

Meta Motoren- und Energie-Technik GmbH  
Kaiserstr. 100  
52134 Herzogenrath

Erdgasbetrieb mit vollvariabler Ventilhubsteuerung und  
Aufladung am Ottomotor. Ein Weg, mit dem Dieselmotor in der  
CO<sub>2</sub>-Bilanz gleichzuziehen und ihn in den Emissionen deutlich  
zu unterbieten (Phase 1)

Abschlußbericht über die 1 Phase des Entwicklungsprojekts,  
gefördert unter dem AZ: 24030-24/0 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dipl.-Ing. Ulrich Peter  
Dipl.-Ing. Ralf Bey

Herzogenrath, Januar 2007

**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	<b>24030</b>	Referat	<b>24/0</b>	Fördersumme	<b>300.000,00 EU</b>
<b>Antragstitel</b>	<b>Erdgasbetrieb mit vollvariabler Ventilhubsteuerung und Aufladung am Ottomotor. Ein Weg, mit dem Dieselmotor in der CO<sub>2</sub>-Bilanz gleichziehen und ihn in den Emissionen deutlich zu unterbieten (Phase 1)</b>				
<b>Stichworte</b>	CO <sub>2</sub> Reduzierung, Erdgasbetrieb, Downsizing				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
<b>12 Monate</b>	<b>01.12.2005</b>	<b>31.12.2006</b>	<b>1</b>		
Zwischenberichte	21.03.2006 10.10.2006				
<b>Bewilligungsempfänger</b>	Meta Motoren- und Energie-Technik GmbH Kaiserstraße 100 52134 Herzogenrath			Tel	02407/9554-26
				Fax	02407/9554-89
				Projektleitung Herr Dipl.-Ing. Ralf Bey	
				Bearbeiter Herr Dipl.-Ing. Ulrich Peter	
<b>Kooperationspartner</b>					

### **Zielsetzung und Anlass des Vorhabens**

Im Rahmen des Gesamtvorhabens soll auf Basis des aktuellen seriennahen Entwicklungsstandes des Meta VVH- Systems (vollvariable Einlassventilhubsteuerung) ein Ottomotor mit diesem System ausgestattet und mit CNG (Compressed Natural Gas) betrieben werden. Das VVH- System von Meta reduziert die Drosselverluste des Ottomotors und erhöht den Gesamtwirkungsgrad des Motors. Zusätzlich wird dieser Motor mit einer Abgasturboaufladung zur Erreichung hoher spezifischer Leistung ausgestattet. Die Kombination des VVH- Systems am Ottomotor in Verbindung mit effizienten Downsizing ermöglicht Verbrauchsvorteile von 20-25% gegenüber heutigen freisaugenden Ottomotoren. Zuzüglich wird im Rahmen des Projektes dieser Motor mit Erdgas betrieben, was einen weiteren CO<sub>2</sub> Vorteil von bis zu 25% aufgrund des günstigen C/H Verhältnisses mit sich bringt. Die Kombination dieser CO<sub>2</sub> reduzierenden Maßnahmen kumulieren sich auf eine CO<sub>2</sub> Reduzierung von 35 - 40 % gegenüber heutigen Benzinmotoren. Die Umsetzung einer Verbrauchsreduzierung in dieser Größenordnung beim Ottomotor ist unverzichtbar, um die freiwillige Selbstverpflichtung der Automobilindustrie von CO<sub>2</sub>-Emissionen kleiner 140 g/km im Flottendurchschnitt zu realisieren. Damit kann der Ottomotor gegenüber dem Dieselmotor nicht nur durch einen vergleichbar geringen Verbrauch, sowohl im Testzyklus als auch in Kundenhand, sondern auch durch seine geringeren NO<sub>x</sub>- und Partikelemissionen zu einer deutlichen Verbesserung der Umweltbilanz beitragen. Ziel des Vorhabens ist es, durch Aufzeigen der motorischen Potentiale dieser Technikkombination auf dem stationären Motorprüfstand sowie anhand eines Versuchsfahrzeugs Automobilhersteller für die Umsetzung dieses Antriebskonzepts zu gewinnen.

## **Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden**

In der vorliegenden Projektphase 1 soll ein erster Prototyp mit der beschriebenen Technikkombination entwickelt und die Funktionsfähigkeit des VVH- Systems im Erdgasbetrieb dargestellt werden. Die Potentiale hinsichtlich Verbrauch, Emissionen und der Realisierung hoher spezifischer Lasten sollen an einem Versuchsmotor im stationären Betrieb auf dem Prüfstand nachgewiesen werden. Anschließend wird ein Versuchsfahrzeug mit dem Versuchsmotor ausgerüstet, in Betrieb genommen und einer ersten Applikationsabstimmung unterzogen. Diese Phase 1 endet mit dem Nachweis der Potentiale am Prüfstand und der Fahrbarkeit des Fahrzeuges in einer ersten Applikations- Grundabstimmung.

Die folgende Vorgehensweise ist vorgesehen:

- Konstruktions- Designloop des VVH- Systems, Fertigung und Beschaffung zur Integration des vollvariablen Einlassventilhubsystem in den Versuchsmotor. Fertigung und Beschaffung geeigneter Aktuatoren, Sensoren, Adapter, Halter, Aufnahmen.
- Konzipierung und Aufbau der Erdgasbevorratung und –versorgung am Motorprüfstand und im Fahrzeug einschl. Fertigung und Beschaffung notwendiger Sensoren, Adapter, Behälter, Ventile.
- Konzipierung und Konstruktion der notwendigen Bauteile zur Integration des Abgasturboladers, Fertigung und Beschaffung
- Aufbau, Erprobung und Funktionsentwicklung einer auf die Technikkombination ausgerichteten Motorsteuerung für den Motorprüfstand und die erste Grundabstimmung des Versuchsfahrzeug sowie der Option einer späteren Feinkalibrierung.
- Aufbau, Inbetriebnahme und Funktionstests des Versuchsmotors auf dem Thermodynamikprüfstand sowie Durchführung eines Meßprogramms zum Nachweis der Potentiale bei Teil- und Vollast.
- Aufbau, Inbetriebnahme, Funktionstests, Funktionsentwicklung und Grundbedatung des Fahrzeuges

Eine ggfs. anschließende Phase 2 des Vorhabens hat zum Ziel, die motorischen Potentiale des stationären Prüfstandsbetriebes in den transienten Fahrbetrieb des Versuchsfahrzeuges zu übertragen.

## **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Ausstellung des Versuchsträgers auf dem Stand der Meta GmbH auf dem 27. Internationalen Wiener Motorensymposium, 27.-28. April 2006

Vortrag über die entwickelte Technikkombination auf der Tagung „Variable Ventilsteuerung“, 13.-14. 02., Essen, Haus der Technik

## **Fazit**

Die in dem Vorhaben dargestellten Ergebnisse aus Prüfstandsuntersuchungen und Testzyklusrechnungen zeigen, daß die entwickelte Technikkombination aus vollvariabler Ventilhubsteuerung VVH, Erdgasbetrieb und Abgasturboaufladung eine Reduzierung der CO<sub>2</sub> Emissionen um etwa 40% in einem Kompaktklassefahrzeug im Neuen Europäischen Fahrzyklus gegenüber einem leistungsgleichen Benzin-Saugmotor ermöglichen.

Damit kann der Ottomotor gegenüber dem Diesel nicht nur durch einen vergleichbar geringen Verbrauch, sondern auch durch seine geringeren NO<sub>x</sub>- und Partikel-emissionen zu einer deutlichen Verbesserung der Umweltbilanz beitragen.

Zur weiterführenden Bewertung des Konzepts in einer geplanten Phase 2 ist neben einer vertiefenden Untersuchung spezifischer Fragestellungen hinsichtlich Kaltstart- und Kataufheizverhalten, Einfluß unterschiedlicher Gasqualität, sowie Anfahrmoment insbesondere der Aufbau eines Demonstrationsfahrzeugs sowie der Nachweis der Potentiale im Rollen- und Straßentest sinnvoll.

Inhaltsverzeichnis:

Verzeichnis von Bildern und Tabellen	5
Verzeichnis von Begriffen und Definitionen	7
Zusammenfassung	8
Einleitung	8
Hauptteil	9
1. Zielsetzung	9
2. Konzeptbeschreibung und Aufgaben	10
3. Rechnerische Vorauslegung	14
4. Versuchsträger und Versuchsrandbedingungen	18
5. Meßergebnisse Motorprüfstand	21
6. Simulationsrechnung Fahrzeugverbrauch	30
7. Aufbau Versuchsfahrzeug	31
Fazit	33
Literaturverzeichnis	33

## Verzeichnis von Bildern und Tabellen

## Bilder

Nr.	Titel/Bezeichnung	Seite
1	Vollvariable Einlaß-Ventilhubfunktion VVH	11
2	Effekte der Technikkombination TVVH-CNG im Kennfeld	12
3	PROMO Ladungswechselmodell	14
4	Massenstrom und Druck vor Einlaßventil bei Nennleistung (5500 1/min) im Vergleich konventioneller Turbo und TVVH	15
5	Luftaufwand bei Nennleistung (5500 1/min) in Abhängigkeit von Saugrohrlänge und Einlaß-Schließt-Zeitpunkt	16
6	Drehmomentverlauf TVVH-CNG-Motor im Vergleich zu Zielwerten und konventionellem Benzin-Turbomotor, Simulationsergebnis	17
7	VVH Ventiltriebskomponenten und Zusammenbauansicht des VVH-Motors	18
8	Maskierung Einlaßventile und resultierender Tumble über Ventilhub	19
9	Turbolader, Saugrohr und CNG-Einblasventile	19
10	Vergleich Einlaßventilhub bei Vollast, Meßwerte Motorprüfstand	21
11	Vergleich Vollast-Drehmoment, Meßwerte Motorprüfstand	22
12	Vergleich Vollast-Verbrauch, Meßwerte Motorprüfstand	22
13	Vergleich eff. Wirkungsgrad bei Vollast, Meßwerte Motorprüfstand	23
14	Vergleich CO <sub>2</sub> Emissionen bei Vollast, Meßwerte Motorprüfstand	23
15	Vergleich Isolinien spez. Kraftstoffverbrauch im Kennfeld, Meßwerte	24
16	Vergleich Isolinien effektiver Wirkungsgrad $\eta_e$ im Kennfeld, Meßwerte	24
17	Vergleich Isolinien CO <sub>2</sub> Emissionen im Kennfeld, Meßwerte	24
18	Vergleich Isolinien HC Emissionen im Kennfeld, Meßwerte	25
19	Vergleich Isolinien NO <sub>x</sub> Emissionen im Kennfeld, Meßwerte	25
20	Einfluß von Ventilhub und Tumble auf Zündzeitpunkt und Heizverlauf über Last bei 2000 min <sup>-1</sup> , Meßwerte TVVH-CNG Motorprüfstand	26
21	Standardabweichung $s_{pmi}$ der Zylinder bei 2000 min <sup>-1</sup> , $p_{me}$ 2bar, Meßwerte TVVH-CNG Motorprüfstand	26
22	Isolinien Einlaßventilhub in mm TVVH-CNG Motor im Kennfeld, Meßwerte TVVH-CNG Motorprüfstand	27
23	Isolinien spez. Verbrauch in g/kWh TVVH-CNG Motor im Kennfeld, Meßwerte Motorprüfstand	27
24	Vergleich Messung mit H-Gas und L-Gas, 2000 min <sup>-1</sup> , $p_{me}$ 4bar, Meßwerte Motorprüfstand	28
25	Vergleich Messung mit H-Gas und L-Gas, 2000 min <sup>-1</sup> , Vollast, Meßwerte Motorprüfstand	28

Nr.	Titel/Bezeichnung	Seite
26	Vergleich CO2 Emissionen und Energieverbrauch im NEFZ für Golf V, Simulation	30
27	Versuchsfahrzeug Golf V 1.4L TVVH-CNG und nachgerüstete serienmäßige Ladeluftkühlung vom 2.0L TDI	31
28	1.4L TVVH-CNG Motor im Golf V Versuchsfahrzeug, Ansicht auf Krümmer, Turbolader und Katalysator	31
29	1.4L TVVH-CNG Motor im Golf V Versuchsfahrzeug	32
30	Nachgerüsteter CNG Gastank im Golf V Versuchsfahrzeug	32

## Tabellen

Nr.	Titel/Bezeichnung	Seite
1	Übersicht Zielwerte TVVH-CNG und Vergleichswerte Benzin und Diesel	10
2	Vergleich Kraftstoffdaten Benzin und Erdgas	20
3	Vergleich Kraftstoffdaten H-Gas und L-Gas	28

## Verzeichnis von Begriffen und Definitionen

### verwendete Abkürzungen

AGR	Abgasrückführung
ATL	Abgasturbolader
C	Kohlenstoff
CNG	Compressed Natural Gas
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
FSI	Fuel Stratified Injection
H	Wasserstoff
HC	Kohlenwasserstoff
KW	Kurbelwinkel
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NO <sub>x</sub>	Stickoxid
OT	Oberer Totpunkt
ROZ	Research Oktan Zahl
TVVH	variabler Ventilhub in Kombination mit Turboaufladung
UT	Unterer Totpunkt
VVH	variabler Ventilhub

## Zusammenfassung

Erdgasmotoren werden nach aktueller Einschätzung bzw. Zielsetzung der EU Kommission bis 2020 einen Anteil von 10% am Fahrzeugbestand in der EU haben und damit einen wesentlichen Anteil im Bereich der Alternativkraftstoffe zu Benzin und Diesel stellen. Erdgas zeichnet sich sowohl durch ein im Vergleich zu Benzin-kraftstoffen günstigeres C/H Verhältnis als auch durch ein günstigere Gemischbildung und eine sehr hohe Klopffestigkeit aus. Die vollvariable Ventilhubsteuerung VVH ergänzt durch drossel-freie Laststeuerung, die intensive Ladungsbewegung bei Teilhub sowie den optimalen Fanggrad über der Drehzahl die Eigenschaften des Erdgases optimal. In Verbindung mit einer Abgasturboaufladung sind damit hervorragende Voraussetzungen gegeben, durch hohe Teillastwirkungsgrade und eine wirkungsgradgünstige Umsetzung hoher spezifischer Lasten ein effizientes Downsizing mit einer Reduzierung der CO<sub>2</sub> Emissionen von 35-40% im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) gegenüber dem jetzigen Stand der benzinbetriebenen Ottomotoren zu realisieren.

