

Clean Engine Vehicle

Ein niedrigstemittierendes und verbrauchsarmes Erdgas-Antriebskonzept



**Christian Bach¹, Christian Lämmle^{1,2}, Rolf Bill¹, Philippe Janner^{1,3},
David Dyntar³, Patrik Soltic¹, Chris Onder³,
Konstantinos Boulouchos², Lino Guzzella³, Hans Peter Geering³**

¹Abt. Verbrennungsmotoren/Feuerungen, EMPA Dübendorf (CH)

²Laboratorium für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme, ETH Zürich (CH)

³Institut für Mess- und Regeltechnik, ETH Zürich (CH)

1. Inhalt

1.	Inhalt	1
2.	Einführung und Motivation	3
2.1	Ozonbelastung der Aussenluft.....	3
2.2	Russpartikel (PM10).....	5
2.3	CO ₂ -Emissionen	6
3.	Das Clean Engine Vehicle-Projekt (CEV)	7
3.1	Basisfahrzeug und Versuchsdurchführung	7
3.2	Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses.....	8
3.3	Downsizing	10
3.4	Motorsteuerung	14
3.5	Katalysatoren	15
3.5.1	Ausrüstung des Fahrzeuges	15
3.5.2	Abgastemperaturen	17
3.5.3	Schadstoffumwandlung im Katalysator.....	18
3.6	Endergebnisse.....	22
4.	Zusammenfassung	24
5.	Anhang 1 (Verzeichnis der Abkürzungen).....	25
6.	Anhang 2 (Verzeichnis der Semester und Diplomarbeiten).....	26
6.1	Semester- und Diplomarbeiten am LAV.....	26
6.2	Semester und Diplomarbeiten am IMRT	26

2. Einführung und Motivation

Der motorisierte Strassenverkehr trägt einerseits wesentlich zur persönlichen Lebensqualität und zur wirtschaftlichen Entwicklung bei, ist aber andererseits mit negativen Auswirkungen auf die lokale und globale Umwelt sowie auf die Gesundheit verbunden. Die Weiterentwicklung der Motorentechnologie und die Einführung von hochentwickelten Motorsteuerungen und effizienten Abgasnachbehandlungssystemen bei Benzin- und Dieselmotoren hat in den vergangenen Jahren zu einer starken Reduktion der verkehrsbedingten Luftbelastung geführt, Defizite bei der Luftschadstoffreduzierung bestehen aber noch beim Ozon, den Russpartikeln und den NO_2 -Emissionen¹. Immer stärker in die Kritik kommen im Verkehrsbereich die steigenden CO_2 -Emissionen und die fast 100 %-ige Abhängigkeit vom Erdöl².

Erdgas als alternativer Treibstoff gewinnt in diesem Zusammenhang zunehmend an Bedeutung, weil sich damit vergleichsweise niedrige CO_2 -Emissionen wie auch niedrigste Schadstoffemissionen realisieren lassen.

2.1 Ozonbelastung der Aussenluft

Obwohl die Konzentrationen der Ozon-Vorläufersubstanzen VOC und NO_x in der Aussenluft seit Jahren kontinuierlich zurückgingen (Abb. 1), blieb die Ozonbelastung im gleichen Zeitraum in ländlichen und städtischen Gebieten nahezu konstant (Abb. 2).

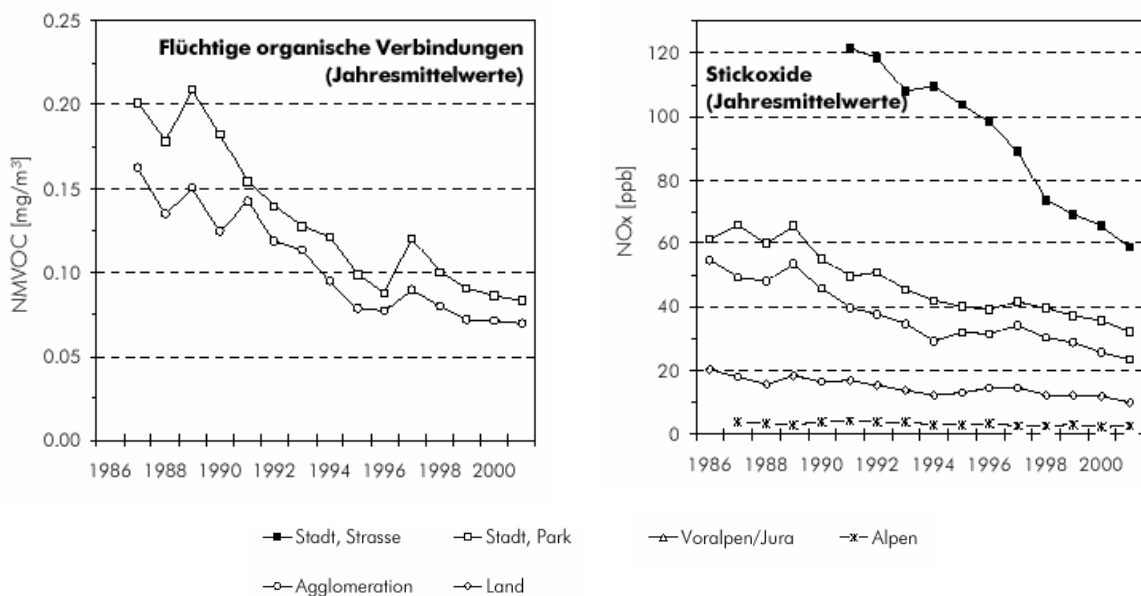


Abb. 1: Immissionsentwicklung 1986 - 2001 für VOC und NO_x an verschiedenen Standorten; Legende siehe Abb. 4 (Quelle: BUWAL)

¹ BUWAL, Bern, Pressemitteilung 19.12.02

² Mitteilung der EU-Kommission über alternative Kraftstoffe für den Strassenverkehr und ein Bündel von Massnahmen zur Förderung der Verwendung von Biokraftstoffen, Brüssel, den 7.11.2001, KOM(2001) 547

Abb. 2 zeigt die Ozonbelastung in einer Agglomeration (Dübendorf) und einem Stadtzentrum (Zürich) während der letzten 10 Jahre.

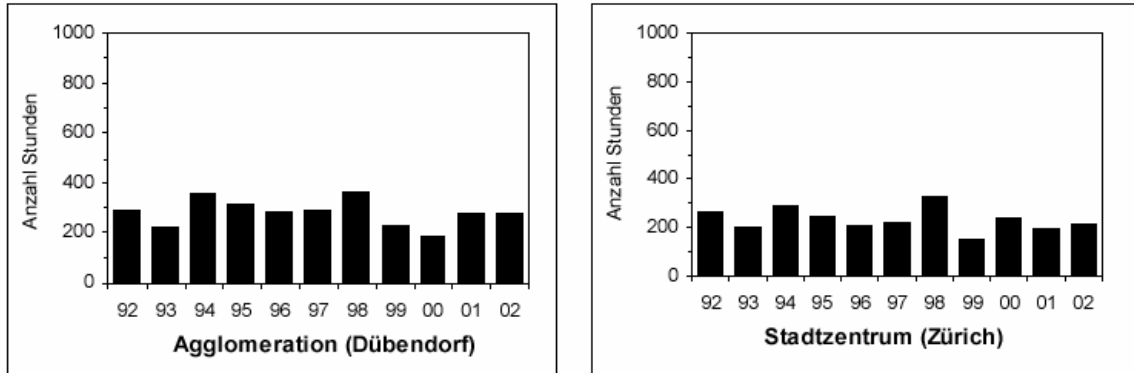


Abb. 2: Anzahl Stunden mit einer Ozonbelastung > 120 µg/m³ (CH-Immissionsgrenzwert) für die Jahre 1992 bis 2002 (Quelle: EMPA NABEL)

Aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzung der Kohlenwasserstoffe von Erdgasfahrzeugen im Vergleich zu denjenigen von Benzin und Dieselfahrzeugen (Abb. 3 links) weisen diese insgesamt eine wesentlich geringere Ozonreaktivität auf als diejenigen von Benzin- und Dieselfahrzeugen (Abb. 3 rechts, breite Balken), selbst wenn die T.HC-Emissionen höher sind als beim Benzin- und Dieselfahrzeug (Abb. 3 rechts, schmale Balken). Damit kann das Erdgasfahrzeug vor allem in städtischen Gebieten (d.h. zunehmend VOC-limitierte Ozonbildung) einen Beitrag zur Verminderung der Ozonbelastung leisten³.

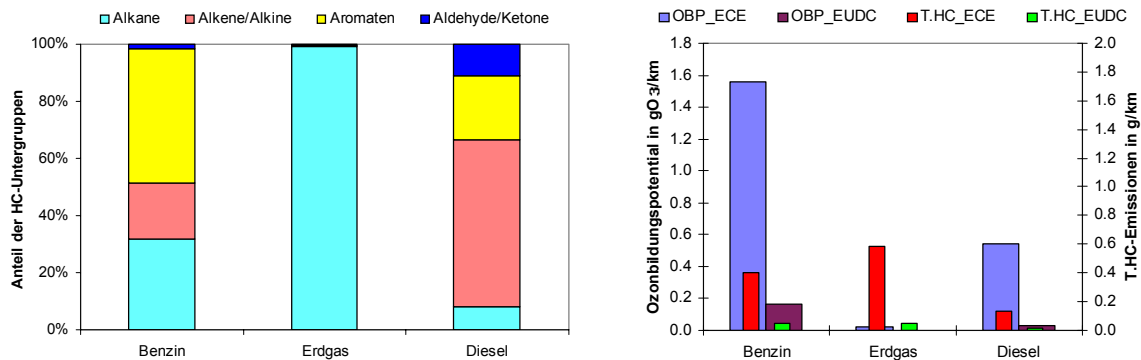


Abb. 3: Zusammensetzung der Kohlenwasserstoffe und Ozonbildungspotentiale von Benzin-, Erdgas- und Dieselfahrzeugen nach Euro-2 (Quelle: EMPA, 1998)

³ Bach, Ch., Heeb, N., Mattrel, P., Mohr, M.; Wirkungsorientierte Bewertung von Automobilabgasen; Motortechnische Zeitschrift MTZ 1998 Nr. 11

2.2 Russpartikel (PM10)

Die Partikelbelastung in der Aussenluft konnte in den vergangenen Jahren im Gegensatz zum Ozon an allen Standorten vermindert werden. Sie liegt aber vor allem in verkehrsbelasteten Gebieten immer noch und zum Teil deutlich über den Grenzwerten der schweizerischen Luftreinhalteverordnung (Abb. 4).

