

Energieforschungsprogramm

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

17/07/2020

Projekttitlel:

Kraftstoffreformierung als Weg zum Ottomotor
mit 45% Wirkungsgrad

Otto45

Projektnummer: 858791

Energieforschungsprogramm – 3. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Ausschreibung	3. Ausschreibung Energieforschungsprogramm
Projektstart	01/04/2017
Projektende	31/12/2019
Gesamtprojektdauer	33 Monate
ProjektnehmerIn	Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik
AnsprechpartnerIn	Assoc. Prof. Dr. Peter Hofmann
Postadresse	Getreidemarkt 9, 1060 Wien
Telefon	+43 1 58801 – 315 01
Fax	
E-mail	info@ifa.tuwien.ac.at
Website	www.ifa.tuwien.ac.at

Kraftstoffreformierung als Weg zum Ottomotor mit 45% Wirkungsgrad

Otto45

AutorInnen:

Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik – TU Wien

Assoc. Prof. Dr. Peter Hofmann

Dipl.-Ing. Georg Klinglmayr

AVL List GmbH – Graz

Dipl.-Ing. Marko Certic

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	4
2	Einleitung	5
3	Inhaltliche Darstellung	6
3.1	Untersuchte Maßnahmen	7
3.2	Prüfstands Aufbau am Motorprüfstand	9
3.3	Prüfstands Aufbau am Synthesegasprüfstand	13
3.4	Testverlauf Synthesegasprüfstand	14
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	15
4.1	Experimentelle Untersuchung am Basismotor	16
4.2	Experimentelle Untersuchung am Miller-Motor	18
4.3	Experimentelle Untersuchung am Synthesegasprüfstand	21
5	Ausblick und Empfehlungen	25
6	Literaturverzeichnis	26
7	Kontakt Daten	26

2 Einleitung

Die weltweite Klimadiskussion macht es unabdingbar, die Mobilität ressourceneffizienter zu gestalten. In Bezug auf die Fahrzeugherstellung sind verbrennungsmotorische Antriebe diesbezüglich deutlich überlegen, wodurch sie bei Verfügbarkeit von regenerativen Kraftstoffen eine attraktive und nachhaltige Antriebsform darstellen.

Zusätzlich verlangt die Gesetzgebung ein stetig steigendes Einsparungspotential von Kraftstoffverbrauch im Einklang mit geringeren Abgasemissionen. Dies gelingt nur mit einem gesteigerten Wirkungsgrad des gesamten Motorkonzepts. Mit dem Augenmerk auf diese Anforderungen gibt es eine Reihe an unterschiedlichen Konzepten mit hohem Potential, den effektiven Wirkungsgrad von Verbrennungskraftmaschinen zu steigern. Des Weiteren erlaubt die voranschreitende Elektrifizierung hinsichtlich Hybridisierung Freiheitsgrade beim Betrieb des Motors und damit zusätzliches Potential durch die Ausnützung von Synergieeffekten.

Aus der Wirkungsgradkette eines Verbrennungsmotors wird ersichtlich, dass etwa ein Drittel der durch den Kraftstoff zugeführten Energie den Motor über das Abgas ungenutzt verlässt. Es ist daher erstrebenswert ein System zu entwickeln, welches sich dieser Abgasenergie bedient, um den Wirkungsgrad zu steigern.

Ziel in diesem Projekt war, den effektiven Wirkungsgrad einer Verbrennungskraftmaschine (DI-Ottomotor, 4-Takt) durch die Kombination unterschiedlicher Maßnahmen in einem eingeschränkten Kennfeldbereich auf 45% zu steigern. Dafür wurde an modernen direkteinspritzenden Ottomotoren mit Abgasturboaufladung und variablen Nockentrieb die Konzepte der

- Abgasrückführung (AGR)
- Verdichtungsanhebung
- Wassereinspritzung
- Kraftstoffreformierung

untersucht. Besonderes Augenmerk wurde auf einen Betrieb bei $\lambda = 1$ gelegt, um eine effiziente Abgasnachbehandlung mittels eines Dreiwegekatalysators zu garantieren.

Als Ausgangsbasis des Projekts diente ein state-of-the-art Ottomotor mit einem Verdichtungsverhältnis $\epsilon = 10,5$, variablem Nockentrieb, Direkteinspritzung und einer Wastegate-Turboaufladung. Mit diesem Motor wurde ein Basiskennfeld gefahren und ein eingeschränkter Kennfeldbereich mit Potential zur weiteren Wirkungsgradsteigerung festgelegt. In weiterer Folge wurde an diesem Motor eine AGR-Variation durchgeführt. Als nächster Versuchsträger kam im Anschluss an den Basismotor ein direkteinspritzender Ottomotor mit variablem Nockentrieb, Miller-Brennverfahren und VTG-Turboaufladung (VTG – Variable Turbinen Geometrie) zum Einsatz. Dabei wurden die Konzepte der Verdichtungsanhebung ($\epsilon = 12,5$ auf $\epsilon = 13,5$), Abgasrückführung, Wassereinspritzung und Kraftstoffreformierung untersucht.

Die einleitenden Kapitel des Berichts erläutern die unterschiedlichen Maßnahmen und deren Wirkungsweise. In weiterer Folge wird auf die experimentelle Umsetzung dieser Maßnahmen, die erzielten Ergebnisse und die gewonnenen Erkenntnisse eingegangen.

Parallel wurde an einem Synthesegasprüfstand die Kraftstoffreformierung mit Ethanol untersucht und ein Simulationsmodell erstellt.

3 Inhaltliche Darstellung

Wesentliche Limitierungen bezüglich des effektiven Wirkungsgrades an Ottomotoren stellen die klopfende Verbrennung und max. zulässige Abgastemperatur an der Turbine oder am Katalysator dar. Um eine klopfende Verbrennung zu unterbinden wird der Zündwinkel in hohen Lastpunkten in Richtung spät verstellt. Damit geht einher, dass sich die Verbrennungsschwerpunktlage ebenfalls in Richtung spät verschiebt und somit weg von der optimalen Lage (ca. 6-8 °KW nZOT).

Der klopfenden Verbrennung kann durch eine Kühlung der Zylinderladung entgegengewirkt werden. Hierfür stellt die Wasserseinspritzung eine effektive Maßnahme dar.

Durch die Verwendung einer Abgasrückführung lässt sich die Verbrennungstemperatur ebenfalls deutlich senken. Dadurch ist es möglich, den Motor in höheren Lastpunkten bei früheren Verbrennungsschwerpunktlagen (hin zum Optimum) zu fahren ohne einer zusätzlichen Gemischkühlung durch Kraftstoffanreicherung.

Das Miller-Brennverfahren (erweiterte Expansion) stellt eine weitere Maßnahme zur Senkung der Klopfwahrscheinlichkeit dar. Durch ein frühes Schließen der Einlassventile verringert sich die Füllmenge und dadurch die Temperatur und der Druck zu Ende des Verdichtungstaktes.

Die Wirkungsgradsteigerung durch Kraftstoffreformierung bedient sich der Wärme des Abgases. Durch ein Einspritzen von Kraftstoff in das heiße Abgas im AGR-System und einer nachfolgenden katalytischen Reaktion dieses Gasgemischs wird ein Synthesegas mit höherem Heizwert verglichen mit dem eingespritzten Kraftstoff generiert – zusätzlich wird mit dem erzeugten Synthesegas (H_2 , CO, CH_4) die Verbrennung beschleunigt.

In den nachstehenden Kapiteln werden die in diesem Projekt getroffenen Maßnahmen und deren Wirkungsweise näher erläutert.

3.1 Untersuchte Maßnahmen

Wassereinspritzung

Durch eine zusätzliche Einbringung von H₂O in den Brennraum lässt sich weiteres Potential zur Wirkungsgradsteigerung erschließen. Es kommt zu einer inneren Kühlung des Brennraums, welche die während der Verbrennung auftretenden Spitzentemperaturen senkt. Dadurch lassen sich im Hochlastbereich günstigere Verbrennungsschwerpunktlagen in klopfbegrenzten Kennfeldbereichen erzielen. Im Teillastbetrieb ergäbe sich die Möglichkeit eines erhöhten Verdichtungsverhältnisses, um den thermodynamischen Wirkungsgrad zu erhöhen.

Wasser hat eine Verdampfungsenthalpie von 2257 kJ/kg (bei 100°C, 1,013 bar) [1] und liegt somit ca. fünfmal so hoch wie jene von Premiumbenzin (420 kJ/kg) [2]. Optimalerweise wird das Wasser der Frischladung während dem Ansaugtakt in flüssiger Phase zugeführt und entzieht der Ladung, durch das Verdampfen während des Verdichtungstaktes, Wärme. Des Weiteren wird eine weitere Absenkung der Abgastemperatur durch die höhere Gasmasse im Zylinder erreicht. Die reduzierten Gastemperaturen verringern die Wandwärmeverlust und mindern den Wärmeeintrag in das Kühlmittel [3]. Durch die Wassereinspritzung lässt sich der Kennfeldbereich in dem auf einer Gemischkühlung durch Kraftstoffanreicherung verzichtet werden kann erweitern.

Die Wassereinspritzung kann in unterschiedlichen Konfigurationen installiert werden (Direkteinspritzung, Multipoint-Kanaleinspritzung, Singlepoint-Saugrohreinspritzung). Jede dieser Konfigurationen bringt Vor- und Nachteile mit sich. Für die in diesem Projekt angestrebten Untersuchungen wurde eine Multipoint-Kanaleinspritzung installiert.

Die dem Zylinder zugeführte Wassermenge kann jedoch nicht beliebig hoch gewählt werden, da sie ab einem gewissen Maß die Verbrennungsstabilität negativ beeinflusst. Es sei angemerkt, dass durch die Installation einer Wassereinspritzung zusätzliche Komponenten und Bauraum erforderlich sind, was zu entsprechenden Mehrkosten führt.