Damit kann der Ottomotor gegenüber dem Diesel nicht nur durch einen vergleichbar geringen Verbrauch, sondern auch durch seine geringeren NO<sub>x</sub>- und Partikel-emissionen zu einer deutlichen Verbesserung der Umweltbilanz beitragen.

Im Rahmen dieses Vorhabens wurde ein 1.4L-Ottomotor mit einer Technik-kombination von vollvariabler Ventilhubsteuerung, Abgasturboaufladung und Erdgasbetrieb ausgerüstet und auf einem stationären Motorprüfstand ausführlich vermessen. Auf Basis der Prüfstandsmessungen wurde eine Fahrzeugverbrauchs-simulation durchgeführt, die für ein Kompaktklassefahrzeug im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) eine Reduzierung der CO<sub>2</sub> Emissionen von etwa 40% im Vergleich zu einem leistungsgleichen, benzinbetriebenen Otto-Saugmotor gezeigt hat.

## Einleitung

Im Vergleich zu modernen Dieselmotoren, die bereits ein Downsizing mit spezifischen Leistungen von 65kW/L und Drehmomenten von 185Nm/L in Verbindung mit hervor-ragend niedrigen Verbräuchen sowohl im Testzyklus als auch in Kundenhand ermöglichen, ist beim Ottomotor zur Zeit eine technische Lösung für die Kombination von höchster spezifischer Leistung und einem sehr gutem Wirkungsgrad noch nicht auf dem Markt umgesetzt.

Der Ottomotor hat im Vergleich zum Dieselmotor in dieser Hinsicht bisher die folgen-den einschränkenden Eigenschaften:

- niedrige geometrische Verdichtung,
- wirkungsgradungünstige Zündbedingungen und Anfettungsbedarf zur Umsetzung sehr hoher spezifischer Lasten,
- zusätzlicher Anfettungsbedarf zum Bauteilschutz (Katalysator, Turbolader),
- Drosselregelung bei Teillast,

- unzureichende Umsetzung sehr hoher Drehmomente schon bei niedrigsten Drehzahlen.

Die für Downsizing notwendige Umsetzung höchster spezifischer Lasten mit wirkungsgradgünstigen Zündbedingungen ohne Anfettung erfordert:

- sehr hohe Klopfestigkeit,
- moderate Temperaturen zum Zündzeitpunkt,
- hohe Liefergrade und spontanes Ansprechverhalten im gesamten Drehzahlbereich, insbesondere schon bei niedrigen Drehzahlen.

Der Teillastwirkungsgrad wird verbessert durch:

- geringe Drosselverluste,
- erhöhte Verdichtung,
- schnelle und stabile Verbrennung,
- hohe Restgasverträglichkeit.

Erdgas zeichnet sich durch eine sehr hohe Klopfestigkeit, eine günstige Gemischbildung sowie ein im Vergleich zu Benzinkraftstoffen günstigeres C/H Verhältnis aus. Die vollvariable Ventilhubsteuerung VVH ergänzt durch die drosselfreie Laststeuerung, die intensive Ladungsbewegung bei Teilhub sowie den optimalen Fanggrad über der Drehzahl die Eigenschaften des Erdgases optimal.

In Verbindung mit einer Abgasturboaufladung sind damit hervorragende Voraussetzungen gegeben, durch hohe Teillastwirkungsgrade und eine wirkungsgradgünstige Umsetzung hoher spezifischer Lasten ein effizientes Downsizing mit einer Reduzierung der CO<sub>2</sub> Emissionen von 35-40% im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) gegenüber dem jetzigen Stand der benzinbetriebenen Ottomotoren zu realisieren.

## Hauptteil

### 1. Zielsetzung

Die Zielsetzung für das in diesem Bericht beschriebene Vorhaben lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- Reduzierung der CO<sub>2</sub> Emissionen um 35-40% gegenüber dem aktuellen Stand der Ottomotoren durch,
- Umsetzung der Kombination von Erdgasbetrieb CNG, vollvariabler Ventilhubsteuerung VVH und Abgasturboaufladung (Kurzbezeichnung TVVH-CNG) an einem 1.4L Ottomotor im Golf V bei
- vergleichbarer oder besserer Fahrdynamik als das Referenzfahrzeug Golf V 2.0L FSI.

- Darstellung der Potentiale zunächst am stationären Motorprüfstand und durch Simulationsrechnungen.
- Abschließend Aufbau eines Versuchsfahrzeugs und Darstellung der prinzipiellen Fahrbarkeit.

Die folgende Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die Zielwerte im Detail und einen Vergleich des Zielmotors 1.4 L TVVH CNG zu aktuellen Otto- und Dieselmotoren:

	Zielwerte Golf V 1.4 T VVH CNG	Katalogwerte Golf V 2.0 FSI Benzin	Katalogwerte Golf V 2.0 TDI
Nennleistung	110 kW	110 kW	103kW
max. Drehmoment	220 - 240 Nm	200 Nm	320 Nm
bei Drehzahl	1500 - 4000 min <sup>-1</sup>	3500 min <sup>-1</sup>	1750 - 2500 min <sup>-1</sup>
Emissionsvergleich			
CO <sub>2</sub> im NEDC	104 - 117 g/km	187 g/km	146 - 154 g/km
NO <sub>x</sub> bei 2000 min <sup>-1</sup> ; pme 2 bar	kleiner gleich Basis	15g / kWh	15 g/kWh
HC bei 2000 min <sup>-1</sup> ; pme 2 bar	kleiner gleich Basis	6.5g / kWh	ca. 65 ppm

*Tabelle 1: Übersicht Zielwerte TVVH-CNG und Vergleichswerte Benzin und Diesel*

Eine ggfs. im Anschluß durchgeführte Phase 2 hat die Darstellung der Potentiale der Technikkombination hinsichtlich Verbrauch und CO<sub>2</sub> Emissionen im Fahrzeug auf dem Rollenprüfstand im Straßenversuch zum Ziel.

## 2. Konzeptbeschreibung und Aufgaben

In diesem Kapitel wird das Konzept der Technikkombination TVVH-CNG anhand der Eigenschaften und Synergie-Effekte der drei Komponenten Erdgas (CNG), vollvariable Ventilhubsteuerung VVH und Abgasturboaufladung im Hinblick auf effizientes Downsizing beschrieben.

Im Detail lassen sich die Eigenschaften und Synergie-Effekte der Kombination wie folgt beschreiben:

### Eigenschaften Erdgas:

- sehr niedrige CO<sub>2</sub> Emissionen
- sehr hohe Klopfestigkeit (ROZ 130) ermöglicht hohe Verdichtung und wirkungsgradgünstige Zündbedingungen
- niedrige Abgastemperatur, keine Anfettung erforderlich
- optimale Gemischbildung
- die langsamere Verbrennung mit Erdgas bei Teillast wird durch die Ladungsbewegung bei Teilhub des VVH wirkungsvoll unterstützt
- benötigt höhere Temperatur zur Methanumwandlung im Kat bei Kaltstart, dies wird durch die schnelle, stabile Verbrennung bei VVH-Teilhub unterstützt (Potential zur Spätzündung)

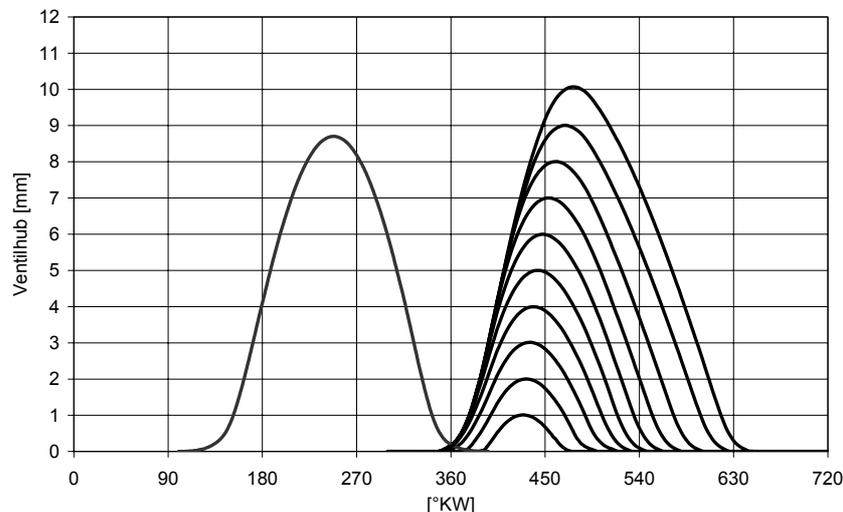
### Eigenschaften vollvariable Ventilhubsteuerung VVH:

Die mechanisch vollvariable Ventilhubsteuerung VVH wurde in verschiedenen Veröffentlichungen bereits detailliert beschrieben [1,2]. Die mit diesem System realisierbaren Ventilhubfunktionen sind in Bild 1 dargestellt. Die Eigenschaften lassen sich wie folgt beschreiben:

- vollvariabler Ventilhub zwischen 0mm und Maximalhub in Kombination mit vollvariablem Einlaß-Schließen zwischen  $\sim 90$  und  $300^\circ\text{KW}$  nach Ladungswechsel-OT
- drosselfreie Laststeuerung
- optimaler Fanggrad über Drehzahl durch variables Einlaß-Schließen
- spätes Einlaß-Schließen bei Nennleistung ermöglicht Verlängerung der Einströmdauer => Potential zur Reduzierung der Turboladergröße
- intensive Ladungsbewegung bei Teilhub fördert Brenngeschwindigkeit des Erdgases und AGR-Verträglichkeit
- optimiertes Ansprechverhalten aus der Teillast durch Vermeidung von Saugrohrunterdruck (drosselfreie Laststeuerung)

### Eigenschaften Abgasturbolader:

- sehr hohe Liefergrade bei gutem Wirkungsgrad
- kleines, leichtes und günstiges Bauteil



**Bild 1: Vollvariable Einlaß-Ventilhubfunktion VVH**

Bild 2 gibt die Effekte der Technikkombination anhand einer Übersicht im Betriebskennfeld des Motors wieder.

Zur Darstellung der Potentiale wurde folgende Vorgehensweise gewählt:

- Rechnerische Vorauslegung und Abstimmung der Hauptparameter eines VW 1.4L-4Zylinder-Otto-Serienmotors auf Erdgasbetrieb, vollvariable Ventilhubsteuerung VVH und Abgasturboaufladung anhand von Ladungswechselrechnungen.

- Umsetzung der Kombination in Hardware auf Basis einer von Meta entwickelten, vorhandenen Konstruktion der vollvariablen Ventilhubsteuerung VVH.
- Vermessung des 1.4L TVVH-CNG-Motors auf dem stationären Motorprüfstand.
- Gegenüberstellung der Prüfstandsmeßwerte zu denen eines leistungsgleichen, benzinbetriebenen Otto-Saugmotors (Vergleichsmotor).
- Durchführung von Fahrzeugsimulationsrechnungen für den Neuen Europäischen Fahrzyklus NEFZ für Vergleichsmotor und TVVH-CNG Motor.