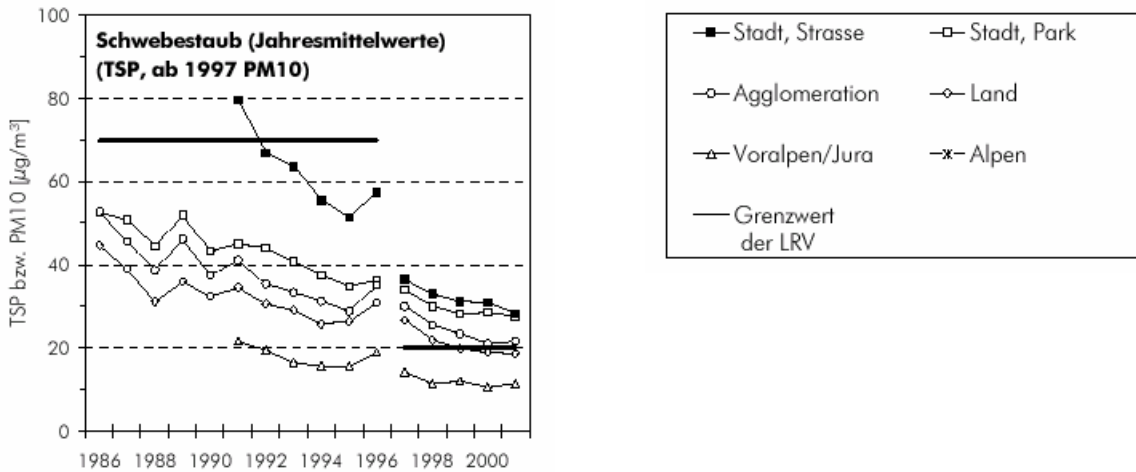


Abb. 4: Immissionsentwicklung 1986 - 2001 für Partikel (TSP bis 1996, PM10 ab 1997) an verschiedenen Standorten (Quelle: BUWAL)

Messungen der EMPA und verschiedener anderer Stellen haben gezeigt, dass Erdgasfahrzeuge anzahl- und massenmässig vergleichbar niedrige Partikelemissionen aufweisen wie konventionelle Benzinfahrzeuge (Abb. 5). Sie liegen im Bereich der Aussenluftkonzentration.

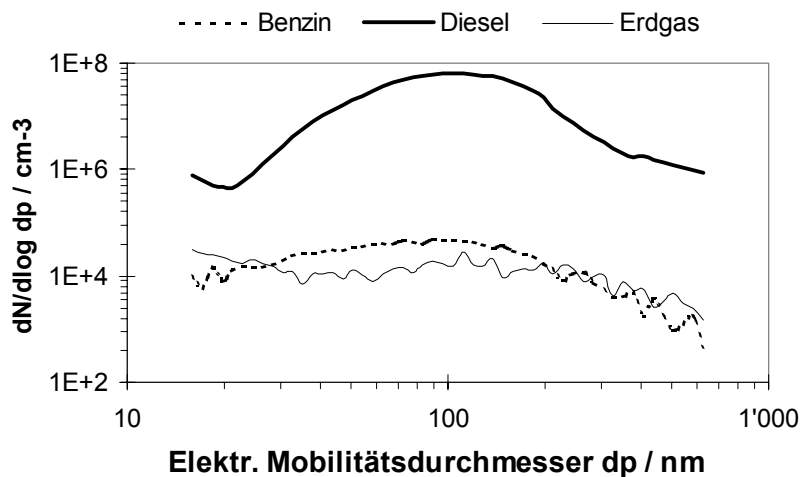


Abb. 5: Partikel-Anzahlkonzentration eines Benzin-, Diesel- und Erdgasfahrzeugtyps (alle Euro-2) bei V = 120 km/h (Quelle: EMPA 1998)

2.3 CO₂-Emissionen

Eine der grössten Herausforderungen der nächsten Zeit im Bereich der Motorfahrzeugantriebe liegt bei der wesentlichen Verminderung der CO₂-Emissionen. Genau hier liegt ein weiterer grosser Vorteil von Erdgas. Dank dem im Vergleich zu Benzin und Diesel niedrigeren Kohlenstoffgehalt, liegen die CO₂-Emissionen bereits bei bivalenten Fahrzeugen im Erdgasbetrieb ca. 20% niedriger als im Benzinbetrieb. Aufgrund der ausgezeichneten Treibstoffeigenschaften von Erdgas (Tab. 1) sind gegenüber dem Benzinfahrzeug mehr wirkungsgradsteigernde Massnahmen (z.B. Verdichtungserhöhung, Downsizing und Aufladung) möglich, die zu einer weiteren Reduktion der CO₂-Emissionen beitragen können.

Eigenschaften	Benzin	Methan
Oktanzahl (ROZ)	95 - 98	130
Energieinhalt	43 MJ/kg	50 MJ/kg
Selbstzündungstemp.	228 - 500 °C	540 °C
Flammentemperatur	2'200 °C	1'875 °C
Giftigkeit	Hoch	Nicht giftig
Kohlenstoff-Massenanteil	0.866	0.749
CO ₂ am Auspuff pro MJ Treibstoff	74 g	55 g
Speichervolumen (bez. auf Energieinhalt von Benzin)	1	4.5 (200 bar)

Tab. 1: Eigenschaften von Benzin und Methan

Vor dem Hintergrund der problematischen Luftschadstoffwerte und den Bemühungen um die Verminderung der CO₂-Emissionen stellt der Erdgasantrieb mehr denn je eine echte Alternative dar. Dies gilt im besonderen, wenn dem fossilen Erdgas biogen erzeugtes Methan beigemischt wird, wie dies in der Schweiz bereits erfolgreich praktiziert wird. Erdgas als Treibstoff stellt aufgrund seiner Schwankungen in der Zusammensetzung jedoch hohe Anforderungen an die Motorsteuerung und aufgrund des stabilen Molekülaufbaus von Methan auch an die Abgasnachbehandlung. Wegen der rund 4.5-mal niedrigeren Energiedichte der 200 bar-Druckgasspeicherung gegenüber Benzin sind akzeptable Reichweiten nur erreichbar, wenn verbrauchsarme Antriebe realisiert werden können.

Insgesamt stellt der Methangantrieb für viele PW-Anwendungen trotz einiger technischer Herausforderungen im Vergleich zu anderen Treibstoffen und/oder Antriebstechnologien eine vergleichsweise kostengünstige Möglichkeit für einen praktisch emissionsfreien Antrieb mit sehr guter CO₂-Bilanz dar.

3. Das Clean Engine Vehicle-Projekt (CEV)

Das Clean Engine Vehicle-Projekt (CEV) beinhaltete den Umbau eines aktuellen benzinbetriebenen Antriebs auf den monovalenten Erdgasbetrieb, sowie die Optimierung des Verdichtungsverhältnisses, der Abgasnachbehandlung und die Realisierung eines Downsizingkonzeptes. Ziel des Projektes war die Reduktion der CO₂-Emissionen um mind. 30% im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) gegenüber einem vergleichbar motorisierten Benzinfahrzeug, wie auch die Einhaltung der strengsten europäischen und amerikanischen Abgasgrenzwerte für Euro-4- Fahrzeuge bzw. Super-Ultra-Low-Emission-Vehicles (SULEV).

3.1 Basisfahrzeug und Versuchsdurchführung

Als Basisfahrzeug diente ein VW Polo (Modelljahr 2000) mit einem Leergewicht von 1'020 kg und einem konventionellen 4 Zylinder, 1.0 Liter-, 2-Ventilmotor mit 37 kW bei 5'000 U/min, bzw. 86 Nm bei 3'000 U/min. Das Verdichtungsverhältnis betrug 10.7 und der Motor war ausgerüstet mit einer Saugrohrspritzung, Abgasrückführung sowie einem Vor- und Hauptkatalysator. Das Fahrzeug war nach Euro-4 homologiert.

Das Projekt beinhaltete Untersuchungen auf dem Motoren- und Rollenprüfstand. Aufgrund der sehr niedrigen Abgaswerte wurde die Verdünnungsluft für die Abgasaufbereitungsanlage (CVS-System) gereinigt, für die Auskondensation des Wasserdampfes auf ca. 0 °C abgekühlt und anschliessend wieder auf 23 °C aufgeheizt. Zusätzlich wurden alle Rohgasleitungen bis zum Mischpunkt des Abgases mit Verdünnungsluft auf 100 °C beheizt, um eine Kondensation des Wasserdampfes im unverdünnten Abgas zu verhindern.

Für die Untersuchungen wurden je nach Fragestellung folgende Gasqualitäten verwendet:

	G20	G25	Kaliforn.- Erdgas⁴	CH- Erdgas
Methan	100.0%	86.0%	89.9%	92.0%
Ethan			4.0%	3.0%
C ₃ und höhere HC			2.0%	1.0%
Sauerstoff			0.5%	
Inertgase		14.0%	3.5%	3.0%

Tab. 2: Im CEV-Projekt verwendete Treibstoffqualitäten

⁴ California – Natural Gas Certification Test Fuel (Emission Certification Procedure, Appendix E)

3.2 Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses

Aufgrund der hohen Klopfestigkeit von Erdgas kann das Verdichtungsverhältnis erhöht werden. Dies führt im Verdichtungsstakt zu einem höheren Druck und einer höheren Temperatur und im Expansionsstakt aufgrund einer grösseren Expansion zu einer niedrigeren Abgastemperatur. Beides führt zu einer Erhöhung des thermischen Wirkungsgrades, bzw. einer Erhöhung der Motorleistung.