Abgasrückführung

Die Abgasrückführung (AGR) an Ottomotoren erweist sich als effektive Maßnahme zur Reduzierung von Stickoxidemissionen, da sie die Verbrennungstemperatur senkt. Zudem kann sie auch zur Lastregelung herangezogen werden und Drosselverluste in der Teillast reduzieren. Der Inertgasanteil in der Zylinderladung hat wesentlichen Einfluss auf die Verbrennung. Mit steigender AGR-Rate verzögert sich die Verbrennung zunehmend und die zyklischen Schwankungen des indizierten Mitteldrucks erhöhen sich. Somit sind der max. AGR-Rate auch Grenzen gesetzt, da bei zu hohen Raten keine zufriedenstellende Verbrennung mehr möglich ist bzw. Zündaussetzer auftreten. Durch den Inertgasanteil in der Zylinderladung reduziert sich der Sauerstoffanteil darin. Daraus ergibt sich eine langsamere Flammenausbreitung woraus eine längere Brenndauer mit reduzierter Verbrennungstemperatur und geringerem Zylinderspitzenruck resultieren. Die Senkung der

Verbrennungstemperatur ergibt sich auch aus der höheren Ladungsmasse im Zylinder (Frischladung + Inertgas), welche die während der Verbrennung entstehende Wärme aufnimmt. Durch die Verwendung einer gekühlten Abgasrückführung ist man beim Ottomotor in klopfkritischen Kennfeldbereichen (später Zündwinkel) in der Lage, frühere Verbrennungsschwerpunktlagen zu fahren bzw. kann auf eine Kraftstoffanreicherung zur Gemischkühlung verzichtet werden, wodurch sich eine deutliche Steigerung des effektiven Wirkungsgrades ergibt. Zudem reduzieren sich die Wandwärmeverluste mit sinkender Verbrennungstemperatur [4].

Der Inertgasanteil der Zylinderladung lässt sich über eine internen und externen Abgasrückführung variieren. Bei der internen AGR wird der Restgasanteil durch die Ventilsteuerzeiten während des Ladungswechsels beeinflusst. Bei der externen AGR wird der Frischluft Abgas beigemischt. Hierfür gibt es unterschiedliche Konzepte wie das Abgas der Frischluft beigemischt werden kann (HD-AGR (HochDruck-AGR) und ND-AGR (NiederDruck-AGR)).

Für die in diesem Projekt angestrebten Ziele wurde die externe AGR in den Konfigurationen ND- und HD-AGR untersucht.

Kraftstoffreformierung

Da über das Abgas etwa ein Drittel der dem Motor zugeführten chemischen Energie abgeführt wird, ist man bestrebt sich dieser Energie im Hinblick auf eine weitere Effizienzsteigerung zu bedienen. Bei der Kraftstoffreformierung wird dem heißen Abgas in der AGR-Strecke Kraftstoff beigemischt und durch eine katalytische Reaktionen Synthesegas (H_2 , CO , CH_4) gebildet. Optimalerweise übersteigt durch diese katalytischen Reaktionen der Heizwert des gebildeten Synthesegases jenen des beigemischten Kraftstoffs. Durch diese Heizwertsteigerung ergibt sich ein höherer effektiver Wirkungsgrad am Verbrennungsmotor. Zudem verbessert sich die Verbrennungsstabilität mit Synthesegas gegenüber jener bei reiner AGR. Voraussetzung für eine effektive Reformierung ist eine ausreichend hohe Temperatur am Reformierbrick. Daraus lässt sich schließen, dass für eine effiziente Wirkungsgradsteigerung durch Kraftstoffreformierung möglichst hohe Abgastemperaturen mit gleichzeitig hohen AGR-Raten und eindosierten Kraftstoffmengen anzustreben sind [5]. Daraus lässt sich jedoch der Zielkonflikt aus erforderlichen hohen Abgastemperaturen bei gleichzeitig hohen AGR-Raten ableiten. Man ist somit bestrebt, die Komponenten der Reformier-AGR möglichst kompakt und motornah zu platzieren, um sämtliche Wärmeverlust gering zu halten.

In diesem Projekt wurde die Kraftstoffreformierung in unterschiedlichen AGR-Konfigurationen untersucht. Es stellte sich heraus, dass in der Konfiguration ND/ND (ND-Entnahme und ND-Einspeisung) keine ausreichend hohen Abgastemperaturen am Reformier erreicht wurden, weshalb das Hauptaugenmerk auf die HD/HD-Konfiguration (HD-Entnahme vor Turbine und HD-Einspeisung) gelegt wurde.

3.2 Prüfstands Aufbau am Motorprüfstand

Abbildung 1 zeigt den schematischen Prüfstands Aufbau des 4-Zylinder Ottomotors für die Basisuntersuchungen. Die wichtigsten Messeinrichtungen sind die Kraftstoffverbrauchsmessung, die Drehmoment/Drehzahlmesseinrichtung und die Motordruckindizierung, bestehend aus einer Hochdruckindizierung aller 4 Zylinder und der Niederdruckindizierung im Saugrohr und vor der Turbine. Ebenso wurden sämtliche Drücke und Temperaturen am Motor messtechnisch erfasst und mittels Abgasmesstechnik die Komponenten CO, CO₂, O₂, NO, NO_x und HC aufgenommen.

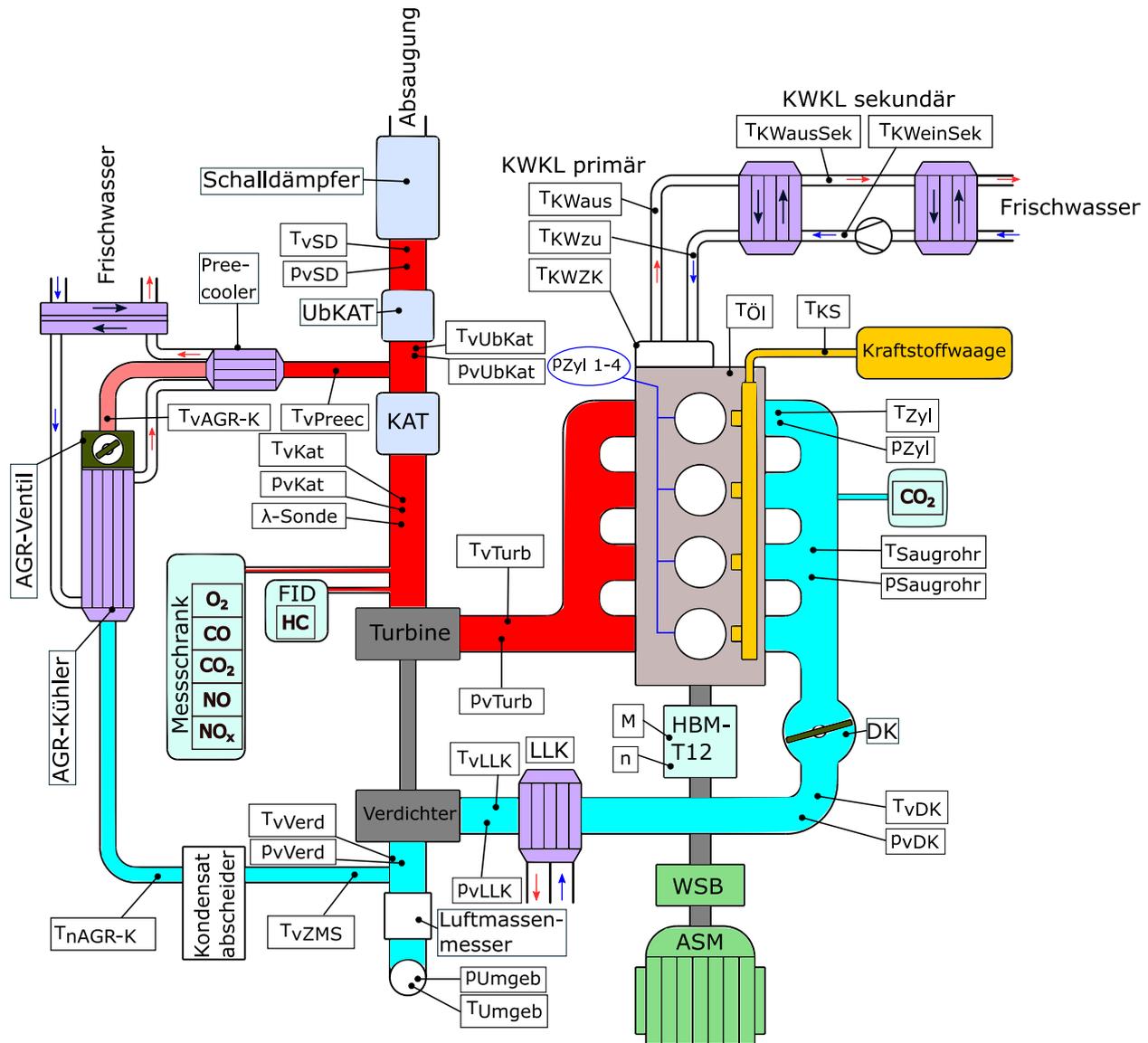


Abbildung 1: schematische Darstellung des Motorprüfstands für AGR-Untersuchungen in der Konfiguration ND/ND

Nach Abschluss der Messungen am Basismotor mit Verdichtungsverhältnis $\epsilon = 10,5$ wurde ein neuer Motor mit Miller-Brennverfahren und Verdichtungsverhältnis $\epsilon = 12,5$ für die weiteren Untersuchungen aufgebaut. Das Verdichtungsverhältnis wurde im Zuge der Untersuchungen weiter auf $\epsilon = 13,5$ angehoben. Gleich wie der Basismotor wurde auch dieser Motor für entsprechende Untersuchungen mit

Abgasrückführung adaptiert. Für Untersuchungen mit ND-AGR wurde eine Entnahmestelle nach dem motornahen Katalysator verbaut und eine Zumischstelle vor dem Verdichter eingerichtet. Des Weiteren war für die AGR-Messungen in der ND-Konfiguration ein Kondensatabscheider erforderlich.

Trotz der Verwendung eines Kondensatabscheiders nach dem AGR-Kühler konnte der Verdichter nicht zur Gänze vor Tropfenschlag geschützt werden. Wie man in Abbildung 2 erkennt, kam es an den Verdichterradspitzen zu Materialabtragungen.

