

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 CO₂-Bilanz gleichzuziehen
und ihn in den Emissionen
deutlich zu unterbieten (Phase 2)

Abschlußbericht über die 2. Phase des Entwicklungsprojekts,
gefördert unter dem AZ: 24030-02 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dipl.-Ing. Markus Kremer
Dipl.-Ing. Ulrich Peter
Dipl.-Ing. Olaf Metzger
Dipl.-Ing. Jürgen Nüsser
Dipl.-Ing. Ralf Bey

Herzogenrath, Nov. 2008

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	24030-02	Referat	24/0	Fördersumme	225.000 EU
				Nachbewilligung	35.383 EU
Antragstitel	Erdgasbetrieb mit vollvariabler Ventilhubsteuerung und Aufladung am Ottomotor. Ein Weg, mit dem Dieselmotor in der CO₂-Bilanz gleichziehen und ihn in den Emissionen deutlich zu unterbieten (Phase 2)				
Stichworte	CO ₂ Reduzierung, Erdgasbetrieb, Downsizing				
	Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)	
	12 Monate	01.03.2007	30.11.2008	2 + Nachbewilligung	
	Zwischenberichte	14.05.2007	31.12.2007	30.06.2008	
Bewilligungsempfänger	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	
Kooperationspartner					

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Im Rahmen der Phase 1 des Gesamtvorhabens wurde auf Basis des aktuellen seriennahen Entwicklungsstandes des Meta VVH- Systems (vollvariable Einlassventilhubsteuerung) ein Ottomotor mit diesem System ausgestattet und mit CNG (Compressed Natural Gas) auf dem Motorprüfstand vermessen. Das VVH- System von Meta reduziert die Drosselverluste des Ottomotors und erhöht den Gesamtwirkungsgrad des Motors. Zusätzlich wurde 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 wurde im Rahmen des Projektes dieser Motor mit Erdgas betrieben, was einen weiteren CO₂ Vorteil von bis zu 25% aufgrund des günstigen C/H Verhältnisses mit sich bringt. Die Kombination dieser CO₂ reduzierenden Maßnahmen addieren sich auf eine CO₂ 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 CO₂-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_x- und Partikelemissionen zu einer deutlichen Verbesserung der Umweltbilanz beitragen. Ziel der Phase 2 dieses Vorhabens ist es, durch verfahrensspezifische Untersuchungen die Potentiale der Technikkombination im Hinblick auf eine Vermarktung detaillierter zu belegen sowie die in Phase 1 am Prüfstand aufgezeigten Potentiale auch im Fahrzeug darzustellen und so Automobilhersteller für die Umsetzung dieses Antriebskonzepts zu gewinnen.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

In der hier beantragten Phase 2 wird ein zweiter Motor mit der TVVH-CNG Technologie ausgerüstet, um die oben genannte weiterführende Entwicklung zum Brennverfahren durchzuführen. Parallel hierzu wird ein Versuchsfahrzeug (Golf V) mit einem T-VVH CNG Motor ausgerüstet und einer Applikation unterzogen, mit der die auf dem Motorprüfstand nachgewiesenen Verbrauchs- und CO₂-Potentiale (siehe Bericht Phase 1) im Fahrzeug dargestellt werden können.

Zur Entwicklung eines präsentierfähigen Versuchsfahrzeuges und zur Durchführung der weiterführenden Untersuchungen am TVVH-CNG Motor bedarf es intensiver Steuergeräte Funktionsentwicklung um die Potentiale der auch im instationären Fahrbetrieb des Fahrzeugs nachzuweisen.

Die folgende Vorgehensweise ist vorgesehen:

- Fertigung und Beschaffung der notwendigen Komponenten um einen zweiten TVVH-CNG Motor aufzubauen und parallel zum Fahrzeug auf dem Motorprüfstand zu betreiben.
- CNG spezifische thermodynamische Untersuchungen zur Absicherung und Vervollständigung des Potentialnachweises.
- Weiterentwicklung der Steuergerätfunktionen für den Fahrzeugeinsatz zur Nutzung der Freiheitsgrade durch die Abgasturboaufladung und die vollvariable Ventilsteuerung
- Ausführliche Bedatung des Motorsteuergerätes am Motorversuch zur Vorbereitung der Applikation.
- Kalibrierung der Fahrbarkeit unter Berücksichtigung der Verbrauchsvorteile
- Messfahrten zum Nachweis der in Phase 2 anvisierten Ziele.
 - Rollenversuch NEDC (Kraftstoffverbrauch / Abgasemissionen)
 - Reale Fahrzyklen (Kraftstoffverbrauchsmessungen bei Stadt-, Land- und Autobahnfahrten)
 - Fahrdynamikmessungen zur Darstellung des Downsizing Konzeptes
- Verbrauchsmessfahrten mit dem Benchmark Fahrzeug Golf V 2.0 FSI

Das Versuchsfahrzeug steht am Ende des Projektes zur Vorführung im Interesse der DBU bereit. Ein Ziel dieses Vorhabens ist es, durch den Nachweis der Potentiale im Versuchsfahrzeug Automobilhersteller für die Umsetzung dieses Antriebskonzeptes zu gewinnen.

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 Technikkombination auf der Tagung „Variable Ventilsteuerung“, 13.-14. 02.07, Essen, Haus der Technik
- Ausstellung des Versuchsfahrzeugs auf der Woche der Umwelt im Schloß Bellevue in Berlin 05.-06. Juni 2007 und Präsentation des Fahrzeugs für Bundespräsident Köhler und Umweltminister Gabriel
- Ausstellung des Versuchsträgers auf dem Stand der Meta GmbH auf dem 29. Internationalen Wiener Motorensymposium, 24.-25. April 2008
- Ausstellung des Versuchsträgers auf dem Stand der Meta GmbH auf dem Aachener Kolloquium. 6.-8. Oktober 2008

Fazit

Im Rahmen der Phasen 1 und 2 dieses Projekts wurde das Potential des Erdgasbetriebs mit vollvariabler Ventilhubsteuerung und Turboaufladung eindrucksvoll nachgewiesen. Im NEDC Rollentest mit einem VW Golf konnte ein sehr niedriges CO₂-Emissionsniveau von 113 g/km dargestellt werden, ebenso wie ein moderater Verbrauch im realen Fahrbetrieb.

Auch das für die Umsetzbarkeit eines solchen Downsizingkonzeptes relevante Anfahrmoment und die allgemeine Fahrbarkeit und Performance des Fahrzeugs entsprechen den Prognosen und bestätigen die Effizienz und Realisierbarkeit dieses Emissionsminderungskonzeptes.

Zur vollständigen Bewertung des Konzepts hinsichtlich seiner Marktfähigkeit sind abschließend noch Detailfragen offen, die im Rahmen des bisherigen Projektumfangs nicht untersucht werden konnten. Dazu gehören der Kaltstart sowie notwendige Eigenschaften eines CNG-spezifischen Katalysators und Strategien zur Sicherstellung der Light-Off-Temperatur des Katalysators bei Niedriglast.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	4
Verzeichnis von Bildern und Tabellen	5
Verzeichnis von Begriffen und Definitionen	7
Zusammenfassung	8
Einleitung	8
Hauptteil	10
1. Ergebnis Projektphase 1	10
2. Zielsetzung Projektphase 2	12
3. Verfahrensspezifische Untersuchungen am Motorprüfstand	15
4. Applikation Versuchsfahrzeug	32
5. Messergebnisse Versuchsfahrzeug	37
6. weiterführende Applikationsarbeiten (Nachbewilligung)	40
Fazit	45
Aufgabeübersicht /Status	46

Verzeichnis von Bildern und Tabellen

	Seite
Bild 1: Isolinien spez. Verbrauch in g/kWh TVVH-CNG Motor im Kennfeld, Messwerte Motorprüfstand	10
Bild 2: Isolinien Verbrauchsvorteil in % TVVH-CNG Motor gegenüber Referenzmotor, Messwerte Motorprüfstand	11
Bild 3: Isolinien CO ₂ -Reduzierung in % TVVH-CNG Motor gegenüber Referenz-Motor, Messwerte Motorprüfstand	11
Bild 4: Ergebnis Fahrzeugsimulation Golf V im NEFZ	12
Bild 5: Auswechselbarer Brennraumeinsatz für Maskierungsuntersuchungen auf dem Strömungsprüfstand	15
Bild 6: Messergebnisse Strömungsprüfstand Tumble und Durchflusszahl α_k , Variation Maskierungshöhe	16
Bild 7: In den Brennraumguss integrierte Maskierung mit 2mm Höhe	16
Bild 8: Maskierung mit 3mm Höhe, in den Sitzring integriert (nicht volllastfest)	16
Bild 9: Zündzeitpunkt und Heizverlauf über Ventilhub, 1000 min ⁻¹ , p _{me} 2bar	17
Bild 10: Laufruhe: Standardabweichung von p _{mi} in %, 1000 min ⁻¹ , p _{me} 2bar	18
Bild 11: Saugrohrdruck und Ladungswechselarbeit in bar, 1000 min ⁻¹ , p _{me} 2bar	18
Bild 12: Spezifischer Verbrauch b_{iHD} , b_i , b_e in g/kWh 1000 min ⁻¹ , p _{me} 2bar	18
Bild 13: Zündzeitpunkt und Heizverlauf über Ventilhub, 1000 min ⁻¹ , p _{me} 1bar	19
Bild 14: Laufruhe: Standardabweichung von p _{mi} in %, 1000 min ⁻¹ , p _{me} 1bar	19
Bild 15: Saugrohrdruck und Ladungswechselarbeit in bar, 1000 min ⁻¹ , p _{me} 1bar	19
Bild 16: Spezifischer Verbrauch b_{iHD} , 1000 min ⁻¹ , p _{me} 1bar	20
Bild 17: Spezifischer Verbrauch b_i , 1000 min ⁻¹ , p _{me} 1bar	20
Bild 18: Spezifischer Verbrauch b_e , 1000 min ⁻¹ , p _{me} 1bar	20
Bild 19: Vergleich Hubschar der Nockenwellenvarianten 4 und 7	21
Bild 20: Saugrohrdruck und Ladungswechselarbeit in bar, 1000 min ⁻¹ , p _{me} 2bar Vergleich Nockenwellenvariante 4 und 7	21
Bild 21: Zündzeitpunkt und Heizverlauf über Ventilhub, 1000 min ⁻¹ , p _{me} 2bar Vergleich Nockenwellenvariante 4 und 7	22
Bild 22: Laufruhe: Standardabweichung von p _{mi} in %, 1000 min ⁻¹ , p _{me} 2bar Vergleich Nockenwellenvariante 4 und 7	22

Bild 23: Spezifischer Verbrauch b_{iHD} , b_i , b_e in g/kWh 1000 min^{-1} , p_{me} 2bar	
Vergleich Nockenwellenvariante 4 und 7	23
Bild 24: Daten der verschiedenen Gasqualitäten	23
Bild 25: Zündzeitpunkt und Heizverlauf über Ventilhub, 1000 min^{-1} , p_{me} 1bar	23
Bild 26: Laufruhe: Standardabweichung von p_{mi} in %, 1000 min^{-1} , p_{me} 1bar	24
Bild 27: Lambda Gleichverteilung über die Zylinder, 1000 min^{-1} , p_{me} 1bar	
Vergleich verschiedene Ventilhübe	24
Bild 28: Lambda Gleichverteilung über die Zylinder, 1000 min^{-1} , p_{me} 1bar	
Vergleich unterschiedliche Gasqualitäten	24
Bild 29: Drehmoment und Verbrauch, Vergleich Messung mit H- und 70%-Gas	26
Bild 30: Drehmoment und Verbrauch	27
Bild 31: Drehmoment und Verbrauch	27
Bild 32: Temperatur Abgas vor Katalysator vs. Zündzeitpunkt, 1000 min^{-1} , p_{me} 1bar	29
Bild 33: Standardabweichung s_{pmi} der 4 Zylinder sowie der Maximalverlauf (fett) über Zündzeitpunkt, 1000 min^{-1} , p_{me} 1bar	29
Bild 34: Temperatur Abgas vor Katalysator vs. Zündzeitpunkt, 1000 min^{-1} , p_{me} 1bar	30
Bild 35: Spezifischer Verbrauch b_e über Zündzeitpunkt, 1000 min^{-1} , p_{me} 1bar	30
Bild 36: Struktur der Motorsteuerungshardware	32
Bild 37 Aufbau der Softwarestruktur in der dSpace Micro Autobox	33
Bild 38 Aufbau der Lasterfassung im Normalbetrieb	34
Bild 39 Kenfelder im Startzustand	34
Bild 40: Lambdaregler	35
Bild 41: Reale Straßenzyklen und gemessene Gasverbräuche	38
Bild 42: Durchzugswerte des Versuchsfahrzeugs im 4., 5. und 6. Gang	39
Bild 43: Gemessene Beschleunigung in jedem Gang zur Bestimmung des Performance Feel Index	39
Bild 44: Performance Feel Index für verschiedene Motorisierungen	40
Bild 45: Prinzipdarstellung Startrampe	41
Bild 46: Simulink Modell des Lambdareglers	42
Bild 47: Simulink Modell der Gangerkennung	43
Bild 48: Simulink Modell der Ladedruckregelung	44
Bild 49: Übersichtmatrix Erledigte Aufgaben	46

Verzeichnis von Begriffen und Definitionen

Verwendete Abkürzungen:

AGR	Abgasrückführung
ATL	Abgasturbolader
C	Kohlenstoff
CNG	Compressed Natural Gas
CO ₂	Kohlendioxid
FSI	Fuel Stratified Injection
H	Wasserstoff
HC	Kohlenwasserstoff
KW	Kurbelwinkel
NEDC	New European Driving Cycle
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NO _x	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 Klopfestigkeit aus. Die vollvariable Ventilhubsteuerung VVH ergänzt durch 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 CO₂ 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_x- und Partikelemissionen zu einer deutlichen Verbesserung der Umweltbilanz beitragen.

Im Rahmen der Phase 1 dieses Vorhabens wurde ein 1.4L-Ottomotor mit einer Technikkombination von vollvariabler Ventilhubsteuerung, Abgasturboaufladung und Erdgasbetrieb ausgerüstet und auf einem stationären Motorprüfstand ausführlich vermessen.

In der in diesem Bericht beschriebenen 2. Projekt-Phase wurden vertiefende verfahrensspezifische Untersuchungen durchgeführt. Abschließend wurde ein Versuchsfahrzeug aufgebaut, abgestimmt und das Verbrauchspotential sowohl auf dem Rollenprüfstand als auch im realen Straßenbetrieb nachgewiesen.

Einleitung

Im Vergleich zu modernen Dieselmotoren, die bereits ein Downsizing mit spezifischen Leistungen von 65kW/L und Drehmomenten von 185Nm/L in Verbindung mit hervorragend 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 folgenden 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 CO₂ Emissionen von 35-40% im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) gegenüber dem jetzigen Stand der benzinbetriebenen Ottomotoren zu realisieren.

Hauptteil

1. Ergebnis Projektphase 1

Die Vermessung des 1.4L Vierzylinder Ottomotors mit vollvariabler Ventilhubsteuerung VVH, Abgasturboaufladung und CNG-Betrieb auf dem stationären Motor-Prüfstand in der Projekt-Phase 1 lässt sich wie folgt zusammenfassen:

Sehr niedriger spezifischer Verbrauch im gesamten Kennfeldbereich auf dem Niveau eines Dieselmotors (Bild 1), insbesondere auch bei hohen Lasten (Minimalwert be = 197 g/kWh bei über 150Nm/l) und im Nennleistungsbereich.

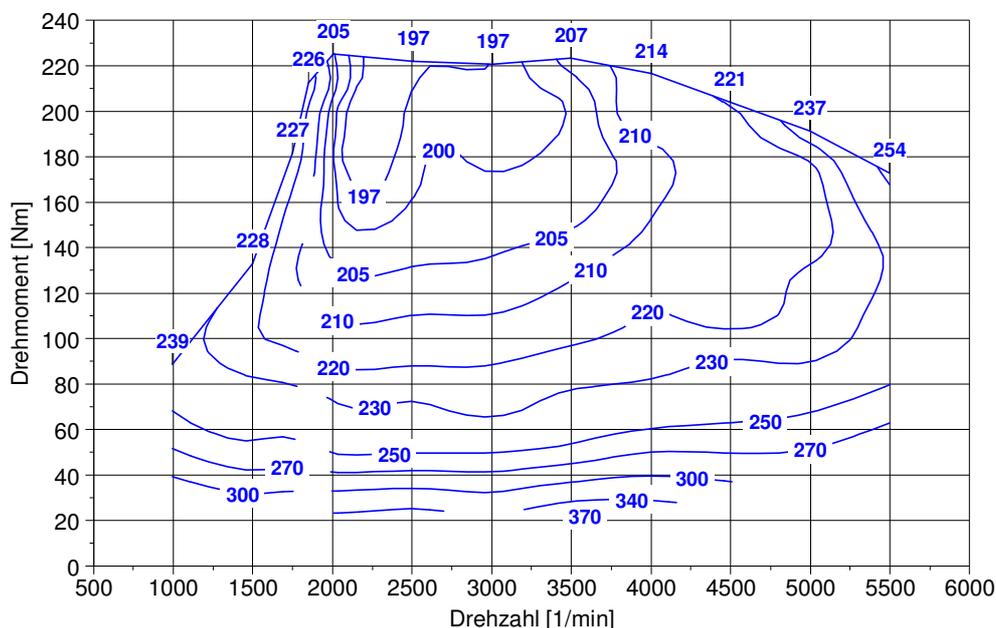


Bild 1: Isolinien spez. Verbrauch in g/kWh TVVH-CNG Motor im Kennfeld, Messwerte Motorprüfstand

Im Vergleich zu einem Benzin-Referenzmotor vergleichbarer Leistung (Opel 2.2L Vierzylinder L850) ergibt sich ein Verbrauchsvorteil je nach Kennfeldbereich von 15 – 28% (Bild 2); insbesondere bei niedrigen Lasten wirkt sich die Kombination von drosselfreier Laststeuerung, hohem Verdichtungsverhältnis und reduziertem Hubvolumen mit Verbrauchsvorteilen von deutlich über 20% sehr günstig aus.

Die resultierende Reduzierung der CO₂ Emissionen im Vergleichs-Kennfeld ist in Bild 3 dargestellt. In Verbindung mit dem im Vergleich zum Benzin niedrigeren Kohlenstoffgehalt des Erdgases ergeben sich CO₂-Reduktionen von 40-50%.