Bevor mit Hilfe eines Simulationsmodells die Optimierung des Verdichtungsverhältnisses berechnet werden konnte (Abb. 7), wurden am auf den Erdgasbetrieb umgebauten Motor mit dem originalen Verdichtungsverhältnis von 10.7 der Einfluss von AGR-Rate, Zündwinkel, Last und Drehzahl auf die Verbrennung in einigen relevanten Betriebspunkten mittels Verbrennungs-, Verbrauchs- und Abgasanalysen untersucht.

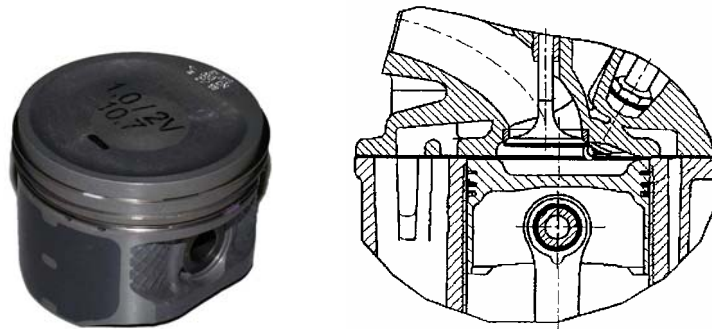


Abb 6: Originalkolben und Brennraum mit einem Verdichtungsverhältnis von 10.7

Mittels zyklusaufgelöster Zylinderinnendruckmessungen konnten die Parameter für ein Verbrennungsmodell nach Vibe⁵ bestimmt werden. Der Hochdruckprozess wurde mit einem Zweizonenmodell abgebildet, wobei geeignete Modelle für Verbrennung und Wandwärmeverluste eingesetzt wurden. Die Modellierung des Niederdruckprozesses erfolgte mit den Grundgleichungen der eindimensionalen Gasdynamik. Mit Hilfe der Daten aus dem Experiment erfolgte eine Validierung des Prozessrechenmodells bei verschiedenen Lasten und Drehzahlen. Dieses Modell wurde dann für die Simulation verschiedener Verdichtungsverhältnisse angewendet.

⁵ Vibe I. I., Brennverlauf und Kreisprozess von Verbrennungsmotoren, VEB Verlag Technik, Berlin 1970

In Abb. 7 sind die berechneten Potentiale verschiedener Verdichtungsverhältnisse auf den spezifischen Verbrauch bei einem Mitteldruck von 2 bar, einer Drehzahl von 2'000 U/min und einem Basiszündwinkel (ausgezogene Linie) angegeben. Darauf basierend wurde das zusätzliche Potential einer Variation des Zündwinkels (Punkte) berechnet.

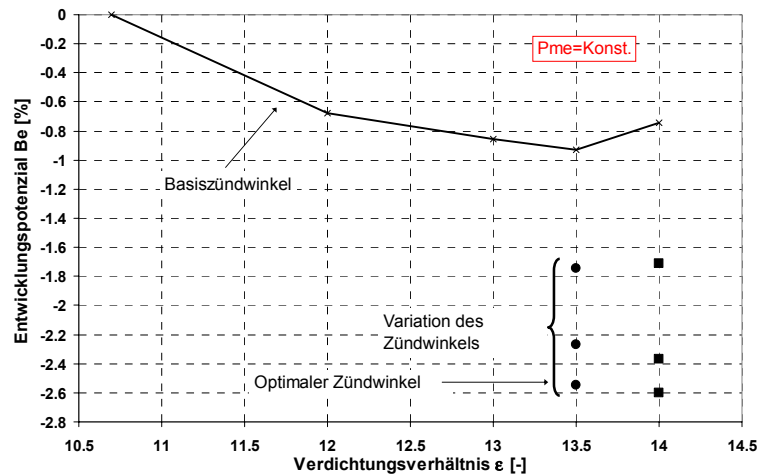


Abb. 7: Berechnete Einflüsse von Verdichtungsverhältnis und Verbrennungsschwerpunkt bei 2'000 U/min und einem Mitteldruck vom 2 bar auf den spezifischen Verbrauch

Anhand dieser Simulation konnte das Optimum bei einem Verdichtungsverhältnis von 13.5 bestimmt werden. Bei höheren Verdichtungsverhältnissen nehmen die Wandwärmeverluste als Folge der zwangsweise zerklüfteten Brennraumform unverhältnismässig stark zu. Zudem wird die Flammausbreitung behindert. Die Simulation ergab für das auf 13.5 erhöhte Verdichtungsverhältnis ein Potential für die Reduktion des spezifischen Verbrauchs von ca. 2%, verglichen mit dem originalen Verdichtungsverhältnis von 10.7 bei einem Verbrennungsschwerpunkt von 8 °KW n. OT.

Häufig wird jedoch das höchstmögliche Verdichtungsverhältnis durch konstruktive Grenzen definiert. In unserem Falle war es aufgrund der Abstände von Ventilen zu Kolben und Zylinderkopf zu Kolben nicht möglich, den Feuersteg des Kolbens zu erhöhen. Es war nur möglich, die Kolbenmulde zu verkleinern oder zu eliminieren. Die vollständige Elimination der Kolbenmulde führte gerade zum gewünschten Verdichtungsverhältnis von 13.5, weshalb diese Variante realisiert wurde. Die so modifizierten Kolben (siehe Abb. 8) wurden installiert und die o.g. Messungen wurden zwecks Validierung der Computersimulation wiederholt.

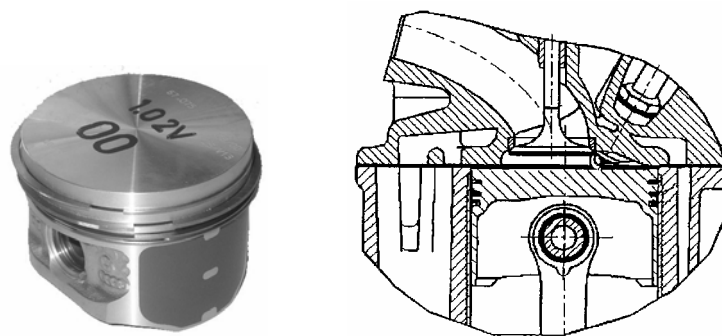


Abb. 8: Modifizierter Kolben (ohne Kolbenmulde) und Brennraum mit einem Verdichtungsverhältnis von 13.5

Die simulierten und gemessenen spezifischen Verbräuche in vier verschiedenen Betriebspunkten für den Motor mit einem Verdichtungsverhältnis von 13.5 sind in folgenden Diagrammen dargestellt:

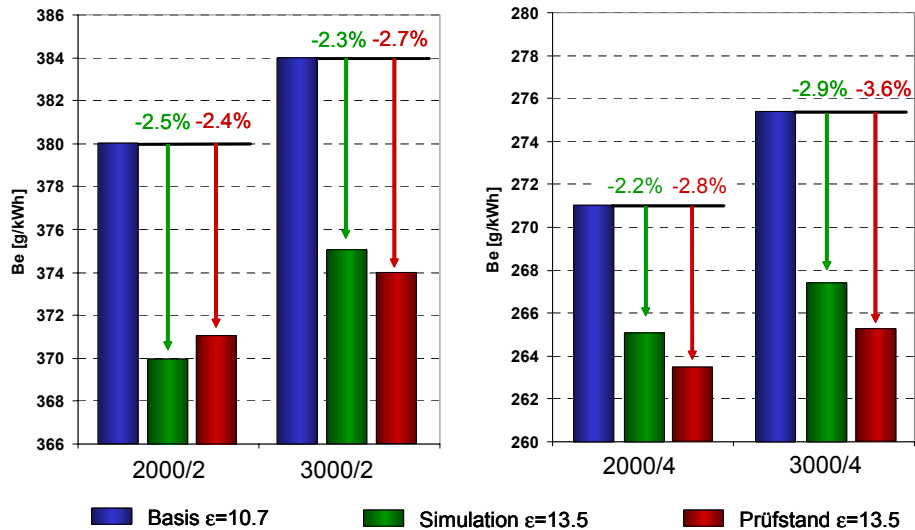


Abb. 9: Simulierte und gemessene Einflüsse des Verdichtungsverhältnisses auf den spezifischen Verbrauch für vier verschiedene Betriebspunkte (Drehzahl in U/min / pme in bar).

3.3 Downsizing

Mit kleineren, dafür aufgeladene Motoren kann der Verbrauch bei Teillast vermindert werden, ohne dass bezüglich Motorleistung Einschränkungen in Kauf genommen werden müssen. Aufgrund der hohen Klopfestigkeit von Erdgas sind Erdgasmotoren für die Aufladung wesentlich besser geeignet als Benzinmotoren. Wegen der gasförmigen Einblasung von Erdgas gegenüber der flüssigen, und damit volumetrisch wesentlich „kompakteren“ Einspritzung von Benzin ergibt sich für Erdgas-Saugmotoren eine systembedingte Minderleistung von ca. 10 bis 15% (Verminderung der Motorfüllung), die durch die Aufladung jedoch mehr als kompensiert werden kann.

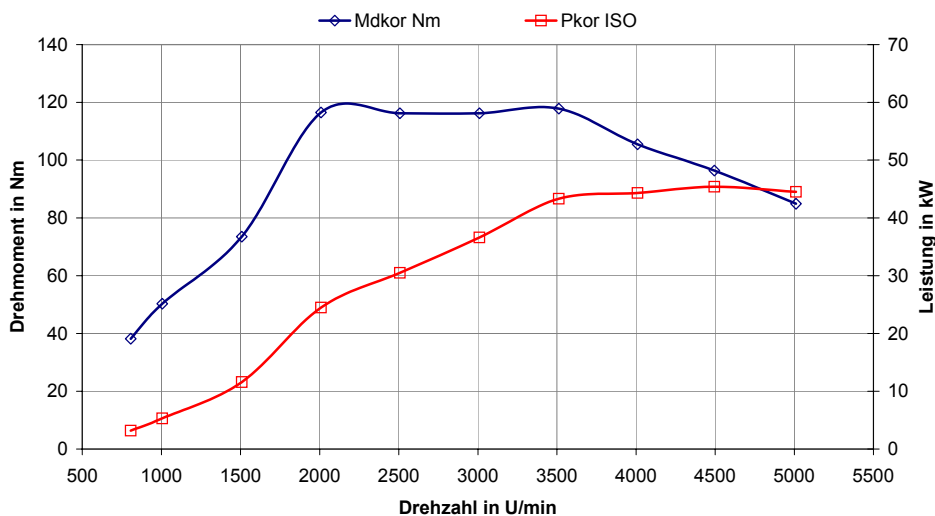


Abb. 10: Gemessene Motorleistung und Drehmoment des aufgeladene 1.0 l Erdgasmotors mit G20-Treibstoff

In unserem Fall hatte das Basisfahrzeug mit dem Benzinmotor bei 80 km/h im 5. Gang eine Drehmomentreserve von 58 Nm. Dieser Wert sank durch den Umbau auf Erdgas auf 49 Nm (siehe Abb. 11).

