gl.39)
	$C_1H_{2,74}O_{0,385} \Rightarrow \frac{12}{1 \cdot 12 + 2,74 \cdot 1 + 0,385 \cdot 16} \approx 0,574$	(Gl.40)
	$\frac{1}{E85} = \frac{1}{CH_{2,74}O_{0,385}} \approx 1,742$	(Gl.41)

Abbildung 45: Berechnung des volumetrischen Kraftstoffverbrauchs von E85

In Abbildung 46 werden die Ergebnisse der Berechnungen und Ableitungen aus diesem Kapitel und Kapitel 3.3 nochmals zusammengefasst. Es zeigt sich deutlich, dass der volumetrische und auch der massebezogene Kraftstoffverbrauch für den E85-Kraftstoff (genauso wie für reines Ethanol) deutlich zunehmen. An der Tankstelle bedeutet das in Litern ca. 40% mehr E85-Verbrauch als bei einem konventionellem Fahrzeug mit Ottomotor bei gleichen CO<sub>2</sub>-Emissionen. Der geringfügig um fast 4% höhere Energieinhalt von E85 gegenüber ROZ95 bei gleicher CO<sub>2</sub>-Emission lässt diesen genannten Mehrverbrauch noch etwas geringer ausfallen und ist darin noch nicht berücksichtigt. Außerdem unberücksichtigt sind motorische, den Wirkungsgrad steigernde Maßnahmen, die sich durch die Kraftstoffeigenschaften von Ethanol z. B. durch die höheren Oktanzahlen ergeben [167].

In der Richtlinie 2004/3/EG (80/1268/EWG) [164] waren die definierten Normkraftstoffe noch reine fossile Kraftstoffe. Durch die Verwendung von Kraftstoffen mit biogenem Anteil wird somit auch die Definition von entsprechenden Normkraftstoffen notwendig. In weiterer Folge müssen die gezeigten Formeln für die Berechnung des Kraftstoffverbrauches in den Richtlinien und Verordnungen angepasst bzw. ergänzt werden (Verordnung 692/2008 [74]).

	Einheit	ROZ95	EtOH	E5	E85	CNG
Kraftstoffmenge in kg	kg/kg CO <sub>2</sub>	0,315	0,524	0,316	0,474	0,364
Kraftstoffmenge in l	l/kg CO <sub>2</sub>	0,425	0,664	0,420	0,602	-
Kraftstoffmenge in MJ	MJ/kg CO <sub>2</sub>	13,27	14,06	13,12	13,78	17,23

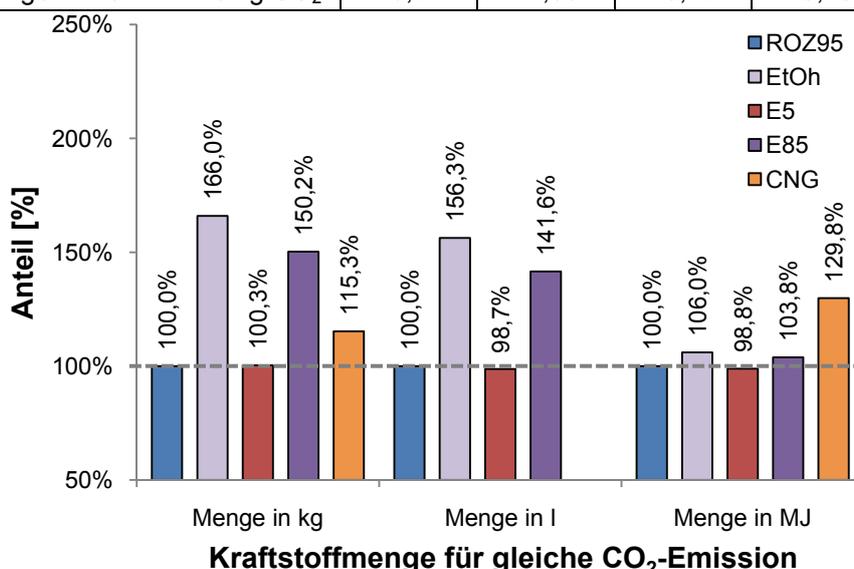


Abbildung 46: Kraftstoffmenge (in Masse /Volumen /Energie) der Versuchskraftstoffe für die gleiche CO<sub>2</sub>-Emissionsmenge

## 5. Versuchsumfänge und untersuchte Fahrzeuge

### 5.1. Fahrzyklen

Das Testverfahren und die Auslegung von Fahrzyklen haben einen entscheidenden Einfluss auf die Abgasemissionen bei der Zertifizierung eines Fahrzeugs. Der Fahrzyklus sollte einigermaßen repräsentativ für das reale Fahrverhalten sein. In Europa wird der Neue Europäische Fahrzyklus (NEFZ) für Abgas-, Verbrauchs- und Kalttests verwendet. Zurzeit sind weltweit mehrere in Fahrprofil, Dauer und Kaltstarttemperatur unterschiedliche Fahrzyklen (NEFZ, FTP) gesetzlich vorgeschrieben.

Insgesamt sind beim Pkw verschiedene Bausteine an Prüfungen zu erfüllen [168].

- *Typ I* Auspuffemissionen nach dem Kaltstart (siehe Kapitel 5.1.1)
- *Typ II* Emissionen von Kohlenmonoxid im Leerlauf
- *Typ III* Gasemissionen aus dem Kurbelgehäuse
- *Typ IV* Verdunstungsemissionen
- *Typ V* Dauerhaltbarkeit der emissionsmindernden Einrichtungen
- *Typ VI* Kaltstartemissionen bei niedrigen Temperaturen (siehe Kapitel 5.1.2)
- *OBD*

Der für die Typprüfung verwendete NEFZ deckt die meisten der im realen Fahrbetrieb vorkommenden Fahrzustände ab. Mit seinem eher normativen Charakter ist er aber kein direktes Abbild eines realen Fahrbetriebs. Für eine erste Einstufung der Fahrkurve ist die Durchschnittsgeschwindigkeit, die geeignete Größe. Die NEFZ-Fahrkurve ist ausgesprochen „langsam“. Die geringere durchschnittliche Geschwindigkeit ist dabei nicht nur auf eine langsamere Fahrweise zurückzuführen, sondern ist auch Folge der höheren Standzeitanteile. Der NEFZ weist im Vergleich zu anderen Normfahrzyklen mit deutlichem Abstand die höchsten Anteile für Stillstands- und Konstantfahrphasen auf. Für Luftqualitäts-Modellierungen wird jedoch angestrebt, die Realität möglichst 1:1 abzubilden. Im Rahmen des europäischen Luftreinhaltungsprogramms CAFE (Clean Air for Europe) wurden daher die aktuellen Fahrzustände in Europa aufgenommen und bewertet. Der Common Artemis Driving Cycle (CADC) ist das Resultat dieser aufwendigen Untersuchung (siehe Kapitel 5.1.3) [169].

### 5.1.1. NEFZ Typ I

Der Europäische Fahrzyklus zur Prüfung der Abgasemissionen nach einem Kaltstart (Umgebungstemperatur 20-30°C) wird gemäß der Richtlinie 2006/96/EG (70/220/EWG) in der letztgültigen Fassung durchgeführt. Der NEFZ hat den Stadt- und Autobahnbetrieb in einem Zyklus und deckt die Abgas- und Verbrauchsmessung komplett ab. Er besteht aus 4 Grundstadtfahrzyklen (ECE, Stadtfahrzyklus) und einem außerstädtischen Fahrzyklus (EUDC, Extra Urban Driving Cycle). In Abbildung 47 ist das Geschwindigkeitsprofil des Fahrzyklus dargestellt [155].

	Einheit	ECE (Innerstädtischer Teil)	EUDC (Außerstädtischer Teil)
Zyklusdauer	s	780	400
Wegstrecke	km	4,052	6,955
Ø-geschwindigkeit	km/h	18,7	62,6

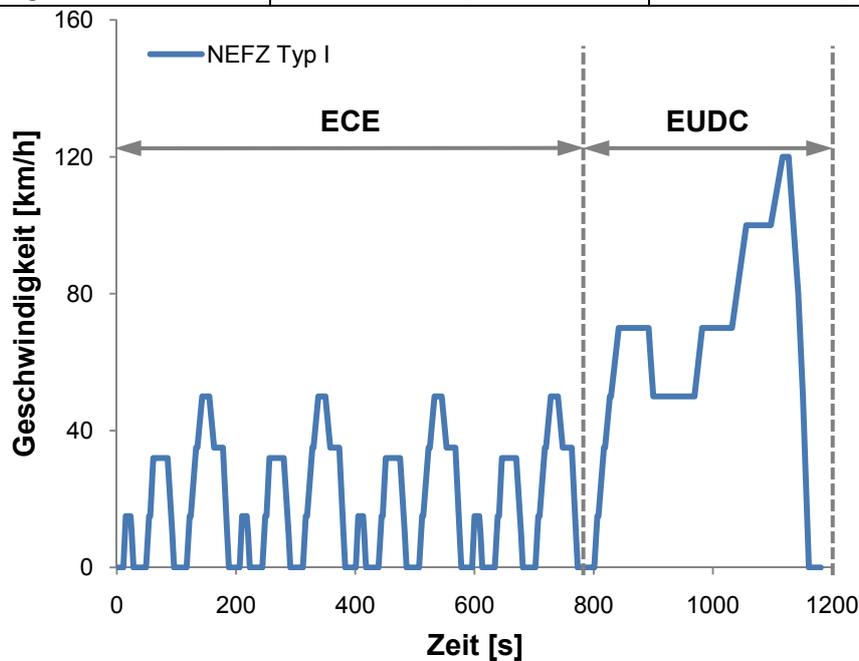


Abbildung 47: Geschwindigkeitsprofil für den NEFZ Typ I [75], [169]

### 5.1.2. NEFZ Typ VI

Der Europäische Fahrzyklus zur Prüfung der Abgasemissionen nach einem Kaltstart (Umgebungstemperatur -7°C) wird gemäß der Richtlinie 70/220/EWG [66] in der letztgültigen Fassung [155] durchgeführt. Dieser besteht aus den 4 Grundstadtfahrzyklen und entspricht der Phase 1 des NEFZ Typ I.

Das Geschwindigkeitsprofil des Fahrzyklus ist in Abbildung 48 dargestellt.

	Einheit	ECE (Innerstädtischer Teil von NEFZ Typ I)
Zyklusdauer	s	780
Wegstrecke	km	4,052
Ø-geschwindigkeit	km/h	18,7

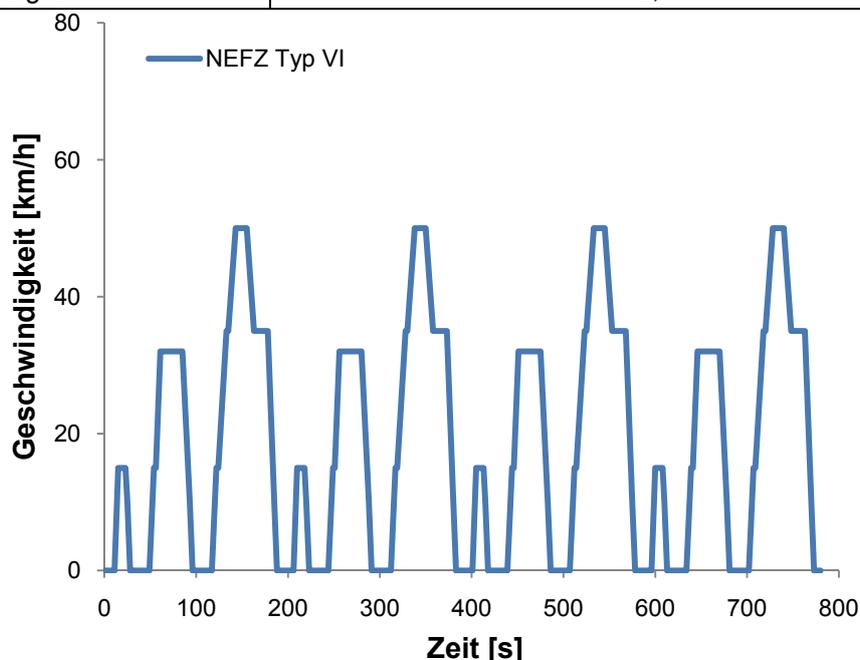


Abbildung 48: Geschwindigkeitsprofil für den NEFZ Typ VI [75], [169]

### 5.1.3. Artemis CADC

Ergänzend zu der Erfassung der Emissionen in diesem Typprüfzyklus erfolgt eine Bewertung in einem so genannten „real world driving cycle“. Im Rahmen des Projektes ARTEMIS (Assessment and Reliability of Transport Emission Modeling and Inventories im 5. EU-Forschungsprogramm) wurde ein einheitliches Messprogramm, der CADC (Common Artemis Driving Cycle) entwickelt. Hierzu wurde das Verkehrsverhalten von Personen in Frankreich, Deutschland, England, Griechenland und der Schweiz aufgezeichnet. Neben einer realitätsnahen Fahrdynamik und Motorleistung ist der ARTEMIS Testzyklus auch durch deutlich höhere Motordrehzahlen als der NEFZ charakterisiert. Ein wichtiges Ergebnis der ARTEMIS-Arbeit war u. a. die Erkenntnis, dass die Getriebeschaltpunkte einen wesentlichen Einfluss auf die Abgasemissionen haben und die festen Getriebeschaltpunkte der gesetzlichen Fahrzyklen nicht mit der Realität übereinstimmen. Um die Anzahl der Getriebeschaltstrategien zu limitieren, wurden 4 Schaltstrategien in Abhängigkeit der

Fahrzeugleistungsdaten festgelegt. In diesen Fahrzyklen wurden bereits über 200 Pkw bei Partnern innerhalb der EU vermessen. Daher ist es möglich Quervergleiche mit Daten aus bereits vorhandenen Messergebnissen zu ziehen [169].

Wie das Geschwindigkeitsprofil (Abbildung 49) zeigt, ist der Common ARTEMIS Driving Cycle (CADC) ein realitätsnaher Zyklus, ist eher dynamisch ausgelegt und repräsentiert ein durchschnittliches europäisches Fahrverhalten für Personenwagen. Der 52-minütige Fahrzyklus unterteilt sich in 3 Teilzyklen – innerorts, außerorts und Autobahn (urban/road/motorway) – die hintereinander durchfahren wurden. Für den "motorway"-Anteil gibt es 2 Varianten, nämlich die hier gezeigt mit  $v_{\max}=130\text{km/h}$  und eine mit  $v_{\max}=150\text{km/h}$  [170], [171], [172].

	Einheit	CADC urban	CADC road	CADC motorway
Zyklusdauer	s	993	1081	1064
Wegstrecke	km	4,8	17,3	28,7
Ø-geschwindigkeit	km/h	17,6	57,2	96,9

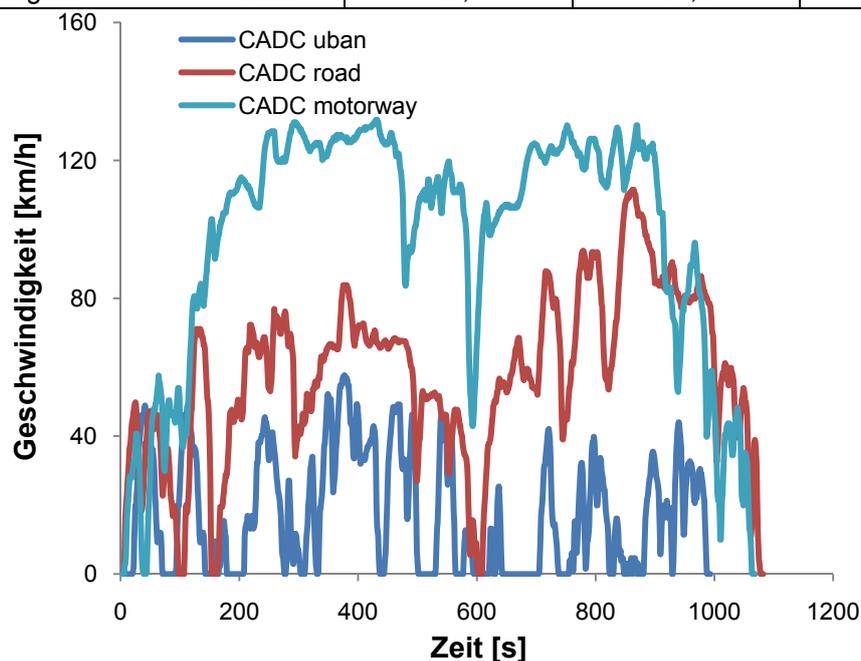


Abbildung 49: Geschwindigkeitsprofil den CADC (urban/road/motorway) [169], [171]

Der Zyklus wird mit betriebswarmem Motor gestartet. Um ähnliche Bedingungen zu gewährleisten wurde er unmittelbar nach dem NEFZ Typ I durchgeführt. Außerdem wurde vor jedem Zyklusteil eine Konditionierphase von 3 Minuten mit der jeweiligen Durchschnittsgeschwindigkeit des Prüflaues absolviert.

## 5.2. Fahrzeuge

Als Ziel dieser Arbeit wurde unter anderem der Erkenntnisgewinn über das Emissionsverhalten von verschiedenen „Stand der Technik“-Motorkonzepten (jeweils 5 Fahrzeuge im Ethanol- bzw. Gasbetrieb) bei Verwendung flüssiger und gasförmiger alternativer Ottokraftstoffe definiert. Von den fünf Fahrzeugen, die mit unterschiedlichen Ethanolmischungen betrieben wurden, waren drei konventionelle und zwei sogenannte Flexible Fuel Fahrzeuge (FFV).

In Tabelle 16 sind die Kenndaten der fünf Ethanolfahrzeuge zusammengefasst.

Tabelle 16: Daten der Bioethanol Versuchsfahrzeuge

	KFZ-01	KFZ-02	KFZ-03	KFZ-04	KFZ-05
FFV	JA	JA	-	-	-
Motorisierung	4-Zylinder-Ottomotor				
Direkteinspritzung	-	-	-	JA	JA
Aufladung	-	JA	-	JA	JA
Hubraum	1798 cm <sup>3</sup>	1985 cm <sup>3</sup>	1595 cm <sup>3</sup>	1390 cm <sup>3</sup>	1984 cm <sup>3</sup>
max. Leistung/Drehzahl (ROZ95)	92 kW / 6000 min <sup>-1</sup>	110 kW / 5500 min <sup>-1</sup>	75 kW / 5600 min <sup>-1</sup>	125 kW / 6000 min <sup>-1</sup>	147 kW / 5100 min <sup>-1</sup>
max. Leistung/Drehzahl (E85)	92 kW / 6000 min <sup>-1</sup>	137 kW / 5500 min <sup>-1</sup>	-	-	-
Kraftstoff	mind. 91 ROZ	mind. 95 ROZ	mind. 91 ROZ	mind. 95 ROZ	mind. 95 ROZ
Abgasnachbehandlung	Geregelter 3-Wege-Katalysator				
Abgasklasse	Euro 4				
Leergewicht	1276 kg	1545 kg	1269 kg	1371 kg	1417 kg
Schwungmassenklasse	1360 kg	1700 kg	1360 kg	1470 kg	1470 kg
Getriebe	5-Gang	5-Gang Automatik	5-Gang	6-Gang Automatik	

Die Ergebnisse, die im Rahmen von Kapitel 6 gezeigt werden, kamen während eines Projekts zustande, das im Rahmen eines Flottentests die Auswirkungen von Ethanol in verschiedenen Blendanteilen auf Emissionen, Kaltstart, Praxistauglichkeit usw. zeigen sollte. Für die konventionellen Fahrzeuge wurde jeweils eine Fahrleistung über 8.000-10.000km mit den Versuchskraftstoffen E5 und E10 definiert. Für die FFVs wurden ebenfalls je ein Flottentestteil über 8.000-10.000km mit E5 und mit E85 vorgesehen [166].

Insgesamt konnten dabei mit den 5 Fahrzeugen und mit den verschiedenen Ethanol-Blends über 100.000km Fahrstrecke zurückgelegt werden (Abbildung 50).

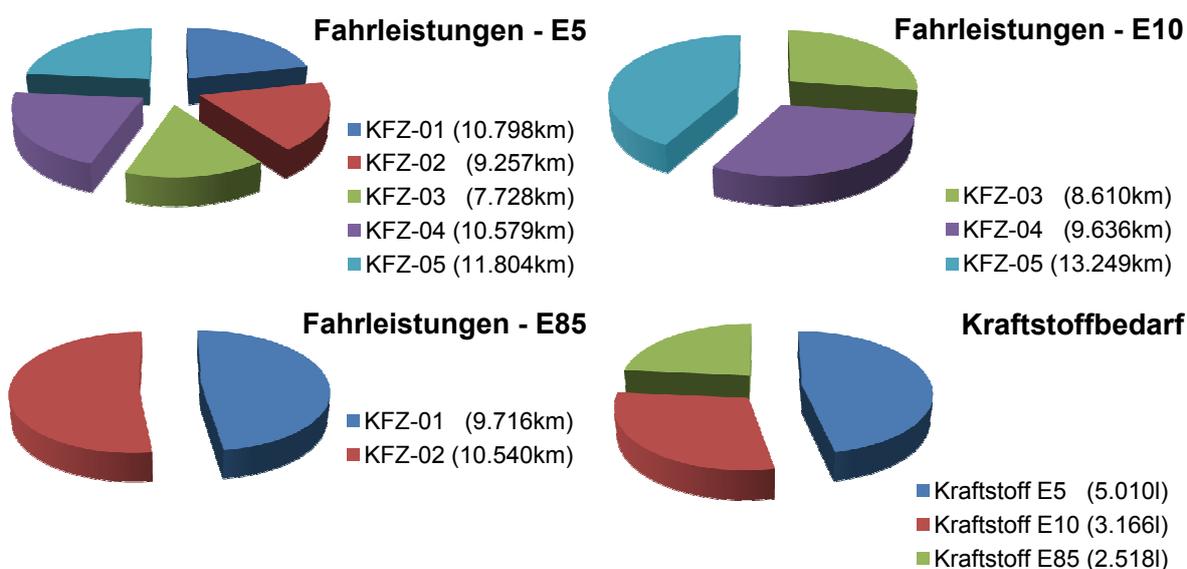


Abbildung 50: Flottentest Bioethanol-Fahrzeuge

Außerdem wurden fünf erdgasbetriebene Pkw am Rollenprüfstand vermessen. In Tabelle 17 sind die Kenndaten der fünf Gasfahrzeuge dargestellt.

Tabelle 17: Daten der Biogas/CNG Versuchsfahrzeuge

	KFZ-06	KFZ-07	KFZ-08	KFZ-09	KFZ-10
Typisierung	CNG	ROZ95	ROZ95	ROZ95	CNG
Motorisierung	4-Zylinder-Ottomotor				
Direkteinspritzung	-	-	-	-	-
Aufladung	-	-	X	-	-
Hubraum	1598 cm <sup>3</sup>	1360 cm <sup>3</sup>	1796 cm <sup>3</sup>	2435 cm <sup>3</sup>	1984 cm <sup>3</sup>
max. Leistung/Drehzahl (ROZ95)	-	55 kW / 5500 min <sup>-1</sup>	120 kW / 5500 min <sup>-1</sup>	103 kW / 4500 min <sup>-1</sup>	-
max. Leistung/Drehzahl (CNG)	69 kW / 6200 min <sup>-1</sup>	50 kW / 5500 min <sup>-1</sup>	120 kW / 5500 min <sup>-1</sup>	103 kW / 5800 min <sup>-1</sup>	80 kW / 5400 min <sup>-1</sup>
Kraftstoff	mind. 91 ROZ	mind. 95 ROZ	mind. 91 ROZ	mind. 95 ROZ	mind. 95 ROZ
Abgasnachbehandlung	Geregelter 3-Wege-Katalysator				
Abgasklasse	Euro 4				
Leergewicht	1590 kg	1108 kg	1690 kg	1514 kg	1675 kg
Schwungmassenklasse	1700 kg	1250 kg	1810 kg	1590 kg	1810 kg
Getriebe	5-Gang	5-Gang	5-Gang Automatik	5-Gang	5-Gang

Bei den Untersuchungen wurde ein breites Spektrum an Fahrzyklen am Rollenprüfstand abgedeckt. Neben den gesetzlichen Fahrkurven wurden für die vorliegende Untersuchung auch sogenannte „real world driving cycle“ gefahren, die

aus einer statistischen Auswertung von Fahrverhaltensuntersuchungen des täglichen Verkehrs abgeleitet wurden und verschiedene, straßentyp- und verkehrsdichteabhängige Fahrmuster Innerorts, Außerorts und auf Autobahnen abbilden. Tabelle 18 gibt eine Übersicht über die mit jedem Fahrzeug gefahrenen Prüfzyklen.