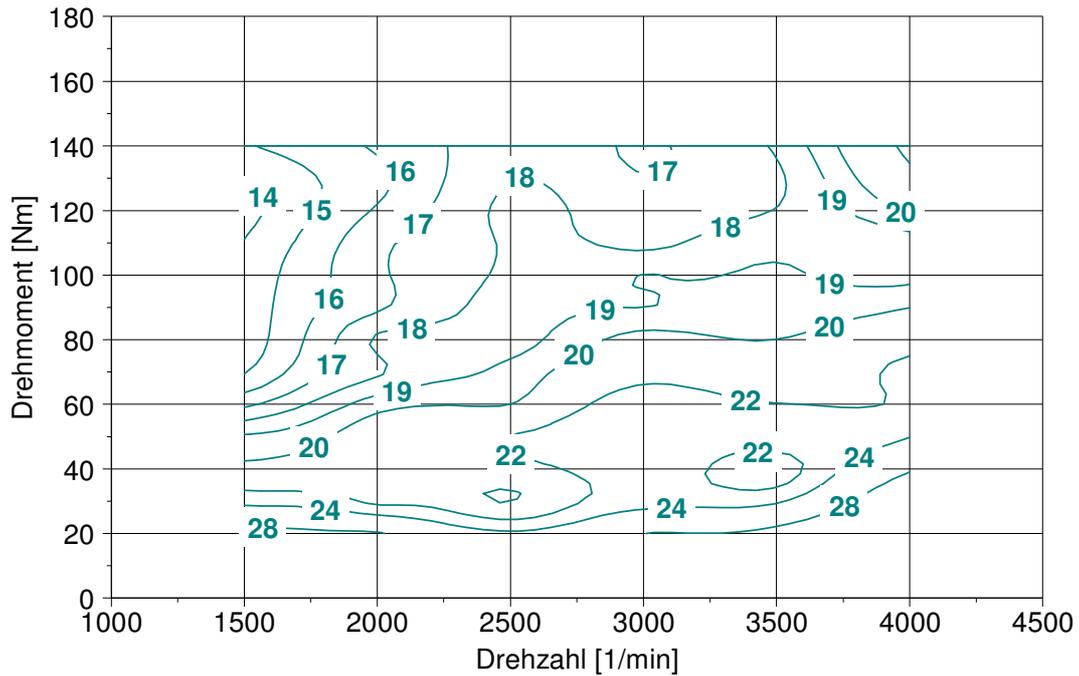


Bild 2: Isolinien Verbrauchsvorteil in % TVVH-CNG Motor gegenüber Referenzmotor, Messwerte Motorprüfstand

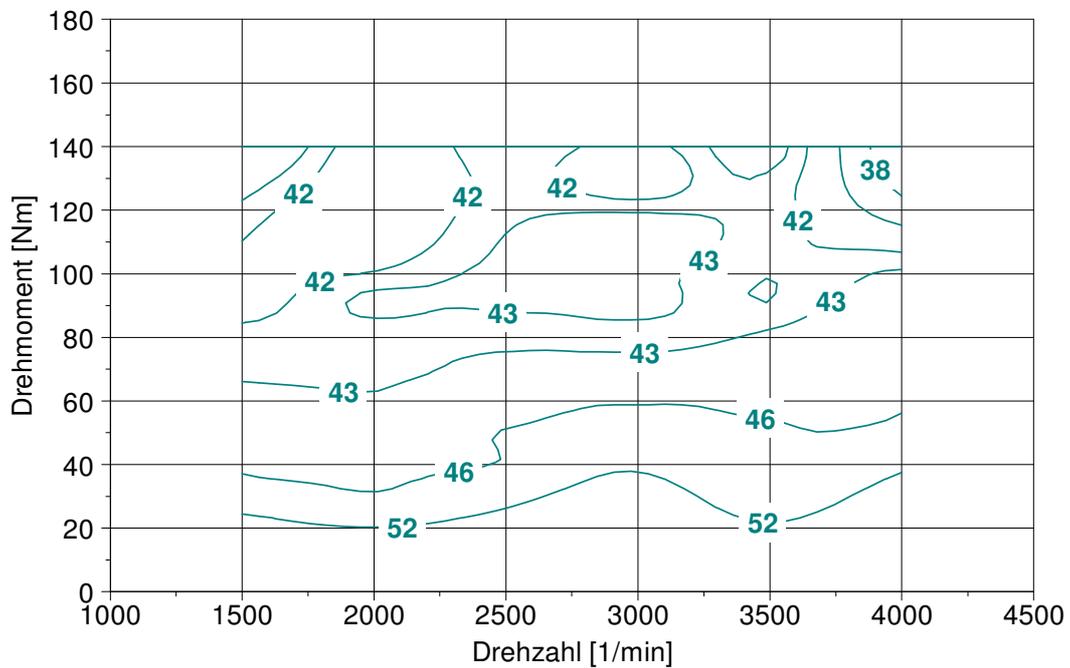


Bild 3: Isolinien CO2-Reduzierung in % TVVH-CNG Motor gegenüber Referenz-Motor, Messwerte Motorprüfstand

Die NEDC-Simulationsrechnung für das Zielfahrzeug Golf V auf Basis der stationären Prüfstandsmessungen ergibt für den 1.4L TVVH-CNG Motor einen Wert von **114 g/km CO₂** (Bild 4); dies entspricht einer Reduzierung der CO₂ Emissionen im Vergleich zum Referenzfahrzeug Golf V 2.0L FSI um etwa 39% bzw. um etwa 24% im Vergleich zu einem Golf V 2.0L TDI. 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. Eine ausführliche Darstellung der Messergebnisse ist im Abschlußbericht der Phase 1 wiedergegeben.

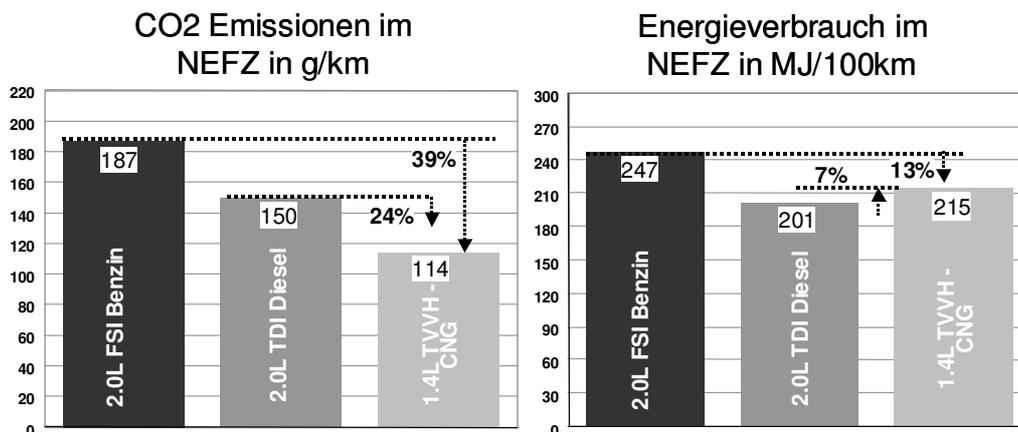


Bild 4: Ergebnis Fahrzeugsimulation Golf V im NEFZ

2. Zielsetzung Projektphase 2

Die Phase 2 des Gesamtvorhabens gliedert sich in 2 Aufgabenpakete:

- 1) Die in der ersten Projektphase identifizierten verfahrensspezifischen Fragestellungen sollen näher untersucht werden und die Technikkombination soll vollständiger bewertet werden.
- 2) Im Rahmen des Gesamtvorhabens soll ein Versuchsfahrzeug (Golf V) mit einem TVVH-CNG Motor ausgerüstet werden, um die motorischen Potentiale der Technikkombination aus den stationären Prüfstandsergebnissen der Phase 1 im transienten Fahrbetrieb des Versuchsfahrzeugs zu untermauern.

Zu 1): Verfahrensspezifische Untersuchungen

Zur vollständigen Bewertung des Konzepts werden in weiterführenden Prüfstands-Untersuchungen zunächst CNG-spezifische Fragestellungen und Anforderungen an das Motor- und Steuerungskonzept auf Basis der Ergebnisse und Erfahrungen der Projektphase 1 intensiver untersucht und bewertet:

Brenngeschwindigkeit/Gasqualität:

Die Vorteile/Potentiale des VVH Teilhubs auf die Brenngeschwindigkeit der CNG Verbrennung sollen im Hinblick auf Leerlauf und Niedrigstlast sowie unterschiedliche Gasqualität vertiefend untersucht werden.

Katalysator aufheizen:

Aufgrund der niedrigeren Abgastemperaturen der CNG-Verbrennung soll eine geeignete Strategie zum Katheizen untersucht werden.

Low-End-Torque/Anfahrmoment:

Im Bereich unterhalb von 1500 min⁻¹ 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 zu untersuchen und ggfs. geeignete Maßnahmen zur Anhebung des Low-End-Torque sind zu bewerten.

Motorsteuerung Funktionsentwicklung:

Zur Steuerung der beschriebenen neuartigen Technikkombination (TVVH-CNG) sind verfahrensspezifische Algorithmen zu entwickeln, um die verschiedenen Potentiale und Konzepte zur Nutzung der Potentiale zu untersuchen und um das Versuchsfahrzeug so kalibrieren zu können, dass das angestrebte Ziele einer CO₂ Reduzierung von 35-40% im NEDC erreicht werden kann.

Eine detaillierte Beschreibung der Vorgehensweise zu den oben genannten Untersuchungen befindet sich im Kapitel Arbeitsplan des vorliegenden Antrages.

In der hier beantragten Phase 2 wird ein zweiter Motor mit der TVVH-CNG Technologie ausgerüstet um die oben genannte weiterführende Untersuchungen zum Brennverfahren der Technikkombination durchführen zu können.

Zu 2): Applikation des Versuchsfahrzeugs

Parallel zu den oben beschriebenen Entwicklungsaufgaben wird ein Versuchsfahrzeug (Golf V) mit einem TVVH-CNG Motor ausgerüstet und einer Applikation unterzogen, mit der die auf dem Motorprüfstand nachgewiesenen Verbrauchs- und CO₂-Potentiale (siehe Bericht Phase 1) im Fahrzeug dargestellt werden können.

Im speziellen bedeutet das, die Potentiale im NEDC Rollentest und im realen Praxisverbrauch (Stadt, Land, Autobahn) mit dem Versuchsfahrzeug nachzuweisen.

Die Vorgehensweise lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- Verifikation der verfahrensspezifischen neuen Steuerungsalgorithmen und Anpassung an den transienten Motorbetrieb im Fahrzeug
- Ausführliche Bedatung des Motorsteuergerätes am Motorversuch zur Vorbereitung der Fahrzeugapplikation
- Kalibrierung der Fahrbarkeit unter Berücksichtigung der Verbrauchsvorteile
- Messfahrten mit dem Versuchsfahrzeug zum Nachweis der in Phase 2 anvisierten Ziele
- Rollenversuche NEDC, reale Fahrzyklen und Fahrdynamikmessungen
- Messfahrten mit dem Benchmark Fahrzeug Golf V 2.0 FSI

Das Versuchsfahrzeug steht am Ende des Projektes zur Vorführung im Interesse der DBU bereit. Ein Ziel dieses Vorhabens ist es, durch den Nachweis der Potentiale im Versuchsfahrzeug Automobilhersteller für die Umsetzung dieses Antriebskonzeptes zu gewinnen.

3 . Verfahrensspezifische Untersuchungen am Motorprüfstand

Brenngeschwindigkeit / Gasqualität

Die Messungen in Projektphase 1 haben gezeigt, dass ein reduzierter Einlassventilhub und daraus folgend eine hohe Einströmgeschwindigkeit in Verbindung mit einer Ventilmaskierung bei Niedriglast einen deutlichen Einfluss auf die Geschwindigkeit der CNG-Verbrennung und damit auf die Laufruhe hat.

Ziel dieser weiterführenden Untersuchungen ist die ausführliche Untersuchung des Einflusses der Parameter Einlassventilhub und Ventilmaskierung auf Brenngeschwindigkeit und Laufruhe bei Niedriglast

Anhand von Voruntersuchungen auf dem Strömungsprüfstand wurden zunächst Einlassventilmaskierungen mit Höhe 2mm, 3mm und 4mm hinsichtlich Tumbleströmung und Durchflusszahl in Abhängigkeit vom Ventilhub untersucht. Die unterschiedlichen Maskierungshöhen wurden durch auswechselbare Brennraumeinsätze mit in den Sitz integrierter Maskierung realisiert (**Bild 5**).

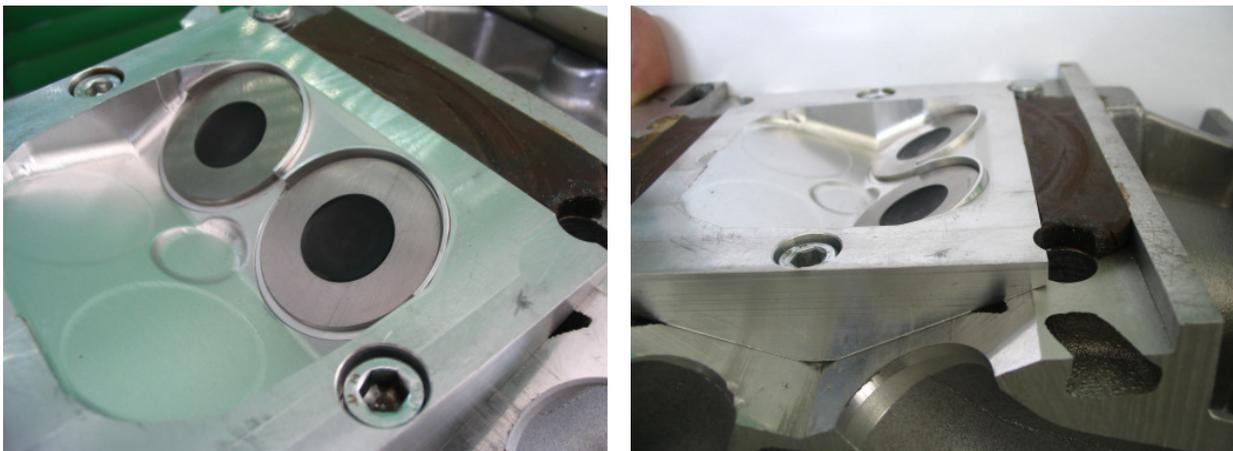


Bild 5: Auswechselbarer Brennraumeinsatz für Maskierungsuntersuchungen auf dem Strömungsprüfstand

Die Messergebnisse sind in **Bild 6** wiedergegeben. Mit zunehmender Maskierungshöhe ergibt sich eine erhebliche Steigerung der Tumblezahl. Das Tumblemaximum wird erwartungsgemäß bei einem Ventilhub im Bereich der Maskierungshöhe erreicht. Bei Vollhub liegt die Tumblezahl für alle Varianten etwa ähnlich, hier überwiegt der Einfluss der Einlasskanalgeometrie.

Mit zunehmender Maskierungshöhe reduziert sich die Durchflusszahl α_k , d.h. die Strömungsverluste steigen. Bei einem aufgeladenen Motor ist dies in Grenzen tolerierbar. Die Maskierung mit 3mm Höhe zeigt einen guten Kompromiss zwischen Tumble und Durchflussgüte und wird neben der bereits existierenden 2mm Maskierung ebenfalls für die Motoruntersuchungen gefertigt.

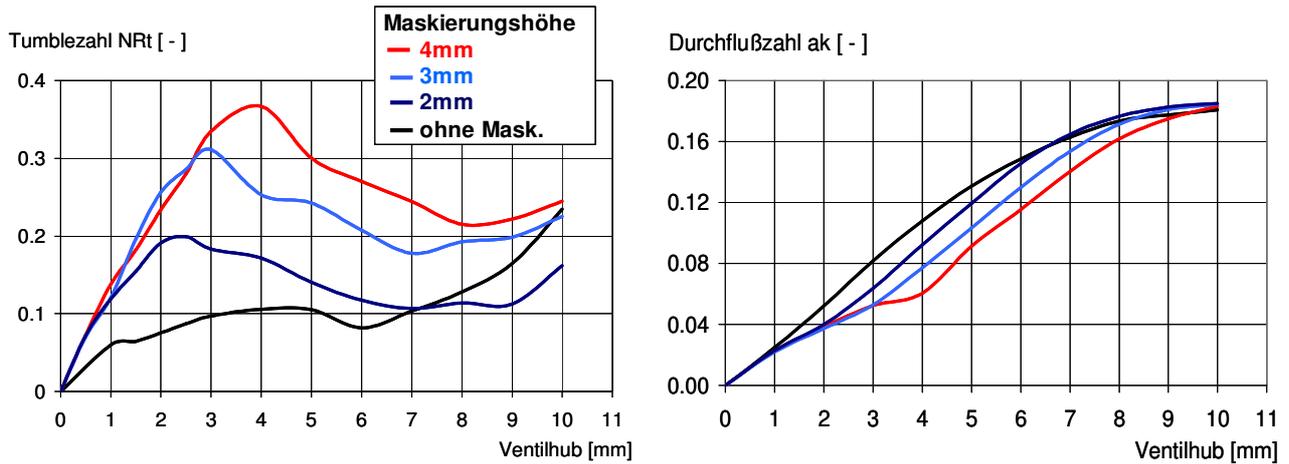


Bild 6: Messergebnisse Strömungsprüfstand Tumble und Durchfließzahl a_k , Variation Maskierungshöhe

Dabei ist zu berücksichtigen, dass die ursprünglich für den VVH Motor vorgesehene Maskierung mit 2mm Höhe schon beim Guß des Zylinderkopfs berücksichtigt wurde und somit für die Motorversuche uneingeschränkt geeignet ist (Bild 7), während die Variante mit 3mm Höhe durch nachträglichen Austausch des Ventilsitzes mit integrierter Maskierung realisiert wurde (Bild 8) und demnach nicht volllastfest ist.

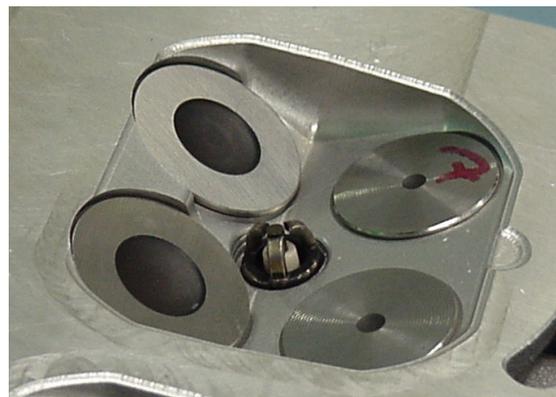


Bild 7: In den Brennraumguss integrierte Maskierung mit 2mm Höhe



Bild 8: Maskierung mit 3mm Höhe, in den Sitzring integriert (nicht volllastfest)

Auf dem Motorprüfstand wurden die Maskierungsvarianten mit 2mm und 3mm Höhe im Niedriglastbereich untersucht:

Lasten pme 1, 2 und 4bar, Drehzahlen 1000, 2000 und 4000 min⁻¹

Dabei wurde jeweils ausgehend vom gedrosselten Betrieb bei 7mm Einlassventilhub der Ventilhub auf 4, 3, 2 und 1mm (bzw. Minimalhub kleiner 1mm) reduziert mit jeweils gleichzeitiger Entdrosselung, um den Lastpunkt konstant zu halten. Der Zündzeitpunkt wurde jeweils verbrauchsoptimal eingestellt. Das verwendete Gas ist H-Gas.