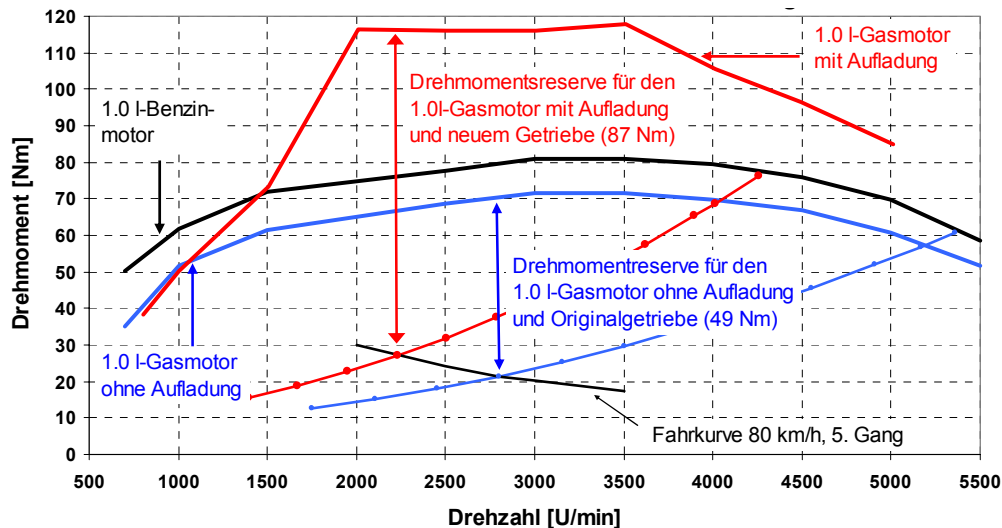


Abb. 11: Drehmomentreserve für den unaufgeladenen Benzin- und Erdgasbetrieb, sowie für den aufgeladenen Erdgasbetrieb.

Würde nun der unaufgeladene Erdgasmotor mit dem Getriebe des 1.4 I Motors mit längeren Übersetzungen kombiniert, ergäbe sich eine Drehmomentreserve von lediglich 39 Nm. Mit einem solchen Antrieb könnte zwar sehr wohl Treibstoff gespart werden, aber es wäre praktisch nicht mehr möglich, bei 80 km/h im 5. Gang noch zu beschleunigen.

Im Projekt wurde das Drehmoment und die Nennleistung des 1.0 I-Motors mittels Turboaufladung auf die Werte des vergleichbaren 1.4 I-Motors erhöht. Dabei konnte die Drehmomentreserve bei 80 km/h im 5. Gang deutlich über diejenige des Originalantriebes erhöht werden. Die Simulation ergab, dass mit dem Getriebe des 1.4 I-Motors mit längerer Übersetzung eine Drehmomentreserve von 80 Nm erreicht wird.

Verbrennungsanalysen auf dem Motorenprüfstand zeigten, dass das Klopfverhalten des aufgeladenen Motors mit max. 1.6 bar Ladedruck (absolut) und erhöhtem Verdichtungsverhältnis ($\epsilon = 13.5$) immer noch im gut beherrschbaren Bereich bleibt (siehe Abb. 12).

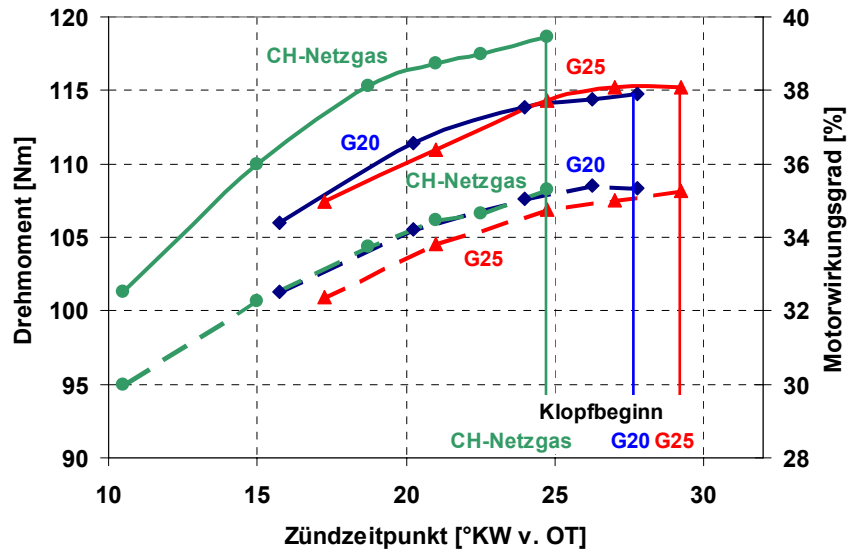


Abb. 12: Drehmoment und spez. Treibstoffverbrauch mit verschiedenen Erdgasqualitäten (CH-Netzgas (CNG), G20, G25) bei 3'000 U/min und 1.6 bar Ladedruck (absolut)

Der Motor kann mit diesen Treibstoffen im o.g. Betriebspunkt ohne Klopfprobleme im Bereich des besten spezifischen Treibstoffverbrauchs betrieben werden. Der Klopfbeginn ist mit Netzgas nur 4-6 °KW früher als mit dem hinsichtlich Klopfen unempfindlichsten Gemisch G25.

Um zu verhindern, dass die Ansaugluft wegen der Aufladung im Teillastbereich stärker gedrosselt werden muss, wurde eine Ladedruckregelung entwickelt und in die Motorsteuerung integriert. Das Wastegateventil wurde während dem gedrosselten Betrieb offen gehalten und erst bei nahezu offener Drosselklappe (hohe Last) geschlossen. Dadurch wurde erreicht, dass bei Bedarf eine hohe Motorleistung zur Verfügung steht, ohne dass der in der Praxis sehr relevante Teillastverbrauch verschlechtert wurde. Zudem konnte der Abgasgedruck mit offenem Wastegateventil fast auf das Niveau des Saugmotors gesenkt werden.

Mit dem aufgeladenen 1.0 I-Motor konnte eine vergleichbare Leistungscharakteristik wie beim ebenfalls im Polo (Modelljahr 2000) angebotenen 1.4 I-Motors erreicht werden. Um ähnliche Fahrleistungen wie mit dem 1.4 I Polo zu erzielen, wurde auch dessen etwas länger ausgelegtes Getriebe (inkl. Achsübersetzung) eingebaut.

Abb. 13 zeigt die Fahrkurve im 5. Gang mit dem originalen und dem modifizierten Getriebe und den berechneten Unterschied im spez. Treibstoffverbrauch bei 80 km/h von 11%.

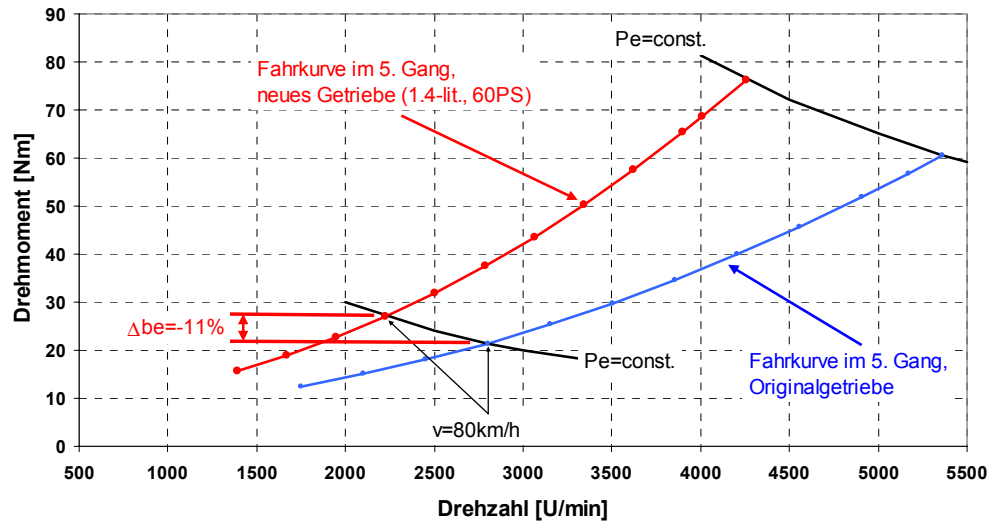


Abb. 13: Fahrkurve im 5. Gang mit dem originalen und dem modifizierten Getriebe

Allerdings beeinflusst die Turboaufladung die Abgastemperatur durch eine Verlängerung der Anspringszeit des Katalysators um einige Sekunden (siehe Kap. 3.5.2).

3.4 Motorsteuerung

Der Motor ist ausgerüstet mit der Bosch-Motorsteuerung ME-7 (Abb. 14), deren Hauptaufgabe es ist, den vom Fahrer gewünschten Betriebszustand am Motor einzustellen. Dazu wird die Gaspedalstellung in einen Sollwert für das Motordrehmoment übersetzt. Die Motorsteuerung stellt mit der Drosselklappe die erforderliche Luftmenge ein und berechnet die für die stöchiometrische Verbrennung notwendige Erdgas-Einblasmenge⁶.