Tabelle 18: Prüfzyklen Biogas/CNG Versuchsfahrzeuge

	KFZ-06	KFZ-07	KFZ-08	KFZ-09	KFZ-10
NEFZ Typ IV	X	X	X	X	X
NEFZ Typ I	X	X	X	X	X
FTP 75	X	X	X	X	X
IUFC 15	X	X	X	X	X
CADC urban/road/motorway	X/X/X	X/X/X	X/X/X	X/X/X	X/X/X
BUWAL Ra	X	X	X	X	X
BUWAL Rb	X	X	X	X	X
BAB	X	X	X	X	X

Für Auswertungen im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit werden allerdings ausschließlich der zur Zertifizierung relevante Neue Europäische Fahrzyklus (NEFZ Typ I und Typ VI) sowie die „Real-World“-Zyklus (CADC urban/road/motorway) herangezogen, um die Ergebnisse auch mit den Fahrzeugen aus dem Bioethanol-Flottentest in Verbindung bringen zu können. Diese Fahrzyklen wurden bereits detailliert in Kapitel 5.1 vorgestellt.

Für die Fahrzeuguntersuchungen am Rollenprüfstand kamen die in Kapitel 3.2.1 vorgestellten Bioethanol-Blends sowie CNG zum Einsatz. Aufgrund der – wie schon in Kapitel 3.2.2 gezeigt – weitgehend identischen Kraftstoffeigenschaften von CNG und Biogas, wurden sämtliche Gasfahrzeuge mit CNG vermessen. Untersuchungen am Motorprüfstand haben gezeigt, dass die Ergebnisse bei Biogas97-Betrieb mit denen beim CNG-Betrieb identisch sind [148], [149].

Die Fahrzeuge – jeweils Emissionsklasse EURO 4 – wurde bezüglich Hubraum, Herstellungsland, Karosserieform und Getriebeart so gewählt, dass sie für die Fahrzeugflotte repräsentativ sind. In der Folge bieten die Ergebnisse dieser Arbeit den angestrebten repräsentativen und umfassenden Überblick über die Auswirkungen des Einsatzes von verfügbaren alternativen Ottokraftstoffen auf das Emissionsverhalten.

## 6. Ergebnisse beim motorischen Betrieb

Im folgenden Kapitel wird auf die Untersuchungen am Rollenprüfstand eingegangen. Grundlage bilden die Emissionsergebnisse der bereits in Kapitel 5.1 vorgestellten Fahrzyklen. Wie bereits beschrieben wurden der Neue Europäische Fahrzyklus NEFZ Typ VI (Kaltstart bei  $-7^{\circ}\text{C}$ ) und Typ I (Kaltstart bei  $20^{\circ}\text{C}$ ) sowie der Common Artemis Driving Cycle (CADC) gefahren [155], [171].

### 6.1. Bioethanol

Bei den mit Ethanol-Blends betriebenen Fahrzeugen wurden die Prüfzyklen immer in derselben Reihenfolge durchgeführt um für die verschiedenen Versuchskraftstoffe gleiche Prüfbedingungen gewährleisten und einen identen Konditionierungszustand darstellen zu können (Abbildung 51).

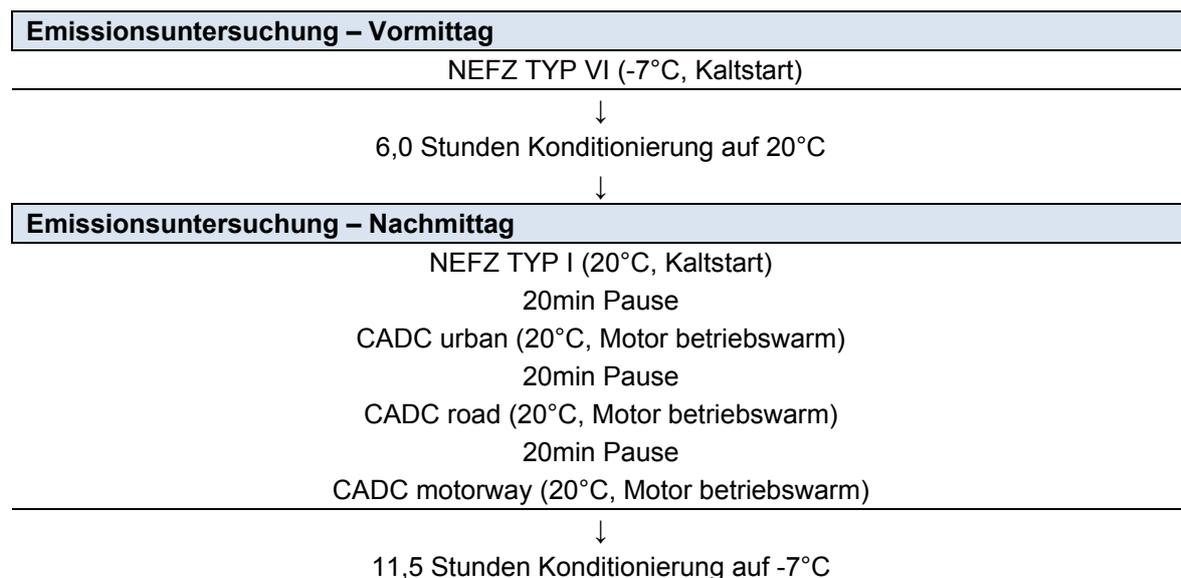


Abbildung 51: Messprogramm für die Emissionsuntersuchungen – „1Tag, 1 Kraftstoff“ [97], [131]

#### 6.1.1. $\text{CO}_2$ -Emissionen und Wirkungsgrad

In Abbildung 52 und Abbildung 53 sind die Ergebnisse der  $\text{CO}_2$ -Emissionen beispielhaft für ein konventionelles Fahrzeug (KFZ-03, betrieben mit ROZ95-, E5 und E10-Kraftstoff) sowie für ein Flexible Fuel Vehicle (KFZ-02, betrieben mit ROZ95-, E5 und E85-Kraftstoff) dargestellt.

	Einheit	ROZ95	E5	E10
NEFZ Typ VI	g/km	259,2	259,0	256,2
NEFZ Typ I	g/km	180,8	179,9	178,0
CADC	g/km	167,5	166,3	165,3

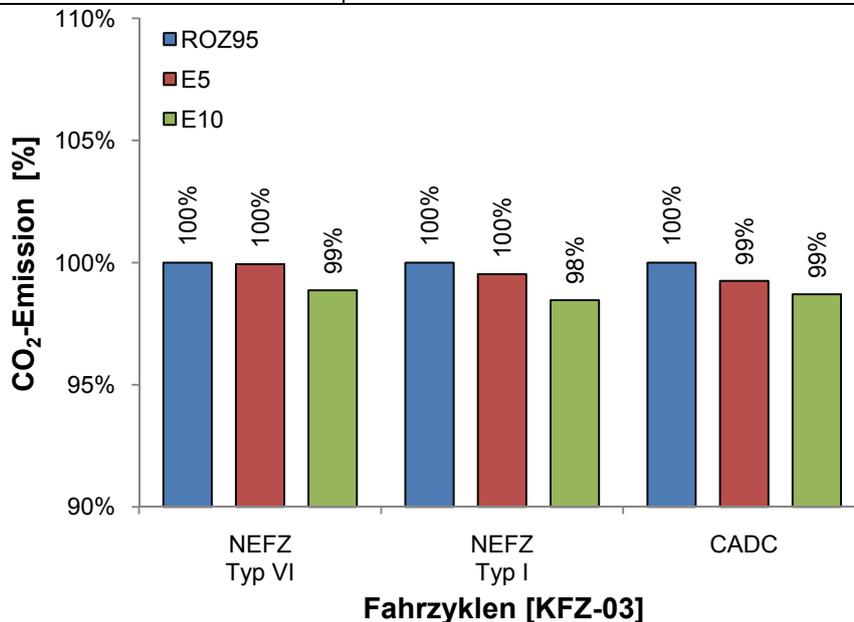


Abbildung 52: CO<sub>2</sub>-Emissionen beim Betrieb eines konventionellen Fahrzeugs mit verschiedenen Ethanol-Blends

	Einheit	ROZ95	E5	E85
NEFZ Typ VI	g/km	450,8	451,5	414,3
NEFZ Typ I	g/km	250,1	249,0	236,9
CADC	g/km	194,7	196,4	186,0

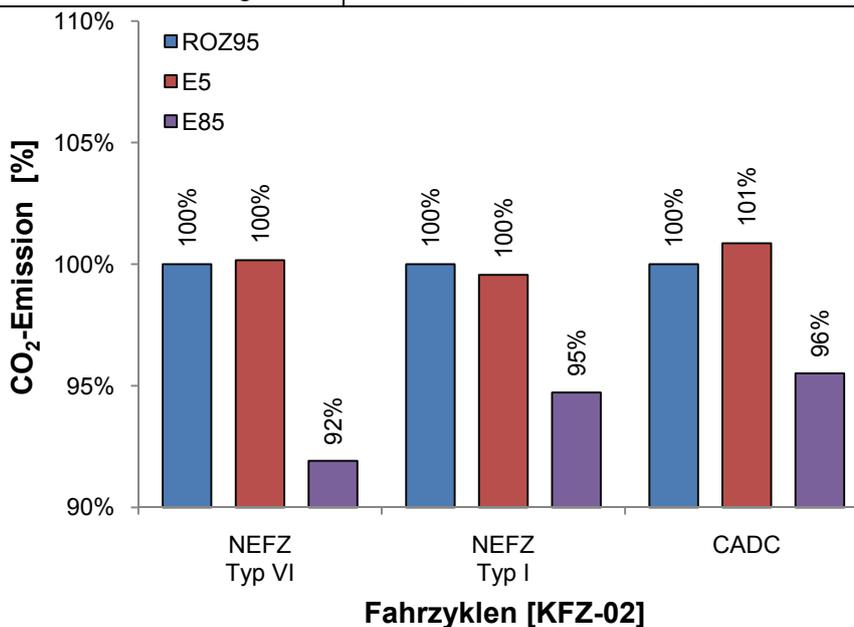


Abbildung 53: CO<sub>2</sub>-Emissionen beim Betrieb eines Flexible Fuel Fahrzeuges mit verschiedenen Ethanol-Blends

Die Ergebnisse zeigen bei einem steigenden Anteil an Ethanolbeimischung einen Trend zu geringeren CO<sub>2</sub>-Werten. Die Werte sind immer bezogen auf den „Referenzkraftstoff“ ROZ95. Für den E85-Kraftstoff ergibt sich – je nach Fahrzyklus – eine Absenkung der CO<sub>2</sub>-Emission zwischen 4% und 8%. Dies wird einerseits durch das geänderte C/H/O-Verhältnis von E85 (wie schon Kapitel 3.3.2 gezeigt) bewirkt.

Die Absenkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen, die über das kraftstoffseitige Potenzial durch das geänderte C/H/O-Verhältnis hinausgeht, ergibt sich andererseits durch eine raschere Energieumsetzung mit steigendem Ethanolanteil und somit steigendem Wirkungsgrad sowohl bei Teillast als auch bei hohen Lasten. Um die Auswirkungen auf das Betriebsverhalten von modernen Ottomotoren zu zeigen und die bereits dargestellten Verbesserungen zu erklären, ist es notwendig Teillast- und Volllastergebnisse von Untersuchungen am Motorenprüfstand mit verschiedenen Benzin/Ethanolgemischen bis zu E85 zu betrachten [30], [166], [173], [174].

Dabei kam ein Versuchsträger zum Einsatz, der auch in einem Flottentestfahrzeug (KFZ-04) betrieben wurde. Bei dem Konzept handelt es sich (wie schon in Kapitel 5.2 dargestellt) um einen aufgeladenen direkteinspritzenden Motor.

- *Teillast*

In den folgenden Abbildungen sind Messergebnisse für drei charakteristische Teillastpunkte ausgewertet. Der Verlauf der dargestellten Messwerte kann über den Ethanolgehalt anschaulich dargestellt werden. Aufgrund des geringeren Heizwertes von Ethanol gegenüber Benzin steigt der massebezogene, spezifische Kraftstoffverbrauch in der Teillast merkbar an (Abbildung 54).

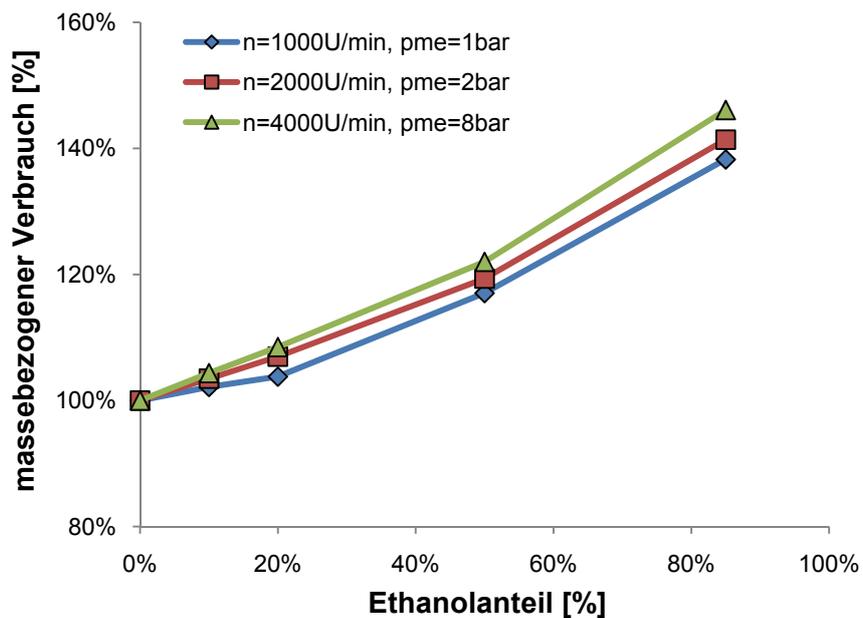


Abbildung 54: Massebezogener Kraftstoffverbrauch über dem Ethanolanteil [166], [31]

Betrachtet man den spezifischen Kraftstoffverbrauch jedoch energetisch, konnten in der Teillast allerdings Vorteile festgestellt werden. Wie in [Abbildung 55](#) erkennbar, konnte speziell bei niedrigen Drehzahlen und Lasten eine Verbesserung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs bezogen auf Energie von bis zu 5% erzielt werden. Dies ist vor allem auf eine raschere Energieumsetzung mit steigendem Ethanolanteil im Kraftstoff zurückzuführen [166], [31].

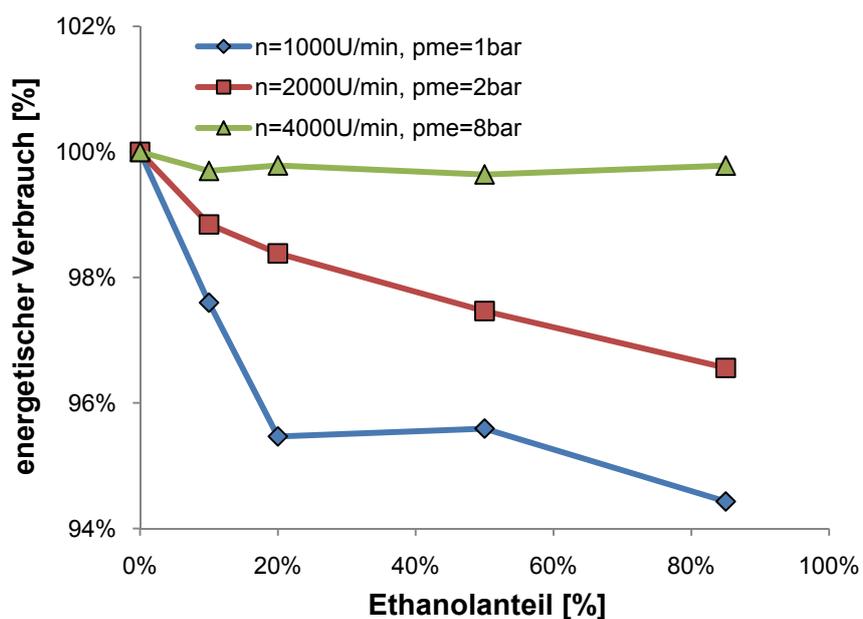


Abbildung 55: Energiebezogener Kraftstoffverbrauch über dem Ethanolanteil [166], [31]

Die angeführten Abbildungen zeigen bereits deutlich das Potenzial des E85-Kraftstoffes hinsichtlich Effizienz- und Emissionsverhalten.

Ein zusätzlicher Erkenntnisgewinn sowie ein besseres Verständnis für die Wirkmechanismen beim Einsatz von Ethanol in einem direkteinspritzenden Ottomotor kann durch die Betrachtung einer Verlustteilung (Abbildung 56) gewonnen werden. Der Gleichraumprozess dient als Grundlage dieses Verlustmodells, welches aus der Literatur übernommen wurde [31], [175], [176].

Ausgehend davon werden die einzelnen Wirkungsgradverluste beschrieben und berechnet:

- *Thermischer Wirkungsgrad*

Aus dem Verdichtungsverhältnis des Motors ergibt sich für den thermischen Wirkungsgrad des Gleichraumprozesses, der eine motorfeste Größe darstellt,  $\eta_{th}=59,8\%$  [177], [178].

- *Verlust aus Reibleistung und Ladungswechsel*

Die indizierte Reib- bzw. Ladungswechselleistung kann aus dem gemessenen Zylinderdruckverlauf berechnet und anschließend auf die eingebrachte Kraftstoffenergie bezogen werden.

- *Wandwärmeverluste*

Dieser Verlustteil resultiert aus dem konvektiven Wärmeübergang an den Brennraumwänden und wird mit dem Ansatz von Woschni bestimmt. Der Verlauf der Gastemperatur lässt sich aus dem mittels der Druckindizierung gemessenen Zylinderdruck ermitteln. Mit der Temperatur im Brennraum kann der Wärmeübergang in Abhängigkeit des Kurbelwinkels abgebildet werden [179].

- *Verluste durch unvollkommene Verbrennung*

Die reale Verbrennung des eingesetzten Kraftstoffs ist unvollständig und unvollkommen. Die Umsetzung erfolgt also nicht bis zum theoretisch erreichbaren chemischen Gleichgewicht. Aus den Abgasmassen der HC- und CO-Emissionen kann mithilfe der zugehörigen Heizwerte die emittierte Verlustenergie berechnet werden [180], [181].

- *Verluste durch die reale Verbrennung (Brenndauer und Schwerpunktslage)*

Bei einem idealen Prozess wird davon ausgegangen, dass die gesamte Energie im oberen Totpunkt freigesetzt wird. In einem nächsten Schritt wird nun die isochore Wärmefreisetzung in den Brennverlaufsschwerpunkt (50%-Umsatzpunkt) verschoben. Dieser liegt zumeist nach dem oberen Totpunkt und ergibt einen Verlust resultierend aus einem verminderten effektiven Verdichtungsverhältnis [175].

- *Verluste durch die reale Ladung*

Bei der Berechnung des thermischen Wirkungsgrades wird von einem Polytropenexponenten von  $\kappa=1,4$  für Luft ausgegangen. Der tatsächliche Wert liegt durch die Zusammensetzung des Gemisches allerdings niedriger und führt damit zu einem Wirkungsgradnachteil. Der Polytropenexponent sinkt aufgrund von Restgas sowie durch die erhöhten Temperatur- und Druckwerte im Zylinder weiter ab.

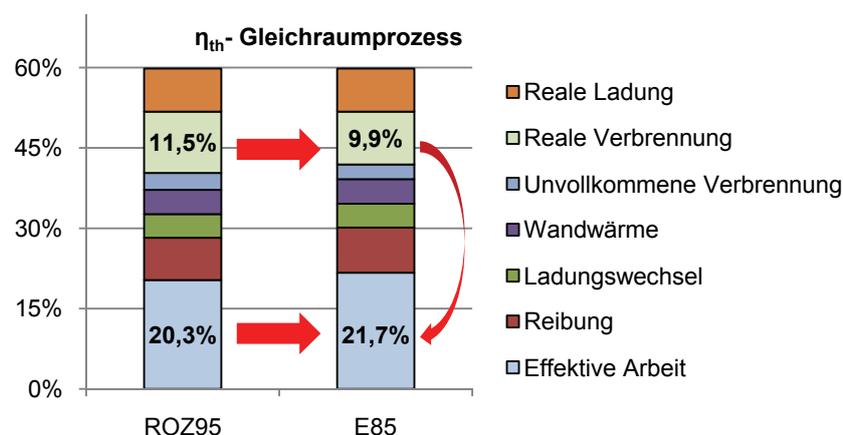


Abbildung 56: Verlustteilung für einen Teillastpunkt ( $2000\text{min}^{-1}$ , 2bar)

Die Ergebnisse einer Verlustteilung zeigen für den E85-Betrieb im Falle des Teillastpunkts eine Verringerung bei den Verlusten der realen Verbrennung und es kommt im Gegenzug zu einer Erhöhung bei der effektiven Arbeit.

- *Volllast*

Es ist bekannt, dass die besonderen Kraftstoffeigenschaften von Ethanol (z. B. die höhere Oktanzahl) Einfluss auf das Volllastverhalten haben und dass es dadurch zu Verbesserungen beim Drehmomentverlauf kommt [182].

Aus diesem Grund werden an dieser Stelle Messergebnisse von Volllastversuchen gezeigt, wobei am Versuchsträger keine hardwaremäßigen Änderungen vorgenommen wurden [166], [31].

Abbildung 57 zeigt das erreichbare Volllastdrehmoment mit verschiedenen Kraftstoffen. Im Vergleich zu ROZ95-Kraftstoff kann das Drehmoment beim Betrieb mit E85 um bis zu 14% angehoben werden [183].

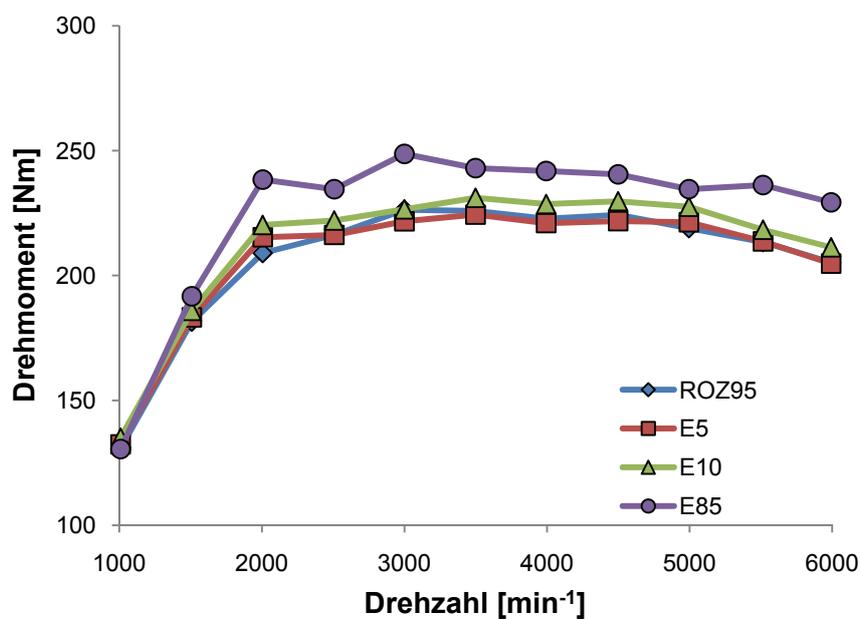


Abbildung 57: Volllastdrehmoment mit den verschiedenen Versuchskraftstoffen [166], [31]

Die Luftzahl wird für alle untersuchten Kraftstoffe bis zum Erreichen der zulässigen Turbineneintrittstemperatur von  $980^{\circ}\text{C}$  auf  $\lambda=1$  gehalten. Ab dem Erreichen der maximalen Turbineneintrittstemperatur wird eine Kraftstoffanreicherung zur Einhaltung dieser Temperatur vorgenommen.

Diese Anreicherung ist beim Betrieb mit ROZ95-Kraftstoff bereits ab einer Drehzahl von  $3000\text{min}^{-1}$  notwendig, bei E5- bzw. E10-Betrieb kann die Anreicherungsgrenze geringfügig zu einer höheren Drehzahl und beim Betrieb auf  $5500\text{min}^{-1}$  verschoben werden [184].