Im folgenden ist eine Auswahl der Messergebnisse vom Motorprüfstand exemplarisch wiedergegeben:

Bild 9 zeigt den Zündzeitpunkt und den Heizverlauf in Abhängigkeit vom Ventilhub im Betriebspunkt 1000 min⁻¹, pme 2bar im Vergleich mit 2 und 3mm Maskierung. Es ergibt sich jeweils eine deutliche Verbrennungsbeschleunigung im Ventilhubbereich mit hohem Tumble. Aufgrund des insgesamt deutlich höheren Tumbelniveaus ist die Verbrennung mit der 3mm Maskierung im gesamten Ventilhubbereich erheblich schneller.

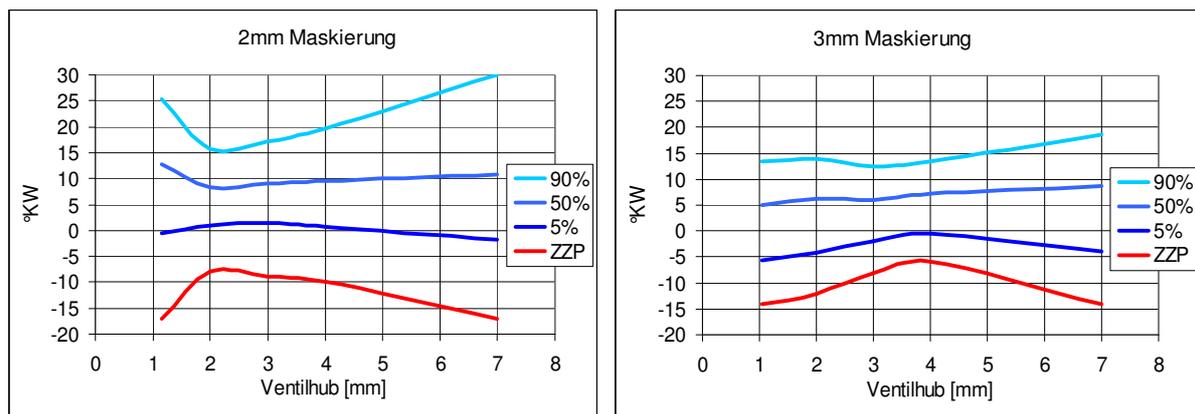


Bild 9: Zündzeitpunkt und Heizverlauf über Ventilhub, 1000 min⁻¹, pme 2bar

Dies spiegelt sich auch in der Laufruhe anhand der Werte der Standardabweichung vom indizierten Mitteldruck pmi wider (Bild 10). Im Bereich schneller Verbrennung hat die Standardabweichung vom Mitteldruck pmi ein Minimum, die Unterschiede unter den Zylindern werden geringer. Die stabile, schnelle Verbrennung mit der 3mm Maskierung wird durch eine Standardabweichung von pmi unter 3% für alle Zylinder im gesamten Ventilhubbereich deutlich. Mit steigendem Ventilhub muss der Saugrohrdruck reduziert werden, um den Lastpunkt gleich zu halten (Androsselung): Hub 1mm => komplett ungedrosselt, Hub 7mm => komplett angedrosselt (Bild 11). Mit steigender Androsselung erhöhen sich die Ladungswechselerluste, ab 4mm ist der Wert etwa konstant. Der Einfluss der Maskierungshöhe auf die Ladungswechselerluste ist gering.

Der Verbrauch biHD gibt den Einfluss nur der Verbrennung wieder: das Minimum liegt bei schneller Verbrennung (Bild 12). Der Verbrauch bi gibt den Einfluss von Verbrennung und Ladungswechsel wieder: das Minimum liegt beim besten Kompromiss aus schneller Verbrennung und geringer Ladungswechselerarbeit.

Der Verbrauch bei gibt zusätzlich den Einfluss der Reibung wieder, diese bleibt etwa konstant über Ventilhub => das Minimum liegt wie bei bi um 2-3mm Ventilhub.

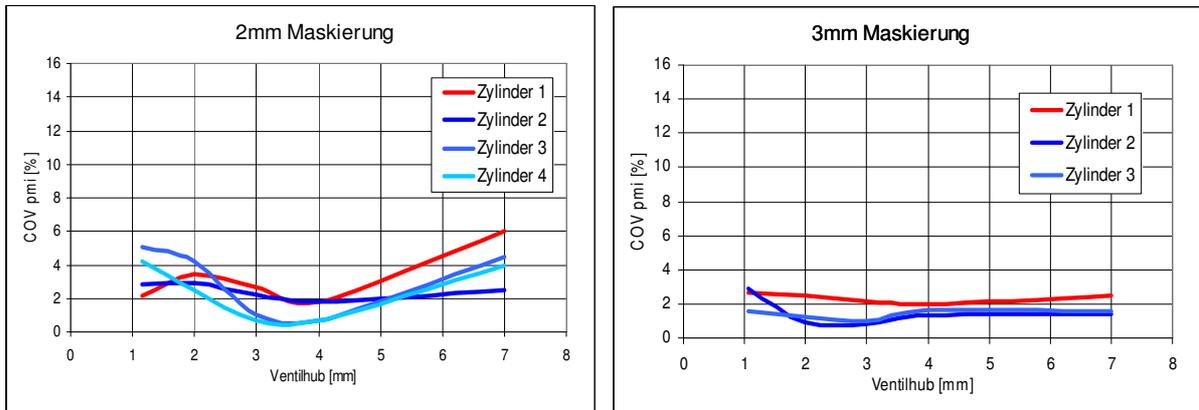


Bild 10: Laufruhe: Standardabweichung von pmi in %, 1000 min⁻¹, pme 2bar

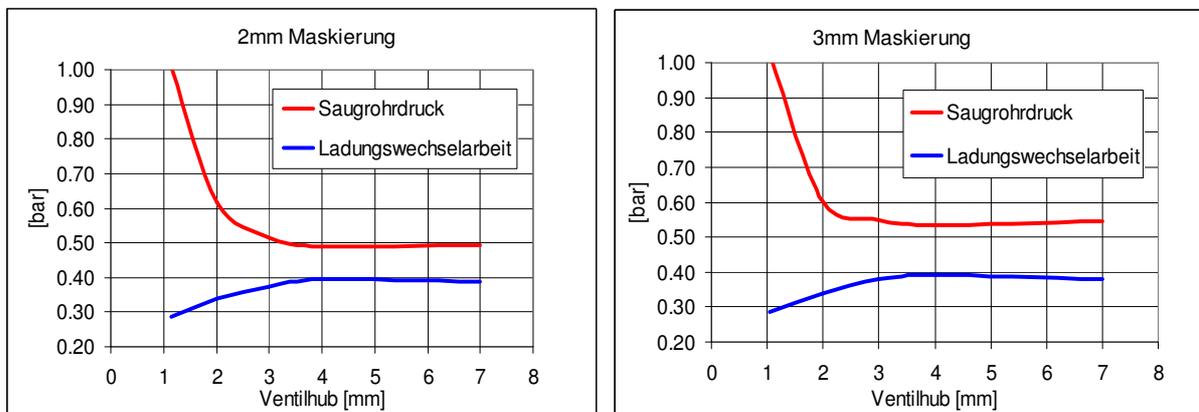


Bild 11: Saugrohrdruck und Ladungswechselerbeit in bar, 1000 min⁻¹, pme 2bar

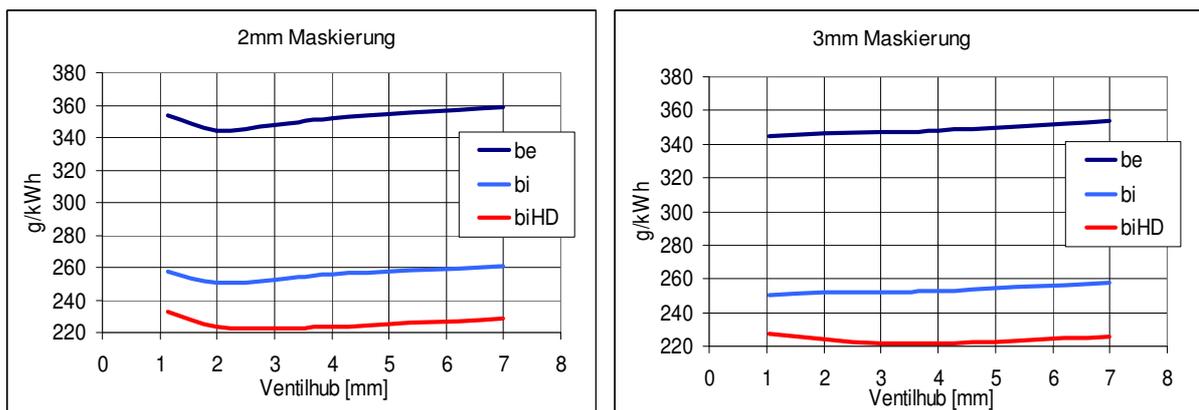


Bild 12: Spezifischer Verbrauch biHD, bi, be in g/kWh 1000 min⁻¹, pme 2bar

Auch im niedrigen Lastpunkt bei pme 1bar zeigt sich ein vergleichbares Verhalten der Brenngeschwindigkeit über Ventilhub. Aufgrund des insgesamt deutlich höheren Tumbelniveaus ist auch hier die Verbrennung mit der 3mm Maskierung im gesamten Ventilhubbereich erheblich schneller (Bild 13). Der völlig ungedrosselte Betrieb ist insbesondere mit der 2mm Maskierung ungünstig.

Das Niveau der Standardabweichung liegt mit der 3mm Maskierung insgesamt auch hier deutlich niedriger (Bild 14).

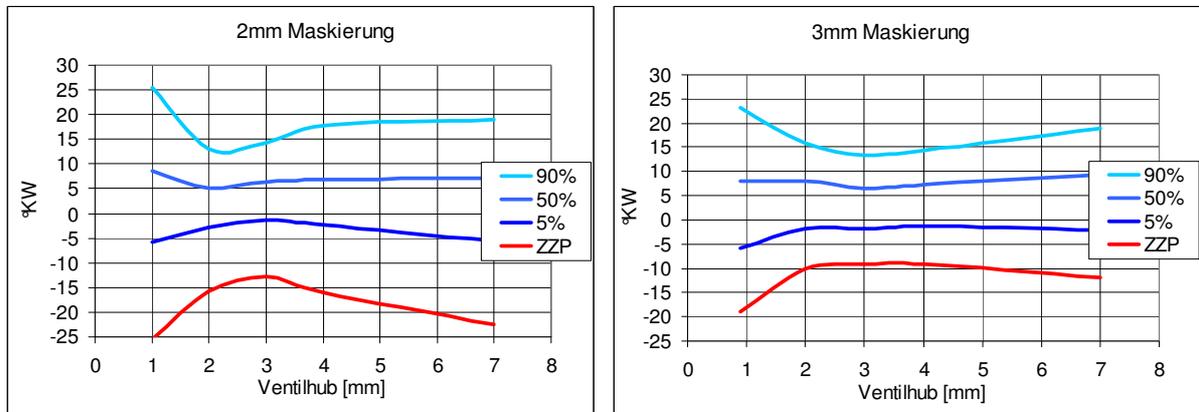


Bild 13: Zündzeitpunkt und Heizverlauf über Ventilhub, 1000 min⁻¹, pme 1bar

Die Ladungswechselperluste steigen bis 3mm an, danach bleiben sie etwa konstant (Bild 15).

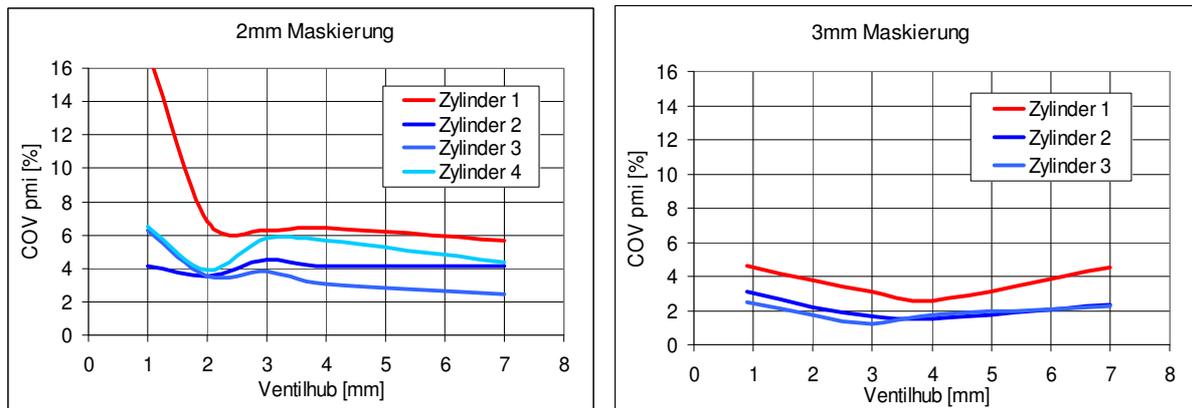


Bild 14: Laufruhe: Standardabweichung von pmi in %, 1000 min⁻¹, pme 1bar

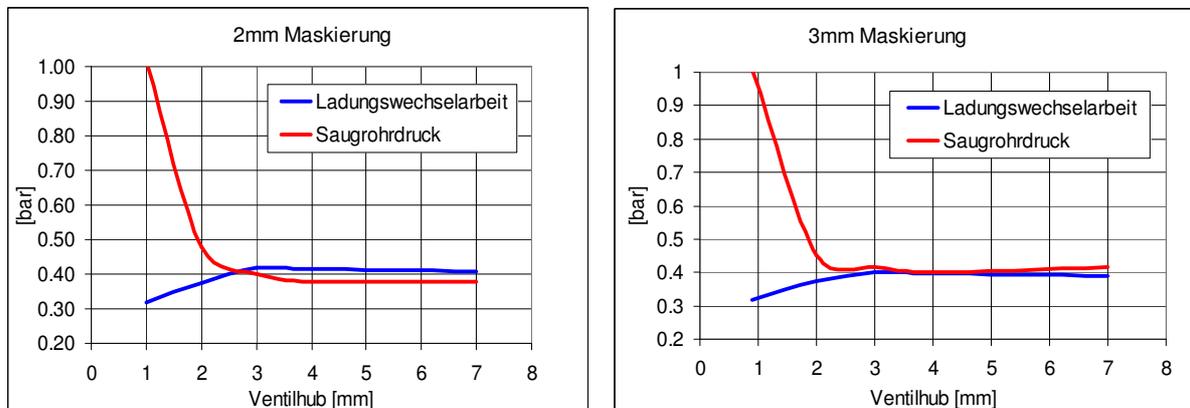


Bild 15: Saugrohrdruck und Ladungswechselerbeit in bar, 1000 min⁻¹, pme 1ba

Das Verbrauchsverhalten von biHD, bi und be verhält sich gleich wie im Lastpunkt 1000 min⁻¹, pme 2bar.

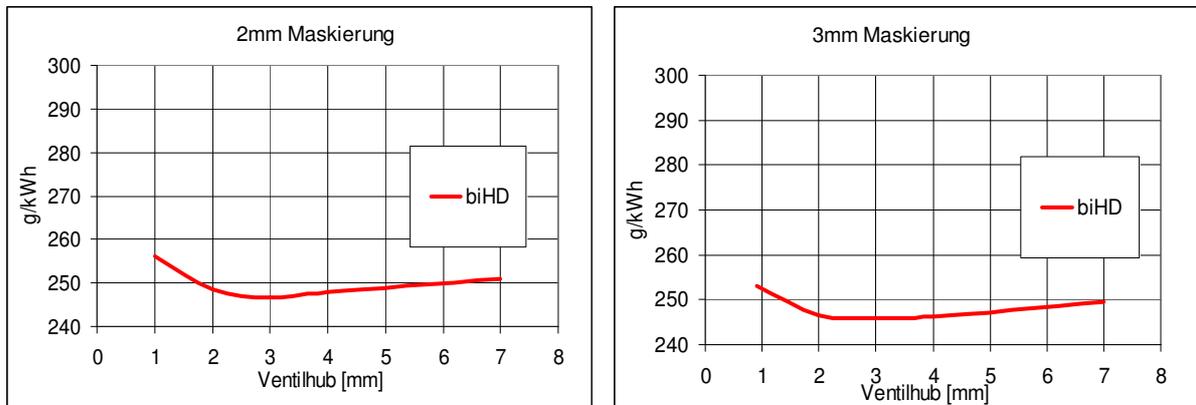


Bild 16: Spezifischer Verbrauch biHD, 1000 min⁻¹, pme 1bar

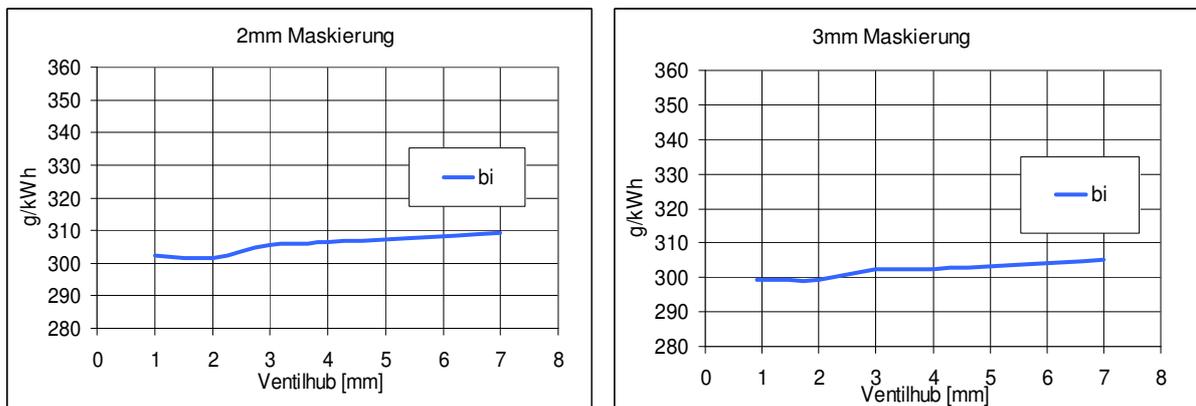


Bild 17: Spezifischer Verbrauch bi, 1000 min⁻¹, pme 1bar

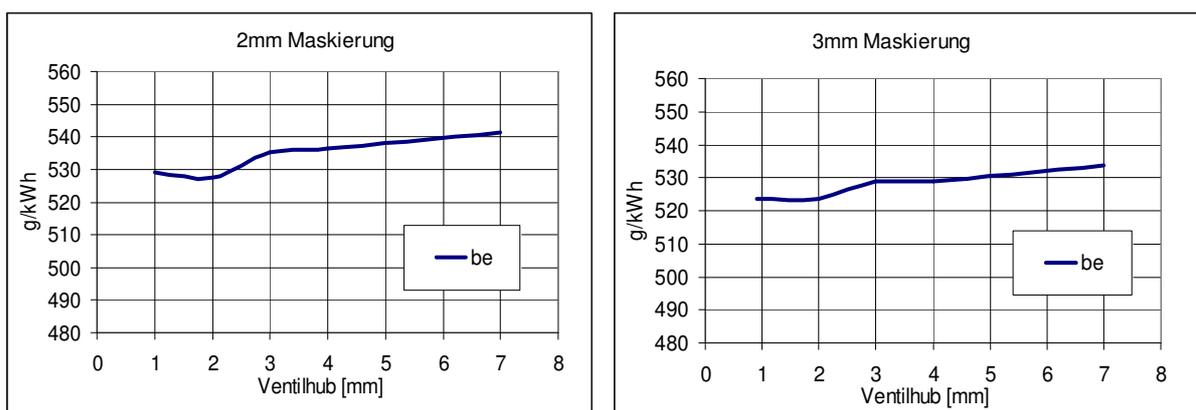


Bild 18: Spezifischer Verbrauch be, 1000 min⁻¹, pme 1bar

Variation der VVH-Nockenwellenvarianten

Die Ladungswechselverluste mit der bisher verwendeten Nockenwellenvariante 4 steigen schon bei kleinen Ventilhuben deutlich an und erreichen bei 3-4mm ihr Maximum. Ursache dafür ist der flache Verlauf der Hubfunktionen mit einem Einlass-Schließen im unteren Totpunkt schon bei Hüben um 3-4mm (Bild 19).