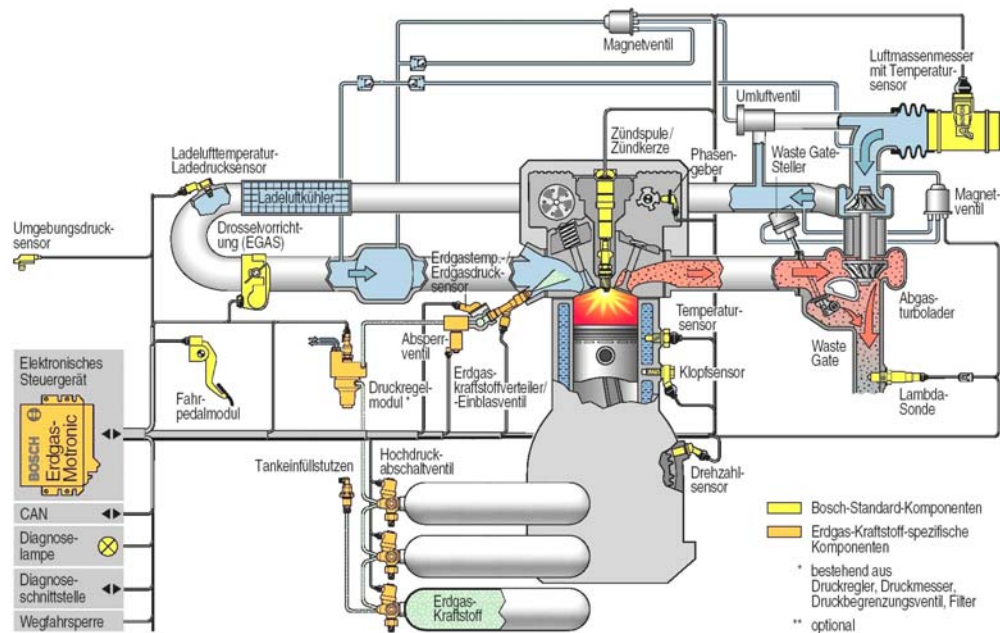


Abb. 14: Systembild Bosch ME-Motronic für Erdgasfahrzeuge ohne elektrischen Wastegatesteller (Quelle: Bosch)

Dynamische Vorgänge wie das Saugrohrdruckverhalten oder die Sauerstoffspeicherung im Katalysator werden in der Motorsteuerung in regelungstechnischen Modellen simuliert. Dies erlaubt eine wesentlich bessere Beherrschung transienter Vorgänge beim Betrieb des Motors. Dadurch können auch in dynamischen Betriebszuständen niedrige Schadstoffemissionen erzielt werden.

Die Motorsteuerung wurde von der Robert Bosch GmbH für die Erdgasanwendung ausgelegt und entsprechend dem Turbokonzept in unserem Projekt für die Aufladung und Ladedruckregelung erweitert. Dazu mussten zusätzliche Funktionen für die Gasinstallation und -einblasung sowie für Aufladung und Ladedruckregelung integriert und die benzinspezifischen Funktionen für das Verdampfungskontrollsystem oder das Wandfilmmodell deaktiviert werden.

Nach dem Bereitstellen der funktionsfähigen Motorsteuerung wurde diese auf dem Motoren- und Rollenprüfstand appliziert und hinsichtlich Abgasemissionen, Treibstoffverbrauch, Fahrbarkeit und Motorleistung optimiert.

⁶ Allgeier, T., Klenk, M., Landenfeld, T.; Motorsteuerung für Erdgasfahrzeuge; Tagung Steuerungssysteme für den Antriebsstrang von Kraftfahrzeugen, Berlin (2001)

3.5 Katalysatoren

3.5.1 Ausrüstung des Fahrzeuges

Das Originalfahrzeug war mit einem kleinen motornahen Metallträgerkatalysator (Vorkatalysator) und einem Unterflur-Hauptkatalysator ausgerüstet. Der serienmässige Vorkatalysator wurde im Projekt durch einen neuen keramischen Vorkatalysator mit höherer Zelldichte und geringerer Wandstärken sowie erhöhter Edelmetallbeladung ersetzt.

Während auch ein stöchiometrisch betriebener Benzinmotor unter gewissen Bedingungen im fetten Bereich ($\lambda < 1$) betrieben wird, wird ein stöchiometrisch betriebener Erdgasmotor immer möglichst nahe von $\lambda = 1$ betrieben. Mit gasförmiger Erdgaseinblasung tritt keine Wandfilmdynamik auf, die im Kaltstart eine Anfettung erfordern kann und es tritt auch keine kühlende Treibstoffverdampfung im Brennraum auf, die bei Benzinfahrzeugen als Bauteilschutz bei hohen Lasten eingesetzt wird. Auch die bei Benzinfahrzeugen mögliche Leistungssteigerung durch fetten Betrieb ist bei Erdgas nicht möglich, da die maximale laminare Brenngeschwindigkeit von Erdgas näher bei $\lambda = 1$ liegt, als bei Benzin und kein Kühleffekt zur Erhöhung des Liefergrades ausgenutzt werden kann. Im weiteren unterscheiden sich auch die Rohemissionen von Erdgasmotoren von denjenigen von Benzinmotoren grundsätzlich. Die CO-, NMHC- und NOx-Rohemissionen sind deutlich niedriger, die CH₄-Rohemissionen jedoch deutlich höher als bei einem Benzinmotor. Aufgrund der stabilen Molekülstruktur von Methan ist für dessen katalytische Umwandlung eine höhere Temperatur erforderlich als bei Nichtmethan-Kohlenwasserstoffen (NMHC).

Diese drei wesentlichen Unterschiede (Lambdakonzentration, Zusammensetzung der Rohemissionen, Umwandlungstemperatur) zwischen benzin- und erdgasbetriebenen Motoren führen zu anderen Anforderungen an Katalysatoren für Erdgasmotoren, vor allem hinsichtlich Sauerstoffspeichereigenschaften und Platzierung im Abgasstrang.

Das im CEV-Projekt angewandte Katalysatorkonzept bestand aus einem für Erdgasbetrieb optimierten Vorkatalysator und dem serienmässigen Unterflur-Hauptkatalysator. Der Träger für den erdgasoptimierten Vorkatalysator wurde von der Corning GmbH mit folgenden Spezifikationen hergestellt:

Vorkatalysator-Träger	Spezifikation
Trägermaterial	Cordieritkeramic
Zellendichte (cpi)	600
Wandstärke (mil; 1 mil = 10 ⁻³ inch = 0.0254 mm)	4
Zellengeometrie	quadratisch
Spezifische Oberfläche (m ² /l)	3.45
Offene Frontfläche (%)	80
Hydraulischer Durchmesser der Zellen (mm)	0.928

Tab. 3: Spezifikationen des Vorkatalysator-Trägers

Dieser Katalysatorträger repräsentiert den aktuellen Stand von Keramikträgern für die Grossserienproduktion und stellt einen geeigneten Kompromiss zwischen aktiver Oberfläche, mechanischer Stabilität und Gegen-druck⁷ dar.

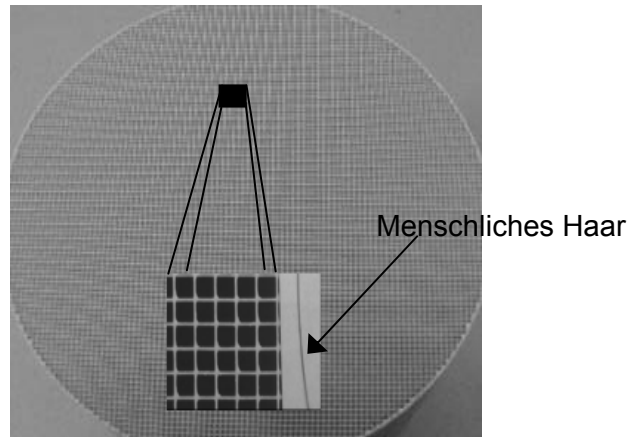


Abb. 15: Keramikträger des Vorkatalysators (Quelle: Corning)

Der neue Vorkatalysator wurde von Engelhard Technologies GmbH nach folgender Spezifikation beschichtet:

Vorkatalysator-Beschichtung	Spezifikation
Wash coat	Al ₂ O ₃ -basiert
Edelmetallbeschichtung	Pd-reich
Beladung (g/cu.ft)	300

Tab. 4: Spezifikation der Vorkatalysator-Beschichtung

Der beschichtete Vorkatalysator wurde mit einer InteramTM 100 HD (4070 g/m²) von 3M⁸ eingepackt und mit Wechselflanschen auf beiden Seiten ausgerüstet. Diese Lösung war für das Austauschen von Vorkatalysatoren im Projekt sehr hilfreich, brachte aber auch Nachteile hinsichtlich Erhöhung der im Warmlauf aufzuwärmenden Masse mit sich. Vor den Untersuchungen wurden neue Vorkatalysatoren im Fahrzeug während rund 300 km eingefahren.

⁷ Leonhard T. et al, Keramische Hochleistungsträger für Pkw-Abgaskatalysatoren, MTZ 5/2003

⁸ 3M InteramTM Mat Mounting System (Rev. 7/01)

3.5.2 Abgastemperaturen

Auch wenn die Rohemissionen von Erdgasfahrzeugen niedriger sind als bei Benzinfahrzeugen, bleibt die Optimierung des Kaltstarts und Warmlaufs ein wichtiges Element für die Emissionsminderung. Im CEV-Projekt stellte der möglichst schnelle Wechsel auf den geregelten $\lambda=1$ -Betrieb nach Kaltstart die beste Lösung dar, da die Abgastemperatur auch mit relativ starken Parameterveränderungen nicht wesentlich erhöht werden konnte.

Die Abgasturboaufladung hatte natürlich einen grossen Einfluss auf die Abgastemperatur. Abb. 15 zeigt die Abgastemperatur vor Vorkatalysator am Motor mit und ohne Aufladung im europäischen Fahrzyklus.