Beim Einsatz von E85 kann der Motor nahezu über den gesamten Drehzahlbereich mit einer Luftzahl von  $\lambda=1$  betrieben werden (Abbildung 58) [143], [31], [185].

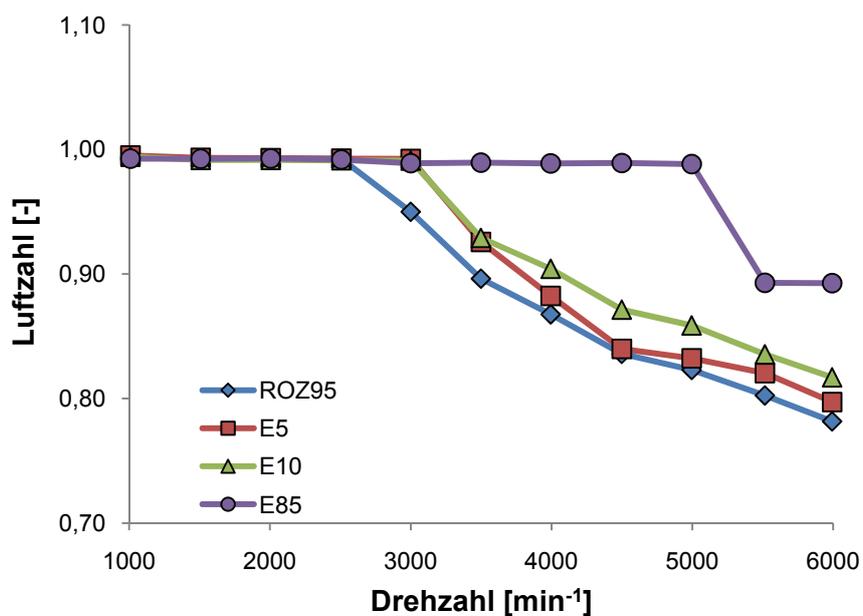


Abbildung 58: Luftzahl bei Volllast mit den verschiedenen Versuchskraftstoffen [166], [31]

Sowohl die günstigere Schwerpunktlage der Verbrennung bedingt durch geringere Klopfneigung als auch der geringere Anreicherungsbedarf führen bei den Ethanol-Mischkraftstoffen zu einer erheblichen Verbesserung des effektiven Wirkungsgrades im Vergleich zum Eurosuper ROZ95-Kraftstoff [31], [186].

- *Schwerpunktlage / Klopfneigung*

Mit steigendem Ethanolgehalt bzw. höherer Klopfestigkeit der eingesetzten Kraftstoffe kann die Verbrennung nach früh gezogen werden: Dadurch findet eine deutlich schnellere Energieumsetzung statt und es stellen sich auch entsprechend höhere Spitzendrücke ein. Der Wirkungsgrad und damit das Drehmoment steigen an und gleichzeitig sinkt die Abgastemperatur.

- *Abgastemperatur / Anreicherungsbedarf*

Die Abgastemperatur wird wesentlich von der Schwerpunktlage der Verbrennung beeinflusst. Da durch das Auftreten von Klopfereignissen an der Vollast die Zündung und damit die Verbrennung nach spät verschoben werden muss, ergeben sich sehr hohe Abgastemperaturen, die eine Kraftstoffanreicherung erforderlich machen.

Abbildung 59 zeigt den berechneten effektiven Wirkungsgrad über der Drehzahl bei Volllastbetrieb. Dabei werden mit E85 bereits Werte in der Nähe moderner Dieselmotoren erreicht.

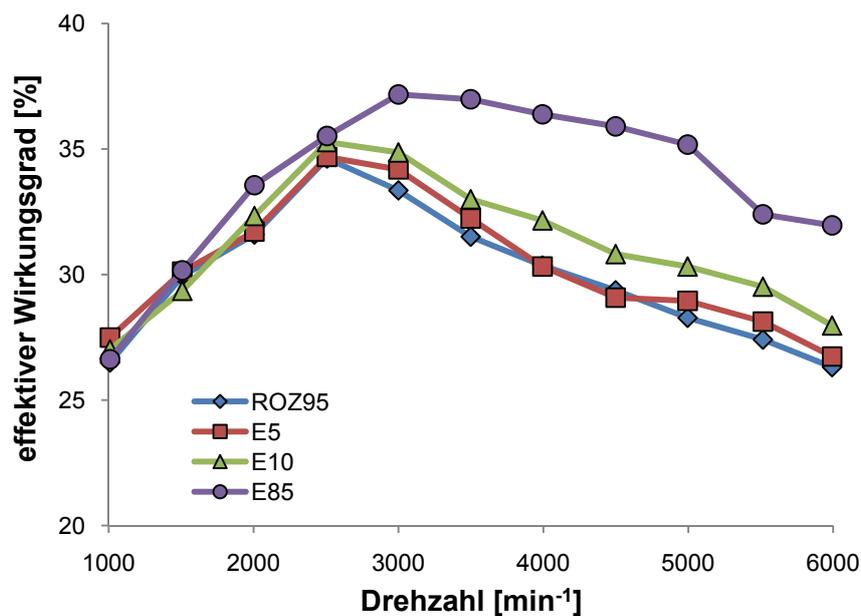


Abbildung 59: Effektiver Wirkungsgrad bei Vollast [166], [31]

Auch für den Vollastpunkt kann wiederum eine entsprechende Verlustteilung (Abbildung 60) angegeben werden. Der signifikante Unterschied im effektiven Wirkungsgrad geht hauptsächlich auf die verbesserte Klopfestigkeit im Betrieb mit E85 zurück [31], [175], [176].

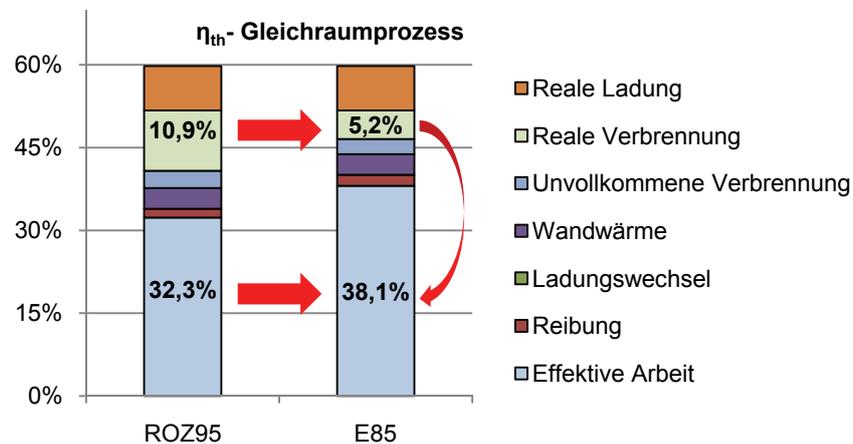


Abbildung 60: Verlustteilung für einen Hochlastpunkt ( $1500\text{min}^{-1}$ , Vollast)

### 6.1.2. Volumetrischer Kraftstoffverbrauch

Aus den gasförmigen kohlenstoffhaltigen Abgasbestandteilen kann nun mithilfe der in Kapitel 4.2.2 ermittelten Formeln der volumetrische Kraftstoffverbrauch berechnet und mit den theoretischen Betrachtungen verglichen werden (Abbildung 61 und Abbildung 62).

Wie schon anhand der Kraftstoffeigenschaften gezeigt bzw. daraus in weiterer Folge berechnet führen der hohe gebundene Sauerstoffanteil in Ethanol und der damit verbundene entsprechend geringere Heizwert gegenüber Benzin zu einem volumetrischen Mehrverbrauch von 2-3% bei den E5- bzw. E10-Kraftstoffen und von 37-38% beim E85-Kraftstoff. Für den Fahrzeugnutzer bedeutet der höhere Kraftstoffverbrauch in Liter je 100km auch eine geringere Reichweite je Tankfüllung.

Diese Werte werden auch durch Literaturwerte bestätigt, die mittels Berechnung über Heizwert, Dichte und stöchiometrischem Luft-Kraftstoff Verhältnis von Benzin bzw. E85-Kraftstoff einen volumetrischen Mehrverbrauch von 39% bei E85-Betrieb anführen [29].

	Einheit	ROZ95	E5	E10
NEFZ Typ VI	l/100km	11,2	11,4	11,5
NEFZ Typ I	l/100km	7,6	7,7	7,8
CADC	l/100km	7,0	7,1	7,2

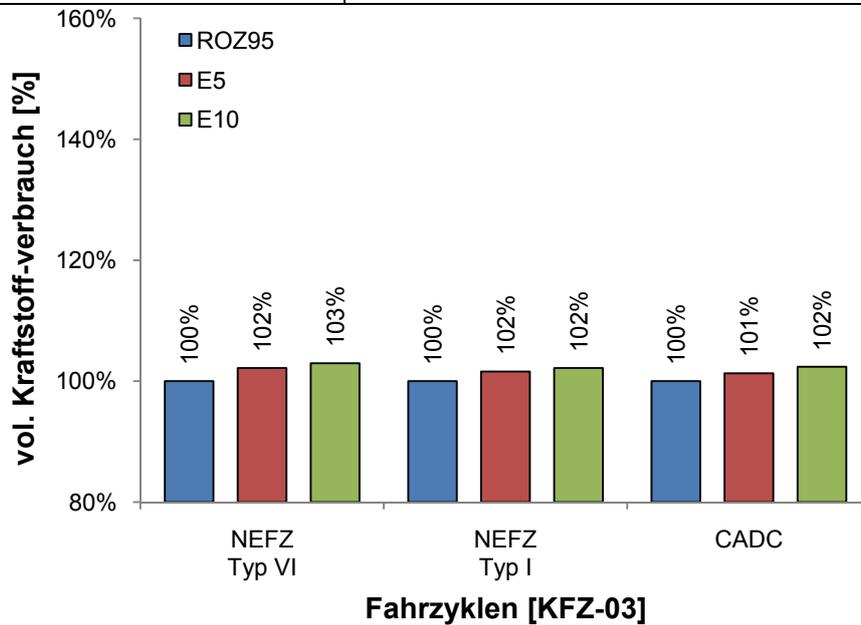


Abbildung 61: volumetrischer Kraftstoffverbrauch beim Betrieb eines konventionellen Fahrzeugs mit verschiedenen Ethanol-Blends

	Einheit	ROZ95	E5	E85
NEFZ Typ VI	l/100km	19,3	19,8	26,3
NEFZ Typ I	l/100km	10,5	10,7	14,4
CADC	l/100km	8,2	8,4	11,2

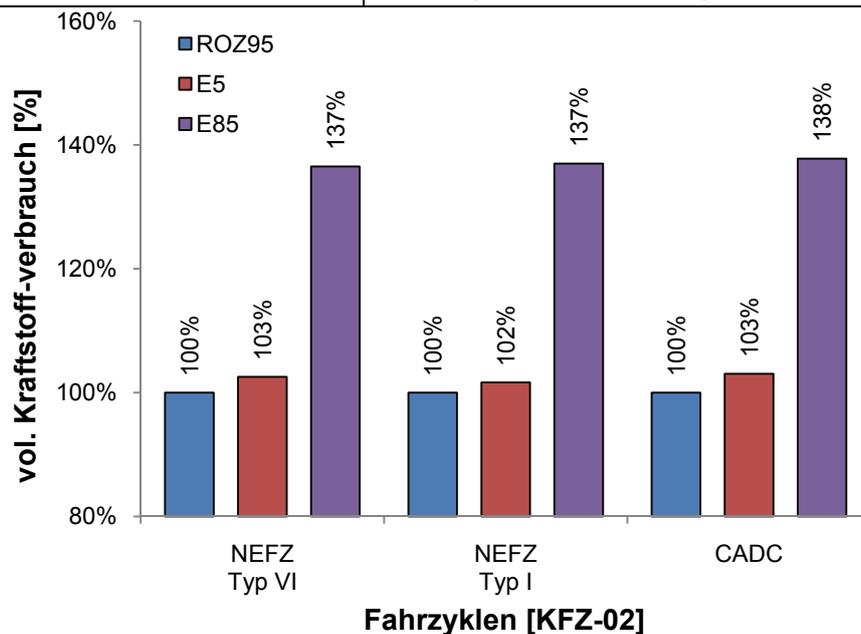


Abbildung 62: volumetrischer Kraftstoffverbrauch beim Betrieb eines Flexible Fuel Fahrzeuges mit verschiedenen Ethanol-Blends

### 6.1.3. Limitierte Abgasemissionen

Festzuhalten ist, dass die absolute Höhe der Emissionsergebnisse einer solchen Untersuchung nur eine begrenzte Zeit Gültigkeit hat. Änderungen der Fahrzeug- und Katalysatortechnologien bzw. der Treibstoffstandards und der Abgasgrenzwerte werden zu einer weiteren Senkung der Emissionen führen. Das Ziel dieser Arbeit liegt vor allem darin die Auswirkungen, die durch die Verwendung eines alternativen Kraftstoffes bzw. durch die Zumischung zum fossilen Kraftstoff entstehen, zu betrachten um grundlegende Erkenntnisse für den breiten Einsatz in der Fahrzeugflotte zu gewinnen.

Die am Prüfstand durchgeführten Versuche mit betriebswarmen Motoren zeigen bereits das Potenzial zur Senkung der Rohemissionen durch den Einsatz von Ethanolkraftstoffen. Zwar ist die Absenkung sehr klein im Vergleich zum Minderungspotenzial durch den Katalysator, doch können die HC-, die CO und die NO<sub>x</sub>-Emissionen gesenkt werden [31], [187], [188], [189].

Der Einfluss beim Fahrzeugbetrieb mit geringen Zumischraten bei konventionellen Fahrzeugen (Abbildung 63, Abbildung 65 und Abbildung 67) sowie mit hohen Zumischraten bei Flexible Fuel Vehicles (Abbildung 64, Abbildung 66 und Abbildung 68) wird im Anschluss für die limitierten Schadstoffe HC, CO und NO<sub>x</sub> mit den Ergebnisse von Untersuchungen am Rollenprüfstand gezeigt [166].

Die Werte der Ethanol-Blends sind immer bezogen auf den „Referenzkraftstoff“ ROZ95. Da der CADC-Fahrzyklus warm gestartet wird, das Emissionsniveau speziell für die CO-, und HC-Emissionen sehr niedrig ist und die Emissionsergebnisse daher teilweise an der Nachweisgrenze liegen, sind die Ergebnisse dieses Zyklus immer auf den Emissionswert des NEFZ Typ I mit dem Normkraftstoff ROZ95 bezogen.

	Einheit	ROZ95	E5	E85
NEFZ Typ VI	g/km	0,650	0,775	0,600
NEFZ Typ I	g/km	0,050	0,053	0,053
CADC	g/km	0,005	0,003	0,003

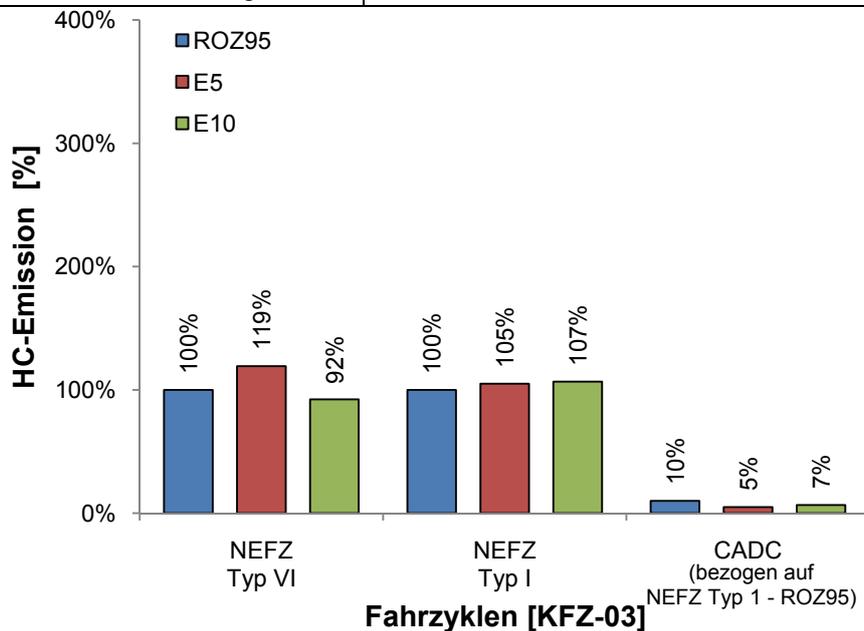


Abbildung 63: HC-Emissionen beim Betrieb eines konventionellen Fahrzeugs mit verschiedenen Ethanol-Blends

	Einheit	ROZ95	E5	E85
NEFZ Typ VI	g/km	1,256	1,463	4,177
NEFZ Typ I	g/km	0,055	0,058	0,093
CADC	g/km	0,009	0,015	0,014

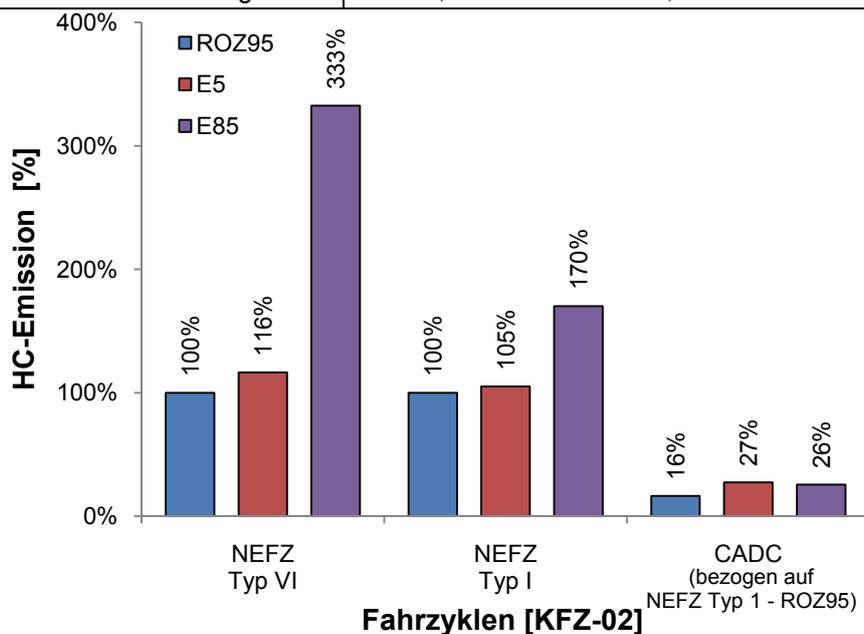


Abbildung 64: HC-Emissionen beim Betrieb eines Flexible Fuel Fahrzeuges mit verschiedenen Ethanol-Blends

	Einheit	ROZ95	E5	E10
NEFZ Typ VI	g/km	4,000	4,000	4,667
NEFZ Typ I	g/km	0,690	0,680	0,660
CADC	g/km	0,215	0,195	0,140

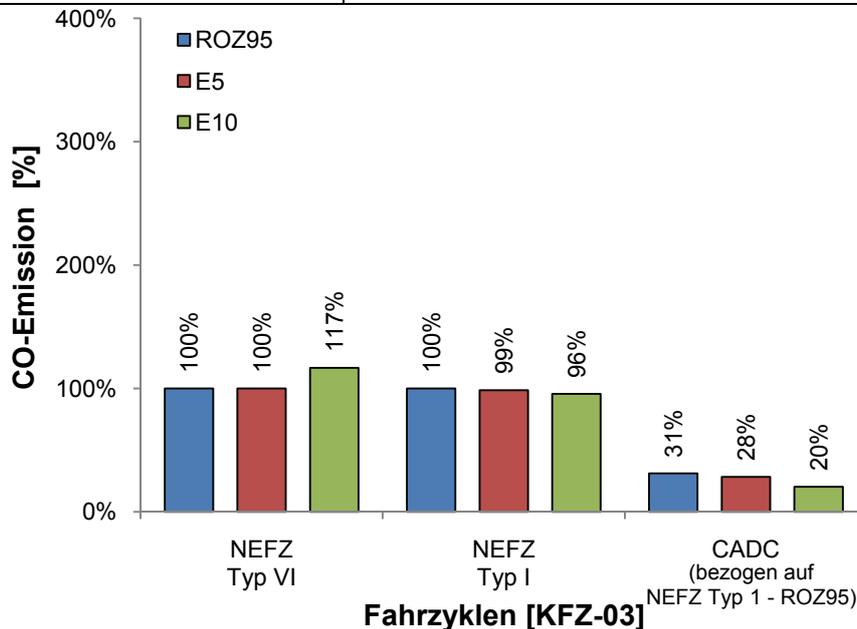


Abbildung 65: CO-Emissionen beim Betrieb eines konventionellen Fahrzeuges mit verschiedenen Ethanol-Blends

	Einheit	ROZ95	E5	E85
NEFZ Typ VI	g/km	3,982	4,516	8,107
NEFZ Typ I	g/km	0,372	0,372	0,574
CADC	g/km	0,190	0,259	0,073

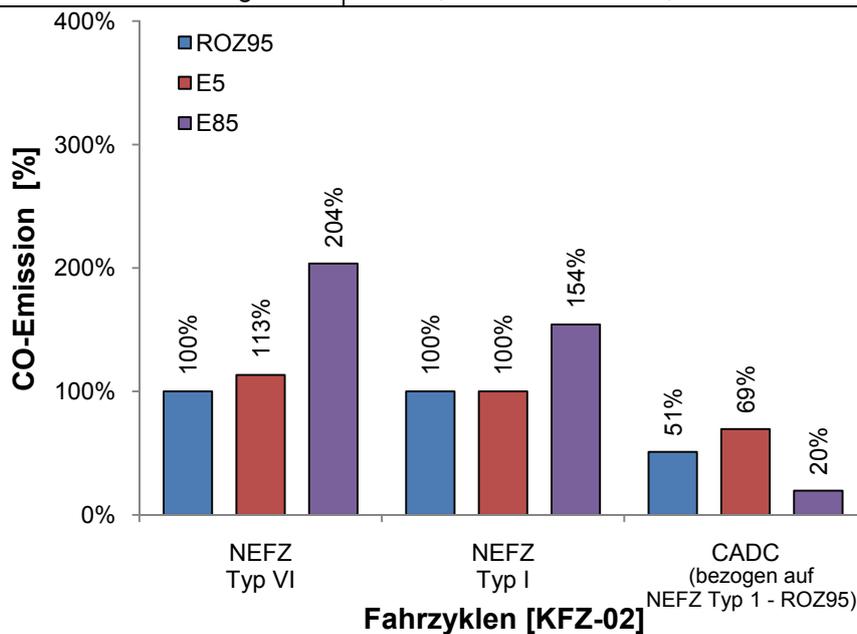


Abbildung 66: CO-Emissionen beim Betrieb eines Flexible Fuel Fahrzeuges mit verschiedenen Ethanol-Blends

	Einheit	ROZ95	E5	E10
NEFZ Typ VI	g/km	0,220	0,258	0,233
NEFZ Typ I	g/km	0,020	0,025	0,030
CADC	g/km	0,070	0,073	0,073

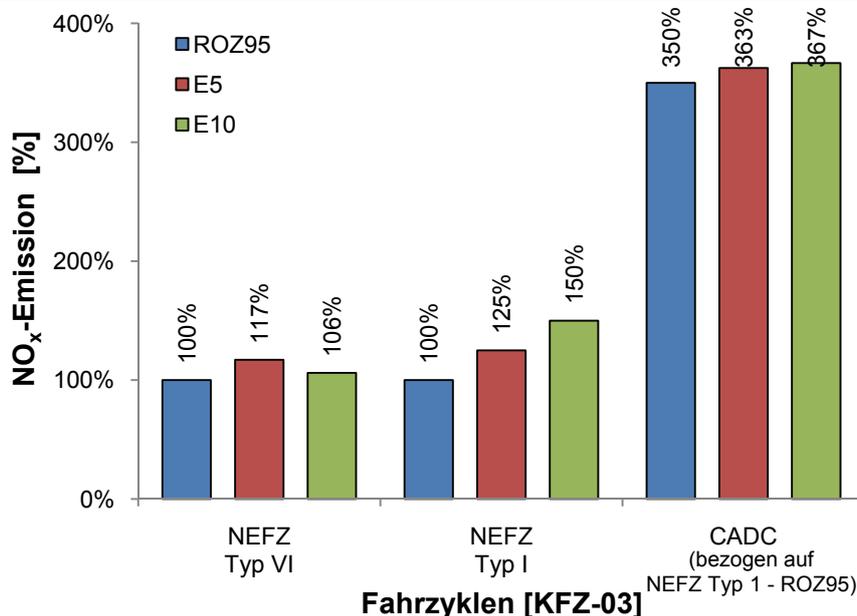


Abbildung 67: NO<sub>x</sub>-Emissionen beim Betrieb eines konventionellen Fahrzeugs mit verschiedenen Ethanol-Blends

	Einheit	ROZ95	E5	E85
NEFZ Typ VI	g/km	0,183	0,207	0,192
NEFZ Typ I	g/km	0,026	0,029	0,009
CADC	g/km	0,006	0,007	0,007

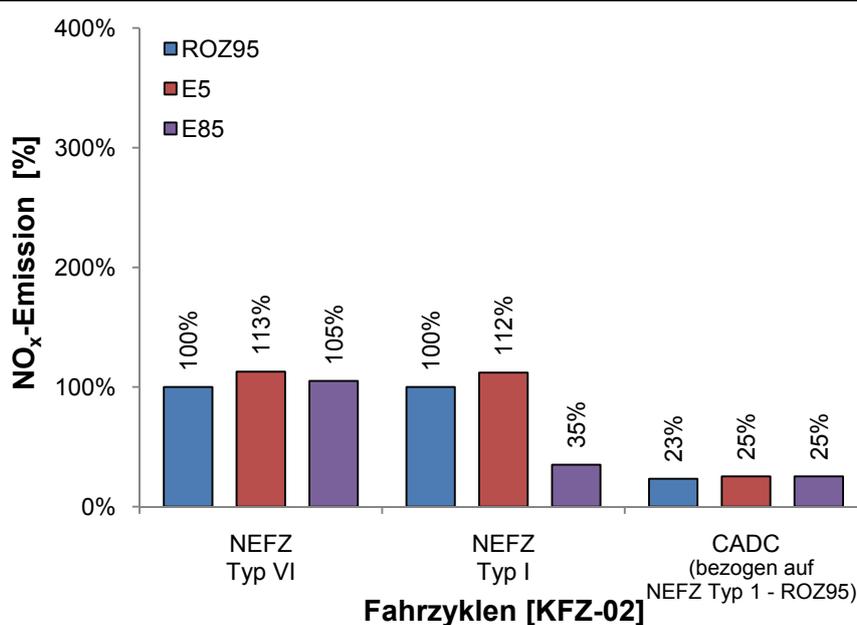


Abbildung 68: NO<sub>x</sub>-Emissionen beim Betrieb eines Flexible Fuel Fahrzeuges mit verschiedenen Ethanol-Blends

Aus den zyklusbasierten Ergebnissen ist ersichtlich, dass die Beimischung von geringen Ethanolmengen (bis 10%) keinen wesentlichen Einfluss auf die Emissionswerte des Versuchsfahrzeuges hat. Die HC- (Abbildung 63 und Abbildung 64) und die CO-Emissionen (Abbildung 65 und Abbildung 66) bewegen sich sowohl bei den beiden Fahrzyklen mit Kaltstart (NEFZ Typ VI mit  $-7^{\circ}\text{C}$  und NEFZ Typ I mit  $20^{\circ}\text{C}$ ) sowie mit betriebswarm gestarteten Motor (CADC urban/road/motorway) auf ähnlichem Niveau. Größere Abweichungen sind nur bei den Kaltstarts mit  $-7^{\circ}\text{C}$  festzustellen.

