

# Prozesssimulation in der Erdgasmotorenentwicklung

**Dipl. Ing. ETH Christian Lämmle**

Abteilung Verbrennungsmotoren/Feuerungen, EMPA Dübendorf und  
Laboratorium für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme (LAV), ETH Zürich

**Dipl. Ing. Christian Bach**

Abteilung Verbrennungsmotoren/Feuerungen, EMPA Dübendorf

**Prof. Dr. Konstantinos Boulouchos**

Laboratorium für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme (LAV), ETH Zürich

## 1 Einleitung

Fahrzeuge mit Erdgas als Treibstoff haben ein hohes Potenzial zur Verbesserung der Luftqualität aufgrund tiefer Schadstoffemissionen und einer signifikanten Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Ausgehend von einem VW Polo mit 1.0-lit. Benzinmotor (MJ 2000) werden einige Änderungen vorgenommen, um Erdgas als Treibstoff verwenden und um die ehrgeizigen Ziele des Projekts erreichen zu können. Die wichtigsten Ziele des CEV (Clean Engine Vehicle)-Projektes können wie folgt zusammengefasst werden: Im NEFZ (Neuer Europäischer Fahrzyklus) soll das Fahrzeug 30% weniger CO<sub>2</sub> emittieren als das Serienfahrzeug mit gleicher Leistung, und die Euro 4-Grenzwerte sollen erfüllt werden, während das Serienfahrzeug mit 1.4-lit. Benzinmotor (60PS) die Euro 4-Grenzwerte erfüllt, aber 155gCO<sub>2</sub>/km emittiert. Zudem muss das Fahrzeug im FTP-75 Zyklus die SULEV Emissionsgrenzwerte erreichen.

Das CEV-Projekt ist ein Gemeinschaftsvorhaben der EMPA Dübendorf und der ETH Zürich (LAV, IMRT) und den Industriepartnern VW, Bosch, Corning und Engelhard. Das Projekt wird unterstützt vom Schweizerischen Verein des Gas- und Wasserfaches SVGW, vom Deutschen Verein des Gas- und Wasserfaches DVGW, vom Österreichischen Verein des Gas- und Wasserfaches ÖVGW und vom schweizerischen Bundesamt für Energie BFE.

Mit Hilfe von Computersimulationen kann der Versuchsaufwand auf dem Motoren- und dem Rollenprüfstand reduziert werden. Um die optimale Strategie für Erdgasbetrieb zu evaluieren, werden detaillierte Untersuchungen durchgeführt, um das Verdichtungsverhältnis, die temperierte AGR-Rate und die Aufladung zu optimieren. Eine gute Übereinstimmung zwischen Simulationsergebnissen, die vor dem Motorumbau zur Verfügung standen, und Prüfstandsversuchen wurde erreicht.

Die Simulationsarbeiten am CEV-Projekt haben die Wichtigkeit von guten Klopf- und Verbrennungsmodellen gezeigt. Im Rahmen einer Dissertation sollen ein Klopf- wie auch ein Flammausbreitungsmodell erarbeitet werden, die speziell für Gasmotoren geeignet sind. Im Gegensatz zum Benzinmotor muss beim Gasmotor die sich ändernde Gasqualität (Heizwert, Zündwilligkeit, Flammgeschwindigkeit) berücksichtigt werden.

## 2 Das CEV-Projekt

Die EMPA Dübendorf und die ETH Zürich haben im Jahr 2000 ein Projekt zur Entwicklung eines verbrauchsarmen und niedrigstemittierenden Fahrzeugantriebes auf Erdgasbasis gestartet. Im Mai 2003, wenn das Projekt zu Ende sein wird, soll ein funktionsfähiger Prototyp vorhanden sein, der die vorgegebenen Ziele erfüllt und auf der Strasse fahrbar ist.

Das Projektziel besteht darin, das Emissionsniveau eines modernen Ottomotors auf das Emissionsniveau der Stromproduktion für Elektroantriebe (Definition des SULEV Grenzwertes) zu senken und mit einem hohen Motorwirkungsgrad zu kombinieren, sodass die Treibhausgasemissionen ( $\text{CO}_2$ ) um 30% verringert werden. Zudem soll das Fahrzeug die bald in Kraft tretenden Euro 4-Grenzwerte erfüllen. Auf Basis des VW Polo mit 1.0-lit. Benzinmotor wird ein Konzept erarbeitet, dass auf andere Motoren und/oder Fahrzeuge übertragbar und marktfähig ist.

Dabei sollen die Treibstoff- und Umwelteigenschaften von Erdgas (hohe Oktanzahl, schwefel- und aromatenfrei, niedriger C-Anteil, geringe Ozonreaktivität) ausgenutzt und der Motorprozess über das ganze Betriebskennfeld in Richtung maximaler Wirkungsgrad bei gleichzeitig minimalen Schadstoffemissionen gestaltet werden.

Aufgrund der geringen Dichte von Erdgas, nimmt der Liefergrad des Motors bei Volllast ab, was zu einer Leistungs- und Drehmomenteinbusse führt. Durch den Einsatz einer geeigneten Aufladung können die Leistung und das Drehmoment gesteigert werden, damit die Fahrleistungen des Serienfahrzeuges erreicht werden.

Um einen hohen Wirkungsgrad zu erreichen, müssen insbesondere bei Teillast Massnahmen getroffen werden. Durch heisses zurückgeführtes Abgas (AGR) können die Ladungswechselverluste verringert und durch eine geeignete Auslegung des Getriebes kann der Motor mit höheren Lasten und tieferen Drehzahlen betrieben werden. Zusätzlich hilft ein hohes Verdichtungsverhältnis den Wirkungsgrad des Motors zu verbessern. Da Erdgas eine hohe Klopfestigkeit hat, kann der Motor trotz hohem Verdichtungsverhältnis auch bei Volllast optimal gezündet werden.