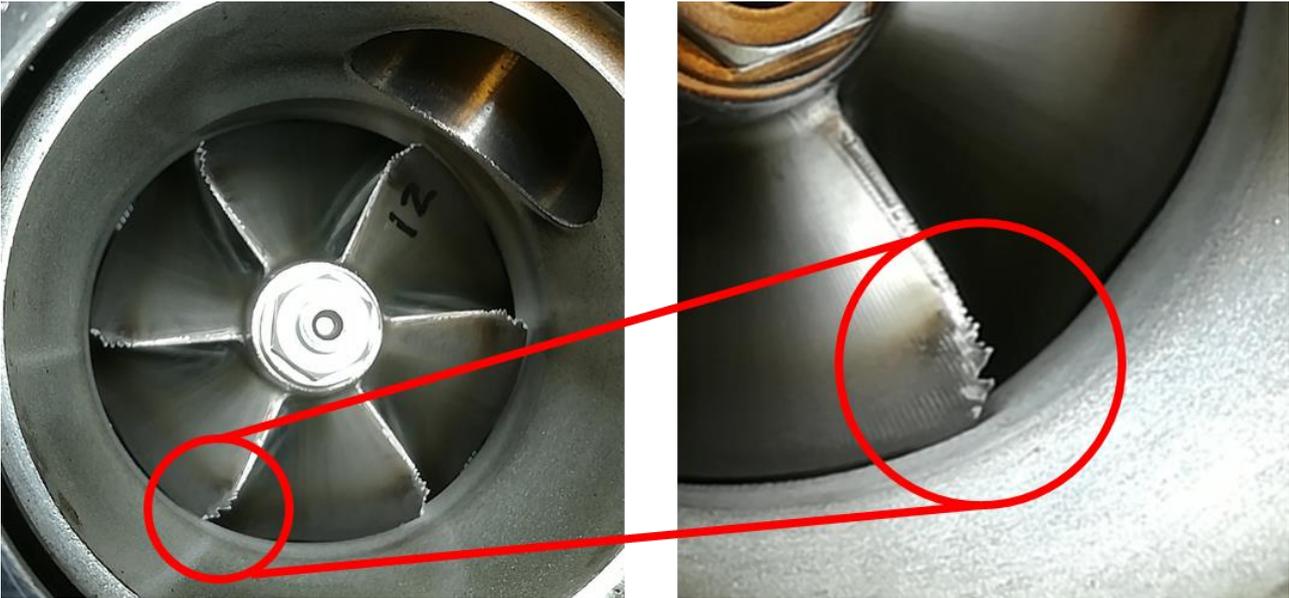


Abbildung 2: Schäden an den Verdichterradspitzen durch Tropfenschlag aus der ND-Abgasrückführung

Im Anschluss an die AGR-Variation wurde das Saugrohr mit H₂O-Injektoren bestückt und eine entsprechende Infrastruktur für H₂O-Einspritzung am Prüfstand aufgebaut. Die Wassereinspritzventile wurden so am Saugrohr positioniert, dass wenig Wandbenetzung auftritt und das Wasser möglichst direkt den Brennräumen zugeführt wird. Die Versorgung der Wassereinspritzventile mit einem ausreichend hohen Raildruck wurde über einen mit Druckluft beaufschlagten Druckspeicher bewerkstelligt. Die saugsynchrone Ansteuerung der H₂O-Ventile erfolgte über eine AVL-EngineTimingUnit „ETU“. Die Wassermenge wurde über die Öffnungsdauer der Wassereinspritzventile (°KW) gestellt und messtechnisch erfasst.

Um die Vorteile beider Maßnahmen (AGR und H₂O-Einspritzung) in Kombination zu beurteilen, wurde in ausgewählten Kennfeldpunkten neben der AGR-Rate (in der Konfiguration ND/ND) (=NiederDruck-Entnahme nach Turbolader und NiederDruck-Einspeisung vor Verdichter) die H₂O-Menge verändert. Bei AGR-Raten von jeweils 10%, 15% und 20% wurde die H₂O-Menge variiert. Nach Abschluss der AGR-H₂O-Variationen wurde die AGR-Strecke für einen Betrieb mit Kraftstoffreformierung adaptiert. Es wurden verschiedene Konfigurationen der Einbindung des Reformers in den Abgasstrang untersucht (ND-Entnahme und ND-Einspeisung, HD-Entnahme und ND-Einspeisung, HD-Entnahme vor Turbine und HD-Einspeisung) wobei sich die Konfiguration mit HD-Entnahme vor Turbine und HD-Einspeisung nach der Drosselklappe auf Grund der höchsten Reformertemperaturen als beste Variante herausstellte.

Energieforschungsprogramm – 3. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Abbildung 3 zeigt eine schematische Darstellung der Reformer-AGR-Strecke in der Konfiguration HD/HD. Für die Reformer-Untersuchungen war es notwendig, sämtliche Stellgrößen im Steuergerät frei wählen zu können, weshalb mit einem freiprogrammierbaren Steuergerät der Fa. AVL gearbeitet wurde.

Das Abgas wurde an einem Adapter zwischen Krümmer und Turbolader entnommen und dem Saugrohr nach der Drosselklappe zugeführt. Um ein Maximum an CO- und H₂-Konzentrationen zu generieren, war es notwendig, den Motor in hohen Lastpunkten zu betreiben. Da in höheren Lastpunkten jedoch kein ausreichendes Druckgefälle von der Abgasseite zur Saugrohrseite bestand, musste durch eine Adaption der Einlassnockenwelle dieses Druckgefälle herbeigeführt werden. Hierfür wurde die Einlassnockenwelle auf spätes Einlass-Schließen gestellt.

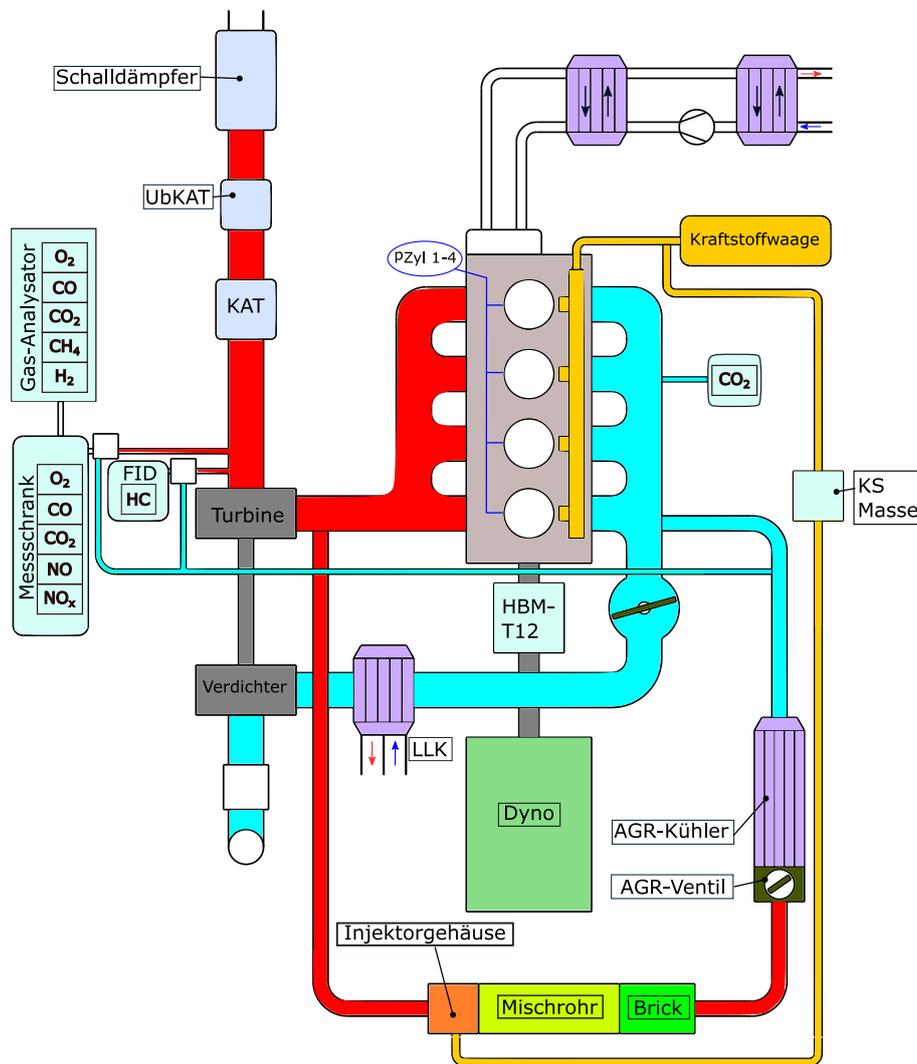


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Prüfstandsbaus während der Reformeruntersuchungen

Für den Versuch am Motorenprüfstand wurde eine Einheit aufgebaut basierend auf dem Brick, dessen Beschichtung für Benzin optimiert wurde. Die Bauweise ist der Einheit für den Synthesegasprüfstand ähnlich. Die fertige Einheit ist auf dem Foto in Abbildung 4 dargestellt. Für die Optimierung der

Energieforschungsprogramm – 3. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Gemischtaufbereitung wurde später noch ein Mischrohr zwischen dem Eintrittselement (mit dem Einspritzventil) und dem Brick eingebracht.

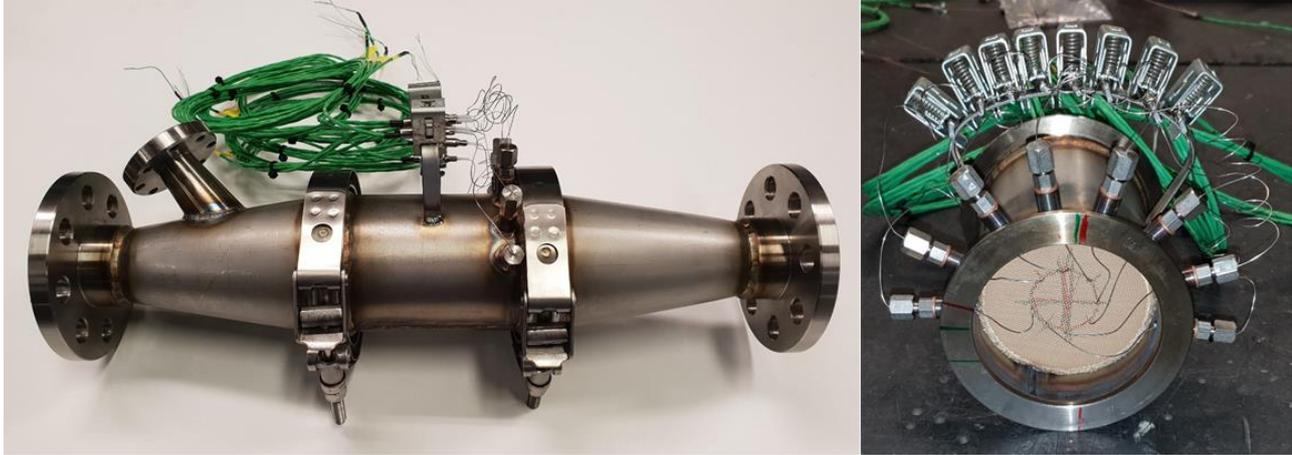


Abbildung 4: Reformereinheit vorbereitet für Versuche am Motorenprüfstand (Bild rechts: Darstellung von Temperatursensoren im Brick die von der Auslasseite eingeschoben sind)

Wie man in Abbildung 5 erkennt, wurden sämtliche Komponenten in der AGR-Leitung thermisch isoliert.