Die für die Versuchsfahrzeuge relevanten Emissionsgrenzwerte werden mit den Ethanol-Blends E5 und E10 eingehalten und es ergibt sich – wie schon aus der Literatur bzw. von den Untersuchungen am Motorprüfstand bekannt – ein generell unauffälliges Emissionsverhalten [187], [190].

Der breite Einsatz der biogenen Ottokraftstoffe bis zu einer Beimischungsrate von 10% ist nach den gezeigten Ergebnissen in Bezug auf die Emissionen völlig unproblematisch.

Als wesentliche Erkenntnis dieser Untersuchungen zeigte sich allerdings in weiterer Folge, dass beim Kaltstart mit  $-7^{\circ}\text{C}$  (NEFZ Typ VI) für die Kraftstoffmischung mit 85% Ethanolanteil (E85) mit einer deutlichen Verschlechterungen bei den HC- (Abbildung 64) und den CO-Emissionen (Abbildung 66) zu rechnen ist. Diese resultieren aus dem schlechteren Siedeverhalten von Ethanol und dem damit verbundenen erhöhten Anreicherungsbedarf während des Kaltstartvorganges.

Zur Verdeutlichung sind in Abbildung 69 die verdünnten HC-Emissionen der verschiedenen Kraftstoffmischungen während der ersten 120 Sekunden des NEFZ im zeitlichen Verlauf übereinander dargestellt. Mit dem Anstieg der Emissionen während dieser Phase des Fahrzyklus ist die Erhöhung in den zyklusbasierten Emissionen unmittelbar verbunden. Besonders auffällig daran ist die deutliche Verbesserung im Emissionsverlauf von E75- gegenüber E85-Kraftstoff und das schon annähernd gleich niedrige Emissionsniveau nach dieser Zeitspanne.

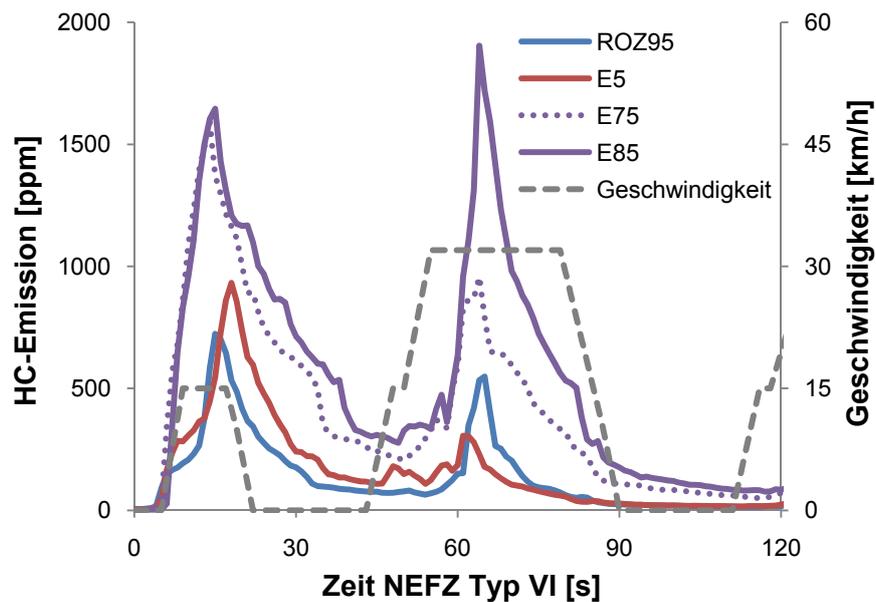


Abbildung 69: Zeitlicher Verlauf der verdünnten HC-Emissionen beim Betrieb eines Flexible Fuel Fahrzeuges mit verschiedenen Ethanol-Blends

Bei den Kraftstoff-Blends mit höherem Ethanolanteil besteht insgesamt noch ein wesentlicher Optimierungsbedarf für die Kaltstartstrategie. Die gültigen Grenzwerte für den NEFZ Typ I mit Kaltstart bei 20°C werden auch bei dem Betrieb mit E85 eingehalten [176].

Diese Erkenntnis – zusammen mit den später in Kapitel 6.1.5 ermittelten minimal möglichen Kaltstarttemperaturen für verschiedene Ethanol-Blends – legt die Einführung eines speziellen Winterkraftstoffes mit abgesenktem Ethanolanteil (z. B. 75% Ethanol) nahe.

#### 6.1.4. Nicht limitierte Abgasemissionen

Die Emissionen wurden vorerst über mehrere Fahrzyklen (NEFZ Typ VI, NEFZ Typ I und CADC urban/road/motorway) während eines gesamten Messtages (wie bereits in Abbildung 51 beschrieben) gesammelt um eine entsprechend ausreichende Probenmenge gewährleisten zu können. Die Versuchsfahrzeuge bzw. Pkws mit betriebswarmem Ottomotor emittieren eine so geringe Menge dieser Schadstoffe, dass dieser Ablauf gewählt werden muss [97].

In Abbildung 70 sind die PAH-Konzentrationen im Abgas eines Flexible Fuel Fahrzeuges in Abhängigkeit des jeweiligen verwendeten Kraftstoffs aufgetragen. Die Werte der PAH-Konzentrationen unterscheiden sich nicht signifikant zwischen den einzelnen untersuchten Kraftstoffen. Die Gesamtkonzentrationswerte an PAHs im Abgas für fossilen Ottokraftstoff sind nahezu identisch mit denen von E5, E10 und E85 (jeweils ca. 280 ng/m<sup>3</sup>) und es treten somit lediglich geringe Unterschiede in den PAH-Konzentrationen im Abgas auf. Auch die Zusammensetzung aus den einzelnen Komponenten sieht für die verschiedenen Kraftstoffe und Mischungen untereinander ähnlich aus. Die Hauptkomponenten sind hier Naphthalin, Phenanthren und Fluoranthen. Benzo[a]pyren wird lediglich in sehr geringen Konzentrationen gebildet. Somit scheint es keine signifikanten Unterschiede in der PAH-Zusammensetzung bei den untersuchten Kraftstoffen zu geben [97].

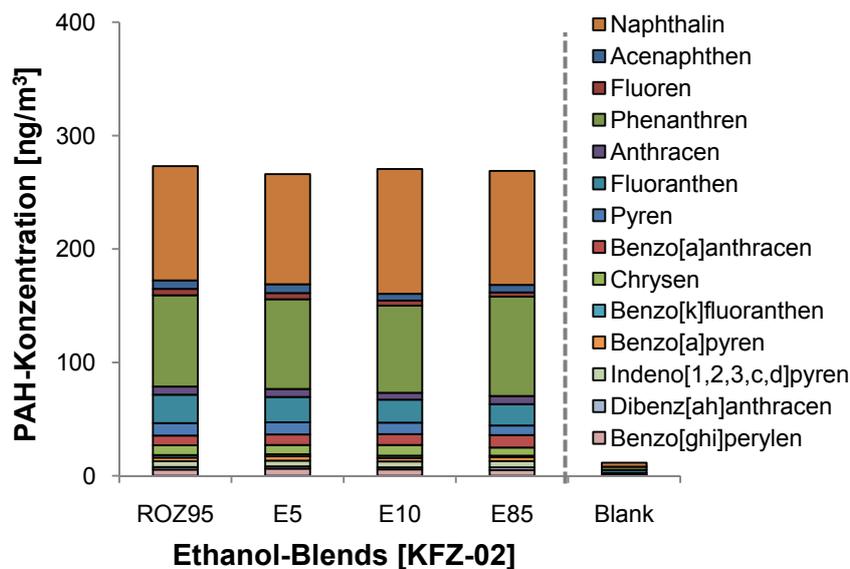


Abbildung 70: PAH-Konzentrationen im Abgas des Flexible Fuel Fahrzeuges [97]

In Abbildung 71 sind die Ergebnisse im Hinblick auf Nitro-PAH aufgetragen. Die Werte der Nitro-PAH-Konzentrationen der einzelnen untersuchten Kraftstoffe unterscheiden sich signifikant. Die Nitro-PAH-Emissionen nehmen mit zunehmendem Ethanolanteil ab.

Für fossilen Ottokraftstoff sind die Gesamtkonzentrationswerte an Nitro-PAH im Abgas ca. 20 ng/m<sup>3</sup>. Schon bei einem Ethanolanteil von 10% (E10) sind sie ca. 65% niedriger als mit fossilem Benzin. Eine zusätzliche Erhöhung des Ethanolanteils (E85) führt aber zu keiner weiteren Abnahme.

Betrachtet man nicht nur die Summe der Nitroverbindungen, sondern die einzelnen emittierten Komponenten, so zeigt sich deutlich, dass vor allem 3-Nitrophenanthren, 1-Nitropyren und 6-Nitrobenzo[a]pyren gebildet werden, die ca. 70-90% der gesamten Emissionen ausmachen [97].

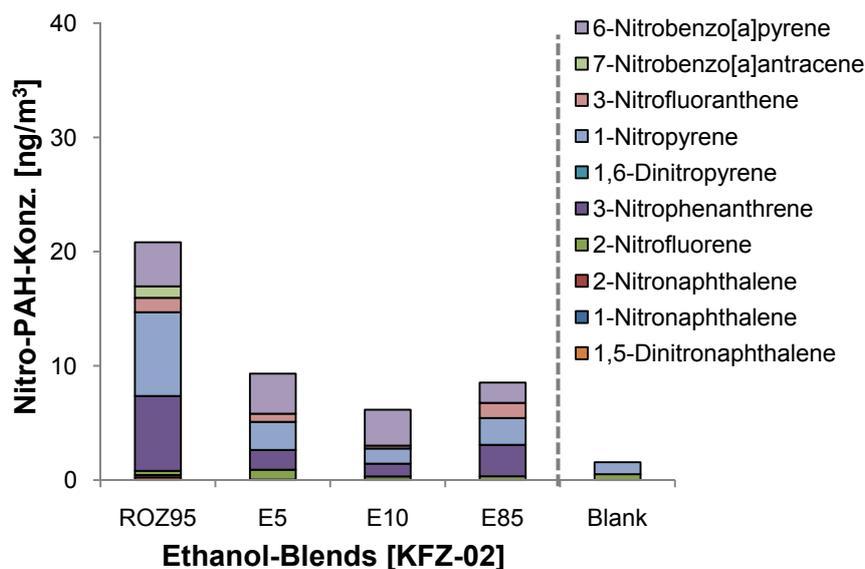


Abbildung 71: Nitro-PAH-Konzentrationen im Abgas des Flexible Fuel Fahrzeuges [97]

Eine zum Teil deutliche Erhöhung der Aldehyd-Emissionen beim Einsatz von Ethanol-Blends kann durch die vorliegenden Ergebnisse dieser Versuchsreihe bisherige Erkenntnisse aus anderen Forschungsarbeiten nachvollziehen [191], [192], [193].

Abbildung 72 zeigt die ermittelten Carbonylkonzentrationen im Abgas der einzelnen Kraftstoffe. Zwischen fossilem Ottokraftstoff (ca.  $16 \text{ mg/m}^3$ ) und den Kraftstoffmischungen E5, und E10 (ca.  $17 \text{ mg/m}^3$ ) treten kaum Konzentrationsunterschiede bei den Carbonylen im Abgas auf. E85 (ca.  $23 \text{ mg/m}^3$ ) zeigt jedoch eine deutliche Erhöhung der Carbonylkonzentrationen im Abgas um ca. 40%. Besonders der Anteil an Acetaldehyd steigt bei der Erhöhung des Bioethanolanteils auf 85% (E85) deutlich an [97].

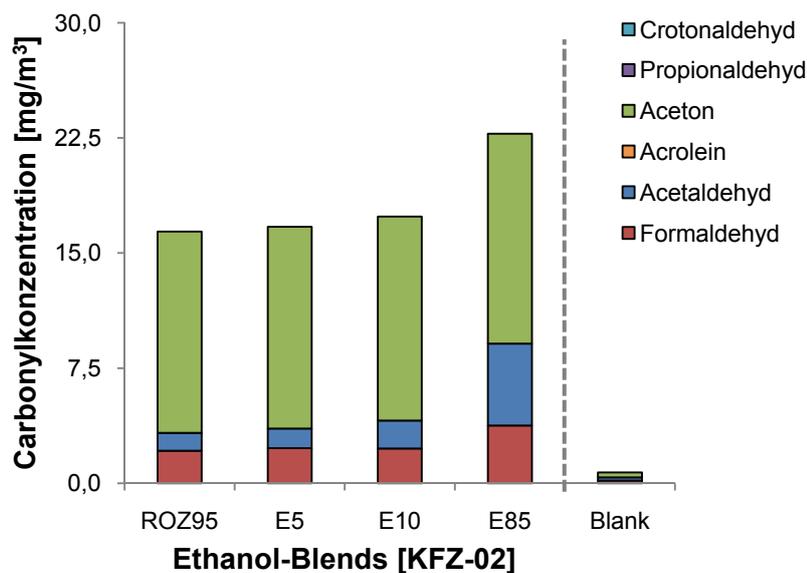


Abbildung 72: Carbonylkonzentrationen im Abgas des Flexible Fuel Fahrzeuges [97]

Im Einzelnen werden als Hauptprodukt vor allem Aceton und in geringeren Mengen auch Formaldehyd und das genannte Acetaldehyd gebildet. Weitere untersuchte Carbonylverbindungen wie beispielsweise Acrolein traten beim FFV nicht auf.

Um die Carbonylentstehung genauer zu beleuchten, wurden mit der in Kapitel 4.1.3 beschriebenen DNPH-Methode die zyklusbasierten Werte ermittelt.

Nachfolgend sind die Gesamtemissionen der untersuchten Aldehydwerte je Zyklus für die jeweiligen Betriebsbedingungen angegeben. Die Ergebnisse (Abbildung 73) wurden wie auch bei den limitierten Emissionen üblich auf den spezifischen Emissionsausstoß in  $\text{g/km}$  umgerechnet [194].

Die Abbildung zeigt die Zyklusemissionen für die drei gemessenen Komponenten Formaldehyd, Acetaldehyd und Benzaldehyd. Acetaldehyd, als Produkt bei der unvollständigen Oxidation von Ethanol, geht als der hauptverantwortliche Stoff aus dieser Analyse hervor. Aus der Abbildung geht außerdem ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen Kaltstartbetrieb (NEFZ Typ VI mit  $-7^{\circ}\text{C}$  und NEFZ Typ I mit  $20^{\circ}\text{C}$ ) bzw. beim Betrieb mit betriebswarmen Motor einerseits und dem Ethanolanteil (ROZ95, E5, E85) andererseits hervor.

	Einheit	ROZ95	E5	E85	E85-warm
Formaldehyd	NEFZ Typ VI g/km	0,00193	0,00193	0,0081	0,00024
	NEFZ Typ I g/km	0,00078	0,00063	0,00166	
Acetaldehyd	NEFZ Typ VI g/km	0,00367	0,00678	0,11529	0,00138
	NEFZ Typ I g/km	0,00075	0,00091	0,02366	
Benzaldehyd	NEFZ Typ VI g/km	0,00168	0,00144	0,00032	0,00014
	NEFZ Typ I g/km	0,00059	0,00064	0,00040	

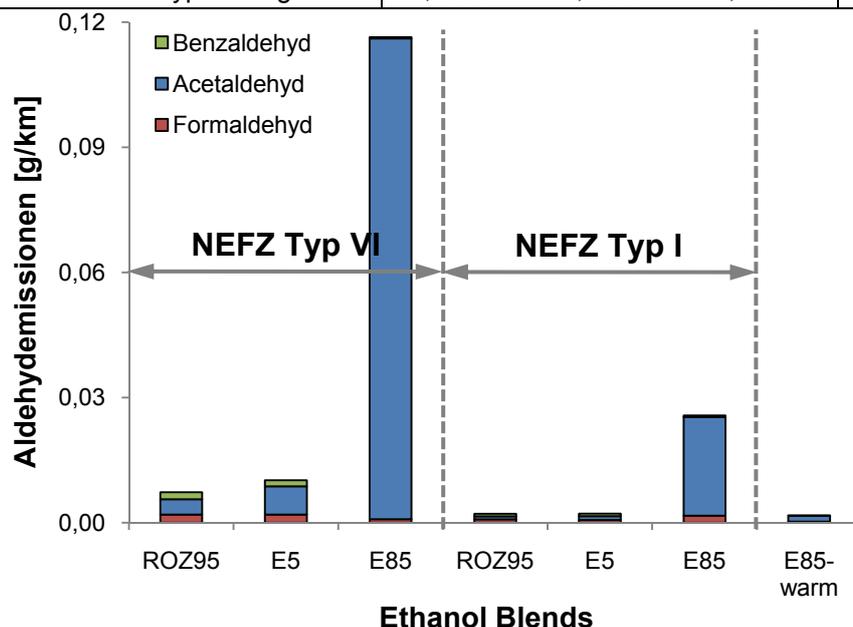


Abbildung 73: Aldehyd-Emissionen bei unterschiedlichen Kraftstoffgemischen und Betriebstemperaturen [194]

Es ist zu erkennen, dass bei einem Kaltstart bei Minustemperaturen  $-7^{\circ}\text{C}$  (NEFZ Typ VI) deutlich höhere Mengen an Aldehyden emittiert werden, als bei  $22^{\circ}\text{C}$  Starttemperatur (NEFZ Typ I). Vor allem die Phase bis zum Erreichen eines warmen Betriebszustandes von Motor und Katalysator scheint emissionsrelevant zu sein. Dies bestätigt auch die Einzelmessung im betriebswarmen Zustand (E85 warm), bei

der im Vergleich sehr niedrige Aldehydkonzentrationen festgestellt wurden. Außerdem ist zu erkennen, dass die Summe der Aldehyde im Abgas mit dem Ethanolgehalt im Kraftstoff zunimmt. Im Gegensatz dazu nimmt Benzaldehyd mit dem Ethanolgehalt ab. Dieser Parameter war bei den E85-Proben kaum bestimmbar [160], [174].

Zudem ist in dieser Abbildung eine Blankmessung am Verdünnungstunnel bei ausgeschaltetem Motor aufgezeigt. Hieraus erkennt man, dass die Blankwerte für die PAH-Konzentrationen auch in diesem Fall vernachlässigbar gering sind.

Als Ergebnis dieser Betrachtung ist davon auszugehen, dass die beschriebenen Aldehyd-Emissionen hauptsächlich in der Kaltstartphase gebildet werden. Genauerem Aufschluss darüber liefert die Möglichkeit einer zeitaufgelösten Messung der Abgasbestandteile. Diese Untersuchungen wurde mittels der ebenfalls in Kapitel 4.1.3 beschriebenen FTIR-Messtechnik durchgeführt.

In Abbildung 74 sowie Abbildung 75 ist der Verlauf der Formaldehyd-Emissionen und in Abbildung 76 sowie Abbildung 77 der Verlauf der Acetaldehyd-Emissionen während eines NEFZ Typ VI (-7°C Kaltstart) und NEFZ Typ I (20°C Kaltstart) wiederum für verschiedene Ethanol-Blends (ROZ95, E5, E10, E85) zeitaufgelöst dargestellt.