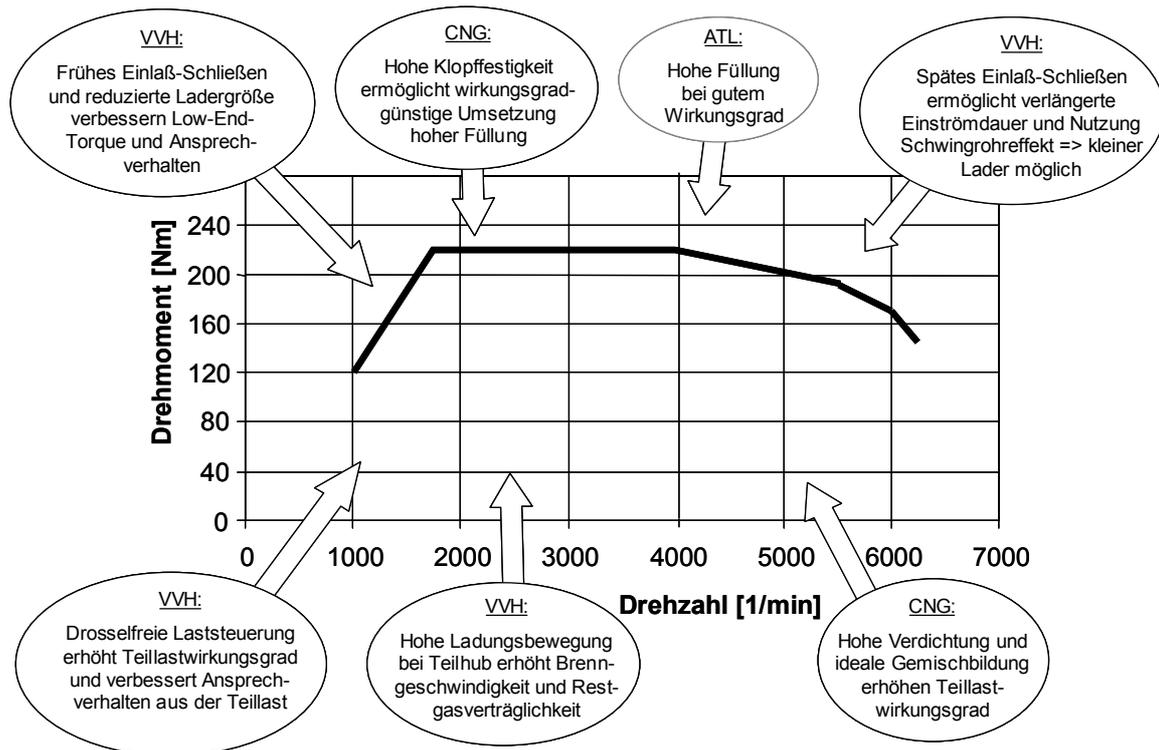


Bild 2: Effekte der Technikkombination TVVH-CNG im Kennfeld

Im Detail waren im Rahmen des Vorhabens folgende Aufgaben bzw. Arbeiten durchzuführen:

Konzepterstellung und Simulationsrechnung:

- Abstimmung der Hauptauslegungsparameter für den Motor durch Ladungswechselsimulation:
  - VVH-Ventilhubfunktion
  - Saugsystem
  - Turbolader
  - Verdichtung
  - CNG-Parameter
- Fahrzeugsimulation, Berechnung der CO<sub>2</sub>- und Verbrauchspotentiale auf Basis stationärer Meßwerte vom Motorprüfstand

## Konstruktion und Fertigung:

- Basierend auf einer vorhandenen VVH-Konstruktion für den VW EA111 1.4L-Motor:
  - Design Loop der VVH Komponenten
  - Neukonstruktion und Fertigung der VVH-Stellereinheit inklusive neuem Konzept für die Lageerfassung des Ventilhubes
  - Überarbeitung des Hochtriebs und der Ventiltriebshaube
- Anpassung des Grundtriebwerks für CNG- und Turbobetrieb :
  - Neuauslegung und Fertigung von Kolben und Pleuel, Erhöhung der Verdichtung
  - Anpassung Ölversorgung des Zylinderkopfs und des Turboladers
  - Auslegung und Fertigung Ventilmaskierung am Zylinderkopf
- Adaption von CNG-Anlage, Turbolader, Saugsystem, CNG-Einblasdüsen, Ladeluftkühlung an Motor und Fahrzeug

## Motorsteuerung:

- Festlegung des Steuerungskonzepts: Motorsteuerung, VVH-Steuerung, Funktionsumfang für Gasbetrieb und Turboaufladung
- Steuergeräte Funktionsentwicklung für Turbolader Regelung und Gasbetrieb
- Weiterentwicklung der Regelung VVH-Steller für neue Lageerfassung und Aktuatorik
- Herstellung Steuergeräte und Kabelbäume für Mechanik-, Motorversuch und Demonstrationsfahrzeug
- Abstimmung der Regelstrategie und -parameter VVH

## Mechanikversuch:

- Funktionsüberprüfung der VVH Zylinderköpfe 1 und 2
- Kinematische Untersuchung der VVH-Komponenten an VVH Zylinderkopf 1
- VVH-Stelleruntersuchungen, Validierung und Parametrierung des VVH Reglers an Zylinderkopf

## Motorversuch:

- Aufbau VVH Motor 1 auf Basisgrundtriebwerk als Benziner und Sauger
- Inbetriebnahme VVH Motor 1 und Abstimmung der VVH Steuerung
- Konzept und Ausrüstung CNG Anlage für Motorprüfstand
- Aufbau VVH Motor 2 auf modifiziertem Triebwerk mit CNG und Turboaufladung
- Inbetriebnahme VVH Motor 2 mit Meta-Motorsteuerung für CNG und Turbo
- Meßprogramm CNG und Grundbedatung für Fahrzeuginbetriebnahme

## Fahrzeugaufbau:

- Herstellung, Einbau, Inbetriebnahme der Fahrzeugelektronik auf Basis der Meta Motorsteuerung
- Voruntersuchungen VVH Betrieb im Fahrzeug mit VVH Motor 1 (Benzin, Sauger)
- Konzept, Package und Umbau VVH-Motor 2 mit CNG und ATL ins Fahrzeug inkl. Ladeluftkühlung
- Inbetriebnahme Fahrzeug TVVH CNG und erste Grundabstimmung Fahrbarkeit

### 3 . Rechnerische Vorauslegung

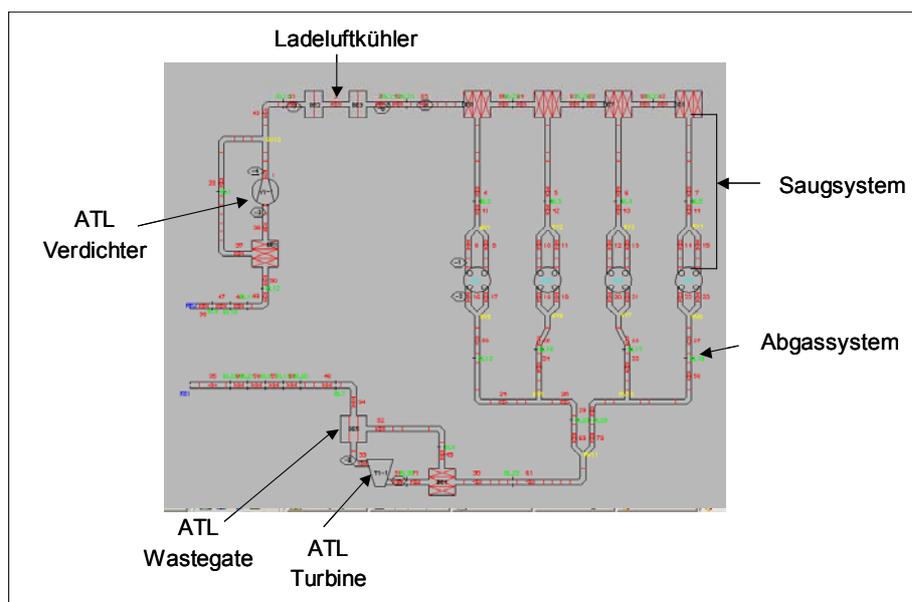
Durch die rechnerische Vorauslegung mittels Ladungswechselsimulation wurden folgende Hauptparameter im Hinblick auf die Technikkombination TVVH-CNG für den 1.4L Serienmotor aufeinander abgestimmt:

- Saugsystemgeometrie
- Größe des Turboladers
- Einlaß-Schließt-Zeitpunkt in Abhängigkeit von der Drehzahl
- Verdichtung

Folgende Vorgehensweise wurde für die Vorauslegung gewählt:

- Kalibrierung des Motor-Simulationsmodells anhand eines konventionellen Basis-Ottomotors mit Abgasturboaufladung
- Abstimmung der Ladungswechsel-Hauptparameter im Nennleistungspunkt: Turbolader, Saugsystemgeometrie, Einlaß-Schließt-Zeitpunkt
- Abstimmung Einlaß-Schließt-Zeitpunkt im Low-End-Torque Bereich, Berechnung stationäres Drehmoment
- Eingabe der Parameter für Gasbetrieb: Füllungseinfluß, Heizwert, stöchiometrischer Luftbedarf, Abstimmung der Verdichtung
- Darstellung des Vollast- und Teillastverhaltens => Auslegungsempfehlung der Hauptparameter für die Hardwarefertigung

Bild 3 zeigt das verwendete PROMO Ladungswechselmodell. Die VVH Einlaßventilhubfunktion wurde entsprechend Bild 1 verwendet.

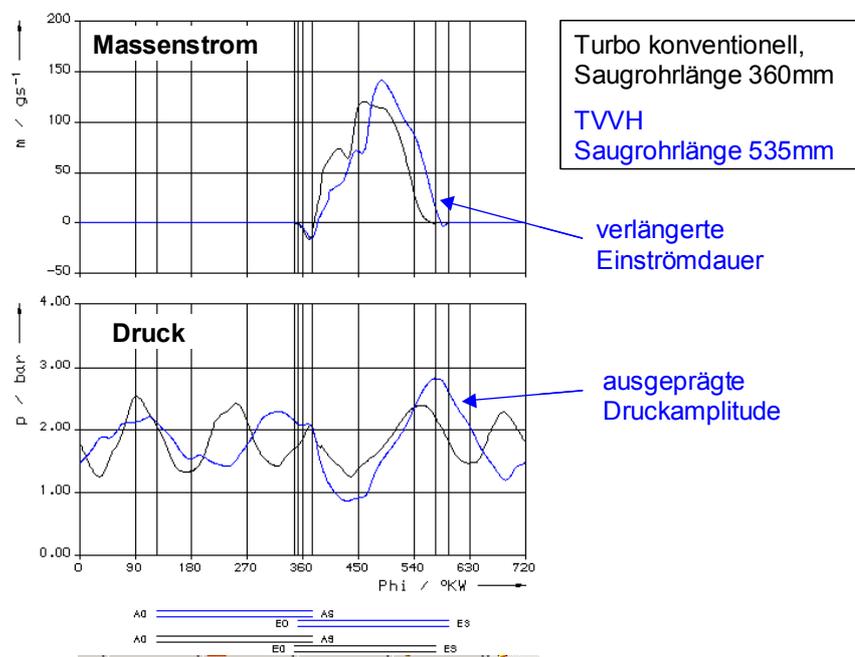


*Bild 3: PROMO Ladungswechselmodell*

Der Abstimmung von Saugsystemgeometrie, Turbolader und Einlaß-Steuerzeit liegt die nachfolgend beschriebene Strategie zu grunde:

Für gutes Ansprechverhalten im Low-End-Torque Bereich hat der konventionelle Otto-Turbomotor eine kurze Einlaßsteuerzeit und eine kurze Saugrohrlänge (Volumen, Befüllung des Saugsystems bei Lastsprung). Im Nennleistungsbereich kann somit kein Schwingrohreffekt genutzt werden, die Füllung wird durch Ladedruck erzeugt.

Durch spätes Einlaß-Schließen mit VVH und eine darauf abgestimmte Saugrohrgeometrie kann auch beim Turbomotor im Nennleistungsbereich ein ausgeprägter Schwingrohreffekt erzeugt werden, der den Füllungsvorgang verlängert und den notwendigen Ladedruck reduziert. Bild 4 zeigt den Massenstrom und den Druck vor Einlaßventil bei Nennleistung (5500 1/min) im Vergleich konventioneller Turbo und TVVH mit abgestimmter Saugrohrlänge. Die deutlich ausgeprägte Druckamplitude beim TVVH-Motor führt zu einer Verlängerung des Einströmvorgangs und damit zu einer höheren Zylinderfüllung.



**Bild 4: Massenstrom und Druck vor Einlaßventil bei Nennleistung (5500 1/min) im Vergleich konventioneller Turbo und TVVH (Ladungswechselrechnung)**

Bild 5 zeigt exemplarisch den Einfluß einer Variation von Saugrohrlänge und Einlaß-Schließt-Zeitpunkt auf die Zylinderfüllung im Nennleistungspunkt beim TVVH Motor im Vergleich zum Basis-Turbomotor. Mittels Einlaß-Schließen bei etwa 50°KW nach UT kann mit einem 510mm langen Saugrohr der Luftaufwand beim TVVH Motor gegenüber dem Basisturbo um etwa 8% gesteigert werden.