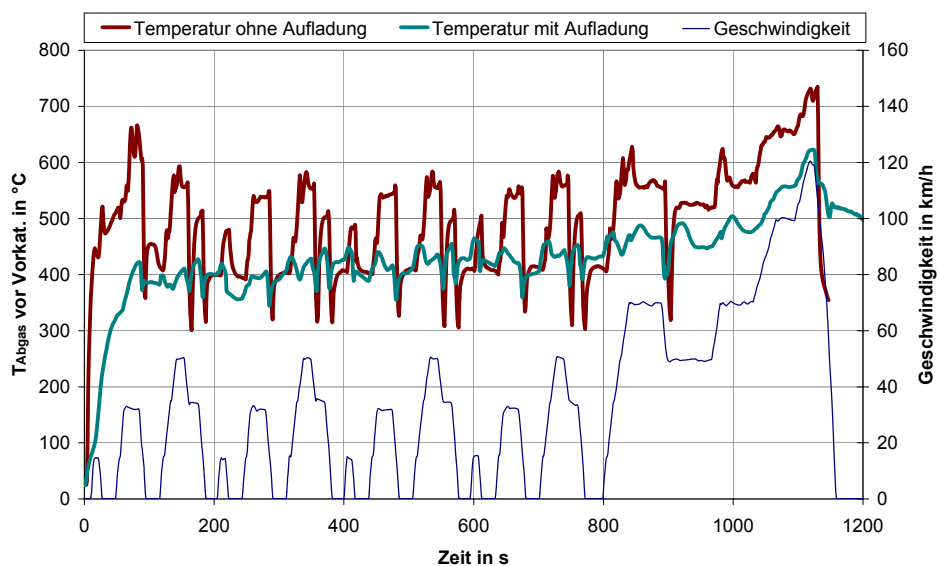


Abb. 15: Abgastemperaturen vor Vorkatalysator im europäischen Fahrzyklus mit und ohne Aufladung

Der Vorkatalysator des Motors ohne Aufladung war näher am Motor installiert als derjenige beim aufgeladenen Motor. Der Turbolader entzieht dem Abgas Wärme, die dann nicht mehr für die Aufheizung des Katalysators zur Verfügung steht. Aus diesem Grund steigt die Abgastemperatur vor Vorkatalysator mit Aufladung im Warmlauf selbst bei vollständig geöffnetem Wastegate-Ventil deutlich langsamer an, als beim nicht aufgeladenen Motor.

Während die Abgastemperatur am Eintritt des Katalysators am Motor ohne Aufladung nach nur ca. 12 Sekunden nach Kaltstart eine Temperatur von 300 °C erreichte, dauerte dies beim Motor mit Aufladung rund 30 s länger. Zudem lag die Abgastemperatur vor Vorkatalysator während dem gesamten europäischen Fahrzyklus rund 50 - 100 °C tiefer als beim Motor ohne Aufladung. Diese niedrigere Abgastemperatur am Motor mit Aufladung verschärfte vor allem das Problem der Methanumwandlung nochmals.

3.5.3 Schadstoffumwandlung im Katalysator

Eine hohe Umwandlungseffizienz unter den o.g. Umständen ist nur möglich, wenn die Motorsteuerung und das Katalysatorkonzept optimal aufeinander abgestimmt sind. Die Grenzwerte der Euro-4-Vorschriften stellen hohe Anforderungen an eine gute Methanumwandlung und die SULEV-Grenzwerte an die NO_x-Umwandlung, während die Einhaltung der CO-Grenzwerte kein Problem bedeutete.

Die Umwandlungseffizienz hängt stark von der Abgastemperatur ab. Diese ist im europäischen und US-amerikanischen Fahrzyklus aufgrund der unterschiedlichen Dynamik und anderer Schaltpunkte ebenfalls unterschiedlich.

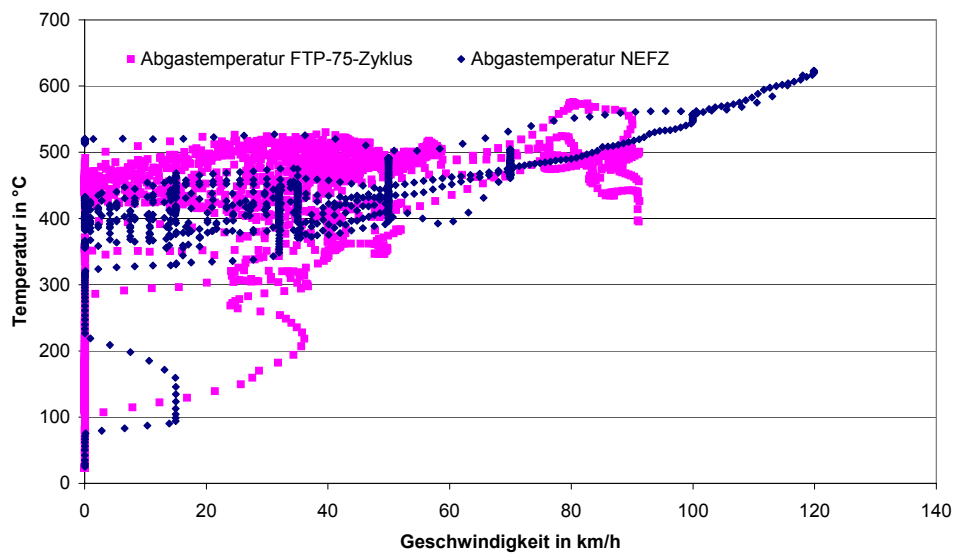


Abb. 16 Abgastemperaturen im europäischen und amerikanischen Fahrzyklus

Nachstehende Abbildungen zeigen, dass die T.HC-Emissionen selbst unter den o.g. Temperaturbedingungen deutlich vermindert werden konnten.

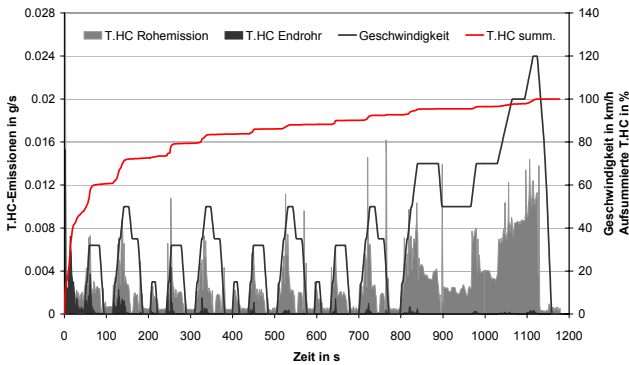


Abb. 17a T.HC Roh- und Endrohrmissionen im europäischen Fahrzyklus NEFZ

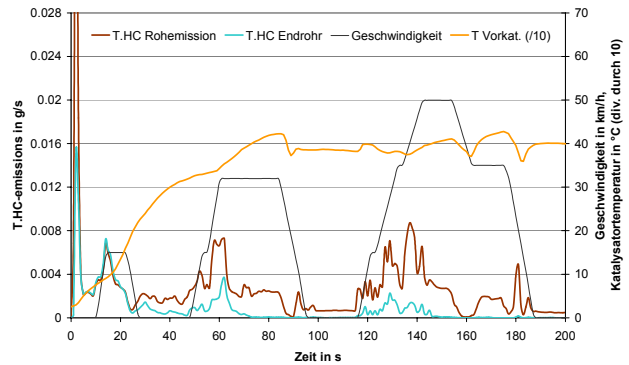


Abb. 17b T.HC Roh- und Endrohrmissionen in den ersten 200 s des NEFZ

Abb. 17a zeigt die Relevanz des Kaltstarts für die T.HC-Emissionen im gesamten Neuen Europäischen Fahrzyklus: ca. 75% der gesamten T.HC-Emissionen werden in den ersten 200 s emittiert, die restlichen 25% in den verbleibenden 980 s. Abb. 17 b zeigt, die ersten 200 s im NEFZ. Während den ersten 30 s ist aufgrund zu geringer Katalysatortemperatur praktisch keine Umwandlung feststellbar. Anschliessend, sobald der Vorkatalysator ca. 250 °C erreicht hat, beginnt die Umwandlung.

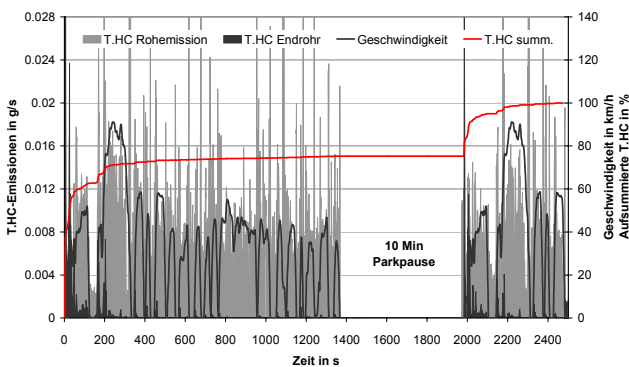


Abb. 18a T.HC Roh- und Endrohrmissionen im amerikanischen FTP-75 Zyklus

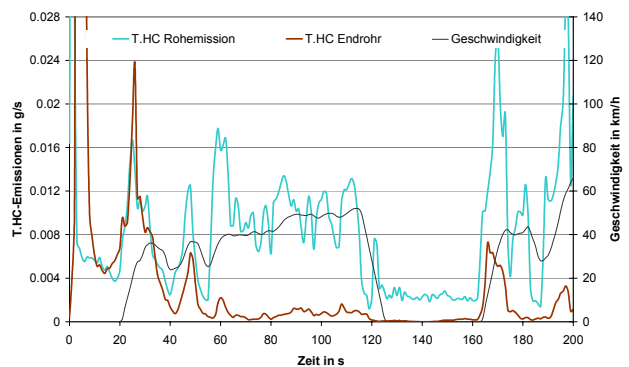


Abb. 18b T.HC Roh- und Endrohrmessungen in den ersten 200 s des FTP-75 Zyklus

Der FTP-75 Zyklus beginnt wie der NEFZ ebenfalls mit einem Kaltstart. In den ersten 200 s werden ca. 70% der gesamten T.HC-Emissionen emittiert. Aufgrund der höheren Abgastemperatur (siehe auch Kap. 3.5.3) werden im anschliessenden Fahrbetrieb nur noch sehr geringe T.HC emittiert. Nach der 10 minütigen Pause mit abgestelltem Motor wird das gleiche Fahrmuster wie zu Beginn des Zyklus wiederholt, der Motor diesmal aber warm gestartet. Während diesem Warmstart und den darauffolgenden 200 s werden weitere ca. 20% der gesamten T.HC-Emissionen ausgestossen. Die Umwandlung der T.HC-Emissionen beginnt im FTP-75 Zyklus ebenfalls nach ca. 30 s.