Zum Vergleich wird die Nockenwellenvariante 7 getestet, die einen deutlich steileren Verlauf auch bei kleinen Hüben hat. Das Einlass-Schließen liegt erst bei Hüben ab 5-6mm im unteren Totpunkt; damit sind deutlich geringere Ladungswechselverluste zu erwarten.

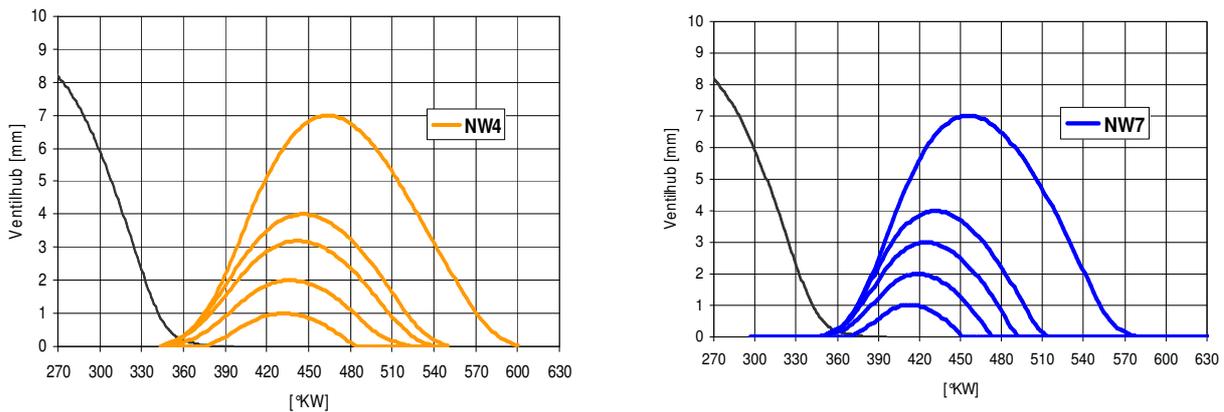


Bild 19: Vergleich Hubschar der Nockenwellenvarianten 4 und 7

Dies wird im Versuch im Lastpunkt 1000 min^{-1} , $p_{me} 2 \text{ bar}$ bestätigt. Im Vergleich Nockenwelle 4 zu 7 zeigt sich eine deutlich reduzierte Ladungswechselerbeit für Variante 7 insbesondere bei kleinen Ventilhuben (Bild 20).

Andererseits wird die Verbrennung mit Nockenwelle 7 bei kleinen Ventilhuben deutlich langsamer als mit Nockenwelle 4. Hier wirkt sich das frühe Einlass-Schließen negativ aus (Bild 21). Die längere Ansaugphase durch den kleineren Hub bei Nockenwelle 4 mit späterem Schließen bewirkt aufgrund der höheren Strömungsgeschwindigkeiten eine intensivere Gemischaufbereitung, d.h. die höhere Ladungswechselerbeit wird in die Gemischbildung „investiert“.

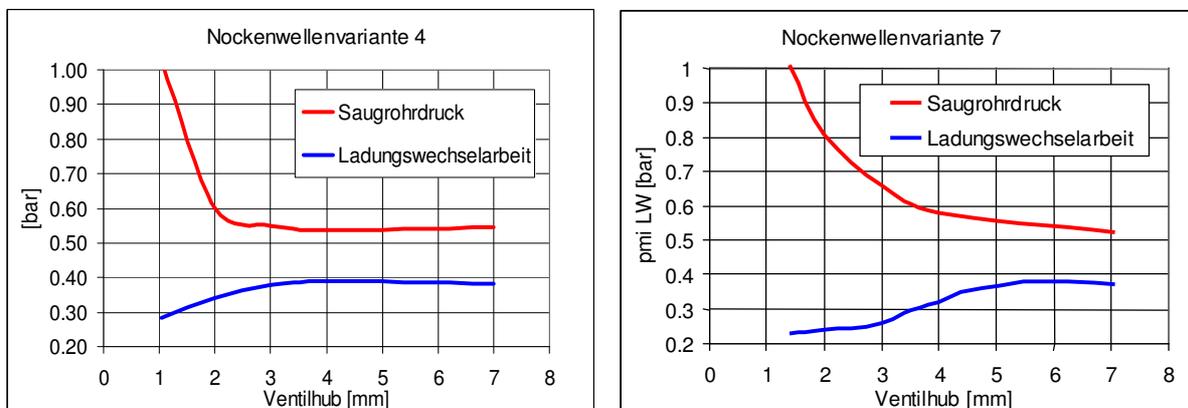


Bild 20: Saugrohrdruck und Ladungswechselerbeit in bar, 1000 min^{-1} , $p_{me} 2 \text{ bar}$

Vergleich Nockenwellenvariante 4 und 7

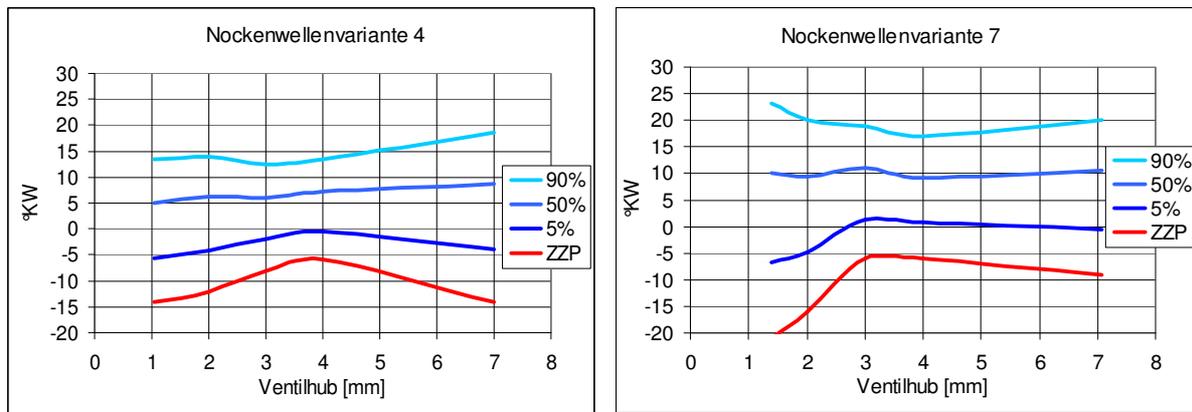


Bild 21: Zündzeitpunkt und Heizverlauf über Ventilhub, 1000 min⁻¹, p_{me} 2bar
Vergleich Nockenwellenvariante 4 und 7

Korrespondierend zur langsameren Brenngeschwindigkeit ist auch die Standardabweichung vom Mitteldruck p_{mi} mit Nockenwelle 7 bei kleinen Ventilhuben deutlich schlechter als bei Nockenwelle 4 (Bild 22).

Insgesamt ergibt sich für Nockenwelle 7 ein geringfügig geringerer Minimalverbrauch bei aufgrund der niedrigeren Ladungswechselverluste. Allerdings ist das Brennverhalten mit Nockenwelle 4 auch im kleinen Ventilhubbereich insgesamt deutlich stabiler, sodass diese für die weiteren Versuche eingesetzt wird.

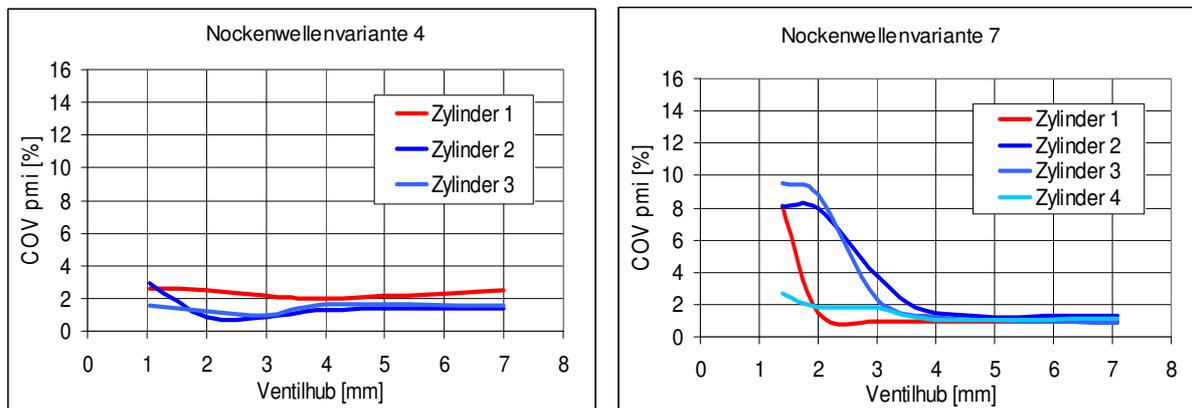


Bild 22: Laufruhe: Standardabweichung von p_{mi} in %, 1000 min⁻¹, p_{me} 2bar
Vergleich Nockenwellenvariante 4 und 7

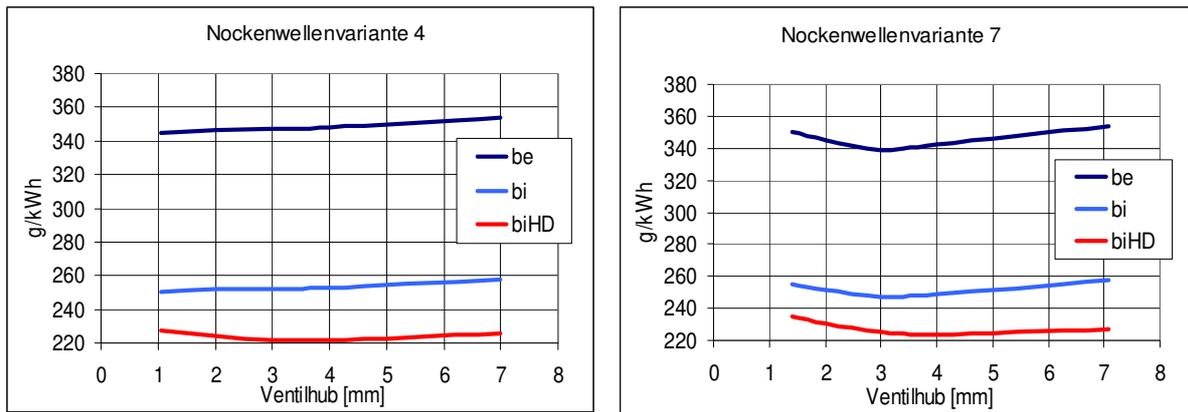


Bild 23: Spezifischer Verbrauch biHD, bi, be in g/kWh 1000 min⁻¹, pme 2bar
Vergleich Nockenwellenvariante 4 und 7

Einfluss unterschiedlicher Gasqualitäten

Um den Einfluss unterschiedlicher Gasqualitäten auf Brenngeschwindigkeit und Verbrauch zu untersuchen, wurde neben der schon in Projekt Phase 1 untersuchten L-Gas-Qualität auch eine Gasversion mit nur 70% Methananteil untersucht.

	H-Gas	L-Gas	70%-Gas
Heizwert	46.98	41.16	~30-33
Dichte	0.75	0.71	
Anteil Volumenprozent			
Methan	92.5	86.5	69.9
Ethan	3.1	2.7	
Propan	1.2	0.4	
Stickstoff	1.5	8.6	30.1

Bild 24: Daten der verschiedenen Gasqualitäten

Die Verbrennung mit 70%-Methan-Gas ist deutlich langsamer als mit H-Gas (Bild 25). Der spezifische Verbrauch steigt proportional zum geringeren Heizwert um etwa 30% an (Bild 26)

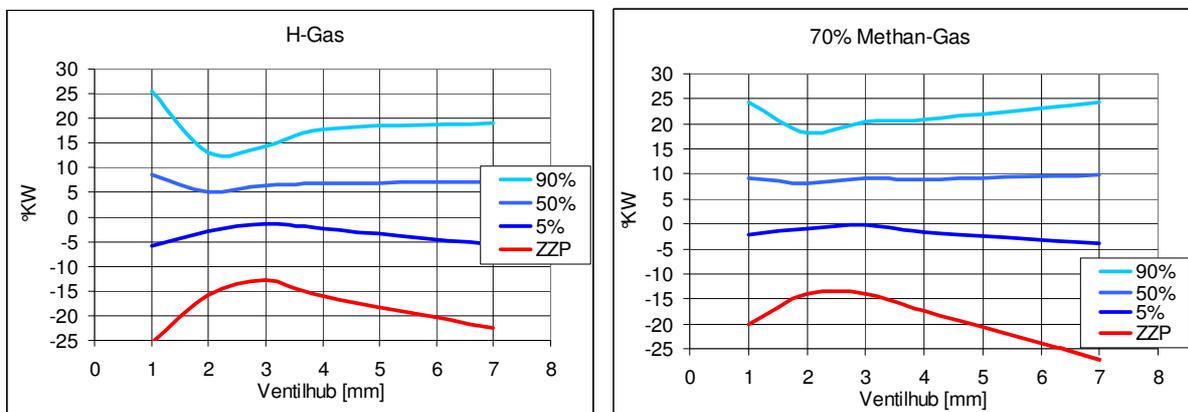


Bild 25: Zündzeitpunkt und Heizverlauf über Ventilhub, 1000 min⁻¹, pme 1bar

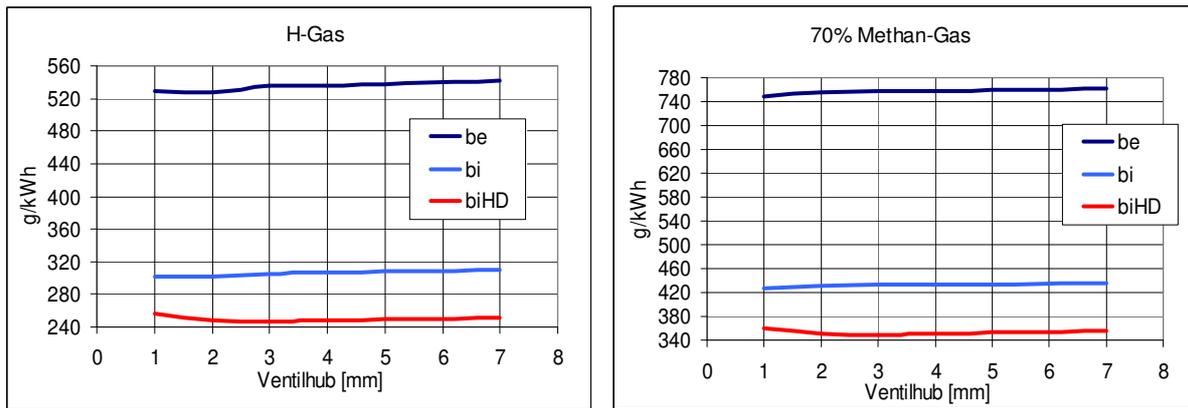


Bild 26: Laufruhe: Standardabweichung von pmi in %, 1000 min⁻¹, pme 1bar

Die Lambda-Gleichverteilung (Bild 27) über die Zylinder ist bei der Verbrennung des 70% Gases bei 2mm-Teilhub und 7mm-Hub vergleichbar, die Abweichungen liegen bei maximal 6%.

Für das H-Gas ergibt sich nur eine geringfügig bessere Lambda-Gleichverteilung, hier liegen die Abweichungen unter den Zylindern bei maximal 4% (Bild 28).