Dieses Potential kann bei gleicher Nennleistung zur Reduzierung der Turboladergröße und damit für verbessertes Ansprechverhalten im Low-End-Torquebereich genutzt werden.

Die Verlängerung des Saugrohres zur Nutzung des Schwingrohreffekts führt zu einer Erhöhung des Saugrohrvolumen, welches bei einem Lastsprung befüllt werden muß. Mit TVVH kann die Teillast drosselfrei ohne Saugrohrunterdruck gefahren werden, d.h. die zu befüllende Luftmasse ist trotz vergrößertem Saugrohr deutlich geringer, das Ansprechverhalten besser.

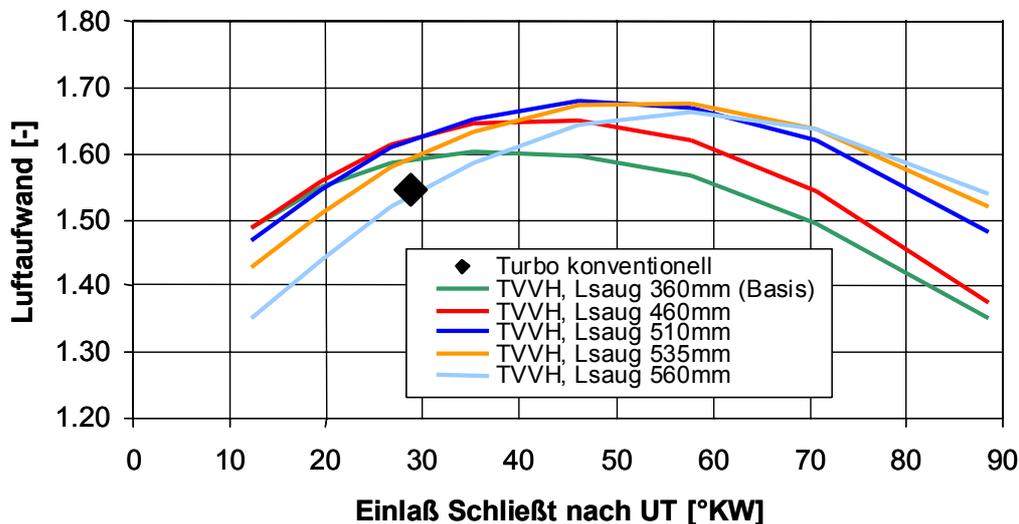
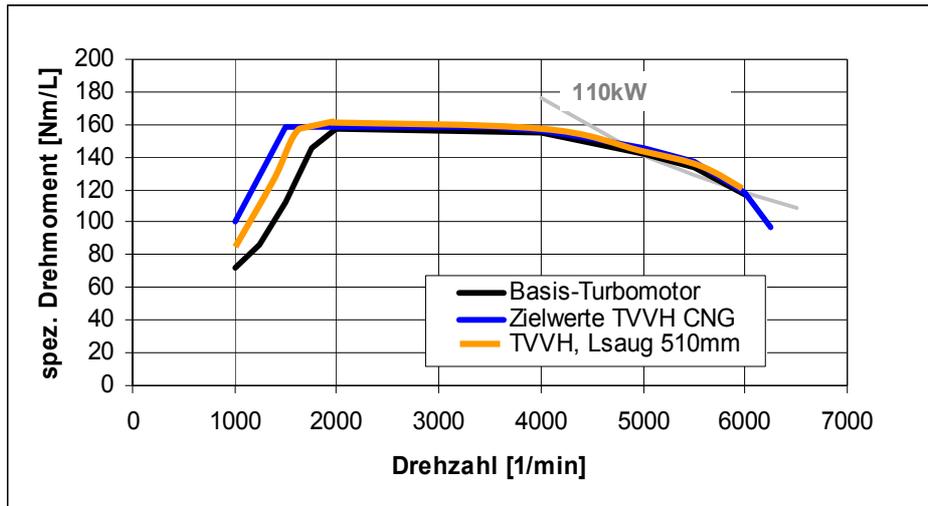


Bild 5: Luftaufwand bei Nennleistung (5500 1/min) in Abhängigkeit von Saugrohrlänge und Einlaß-Schließt-Zeitpunkt (Ladungswechselrechnung)

Folgende Randbedingungen wurden für die Simulation des Erdgasbetriebs in den Rechnungen berücksichtigt:

- Verdichtungserhöhung auf 12.5 unter Berücksichtigung eines maximalen Zylinderspitzen drucks von 110bar
- Einfluß der Füllungsreduzierung durch gasförmigen Kraftstoff simuliert durch ~ 8% reduzierte Luftdichte
- Heizwert  $H_u$  des Erdgases 47.0 MJ/kg
- stöchiometrischer Betrieb

Der berechnete resultierende Drehmomentverlauf für den TVVH-CNG-Motor mit Saugrohrlänge 510mm, um 6% reduzierter Turboladergröße und drehzahlabhängig abgestimmtem Einlaß-Schließt-Zeitpunkt ist in Bild 6 im Vergleich zu einem konventionellen Otto-Benzin-Turbo sowie den Zielwerten wiedergegeben. Aufgrund des variablen Einlaß-Schließens und des angepaßten Saugrohrs kombiniert der TVVH-CNG Motor 110kW Nennleistung mit einem maximalen Drehmoment von 160Nm/l (entspricht 224Nm absolut) schon ab 1700 1/min. Ein höheres maximales Drehmoment von 240Nm, wie in den Zielwerten zunächst geplant, ist aufgrund der Beschränkung auf 110 bar Spitzdruck bei einer Verdichtung von 12.5 nicht wirkungsradgünstig realisierbar, für das geplante Downsizing allerdings auch nicht notwendig.



*Bild 6: Drehmomentverlauf TVVH-CNG-Motor im Vergleich zu Zielwerten und konventionellem Benzin-Turbomotor, Simulationsergebnis*

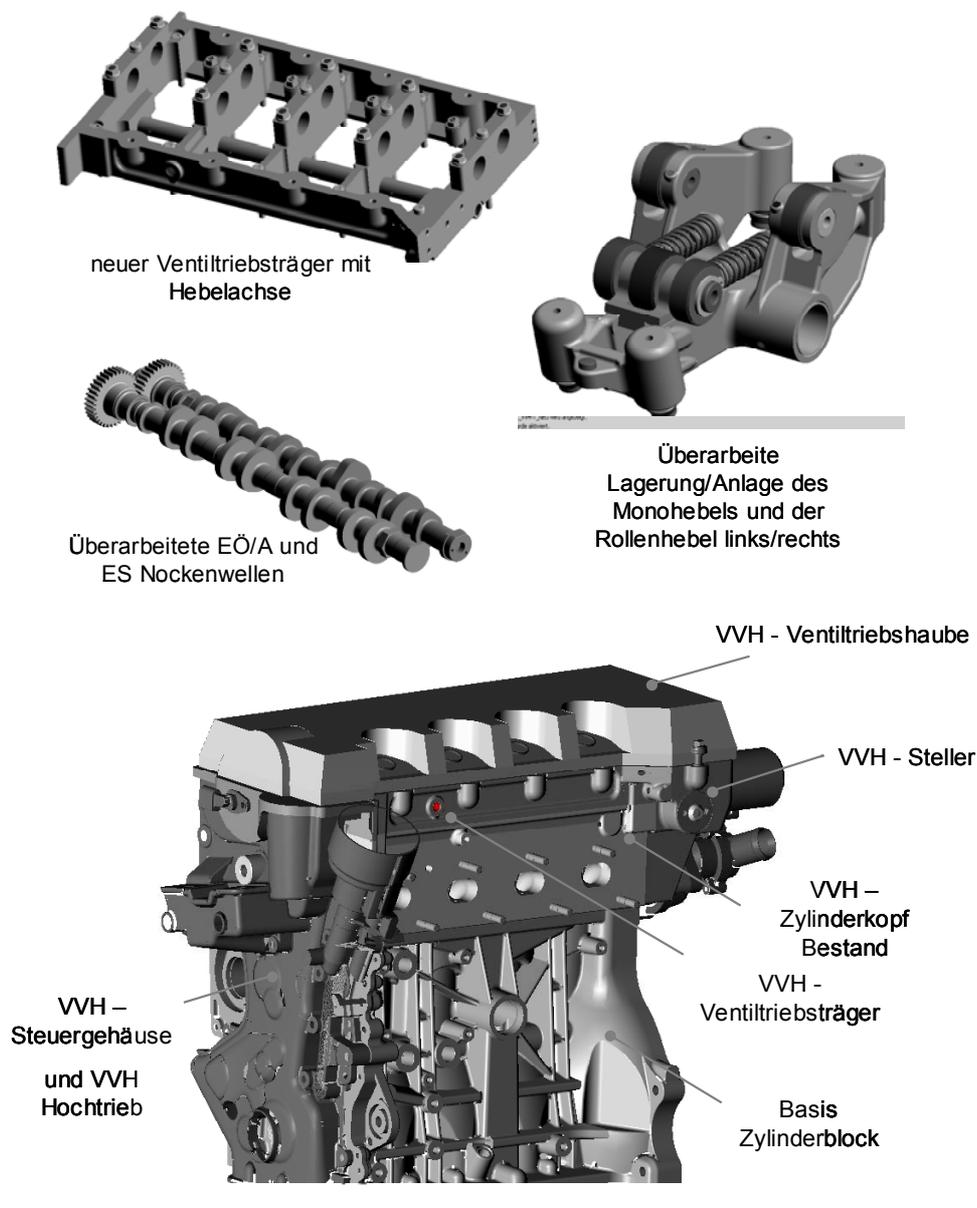
Als Ergebnis der rechnerischen Vorauslegung ergibt sich folgende Konfiguration des TVVH-CNG-Motors:

- Hubraum: 1.4L
- Verdichtung: 12.5
- Saugrohrlänge: 510mm
- Turbolader: Garrett GT12  
Durchmesser Turbine 35.5 mm  
Durchmesser Verdichter 41.0 mm
- Ventilsteuerzeit: siehe Bild 1

#### 4. Versuchsträger und Versuchsrandbedingungen

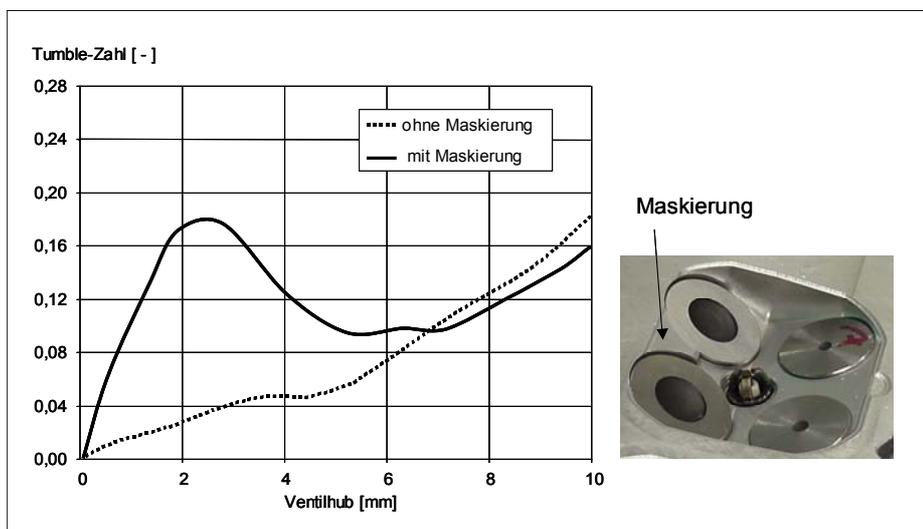
Auf Basis der rechnerischen Vorauslegung und Abstimmung der Hauptparameter wurde zur Darstellung der Potentiale auf dem Motorprüfstand ein serienmäßiger 1.4L 4-Zylinder-Ottomotor (Saugmotor) auf vollvariable Ventilhubsteuerung VVH, Erdgas-Betrieb (CNG) und Abgasturboaufladung umgerüstet. Folgende Hardware wurde dafür angefertigt bzw. umgerüstet:

- der Zylinderkopf mit Nockenwellen wurde auf vollvariable Ventilhubsteuerung VVH für die Einlaßseite umgerüstet, eine von Meta entwickelte Konstruktion lag vor und wurde angepaßt bzw. weiterentwickelt; Bild 7 zeigt VVH Ventiltriebskomponenten und eine Zusammenbauansicht des VVH Motors.