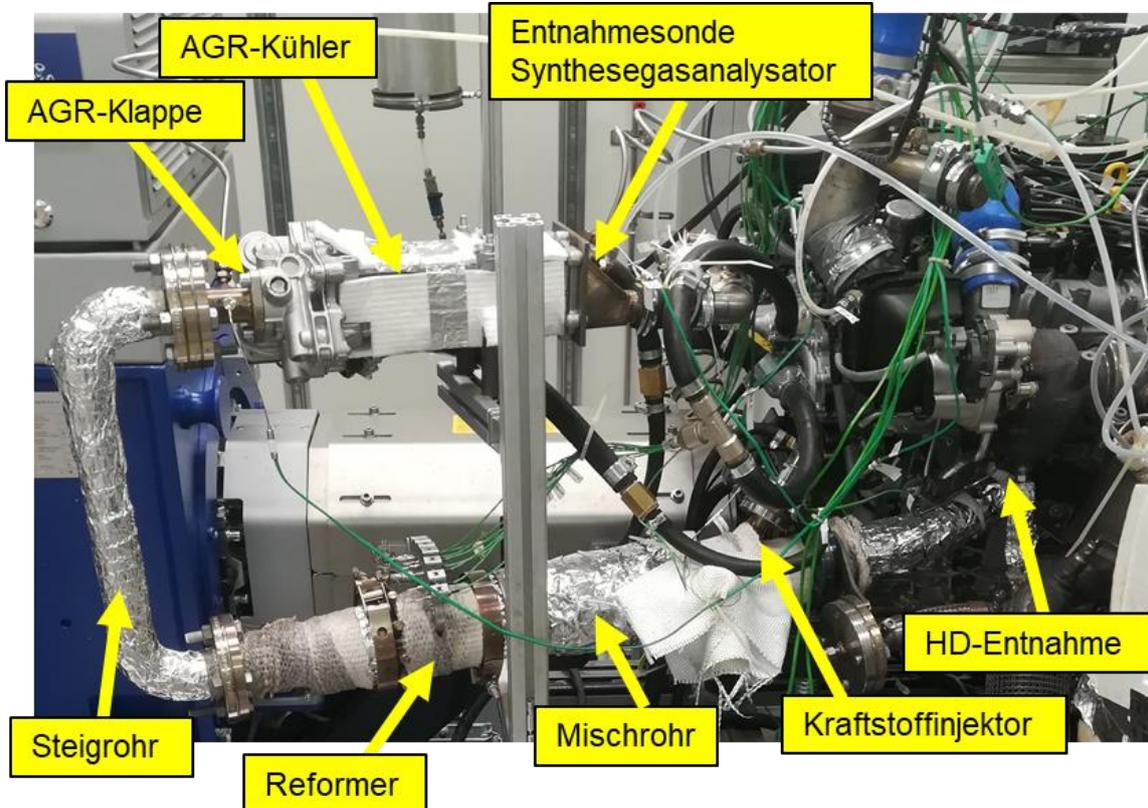


Abbildung 5: Reformerstrecke in der Konfiguration HD/HD

3.3 Prüfstandsaufbau am Synthesegasprüfstand

Die Reformereinheit besteht aus dem Katalysatorelement, einem keramischen Grundträger mit entsprechender Beschichtung und einem Kraftstoff-Dosierelement am Einlass. Mit dieser Bauweise ist es möglich, im Betrieb die Veränderungen nach dem Einschalten der Kraftstoffeinspritzung direkt zu beobachten. Für die Eindosierung des Kraftstoffes wurde ein herkömmlicher PFI Injektor verwendet, der in ein gekühltes Gehäuse eingebaut wurde. Abbildung 6 zeigt die schematische Darstellung der Reformereinheit mit den Messstellen.

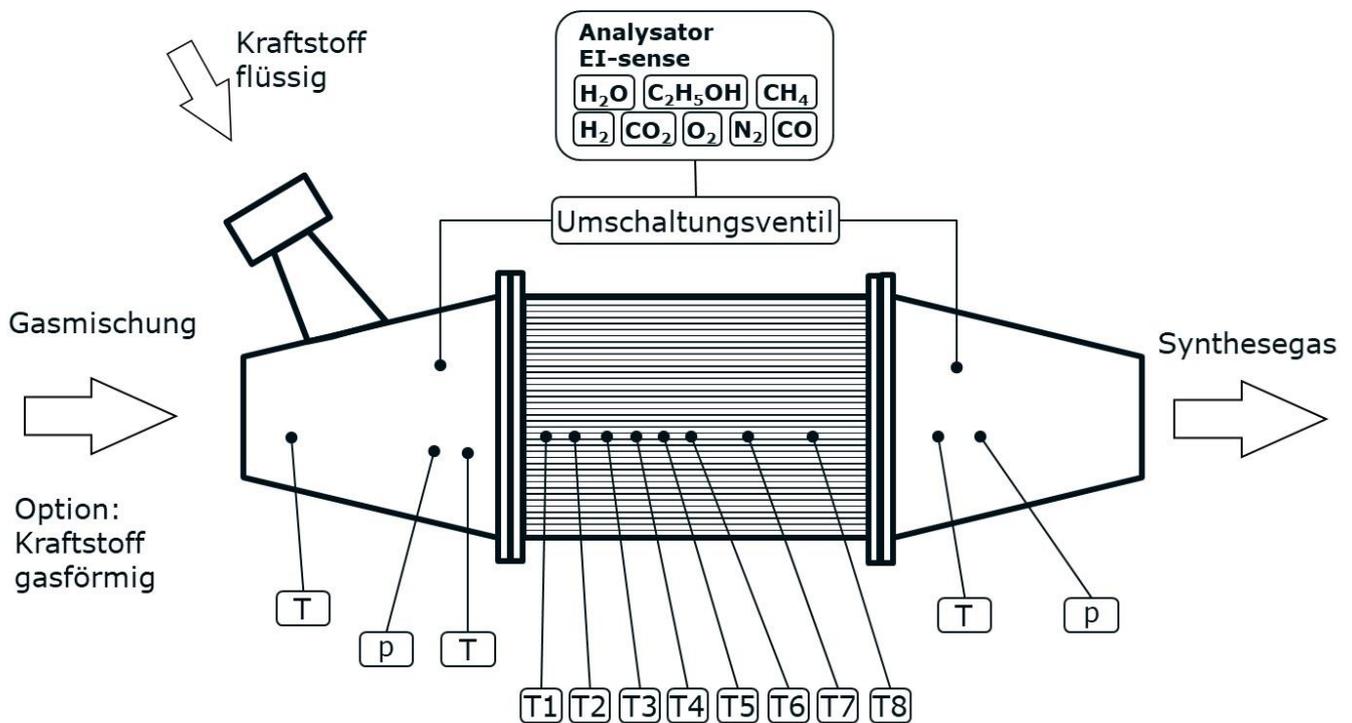


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Reformereinheit

Für die Versuche am Synthesegasprüfstand wurde eine Beschichtung ausgewählt, die mit Ethanol (C₂H₅OH) gut funktioniert.

Für die Versuche mit dem Reformer am Syntheseprüfstand wurde die Zusammensetzung des Abgases (vom Verbrennungsmotor) durch das Mischen der Gaskomponenten: CO, CO₂, CH₄ (simuliert alle HC Komponenten im Abgas), N₂ und Luft simuliert. Wasserdampf wurde separat eindosiert und der Gesamtgasdurchfluss eingestellt. Die Zusammensetzung wurde für alle Betriebspunkte gleich gehalten - die Werte sind in

Energieforschungsprogramm – 3. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Tabelle 1 angeführt.

Tabelle 1: Konzentrationen der Komponenten am Synthesegasprüfstand

CH4	CO2	CO	NOx	O2	H2O	N2
0,23	13,59	0,36	0,05	0,96	20,39	64,42
Vol%						

Der Kraftstoff wurde separat eingespritzt – dabei wurde die Einspritzmenge variiert. Die Versuche wurden unter 1 bar abs. Druck ausgeführt.

Für die Analyse der Gaszusammensetzung wurde ein Messgerät der Firma V&F verwendet (EI-sense), welches die Konzentrationen von Wasserstoff und diversen anderen Komponenten misst. Bei der Analyse wurde der Fokus auf jene Komponenten gelegt, die zum Heizwert des Synthesegases beitragen, wie H₂, CO, CH₄ und C₂H₅OH (unreformierter Kraftstoff). Mit entsprechender Umschaltung war es möglich, die Konzentrationen mit einem Messgerät vor und nach dem Katalysator zu messen - jeweils für ein und denselben Betriebspunkt.

Um den thermochemischen Prozess so gut wie möglich abzubilden, wurden mehrere Temperatursensoren verwendet. Insbesondere wurden in den Katalysator acht Sensoren durch Einschieben in einzelne Kanäle (Zellen) des Bricks, siehe Abbildung 4, platziert. Für jeden Sensor wurde eine andere Einschublänge ausgewählt, siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** (Sensoren T1-T8). Damit ist es möglich, den Temperaturverlauf über die Länge des Brick zu erstellen. Es wurde erwartet, dass in der ersten Hälfte des Brick stärkere Temperaturgradienten entstehen - deshalb wurden die Abstände asymmetrisch ausgewählt.

3.4 Testverlauf Synthesegasprüfstand

Der Versuchsplan beinhaltet Messungen mit verschiedenen Gasdurchsätzen, bei verschiedenen Temperaturen und verschiedenen Mengen an Kraftstoff. In

Tabelle 2 ist der Variationsbereich der drei Hauptparametern definiert.