Bei der Abgasnachbehandlung kommt ein Drei-Wege-Katalysator zum Einsatz, der aufgrund der variierenden Abgaszusammensetzung neu abgestimmt werden muss. Eine moderne  $\lambda$ -Regelung des Verbrennungsmotors wird mit dem Ziel eingesetzt, die Sauerstoffspeicherung im Katalysator so zu regeln, dass er auch bei Abweichungen vom stöchiometrischen Kraftstoff-Luft-Gemisch eine hohe Konvertierungsrate gewährleistet. Die Beschichtung des Katalysators muss auf den Erdgasbetrieb optimiert werden, um die Konvertierung des stabilen Methan-Moleküls sicherzustellen. Für die Regelstrategie im Erdgasbetrieb ist weiter zu berücksichtigen, dass die Zusammensetzung des Erdgases variiert.

## 2.1 Das Projektfahrzeug

Die nachstehende Tabelle gibt eine Übersicht über die wichtigsten Motordaten des 1.0-lit. Benzinmotors (Herstellerangaben), der als Basis für die nachfolgende Optimierung im Erdgasbetrieb dient:

Bohrung x Hub	mm x mm	67.1 x 70.6
Anzahl Zylinder		4
Anzahl Ventile pro Zylinder		2
Verdichtungsverhältnis		10.7
Max. Drehmoment	Nm bei 1/min	86 / 3000..3600
Max. Leistung	kW bei 1/min	37 / 5000
Motorsteuerung		Motronic ME 7.5.10
Zylinderindividuelle Klopfregelung		ja
Abgasrückführung		ja
$\lambda$ -Regelung		2 $\lambda$ -Sonden
Abgasgrenzwerte		EURO 4

*Tabelle 2.1: Daten des 1.0-lit. Benzinmotors*

## 3 Anwendung der Prozesssimulation im CEV-Projekt

### 3.1 Warum Simulation?

Mit Hilfe von Computer-Simulationen können in kurzer Zeit verschiedene Motorparameter untersucht werden, was beim Entscheidungsprozess über zukünftige Entwicklungen hilft. Durch den Einsatz von Simulationswerkzeugen werden der Versuchsaufwand und die Kosten reduziert, wobei zusätzlich die Entwicklungszeiten verkürzt werden, was zu Wettbewerbsvorteilen führt.

Des Weiteren hilft die Simulation, die äusserst komplexen, zusammenhängenden physikalischen Vorgänge zu verstehen. Nach erfolgter Simulation stehen viele Informationen zur Verfügung, die mit geeigneten Programmen ausgewertet und visualisiert werden können.

### 3.2 Simulationsmodell

Das thermodynamische Prozessrechenmodell des Vierzylindermotors wurde mit der kommerziellen Software GT-Power aufgebaut. Dabei wurden das Ansaug- und Abgassystem komplett mit berücksichtigt. Der Hochdruckprozess wurde mit einem Zweizonenmodell abgebildet, wobei einfache Modelle für Verbrennung und Wandwärmeverluste eingesetzt wurden. Die Modellierung des Niederdruckprozesses erfolgt mit den Grundgleichungen der eindimensionalen Gasdynamik.

Mit Hilfe von Daten aus dem Experiment erfolgte eine Validierung des Prozessrechenmodells bei verschiedenen Lasten und Drehzahlen. Dabei standen diverse Temperaturen und Drücke wie auch der Druckverlauf im Zylinder zur Verfügung. Eine erste Validierung erfolgte am Benzinmotor. Der Umbau des Motors auf Gasbetrieb erfolgte im Modell und im Experiment gleichzeitig, wodurch die Qualität des Modells

weiter getestet werden konnte. Die saubere Validierung war enorm wichtig, da später auf andere Motorkonfigurationen und Betriebsparameter extrapoliert wurde.

### 3.3 Ergebnisse der Variation des Verdichtungsverhältnisses

Bevor mit Hilfe des Simulationsmodells die Optimierung des Verdichtungsverhältnisses erfolgte, wurden am auf den Erdgasbetrieb umgebauten Motor der Einfluss von AGR-Rate, Zündwinkel, Last und Drehzahl auf die Verbrennung in einigen relevanten Betriebspunkten untersucht. Die einzelnen beeinflussenden Parameter wurden multiplikativ bezogen auf einen Grundzustand berücksichtigt. Da für das Verbrennungsmodell ein Vibe-Ansatz gewählt wurde, konnten in kurzer Zeit verschiedene Betriebspunkte mit unterschiedlichen Verdichtungsverhältnissen untersucht werden. Die Formulierung dieses stark vereinfachten Verbrennungsmodells kann wie folgt erfolgen:

$$\Delta\phi_{BD} = \Delta\phi_{BD_0} \cdot \frac{f_{RGZ} \cdot f_{ZZP} \cdot f_n \cdot f_{pme}}{f_{RGZ0} \cdot f_{ZZP0} \cdot f_{n0} \cdot f_{pme0}}$$

$$VSP = VSP_0 \cdot \frac{g_{RGZ} \cdot g_{ZZP} \cdot g_n \cdot g_{pme}}{g_{RGZ0} \cdot g_{ZZP0} \cdot g_{n0} \cdot g_{pme0}}$$

$$m_v = m_{v0} \cdot \frac{h_{RGZ} \cdot h_{ZZP} \cdot h_n \cdot h_{pme}}{h_{RGZ0} \cdot h_{ZZP0} \cdot h_{n0} \cdot h_{pme0}}$$

wobei folgende Abkürzungen verwendet wurden:

$\Delta\phi_{BD}$	Vibe-Brenndauer
RGZ	Rauchgas im Zylinder
ZZP	Zündzeitpunkt
VSP	Verbrennungsschwerpunkt (50%-Umsatzpunkt)
$m_v$	Vibe-Formparameter
n	Drehzahl
pme	Effektiver Mitteldruck
Index 0	Grundzustand

Dabei hat sich gezeigt, dass im untersuchten Bereich der Wirkungsgrad verbessert werden kann. Die konstruktiven Möglichkeiten liessen es zu, das Verdichtungsverhältnis von  $\epsilon=10.7$  auf  $\epsilon=13.5$  zu erhöhen. Folgende Abbildung zeigt die Ergebnisse der Simulation verglichen mit den Ergebnissen vom Stationärprüfstand für verschiedene Teillastpunkte. Dabei bedeutet beispielsweise 2000/2, dass bei einer Drehzahl  $n=2000\text{U/min}$  und  $pme=2\text{bar}$  simuliert bzw. gefahren wurde.

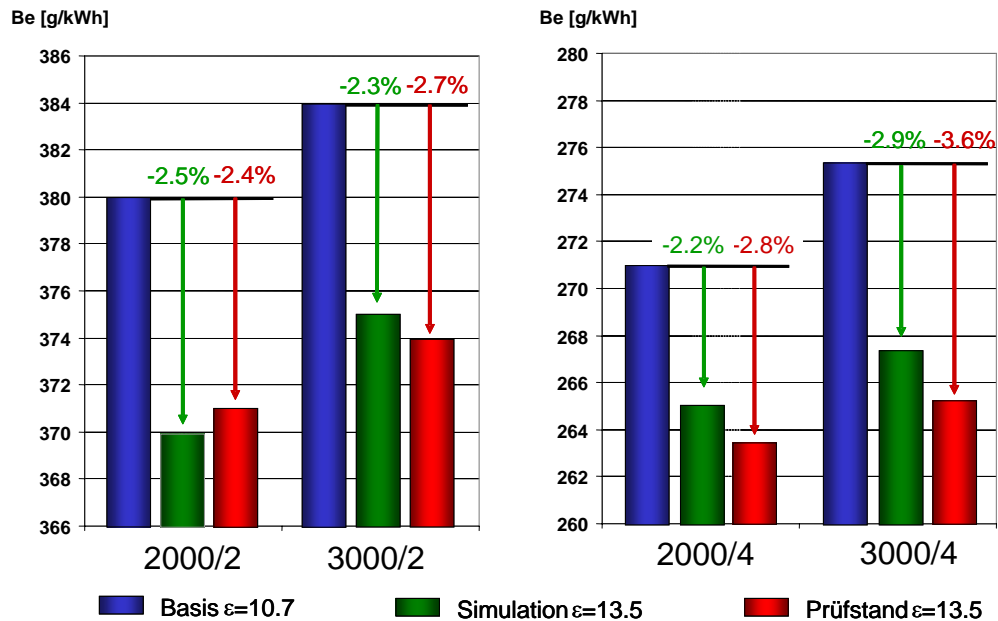


Abbildung 3.1: Vergleich Experiment/Simulation des spez. Verbrauchs bei Teillast bei einer Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses

Ausgehend vom Basismotor im Gasbetrieb ( $\epsilon=10.7$ ) sind die Ergebnisse des spezifischen Verbrauchs der Simulation bei  $\epsilon=13.5$  als auch die Prüfstandsergebnisse bei  $\epsilon=13.5$  eingetragen. Es soll hier nochmals erwähnt werden, dass die Simulationsergebnisse vorhanden waren, *bevor* der Motor umgebaut wurde. Die Simulationsergebnisse zeigen eine gute Voraussage des spezifischen Verbrauchs. Die Verbrauchsverbesserung nimmt mit zunehmender Last und Drehzahl zu, da die Zunahme der Wandwärmeverluste bei tiefen Lasten und Drehzahlen einen grösseren Einfluss hat.

Die Unterschiede zwischen Experiment und Simulation sind auf den nicht exakt vorausgerechneten Brennverlauf und auf Ungenauigkeiten in der Beschreibung des Reibmitteldruckes zurückzuführen. Zur Zeit wird ein verbessertes Modell für die Verbrennung entwickelt. Die Änderung des Verdichtungsverhältnisses am Prüfstand konnte nur durch eine Veränderung der ursprünglichen Brennraumgeometrie realisiert werden, wobei das oben erwähnte einfache Modell diese Änderung nicht abbilden kann. Das verbesserte Modell soll es ermöglichen, die geänderten Bedingungen bezüglich Geometrie, Druck, Temperatur und Rauchgasmenge im Zylinder zu berücksichtigen.

Auch bei Vollastbetrieb brachte die Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses Vorteile. Durch den Einsatz von Erdgas als Treibstoff und ohne Änderung von  $\epsilon$  nahmen maximales Drehmoment und maximale Leistung um ca. 15% ab. Nach dem Motorumbau auf  $\epsilon=13.5$  betrugen die Einbußen für Drehmoment und Leistung noch ca. 10%. Folgende Abbildung zeigt den Verlauf des Drehmomentes in Funktion der Motordrehzahl von Benzinmotor (RON95), Erdgasmotor mit  $\epsilon=10.7$  und Erdgasmotor mit  $\epsilon=13.5$  bei Vollast, wie sie am Stationärprüfstand aufgenommen wurden:

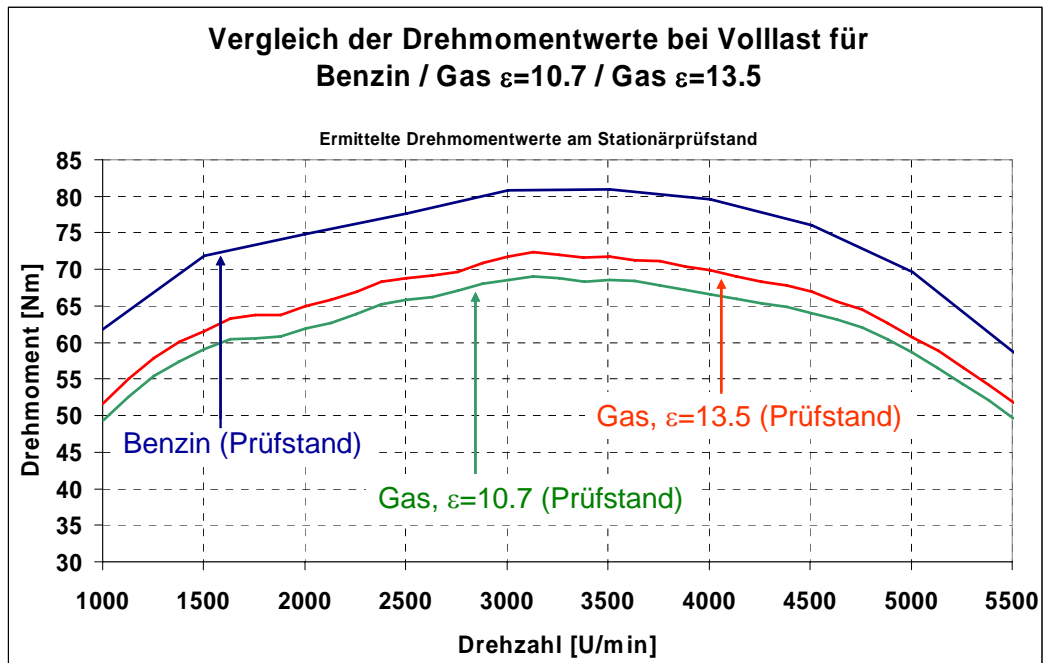


Abbildung 3.2: Einfluss der Verdichtungserhöhung auf das Drehmoment bei Vollast

Während der Benzinmotor mit  $\lambda=0.9$  betrieben wird, kann mit einer Kraftstoffanreicherung beim Gas kein Kühleffekt erreicht werden. Deshalb wird der Gasmotor im ganzen Kennfeld mit  $\lambda=1.0$  betrieben.

### 3.4 Auslegung der Aufladung

Um die Drehmoment- und Leistungseinbuße zu kompensieren, wird ein Abgasturbolader eingesetzt. Die Erhöhung der Leistung um ca. 10% würde den Aufwand zur Anbringung einer Aufladung kaum rechtfertigen, weshalb der nächst grössere Motor (1.4-lit.) bezüglich Leistung und Drehmoment erreicht werden soll. Um diese Ziele erreichen zu können, musste das Drehmoment um ca. 60% auf 116Nm und die Leistung um ca. 37% auf 44kW erhöht werden. Um einen geeigneten ATL für die gestellten Anforderungen und passend zum Motor zu finden, wurden zwei verschiedene Abgasturbolader untersucht. Gerade beim Zusammenspiel von Motor und Abgasturbolader kann die Entwicklungszeit mit Hilfe von Simulationenwerkzeugen deutlich verkürzt werden, da für den ATL passende Ansaug- und Abgassysteme gebaut werden müssen. Folgende Abbildung vergleicht die berechneten Drehmomentwerte bei Vollast mit dem Benzinmotor und dem Gasmotor mit erhöhtem Verdichtungsverhältnis:

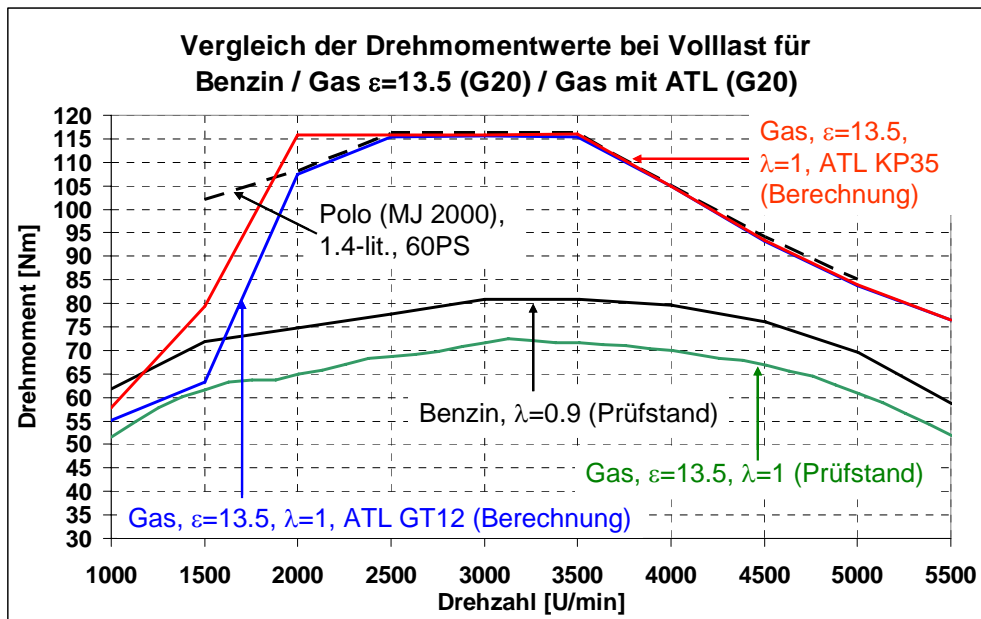


Abbildung 3.3: Auslegung der Aufladung: Vergleich der Volllastkurven mit unterschiedlichen Konfigurationen

Mit beiden Abgasturboladern können die vorgegebenen Leistungsdaten erreicht werden, wobei der ATL KP35 im unteren Drehzahlbereich ein deutlich besseres Ansprechverhalten aufweist. An dieser Stelle zeigt sich die Wichtigkeit eines Klopfmodells, da der Motor mit ATL und hohem Verdichtungsverhältnis betrieben wird. Würde der Motor zu stark mit klopfender Verbrennung betrieben, müsste entweder das Verdichtungsverhältnis oder der Ladedruck reduziert werden. Die Voraussage des höchst möglichen  $\epsilon$  im Zusammenspiel mit dem Abgasturbolader ist von besonderem Interesse.