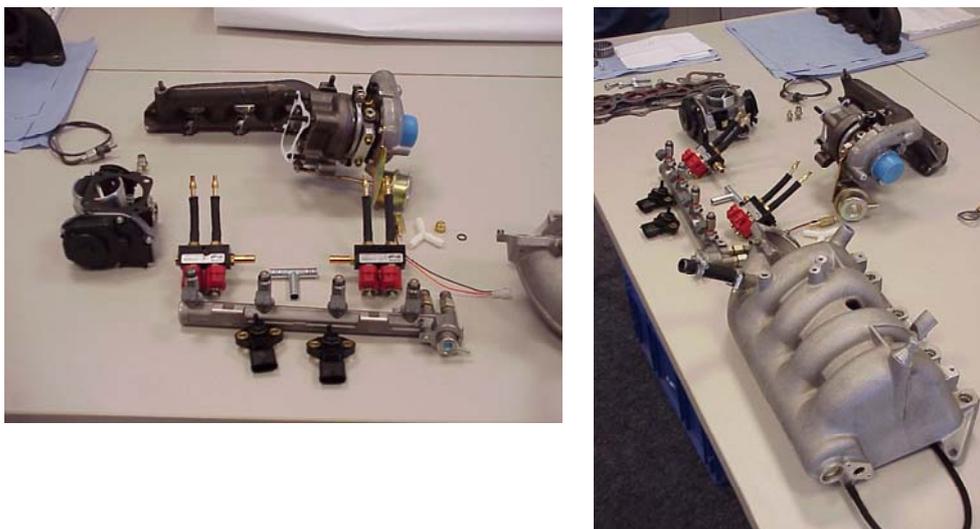


*Bild 7: VVH Ventiltriebskomponenten und Zusammenbauansicht des VVH-Motors*

- der Brennraum weist einlaßseitig eine Ventilmaskierung auf, die insbesondere bei Teilhub (1.0 – 4.0 mm) eine deutliche Erhöhung der Tumble-Ladungsbewegung der Frischladung während des Einströmvorgangs induziert (Bild 8)
- Pleuel und Kolben wurden zur Anhebung der Verdichtung auf 12.5 und im Hinblick auf die erhöhten Zylinderdrücke neu gefertigt bzw. bearbeitet
- Anbau eines Turboladers Garrett GT12 (Durchmesser Turbine 35.5 mm, Durchmesser Verdichter 41.0 mm) mit Wastegate und Neuanfertigung Abgaskrümmmer
- CNG Komponenten (Einblasdüsen, Druckregler, etc.) als Nachrüstatz aus dem Zubehörhandel (Bild 9)
- Luft/Luft-Ladeluftkühlung eines aufgeladenen 110kW-Serienmotors
- Betrieb des TVVH-CNG Motors mit einer eigenen, frei bedatbaren Motorsteuerung



**Bild 8: Maskierung Einlaßventile und resultierender Tumble über Ventilhub**



**Bild 9: Turbolader, Saugrohr und CNG-Einblasventile**

Folgende Randbedingungen wurden für die Messungen am TVVH-CNG Motor zugrunde gelegt:

- ungedrosselter Betrieb im gesamten Kennfeld durch lastabhängige Anpassung des Ventilhubes bzw. Einlaß-Schließt-Zeitpunkts
- füllungsoptimale Anpassung des Ventilhubes bzw. Einlaß-Schließt-Zeitpunkts an der Vollast
- Abgastemperatur vor Turbine kleiner 950°C
- stöchiometrischer Betrieb im gesamten Kennfeldbereich
- keine zusätzliche interne oder externe Abgasrückführung
- maximal zulässiger Zylinderspitzenruck 110 bar

Als Vergleichswerte für die Prüfstandsmessungen wurden die Meßergebnisse eines Opel 2.2L Benzin-Saugmotor herangezogen. Dieser Motor repräsentiert mit Nockenwellenphasensteller und interner Abgasrückführung den aktuellen Stand der Ottomotoren und hat mit einer Nennleistung von 108kW und einem maximalen Drehmoment von 206 Nm eine vergleichbares Vollastverhalten.

Tabelle 2 vergleicht die motorisch relevanten Kraftstoffdaten des für die Prüfstandsmessungen verwendeten Erdgases sowie des Benzins.

	Benzin	Erdgas (H)
Heizwert	42.0 MJ / kg	47.0 MJ / kg
Dichte bei 15°C	755 kg/m <sup>3</sup>	0.75 kg/m <sup>3</sup>
Luftbedarf	14.7	16.9
Oktanzahl	98	130

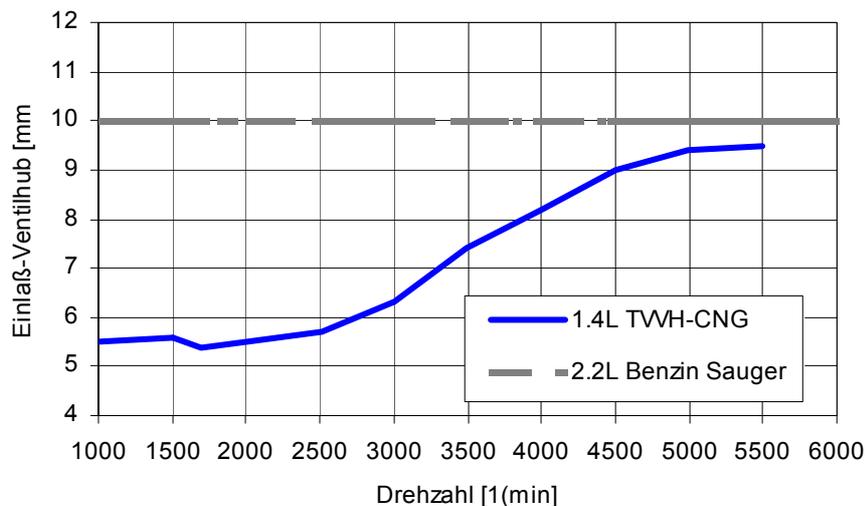
Tabelle 2: Vergleich Kraftstoffdaten Benzin und Erdgas

## 5. Meßergebnisse Motorprüfstand

Im folgenden wird eine Auswahl der Ergebnisse der Vermessung des 1.4L TVVH-CNG Motors auf dem stationären Motorprüfstand zunächst bei Vollast und anschließend bei Teillast den Meßergebnissen des 2.2L Benzin-Vergleichsmotors gegenübergestellt.

Die Bilder 10 bis 14 zeigen exemplarisch das Vollastverhalten. Im Low-End-Torque Bereich liegt beim TVVH-CNG Motor der optimale Einlaßventilhub bei etwa 5.5mm mit einem Einlaß-Schließen im Bereich des unteren Tot-Punkts (Bild 10). Mit zunehmender Drehzahl bewirkt eine Vergrößerung des Einlaß-Ventilhubs und damit ein späteres Einlaß-Schließen ein drehzahlabhängig jeweils optimiertes Füllungsverhalten. Damit läßt sich sowohl ein sehr gutes Low-End-Torque mit einem maximalen Drehmoment von 220 Nm schon bei etwa 1800  $\text{min}^{-1}$  sowie eine Nennleistung von 100 kW realisieren, beides jeweils nur knapp unter den Zielwerten.

Insbesondere im Bereich zwischen 1700 und 4000  $\text{min}^{-1}$  weist der TVVH-CNG Motor ein deutlich höheres stationäres Drehmoment als der Vergleichsmotor auf (Bild 11), lediglich bei niedrigsten Drehzahlen unterhalb von 1500  $\text{min}^{-1}$  liegt das Drehmoment des Downsizing-Motors geringer. Hier bietet sich durch Einsatz eines Twin-Scroll Turboladers zusätzliches Verbesserungspotential.



*Bild 10: Vergleich Einlaßventilhub bei Vollast, Meßwerte Motorprüfstand*

Der Vollastverbrauch in g/kWh ist in Bild 12 gegenübergestellt. Aufgrund der günstigen Zündbedingungen, des hohen Verdichtungsverhältnisses, des stöchiometrischen Betriebs und des höheren Heizwerts des Kraftstoffs zeigt der TVVH-CNG Motor ein um etwa 20% geringeres Verbrauchsniveau als der Benzin-Vergleichsmotor, der mit einem Luftverhältnis  $\lambda$  zwischen 0.88 bis 0.96 betrieben wurde. Mit Minimalwerten von knapp unter 200 g/kWh liegt der Erdgasmotor damit auf dem Niveau direkteinspritzender Dieselmotoren. Auch im Nennleistungsbereich liegt der Verbrauch um 250 g/kWh auf einem sehr günstigen Niveau, hier macht sich der fehlende Anfettungsbedarf besonders deutlich bemerkbar.

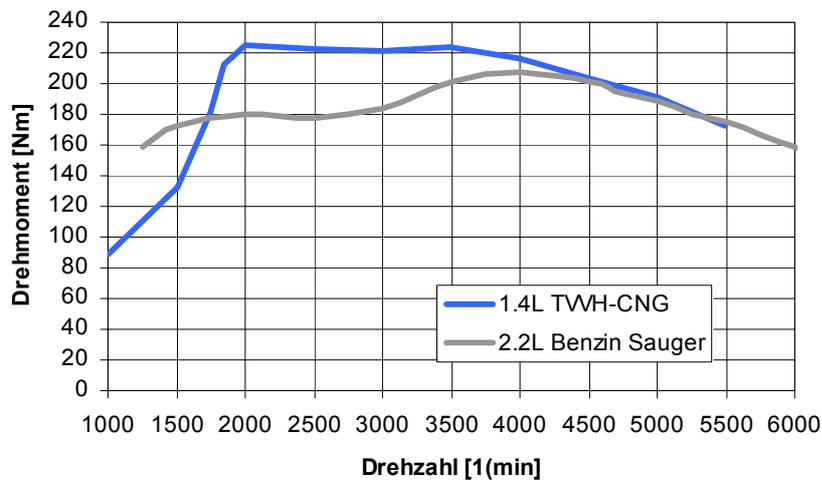


Bild 11: Vergleich Vollast-Drehmoment, Meßwerte Motorprüfstand

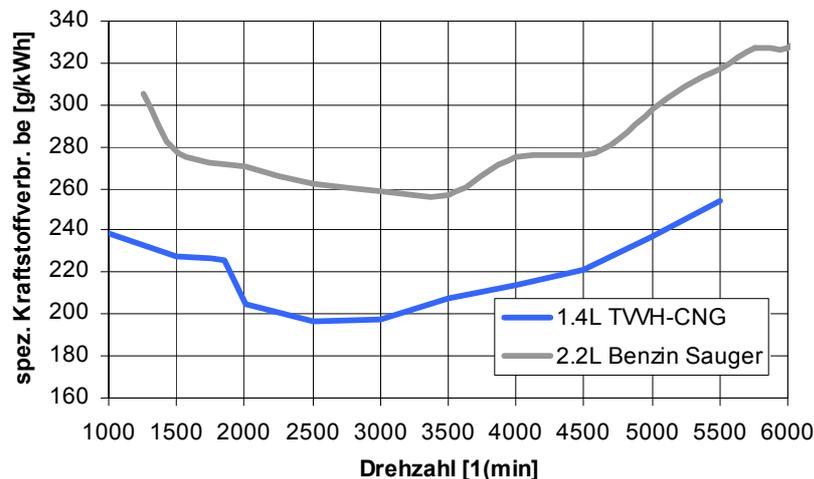


Bild 12: Vergleich Vollast-Verbrauch, Meßwerte Motorprüfstand

Die Wirkungsgradverbesserung ohne den Einfluß des höheren Heizwertes des Erdgases läßt sich anhand des effektiven Wirkungsgrades  $\eta_e$  darstellen (Bild 13). Dieser ist beim TVVH-CNG Motor etwa 10% höher als beim Vergleichsmotor und liegt im Bestpunkt mit über 39% knapp unter dem Niveau direkt einspritzender Dieselmotoren. Die resultierenden CO<sub>2</sub> Emissionen in g/kWh sind in Bild 14 wieder-gegeben. In Verbindung mit dem günstigeren C/H Verhältnis des Erdgases ergibt sich eine signifikante Reduzierung der CO<sub>2</sub> Emissionen im Bereich von 30-40%.