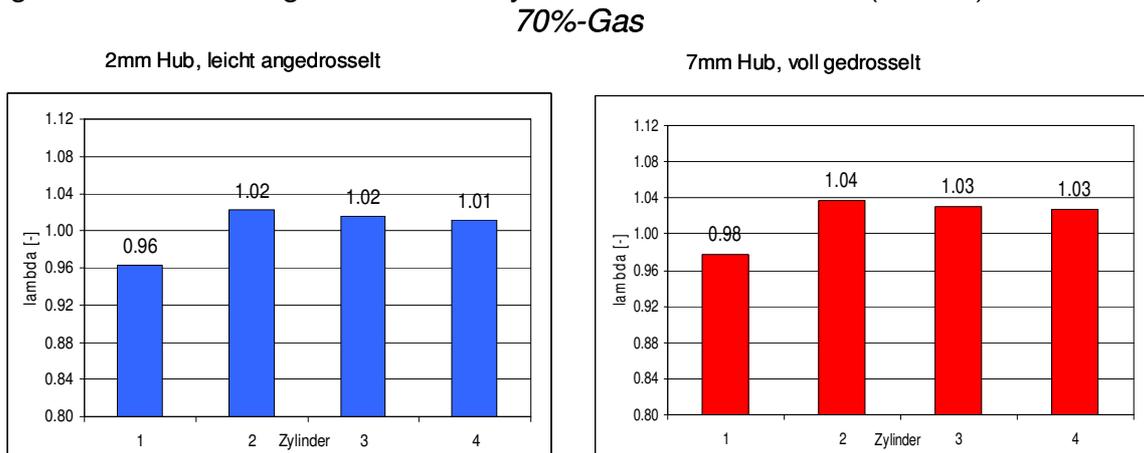


Bild 27: Lambda Gleichverteilung über die Zylinder, 1000 min⁻¹, pme 1bar
Vergleich verschiedene Ventilhube

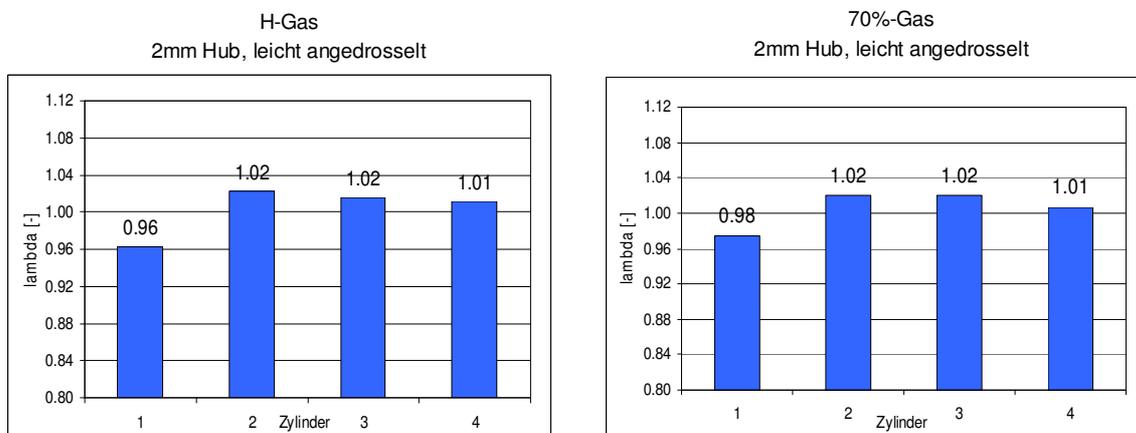


Bild 28: Lambda Gleichverteilung über die Zylinder, 1000 min⁻¹, pme 1bar
Vergleich unterschiedliche Gasqualitäten

Fazit Untersuchungen Brenngeschwindigkeit

Die Untersuchung des Einflusses der Parameter Einlassventilhub und Ventilmaskierung auf Brenngeschwindigkeit und Laufruhe bei Niedriglast lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die CNG Verbrennung wird bei kleinen Ventilhuben und Ventilmaskierung aufgrund hoher Einströmgeschwindigkeit und hohem Tumbelniveau erheblich beschleunigt.
- Mit der 3mm hohen Einlassventilmaskierung wird im gesamten Ventilhubbereich ein deutlich höheres Tumbelniveau erreicht als mit der 2mm Maskierung.
- Daraus ergibt sich für die 3mm Maskierung ein insgesamt deutlich stabileres und schnelleres Brennverhalten im Niedriglastbereich mit geringerer Standard-Abweichung des Mitteldrucks p_{mi} .
- Der günstigste, nur von der Verbrennung abhängige, spezifische Verbrauch b_{iHD} wird, korrespondierend zu der Brenngeschwindigkeit, im Ventilhubbereich zwischen 2 und 4mm erreicht.
- Da mit steigendem Ventilhub angedrosselt werden muss, um die Last gleich zu halten, steigen mit dem Ventilhub auch die Ladungswechselverluste. Das Minimum des effektiven spezifischen Verbrauchs b_i liegt beim besten Kompromiss aus schneller Verbrennung und geringer Ladungswechselarbeit.
- Eine VVH Nockenwellenvariante mit steilen Hubfunktionen und damit frühem Einlass-Schließen (Var 7) bewirkt eine deutliche Reduzierung der Ladungswechselverluste bei kleinen Ventilhuben gegenüber einer Variante mit flachen Hubfunktionen (Var 4).
- Die flache Nockenwellenvariante zeigt dagegen aufgrund der längeren Ansaugphase mit späterem Schließen und der höheren Strömungsgeschwindigkeiten eine intensivere Gemischaufbereitung, d.h. die höhere Ladungswechselarbeit wird in die Gemischbildung „investiert“.
- Im Hinblick auf die günstigeren Eigenschaften für Verbrennungsstabilisierung wird Nockenwellenvariante 4 für die weiteren Untersuchungen verwendet.
- Der Verbrauchseinfluss der schnelleren Verbrennung durch Maskierung und Tumble ist vergleichsweise gering. Allerdings wird die Laufruhe und die Verbrennungsstabilität erheblich besser. Die Maskierungsvariante 3mm liefert bessere Ergebnisse als die 2mm Variante. Für die weiteren Untersuchungen kann die 3mm Variante allerdings nicht weiter eingesetzt werden, da sie im Gegensatz zur 2mm Variante, die im Guss des Zylinderkopfs integriert ist, nachträglich für diese Tests in den Sitzring integriert wurde und damit nicht volllastfest ist.

Anfahrmoment

Ziel der nachfolgenden Untersuchungen ist es, die Möglichkeiten zur Umsetzung zusätzlicher Potentiale im Anfahrmoment aufzuzeigen.

Zunächst wird der Einfluss der Gasqualität auf das Vollastverhalten dargestellt. Anschließend wird zum Vergleich ein kleinerer Turbolader eingesetzt, um das Ansprechverhalten bei niedrigen Drehzahlen zu verbessern.

Vollast mit 70%-Gas

Der Vergleich der Vollastmessung mit H-Gas und mit 70%-Gas ist in Bild 29 wiedergegeben. Entsprechend dem geringeren Heizwert des 70%-Gases ergibt sich ein reduziertes Anfahrmoment als mit dem höherwertigen H-Gas. Das Low-End-Torque ist etwa 10% geringer, das maximale Drehmoment wird erst bei etwa 500 min^{-1} höherer Drehzahl erreicht.

Analog zum Verhalten bei Teillast ist auch bei Vollast der Verbrauch proportional zum geringeren Heizwert des 70%-Gases um ca. 30% höher.

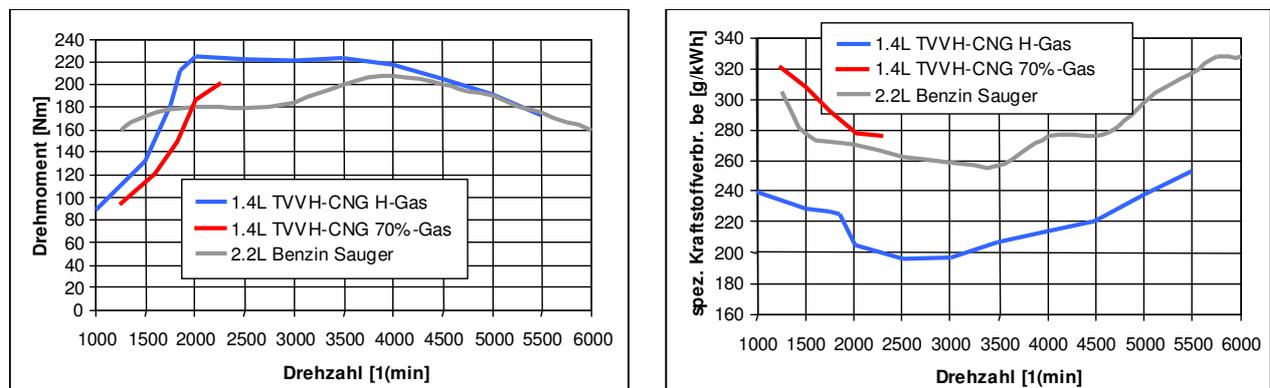


Bild 29: Drehmoment und Verbrauch, Vergleich Messung mit H- und 70%-Gas

Größe Abgasturbolader

Die Daten der untersuchten Turbolader ergeben sich wie folgt:

- bisheriger Turbolader: Garrett GT12 (Smart-Fahrzeug):
- Durchmesser Turbine 35.5mm, Durchmesser Verdichter 41mm
- alternativer Turbolader: MHI Mitsubishi TD02MR2:
- Durchmesser Turbine 28mm, Durchmesser Verdichter 35mm

Zusätzlich ist der kleinere Turbolader zweiflutig ausgelegt (Twin Scroll), d.h. die Abgaskanäle von Zylinder 1 und 4 sowie von Zylinder 2 und 3 sind jeweils zusammengeführt und werden in zwei getrennten Kanälen auf die Turbine geleitet. Auf diese

Weise werden die durch den Druckstoß bei Auslass-Öffnen induzierten Abgas-pulsationen gezielt zur Beschleunigung der Turbine bei niedrigen Drehzahlen genutzt.

Die Ergebnisse der Vermessung sind in den Bildern 30 und 31 dargestellt. Der kleine MHI Twin-Scroll Lader ermöglicht eine deutliche Steigerung des Low-End-Torques. Das maximale Drehmoment wird schon bei einer sehr niedrigen Drehzahl von 1450 min^{-1} statt bei etwa 2000 min^{-1} erreicht. Allerdings steigt der Vollastverbrauch schon ab 2000 min^{-1} deutlich über den Verbrauch mit dem größeren Turbolader.

Ursache dafür ist der stark ansteigende Abgasgegendruck mit dem kleinen Lader (Bild 31). Bei 1400 min^{-1} ergeben sich schon über 2.5bar vor Turbine, bei 2500 min^{-1} liegt der Gegendruck schon über 3.5 bar.

Im pV-Diagramm bei 2500 min^{-1} wird deutlich, dass das Ausschleichen der verbrannten Ladung auf dem Druckniveau von 3.5bar erfolgt, die Füllung mit Frischladung dagegen nur mit dem Ladedruck von etwa 2.4bar. Daraus ergibt sich im Gegensatz zum größeren Lader eine negative Ladungswechselschleife.

Der kleine MHI Lader ist demnach für diesen Motor deutlich zu klein.

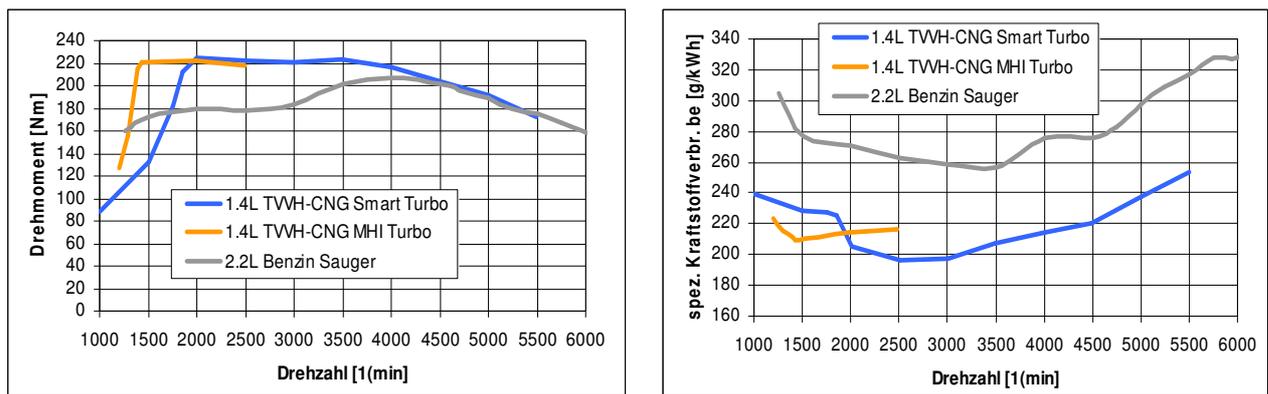


Bild. 30: Drehmoment und Verbrauch

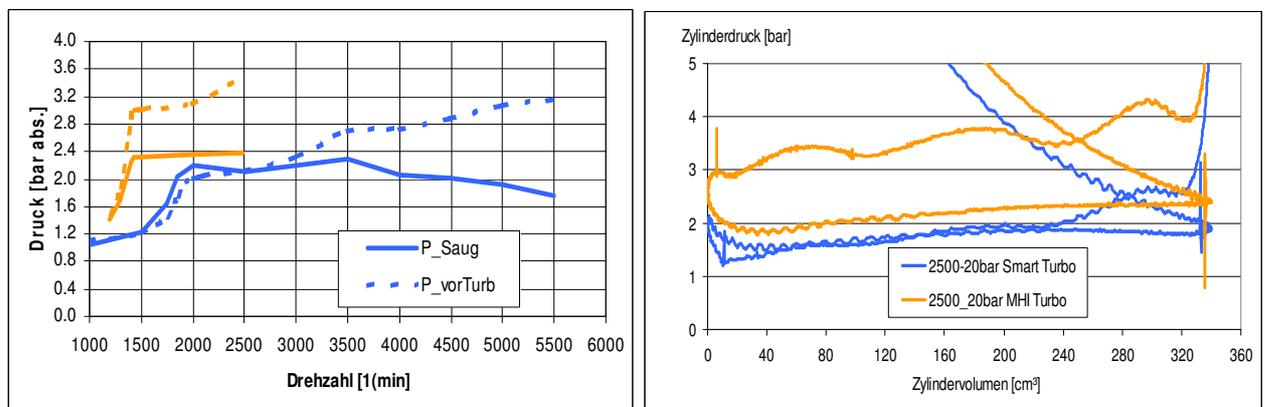


Bild 31: Drehmoment und Verbrauch

Zusammenfassung Untersuchungen zum Anfahrmoment

- Mit reduziertem Heizwert des Gases (geringerer Methananteil bei schlechterer Gasqualität) reduziert sich das Anfahrmoment erheblich.
- Mit dem kleineren MHI Twin-Scroll Lader kann eine deutliche Steigerung des Low-End-Torques erreicht werden.
- Allerdings steigt der Abgasgegendruck schon ab mittleren Drehzahlen sehr stark an, so dass sich hohe Ladungswechselperluste ergeben. Dies führt zu einem deutlich höheren Verbrauch ab mittleren Drehzahlen und mittleren Lasten.
- Der MHI Twin Scroll Lader ist für diesen Motor deutlich zu klein. Eine Recherche bzgl. weiterer Turbolader für Ottomotoren in geeigneter Größe zwischen dem Smart Lader und dem MHI Lader hat kein Ergebnis gebracht.
- Im Gegensatz zu den Dieselmotoren wird das Downsizing mit Aufladung für Ottomotoren in der Leistungsklasse um 100kW und darunter sowie im Hubraumbereich von 1.0 bis 1.4L erst in letzter Zeit bei den Neuentwicklungen berücksichtigt, so dass Turbolader von geeigneter Größe und Konfiguration (Twin-Scroll) erst zukünftig zu Verfügung stehen werden.

Katheizen / Spätzündung

Die Abgastemperaturen der CNG-Verbrennung sind niedriger als die der Benzin-Verbrennung. Zusätzlich benötigt die stabilere CNG-(Methan)-Verbindung eine höhere Temperatur für die Konvertierung im Katalysator.

Die beschleunigte Verbrennung mit VVH Teilhub bietet Potential für eine effektive Spätzündungsstrategie im leerlaufnahen Betrieb zur Erhöhung der Abgastemperatur und damit Beschleunigung des Katalysator-Aufheizens.

Ziel dieser weiterführenden Untersuchungen ist die Darstellung der Vorteile des entdrosselten Betriebs mit VVH-Teilhub und Ventilmaskierung im Vergleich zur konventionellen Drosselsteuerung mit Vollhub in Bezug auf Verbrennungsstabilität und damit auf die Möglichkeit zu deutlicher Spätzündung.

Es wurde im Betriebspunkt 1000 min^{-1} , $p_{me} 1 \text{ bar}$ eine ausführliche Zündzeitpunktvariation sowohl für 2mm Ventilhub mit geringer Androsselung als auch für 7mm mit vollständiger Drosselung eingefahren.

Die Haupt-Bewertungsgrößen sind die Temperatur des Abgases vor Katalysator, die Standardabweichung des Mitteldrucks p_{smpi} als Maß für Laufruhe sowie der spezifische Verbrauch.

Die Ergebnisse sind im folgenden exemplarisch wiedergegeben.
 Bei gleichem Zündzeitpunkt wird im gedrosselten Betrieb mit 7mm Hub eine höhere Abgastemperatur erreicht als mit 2mm VVH Teilhub und leichter Androsselung; dies liegt am schlechteren Wirkungsgrad des gedrosselten Betriebs (höhere indizierte Last pmi durch höhere Ladungswechselarbeit, langsamere Verbrennung, Bild 32).

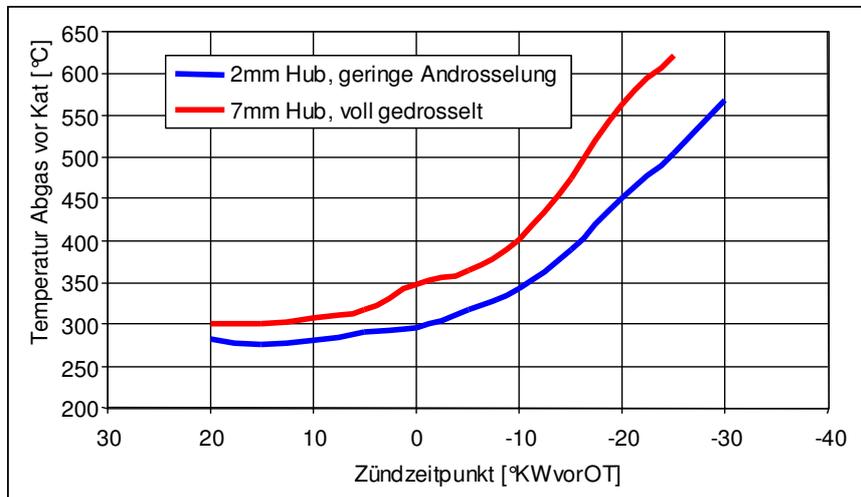


Bild 32: Temperatur Abgas vor Katalysator vs. Zündzeitpunkt, 1000 min⁻¹, pme 1bar

Die Laufruhe ist im gedrosselten 7mm-Hub-Betrieb deutlich schlechter (Bild 33). Die Laufruhegrenze wird schon bei einer Zündung 10°KW vor OT erreicht; im VVH-Teilhubbetrieb kann bis über 20°KW nach OT bei hinreichender Laufruhe gezündet werden.