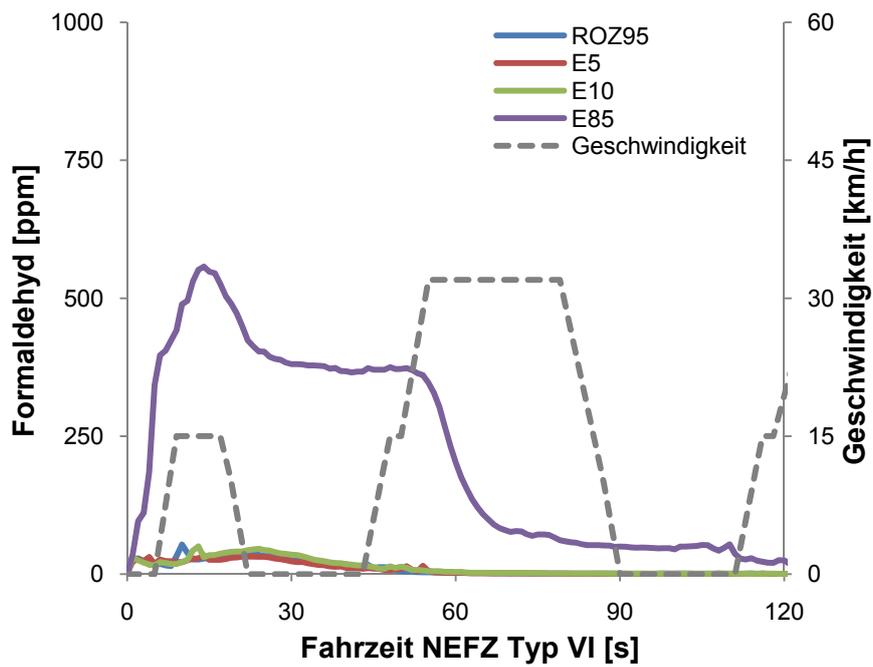


Abbildung 74: Zeitlicher Formaldehydverlauf bei einem NEFZ Typ VI

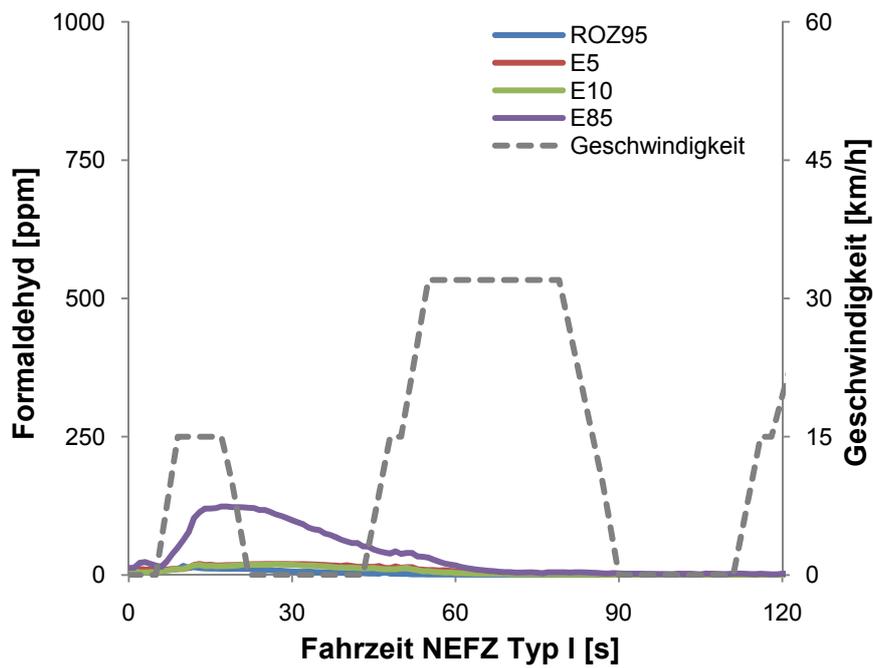


Abbildung 75: Zeitlicher Formaldehydverlauf bei einem NEFZ Typ I

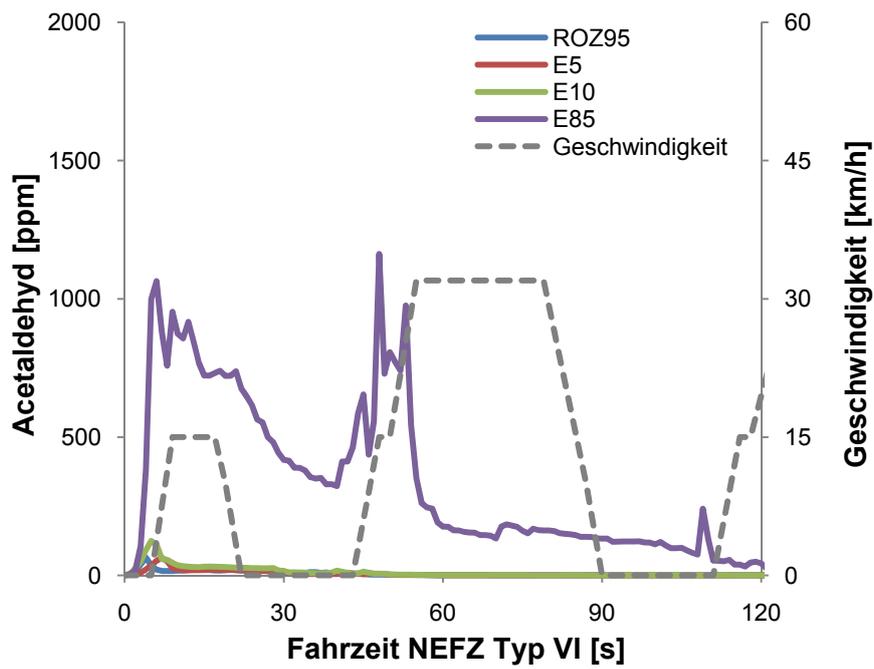


Abbildung 76: Zeitlicher Acetaldehydverlauf bei einem NEFZ Typ VI

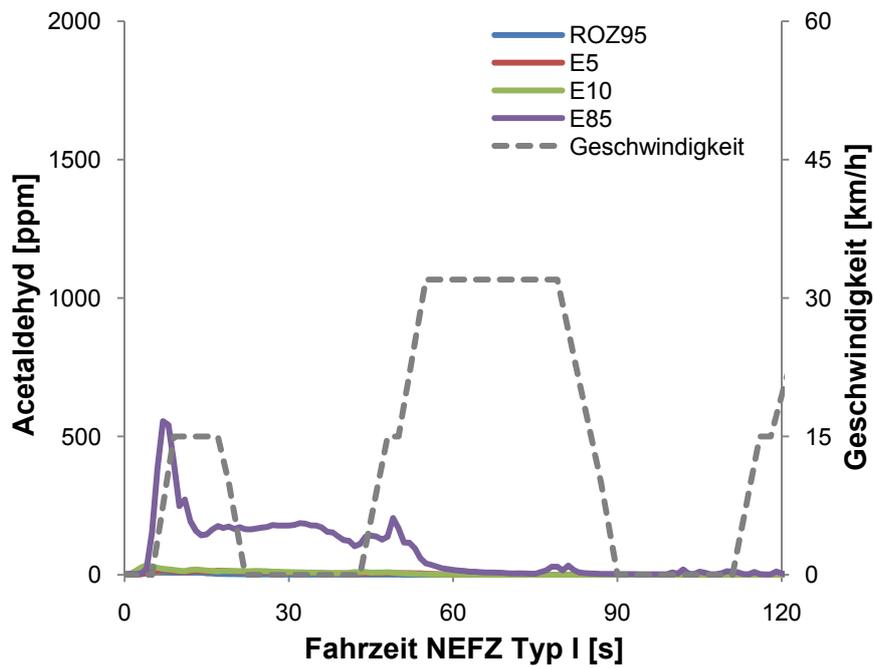


Abbildung 77: Zeitlicher Acetaldehydverlauf bei einem NEFZ Typ I

Diese FTIR-Messungen bestätigen die schon anhand der Zyklusemissionen (DNPH-Methode) getroffenen Aussagen. Die Aldehyd-Emissionen nehmen auch hier mit sinkender Kaltstarttemperatur (NEFZ Typ VI mit  $-7^{\circ}\text{C}$  und NEFZ Typ I mit  $20^{\circ}\text{C}$ ) sowie mit steigendem Ethanolanteil (ROZ95, E5, E10, E85) zu.

Die serienmäßigen Systeme zur Abgasnachbehandlung zeigen demnach bei diesen Abgasbestandteilen gute Konvertierungsraten, sodass nach dem light-off des Katalysators alle Versuchskraftstoffe gleich geringe Emissionen zeigen.

Wichtig anzumerken ist, dass die Konzentration der Aldehyd-Emissionen um ein Vielfaches kleiner ist, als die der limitierten HC-Emissionen.

Da es sich bei den Aldehyd-Emissionen um Zwischenprodukte bei der Oxidation handelt, ist auch die Emission von unverbranntem Ethanol von Interesse. In Abbildung 78 und Abbildung 79 ist ersichtlich, dass ausschließlich während der Kaltstartphase unverbranntes Ethanol emittiert wird. Dies ist wie schon bei den limitierten HC-Emissionen auch hier auf den hohen Anreicherungsbedarf – bedingt durch das Siedeverhalten des Ethanolanteil – während der Kaltstartphase zurückzuführen.

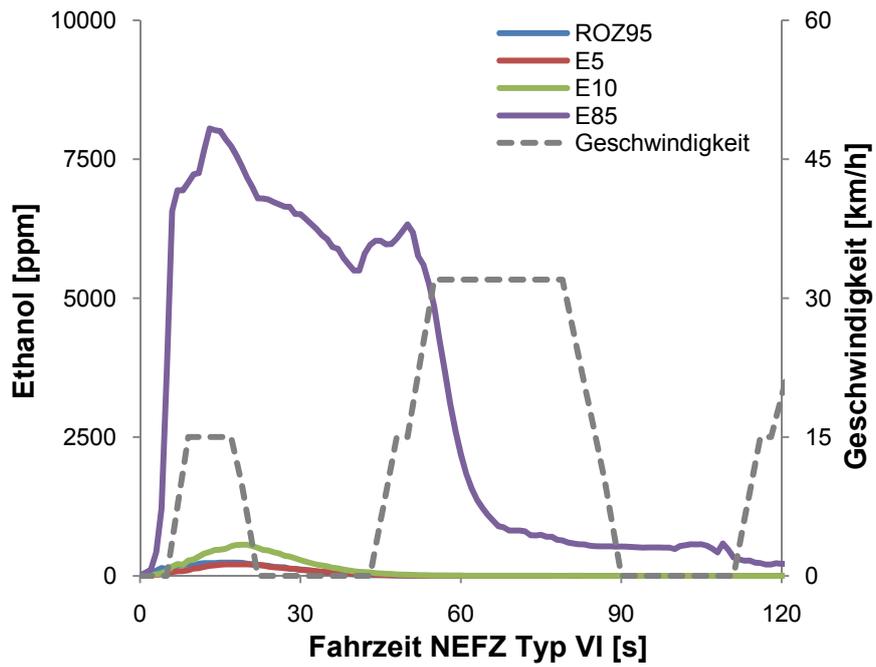


Abbildung 78: Zeitlicher Ethanolverlauf bei einem NEFZ Typ VI

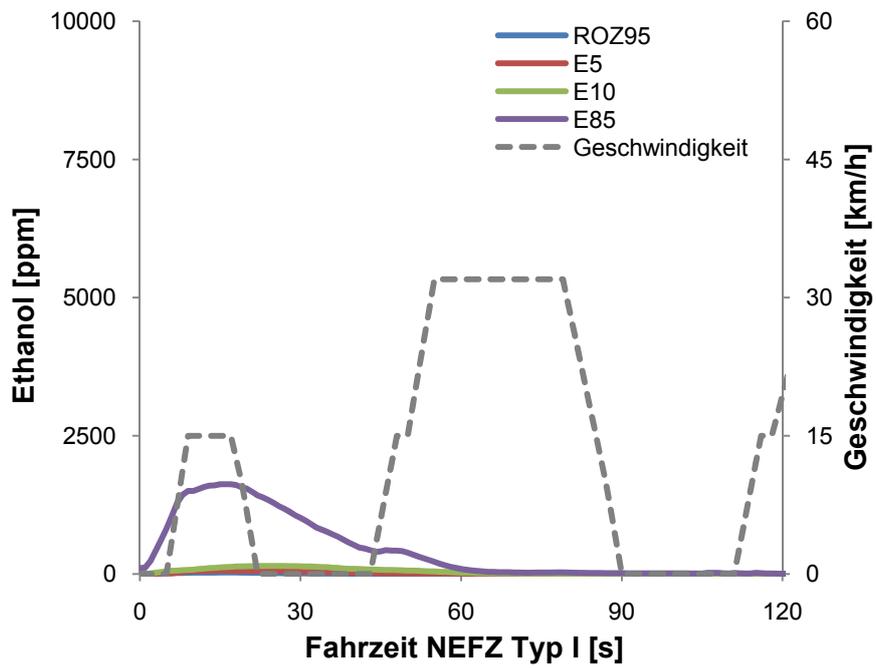


Abbildung 79: Zeitlicher Ethanolverlauf bei einem NEFZ Typ I

### 6.1.5. Kaltstartfähigkeit

Beim Fahrzeugbetrieb mit höherem Ethanolanteil (FFVs) ist vor allem der Kaltstart bei Temperaturen unter  $-20^{\circ}\text{C}$  von Interesse. Ziel dieser Untersuchung war die Ermittlung der tiefst möglichen Starttemperatur für Kraftstoffe mit verschiedenen Ethanolanteilen. Dabei kamen verschiedene Kraftstoffe zum Einsatz, die sowohl einen unterschiedlichen Ethanolanteil als auch unterschiedlichen Dampfdruck (Sommer-/ Winterqualität) aufwiesen. Um die Kaltstarttauglichkeit der unterschiedlichen Mischungsverhältnisse beurteilen zu können, wurden nach einer genau festgelegten Prozedur, die in reproduzierbarer Weise die Identifikation eines „erfolgreichen“ bzw. eines „nicht erfolgreichen“ Starts erlaubte, Kaltstarts durchgeführt.

Definition – „Start nicht erfolgreich“:

- wenn der Motor nach zwei Startversuchen (jeweils ca. 4s mit 2s Pause) bis zur ersten NEFZ-Rampe (nach 11s) nicht anspringt (siehe [Abbildung 80](#))
- wenn der Motor die erste Beschleunigungsrampe nicht bewältigt

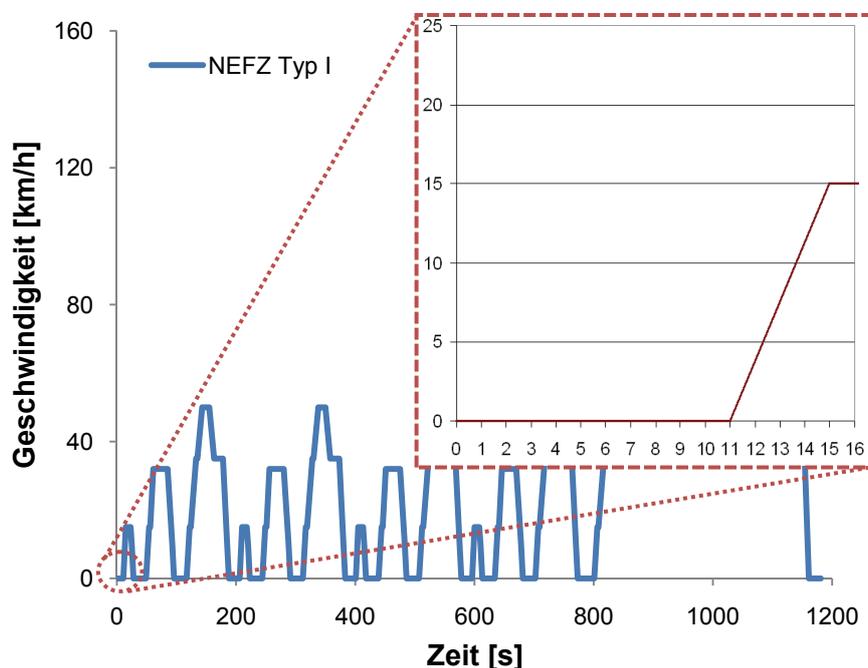


Abbildung 80: Startprozedur „Kaltstartuntersuchungen“

Um möglichst rasch einen größeren Temperaturbereich abstrahieren zu können und dabei wiederum annähernd gleiche Voraussetzungen für die untersuchten Kraftstoffe zu gewährleisten, wurde eine genaue Vorgehensweise für die Einhaltung der

Temperaturabsenkung (im Fall eines erfolgreichen Starts) bzw. Temperaturerhöhung (im Fall eines nicht erfolgreichen Starts) festgelegt (Abbildung 81).

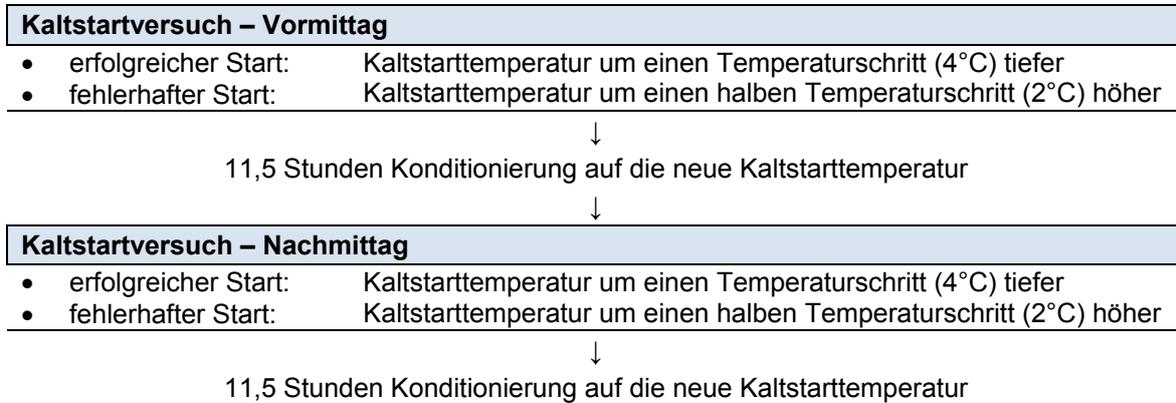


Abbildung 81: Messprogramm für den Kaltstarttest – „1Tag, 1 Kraftstoff“

Die Ergebnisse zeigen, dass der Dampfdruck große Auswirkungen auf das Kaltstartverhalten hat und ist daher in der Kraftstoffnorm DIN EN 228 [140] auch genau definiert. Entsprechend der Jahreszeit müssen also als Sommer- (S) bzw. Winterqualität (W) festgelegte Maximal- und Minimalwerte eingehalten werden (siehe auch Tabelle 6).

In Abbildung 82 ist der Zusammenhang zwischen dem Dampfdruck der verschiedenen Kraftstoffmischungen und der ermittelten minimal möglichen Starttemperatur. Der Dampfdruck wird darin in der oberen Diagrammhälfte für alle Versuchskraftstoffe absteigend dargestellt. In der unteren Diagrammhälfte ist für den jeweiligen Kraftstoff die minimal mögliche Starttemperatur (tiefste Temperatur, bei welcher der Motor der beiden FFVs noch startet) eingezeichnet.

Aus den auf diese Weise dargestellten Versuchsergebnissen lässt sich ein eindeutiger Zusammenhang ablesen [32], [195].

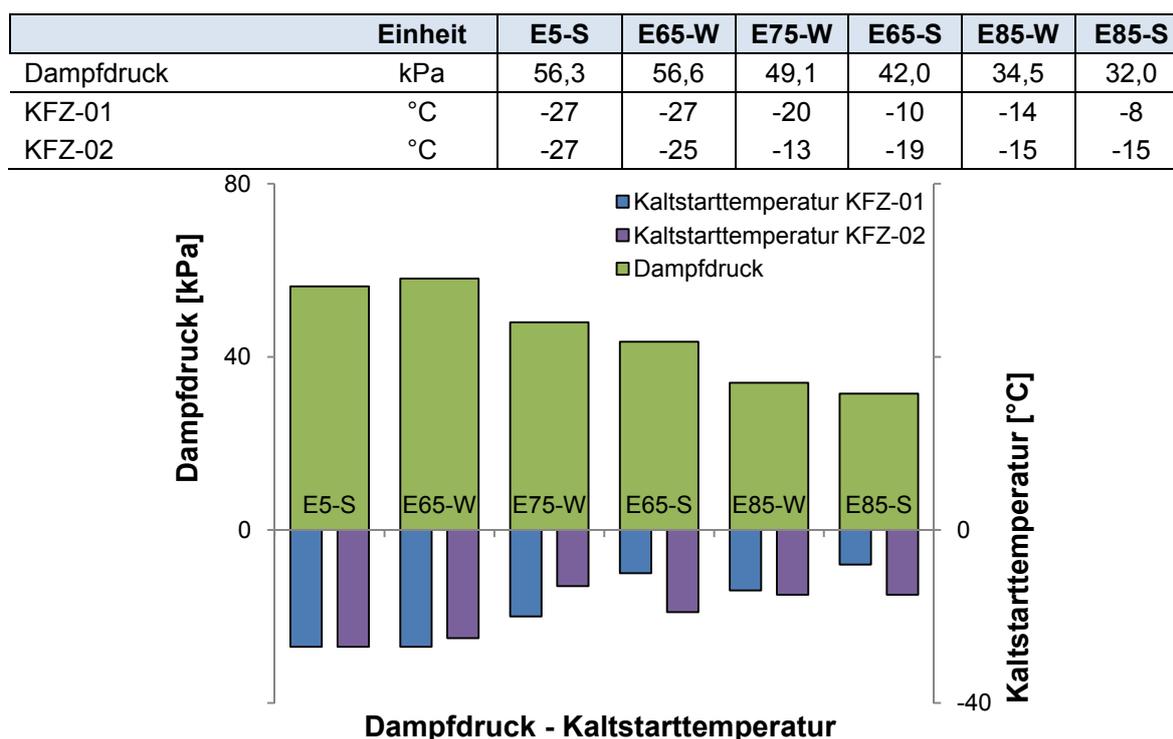


Abbildung 82: Zusammenhang zwischen Dampfdruck und der tiefsten noch möglichen Kaltstarttemperatur

In der bisherigen Kraftstoffnorm DIN EN 228 [140] wurden nur rein fossile Kraftstoffe berücksichtigt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen flossen als Empfehlung in den E85-Normvorschlag für Österreich, der in der ÖNORM C 1114 [196] bereits umgesetzt wurde (Tabelle 19), ein.

Tabelle 19: Sommer-/Winter-E85-Kraftstoff lt. ÖNORM C 1114 [196]

	Einheiten	Grenzwerte	
		Sommer	Winter
Ethanol und höhere Alkohole	% (V/V), min.	75	65
	% (V/V), max.	85	75
Dampfdruck (VP)	kPa, min.	35	50
	kPa, max.	60	90

Diese ÖNORM hat nur eine nationale Gültigkeit für Österreich. Es gibt auch von Seiten der EU noch keinen Vorschlag für eine Europäische Norm. Allerdings gibt die deutsche DIN 51625 [197] in ähnlicher Weise Grenzwerte für einen E85-Winterkraftstoff an (Tabelle 20).

Tabelle 20: Sommer-/Winter-E85-Kraftstoff lt. DIN 51625 [197]

	Einheiten	Grenzwerte	
		Sommer	Winter
Ethanol und höhere Alkohole	% (V/V), min.	75	70
	% (V/V), max.	86	80
Dampfdruck (VP)	kPa, min.	35	50
	kPa, max.	60	90

In diesen Normvorschlägen findet man für Sommerqualität (Klasse A) bzw. Winterqualität (Klasse D/D1) entsprechend angepasste Werte für Ethanol um die erforderlichen Dampfdruckbereiche zu erfüllen.

Nach den durchgeführten Untersuchungen scheinen diese Normvorschläge für die klimatischen Bedingungen der jeweiligen Länder sinnvoll gewählt, um einen problemlosen Kaltstart mit einem E85-Kraftstoff zu ermöglichen.

- Min. Kaltstarttemperatur E5 Sommer (56,3kPa)      => -27°C
- Min. Kaltstarttemperatur E65 Winter (56,6kPa)      => -27°C

## 6.2. Biogas / CNG

Bei den mit Biogas/CNG betriebenen Fahrzeugen werden zur besseren Übersicht aus der breiten Palette an untersuchten Fahrzyklen (siehe dazu auch Tabelle 18) nur die Ergebnisse der Prüfzyklen dargestellt (NEFZ Typ VI, NEFZ Typ I und CADC urban/road/motorway), die auch bei den mit Ethanol betriebenen Fahrzeugen verwendet wurden).

### 6.2.1. CO<sub>2</sub>-Emissionen und Wirkungsgrad

In Abbildung 83 sind die Ergebnisse der CO<sub>2</sub>-Emissionen beispielhaft für drei Gasfahrzeuge (KFZ-07, KFZ-08, KFZ-09, betrieben mit ROZ95- und Biogas-/CNG-Kraftstoff) sowie für ein Flexible Fuel Vehicle (KFZ-02, betrieben mit ROZ95- und E85-Kraftstoff) anhand des NEFZ Typ I dargestellt.