Um die ambitionösen Ziele zu erreichen, ist die Abschätzung des Einflusses auf den Teillastbetrieb wichtig. Beim Betrieb mit Abgasturbolader im Teillast wurden verschiedene Strategien untersucht. Zum einen kann das Waste-Gate im gesamten Teillastbereich geschlossen bleiben, was zu höherem Verbrauch aber besserem Ansprechverhalten führt. Die Strategie "Waste-Gate offen" verfolgt das Ziel, die Ladungswechselverluste zu verringern, wobei das Ansprechverhalten im transienten Betrieb aber verschlechtert wird.

Beide Waste-Gate-Strategien wurden im stationären Betrieb rechnerisch abgeschätzt. Folgende Abbildung zeigt die Verbrauchserhöhung der Strategie "Waste-Gate geschlossen" in Prozent im Vergleich zum hoch verdichteten Gasmotor ohne Turbolader, der als Basis diente:

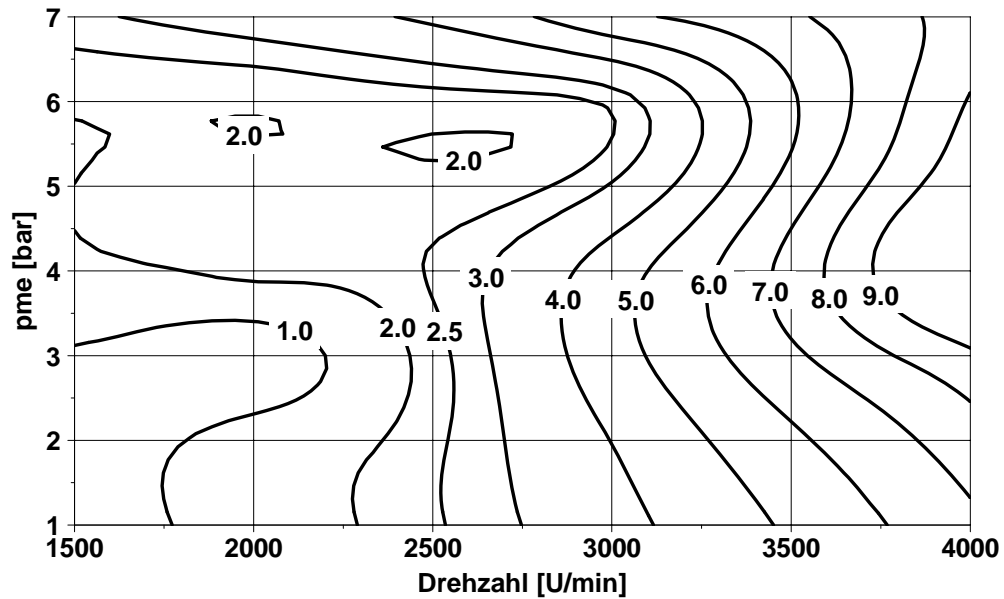


Abbildung 3.4: Änderung des spezifischen Verbrauchs bei Teillast mit ATL im Vergleich zum Saugmotor mit der Strategie "Waste-Gate geschlossen" in Prozent

Eine Zunahme des Verbrauchs mit zunehmender Last und Drehzahl war zu erwarten. Auf den ersten Blick überrascht die weniger ansteigende Verbrauchsverschlechterung bei mittleren Lasten. Es ist jedoch zu bedenken, dass der Motor fast im ganzen hier gezeigten Bereich mit AGR betrieben wird. Durch den Einsatz des Turboladers nimmt der Abgasgegendruck bei mittleren Lasten stark zu, worauf hohe AGR-Raten im Vergleich zum Saugmotor resultieren, die zu einer Reduktion der Ladungswechselverluste führen. Bei  $p_{me}=7\text{bar}$  fährt der Motor in der Originalabstimmung ohne AGR, wodurch der Verbrauch wiederum stärker ansteigt.

Eine Abschätzung der Strategie "Waste-Gate geschlossen" im NEFZ hat gezeigt, dass der Verbrauch ungefähr 4% im Vergleich zum Saugmotor ansteigt. Diese Verbrauchsverschlechterung könnte durch den Einsatz von AGR bei hohen Lasten ( $p_{me}=7\text{bar}$ ) etwas reduziert werden.

Durch die Strategie "Waste-Gate offen" resultiert eine geringe Zunahme des Verbrauchs, wie nachfolgende Abbildung zeigt:



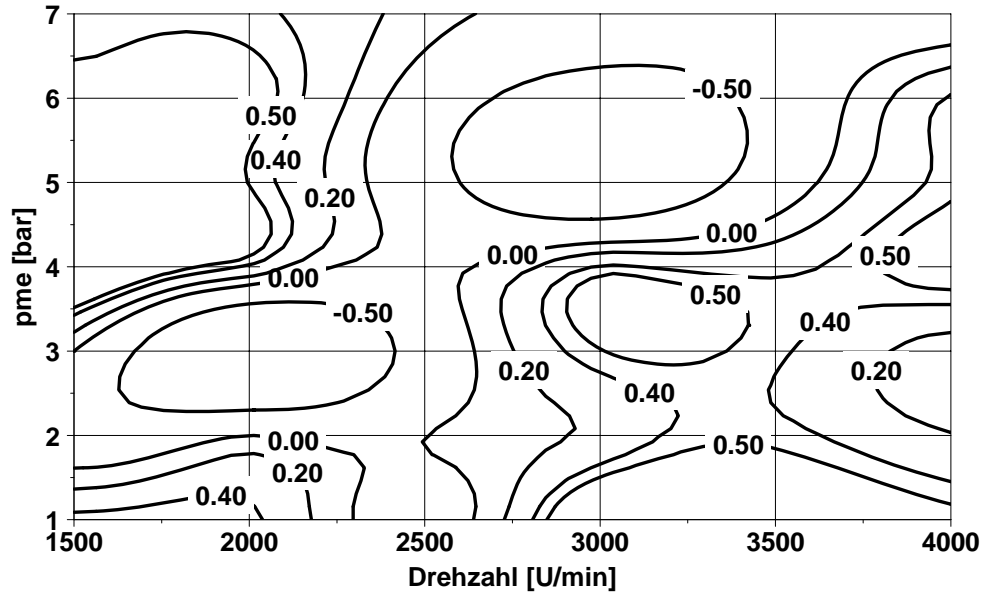


Abbildung 3.5: Änderung des spezifischen Verbrauchs bei Teillast mit ATL im Vergleich zum Saugmotor mit der Strategie "Waste-Gate offen" in Prozent

Wiederum sind in dieser Darstellung die Isolinien konstanter Verbrauchsänderung in % dargestellt. Es fällt zuerst auf, dass die Änderungen bezüglich dem Saugmotor im ganzen Kennfeldbereich gering sind, da sich der Abgasgegendruck und die AGR-Raten nur wenig ändern. Weiterhin fällt auf, dass es Bereiche gibt, wo der Verbrauch geringfügig sinkt, was möglicherweise auf eine Art Nutzdrossel-Effekt des Abgasturboladers zurückzuführen ist. Die Drosselklappe muss in diesen Bereichen etwas weiter geöffnet werden im Vergleich zum Saugmotor. Es ist allerdings zu bemerken, dass in diesem Fall kleine Ungenauigkeiten in der Berechnung einen verhältnismässig grossen Einfluss haben.

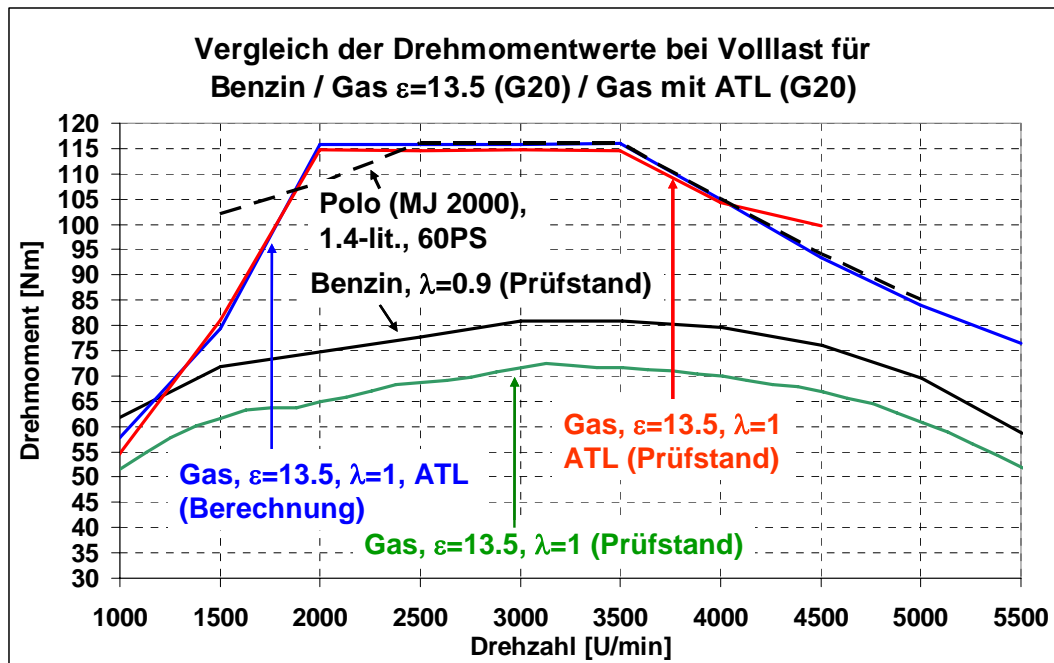
Eine Abschätzung der Strategie "Waste-Gate offen" im NEFZ hat gezeigt, dass der Verbrauch ungefähr 0.5% im Vergleich zum Saugmotor ansteigt. Da die Aufladung für den Zyklus nicht gebraucht wird, ergeben sich hier eindeutig Vorteile bezüglich des Verbrauchsverhaltens.

Ein weiterer Vorteil der Strategie "Waste-Gate offen" ist durch das schnellere Aufheizen des Katalysators gegeben. Das Erreichen der Light-off Temperatur im Katalysator ist ganz entscheidend, um die strengen Abgasvorschriften einhalten zu können.

Beide Waste-Gate Strategien werden in Zukunft auf dem Rollenprüfstand und auf der Strasse hinsichtlich Verbrauch und Fahrbarkeit untersucht. Es wird dabei zu beachten sein, dass dieses Fahrzeug in erster Linie verbrauchsarm sein soll. Trotzdem wird man versuchen, das Ansprechverhalten und die Fahrdynamik nicht zu vernachlässigen. Es werden verschiedene Strategien untersucht werden müssen, wann das Waste-Gate geschlossen werden soll. Natürlich stellt der Balanceakt zwischen Ansprechverhalten und Verbrauch eine besondere Herausforderung dar.