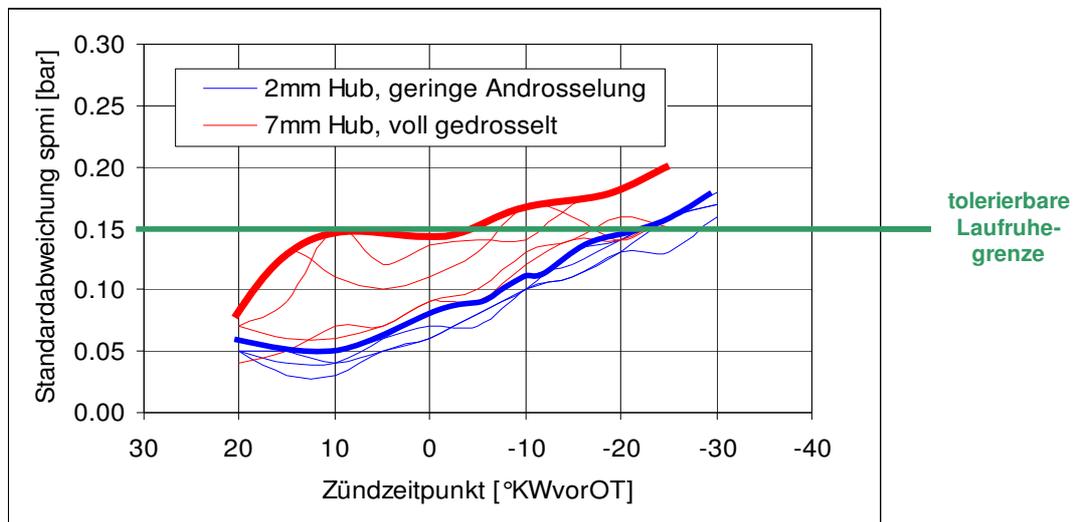


Bild 33: Standardabweichung spmi der 4 Zylinder sowie der Maximalverlauf (fett) über Zündzeitpunkt, 1000 min⁻¹, pme 1bar

Unter Berücksichtigung der Laufruhegrenze kann durch Spätzündung eine um 160°C höhere Abgastemperatur vor Katalysator im VVH-Teilhubbetrieb erreicht werden (Bild 34). Der günstigere Wirkungsgrad der Verbrennung mit 2mm Teilhub wird auch anhand des niedrigeren spezifischen Verbrauchs deutlich (Bild 35). Durch Einsatz einer 3mm Maskierung ließe sich das Potential zusätzlich erweitern.

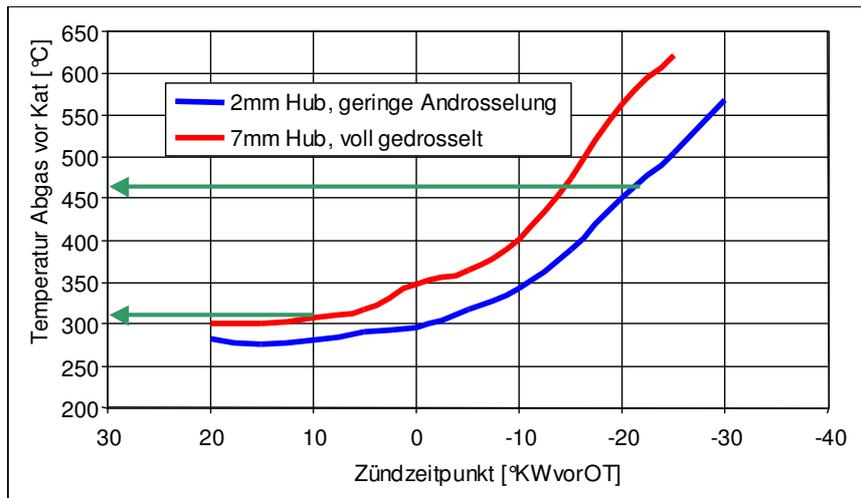


Bild 34: Temperatur Abgas vor Katalysator vs. Zündzeitpunkt, 1000 min⁻¹, pme 1bar

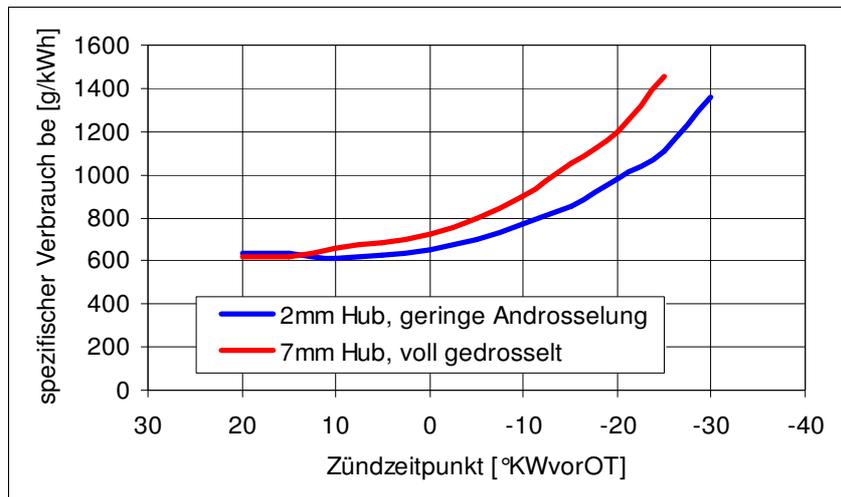


Bild 35: Spezifischer Verbrauch be über Zündzeitpunkt, 1000 min⁻¹, pme 1bar

Fazit Katheizen / Spätzündung

- Aufgrund des schlechteren Wirkungsgrads im gedrosselten Betrieb (höhere indizierte Last pmi durch höhere Ladungswechselarbeit, langsamere Verbrennung) ergibt sich unter gleichen Zündbedingungen eine höhere Abgastemperatur als im ungedrosselten Teilhubbetrieb.
- Aufgrund der stabileren Verbrennung bei Teilhub kann unter der Voraussetzung hinreichender Laufruhe der Zündzeitpunkt weiter nach spät gelegt werden als im Drosselbetrieb bei Vollhub.
- Damit kann im Kaltstart durch eine effektive Spätzündungsstrategie eine um etwa 160°C höhere Abgastemperatur vor Katalysator erzeugt werden; dies führt zu einem schnelleren Erreichen der Katalysator Light-Off Temperatur und bietet damit Potential zur Einhaltung der Abgasgrenzwerte im CNG Betrieb.

4. Applikation Versuchsfahrzeug

Steuerungshardware Fahrzeug

Die im Fahrzeug befindliche Steuerungshardware besteht im wesentlichen aus drei Komponenten:

1. Meta Motorsteuerung (MMS)
2. Meta VVH Steller
3. dSpace Micro Autobox

zu1) Die Meta Motorsteuerung dient dazu, alle motorseitigen Sensoren auszulesen und die motorseitigen Aktoren anzusteuern.

zu2) Der Meta VVH Steller, dient dazu, den Ventilhub mit Hilfe eines Elektromotors einzustellen und die Ist-Position, durch auslesen eines Ventilhubensors, zu erfassen.

zu 3) Die dSpace Micro Autobox beinhaltet die komplette Software zur Steuerung des Motors. Hierin finden sämtliche Zustandserfassungen und Kennfeldberechnungen statt, die für den motorischen Betrieb erforderlich sind.

Die Kommunikation zwischen den einzelnen Steuergeräten erfolgt über einen „privaten“ CAN-Bus, der separat von Fahrzeug-CAN-Bus aufgebaut ist. (siehe Bild)

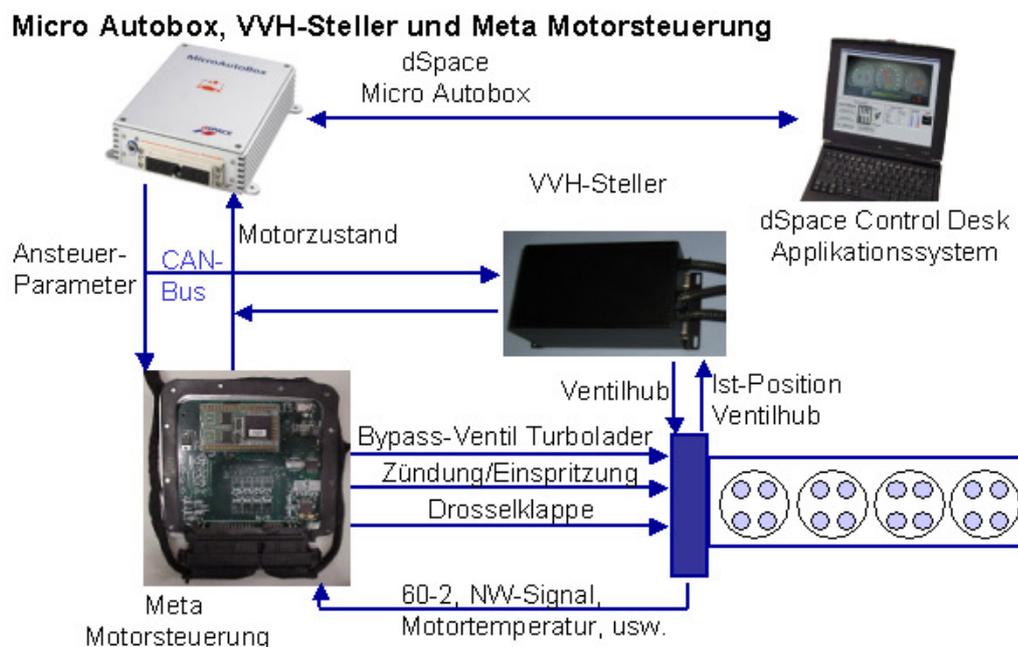


Bild 36: Struktur der Motorsteuerungshardware

Aufbau Motorsteuerungssoftwarestruktur in der dSpace Micro Autobox

Innerhalb der Micro Autobox läuft die gesamte Berechnungskette inklusiver aller Kennfelder ab, die für den motorischen Betrieb erforderlich sind.

Die Istwerte der Sensoren werden von der Meta Motorsteuerung über den CAN-Bus empfangen, danach konvertiert und mit Hilfe einer Zustandserkennung wird der aktuelle Betriebszustand der Motorsteuerung ermittelt.

Innerhalb der verschiedenen Zustände erfolgen Berechnungen, die letztlich wieder einen Sollwert für Ventilhub, Zündzeitpunkt, Einspritzdauer, Einspritzzeitpunkt usw. ergeben.

Diese Sollwerte werden sofort wieder an die Meta Motorsteuerung über den CAN-Bus übermittelt und dort in Ansteuersignale für die Stellglieder umgesetzt. Eine Übersicht der Funktionen ist in **Bild** dargestellt.

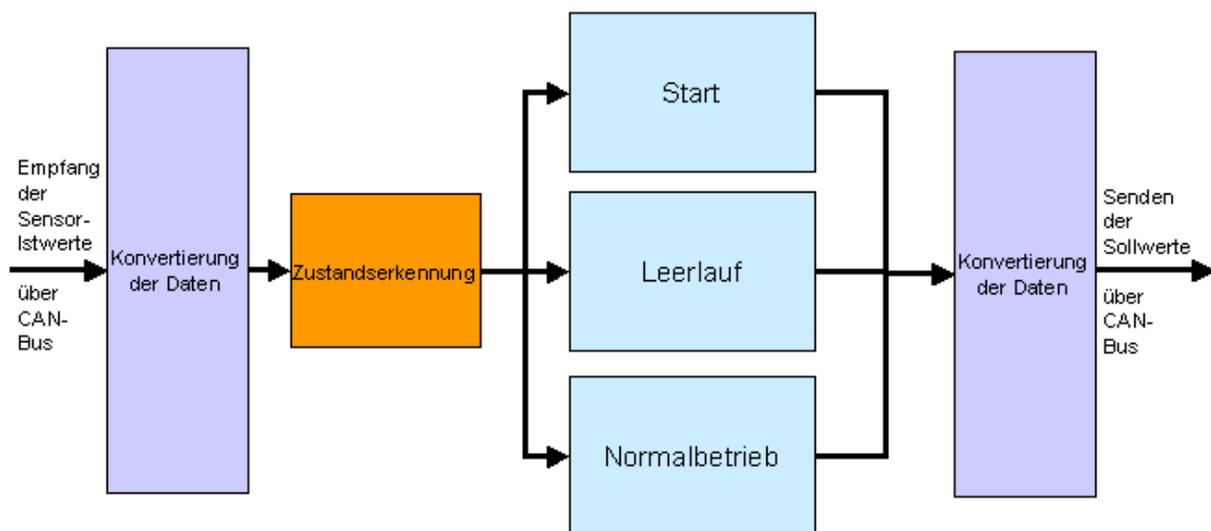


Bild 37 Aufbau der Softwarestruktur in der dSpace Micro Autobox

Stationäre Bedatung der Lasterfassung am Thermodynamik Prüfstand

Innerhalb der einzelnen Zustände der Steuerungssoftware ist es erforderlich, Kennfelder zu bedaten und Regler abzustimmen. Dies erfolgte am Thermodynamikprüfstand der Firma Meta.

Der wichtigste Bestandteil hierbei war die Bedatung der Kennfelder, die eine Lasterfassung für den Motor mit vollvariablen Ventiltrieb bewirken.

Im stationären Zustand, kann die Lasterfassung mit Hilfe eines HFM-Luftmassenmessers erfolgen.

Bei starken Laständerungen jedoch, ist es erforderlich, schneller auf eine Veränderung der Luftzufuhr reagieren zu können, als es der HFM zulässt. Aus diesem Grund erfolgt bei starken Lastwechseln, beziehungsweise beim einsetzen des Turboladers und somit Aufbau von Ladedruck, eine Lasterfassung über den eingestellten Ventilhub und den erfassten Druck im Saugrohr.

Hierzu mussten verschiedene Kennfelder am Thermodynamikprüfstand bedatet werden. Eine Übersicht der Kennfelder ist in **Bild** dargestellt.

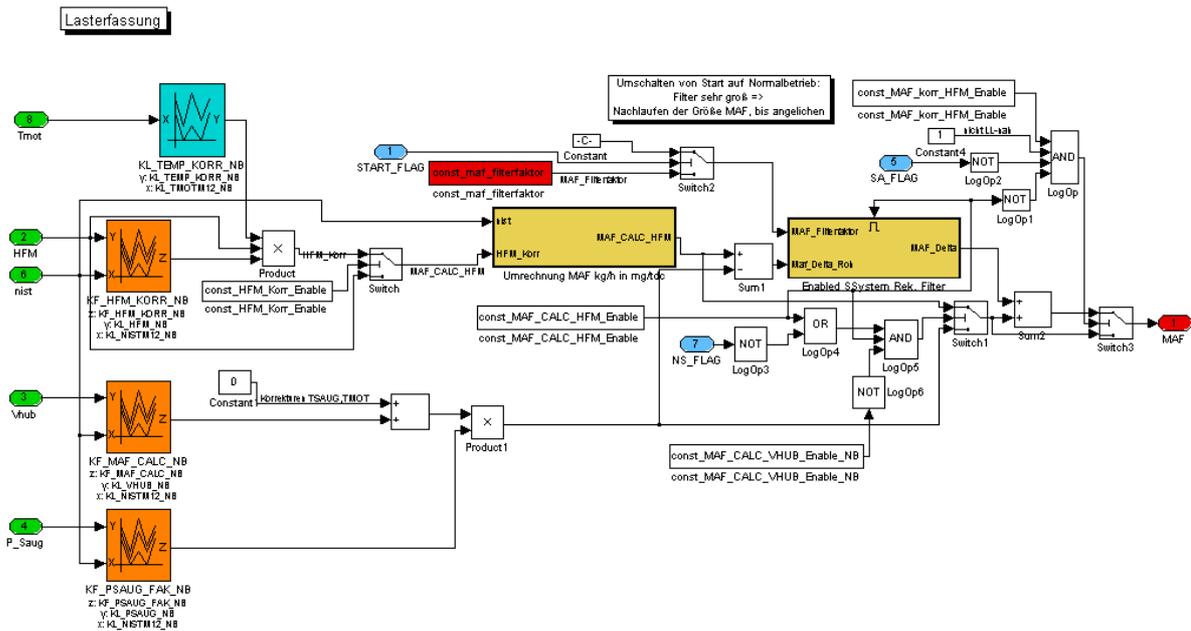


Bild 38 Aufbau der Lasterfassung im Normalbetrieb

Des Weiteren wurden der Lambda- und der Leerlaufregler abgestimmt, die Umsetzung des Fahrerwunsches bedatet und der Warmlauf integriert.

Applikation des Startverhaltens am Thermodynamikprüfstand

Um später im Fahrzeug ein gutes Startverhalten zu erreichen, wurden Starttest durchgeführt, in deren Verlauf ein gutes Startverhalten am Prüfstand bei ca. 20° Celsius erreicht wurde.

Dazu wurden alle startrelevanten Kenfelder bedatet. (siehe Bild 39)

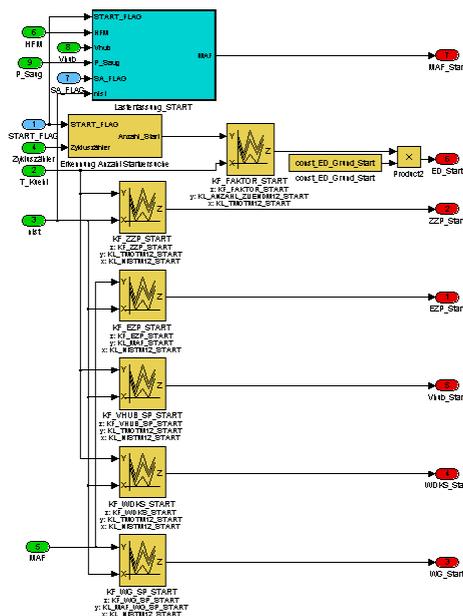


Bild 39 Kenfelder im Startzustand

Applikation der Lasterfassung auf dem Rollenprüfstand

Nach Demontage des Motors vom Thermodynamikprüfstand und Integration in das Fahrzeug, muss die Applikation des Systems in einigen Punkten überarbeitet werden, da im Fahrzeug einige Einbaupositionen und Reibwiderstände (z.B. durch Anschluss des Getriebes an den Motor) verändert sind. Da auch die Luftführung des Ansaugsystems sich im Vergleich zum Thermodynamikaufbau verändert hat, muss die Lasterfassung im Fahrzeug überprüft und gegebenenfalls überarbeitet werden. Diese Änderungen erfordern einen konstanten Fahrzustand, damit die Kennfelder in stationären Punkten angepasst werden können. Am besten ist dies auf einem Rollenprüfstand zu erreichen. Dort wird mit Hilfe einer elektronischen Bremse und Schwungmassen das Fahrzeug während der Fahrt in einen konstanten Lastpunkt eingebremst. Somit können die in Kapitel 0 beschriebenen Kennfelder ähnlich wie am Prüfstand bedatet werden.

Applikation des Lambdareglers auf dem Rollenprüfstand

Aufgrund der Tatsache, dass sich das Saugsystem und das Abgassystem aufgrund der Packagesituation im Fahrzeug, im Vergleich zum Thermodynamik-Prüfstand verändert hat, muss neben der Applikation der Lasterfassung ebenfalls der Lambdaregler neu angepasst und bedatet werden. Dies wurde ebenfalls in stationären Punkten am Rollenprüfstand durchgeführt.