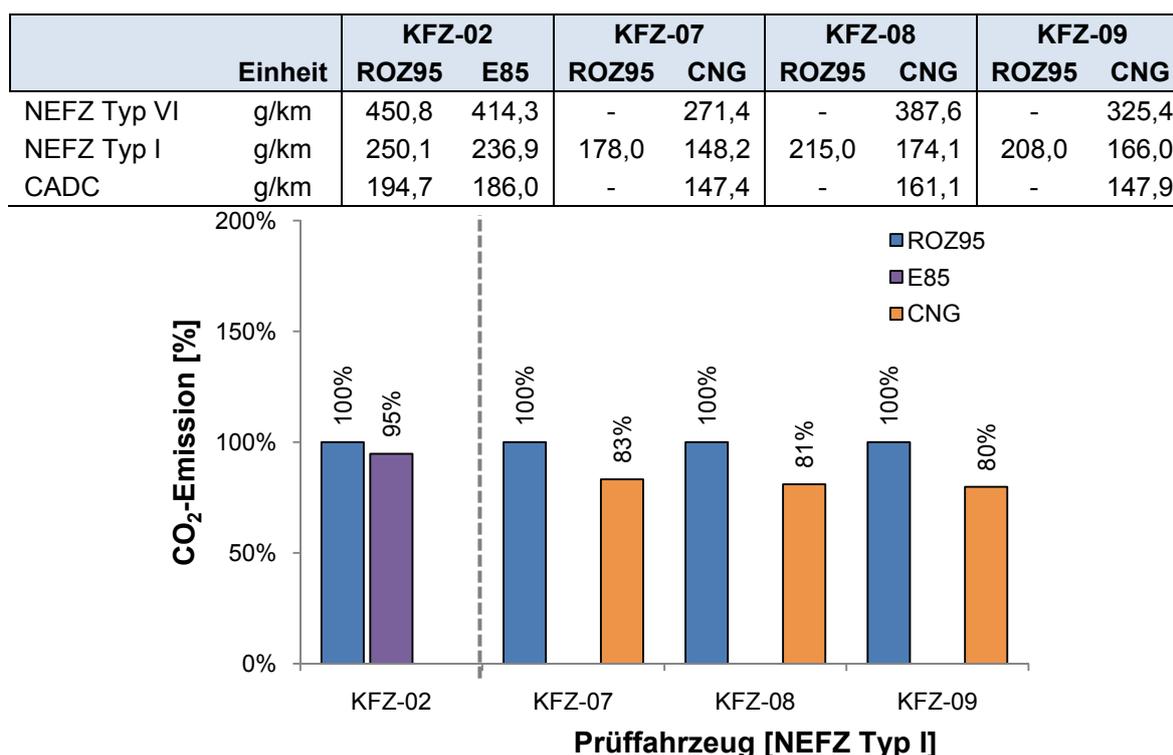


Abbildung 83: CO<sub>2</sub>-Emissionen beim Betrieb verschiedener Biogas-/CNG-Fahrzeuge

Die Ergebnisse zeigen auch bei Gasbetrieb einen Trend zu deutlich geringeren CO<sub>2</sub>-Werten. Die Werte sind immer bezogen auf den „Referenzkraftstoff“ ROZ95. Für den E85-Kraftstoff wird hier die durchschnittliche Absenkung der CO<sub>2</sub>-Emission um 6% nochmals gezeigt (Kapitel 6.1.1). Für den gasförmigen alternativen Kraftstoff fällt die CO<sub>2</sub>-Absenkung – je nach Fahrzeug – mit 17-20% noch deutlicher aus. Allerdings

wird das aus Kraftstoffwerten für CNG abgeleitete und in Tabelle 12 gezeigte Reduktionspotenzial von 23% im Vergleich zu Eurosuper ROZ95-Kraftstoff nicht ganz erreicht. Die Differenz resultiert aus der für einen Gaskraftstoff nicht wirkungsgradoptimalen Motorauslegung, um auch mit einem flüssigen Ottokraftstoff noch einen einwandfreien Betrieb gewährleisten zu können. Da Biogas eine hohe Oktanzahl von  $ROZ > 130$  besitzt, verspricht auch die Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses eine weiterhin kloppfreie Verbrennung. Somit gibt es im Gasbetrieb Potenzial zur Verbesserung beim thermischen Wirkungsgrad.

Für eine Gesamtbetrachtung wichtig und ebenfalls zu berücksichtigen ist der im Biogas enthaltene  $CO_2$ -Anteil (25-45% nach Tabelle 8), der bei der Aufbereitung zu einer Gasqualitäts- höchster Aufbereitungsstufe bereits an die Umgebung abgegeben wird. Das Ziel dieser Arbeit liegt allerdings in der Tank-to-Wheel Betrachtung der Emissionen und somit wird diese Tatsache nur am Rande erwähnt und nicht näher ausgeführt.

Die durchgeführten Versuche haben eindrucksvoll das Potenzial von Biogas gegenüber herkömmlichem Eurosuper ROZ95 Kraftstoff aufgezeigt [148].

Durch eine Direkteinblasung des Gases in den Brennraum könnte der deutliche Füllungsgradnachteil an der Vollast von Biogas und CNG im Vergleich zu flüssigem Kraftstoff ausgeglichen werden. Auch eine Aufladung des Motors verspricht aufgrund der hohen Kloppfestigkeit von Biogas weitere Vorteile gegenüber herkömmlichem Kraftstoff mit einer Oktanzahl von 95 ROZ [153], [198], [199].

### 6.2.2. Limitierte Abgasemissionen

Das Ziel der Untersuchungen besteht auch hier darin die Auswirkungen auf die Emissionen durch die Verwendung eines gasförmigen Kraftstoffes zu betrachten. Es werden die Änderungen im Emissionsverhalten an jeweils demselben Fahrzeug (mit den gleichen gültigen Grenzwerten und mit unveränderter Katalysatortechnologie) untersucht. Der grundlegende Erkenntnisgewinn für den breiten Einsatz in der Fahrzeugflotte steht wiederum im Vordergrund. In der Literatur wird vor allem das Potenzial zur Senkung der CO- und HC-Emissionen durch den Einsatz von CNG als Kraftstoff beschrieben [200], [201], [202], [203].

Bisher bekannte Werte aus der Literatur bestätigen sich durch die in den Abbildung 84 bis Abbildung 86 gezeigten Ergebnisse der Untersuchungen am Rollenprüfstand. Die Absenkung der CO- und HC-Emissionen ist dabei auf die bessere Homogenisierung des Gemisches bereits während des Kaltstarts zurückzuführen. Im Vergleich dazu zeigt der hier nochmals zu Vergleichszwecken dargestellte E85-Kraftstoff einen deutlichen Anstieg der CO- und HC-Emissionen. Wie schon in Kapitel 6.1.3 beschrieben resultiert dieser Anstieg aus der schlechteren Gemischbildung während des Kaltstarts.

	Einheit	KFZ-02		KFZ-07		KFZ-08		KFZ-09	
		ROZ95	E85	ROZ95	CNG	ROZ95	CNG	ROZ95	CNG
NEFZ Typ VI	g/km	1,256	4,177	-	1,200	-	2,487	-	2,123
NEFZ Typ I	g/km	0,055	0,093	0,048	0,043	0,047	0,046	0,066	0,048
CADC	g/km	0,009	0,014	-	0,003	-	0,008	-	0,015

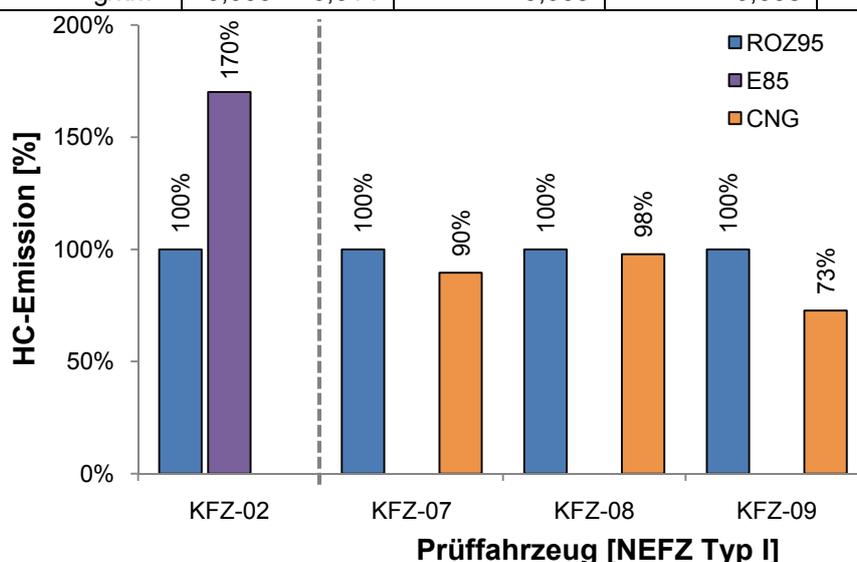


Abbildung 84: HC-Emissionen beim Betrieb verschiedener Biogas-/CNG-Fahrzeuge

	Einheit	KFZ-02		KFZ-07		KFZ-08		KFZ-09	
		ROZ95	E85	ROZ95	CNG	ROZ95	CNG	ROZ95	CNG
NEFZ Typ VI	g/km	3,982	8,107	-	8,964	-	6,983	-	10,134
NEFZ Typ I	g/km	0,372	0,574	0,802	0,698	0,347	0,233	0,436	0,283
CADC	g/km	0,190	0,073	-	0,754	-	1,266	-	2,220

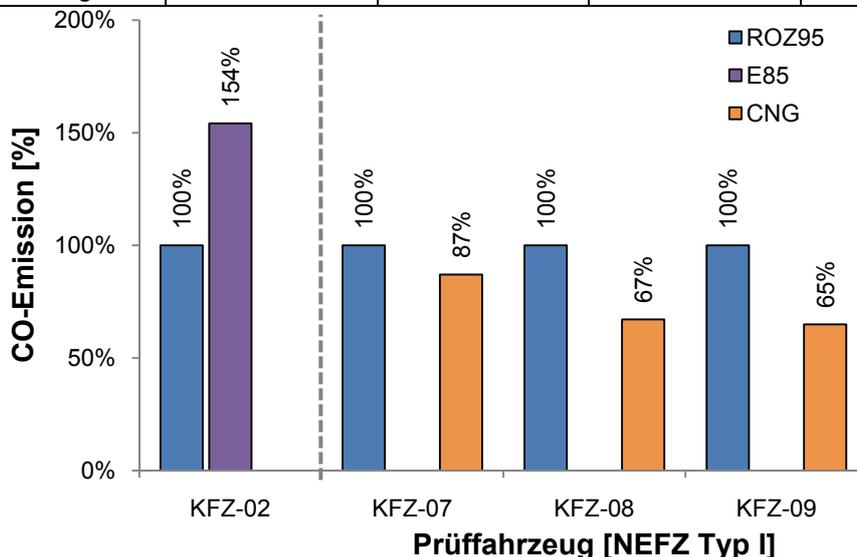


Abbildung 85: CO-Emissionen beim Betrieb verschiedener Biogas-/CNG-Fahrzeuge

	Einheit	KFZ-02		KFZ-07		KFZ-08		KFZ-09	
		ROZ95	E85	ROZ95	CNG	ROZ95	CNG	ROZ95	CNG
NEFZ Typ VI	g/km	0,183	0,192	-	0,098	-	0,255	-	0,076
NEFZ Typ I	g/km	0,026	0,009	0,028	0,016	0,029	0,028	0,046	0,032
CADC	g/km	0,006	0,007	-	0,046	-	0,019	-	0,045

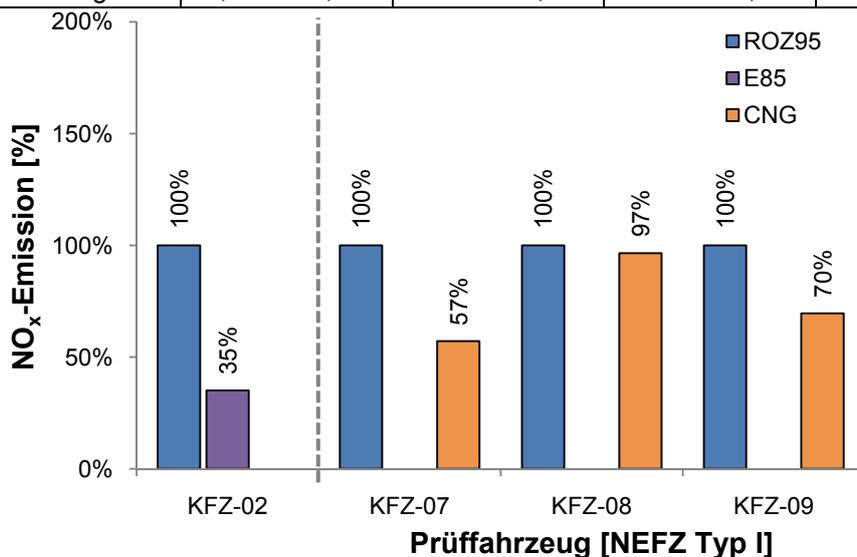


Abbildung 86: NO<sub>x</sub>-Emissionen beim Betrieb verschiedener Biogas-/CNG-Fahrzeuge

### **6.2.3. Nicht limitierte Abgasemissionen**

Die Methanemissionen stellen die weitaus auffälligste nicht limitierte Komponente für Biogas-/CNG-Fahrzeuge dar.

Die FTIR-Messungen zeigen die zeitaufgelösten CH<sub>4</sub>-Emissionen (Abbildung 87 und Abbildung 88) während eines NEFZ Typ VI (Kaltstarttemperatur -7°C) und eines NEFZ Typ I (Kaltstarttemperatur 20°C). In den Diagrammen ist eindeutig zu erkennen, dass es beim Kaltstart der Gasfahrzeuge im Gasbetrieb zu einem Anstieg der deutlichen Methan-Emissionen kommt. Bei der tieferen Kaltstarttemperatur kommt es durch die höhere Anreicherung wiederum zu entsprechend höheren Emissionswerten.

Die Konzentration dieser Abgasbestandteile ist in der Größenordnung der limitierten HC-Emissionen und es ist somit davon auszugehen, dass die Methan-Emissionen einen großen Teil der unverbrannten Kohlenwasserstoffe ausmachen.

Die serienmäßigen Abgasnachbehandlungssysteme zeigen nach dem Katalysator light-off bei den CH<sub>4</sub>-Emissionen ebenfalls eine gute Konvertierung.

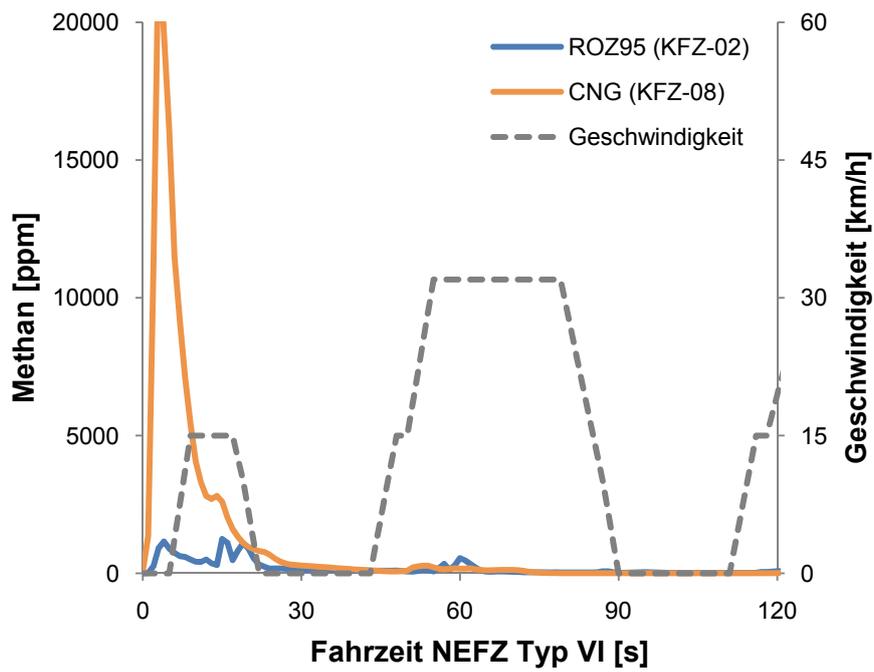


Abbildung 87: Zeitlicher Methanverlauf bei einem NEFZ Typ VI

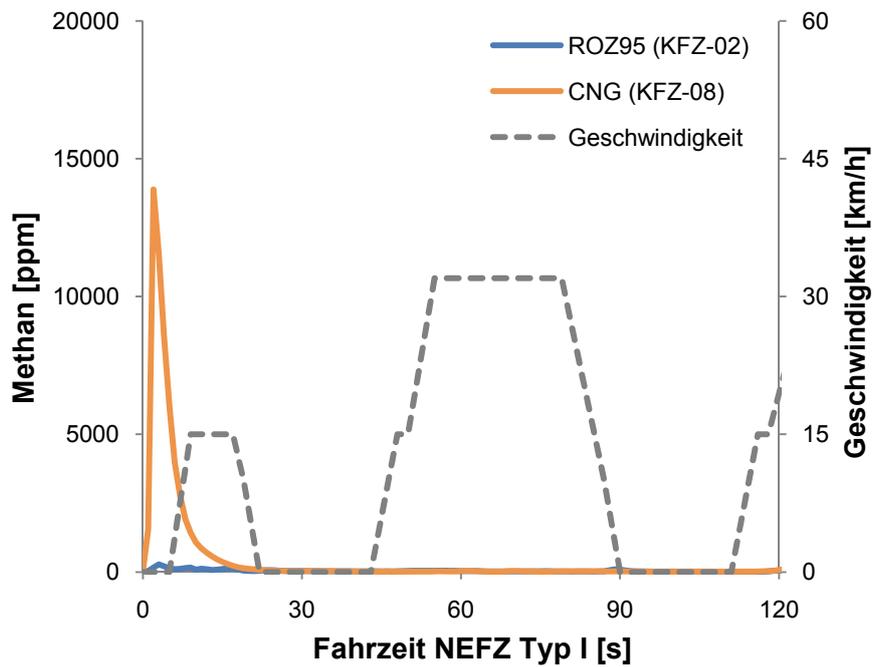


Abbildung 88: Zeitlicher Methanverlauf bei einem NEFZ Typ I

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Der Fokus der Arbeit liegt auf den Tank-to-Wheel Eigenschaften der untersuchten Kraftstoffe. Zum besseren Verständnis der Vorgänge im Motor werden dazu eingangs die Eigenschaften und Kenngrößen der eingesetzten Treibstoffe – konventioneller Eurosuper als Referenzkraftstoff (ROZ95), Ethanol Bends (E5, E10, E85) und Biogas/CNG – mit Analysedaten ergänzt durch Werte früherer Untersuchungen ausführlich dargestellt. Dabei sind bei den Ethanol-Blends vor allem die Unterschiede im Bereich des (Gemisch)heizwerts, des Temperaturabfalls während der Kraftstoffverdampfung und des Siedeverlaufs bzw. des Verdampfungsverhaltens wesentlich. Beide alternativen Kraftstoffe – das flüssige Ethanol und das gasförmige Biogas/CNG – verfügen mit einem geringeren C/H-Verhältnis und mit deutlich höheren Oktanzahlen zudem über Eigenschaften die wesentlichen Einfluss auf das Betriebsverhalten im Motor haben.

Betrachtet man den Energieinhalt der Versuchskraftstoffe zeigt sich, dass bei der Verbrennung des konventionellen ROZ95-Kraftstoffs CO<sub>2</sub>-Emission von 75,4 g/MJ gegenüber 71,1 g/MJ beim reinen Ethanol bzw. 72,6 g/MJ beim alternativen Kraftstoff E85 entstehen. Bei CNG beträgt die CO<sub>2</sub>-Emission sogar nur 58,1 g/MJ. Damit ergibt sich schon im Vergleich zu ROZ95 – rein aufgrund der Zusammensetzung des Kraftstoffes – bei E85 ein CO<sub>2</sub>-Minderungspotenzial von etwa 4% im Vergleich und bei Biogas/CNG von 23%.

Für den Nutzer aber mindestens genauso entscheidend ist, dass bei der gleichen Menge an CO<sub>2</sub>-Emission aufgrund dieser ermittelten Stoffeigenschaften der E85-Verbrauch massebezogen um ca. 50% (aufgrund der etwas höheren Dichte von E85 als ROZ95) und volumenbezogen um ca. 40% bzw. bei Biogas/CNG massebezogen um ca. 15% im Vergleich zu ROZ95 zunimmt.

Ebenso wie die Motorenentwickler sah bis dato auch der Gesetzgeber in den Richtlinien und Verordnungen zur Bestimmung von Emissionen und Verbrauch ausschließlich den Einsatz von genormten fossilen Energieträgern vor. Aus dieser Tatsache ergibt sich für die derzeitigen Mess- (CVS-Messung) und Berechnungsmethoden (Kohlenstoffbilanz zur Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs)

ein dringender Anpassungsbedarf bei der Verwendung von Kraftstoffen mit biogenem Anteil.

Aus diesem Grund wird auf die Berechnungsmethode genau eingegangen und die relevanten Änderungen werden gezeigt und erläutert. Die Kohlenstoffbilanz wird für die neuen Kraftstoffmischungen mit Ethanol (E5 und E85) hergeleitet, sodass die entsprechenden Formeln verfügbar und für beliebige andere Mischungsverhältnisse leicht herleitbar sind.

Die im Rahmen dieser Arbeit am Rollenprüfstand durchgeführten umfangreichen Fahrzeuguntersuchungen bestätigen die theoretischen Betrachtungen. Im Fahrzyklus ergibt sich beim Betrieb mit E85 eine Absenkung der CO<sub>2</sub>-Emission um bis zu 6%. Dies wird durch die gezeigte Änderung des C/H-Verhältnisses bewirkt und in weiterer Folge bestätigt sich mit den adaptierten Verbrauchsberechnungsformeln der erwartete volumetrische Mehrverbrauch von ca. 40%.

Dieser höhere Kraftstoffverbrauch im Fahrzeugbetrieb resultiert aus dem geringeren Heizwert von Bioethanol gegenüber Benzin. Der Motorwirkungsgrad kann jedoch durch die hohe Oktanzahl gesteigert werden, wie Untersuchungen am Motorprüfstand sowohl für die Teillast als auch im Besonderen für die Volllast zeigen. Ethanol-Blends mit 5% und 10% Ethanolanteil verändern die CO<sub>2</sub>-Emissionen kaum. Die Ergebnisse der Gasfahrzeuge zeigen in gleicher Weise das erwartete Absenkungspotenzial von ca. 20%. Durch die bivalente Auslegung der Versuchsfahrzeuge konnte ein Vergleich des Brennverhaltens, der Emissionen und der Effizienz zwischen dem Einsatz von Biogas gegenüber herkömmlichem Eurosuper ROZ95-Kraftstoff angestellt werden. Um auch den Betrieb mit ROZ95 weiter zu ermöglichen, muss allerdings auch berücksichtigt werden, dass nicht alle Vorteile von Biogas/CNG (z. B. ein höheres Verdichtungsverhältnis wegen der besseren Klopffestigkeit) ausgenutzt werden konnten.

Für die limitierten Schadstoffemissionen sind aus den Ergebnissen des Fahrzeugtests keine signifikanten Auswirkungen bei geringen Ethanol-Beimischungen (bis E10) während der verschiedenen Fahrzyklen zu erkennen. Diese Ethanolkraftstoffe erlauben daher bezüglich ihres Emissionsverhaltens eine

unproblematische Anwendung in der gesamten Fahrzeugflotte. Probleme können sich nur bei kraftstoffführenden Bauteilen (z. B. Dichtungen, Leitungen, Pumpen) ergeben, die nicht für den Einsatz mit Ethanol ausgelegt sind. Für die Kraftstoffmischung mit 85% Ethanolanteil (E85) ergeben sich beim Start mit  $-7^{\circ}\text{C}$  deutliche Verschlechterungen bei den CO- und den HC-Emissionen. Die gültigen Grenzwerte für den NEFZ Typ I mit Kaltstart bei  $20^{\circ}\text{C}$  werden allerdings auch bei dem Betrieb mit E85 eingehalten. Diese Erkenntnis zusammen mit den minimal möglichen Kaltstarttemperaturen, die für die verschiedensten Ethanol-Blends mittels einer definierten Prüfprozedur ermittelt wurden, legt die Einführung eines speziellen Winterkraftstoffes mit abgesenktem Ethanolanteil (z. B. 75% Ethanol) nahe. Die Definition der nun vorliegenden Kraftstoffnorm für E85 (ÖNORM C 1114 [196]), die für den Sommerbetrieb einen Ethanolanteil zwischen 75-85% und für den Winterbetrieb einen nochmals weiter abgesenkten Ethanolanteil von 65-75% vorsieht und somit ein deutlich besseres Kaltstartverhalten bei den hier typischen klimatischen Bedingungen gewährleistet wird, konnte auf Erkenntnisse dieser Arbeit zurückgreifen. Zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung existierte noch keine gültige Kraftstoffnorm für die Ethanol-Blends. Daher war für die Zertifizierung dieser Fahrzeuge nur der CEC-Normkraftstoff ohne Ethanol-Anteil relevant. Auch diese Anpassung wurde bereits vorgenommen, die ebenso die gezeigten Änderungen in den Mess- und Berechnungsmethoden beinhaltet. Für die mit Biogas/CNG betriebenen Fahrzeug ergibt sich sowohl bei den HC-Emissionen eine leichte als auch bei den CO- und  $\text{NO}_x$ -Emissionen eine deutliche Absenkung.