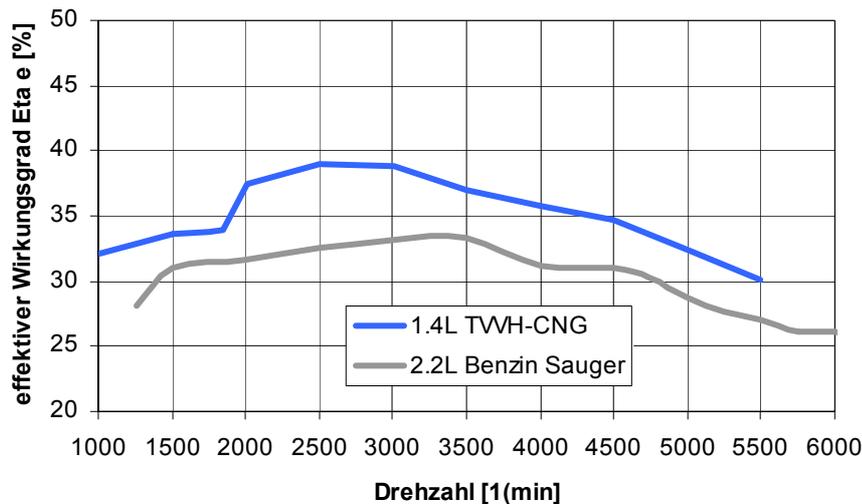


Bild 13: Vergleich eff. Wirkungsgrad bei Vollast , Meßwerte Motorprüfstand

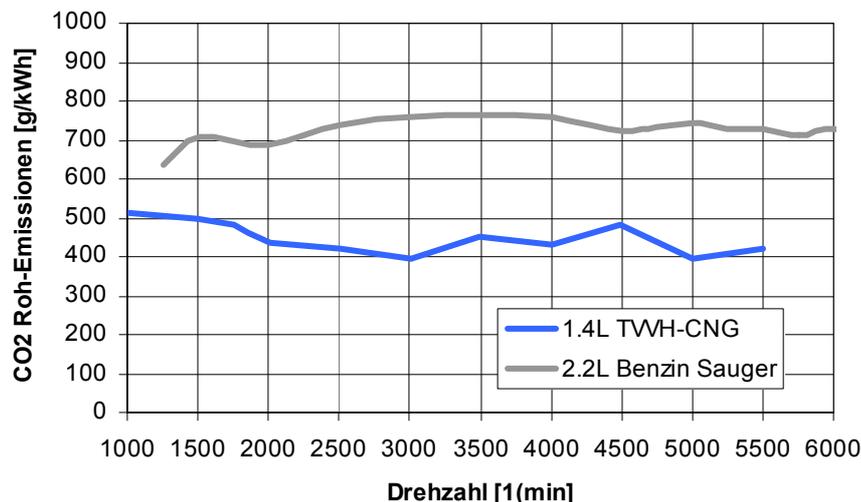


Bild 14: Vergleich CO2 Emissionen bei Vollast , Meßwerte Motorprüfstand

Die Ergebnisse der Teillast-Kennfeldvermessung des 1.4L TVVH-CNG Motors zeigen die Bilder 15-19 jeweils wieder im Vergleich zum 2.2L Benzin-Motor. Der Vergleich des spezifischen Verbrauchs  $b_e$  (Bild 15) zeigt einen Vorteil für den TVVH-CNG Motor je nach Last von 15-30%. Insbesondere bei niedrigen Lasten wirkt sich die Kombination von drosselfreier Laststeuerung, minimierten Ladungswechselverlusten und hohem Verdichtungsverhältnis signifikant aus. Den Vergleich der effektiven Wirkungsgrade zeigt Bild 16. Je nach Lastbereich ergibt sich eine 4-6%ige Verbesserung des effektiven Wirkungsgrads.

Die CO2 Emissionen (Bild 17) liegen in dem betrachteten Kennfeldbereich auf einem um durchschnittlich 40% reduzierten Niveau. Sowohl die HC-Emissionen (CH4) als auch die NOx-Emissionen sind beim TVVH-CNG Motor im Vergleich zum Benziner insbesondere bei höheren Lasten geringer (Bilder 18 und 19). Ursache hierfür sind die bessere Gemischbildung sowie die geringeren Spitzentemperaturen der Erdgasverbrennung.

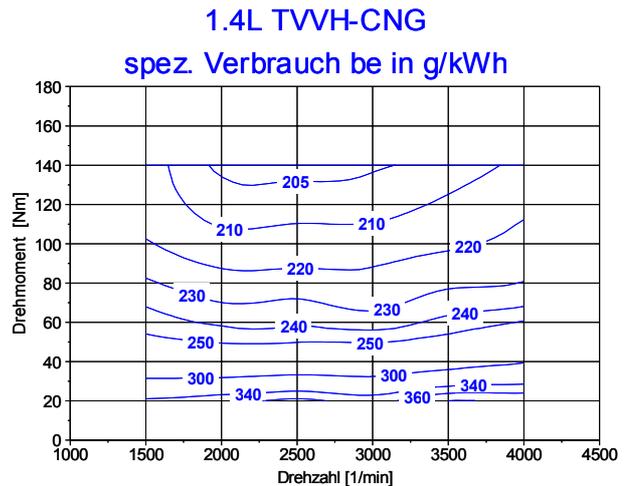
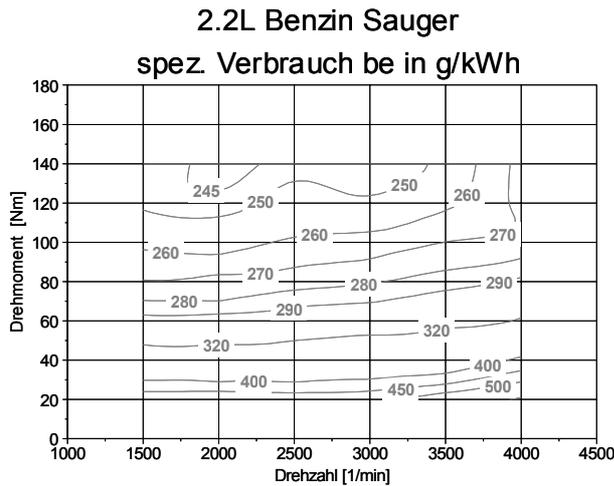


Bild 15: Vergleich Isolinien spez. Kraftstoffverbrauch im Kennfeld , Meßwerte

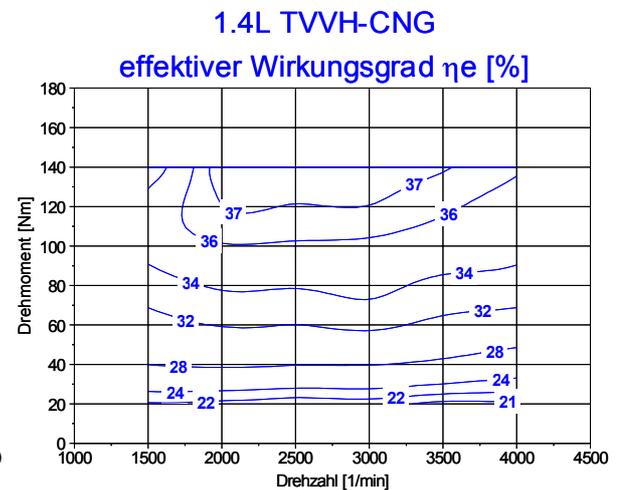
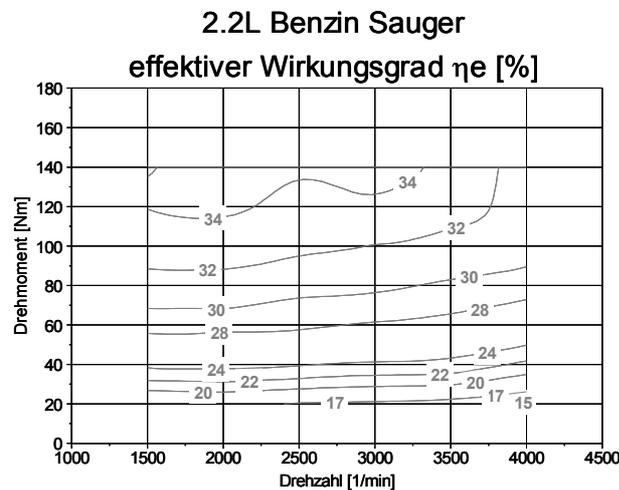


Bild 16: Vergleich Isolinien effektiver Wirkungsgrad  $\eta_e$  im Kennfeld , Meßwerte

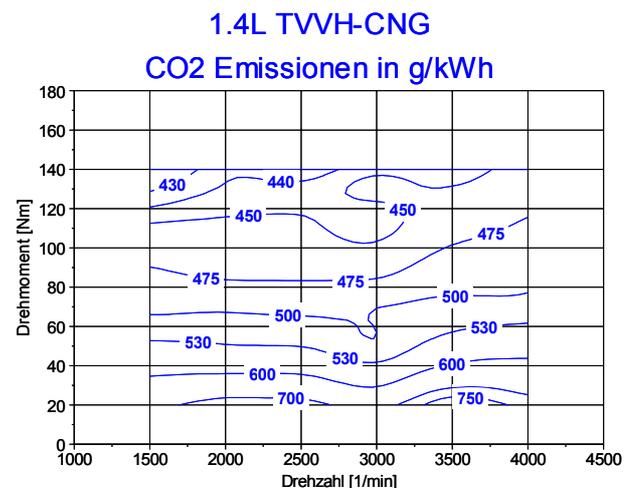
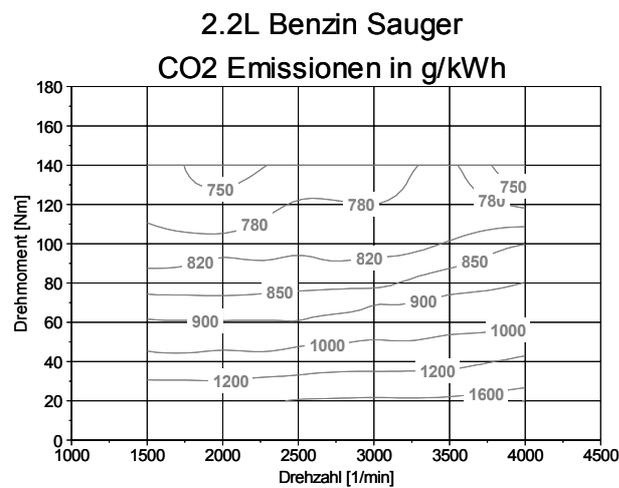