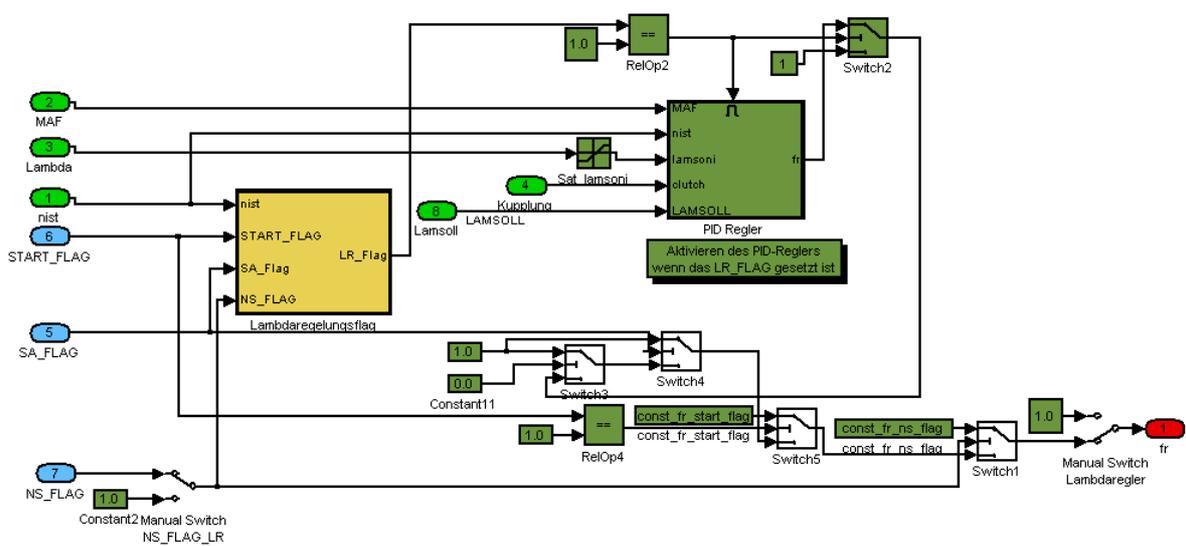


Bild 40: Lambdaregler

Applikation der Fahrbarkeit im Straßentest

Um eine gute Fahrbarkeit des Fahrzeugs im Straßenverkehr zu erreichen, wurden Applikationsfahrten durchgeführt und diverse Verkehrssituationen erfahren. Dazu gehörten Stadtfahrten, Landstraßenfahrten und Autobahnfahrten, sowie spezielle Fahrtsituationen, wie zum Beispiel Anfahren, und Lastsprünge.

Während diesen Messfahrten wurden die Ein- und Ausgangsgrößen der Motorsteuerung erfasst und Regler und Filter für diese Größen bearbeitet und abgestimmt, um ein akzeptables Fahrverhalten zu erzielen.

Applikation der Regler für Drosselklappe und Ventilhub

Im Zuge der unter Kapitel 0 beschriebenen Fahrbarkeitsapplikation wurden unter anderem auch die Regler für die Drosselklappe und der Regler für die Einstellung des gewünschten Ventilhubes überarbeitet und bedatet. Dazu wurden spezielle Fahrsituationen durchfahren.

Applikation von Lastsprüngen

Um eine hinreichende Antwortzeit auf Lastsprünge zu erreichen wurden diverse Lastsprünge im Fahrbetrieb erfahren und dann Regler und Filter so eingerichtet und bedatet, dass sich während der Lastsprünge für den Fahrer ein angenehmes Fahrverhalten einstellt.

Applikation Lambdaregler und Einspritzmengenberechnung im transienten Verhalten

Zur Applikation des Lambdareglers und der Einspritzmengenberechnung während des transienten Verhaltens wurden verschiedene Lastsprünge über Pedalwert vorgegeben und entsprechend zum gemessenen Lambdawert, welcher in der Motorsteuerung aufgezeichnet wurde, der Lambdaregler angepasst, bis die Abweichung des Lambdawertes innerhalb einer akzeptablen Toleranz lag. Die gesamte Prozedur wurde bei verschiedenen Drehzahlen durchgeführt, so dass das gesamte Drehzahlband der Kennfelder abgedeckt wurde.

5. Messergebnisse Versuchsfahrzeug

Fahrzeug Rollentest NEDC

Mit dem Versuchsfahrzeug Golf V mit TVVH CNG Motor wurden NEDC-Messungen auf der Fahrzeugrolle beim TÜV durchgeführt. Es wurden 3 Messungen hintereinander durchgeführt, jeweils mit Warmstart.

Folgende CO₂-Emissionen wurden in den Tests mit Warmstart gemessen:

Messung 1: 104.2 g/km

Messung 2: 102.8 g/km

Messung 3: 102.1 g/km

Um die CO₂ Emissionen im Kaltstart zu bestimmen, wird der übliche Umrechnungsfaktor für Kaltstart von 1.065 verwendet.

Da aufgrund des begrenzten Applikationsaufwands in dieser Projektphase die unverbrannten Kohlenwasserstoffe im Abgas höher sind als der Grenzwert von Euro IV, müssen in der CO₂ Bestimmung auch diese berücksichtigt werden. Entsprechend der Bruttoumsatzgleichung wurde deshalb ermittelt, wieviel CO₂ aus den unverbrannten Kohlenwasserstoffen bei der Verbrennung entstehen.

Insgesamt ergeben sich damit folgende CO₂-Emissionen im NEDC Rollentest

Messung 1: 115.9 g/km

Messung 2: 113.6 g/km

Messung 3: 112.8 g/km

Damit liegen die tatsächlich im Fahrzeug gemessene CO₂-Emissionen auf exakt dem sehr niedrigen Niveau, welches anhand von Fahrzeugsimulationsrechnungen auf Basis der stationären Prüfstandmessungen der Projekt-Phase 1 prognostiziert wurde.

Verbrauch im realen Straßentest

Neben den Messungen auf dem Fahrzeugrollenprüfstand wurden auch Verbrauchs- und damit CO₂-Messungen im Fahrzeugbetrieb auf öffentlichen Straßen unter realen Bedingungen (Verkehrsdichte, Ampeln, etc.) durchgeführt.

Zu diesem Zweck wurden ein Landstraßen-, ein Stadtzyklus jeweils zweimal gefahren ein Autobahnzyklus einmal und die Verbrauchswerte bestimmt. Bild 41 zeigt die verschiedenen Zyklen und die gemessenen Gasverbräuche. Es wurde jeweils eine sparsame Fahrweise mit frühem Hochschalten durchgeführt, ohne jedoch langsamer als der allgemeine Verkehr zu fahren. Auf freier Strecke wurde die Richtgeschwindigkeit eingehalten. Im Landstraßen- und Autobahnzyklus ergeben sich mit 4.1 bzw. 4.4kg sehr niedrige Verbräuche, der Stadtbetrieb liegt mit 7.7 kg erwartungsgemäß auf einem höheren Niveau. Im 1/3-Mix ergibt sich ein Verbrauch von 5.4 kg. Bei einem durchschnittlichen Gaspreis von z.Zt. 0.95 € sind die

Kraftstoffkosten damit mit 5.1 € pro 100km aufgrund des geringen Verbrauchs sowie des günstigen Gaspreises sehr niedrig.

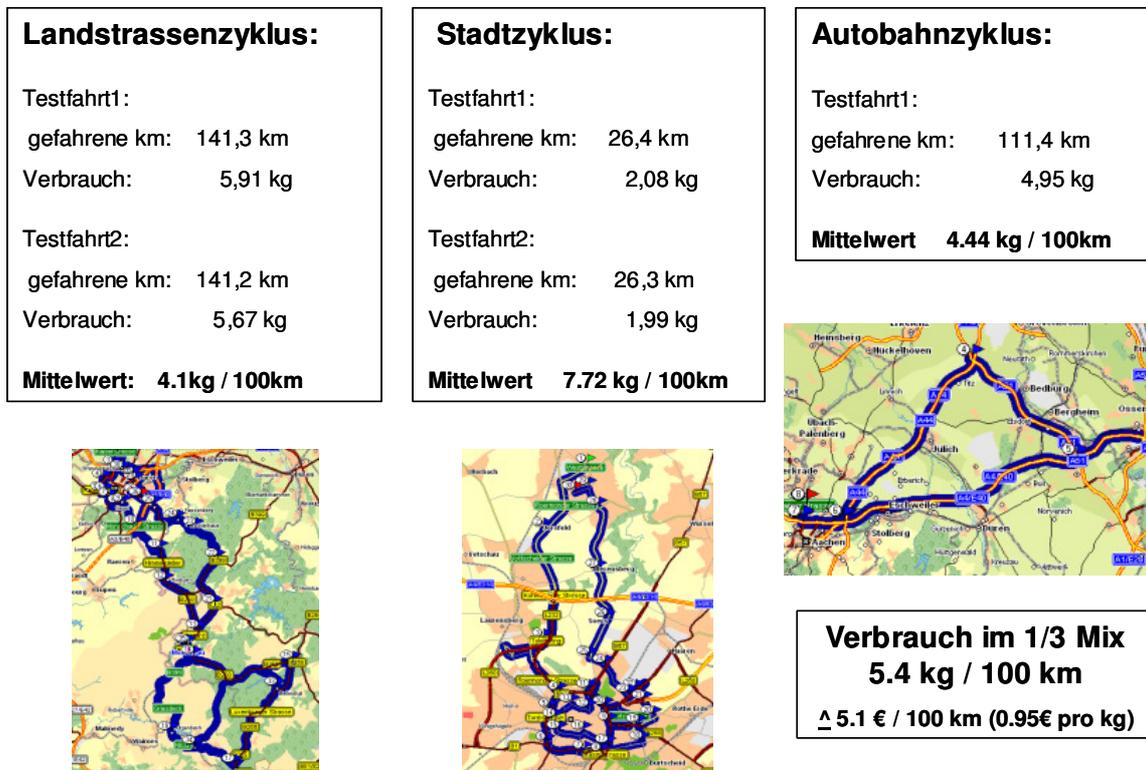


Bild 41: Reale Straßenzyklen und gemessene Gasverbräuche

5.3 Fahrleistung

Zur Bewertung der Fahrleistungen wurde neben den Standardwerten wie Beschleunigung, Durchzug und Höchstgeschwindigkeit auch der sogenannte Performance Feel Index (PFI) bestimmt. Dieser Wert wurde von der Volkswagen AG definiert, um das subjektive Empfinden des Fahrers über die Durchzugsfähigkeit bzw. „Souveränität“ der Fahrzeugmotorisierung zu bewerten. Er wird aus den maximalen Beschleunigungen in jedem Gang ermittelt.

Als Höchstgeschwindigkeit wurden 198 km/h ermittelt. Dieser Wert korrespondiert gut mit der auf dem Motorprüfstand ermittelten Nennleistung von 100kW.

Die Durchzugswerte in den Gängen 4, 5 und 6 sind in Bild 42 dargestellt. Beschleunigungszeiten von z.B. 12.2 s von 80 auf 120 km/h im (lang übersetzten) größten Gang sind für ein Fahrzeug dieser Leistungsklasse ein guter Wert. Die Messungen und die Formel zur zur Bestimmung des Performance Feel Index sind in Bild 43 dargestellt. Es ergibt sich ein PFI von 2.28.

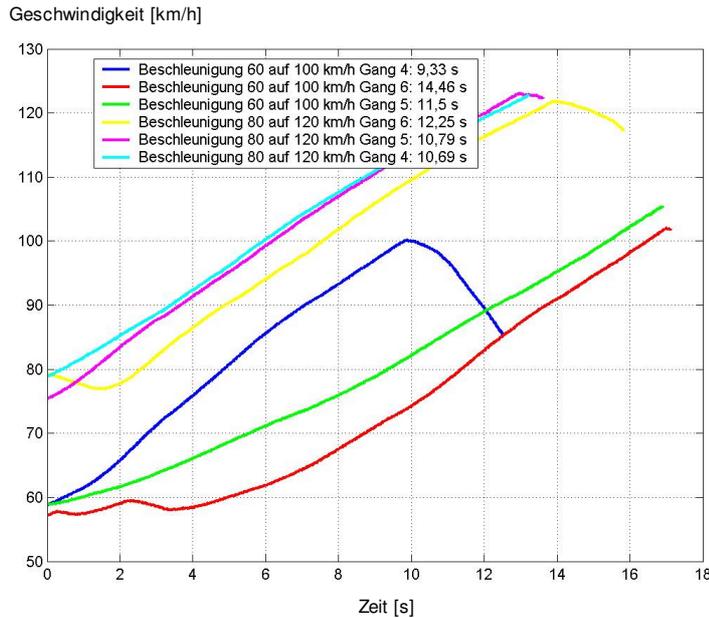


Bild 42: Durchzugswerte des Versuchsfahrzeugs im 4., 5. und 6. Gang

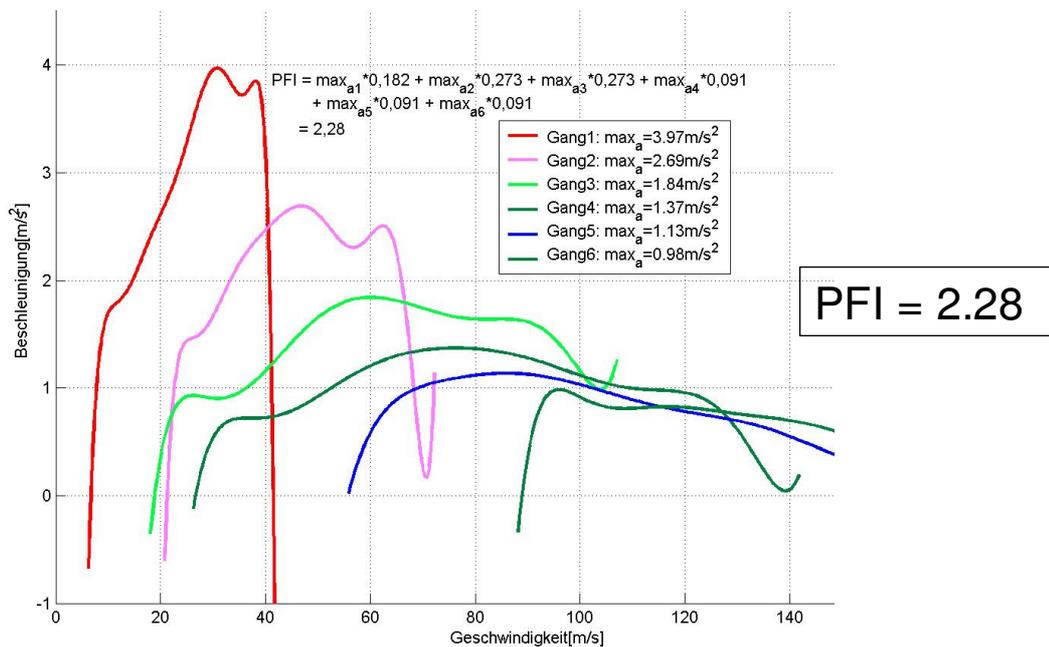


Bild 43: Gemessene Beschleunigung in jedem Gang zur Bestimmung des Performance Feel Index

Im Vergleich verschiedener Motorisierungen liegt der TVVH CNG Motor damit bei einem guten Wert (Bild 44). Der positive, durchzugsstarke Fahreindruck bestätigt dies.

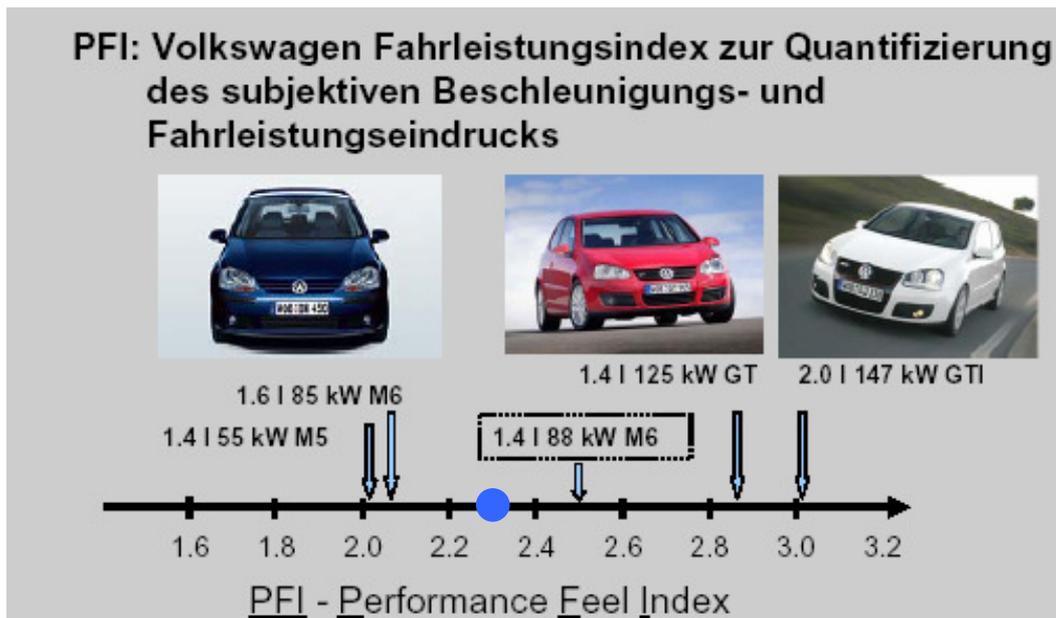


Bild 44: Performance Feel Index für verschiedene Motorisierungen

Weiterführende Applikationsarbeiten (Nachbewilligung)

Zielsetzung Weiterführende Applikationsarbeiten

Mit dem bisherigen Projektumfang konnten die Potenziale des Antriebskonzeptes auf dem Motorprüfstand und im Fahrzeug nachgewiesen werden.

Bei Fahrversuchen auf dem Rollenprüfstand und bei Messungen im realen Strassenverkehr wurde ein beachtlich niedriger Verbrauch von 114 g/km CO₂ (in der Golf-Klasse) erreicht.

Die Abstimmung des Fahrzeugs hat einen Stand, mit dem ein guter und sicherer Fahrzeugbetrieb für Messfahrten auf dem Rollenprüfstand und im realen Strassenverkehr durchgeführt werden kann.

Durch eine weiterführende Applikation sollen die guten Ergebnisse weiter verbessert werden. Insbesondere soll der Kompromiss zwischen Fahrverhalten und Verbrauchs- bzw. Emissionsverhalten des Fahrzeugs weiter verbessert werden.