Die NOx-Emissionen konnten in beiden Fahrzyklen praktisch vollständig eliminiert werden:

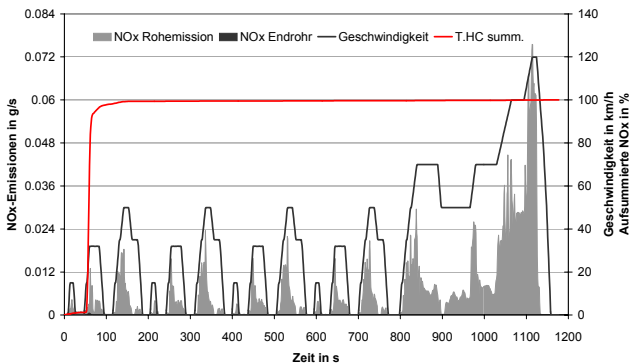


Abb. 19a NOx Roh- und Endrohrmissionen im europäischen Fahrzyklus NEFZ

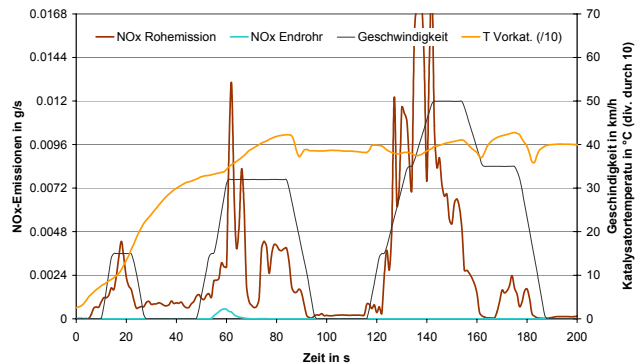


Abb. 19b NOx Roh- und Endrohrmissionen in den ersten 200 s des NEFZ

Die NOx-Rohemissionen hängen stark von der Motorlast ab und sind deshalb bei Beschleunigungen und hohen Geschwindigkeiten relevant. Im CEV-Projekt konnten diese jedoch katalytisch praktisch vollständig umgewandelt werden. Wie Abb. 19a und b zeigen, bildet eine sehr niedrige Emission nach dem ersten Schaltpunkt praktisch die gesamte NOx-Emission im NEFZ.

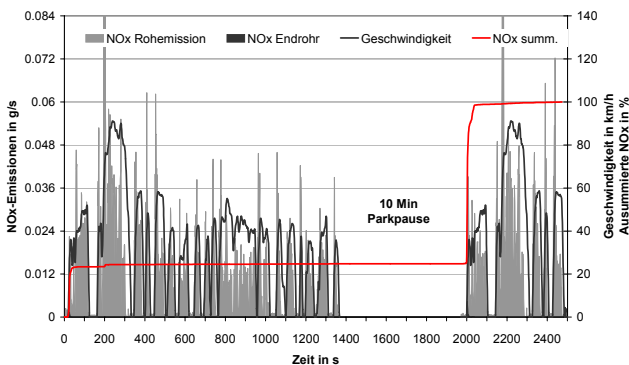


Abb. 20a NOx Roh- und Endrohrmissionen im amerikanischen FTP-75 Zyklus

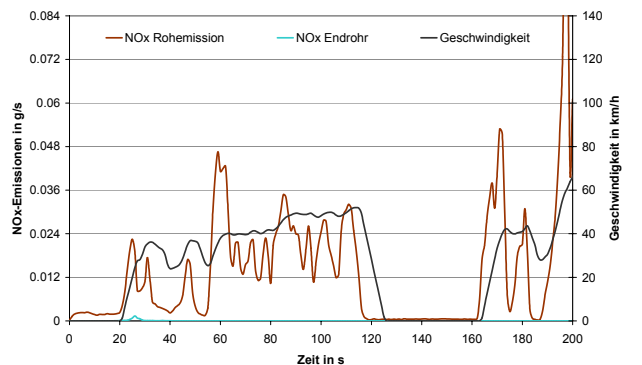


Abb. 20b NOx Roh- und Endrohrmessungen in den ersten 200 s des FTP-75 Zyklus

Die bereits im NEFZ beobachtete NOx-Emission nach dem ersten Schaltpunkt tritt auch im FTP-75 Zyklus sowohl beim Zyklusbeginn auf. Nach der Parkpause tritt eine etwas grössere, aber immer noch sehr kleine NOx-Emission beim Anfahren auf. Die NOx-Emissionen am Endrohr sind generell sehr niedrig (siehe auch Abb. 21).

Die NO_x-Emissionen konnten so stark vermindert werden, dass diese in den zwei ersten Phasen des FTP-75-Zyklus nach nur ca. 1 Min. nach Kaltstart im Auspuff auch im dynamischen Betrieb dauernd niedriger sind, als in der Ansaugluft des Motors (Bild 21).

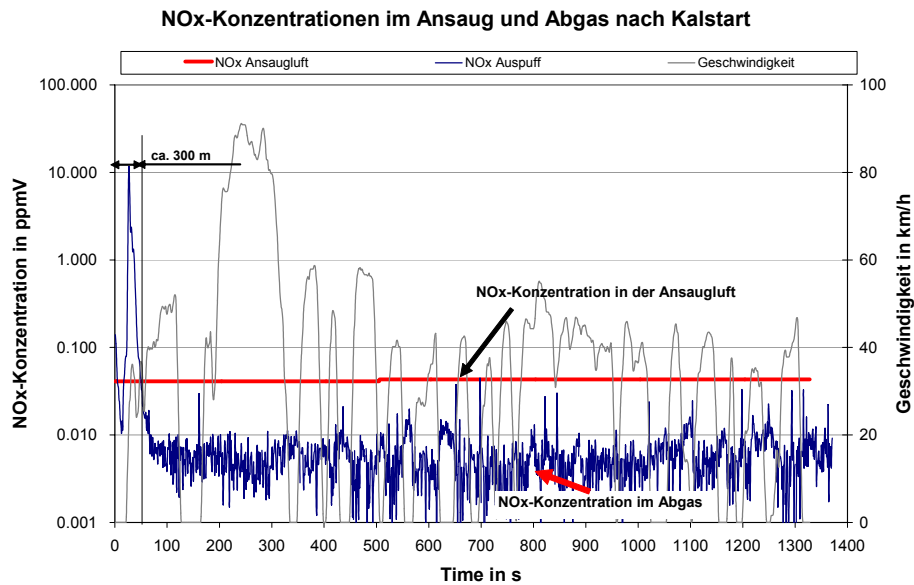


Abb. 21 NO_x-Emissionen in der Ansaugluft und im Abgas im FTP-75-Zyklus

3.6 Endergebnisse

Verglichen mit einem ähnlich motorisierten Benzinfahrzeug konnten die CO₂-Emissionen um 31% vermindert werden (siehe Abb. 22).

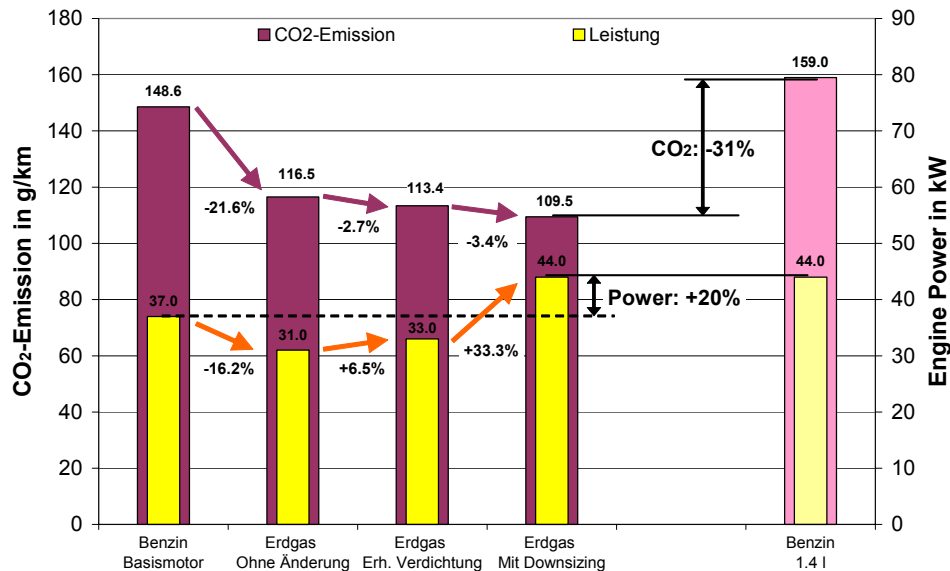


Abb. 22 CO₂-Reduktionspfad im CEV-Projekt und Vergleich mit dem gleich motorisierten Benzinfahrzeug mit 1.4-Litermotor

Die grösste CO₂-Reduktion von 21.6% wurde durch den Umbau auf monovalenten Betrieb mit Erdgas aufgrund des geringeren Kohlenstoffgehaltes von Erdgas gegenüber Benzin erzielt. Am Motor wurden ausser den Umbauten (inkl. Anpassungen am Zündzeitpunkt) keine Änderungen vorgenommen. Gleichzeitig nahm die maximale Motorleistung um ca. 16% ab. Die anschliessende Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses führte zu einer weiteren CO₂-Reduktion von knapp 2.7% und die Motorleistung konnte gegenüber dem originalen Verdichtungsverhältnis um 6.5% erhöht werden. Die Turboaufladung mit Anpassungen am Getriebe führte schliesslich zu einer nochmaligen CO₂-Reduktion von 3.4% und einer Leistungssteigerung gegenüber dem nicht aufgeladenen Erdgasmotor um 33.3%. Sie liegt damit 20% höher als beim 1.0 l-Basismotor im Benzinbetrieb.

Vergleicht man nun die CO₂-Emissionen des aufgeladenen Erdgasfahrzeuges mit denjenigen eines vergleichbar motorisierten Polos mit 1.4 l Benzinmotor, so liegen diese um 31% niedriger. Berücksichtigt man das Treibhausgaspotential der CH₄-Emissionen gemäss IPCC⁹ für den Zeitraum von 100 Jahren, so vermindert sich der CO₂-Vorteil auf 30%.