Tabelle 2: Übersicht der Testmatrix (Siedetemperatur von Ethanol beim Einspritzdruck von 5 bar ist ca. 140°C

Gas		Kraftstoff	
Massendurchsatz	Temperatur	Massendurchsatz	Temperatur
kg/h	°C	kg/h	°C
14,4-36	300-600	0,5-4,0	gleich wie Gas
28	500	2	25
28	400	1,0-3,0	60-80

Um den Einfluss der Gemischaufbereitung sowie der Verdampfungsenthalpie zu analysieren, wurde der Kraftstoff in flüssiger Form mit Variationen der Temperatur sowie gasförmig eindosiert.

Die Messergebnisse mit vorverdampftem und vorgeheiztem Kraftstoff wurden für die Parametrierung des 1D-Modells der Reformereinheit verwendet.

4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Ziel des Projektes war es, in einem eingeschränkten Kennfeldbereich durch Motormaßnahmen wie beispielweise Verdichtungsanhebung, verlängerte Expansion (Miller), verbesserte Aufladung und höhere AGR-Raten durch Synthesegasbeimischung über Benzinreformierung mittels Abgasenergie den Wirkungsgrad in Richtung 45% zu heben. Im Zuge des Projekts konnten alle geplanten Ansätze umgesetzt und untersucht werden. In Abbildung 7 sind die eingangs festgelegten Maßnahmen samt angestrebtem Entwicklungsweg dargestellt.

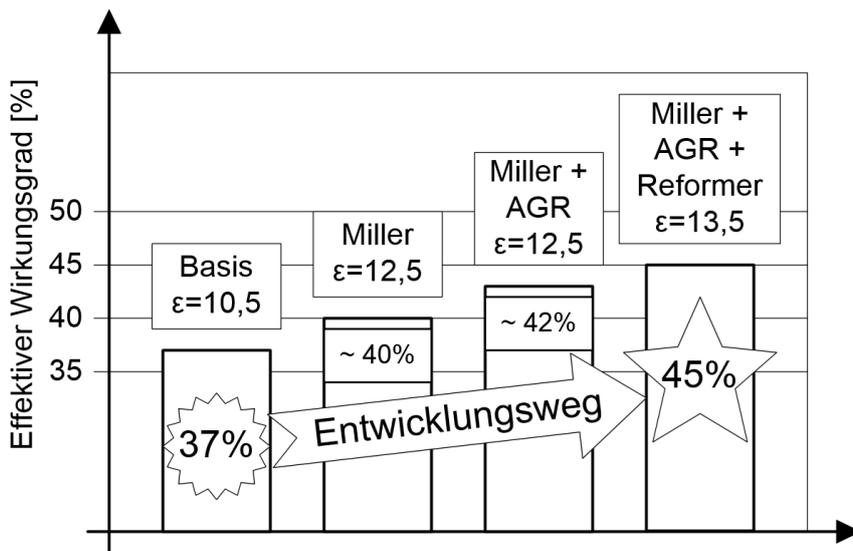


Abbildung 7: Geplante Maßnahmen zur Erreichung eines effektiven Wirkungsgrades von 45%

Die Untersuchungen zeigten, dass sämtliche Einzelmaßnahmen wirksam und die prognostizierten Wirkungsgradsteigerungen erreicht werden konnten. Allerdings stellte sich heraus, dass die Kombination sämtlicher Maßnahmen nicht zu einer additiven Wirkungsgradsteigerung führte. Einer der Gründe dafür - speziell in Hinblick auf die Benzinreformierung - war, dass durch die Wirkungsgradverbesserungen die Verluste verringert und damit auch die Abgastemperatur gesenkt wurde. Damit waren die Voraussetzungen für eine effiziente Spaltung von Benzin in Synthesegas mittels Abgasenergie nicht mehr in ausreichendem Maße gegeben.

4.1 Experimentelle Untersuchung am Basismotor

Als Ausgangsbasis des Projekts diente ein 4-Zylinder-Ottomotor mit einem Verdichtungsverhältnis von 10,5:1, variablem Nockentrieb, Direkteinspritzung und einer Wastegate-Turboaufladung. In der Basisvermessung konnte ein maximaler Wirkungsgrad von 37,5% bei einer Drehzahl von 2750 min⁻¹ und einem effektiven Mitteldruck von 14 bar erzielt werden. Als Resultat der Basisvermessung ging ein Kennfeld des effektiven Wirkungsgrades (aufgetragen über der Motordrehzahl und dem effektiven Mitteldruck) hervor, siehe Abbildung 8.

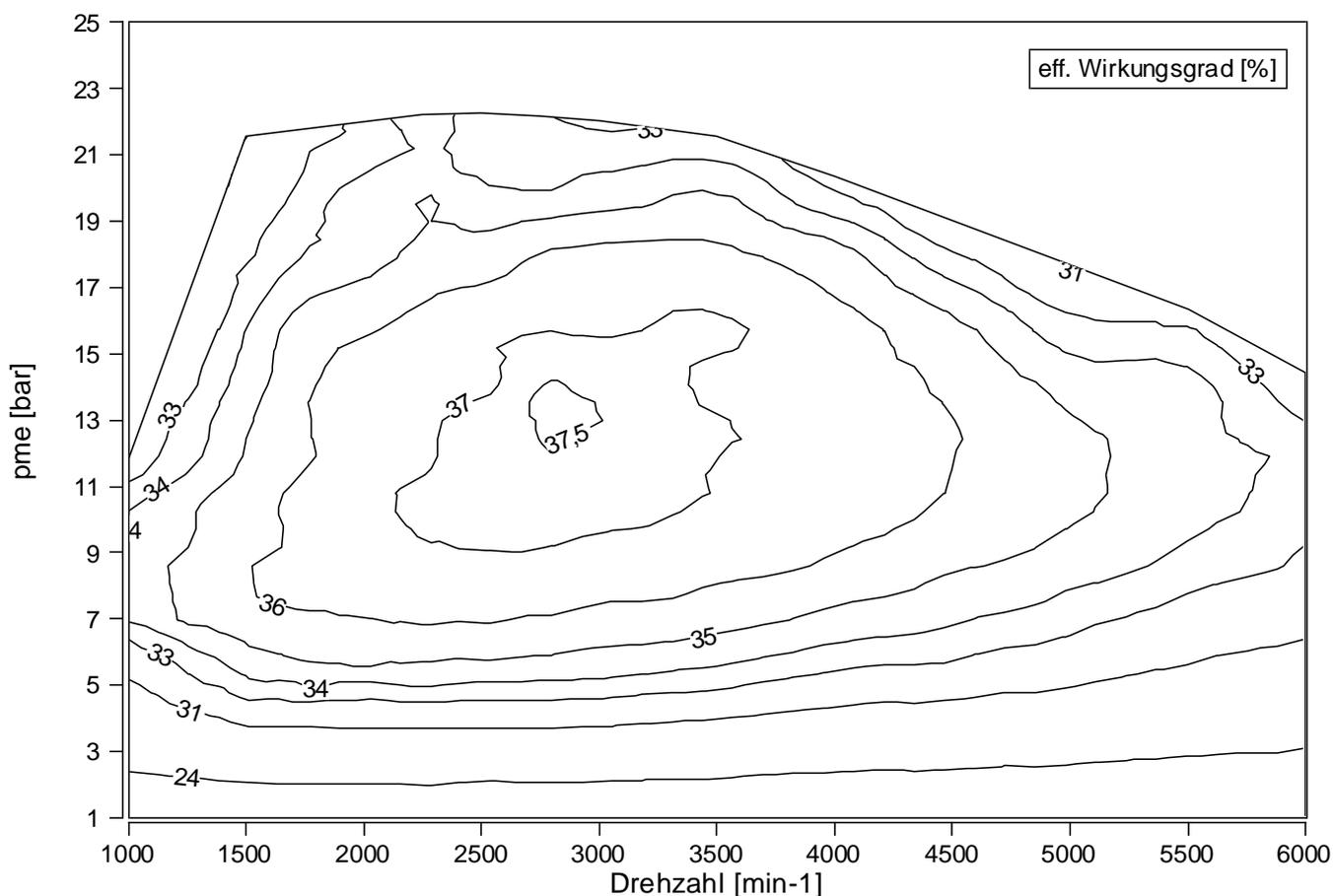


Abbildung 8: Kennfeld - effektiver Wirkungsgrad des Basismotors

In weiterer Folge wurde durch eine Adaption des Abgasstrangs eine Abgasrückführung am Basismotor appliziert. Das Abgas wurde nach dem motornahen Katalysator entnommen, gekühlt, und dem Frischluftsystem vor dem Verdichter wieder zugeführt.

In dieser Konfiguration wurde eine AGR-Variation im Bereich des max. Wirkungsgrades aus dem Basiskennfeld durchgeführt. Durch die Verwendung der Niederdruck-AGR war es möglich, einen um 2,7% höheren max. eff. Wirkungsgrad zu erzielen. Exemplarisch für die AGR-Variation sind in Abbildung 9 die Verläufe des eff. Wirkungsgrades und spez. Kraftstoffverbrauchs in Abhängigkeit von der AGR-Rate dargestellt.