6.2 Startverhalten

Zielsetzung: Reproduzierbarkeit des Startverhaltens und Verbesserung des Warmlaufs

Methan zündet im Gegensatz zu Benzin schlechter. In der Vollast gibt es einen deutlichen Vorteil auf Grund einer besseren Klopfestigkeit. Beim Motorstart, insbesondere bei niedrigen Temperaturen, stellt sich die geringe Zündwilligkeit von Erdgas als Nachteil dar.

Um im Fahrzeug ein gutes Startverhalten zu erreichen, wurden Versuche über mehrere Wochen bei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt, in deren Verlauf sich ein gutes Startverhalten einstellte. Motorische Kenngrößen wie der Zündzeitpunkt, die Einspritzmenge oder der Ventilhub im Start wurden hierbei in Kennfeldern optimiert und bedatet.

Das Fahrzeug startet bis ca. 5°C zuverlässig. Starttests bei noch niedrigeren Temperaturen werden über dieses Programm hinaus im Winter durchgeführt.

Startrampe CNG bei 300 1/min = 400ms Dauer Zyklus
alle 100ms eine Einspritzung

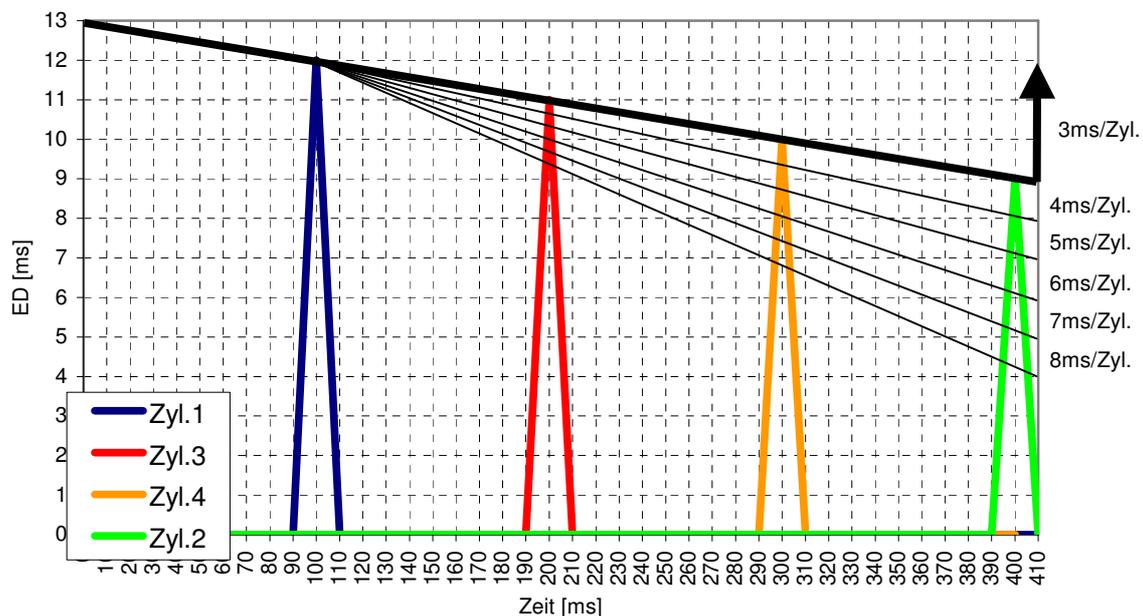


Bild 45: Prinzipdarstellung Startrampe

Das Bild 45 beschreibt die Vorüberlegungen eine geeignete Einspritzrampe, die einen guten Motorstart gewährleistet, zu definieren.

Bei einer durchschnittlichen Startdrehzahl von 300 1/min ist die erste Einspritzdauer 12ms lang. Diese Einspritzdauer wird dann heruntergerampft bis der Motor anspringt.

Verschiedene Rampengradienten wurden in Starttests validiert um ein möglichst schnelles und robustes Anspringen des Motors zu gewährleisten.

6.3 Lambdaregelung/ Lastwechsel

Zielsetzung: Vermeidung von Ruckeln durch Ausmagern bei schnellen Lastwechseln und Verringerung von Lastschlägen bei Gangwechsel bzw. Lastwechsel

Zur Applikation des Lambdareglers und der Einspritzmengenberechnung während des transienten Verhaltens wurden verschiedene Lastsprünge im Fahrzeug durchgeführt. Insbesondere bei schnellen Lastwechseln, beim Beschleunigen und Verzögern des Fahrzeuges musste der Lambdaregler von seiner Regelgüte her verbessert werden. Die gesamte Prozedur wurde bei verschiedenen Drehzahlen und Lasten durchgeführt, so dass die gesamten Kennfeldbereiche abgedeckt wurden.

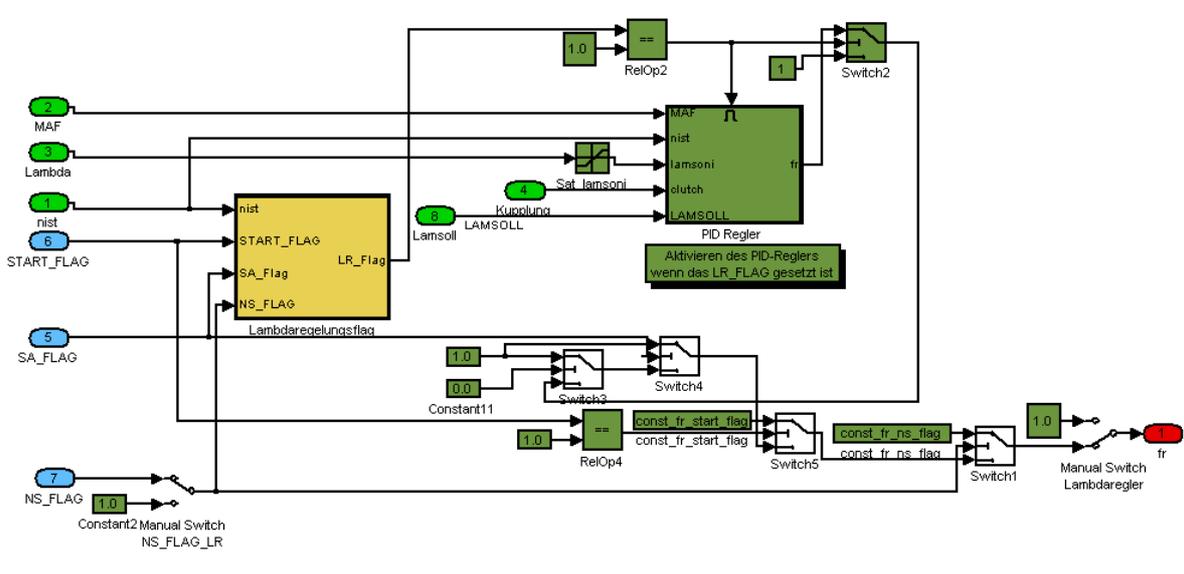


Bild 46: Simulink Modell des Lambdareglers

6.4 Schubabschaltung/ Konstantfahrt bei niedriger Last

Zielsetzung: Verbesserung des Übergangs zwischen Schubbetrieb und Wiedereinsetzen, sowie Fahren an der Nulllastlinie

Die Schubabschaltung wurde in der ersten Phase der Fahrzeugapplikation nicht in Betrieb genommen, weil das Wiedereinsetzen der Einspritzung bei 1400 1/min zu grob verlief, insbesondere in kleinen Gängen. Aus diesem Grund wurde eine Gangerkennung über den CAN-Bus eingerichtet, die es erlaubt eine gangabhängige Schubabschaltung zu generieren.

Diese nun aktivierte Schubabschaltung ist für jeden Gang appliziert worden und sorgt für ein gleitendes Wiedereinsetzen der Einspritzung in den verschiedenen Gängen bzw. Drehzahlen. Das Wiedereinsetzen der Einspritzung wurde durch eine Einspritzrampe realisiert und ist mit einer Hysterese von 200 1/min belegt.

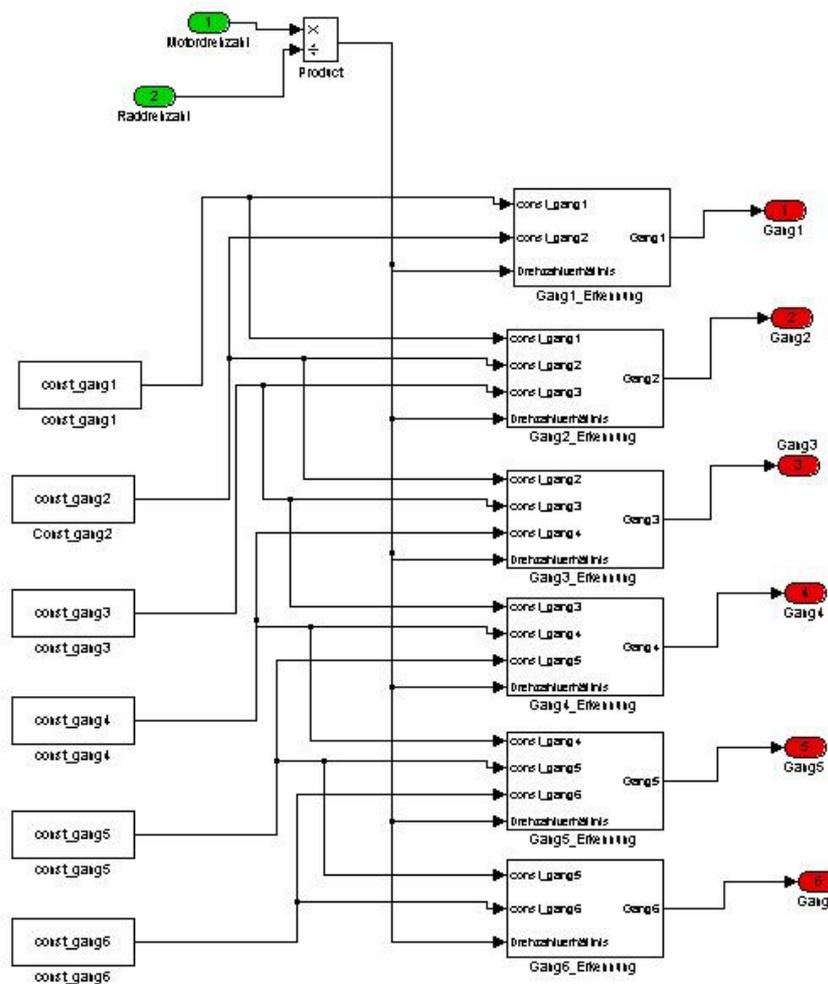


Bild 47: Simulink Modell der Gangerkennung

6.5 Ladedruckregelung

Zielsetzung: Verbesserung der Ladedruckregelung

Die Ladedruckregelung wurde neu entworfen, in Simulink dargestellt und simuliert und dann im Fahrzeug erprobt und appliziert.

Es handelt sich um einen PID Regler dessen Parameter über Kennfelder abgelegt wurden. Diese Kennfelder wurden in aufwendigen Testfahrten bedatet und erlauben nun ein optimales Einschwingen des Ladedruckes in der Vollast.

Eine Vollastbeschleunigung findet nun ruckelfrei statt und die Leistungsentfaltung gleicht einer linearen Funktion.

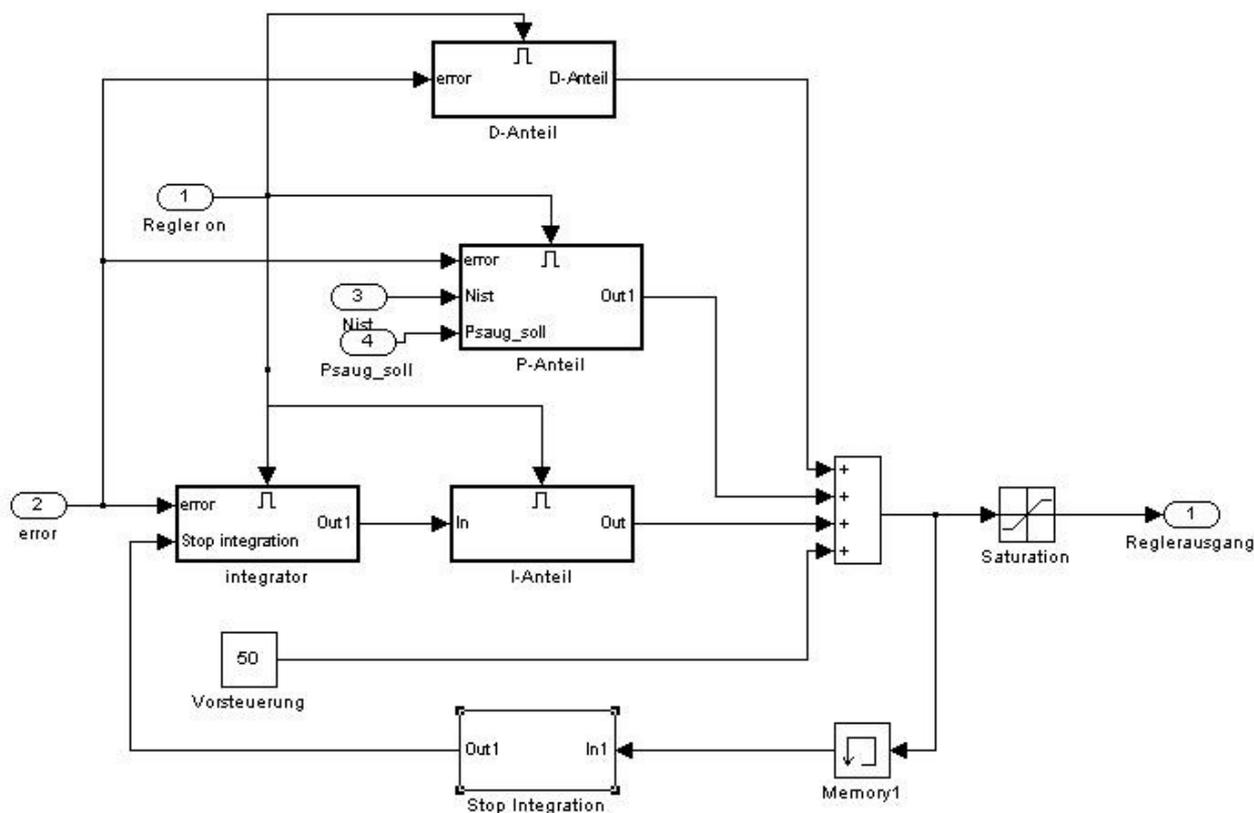


Bild 48: Simulink Modell der Ladedruckregelung

Fazit

Im Rahmen der Phasen 1 und 2 dieses Projekts wurde das Potential des Erdgasbetriebs mit vollvariabler Ventilhubsteuerung und Turboaufladung eindrucksvoll nachgewiesen. Im NEDC Rollentest mit einem VW Golf konnte ein sehr niedriges CO₂-Emissionsniveau von 113 g/km dargestellt werden, ebenso wie ein moderater Verbrauch im realen Fahrbetrieb.

Auch das für die Umsetzbarkeit eines solchen Downsizingkonzepts relevante Anfahrmoment und die allgemeine Fahrbarkeit und Performance des Fahrzeugs entsprechen den Prognosen und bestätigen die Effizienz und Realisierbarkeit dieses Emissionsminderungskonzepts.

Zur vollständigen Bewertung des Konzepts hinsichtlich seiner Marktfähigkeit sind abschließend noch Detailfragen offen, die im Rahmen des bisherigen Projektumfangs nicht untersucht werden konnten. Dazu gehören der Kaltstart sowie notwendige Eigenschaften eines CNG-spezifischen Katalysators und Strategien zur Sicherstellung der Light-Off-Temperatur des Katalysators bei Niedriglast.

Fazit (weiterführende Applikationsarbeiten)

Die durchgeführten zusätzlichen Applikationsmaßnahmen, insbesondere das verbesserte Startverhalten und die Schubabschaltung nehmen positiven Einfluß auf den Kraftstoffverbrauch bzw. die CO₂ Emissionen.

Im Rahmen dieses Projektes lag dort auch das Hauptaugenmerk. Die übrigen Emissionen, außer HC, lagen eher auf niedrigem Niveau. Die unverbrannten Kohlenwasserstoffe, die zu einem großen Teil aus CH₄ bestehen, lassen sich schlechter oxidieren als die Kohlenwasserstoffe die im Benzinbetrieb entstehen. Dies setzt einen höhere Kat-Light-Off Temperatur und somit eine höhere Edelstahlbeladung des Katalysators voraus. Der Thematik Abgasnachbehandlung wurde deshalb in diesem Projekt nicht weiter nachgegangen. Eine Katalysator Anpassung für die Einhaltung einer bestehenden oder zukünftigen Abgasnorm ist Stand der Technik und bedarf keiner prinzipiellen Entwicklungsarbeit.

Die weiterführenden Applikationsarbeiten sind abgeschlossen. Das Startverhalten hat sich entscheidend verbessert. Die Lambdaregelung arbeitet bei Lastschlägen genauer und eine gangabhängige Schubabschaltung wurde implementiert. Die Ladedruckregelung wurde neu entworfen, programmiert und appliziert. Der Motorraum wurde nochmals optisch verbessert. Der neue Stand konnte erfolgreich auf dem AC- Kolloquium 2008 präsentiert werden.

. Aufgabeübersicht /Status

Phase 2	
Aufgabenpaket 1:	Status
Verfahrensspezifische Untersuchungen am Motorprüfstand	
1.1 Brenngeschwindigkeit	Erledigt
1.2 Katheizen	Erledigt
1.3 Anfahrmoment	Erledigt
1.4 Motorsteuerung Funktionsentwicklung	Erledigt
1.5 Konstruktion und Fertigung	Erledigt
1.6 Hardware-Motorsteuerungssystem	Erledigt
Aufgabenpaket 2:	Status
Applikation des Versuchsfahrzeugs	Erledigt
2.1 Ausführliche Bedatung der stationären Steuergeräte Funktionen	Erledigt
2.2 Unterstützung der Fahrbarkeitsabstimmung am Motorprüfstand	Erledigt
2.3 Fahrzeugapplikation	Erledigt
2.4 Messfahrten	Erledigt
2.5 Auswertung / Analyse / Bewertung:	Erledigt
weiterführende Applikationsarbeiten	Status
Startverhalten(Reproduzierbarkeit,inkl. Warmlauf)	Erledigt
Lambda Regelung(Ruckeln durch Ausmagern bei schnellen Lastwechseln)	Erledigt
Lastwechsel(Verringerung von Lastschlägen bei Gangwechsel bzw Lastwechsel)	Erledigt
Implementierung Schubabschaltung	Erledigt
Konstantfahrt bei niedriger Last (Schubbetrieb und Wiedereinsetzen, Fahren an der Nulllastlinie)	Erledigt
Ladedruckregelung bei Vollastbeschleunigung	Erledigt

Bild 49: Übersichtmatrix erledigte Aufgaben