Die ersten Versuche mit dem ATL auf dem Stationärprüfstand konnten erfolgreich durchgeführt werden. Der Vergleich von Experiment und Simulation zeigt eine gute

Übereinstimmung. Bei  $n=4500\text{U/min}$  konnte das Waste-Gate nicht ganz so weit geöffnet werden, wie vorgesehen war:



#### 4 Flammgeschwindigkeit bei Erhöhung der Verdichtung

Das in Kapitel 3.3 *Ergebnisse der Variation des Verdichtungsverhältnisses* vorgestellte „voraussagefähige“ Verbrennungsmodell hat den grossen Nachteil, dass Einflüsse der Flammgeschwindigkeit nicht berücksichtigt werden. Die nachfolgende Darstellung zeigt einen Vergleich zwischen dem experimentell bestimmten und dem vorausgerechneten Brennverlauf im wichtigen Teillastpunkt  $n=3000\text{U/min}$  und  $p_{me}=4\text{bar}$ . Es wurde an dieser Stelle bewusst der schlechteste der untersuchten Punkte gewählt, damit Unterschiede zwischen Experiment und Simulation gut sichtbar sind:

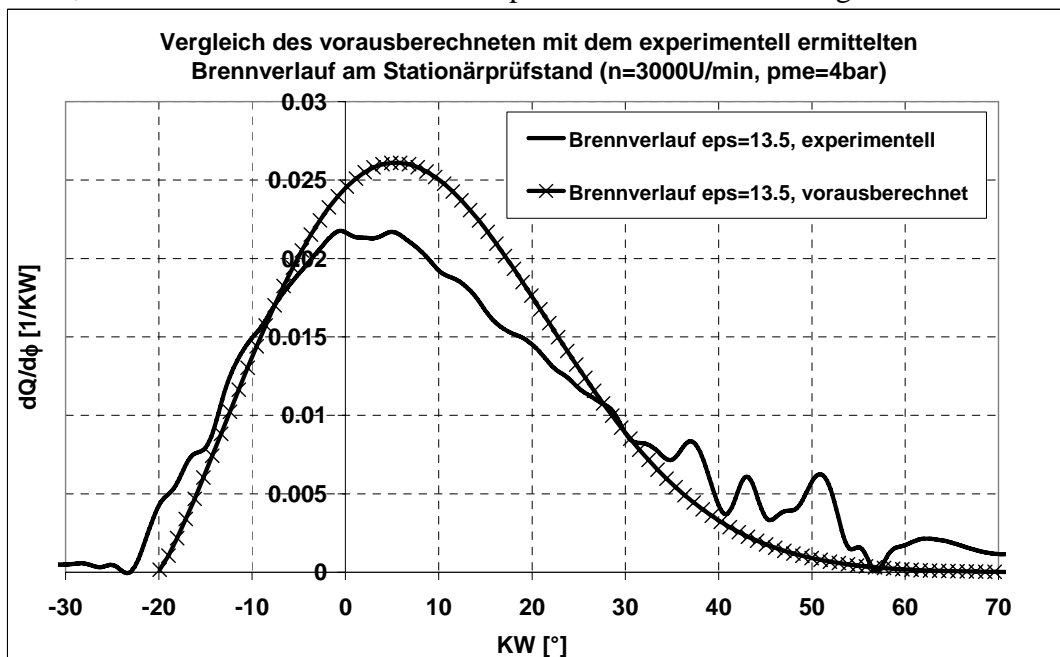


Abbildung 4.1: Vergleich des vorausgerechneten mit dem experimentell ermittelten Brennverlauf

Aus dieser Abbildung ist zu erkennen, dass der Brennbeginn sowie die ansteigende Flanke und das Ausbrennverhalten schlecht abgebildet werden können.

Wie bereits erwähnt wurde, kann mit dem verwendeten Verbrennungsmodell der Einfluss der Flammgeschwindigkeit nicht beschrieben werden. Es hat sich aber gezeigt, dass die Änderung der laminaren Flammgeschwindigkeit – hier mit  $S_L$  bezeichnet – womöglich die beschriebenen Unterschiede im Brennverlauf zum Teil erklären kann. Folgende Abbildung vergleicht  $S_L$  vom Grundzustand mit der laminaren Flammgeschwindigkeit, die aus dem vorausgerechneten Brennverlauf resultiert. Zusätzlich sind die dazugehörigen Brennverläufe dargestellt.