Energieforschungsprogramm – 3. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

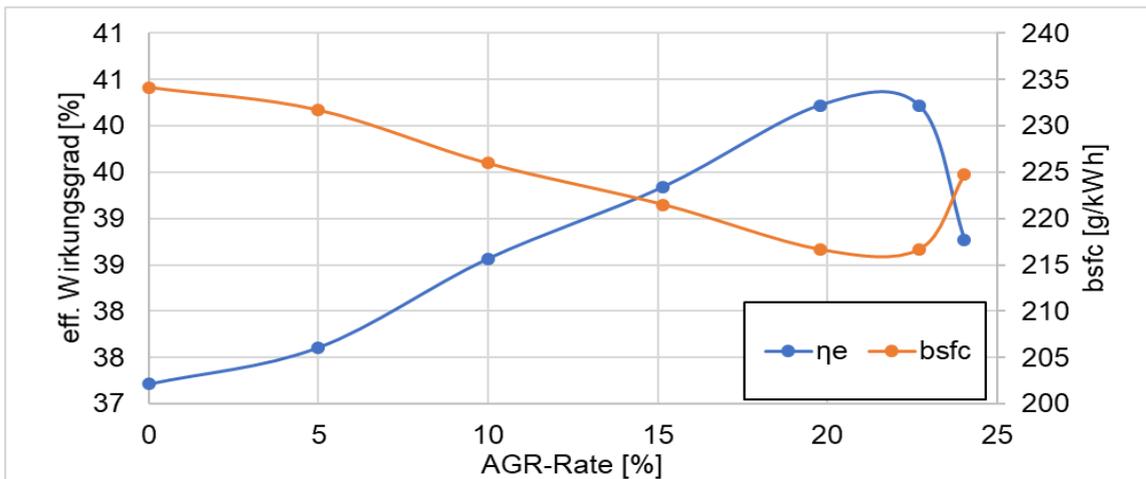


Abbildung 9: AGR-Variation am Basismotor mit Verdichtungsverhältnis $\epsilon = 10,5$: eff. Wirkungsgrad und spez. Kraftstoffverbrauch aufgetragen über der AGR-Rate

Die Wirkungsgradsteigerung basiert in diesem Fall auf der Ladungsverdünnung mit Inertgas (gekühlte Abgasrückführung AGR) und einer daraus resultierenden geringeren Klopfneigung. Dadurch kann der Zündwinkel in Richtung früh verlegt werden, wodurch sich auch die Verbrennungsschwerpunktlage (MFB50% = crank angle at which 50% of the fuel mass fraction has burned) in Richtung der optimalen Schwerpunktlage von etwa 8°KWnZOT verschiebt. Dies ist ohne die gekühlte AGR in den höheren Lastpunkten durch das Auftreten von klopfenden Verbrennungen (führt zu mechanischen Schäden am Motor) nicht möglich.

Um den Einfluss der Abgasrückführung auf die Abgastemperatur und die NOx-Rohgaskonzentration zu verdeutlichen sind in Abbildung 10 die Verläufe (zugehörig zu Abbildung 9) dieser über der AGR-Rate dargestellt.

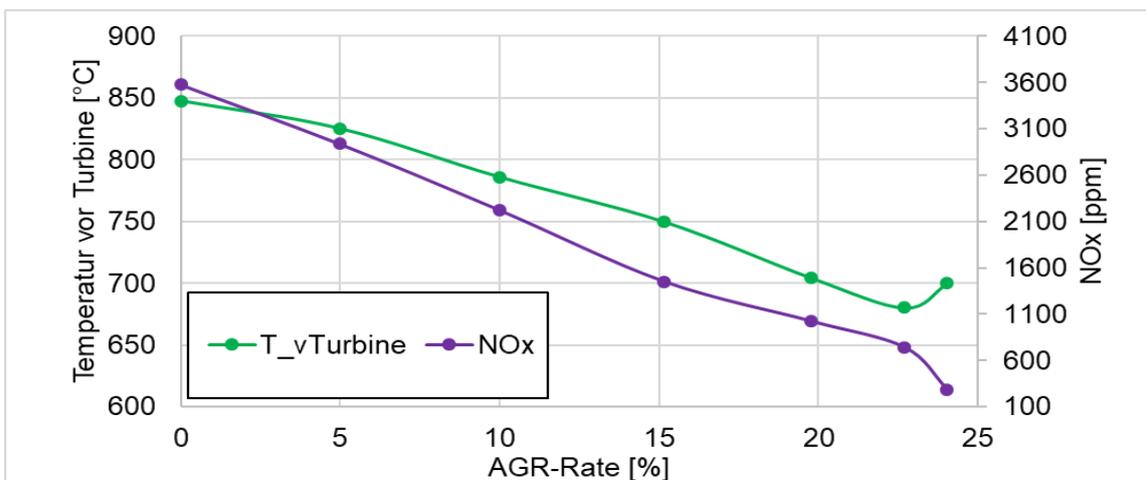


Abbildung 10: AGR-Variation am Basismotor mit Verdichtungsverhältnis $\epsilon = 10,5$: Temperatur vor der Turbine und NOx-Rohgaskonzentrationen aufgetragen über der AGR-Rate

4.2 Experimentelle Untersuchung am Miller-Motor

In weiterer Folge wurde das Verdichtungsverhältnis angehoben. Dies erfolgte durch Einsatz einer weiteren Variante des Motors aus der gleichen Motorenfamilie, einem 4-Zylinder-Ottomotor mit 96kW, einem Verdichtungsverhältnis von 12,5:1, Miller-Brennverfahren, variablem Nockentrieb und einem VTG-Turbolader. Dieser Motor wurde für sämtliche nachfolgende Untersuchungen mit Abgasrückführung, erhöhtem Verdichtungsverhältnis, Wassereinspritzung und Kraftstoffreformierung herangezogen. Zu Beginn der Untersuchungen wurde gleich wie beim Basismotor ein Basiskennfeld gefahren. Daraus ging ein maximaler eff. Wirkungsgrad von 39,2% bei einer Drehzahl von 3500 min⁻¹ und einem eff. Mitteldruck von 12 bar hervor.

Im Anschluss an die Untersuchungen mit Serienverdichtungsverhältnis wurden Kolben mit einem erhöhten Verdichtungsverhältnis von 13,5:1 verbaut. Damit wurde ein Kennfeld bei 0% AGR gefahren und ein maximaler Wirkungsgrad von 39,6% erzielt.

Als weiter Maßnahme wurde eine H₂O-Einspritzung untersucht. Ähnlich wie bei der Abgasrückführung wird durch das eingebrachte Wasser die Brennraumtemperatur gesenkt und damit die Klopfneigung reduziert. Für die Untersuchungen wurden Wassereinspritzventile an den Saugrohrkanälen des Motors appliziert und über ein eigenes Steuergerät betrieben. Wie bei den anderen Versuchsläufen wurde die eingespritzte H₂O-Menge in den Betriebspunkten mit den höchsten Wirkungsgraden variiert. Bei Wasserraten von 100% bezogen auf die eingespritzte Kraftstoffmasse konnte der max. Wirkungsgrad (gegenüber der Basismessung mit erhöhtem Verdichtungsverhältnis $\epsilon = 13,5$) um 0,7% gesteigert werden. Abbildung 11 zeigt exemplarisch das Potential der Wirkungsgradsteigerung durch Wassereinspritzung.

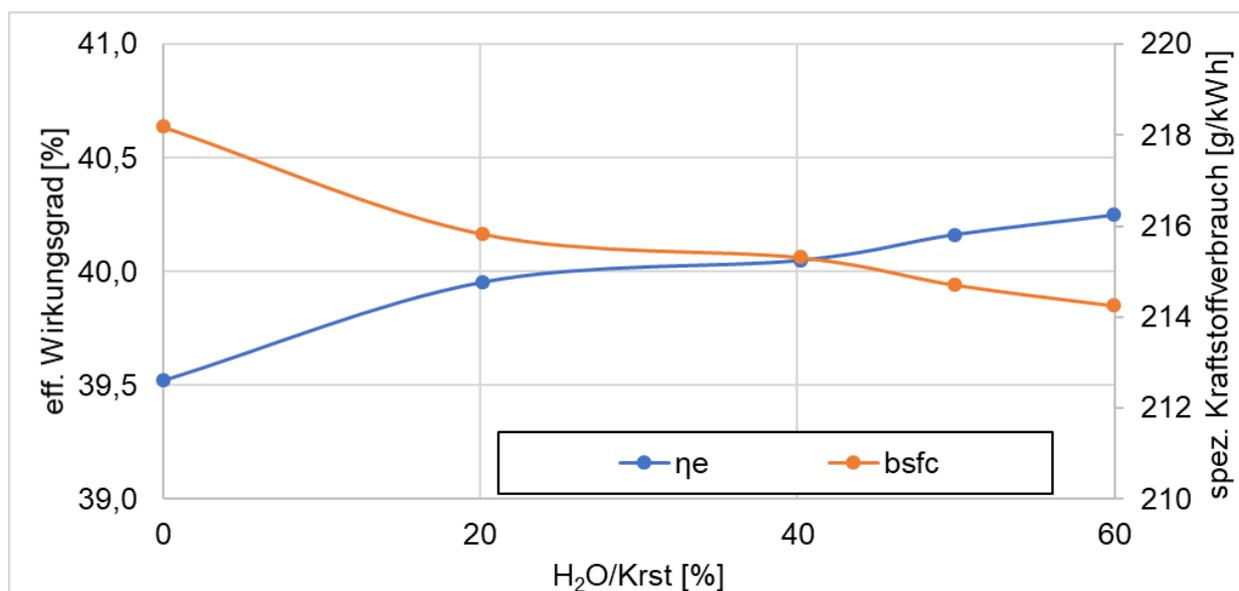


Abbildung 11: H₂O-Variation am Versuchsmotor mit Verdichtungsverhältnis $\epsilon = 13,5$: eff. Wirkungsgrad und spez. Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit vom H₂O - zu Kraftstoffmasse-Verhältnis

In weiterer Folge wurde das Potential einer Kombination von Wassereinspritzung und gekühlter Abgasrückführung untersucht. Da beide Ansätze ähnliche Mechanismen und Auswirkungen auf die Verbrennung aufweisen, konnte in Summe keine weitere Wirkungsgradsteigerung erreicht werden. Zudem steigen sowohl bei Abgasrückführung als auch Wassereinspritzung der Zündverzug und die Brenndauer, sodass relativ bald die Grenzen einer stabilen Verbrennung erreicht wurden.

Ein Hauptfokus im Projekt war die Anwendung und Untersuchung der Kraftstoffreformierung mit Abgasenergie. Ziel dieser Untersuchungen war die Steigerung des eff. Wirkungsgrades durch im Reformer generiertem Synthesegas mit möglichst hohen H_2 - und CO -Konzentrationen. Es wurden unterschiedliche Integrationsvarianten im Abgasstrang untersucht, wobei sich die Einbindung über Hochdruck-AGR am erfolversprechendsten herausstellte. Dies ist mit der deutlich höheren Abgastemperatur vor dem Turbolader zu begründen. Um ein ausreichendes Druckgefälle von der Abgasseite zur Saugrohrseite des Motors zu erreichen, war es notwendig, Anpassungen an den Ventilsteuerzeiten vorzunehmen, was jedoch zu einer Verschlechterung des eff. Wirkungsgrades führte. Aus diesem Grund war es mit dem Reformer nicht möglich, den bislang erzielten max. Wirkungsgrad weiter zu erhöhen. Es konnten jedoch wertvolle Ergebnisse zur Charakterisierung des Reformerverhaltens generiert werden. Abbildung 12 zeigt die Wirkungsgrad- und Mitteldrucksteigerung bei einer Variation der eingespritzten Kraftstoffmasse vor dem Reformer.