Bild 17: Vergleich Isolinien CO2 Emissionen im Kennfeld , Meßwerte

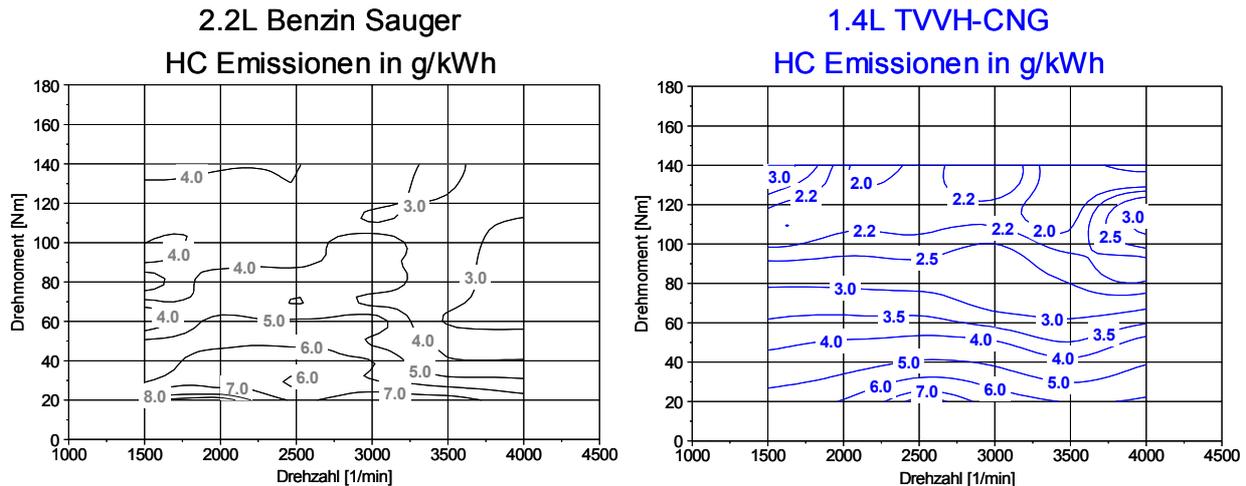


Bild 18: Vergleich Isolinien HC Emissionen im Kennfeld , Meßwerte

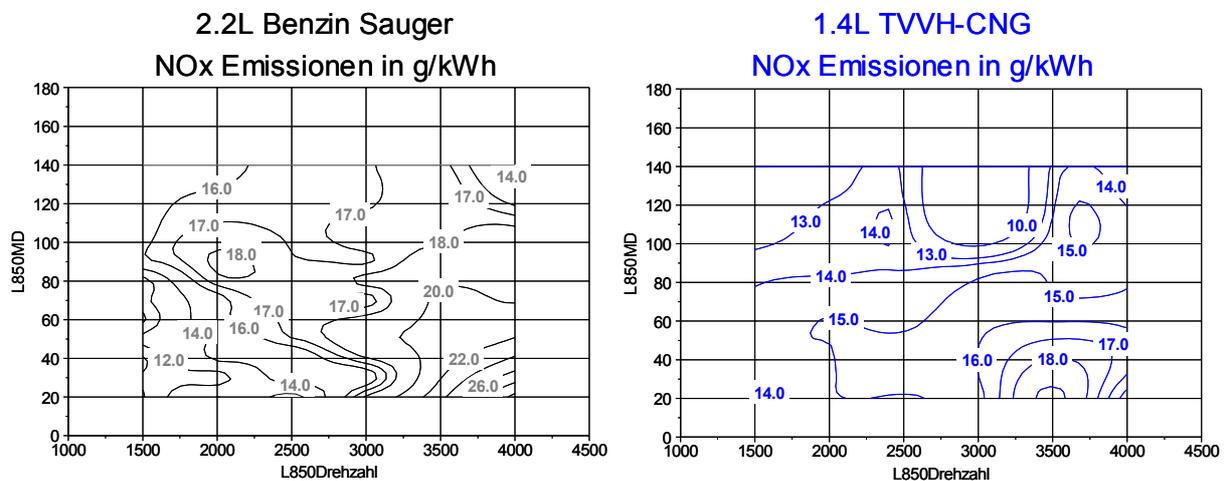


Bild 19: Vergleich Isolinien NOX Emissionen im Kennfeld , Meßwerte

Der Einfluß der intensivierten Ladungsbewegung bei Teilhub in Verbindung mit der Einlaßventilmaskierung wird anhand Bild 20 exemplarisch an einer Lastvariation bei  $2000 \text{ min}^{-1}$  deutlich. In Abhängigkeit von der Last sind dargestellt der eingestellte Einlaßventilhub, der induzierte Tumble der Frischladung (siehe auch Bild 8) sowie der sich ergebende Zündzeitpunkt und Heizverlauf 10-90%. Es ist deutlich erkennbar, daß im Bereich des maximalen Tumbles zwischen 1 und 4 mm Ventilhub eine erhebliche Beschleunigung der Verbrennung erfolgt. Bild 21 zeigt die Standardabweichung des indizierten Mitteldrucks  $s_{pmi}$  der 4-Zylinder im Niedriglastpunkt  $1500 \text{ min}^{-1}$ , 22Nm (entspricht  $p_{me} 2\text{bar}$ ), welche die Laufruhe des Motors charakterisiert. Das Niveau der Standardabweichung unter 0.1 bar stellt für eine CNG-Verbrennung in diesem Lastpunkt einen guten Wert dar und ist ebenfalls ein Indiz für eine hinreichend schnelle Verbrennung. Bild 22 gibt den Verlauf des Einlaß-Ventilhub im gesamten Betriebskennfeld wieder. Der tumble-intensive Ventilhub zwischen 1 bis 4mm deckt den gesamten Kennfeldbereich niedriger und mittlerer Last ab, d.h. das Potential der erhöhten Ladungsbewegung kann hier wirkungsvoll zur Verbrennungsbeschleunigung genutzt werden.

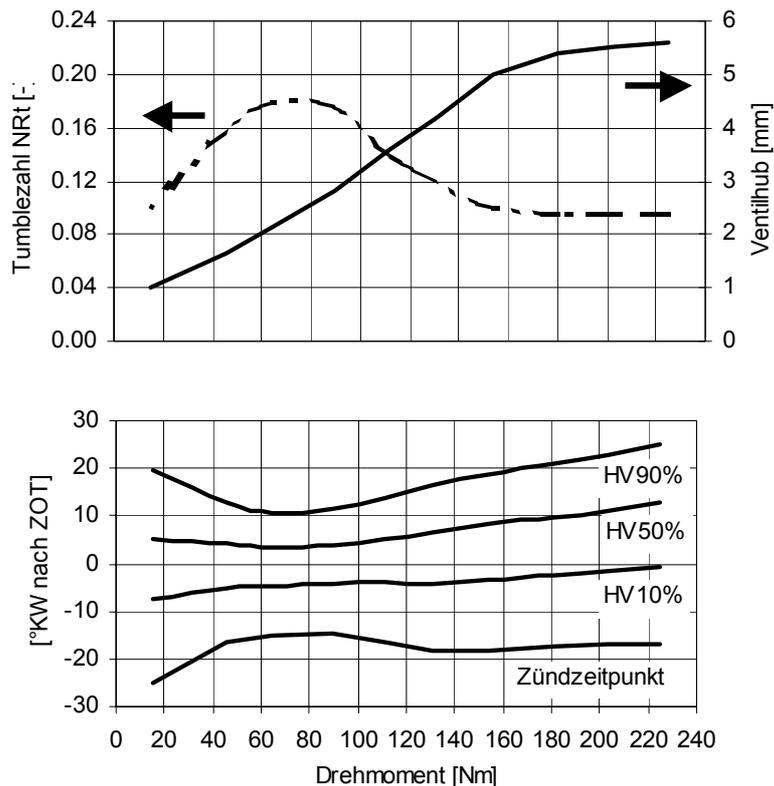


Bild 20: Einfluß von Ventilhub und Tumble auf Zündzeitpunkt und Heizverlauf über Last bei  $2000 \text{ min}^{-1}$ , Meßwerte TVVH-CNG Motorprüfstand

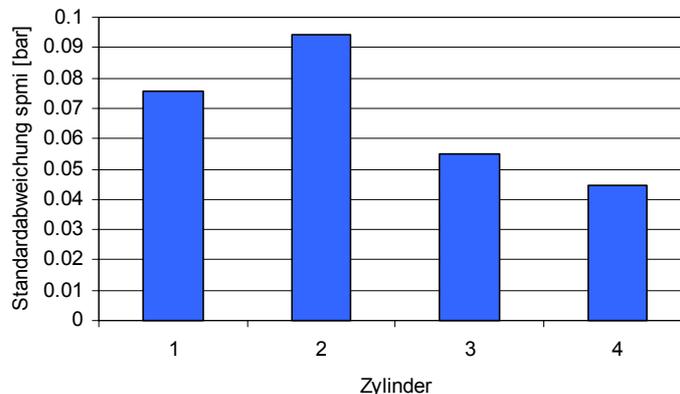


Bild 21: Standardabweichung  $sp_{mi}$  der Zylinder bei  $2000 \text{ min}^{-1}$ ,  $p_{me} 2 \text{ bar}$ , Meßwerte TVVH-CNG Motorprüfstand

Das resultierende Verbrauchsverhalten des TVVH-CNG Motor im gesamten Betriebskennfeld ist in Bild 23 dargestellt. Es zeigt sich eindrucksvoll, daß durch die beschriebene Technik Kombination TVVH-CNG mittels drosselfreier Laststeuerung, hoher Verdichtung, schneller stabiler Verbrennung, günstigen Vollastzündbedingungen bei ausschließlich stöchiometrischem Betrieb und Verzicht auf Anfettung ein hervorragendes Verbrauchsverhalten sowohl bei Teillast als auch bei Vollast realisiert werden kann.

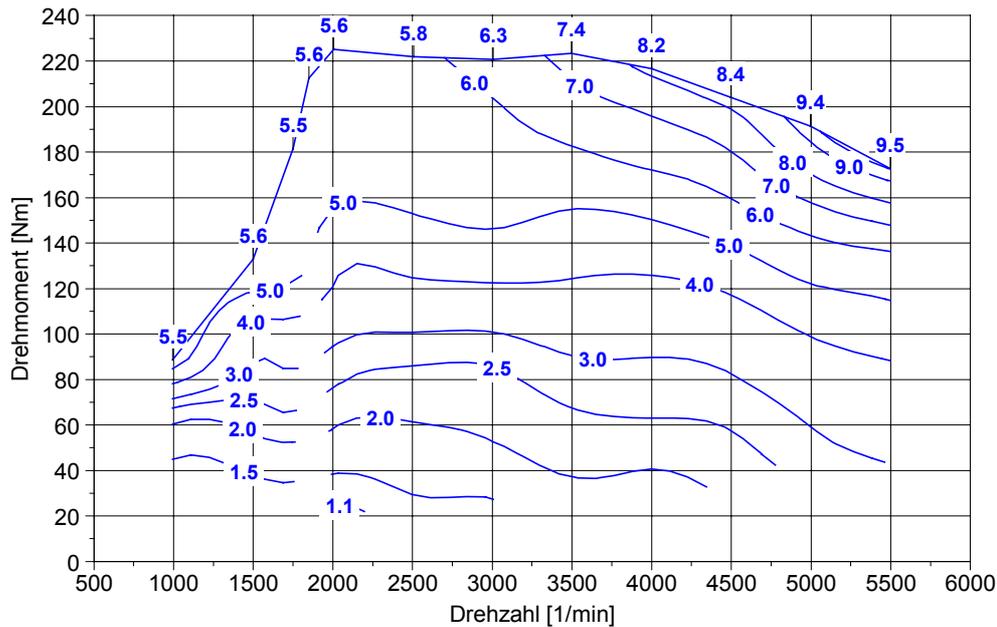


Bild 22: Isolinien Einlaßventilhub in mm TVVH-CNG Motor im Kennfeld , Meßwerte Motorprüfstand

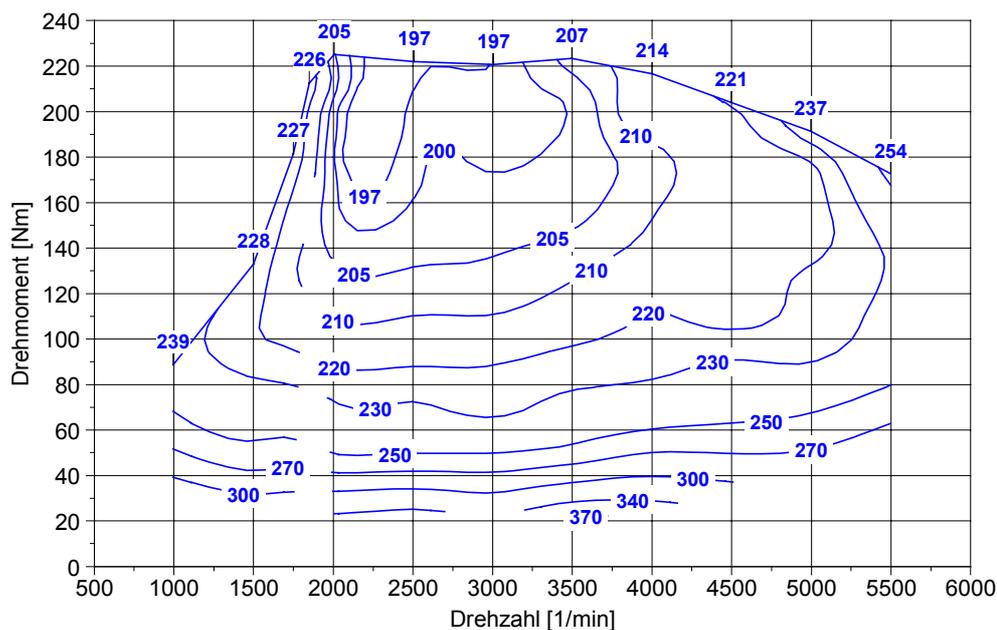


Bild 23: Isolinien spez. Verbrauch in g/kWh TVVH-CNG Motor im Kennfeld , Meßwerte Motorprüfstand

Zum Abschluß der Prüfstandsmessungen wurde der Motor mit CNG-Gas geringerer Qualität (L-Gas) in zwei Vergleichspunkten betrieben. Tabelle 3 vergleicht die motorisch relevanten Kraftstoffeigenschaften des vermessenen H- und L-Gases. Das L-Gas weist einen deutlich geringeren Methananteils und damit einen um etwa 12% geringeren Heizwert  $H_u$  auf. Aufgrund geringerer Brenngeschwindigkeit und reduzierter Klopfestigkeit erhöhen sich der spezifische Verbrauch sowie die  $CO_2$

Emissionen mit L-Gas sowohl im Teillastpunkt  $2000 \text{ min}^{-1}$  - pme 4bar als auch bei  $2000 \text{ min}^{-1}$  - Vollast um etwa 18% (Bilder 24 und 25).