Die Messergebnisse der nichtlimitierten Schadstoffemissionen zeigen für die Versuchsfahrzeuge mit steigendem Ethanolanteil im Kraftstoff bei den polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAH) kaum Veränderungen. Allerdings kommt es zu einem Anstieg der Aldehyd-Emissionen (vor allem der beim Acetaldehyde) im Vergleich zum Betrieb mit Referenzkraftstoff ROZ95. Das konnte sowohl mit den zyklusbezogenen Emissionswerten als auch mit einer zeitaufgelösten FTIR-Messung gezeigt werden. Die Konzentrationen sind allerdings um ein Vielfaches kleiner als die der limitierten HC-Emissionen und auch die serienmäßigen Systeme zur Abgasnachbehandlung bringen – nach Analyse der Emissionsverläufe – auch bei diesen Abgasbestandteilen nach dem light-off gute Konvertierungsraten und somit eine weitere Reduktion. Beim Kaltstart der Gasfahrzeuge kommt es im Gasbetrieb zu

einem Anstieg der Methan-Emissionen, die jedoch nach dem Katalysator light-off ebenfalls gut konvertiert werden.

Für die weitere Entwicklung von Alternativen zu den bekannten fossilen Kraftstoffen wird die Rohölpreisentwicklung genauso ausschlaggebend sein wie die nachhaltigen Herstellungsprozesse dafür. Die Entwicklung von Motoren, die auf die gezeigten Kraftstoffeigenschaften (z. B. die höhere Kopffestigkeit) zugeschnitten sind, bieten sowohl für die flüssigen Ethanol-Kraftstoffe als auch für das gasförmigen Biogas/CNG noch ein großes Potenzial zu einer weiteren Wirkungsgradsteigerung und somit auch zu einer weiteren Absenkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Tank-to-Wheel Betrachtung.

Speziell für den E85-Kraftstoff ergibt sich ein entsprechender Entwicklungs- und Optimierungsbedarf (z. B. geeignete Kaltstartstrategien) für die verwendeten Motorenkonzepte um die gesetzlichen Rahmenbedingungen zu erfüllen. Kurzfristig bietet aber gerade die Beimischung von Ethanol zu den bekannten fossilen Ottokraftstoffen die Möglichkeit der breiten Anwendung als eine biogene Alternative ohne zusätzlichen Infrastruktur bzw. Technologieaufwand.

Gasfahrzeuge haben den Nachteil, dass die notwendige Tankstelleninfrastruktur noch nicht überall flächendeckend vorhanden ist und daher bivalente Ausführungen – also Fahrzeuge die sowohl mit flüssigem als auch mit gasförmigen Ottokraftstoffen fahren können – weiter dominieren werden. Für spezielle Anwendungen, bei denen niedrigste Schadstoffemissionen ausschlaggebend sind, stellen sie allerdings ein interessantes Konzept dar.

## 8. Literaturverzeichnis

- [1] **SCHINDLER, J. und ZITTEL, W.:** *Zukunft der weltweiten Erdölversorgung.* Berlin : Energy Watch Group, Ludwig-Bölkow-Stiftung, Mai 2008.
- [2] **WIDMANN, B. und REMMELE, E.:** *Biokraftstoffe - Fragen und Antworten.* Straubing : Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, Mai 2008.
- [3] **WINTER, R.:** *Biokraftstoffe im Verkehrssektor 2009.* Wien : Umweltbundesamt, Juni 2009.
- [4] **TOBER, W.:** *Abschlussbericht "Einsatz und Potenzial von biogenen Designerkraftstoffen – BTL (Biomass to Liquid) im Motoreneinsatz" Teilbericht zum Arbeitspaket 9 - Erstellen einer Ökobilanz (Life Cycle Assessment - LCA) für BTL.* Wien : Technischen Universität Wien (IVK), 2009. B09012.
- [5] **N.N.:** *Richtlinie 2003/30/EG.* Brüssel : Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union, 8. Mai 2003.
- [6] **N.N.:** *Richtlinie 2001/77/EG.* Brüssel : Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union, 27. September 2001.
- [7] **GERINGER, B. und TOBER, W. K.:** *Energiepolitik Europas - Im Fokus: Der Verkehrssektor.* Wien : Österreichischer Verein für Kraftfahrzeugtechnik (ÖVK), November 2009.
- [8] **N.N.:** *BGBI. II Nr. 417/2004.* Wien : Republik Österreich, 4. November 2004.
- [9] **SALCHEGGER, St. und R., WINTER.:** *Biokraftstoffe im Verkehrssektor in Österreich 2006.* Wien : Umweltbundesamt GmbH, 2006.
- [10] **GERINGER, B.:** *Biokraftstoffe in der Fahrzeuganwendung.* s.l. : Ländlicher Raum, 2008.
- [11] **KURZWEIL, A., LICHTBLAU, G. und PÖLZ, W.:** *Einsatz von Biokraftstoffen und deren Einfluss auf Treibhausgas-Emissionen in Österreich.* Wien : Umweltbundesamt GmbH, 2003.
- [12] **GERINGER, B., ROSENITSCH, R. und BAUER, Ch.:** *Pkw-Flottentest für Pflanzenöl sowie begleitende wissenschaftliche Untersuchungen.* Dresden : 6. VDI Tagung - Innovative Fahrzeugantriebe, 6.-7. November 2008.
- [13] **N.N.:** *DIN 51624 (Kraftstoffe für Kraftfahrzeuge – Erdgas – Anforderungen und Prüfverfahren).* Berlin : DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Februar 2008.

- [14] **EICHESEDER, H., KLÜTING, M. und PIOCK, W.F.:** *Grundlagen und Technologien des Ottomotors*. Wien : Springer Verlag, 2008. ISBN: 978-3-211-25774-6.
- [15] **N.N.:** *Alcohol Fuels (U.S. Department of Energy)*. s.l. : The Energy Consumer, Jänner 1980.
- [16] **SCHELLER, A.:** *Test on Unleaded Gasoline Containing 10% Ethanol - Nebraska GASOHOL*. Wolfsburg : International Symposium on Alcohol Fuel Technology - Methanol and Ethanol, 21.-23. November 1977.
- [17] **LIST, R.:** *Dissertation: Potenzialbewertung von Benzin-Ethanol Kraftstoffmischungen*. Wien : Technischen Universität Wien, Juni 2008.
- [18] **LEITE, R.C.C., et al.:** *Can Brazil Replace 5% of the 2025 Gasoline World Demand with Ethanol?* s.l. : Energy 34, 2009. S. 655-661.
- [19] **WALTER, A., et al.:** *Perspectives on Fuel Ethanol Consumption and Trade*. s.l. : Biomass and Bioenergy 32, 2008. S. 730-748.
- [20] **FACHETTI, A. und KREMER, F.G.:** *Alcohol as Automotive Fuel - Brazilian Experience*. Paris : CEC/SAE Spring Fuels & Lubricants Meeting & Exposition, June 2000.
- [21] **HENKE, J.M.:** *Bioethanol – Eine weltwirtschaftliche Perspektive (Kieler Arbeitspapier Nr. 1236)*. Kiel : Institut für Weltwirtschaft, Februar 2006.
- [22] **SCHMITZ, N.:** *Bioethanol in Deutschland*. Gülzow : Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), 2003. ISBN: 3-7843-3217-X.
- [23] **BERGSTRÖM, K., et al.:** *ABC - Alcohol Based Combustion Engines – Challenges and Opportunities*. Aachen : 16. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 8.-10. Oktober 2007. ISBN: 978-3-940374-00-4.
- [24] **SCHMITZ, N., HENKE, J. und KLEPPER, G.:** *Biokraftstoffe - eine vergleichende Analyse*. Gülzow : Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), 2009.
- [25] **GANGL, Ch.:** *Diplomarbeit: Ethanolerzeugung aus stärkehaltigen Rohstoffen für Treibstoffzwecke*. Wien : Universität für Bodenkultur, September 2004.
- [26] **FUENTES, M.:** *EU Strategy for Biofuels*. Berlin : 4. Internationaler Fachkongress für Biokraftstoffe des BBE und der UFOP - Kraftstoffe der Zukunft 2006, 27.-28. November 2006.

- [27] **ULLMANN, J. und STUTZENBERGER, H.:** *Influence of Fuel Quality on Fuel System performance*. München : Seminar - Kraftstoffe für Verbrennungsmotoren, 25. Oktober 2007.
- [28] **GROFF, E., KÖNIGSTEIN, A. und DRANGEL, H.:** *The New 2.0L High Performance Turbo Engine with Gasoline Direct Injection from GM Powertrain*. Wien : 26. Internationales Wiener Motorensymposium (ÖVK), 28.-29. April 2006. ISBN: 3-18-359512-5.
- [29] **BERGSTRÖM, K., MELIN, S.-A. und JONES, C.:** *The New ECOTEC Turbo BioPower Engine from GM Powertrain - Utilizing the Power of Nature's Resources*. Wien : 28. Internationales Wiener Motorensymposium (ÖVK), 27.-28. April 2007. ISBN: 978-3-18-363912-0.
- [30] **LIST, R., HOFMANN, P. und URBANEK, M.:** *The Effects of Bio-Ethanol Mixtures on the SI-Engine Operation*. Stuttgart/Ostfildern : TAE 6th International Colloquium - Fuels, 10.-11. Jänner 2007. ISBN: 3-924813-67-1.
- [31] **HOFMANN, P., et al.:** *Potenzial von Ethanol-Blends in modernen Ottomotoren*. Graz : 11. Tagung - Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors, 20.-21. September 2007. ISBN: 978-3-902465-84-9.
- [32] **KAWAI, T., et al.:** *Effect of High Concentration Ethanol on SI Engine Cold Startability and Emissions*. Aachen : 16. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 8.-10. Oktober 2007. ISBN: 978-3-940374-00-4.
- [33] **YEH, S.:** *An Empirical Analysis on the Adoption of Alternative Fuel Vehicles: The Case of Natural Gas Vehicles*. s.l. : Energy Policy 35, 2007. pp. 5865–5875.
- [34] **DAVIS, S.C. und DIEGEL, S.W.:** *Transportation Energy Data Book 25th ed*. Oak Ridge : Oak Ridge National Laboratory, 2006.
- [35] **N.N.:** International Association for Natural Gas Vehicles (IANGV). [Online] [Zitat vom: 5. Mai 2010.] <http://www.iangv.org/tools-resources/statistics.html>.
- [36] **JOYCE, M.:** *Developments in US Alternative Fuel Markets*. s.l. : Energy Information Administration (EIA), 2000.
- [37] **N.N.:** *Natural Gas Vehicle Industry – Position Paper 1997*. s.l. : International Association for Natural Gas Vehicles (IANGV), 1997.
- [38] **DE, S.A.K.:** *Development of CNG Infrastructure in India with Special Reference to National Capital Territory of Delhi*. Mumbai : Second Asia Gas Buyers' Summit, 2004.
- [39] **SEISLER, J. M.:** *International NGV Markets*. s.l. : World Bank Seminar, 2000.

- [40] **MATIC, D.:** *Global Opportunities for Natural Gas as a Transportation Fuel for Today and Tomorrow.* 2005.
- [41] **PÖLZ, W. und SALCHENEGER, St.:** *Biogas im Verkehrssektor - Technische Möglichkeiten, Potential und Klimarelevanz.* Wien : Umweltbundesamt GmbH, 2005.
- [42] **FRANKE, H.:** *Praktische Erfahrungen mit der Aufbereitung von Biogas.* Braunschweig : Gülzower Fachgespräch: Workshop „Aufbereitung von Biogas“, 17.-18. Juni 2003.
- [43] **N.N.:** erdgasfahren.ch. [Online] [Zitat vom: 29. Mai 2010.]  
<http://www.erdgasfahren.ch/232.html>.
- [44] **N.N.:** erdgas-mobil.de. [Online] [Zitat vom: 29. Mai 2010.] <http://www.erdgas-mobil.de/oepnv/news-oepnv/volvo-cng-diesel.html>.
- [45] **N.N.:** *Öffentliche Anhörung zur Umsetzung der CO<sub>2</sub>- und Pkw-Strategie der Kommission.* Brüssel : Europäische Kommission, 11.Juli 2007.
- [46] **MATTHES, F.Chr., et al.:** *Politiksznarien IV - Szenarien für den Projektionsbericht 2007.* Dessau-Roßlau : Umweltbundesamt, Jänner 2008.
- [47] **N.N.:** *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change.* Kyoto : United Nations, 1998.
- [48] **SOLOMON, S., et al.:** *Climate Change 2007 - The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* New York : Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2008. ISBN: 978 0521 88009-1.
- [49] **ANDERL, M., et al.:** *Klimaschutzbericht 2008.* Wien : Umweltbundesamt GmbH, 2008.
- [50] **CUPAL, J., et al.:** *Vergleich der Klimastrategien von EU-Mitgliedstaaten.* Wien : brainbows informationsmanagement gmbh, 26. November 2005.
- [51] **N.N.:** *Handbook for the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer (Eighth edition).* Kenya : United Nations Environment Programme, 2009. ISBN: 9966-7319-0-3.
- [52] **N.N.:** *Fact Sheet: Die Vereinigten Staaten und das Kyoto Protokoll.* Wien : United States Embassy (Internet:[www.usembassy.at/en/download/pdf/kyoto.pdf](http://www.usembassy.at/en/download/pdf/kyoto.pdf)), 26. Oktober 2004.
- [53] **N.N.:** *Richtlinie 2009/28/EG.* Brüssel : Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union, 23. April 2009.

- [54] **RABE, M.:** *BTL-Kraftstoff aus Sicht von Volkswagen*. Wolfsburg : Volkswagen AG, 2004.
- [55] **GERINGER, B.:** *Diesel- und Ottomotorische Brennverfahren für Alternative Kraftstoffe - Trends in der Motorentechnologie*. Passau : BAIKA Kooperationsforum, 2005.
- [56] **N.N.:** *Grünbuch - Hin zu einer europäischen Strategie für Energieversorgungssicherheit*. Luxemburg : Europäische Kommission, 2001. ISBN 92-894-0317-9.
- [57] **N.N.:** *Österreichische Regierungsprogramm 2007-2010*. Wien : Bundeskanzleramt Österreich, 2007.
- [58] **N.N.:** *Aktionsplan für Energieeffizienz: Das Potenzial ausschöpfen*. Brüssel : Kommission der Europäischen Gemeinschaft, 19. Oktober 2009.
- [59] **N.N.:** *Verordnung (EG) 443/2009*. Brüssel : Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union, 23. April 2009.
- [60] **N.N.:** *Entscheidung 406/2009/EG*. Brüssel : Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union, 23. April 2009.
- [61] **SEYFRIED, F.:** *Alternative Kraftstoffe für Fortschrittliche Antriebe*. Aachen : 14. Aachener Kolloquium, Fahrzeug- und Motorentechnik, 4.-6. Oktober 2005.
- [62] **N.N.:** *Ergebnisse der Überprüfung der Strategie der Gemeinschaft zur Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen*. Brüssel : Europäische Kommission, 7. Februar 2007.
- [63] **STROMBERGER, R. und THEIS, J.:** *Integrated Approach: Konzept einer nachhaltigen CO<sub>2</sub>-Reduktion*. Wien : 27. Internationales Wiener Motorensymposium (ÖVK), 27.-28. April 2006. ISBN: 3-18-362212-2.
- [64] **TRECHNOW, P.:** *EU zieht die Daumenschrauben für PKW-Hersteller fest an*. s.l. : VDI Nachrichten Nr. 3, 16. Jänner 2009.
- [65] **HOFMANN, P.:** *Hybridfahrzeuge*. Wien : Springer Verlag, 2010.
- [66] **N.N.:** *Richtlinie 70/220/EWG*. Brüssel : Der Rat der Europäischen Gemeinschaft, 20. März 1970.
- [67] **N.N.:** *Richtlinie 91/441/EWG (70/220/EWG)*. Brüssel : Der Rat der Europäischen Gemeinschaft, 26. Juni 1991.
- [68] **N.N.:** *Richtlinie 93/59/EWG (70/220/EWG)*. Brüssel : Der Rat der Europäischen Gemeinschaft, 28. Juni 1993.

- [69] **N.N.:** *Richtlinie 94/12/EG (70/220/EWG)*. Brüssel : Der Rat der Europäischen Gemeinschaft, 23. März 1994.
- [70] **N.N.:** *Richtlinie 96/69/EG (70/220/EWG)*. Brüssel : Der Rat der Europäischen Gemeinschaft, 8. Oktober 1996.
- [71] **N.N.:** *Richtlinie 98/69/EG (70/220/EWG)*. Brüssel : Der Rat der Europäischen Gemeinschaft, 13. Oktober 1998.
- [72] **N.N.:** *Richtlinie 2002/80/EG (70/220/EWG)*. Brüssel : Der Rat der Europäischen Gemeinschaft, 3. Oktober 2002.
- [73] **N.N.:** *Verordnung (EG) Nr. 715/2007*. Brüssel : Die Kommission der Europäischen Gemeinschaft, 20. Juni 2007.
- [74] **N.N.:** *Verordnung (EG) Nr. 692/2008 (715/2007)*. Brüssel : Die Kommission der Europäischen Gemeinschaft, 18. Juli 2008.
- [75] **N.N.:** *ECE Regelung Nr. 83*. s.l. : Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE), 6. Mai 2008.
- [76] **N.N.:** *ECE Regelung Nr. 101*. s.l. : Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE), 19. Juni 2007.
- [77] **POLACH, W.:** *Der Kraftstoffeinfluß auf die Schadstoffemission von Motoren mit unterschiedlichen*. Wiesbaden : MTZ - Motortechnische Zeitschrift Jahrgang 36, 1975.
- [78] **GERINGER, B.:** *Skriptum: Grundzüge Verbrennungskraftmaschinen (Lv-Nr.: 315.018)*. Wien : Technische Universität Wien, 2006.
- [79] **HÖPFNER, U. und LAMBRECHT, U.:** *Emissions and Air Quality in Urban Areas of Germany an Actual Survey*. Graz : 14th International Conference „Transport and Air Pollution“, 1.-3. Juni 2005.
- [80] **HENDRIKS, N., et al.:** *EC-Case - Carbon Dioxide Sequestration*. Utrecht : TNO, Niederländische Organisation für Angewandte Naturwissenschaftliche Forschung, 2003.
- [81] **GALE, J. und DAVISON, J.:** *Transmission of CO<sub>2</sub> – Safety and Economic Considerations*. Kyoto : Proceedings of the 6th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologie, 2002. S. 517-522.
- [82] **LENZ, H.-P. und COZZARINI, Ch.:** *Emissionen und Luftqualität. VDI Fortschritt-Berichte Reihe 12, Nr. 365*. Düsseldorf : VDI Verlag, 1998.
- [83] **HERZOG, T.:** *World Greenhouse Gas Emissions*. Washington DC : World Resources Institute, 2009.

- [84] **KOHOUTEK, P.:** *Entwicklung einer Datenbank zur Berechnung von Abgasemissionen benzinbetriebener Pkw unter besonderer Berücksichtigung der Kraftstoffzusammensetzung.* Düsseldorf : VDI Verlag GmbH, 1996. ISBN: 3-18-327512-0.
- [85] **ORTHOFFER, R., et al.:** *Flüchtige Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe in Österreich: Regionalisierte Emissionsinventur und Strategien der Emissionsminderung.* Seibersdorf : Österreichisches Forschungszentrum, Juli 1991. ÖFZS-A-2065.
- [86] **BOUSCAREN, R., FRANK, R. und VELDT, C.:** *Hydrocarbons: Identification of Air Quality Problems in Member States of the European Communities.* s.l. : European Communities, Juni 1987. ISBN: 92-825-6942-X.
- [87] **BERG, W.:** *Die neue Abgasgesetzgebung der USA.* Wien : 12. Internationales Wiener Motorensymposium (ÖVK), 25.-26. April 1991. VDI Fortschrittberichte Nr. 150 Reihe 12.
- [88] **HAUSBERGER, St. und STURM, P.J.:** *Skriptum: Umweltauswirkungen des Verkehrs (Lv-Nr: 313.171).* Graz : Technische Universität Graz, 2006.
- [89] **FRISCHMUTH, M.:** *Dissertation: Massenspektrometrie mit chemischer Ionisierung (CI-MS) zur dynamischen Erfassung limitierter und nicht-limitierter Komponenten im Automobilabgas.* Braunschweig : Universität Lüneburg, 2002.
- [90] **BACH, C., et al.:** *Wirkungsorientierte Bewertung von Automobilabgasen.* Wiesbaden : MTZ - Motortechnische Zeitschrift Jahrgang 59, 1998.
- [91] **POULOPOULOS, S.G., SAMARAS, D.P. und PHILIPPOPOULOS, C.J.:** *Regulated and Unregulated Emissions from an Internal Combustion Engine Operating on Ethanol-Containing Fuels.* s.l. : Atmospheric Environment 35, September 2001. S. 4399-4406 .
- [92] **STÜGER, H.:** *Skriptum: Chemie (Lv-Nr. 303.170).* Graz : Technische Universität Graz, 24. Februar 2009.
- [93] **BACH, Ch. und LIENIN, S.:** *Emissionsvergleich verschiedener Antriebsarten in aktuellen Personenwagen - Untersuchung der Emissionen von aktuellen Personenwagen mit konventionellen und direkteingespritzten Benzinmotoren, Dieselmotoren mit und ohne Partikelfilter, sowie Erdgasmotoren.* Dübendorf : EMPA Materials Science and Technology, November 2007.
- [94] **WARNATZ, J., MAAS, U. und DIBBLE, R.W.:** *Verbrennung: Physikalisch-Chemische Grundlagen, Modellierung und Simulation, Experimente,*

- Schadstoffentstehung (3. Auflage)*. Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 2001.  
ISBN: 3-540-42128-9.
- [95] **KOCH, R. und WAGNER, B.O.:** *Umweltchemikalien*. Weinheim : Verlag Chemie, 1995. ISBN: 3-527-26902-9.
- [96] **N.N.:** *Test Method, Polynuclear Aromatic Hydrocarbons - Method 610*. Cincinnati : Environmental Protection Agency (EPA), 1982.
- [97] **BLASSNEGGER, J., et al.:** „*Untersuchung: Emissionen bei der motorischen Verbrennung von Biokraftstoffen und Kraftstoffmischungen*“. Gülzow : Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), 17. Dezember 2009.
- [98] **HÜBNER, C., ELLINGER, R. und PUXBAUM, H.:** *Polycyclic Aromatic Hydrocarbons*. Wien : Laboratorium für Umweltanalytik GesmbH (LUA), 29. Jänner 2004.
- [99] **KÜHLING, W.:** *Planungsrichtwerte für die Luftqualität, Entwicklung von Mindeststandards zur Vorsorge vor schädlichen Immissionen als Konkretisierung der Belange empfindlicher Raumnutzungen*. Dortmund : Schriftenreihe Landes- und Stadtentwicklungsforschung des Landes Nordrhein-Westfalen. Band 4.045, 1986.
- [100] **NOWAK, D., JÖRRES, R. und MAGNUSSEN, H.:** *Luftverschmutzung - Asthma - Atemwegsallergien, Zwischenergebnisse deutsch-deutscher epidemiologischer Studien*. Köln : Deutsches Ärzteblatt 91, Heft 1/2, 1994.
- [101] **CARA, C., et al.:** *Production of Fuel Ethanol from Steam-Explosion Pretreated Olive Tree Pruning*. s.l. : Fuel 87, Mai 2007. S. 692–700.
- [102] **PORDESIMO, L.O., et al.:** *Variation in Corn Stover Composition and Energy Content with Crop Maturity*. s.l. : Biomass and Bioenergy 28, April 2005. S. 366–374.
- [103] **DAI, D., et al.:** *Energy Efficiency and Potentials of Cassava Fuel Ethanol in Guangxi Region of China*. s.l. : Energy Conversion and Management 47, 2006.
- [104] **HENRICH, E. und DINJUS, E.:** *Hochwertige Biomassenutzung durch Flugstrom-Druckvergasung*. Berlin : 13. Internationales Sonnenforum, 12.-14. September 2002.
- [105] **LINDORFER, J.:** *Lignozellulose, eine Rohstoffoption für biogene Kraftstoffe?* Wien : 6. Internationalen Energiewirtschaftstagung, 11.-13. Februar 2009.