⁹ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Climate Change 2001: The Scientific Basis; Technical Summary Working Group I

Gleichzeitig zu der CO₂-Verminderung konnten die Schadstoffemissionen in beiden Fahrzyklen (NEFZ und FTP-75) unter die anvisierten Grenzwerte gesenkt werden. Tabelle 4 zeigt die CO-, T.HC, NMHC- und NOx-Emissionen im Benzinbetrieb am Anfang und im Erdgasbetrieb am Schluss des Projektes:

NEFZ	CO [g/km]	T.HC [g/km]	NMHC [g/km]	NOx [g/km]
Benzin	0.12	0.07	0.05	0.06
Erdgas G20	0.14	0.10	0.00	0.00
Erdgas G25	0.15	0.09	0.01	0.00
Zielwerte Euro-4	1.0	0.10	- - -	0.08

FTP-75	CO [g/km]	T.HC [g/km]	NMHC [g/km]	NOx [g/km]
Benzin	0.114	0.028	0.020	0.064
Erdgas (kaliforn. Spez.)	0.081	0.047	0.004	0.001
Zielwerte SULEV	0.62	- - -	0.006	0.012

Tab. 4: Abgasemissionen im Benzin- und Erdgasbetrieb im europäischen (NEFZ) und amerikanischen Fahrzyklus (FTP-75). Die Abgasemissionen im NEFZ wurden mit dem reglementierten Verschlechterungsfaktor von 1.2 multipliziert, diejenigen im FTP-75 Zyklus sind ohne Verschlechterungsfaktor angegeben.

Die CO-Emissionen liegen im vorliegenden Fall wie bei Erdgasmotoren generell auf einem sehr niedrigen Niveau. Die angegebenen T.HC-Emissionen beinhalten auch Methan, das in der kalifornischen Gesetzgebung nicht berücksichtigt wird. Erdgasfahrzeuge weisen in der Regel wegen diesem Methananteil etwas höhere T.HC-Emissionen auf als Benzinfahrzeuge. Die NMHC-Emissionen von Erdgasfahrzeugen sind jedoch deutlich niedriger als bei Benzinfahrzeugen.

Mit dem Projekt konnte gezeigt werden, dass entsprechend ausgerüstete Erdgasfahrzeuge deutlich niedrigere Schadstoff- und CO₂-Emissionen erreichen können, als dies mit heutigen Benzin- und Dieselfahrzeugen der Fall ist.

4. Zusammenfassung

Erdgas hat das Potential, als Treibstoff die negativen Auswirkungen des motorisierten Verkehrs signifikant zu reduzieren und erlaubt gleichzeitig die Nutzung von Technologien zur Erhöhung der Energieeffizienz. Die in diesem Projekt aufgezeigte Technologie zeigt keinen Zielkonflikt zwischen CO₂- und Schadstoffreduzierung, wie dies bei anderen Treibstoffen oder Motortechnologien häufig der Fall ist.

Die hier verwendete Technologie basiert auf grossserientauglichen und damit vergleichsweise günstigen Bauteilen. Vergleichbare CO₂- und Schadstoffminderungen sind mit Benzin- oder Dieselfahrzeugen nur mit wesentlich höheren Kosten und komplexeren Technologien erreichbar.

Die Emissionsminderung ist im realen Betrieb (d.h. in der Praxis) aufgrund der höheren Motorlast und des permanent stöchiometrischen Betriebs wohl noch höher als in den offiziellen europäischen und amerikanischen Fahrzyklen, was bei Benzinfahrzeugen eher umgekehrt ist.

Zudem spricht die wirkungsorientierte Bewertung der Abgasemissionen ebenfalls für Erdgas, denn die Ozonbildungsreaktivität der Kohlenwasserstoffe, das Säurebildungspotential, die Gehalte an kanzerogenen Verbindungen und Russpartikel sind bei technisch hochstehenden Erdgasfahrzeugen ebenfalls wesentlich niedriger als bei Benzinfahrzeugen. Während die unterschiedliche Ozonreaktivität der Kohlenwasserstoffe in den amerikanischen Vorschriften berücksichtigt wird, ist dies bei den Abgasvorschriften der EU für Personewagen noch nicht der Fall. Eine vergleichbare Bewertung der Kohlenwasserstoffemissionen wie bei den Nutzfahrzeugmotoren mit einem separaten CH₄-Grenzwert würde das Emissionsverhalten wesentlich gerechter bewerten, als die heutige Lösung.

Verdankung

Das Projektteam dankt der Volkswagen AG, der Robert Bosch GmbH, der Corning GmbH und der Engelhard Technologies GmbH für die Bereitstellung von Fahrzeug, Motor, Motorbauteilen, Katalysatoren, Motorsteuer- und Applikationssystem, für die technische Unterstützung und die gute Zusammenarbeit sowie dem Bundesamt für Energie (BFE), dem Schweizerischen Verband des Gas- und Wasserfaches (SVGW), dem Deutschen Verband des Gas- und Wasserfaches (DVGW) und dem Österreichischen Verband des Gas- und Wasserfaches (ÖVGW) für deren finanzielle Unterstützung.

Das Projekt wurde von einer Fachgruppe, bestehend aus Vertretern der o.g. Projektpartner und des Bundesamtes für Energie (BFE), des Bundesamtes für Strassen (ASTRA), des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), der Automobil- und Motoren AG (AMAG), der Post, der Compagnie Industrielle du Commerce et Gas (CICG), der ErdgasZürich AG und der Ruhrgas AG sowie von den Herren Dr. W. Janach und Dr. A. Paul begleitet. Das Projektteam dankt dieser Begleitgruppe für die Inputs und wertvollen Diskussionen.

Neben den aufgeführten Autoren haben Dr. Michael Simons (ETH-IMRT), Peter Obrecht (ETH-LAV), Samuel Duc und Rolf Ziegler (beide Empa) massgeblich am Projekt mitgearbeitet. Im Rahmen des Projektes wurde eine Reihe von Semester- und Diplomarbeiten durchgeführt (Anhang 2). Das Projektteam dankt auch allen diesen Personen für ihr Engagement.

5. **Anhang 1** (Verzeichnis der Abkürzungen)

AGR	Abgasrückführung
BUWAL	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern
CEV	Clean Engine Vehicle
CH ₄	Methan
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
CVS	Constant Volume Sampling
EMPA	Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
ETH	Eidg. Technische Hochschule
Euro-2	Abgasvorschriften für Personenwagen ab 2000
Euro-4	Abgasvorschriften für Personenwagen ab 2005
FTP-75	Amerikanischer Fahrzyklus (Federal Test Procedure)
IMRT	Institut für Mess- und Regeltechnik der ETH Zürich
LAV	Laboratorium für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme der ETH Zürich
NABEL	Nationales Beobachtungsnetz für Luftschadstoffe
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NMHC	Nichtmethan-Kohlenwasserstoffe
NO _x	Stickoxid
NO ₂	Stickstoffdioxid
PM ₁₀	Russpartikel <10µm
ROZ	Oktanzahl
SULEV	Kalifornische Abgasvorschriften für Super-Ultra-Low-Emission-Vehicles
T.HC	Gesamt-Kohlenwasserstoffe
TSP	Total Suspended Particulate
VOC	Volatile organic compounds
°KW n. OT	Grad Kurbelwinkel nach oberem Totpunkt

6. Anhang 2 (Verzeichnis der Semester und Diplomarbeiten)

6.1 Semester- und Diplomarbeiten am LAV

Hübner, Marc: Vergleich von Wärmeentwicklungsrechnungen in der motorischen Verbrennung und Motorprozess-Simulation mit einem bestehenden Tool (GT Power), Semesterarbeit Wintersem. 2001/2002

Fuchs, Patrick: Optimierung des Vorlagerungswinkels bei einem Erdgasmotor, Semesterarbeit Sommersemester 2002

Manetsch, Marc: Simulation eines Erdgasmotors mit einem mechanischen Lader, Semesterarbeit Sommersemester 2002

Hübner, Marc: Untersuchung der AGR-Verteilung im Saugrohr mittels Kopplung von 1D- und 3D-Simulation, Diplomarbeit Wintersemester 2002/2003

Habermacher, Tino: 3D-Simulation der Zylinderinnenströmung und Verbrennung in einem Erdgasmotor, Semesterarbeit Sommersemester 2003

Ryser, Raphael: 3D-Simulation der Verbrennung bei Erdgasmotoren, Semesterarbeit Wintersemester 2003/2004

Hug, Markus: Modellierung der Verbrennung für Erdgasmotoren mittels Brennverlaufsrechnung, Semesterarbeit Wintersemester 2003/2004

Vögeli, Stefan: Modellierung der Verbrennung für Erdgasmotoren mittels phänomenologischer Modellbildung, Semesterarbeit Wintersemester 2003/2004

6.2 Semester und Diplomarbeitern am IMRT

Garcia, Daniel: Modellierung und Regelung eines Gasmotors im Hinblick auf ein SULEV-Fahrzeug I, Diplomarbeit Sommersemester 2000

Haugstetter, Christoph: Modellierung eines Gasmotors im Hinblick auf ein SULEV-Fahrzeug II, Semesterarbeit Wintersemester 2000/2001

Aurich, Reinhard: Modellierung und Regelung eines Gasmotors im Hinblick auf ein SULEV-Fahrzeug III, Diplomarbeit Wintersemester 2000/2001

Fritsche, Daniel: Lambdae Regelung für einen Erdgasmotor, Diplomarbeit Wintersemester 2001/2002

Janner, Philippe: Modelbasierte Ladedruckregelung für aufgeladene Erdgas-Turbomotoren, Diplomarbeit Wintersemester 2002/2003

Lienert, Alexandre; Rüttimann Niklaus: MIMO-Regelung für einen Erdgasmotor, Semesterarbeit Sommersemester 2003



Verbrennungsmotoren/Feuerungen

Überlandstrasse 129

CH-8600 Dübendorf

Phone +41-1-823 55 11

Fax +41-1-821 62 44

Internet www.empa.ch

© EMPA 2004

Preis CHF 50.-