	H-Gas	L-Gas
Heizwert	46.98	41.16
Dichte	0.75	0.71
Anteil Volumenprozent		
Methan	92.5	86.5
Ethan	3.1	2.7
Propan	1.2	0.4
Stickstoff	1.5	8.6

Tabelle 3: Vergleich Kraftstoffdaten H-Gas und L-Gas

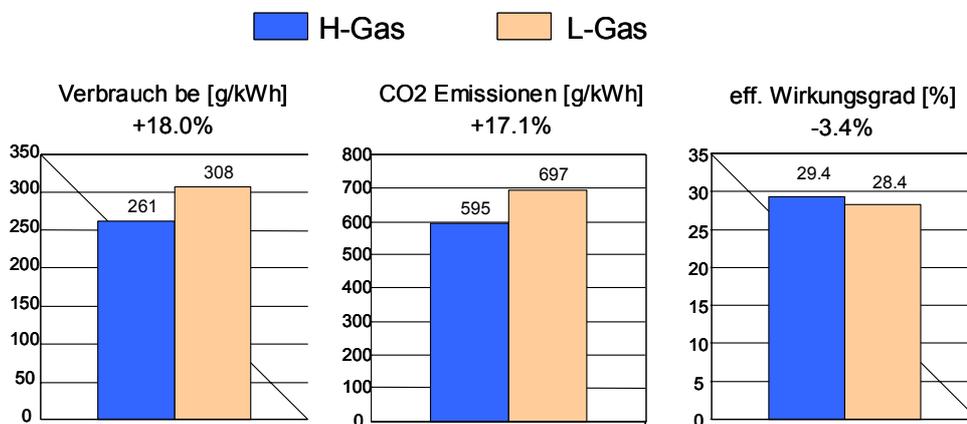


Bild 24: Vergleich Messung mit H-Gas und L-Gas,  $2000 \text{ min}^{-1}$ , pme 4bar, Meßwerte Motorprüfstand

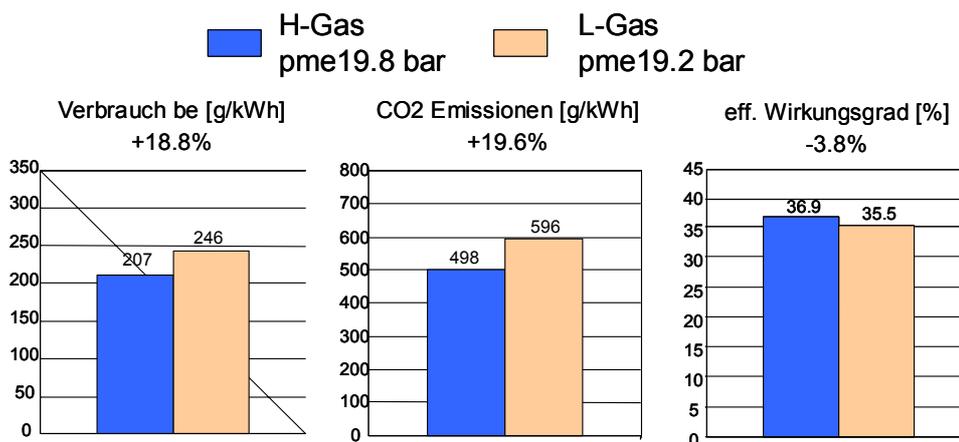


Bild 25: Vergleich Messung mit H-Gas und L-Gas,  $2000 \text{ min}^{-1}$ , Vollast, Meßwerte Motorprüfstand

Die Motorprüfstandsmessungen im Rahmen dieser Phase des Vorhabens haben die prognostizierten Potentiale zum überwiegenden Teil eindrucksvoll bestätigt. Zur vollständigen Bewertung des Konzepts sind folgende weiterführende Fragestellungen näher zu betrachten bzw. zu vertiefen:

- Low-End-Torque/Anfahrmoment: im Bereich unterhalb von 1500 min<sup>-1</sup> liegt das Drehmoment des TVVH-CNG Motors geringer als das des Benzin-Vergleichsmotors; hier ist die Downsizing-Tauglichkeit des Konzepts im Hinblick auf ein hinreichendes Anfahrverhalten auch im transienten Fahrzeugbetrieb nachzuweisen
- Kaltstartverhalten: aufgrund der niedrigeren Abgastemperaturen der CNG-Verbrennung muß eine geeignete Strategie zum Katheizen aufgezeigt werden
- Brenngeschwindigkeit/Gasqualität: die Vorteile/Potentiale des VVH Teilhubs auf die Brenngeschwindigkeit der CNG Verbrennung sollten im Hinblick auf Leerlauf und Niedriglast sowie unterschiedliche Gasqualität vertiefend untersucht werden.

Diese zusätzlichen Untersuchungen werden Gegenstand einer ggfs. durchgeführten Projekt Phase 2 sein.

Im Hinblick auf die Vorbereitung des Versuchsfahrzeugs wurden vor Abbau des TVVH-CNG-Motors noch folgende Arbeiten durchgeführt:

- Grundbedatung der Kennfelder der Motorsteuerung
- Steuergeräte Funktionsentwicklung für Turbolader-Regelung und Gasbetrieb
- Weiterentwicklung der Regelung VVH-Steller für neue Lageerfassung und Aktuatorik
- Abstimmung der Regelstrategie und -parameter VVH

## 6. Simulationsrechnung Fahrzeugverbrauch

Auf Basis der Meßergebnisse vom stationären Motorprüfstand wurden mit einem Fahrzeugsimulationsprogramm Berechnungen für den Neuen Europäischen Fahrzyklus NEFZ in einem Kompaktklasse Fahrzeug (Golf V) sowohl für den 1.4L TVVH-CNG-Motor als auch für den serienmäßigen 2.0L FSI Benziner und 2.0L TDI Diesel durchgeführt (Vergleichsdaten siehe Tabelle 1).

Die Simulationsrechnungen wurden dabei jeweils mit den gleichen Fahrzeugdaten gerechnet, d.h. Randbedingungen wie Getriebeübersetzung, Fahrzeuggewicht (1350 kg), etc. waren gleich.

Das Berechnungsergebnis für die drei Fahrzeugvarianten ist in Bild 26 wiedergegeben. Die CO<sub>2</sub> Emissionen liegen für den TVVH-CNG Motor mit 114 g/km um knapp 40% unter denen des Benzinmotors und um 24% unter denen des Dieselmotors. Der Vergleich des Energie-Verbrauchs im NEFZ fällt mit einem Vorteil von 13% gegenüber dem Benziner ebenfalls deutlich zugunsten des TVVH-CNG Motors aus, wohingegen der Diesel aufgrund der höheren Dichte und des besseren Wirkungsgrads hier 7% besser ist.

Die 40%-ige CO<sub>2</sub> Reduzierung setzt sich zu etwa 20-25% aus dem gegenüber Benzin günstigeren C/H Verhältnis des Erdgases sowie zu etwa 15-20% aus der Wirkungsgradverbesserung des TVVH-CNG-Motors durch drosselfrei Laststeuerung, erhöhte Verdichtung und Downsizing zusammen.

Dieses Ergebnis zeigt eindrucksvoll das Potential von Erdgas in Kombination mit mechanisch vollvariabler Ventilhubsteuerung und Abgasturboaufladung, ein effizientes Downsizing umzusetzen und das hochgesteckte Ziel einer Reduzierung der CO<sub>2</sub> Emissionen unter 120 g/km zu realisieren.

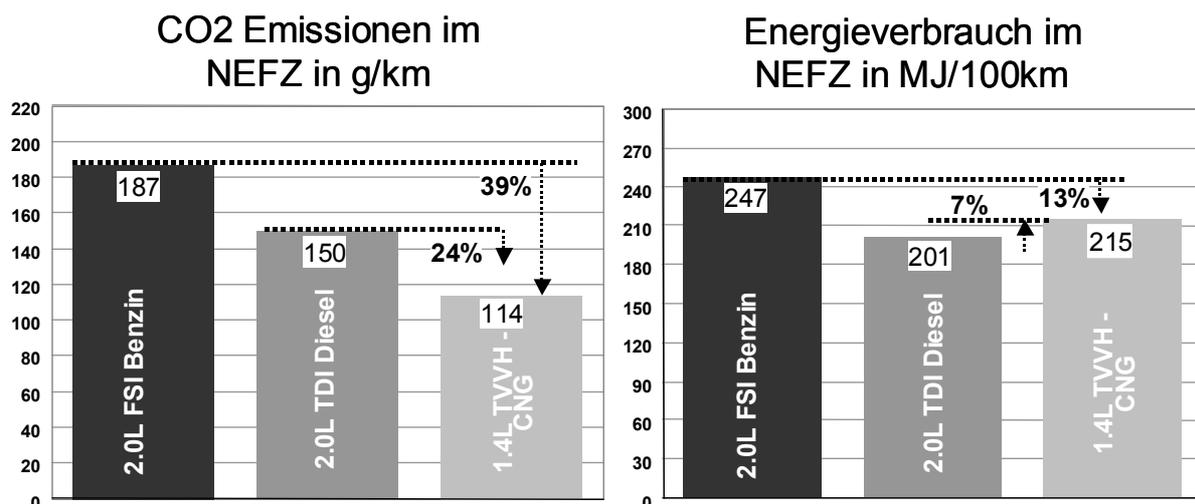


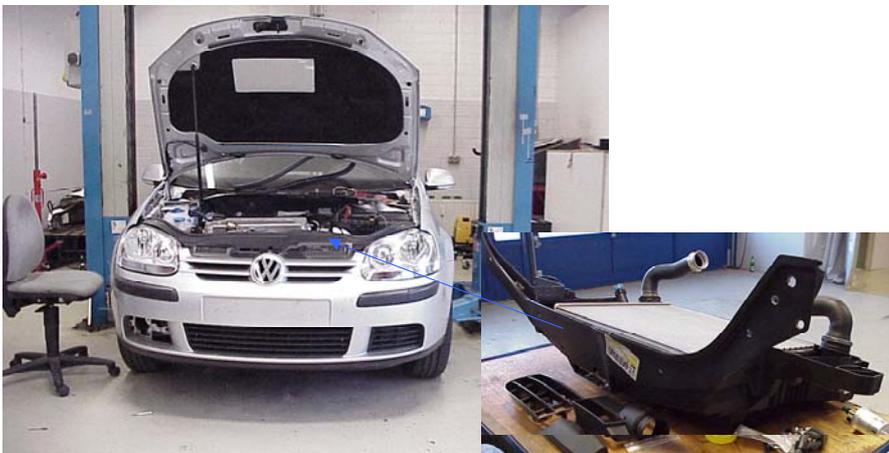
Bild 26: Vergleich CO<sub>2</sub> Emissionen und Energieverbrauch im NEFZ für Golf V, Simulation

## 7. Aufbau Versuchsfahrzeug

Nach Vermessung auf dem Motorprüfstand wurde der TVVH-CNG-Motor in ein Fahrzeug Volkswagen Golf V eingebaut. Gas-Tank, Hochdruckleitungen und Gasdruckregler für den Fahrzeugbetrieb wurden als Nachrüstset gekauft und von einem auf CNG-Umrüstung von Serienfahrzeugen spezialisierten Fachbetrieb montiert und abgenommen.

Zum Abschluß der Phase 1 dieses Vorhabens wurde das Versuchs-Fahrzeug mit TVVH-CNG-Motor in Betrieb genommen und einer ersten Grundabstimmung im Hinblick auf Startverhalten und hinreichende Fahrbarkeit unterzogen. Für die geplante Phase 2 des Vorhabens steht das Fahrzeug damit für weiterführende Abstimmungen und zur Darstellung der Potentiale hinsichtlich Verbrauch und CO<sub>2</sub> Emissionen auf dem Fahrzeug-Rollenprüfstand als auch im realen Straßenbetrieb zur Verfügung.

Die Bilder 27-31 zeigen den Aufbau des Fahrzeugs.



*Bild 27: Versuchsfahrzeug Golf V 1.4L TVVH-CNG und nachgerüstete serienmäßige Ladeluftkühlung vom 2.0L TDI*



*Bild 28: 1.4L TVVH-CNG Motor im Golf V Versuchsfahrzeug, Ansicht auf Krümmer, Turbolader und Katalysator*



*Bild 29: 1.4L TVVH-CNG Motor im Golf V Versuchsfahrzeug*



*Bild 30: Nachgerüsteter CNG Gastank im Golf V Versuchsfahrzeug*

### Fazit

Die in dem Vorhaben dargestellten Ergebnisse aus Prüfstandsuntersuchungen und Testzyklusrechnungen zeigen, daß die entwickelte Technikkombination aus vollvariabler Ventilhubsteuerung VVH, Erdgasbetrieb und Abgasturboaufladung eine Reduzierung der CO<sub>2</sub> Emissionen um etwa 40% in einem Kompaktklassefahrzeug im Neuen Europäischen Fahrzyklus gegenüber einem leistungsgleichen Benzin-Saugmotor ermöglichen.

Damit kann der Ottomotor gegenüber dem Diesel nicht nur durch einen vergleichbar geringen Verbrauch, sondern auch durch seine geringeren NO<sub>x</sub>- und Partikelemissionen zu einer deutlichen Verbesserung der Umweltbilanz beitragen.

Zur weiterführenden Bewertung des Konzepts ist neben einer vertiefenden Untersuchung spezifischer Fragestellungen hinsichtlich Kaltstart- und Kataufheizverhalten, Einfluß unterschiedlicher Gasqualität, sowie Anfahrmoment insbesondere der Aufbau eines Demonstrationsfahrzeugs sowie der Nachweis der Potentiale im Rollen- und Straßentest sinnvoll.

### Literaturverzeichnis

- [1] KREUTER, P.; HEUSER, P.; REINICKE-MURMANN, J.  
The Meta VVH System – A Continuously Variable Valve Timing System  
SAE Paper 980765
  
- [2] KREUTER, P.; HEUSER, P.; REINICKE-MURMANN, J.; ERZ, R.; PETER, U.  
The Meta VVH System – The Advantages of Continuously Mechanical Variable Valve Timing  
SAE Paper 99P450