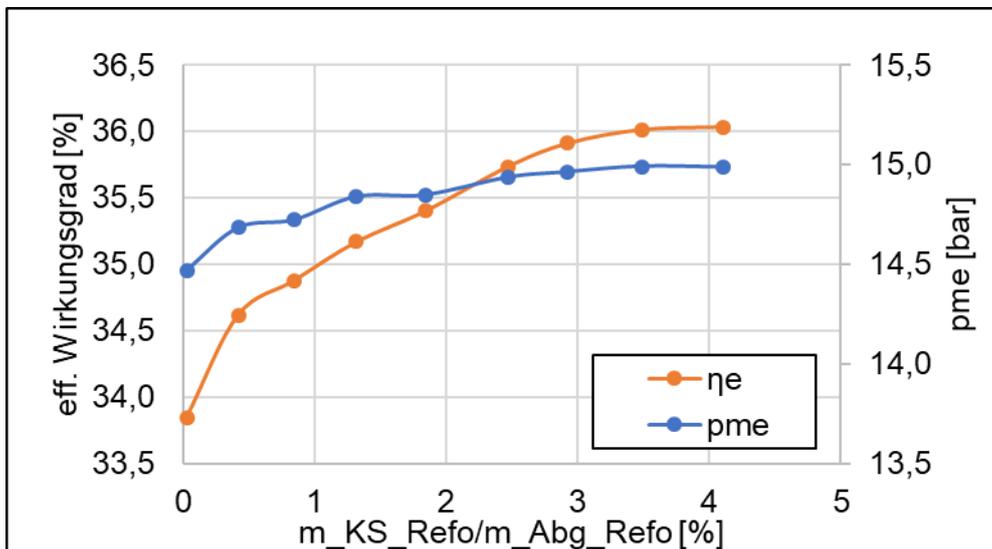


Abbildung 12: Reformeruntersuchung am Versuchsmotor mit Verdichtungsverhältnis $\epsilon=13,5$: eff. Wirkungsgrad und eff. Mitteldruck in Abhängigkeit der eingespritzten Kraftstoffmasse bezogen auf den AGR-Massenstrom

In der Abbildung 13 sind die Verbrennungsgrößen und Synthesegaskonzentrationen der Reformeruntersuchung aus Abbildung 12 dargestellt. Man erkennt trotz gleichbleibendem Zündwinkel eine deutliche Verkürzung der Brenndauer und damit einhergehend eine Verschiebung der Verbrennungsschwerpunktlage MFB50% zu früheren Zeitpunkten (Optimum bei ca. $8^\circ KWnZOT$). Die Verkürzung der Brenndauer ist mit dem steigenden H_2 -Anteil im Synthesegas zu begründen. Aus den Verläufen der Synthesegaskomponenten geht hervor, dass sich bei ca. 3,5 – 4 % (Kraftstoffmasse am

Reformer bezogen auf AGR-Masse) ein Peak der CO- und H₂-Konzentrationen bildet. Eine weitere Erhöhung der Kraftstoffmasse am Reformer lässt die H₂- und CO-Konzentrationen wieder sinken und die Konzentration an unverbrannten Kohlenwasserstoffen THC (Total-Hydro-Carbon) ansteigen (=unreformierter Kraftstoffdampf).

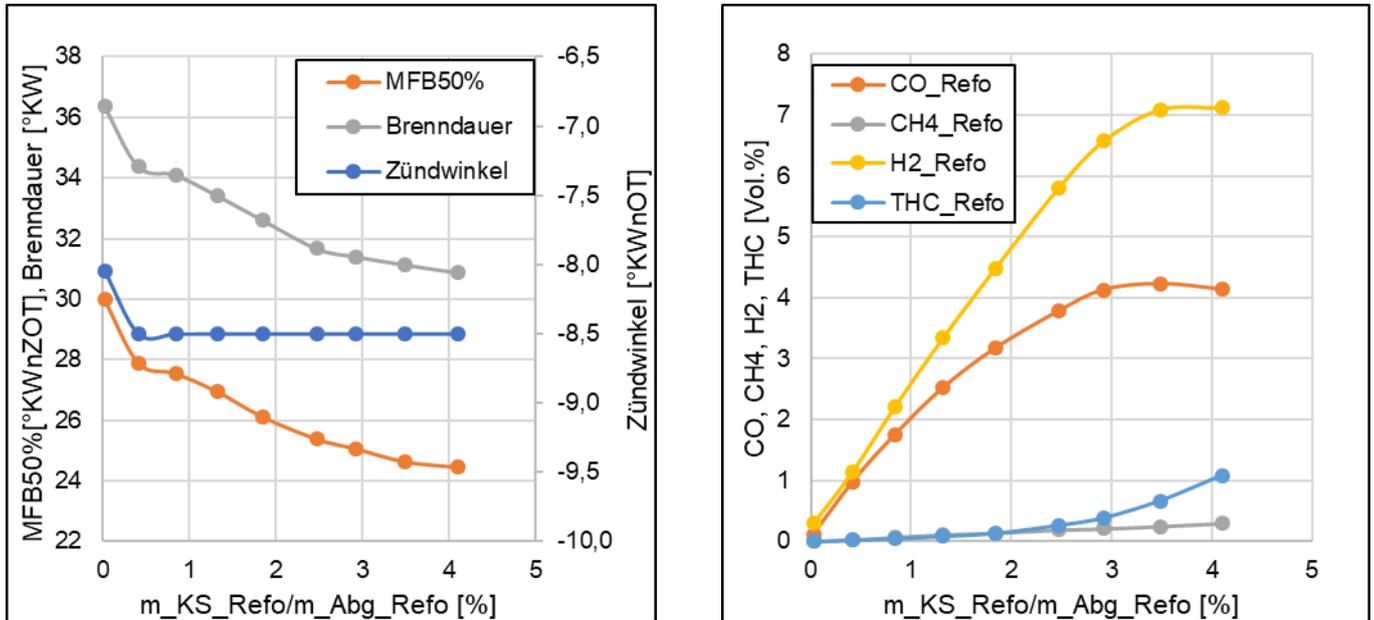


Abbildung 13: Reformeruntersuchung am Versuchsmotor mit Verdichtungsverhältnis $\epsilon=13,5$: Verbrennungsgrößen und Synthesegaskonzentrationen aufgetragen über dem Verhältnis von Kraftstoffmasse am Reformer zu AGR-Massenstrom

Aus den durchgeführten Untersuchungen geht hervor, dass alle getroffenen Maßnahmen hohes Potential zur Steigerung des eff. Wirkungsgrades haben. Es zeigte sich jedoch, dass sich die Maßnahmen gegenseitig beeinflussen und nicht generell addierbar sind. Mit den gewonnenen Erkenntnissen konnte eine wertvolle Ergebnisbasis generiert werden, auf welcher nachfolgende Untersuchungen aufbauen können. In Abbildung 14 sind die getroffenen Maßnahmen mit zugehörigem Potential zur Steigerung des max. Wirkungsgrades dargestellt. Aus der Abbildung geht hervor, dass mit reiner Abgasrückführung der höchste Wirkungsgrad erzielt werden konnte. Um weitere Steigerungen mit der Verwendung eines Reformers und Miller-Brennverfahren zu erzielen, wird es notwendig sein, alternative Wege zu finden, um dem Saugrohr das reformierte Abgas zuzuführen. Dabei könnte sich ein elektrischer Verdichter als sinnvoll erweisen. Eine weitere Möglichkeit würde sich mit einer anderen Beschichtung des Reformerbricks ergeben, wenn man damit die Arbeitstemperatur des Reformers senken könnte.

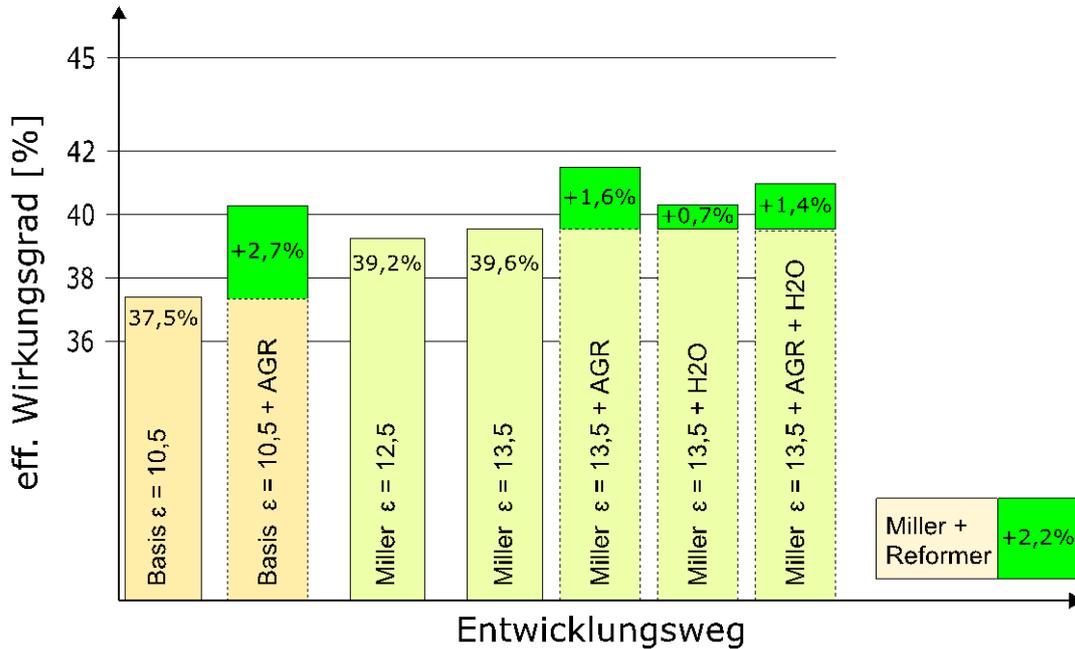


Abbildung 14: Im Rahmen des Projekts durchgeführte Untersuchungen mit zugehörigem Steigerungspotential