- [106] **GRUNERT, M. und FARACK, M.:** *Anbauverfahren Getreide für die Ethanolherstellung und Kurzvorstellung des Mehrländerprojektes Ethanol.* Leipzig : 2. Mitteldeutscher Bioenergietag, 29.4.2005.
- [107] **SARIKKINEN, K.:** *Technology for Bioethanol Production from Different Raw Materials.* Beijing : International Symposium on Alcohol Fuels, 21.-24. September 1998,.
- [108] **BOHLMANN, J.:** *Biokraftstoffe der zweiten Generation: Herstellungsoptionen, Stand der Technik, Effizienz, Kosten.* Stuttgart : Mobil mit Biomasse, 27. September 2006.
- [109] **WARNEKE, W., et al.:** *Kraftstoffe der Zukunft.* Wien : 27. Internationales Wiener Motorensymposium (ÖVK), 27.-28. April 2006. ISBN: 3-18-362212-2.
- [110] **BRISTLE, J.:** *Diplomarbeit: Die Verwendung von Ethanol als Kraftstoff. insbesondere in Dieselmotoren.* Nürtingen : Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen, Februar 2008.
- [111] **PAUL, N. und KEMNITZ, D.:** *Biokraftstoffe.* Gülzow : Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), 2007.
- [112] **WOLFSBERGER, U.:** *Biotreibstoffe - Überblick der verschiedenen Herstellungsverfahren.* Tänikon : Informationstagung Landtechnik, 10.-11. Oktober 2006.
- [113] **SCHINDLER, V.:** *Kraftstoffe für morgen.* Berlin : Springer Verlag, 1997. ISBN 5-540-62049-4.
- [114] **HENNINGS, O.:** *Die Bioethanolproduktion: Wettbewerbsfähigkeit in Deutschland unter Berücksichtigung der internationalen Konkurrenz (2. Auflage).* Lohmar - Köln : Josef Eul Verlag GmbH, Mai 2007. ISBN: 978-3-89936-586-3.
- [115] **TEGTMEIER, U.:** *Fortschritte in der Ethanol-Destillertechnik.* Berlin : Die Branntweinwirtschaft 8, 1985.
- [116] **WETTER, Ch., BRÜGGING, E und DOETKOTTE, F.:** *Machbarkeitsstudie zur Absolutierung von Bioethanol aus landwirtschaftlichen Brennereien.* Münster : Fachhochschule Münster, Dezember 2005.
- [117] **SCHATTAUER, A. und WEILAND, P.:** *Grundlagen der anaeroben Fermentation. Handreichung: Biogasgewinnung und -nutzung.* Gülzow : Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), 2006.

- [118] **KALTSCHMITT, M., HARTMANN, H. und HOFBAUER, H.:** *Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren.* Berlin/Heidelberg : Springer Verlag, 2009. ISBN: 978-3-540-85094-6.
- [119] **BRAUN, R.:** *Biogas-Methangärung organischer Abfallstoffe: Grundlagen und Anwendungsbeispiele.* Wien : Springer Verlag, 1982. ISBN: 3-211-81705-0.
- [120] **KLOSS, R.:** *Biogasanlagen nach technisch-wirtschaftlichen Kriterien.* München/Wien : Oldenbourg R. Verlag GmbH, 1986. ISBN: 3-486-26136-3.
- [121] **SCHATTNER, S. und GRONAUER, A.:** *Methangärung verschiedener Substrate – Kenntnisstand und offene Fragen.* Weimar : Gülzower Fachgespräche Band 15 (Energetische Nutzung von Biogas: Stand der Technik und Optimierungspotenzial), 2000.
- [122] **HARASEK, M.:** *Biogasaufbereitung mit der Membrantechnologie am Beispiel des Standortes Bruck/Österreich.* Kassel : 6. Hanauer Dialog - Biogasaufbereitung zu Biomethan, 21.02.2008.
- [123] **SCHOLWIN, F., et al.:** *Anlagentechnik zur Biogasbereitstellung. Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung.* Gülzow : Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), 2006.
- [124] **SCHULZ, H. und EDER, B.:** *Biogas-Praxis: Grundlage, Planung, Anlagenbau.* Staufen bei Freiburg : Ökobuch Verlag, 1996.
- [125] **JÄKEL, K. und MAU, S.:** *Managementunterlage: Landwirtschaftliche Biogaserzeugung und -verwertung.* Dresden : Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, 2003.
- [126] **HOFFMANN, M.:** *Trockenfermentation in der Landwirtschaft – Entwicklung und Stand.* Leipzig : Biogas – Energieträger der Zukunft (VDI-Berichte 1751), 12. März 2003.
- [127] **SCHATTAUER, A. und WEILAND, P.:** *Beschreibung ausgewählter Substrate. Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung.* Gülzow : Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), 2006.
- [128] **KALTSCHMITT, M., et al.:** *Biogasgewinnung und -nutzung: Tendenzen und Entwicklungen infolge des EEG.* Straubing : CARMEN e.V. (Internet: [www.carmenev.de/dt/portrait/sonstiges/kaltschmidt.pdf](http://www.carmenev.de/dt/portrait/sonstiges/kaltschmidt.pdf)), 2003.
- [129] **HEINRICH, H.:** *Bioethanol und ETBE die Position der Fahrzeugindustrie im Kontext der internationalen Entwicklung - Kraftstoffe der Zukunft.* Berlin : 3.

- Internationaler Fachkongress für Biokraftstoffe des BBE und der UFOP, 15. November 2005.
- [130] **URBANEK, M., GERINGER, B. und HOFMANN, P.:** *Limitierte und nichtlimitierte Schadstoffemissionen beim motorischen Betrieb mit Biokraftstoffen*. Stuttgart : ATZ/MTZ Konferenz - Innovative Kraft- und Schmierstoffe, 11.-12. November 2008.
- [131] **URBANEK, M. und HOFMANN, P.:** *Bioethanol aus Zucker und Stärke – die kurzfristige umweltfreundliche Kraftstoffalternative (Abschlussbericht)*. Wien : Technische Universität Wien (IVK), 29. August 2008. B08032.
- [132] **TERSCHEK, R. und LUDZAY, J.:** *Laboruntersuchungsprogramm zur Ethanolbeimischung zu Ottokraftstoffen*. Hamburg : DGMK (Deutsche wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V.) Forschungsbericht 645, 2005.
- [133] **ROSENITSCH, R., GERINGER, B. und LIST, R.:** *Literaturstudie: Potenzial von Bioethanol im Fahrzeugeinsatz*. Wien : Technische Universität Wien (IVK), Dezember 2007. B05048.
- [134] **MENRAD, H. und KÖNIG, A.:** *Alkoholkraftstoffe - Innovative Energietechnik*. Wien : Springer Verlag, 1982. ISBN: 3-211-81696-8.
- [135] **EIFLER, W., et al.:** *Küttner Kolbenmaschinen*. Wiesbaden : Vieweg+Teuber, GWV Fachverlage GmbH, 2009. ISBN: 978-3-8351-0062-6.
- [136] **SPICHER, U. und KNEIFEL, A.:** *Bedeutung der Motor-Oktan-Zahl (MOZ) für moderne Ottomotoren (Vorhabennr. 824)*. Frankfurt a.M. : FVV-Informationstagung, Motoren, 2006. R 533.
- [137] **KALGHATGI, G.T. und HEAD, R.A.:** *The Available and Required Auto-Ignition Quality of Gasoline-Like Fuels in HCCI Engines at High Temperatures (SAE Technical Paper Series 2004-01-1969)*. Toulouse : Fuels & Lubricants Meeting & Exhibition, 8.-10. Juni 2004.
- [138] **KALGHATGI, G.T.:** *Auto-Ignition Quality of Practical Fuels and Implications for Fuel Requirements of Future SI and HCCI Engines (SAE Technical Paper Series 2005-01-0239)*. Detroit : 2005 SAE World Congress, 11.-14. April 2005.
- [139] **KALGHATGI, G.T., NAKATA, K. und MOGI, K.:** *Octane Appetite Studies in Direct Injection Spark Ignition (DISI) Engines (SAE Technical Paper Series 2005-01-0244)*. Detroit : 2005 SAE World Congress, 11.-14. April 2005.

- [140] **N.N.:** *DIN EN 228 (Kraftstoffe für Kraftfahrzeuge – Unverbleite Ottokraftstoffe – Anforderungen und Prüfverfahren)*. Berlin : DIN Deutsches Institut für Normung e.V., November 2008.
- [141] **N.N.:** *ÖNORM EN 15293 (Kraftstoffe für Kraftfahrzeuge — Ethanol (E85) Autokraftstoff — Anforderungen und Prüfverfahren)*. Wien : ON Österreichisches Normungsinstitut, Juni 2009.
- [142] **WYSZINSKI, L. und STONE, C.:** *The Volumetric Efficiency of Direct and Port Injection Gasoline Engines with Different Fuels (SAE Technical Paper Series 2002-01-0839)*. s.l. : SAE International, 2002.
- [143] **BENNINGER, K., et al.:** *Flexfuel-Systeme für Ottomotoren mit Direkteinspritzung*. Wiesbaden : MTZ - Motortechnische Zeitschrift Jahrgang 68, 2007.
- [144] **KUFFERATH, A., SAMENFINK, W. und GERHARDT, J.:** *Die neue Emissionsstrategie der Benzin-Direkteinspritzung*. Wiesbaden : MTZ - Motortechnische Zeitschrift Jahrgang 64, 2003.
- [145] **UEBERHORST, St.:** *Energieträger Erdgas: Exploration. Produktion. Versorgung (3. aktualisierte Auflage)*. Landsberg/Lech : Moderne Industrie, 1999. ISBN: 3-478-93221-1.
- [146] **N.N.:** *Bosch Kraftfahrtechnisches Taschenbuch 24. Auflage*. Braunschweig/Wiesbaden : Vieweg&Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 2002. ISBN: 3-528-13876-9.
- [147] **ROSENITSCH, R. und GERINGER, B.:** *Vergleich der alternativen Kraftstoffe CNG und GTL im Hinblick auf ökonomische und ökologische Auswirkungen in Österreich*. Wien : Technische Universität Wien (IVK), Dezember 2004. B04046.
- [148] **PFLAUM, H. und GERINGER, B.:** *Biogas im Ottomotor - Einsatz und Potenzialabschätzung von Biogas in einem modernen Ottomotor*. Wien : Technische Universität Wien, Mai 2009. B09035.
- [149] **PFLAUM, H., et al.:** *Potenzial von unterschiedlichen Biogasqualitäten im Ottomotorischen Betrieb*. Graz : 12. Tagung - Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors, 24.-25. September 2009. ISBN: 978-3-85125-068-8.
- [150] **STRICKER, M.:** *Einspeisung von Biogas aus Sicht eines Erdgasnetzbetreibers*. Braunschweig : Gülzower Fachgespräch: Workshop „Aufbereitung von Biogas“, 17.-18. Juni 2003.

- [151] **N.N.:** *DVGW Technische Regel Arbeitsblatt G 260: Gasbeschaffenheit*. Bonn : Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, 2000.
- [152] **N.N.:** *DIN EN ISO 15403 (Erdgas – Bestimmung der Beschaffenheit von Erdgas als verdichteter Kraftstoff für Fahrzeuge)*. Berlin : DIN Deutsches Institut für Normung e.V., August 2007.
- [153] **STÜTZ, H. und PRENNINGER, P.:** *Gas-Direkteinblasung als Kernelement zur Erzielung extrem CO<sub>2</sub>-armer Antriebssysteme*. Stuttgart : ATZ/MTZ-Konferenz: Innovative Kraft- und Schmierstoffe für die Mobilität von morgen, 11.-12. November 2008.
- [154] **HEYWOOD, J.B.:** *Internal Combustion Engine Fundamentals*. New York : McGraw-Hill Inc., 1988. ISBN: 0-07-100499-8.
- [155] **N.N.:** *Richtlinie 2006/96/EG (70/220/EWG)*. Brüssel : Der Rat der Europäischen Gemeinschaft, 20. November 2006.
- [156] **KELLER, M. und de HAAN, P.:** *Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (Version 2.1)*. Bern/Heidelberg/Graz/Essen : UBA Berlin / BUWAL Bern / UBA Wien, 18. August 2004.
- [157] **URBANEK, M. und HOLUB, F.:** *Skriptum: Kraftfahrzeugbau Laborübungen (Lv-Nr.: 315.045)*. Wien : Technische Universität Wien, 2009.
- [158] **SCHAUER, C., NIESSNER, R. und PÖSCHL, U.:** *Analysis of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by Liquid Chromatography with Fluorescence and Mass Spectrometry Detection: Air Particulate Matter, Soot, and Reaction Product Studies*. s.l. : Analytical and Bioanalytical Chemistry 378, Februar 2004. S. 725-736.
- [159] **SCHAUER, C., NIESSNER, R. und PÖSCHL, U.:** *Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Urban Air Particulate Matter: Decadal and Seasonal Trends, Chemical Degradation and Sampling Artifacts*. s.l. : Environmental Science & Technology 37, Juli 2003. S. 2861-2868.
- [160] **LIPARI, F. und SWARIN, S. J.:** *Determination of Formaldehyde and Other Aldehydes in Automobile Exhaust with an Improved 2,4-dinitrophenylhydrazine Method*. s.l. : Journal of Chromatography 247, Oktober 1982.
- [161] **KALLINGER, G. und NIESSNER, R.:** *Development and Laboratory Investigation of a Denuder Sampling System for the Determination of Carbonyl Compounds in Stack Gas*. s.l. : Fresenius' Journal of Analytical Chemistry 358, Juli 1997. S. 687-693.

- [162] **SMIDT, S., et al.:** *Concentrations of Ethene and Formaldehyde at a Valley and a Mountain Top Site in the Austrian Alps.* s.l. : Atmospheric Environment 39, Juli 2005. S. 4087-4091.
- [163] **SOLBERG, S., et al.:** *Longterm Measurements and Model Calculations of Formaldehyde at Rural European Monitoring Sites.* s.l. : Atmospheric Environment 35, 2001. S. 195–207.
- [164] **N.N.:** *Richtlinie 2004/3/EG (80/1268/EWG).* Brüssel : Der Rat der Europäischen Gemeinschaft, 16. Dezember 1980.
- [165] **FLOHR, A.:** *Dissertation: Konzept und Umsetzung einer Online-Messdatendiagnose an Motorenprüfständen.* Darmstadt : Technische Universität Darmstadt, 7. September 2005.
- [166] **URBANEK, M., et al.:** *Flottentest- und Prüfstandsuntersuchungen mit Bioethanol verschiedener Konzentrationen – Ergebnisse eines österreichischen Forschungsprogramms.* Dresden : 6. VDI Tagung - Innovative Fahrzeugantriebe, 6.-7. November 2008.
- [167] **ROBERTS, M.C.:** *E85 and Fuel Efficiency: An Empirical Analysis of 2007 EPA Test Data.* s.l. : Energy Policy 36, März 2008.
- [168] **SCHWEINLE, G., GRAF, A. und OBLÄNDER, P.:** *Grenzwerte, Vorschriften und Messung der Abgas-Emissionen sowie Berechnung des Kraftstoffverbrauches aus dem Abgastest (Auflage Nr. 25).* s.l. : Mercedes-Benz Abgasbroschüre, Mai 2005.
- [169] **SCHWEINLE, G., GRAF, A.:** *Interaktion von Testverfahren und Fahrzyklen bei Pkw-Abgasmessungen.* Sinsheim : 3. Internationales Forum Abgas- und Partikelemission, 14.-15.09.2004.
- [170] **de HAAN, P. und KELLER, M.:** *Real-World Driving Cycles for Emission Measurements: ARTEMIS and Swiss Cycles.* Bern : INFRAS, 17 März 2001.
- [171] **ANDRE, M.:** *The ARTEMIS European Driving Cycles for Measuring Car Pollutant Emissions.* s.l. : Science of The Total Environment 334-335, Dezember 2004. S. 73-84.
- [172] **ANDRE, M., et al.:** *Real-World European Driving Cycles, for Measuring Pollutant Emissions from High- and Low-powered Cars.* s.l. : Atmospheric Environment 40, Oktober 2006. S. 5944-5953.
- [173] **GERINGER, B. und HOFMANN, P.:** *Potentials and Challenges of 1st and 2nd Generation Alternative Fuels for Internal Combustion Engines (ICE).*

- Stuttgart/Ostfildern : TAE 6th International Colloquium - Fuels, 10.-11. Jänner 2007. ISBN: 3-924813-67-1.
- [174] **URBANEK, M., HOFMANN, P. und GERINGER, B.:** *Emission Performance of Passenger Cars Operated with Ethanol-Blends*. Stuttgart/Ostfildern : TAE 7th International Colloquium - Fuels, 14.-15. Jänner 2009. ISBN: 3-924813-75-2.
- [175] **WEBERBAUER, F., et al.:** *Allgemein gültige Verlustteilung für neue Brennverfahren*. Wiesbaden : MTZ - Motortechnische Zeitschrift Jahrgang 66, 2005. S. 120-124.
- [176] **URBANEK, M., HOFMANN, P. und GERINGER, B.:** *Vehicle use of Ethanol-Blends – Emission Performance and Potential for CO<sub>2</sub>-Reduction*. Bratislava : 12th EAEC European Automotive Congress, 29. Juni-01. Juli2009.
- [177] **BASSHUYSEN, R. und SCHÄFER, F.:** *Handbuch Verbrennungsmotor (2. Auflage)*. Braunschweig/Wiesbaden : Vieweg&Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 2002. ISBN: 3-528-1333-1.
- [178] **PISCHINGER, R., KLELL, M. und SAMS, T.:** *Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine*. Wien : Springer Verlag, 2002. ISBN: 3-211-83679-9.
- [179] **WOSCHNI, E.-G.:** *Die Berechnung der Wandverluste und der thermischen Belastung der Bauteile von Dieselmotoren*. Wiesbaden : MTZ - Motortechnische Zeitschrift Jahrgang 36, 1970.
- [180] **BARGENDE, M., BURKHARDT, Ch. und FROMMELT, A.:** *Besonderheiten der thermodynamischen Analyse von DE-Ottomotoren*. Wiesbaden : MTZ - Motortechnische Zeitschrift Jahrgang 62, 2001.
- [181] **BAER, H. D. und KABELAC, St.:** *Thermodynamik - Grundlagen und ihre technischen Anwendungen (13. Auflage)*. Berlin/Heidelberg : Springer Verlag, 2006. ISBN: 3-540-32513-1.
- [182] **YÜCESU, H.S., et al.:** *Effect of Ethanol-Gasoline Blends on Engine Performance and Exhaust Emissions in Different Compression Ratios*. s.l. : Applied Thermal Engineering 26, Dezember 2006.
- [183] **GERINGER, B., et al.:** *Biokraftstoffe – Herausforderung an die Motoren von morgen*. Bad Staffelstein : OTTI 18. Symposium Bioenergie, 19.-20. November 2009.

- [184] **HSIEH, W.-D., et al.:** *Engine Performance and Pollutant Emission of an SI Engine Using Ethanol–Gasoline Blended Fuels*. s.l. : Atmospheric Environment 36, Jänner 2002. S. 403-410.
- [185] **BALLAUF, J., et al.:** *AUDI 2.0l TFSI Flexible Fuel*. Graz : 12. Tagung - Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors, 24.-25. September 2009. ISBN: 978-3-85125-068-8.
- [186] **BRUSSTAR, M.J. und C.L., GRAY.:** *High Efficiency with Future Alcohol Fuels in a Stoichiometric Medium Duty Spark Ignition Engine (SAE Technical Paper Series 2007-01-3993)*. Rosemont : Powertrain & Fluid Systems Conference & Exhibition, 29.10.-1.11.2007.
- [187] **HE, B.-Q., et al.:** *A Study on Emission Characteristics of an EFI Engine with Ethanol Blended Gasoline Fuels*. s.l. : Atmospheric Environment 37, March 2003. S. 949-957.
- [188] **JEFFREY, J.G. und ELLIOTT, N.G.:** *Gasoline Composition Effects in a Range of European Vehicle Technologies (SAE Technical Paper Series 932680)*. Philadelphia, : International Fuels & Lubricants Meeting & Exposition, Oktober 1993.
- [189] **LANGE, W.W., et al.:** *The Effect of Gasoline Composition on Exhaust Emissions from Modern BMW Vehicles (SAE Technical Paper Series 941867)*. Baltimore : International Fuels & Lubricants Meeting & Exposition, Oktober 1994.
- [190] **BEER, T. und GRANT, T.:** *Life-cycle Analysis of Emissions from Fuel Ethanol and Blends in Australian Heavy and Light Vehicles*. s.l. : Journal of Cleaner Production 15, 2007. S. 833-837.
- [191] **JIA, L.-W., et al.:** *Influence of Ethanol–Gasoline Blended Fuel on Emission Characteristics from a Four-Stroke Motorcycle Engine*. s.l. : Journal of Hazardous Materials A123, August 2005. S. 29-34.
- [192] **GRAHAM, L.A., BELISLE, S.L. und BAAS, C.L.:** *Emissions from Light Duty Gasoline Vehicles Operating on Low Blend Ethanol Gasoline and E85*. s.l. : Atmospheric Environment 42, Juni 2008. S. 4498-4516.
- [193] **BENSON, J.D., et al.:** *Emissions with E85 and Gasolines in Flexible/Variable Fuel Vehicles - The Auto/Oil Air Quality Improvement Research Program (SAE Technical Paper Series 952508)*. s.l. : SAE International, Oktober 1995.

- [194] **HÜBNER, Ch. und ERNST, V.:** *Emissionen von Aldehyden im Abgas eines Pkws bei Einsatz unterschiedlicher Kraftstoffgemische*. Wien : Laboratorium für Umweltanalytik, 3.8.2007. 192B07.
- [195] **TSUNOOKA, T., et al.:** *High Concentration Ethanol Effect on SI Engine Cold Startability (SAE number 2007-01-0236)*. s.l. : SAE International, Juli 2007.
- [196] **N.N.:** *ÖNORM C 1114 (Kraftstoffe für Kraftfahrzeuge – Ottokraftstoff – Ethanol E85 – Anforderungen und Prüfmethode)*. Wien : ON Österreichisches Normungsinstitut, April 2007.
- [197] **N.N.:** *DIN 51625 (Kraftstoffe für Kraftfahrzeuge – Ethanolkraftstoff – Anforderungen und Prüfverfahren)*. Berlin : DIN Deutsches Institut für Normung e.V., August 2008.
- [198] **BARGENDE, M., et al.:** *Ein strahlgeführtes CNG-Brennverfahren für minimale CO<sub>2</sub>-Emissionen*. München : MTZ Konferenz: Der Antrieb von Morgen, 3.-4. Juni 2008.
- [199] **PUCHER, E., et al.:** *CNG Prototyp Van With CO<sub>2</sub> Emission Target of 120 g/km*. München : FISITA 2008 World Automotive Congress, 14.-19. September 2008. F2008-07-023.
- [200] **ASLAM, M.U., et al.:** *An Experimental Investigation of CNG as an Alternative Fuel for a Retrofitted Gasoline Vehicle*. s.l. : FUEL 85, März-April 2006. S. 717-724.
- [201] **JONES, A.L. und EVANS, R.L.:** *Comparison of Burning Rates in a Natural-Gas-Fueled Spark Ignition Engine*. s.l. : Journal of Engineering for Gas Turbines and Power 107, Oktober 1985.
- [202] **EVANS, R.L. und J., BLASZCZYK.:** *A comparative Study of the Performance and Exhaust Emissions of a Spark Ignition Engine Fuelled by Natural Gas and Gasoline*. s.l. : Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers 211 (Part D: Journal of Automobile Engineering), 1997. S. 39-47.
- [203] **KALAM, M.A., et al.:** *Exhaust Emission and Performance Evaluation of a Modified Spark Ignited Natural Gas Engine*. s.l. : JSPS-VCC Natural Resources & Energy Environment, 7.-9. September 2004.

---

## Lebenslauf

### Persönliche Daten

Name: Michael Maximilian Urbanek  
Geburtsdatum: 2.8.1976  
Geburtsort: St.Pölten  
Staatsbürgerschaft: Österreich  
Familienstand: verheiratet

Anschrift: Kurzenkirchnerstraße 16  
3150 Wilhelmsburg

E-Mail: michael@urbanek.cc

### Ausbildung

2006 – 2008: TU Wien / Donau-Universität Krems (MBA)  
General Management MBA Lehrgang  
*„Strategische Neuausrichtung eines Unternehmens nach dem Krisenfall –  
Sanierung am Beispiel der RHI“ (Master-Thesis)*

1995 – 2004: TU Wien (Dipl.-Ing.)  
Diplomstudium Maschinenbau  
*„Methodik der Messung und Simulation von Lastkollektiven auf der  
Rennstrecke“ (Diplomarbeit)*

1986 – 1994: BG und BRG St. Pölten  
Humanistischer Zweig

### Beruflicher Werdegang

2004 – 2010: Technischen Universität Wien  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fahrzeugantriebe und  
Automobiltechnik (IFA)

2003 – 2004: Audi AG  
Diplomand bei Audi Sport in der Abteilung I/EY-2