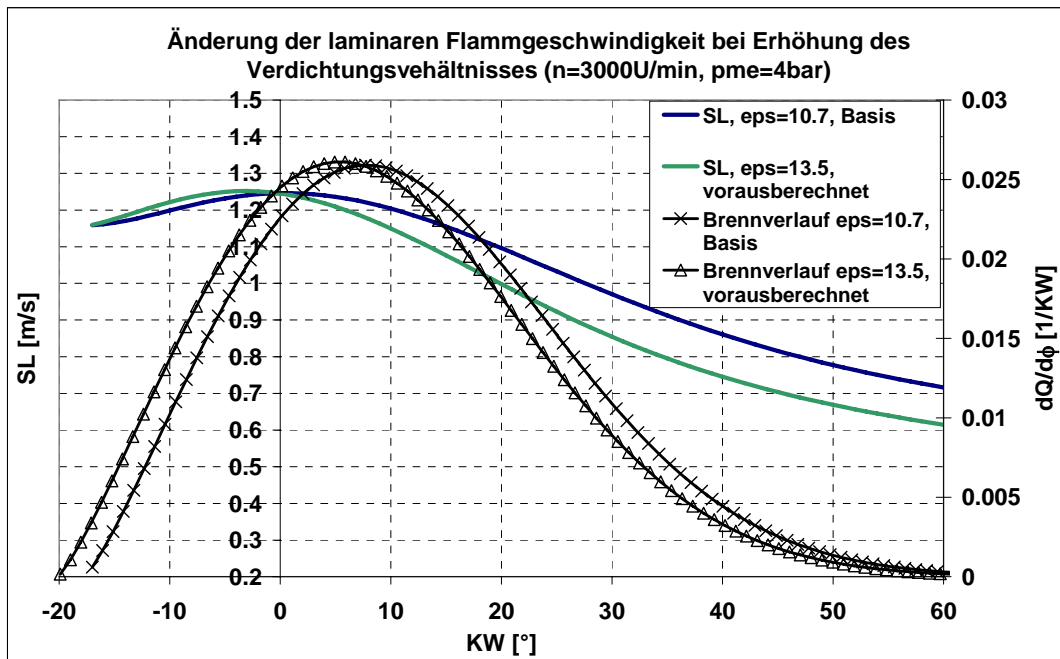


Abbildung 4.2: Änderung von  $S_L$  bei einer Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses

Zur Berechnung der laminaren Flammgeschwindigkeit wurde ein auf Gasbetrieb angepasstes Modell verwendet, das den Einfluss des Druckes stärker gewichtet als das Modell von Keck und Metghalchi. Mit diesem Modell ergibt sich, dass kurz nach Brennbeginn  $S_L$  des hochverdichteten Motors im Vergleich zum originalverdichteten Motor stärker zunimmt, während der Expansion jedoch stärker abnimmt. Vergleicht man den Verlauf der Flammgeschwindigkeiten mit den Abweichungen im Brennverlauf aus *Abbildung 4.1*: Vergleich des vorausgerechneten mit dem experimentell ermittelten Brennverlauf ist zu erwarten, dass eine Berücksichtigung von  $S_L$  eine deutliche Verbesserung in der Voraussage des Brennverlaufs liefern würde.

Es ist aber denkbar, dass noch weitere Parameter den Brennverlauf beim hochverdichteten Motor beeinflussen, weshalb zur Zeit versucht wird, verschiedene Einflüsse von Flammgeschwindigkeit und weiterer Parameter zu beschreiben.

## **5 Zusammenfassung und Ausblick**

Eine deutliche Zeitersparnis konnte durch den Einsatz von Simulationswerkzeugen erreicht werden. Die Optimierung der Verdichtungserhöhung erfolgte am Rechner, wobei Prüfstandsversuche eine gute Übereinstimmung gezeigt haben. Die stationär ermittelte Optimierung konnte gut auf den dynamischen Betrieb übertragen werden. Dabei hat sich gezeigt, dass die Vorgehensweise, die Strategie zuerst auf dem Rechner zu simulieren, danach auf dem Motorenprüfstand stationär zu überprüfen und weiter zu optimieren und zum Schluss die Erkenntnisse auf den dynamischen Betrieb im Fahrzeug zu übertragen, richtig war. Insgesamt konnte im NEFZ durch die Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses eine CO<sub>2</sub>-Reduktion von ca. 3% erreicht werden.

Anschliessend wurden Berechnungen mit zwei Abgasturboladern durchgeführt, worauf eine Entscheidung zugunsten von ATL KP35 (KKK) gefällt wurde, der die hier gestellten Anforderungen besser zu erfüllen mag. Das komplexe Zusammenspiel von Abgasturbolader und Motor kann mittels Simulationswerkzeugen mit vernünftigem Aufwand untersucht werden. Wiederum konnte eine gute Übereinstimmung beim Drehmomentverhalten im Volllastbetrieb erzielt werden. Die Untersuchung des Teillastbetriebs am Motorenprüfstand erfolgt, sobald die Motorsteuerung auf die gewünschten Änderungen vorbereitet ist. Bei den ersten Untersuchungen am Motorenprüfstand stand im Vordergrund, ob das hohe Verdichtungsverhältnis trotz Aufladung beibehalten werden kann, wobei das Klopfverhalten des Motors bei verschiedenen Ladedrücken, Drehzahlen und mit verschiedenen Gasen untersucht wurde. Die Ziel-Drehmomentkurve konnte mit allen untersuchten Gasen erreicht werden.

Die Simulationsarbeiten haben das Potenzial von Voruntersuchungen am Rechner und die Notwendigkeit, Modelle weiter zu entwickeln, gezeigt. Die variierende Zusammensetzung des Gases stellt eine ganz besondere Herausforderung für voraussagefähige Modelle dar. Der Fokus der Arbeit richtet sich im Moment auf die Beschreibung der Verbrennung, wobei später die Untersuchung des Klopfverhaltens vertieft wird.

Im CEV-Projekt konnte gezeigt werden, dass Erdgasfahrzeuge ein hohes Potenzial zur Reduktion der Treibhausgasemissionen aufweisen. Kombiniert man diese Eigenschaft mit einem geeigneten, auf den Erdgasbetrieb abgestimmten Katalysator, können die Euro 4-Grenzwerte deutlich unterschritten werden. Im nächsten Schritt wird die Aufladung an Motorenprüfstand und Fahrzeug optimiert bzw. realisiert. In einem letzten Schritt wird das Getriebe des Polo 1.4-lit. Benzinmotors verwendet, um den Motor bei tieferen Drehzahlen und höheren Lasten zu betreiben.

Das Potenzial zu weiteren Senkungen der Emissionen bei Gasfahrzeugen ist vorhanden, wie möglicherweise in einem Nachfolgeprojekt gezeigt werden soll.

## **6 Danksagung**

Das Projektteam dankt dem schweizerischen, deutschen und österreichischen Gasverbänden, dem schweizerischen Bundesamt für Energie und den Industriepartnern Robert Bosch GmbH, Volkswagen AG, Corning GmbH und Engelhard Technologies GmbH.