4.3 Experimentelle Untersuchung am Synthesegasprüfstand

Parallel zum Motorenprüfstand wurde der Reformierungsprozess detailliert am Synthesegasprüfstand untersucht. Dabei wurde ein besonderer Fokus auf die beiden Effekte:

- Die Konzentration von Wasserstoff am Austritt vom Reformer
- Die Energierückgewinnung durch endothermische chemische Reaktionen

gelegt, mit denen die angestrebte Wirkungsgradsteigerung des Verbrennungsmotors erreicht werden sollte. Die Betriebsparameter wurden bei den Tests den Rahmenbedingungen des Verbrennungsmotors z.B. der Abgastemperatur angepasst. Für die Maximierung der erwähnten Effekte wurde der in den Reformer eindosierte Kraftstoff vollständig vorverdampft und auf die gleiche Temperatur wie das Gas vorgeheizt. Als Kraftstoff wurde für diese Basisuntersuchungen reines Ethanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) verwendet, um die Gasanalyse mit der vorhandenen Messtechnik möglich zu machen. Benzin ist im Gegensatz eine Mischung aus einer großen Anzahl verschiedener Kohlen-Wasserstoff-Verbindungen (C_xH_y), was den Mess- und Auswerteaufwand deutlich erhöhen würde. In der Abbildung 15 ist die Wasserstoffkonzentration am Austritt des Reformers gezeigt, bei einem konstanten Gasdurchsatz von 28 kg/h (entspricht AGR Masse am Vollmotor) in Abhängigkeit von der eingespritzten Kraftstoffmenge für verschiedene Gastemperaturen am Eintritt. Prinzipiell steigt mit der Kraftstoffmenge auch die Produktion von Wasserstoff, jedoch erreicht die Wasserstoffkonzentration ein temperaturabhängiges

Plateau, ab welchem keine weitere Steigerung mehr erfolgt. Damit sind die möglichen Betriebspunkte für Tests am Vollmotor teilweise definiert.

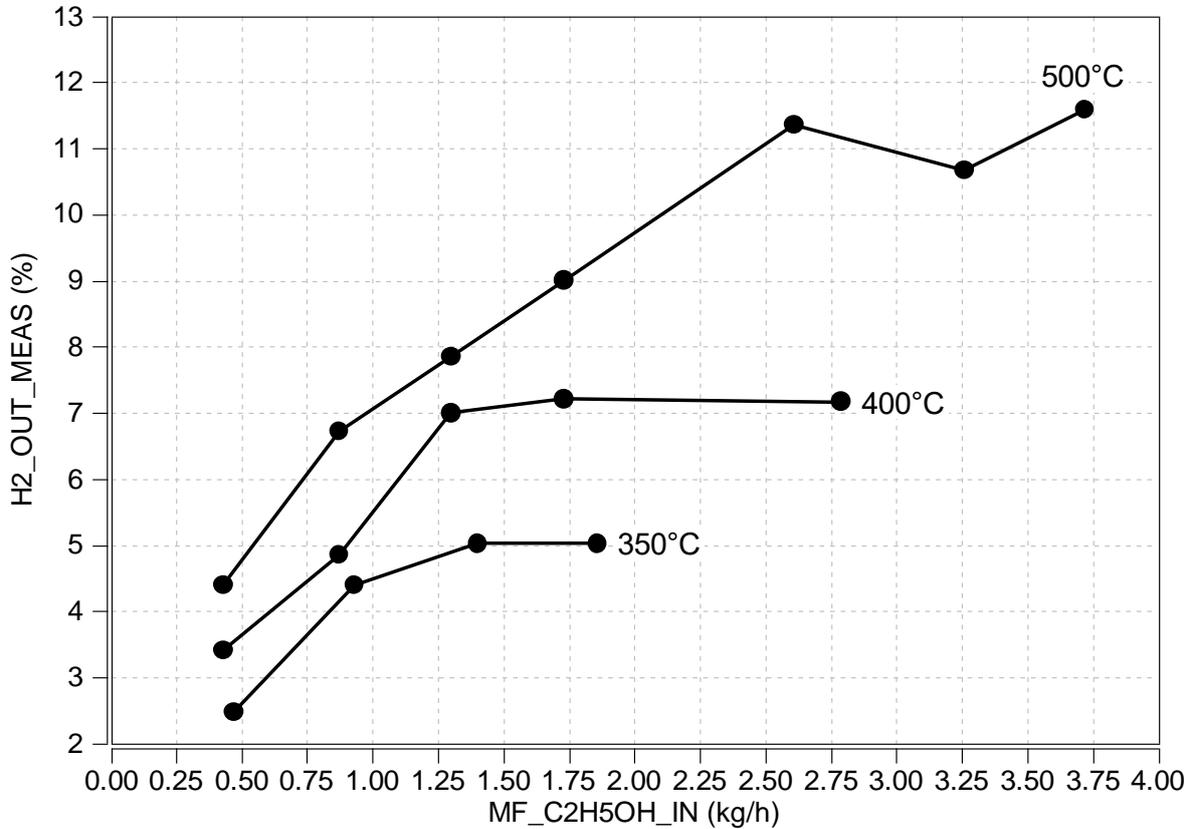


Abbildung 15: Wasserstoff (H2) - Konzentrationen am Reformerausgang in Abhängigkeit der eindosierten Kraftstoffmasse für verschiedene Gastemperaturen

Die erreichte Energierückgewinnung durch die Heizwertsteigerung mittels endothermer, chemischer Reaktionen ist in [Abbildung 16](#) dargestellt. Die Konzentrationen von brennbaren Komponenten am Austritt des Reformers wurden gemessen und ihr Energieinhalt mit der eindosierten Kraftstoffmenge verglichen (=Wirkungsgrad des Reformers). Dieses Ergebnis definiert eine weitere Limitierung für den sinnvollen Betrieb der Reformereinheit in Kombination mit dem Verbrennungsmotor. Für eine Reformereintrittstemperatur von 350°C bleibt der Wirkungsgrad des Reformers trotz einer geringen Wasserstoffbildung immer unter 1. Damit ist dieser Betriebsbereich nicht sinnvoll am Vollmotor einsetzbar. Für Temperaturen über 400°C wurden Wirkungsgrade deutlich über 1 erreicht, mit einem Maximalwert von 1,37. Der Verlauf von allen drei Kurven zeigt zuerst einen deutlichen Anstieg des Wirkungsgrades bei einer Erhöhung des Kraftstoffdurchsatzes - bei Überschreitung des optimalen Wertes sinkt der Wirkungsgrad deutlich unter 1. Der Verlauf korreliert damit gut mit der Wasserstoffbildung, siehe [Abbildung 15](#). Daraus folgt, dass es für einen bestimmten Betriebspunkt, der am Vollmotor mit Durchsatz und Temperatur des Gases (AGR) definiert ist, eine optimale Kraftstoffmenge für die Reformierung gibt, um den Gesamtwirkungsgrad des Systems (VKM + Reformer) maximal steigern zu können.

Energieforschungsprogramm – 3. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

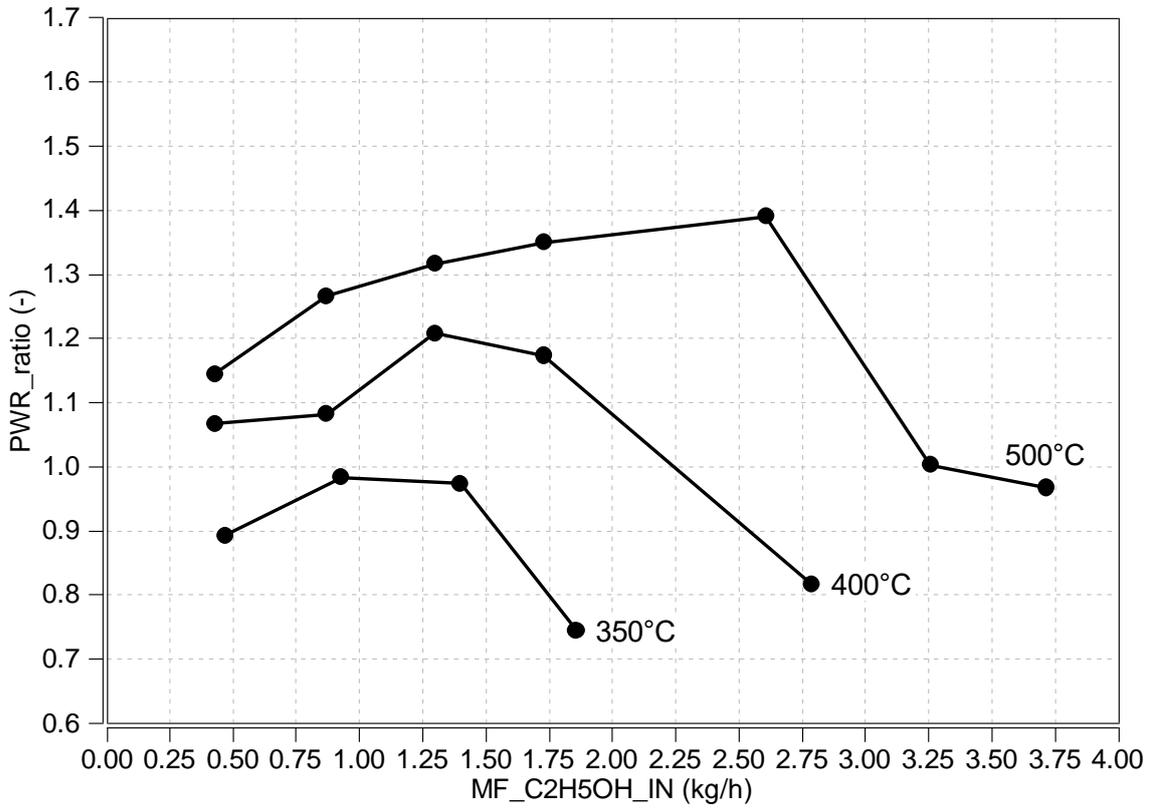


Abbildung 16: Wirkungsgrad von der Reformereinheit in Abhängigkeit der eindosierte Kraftstoffmasse

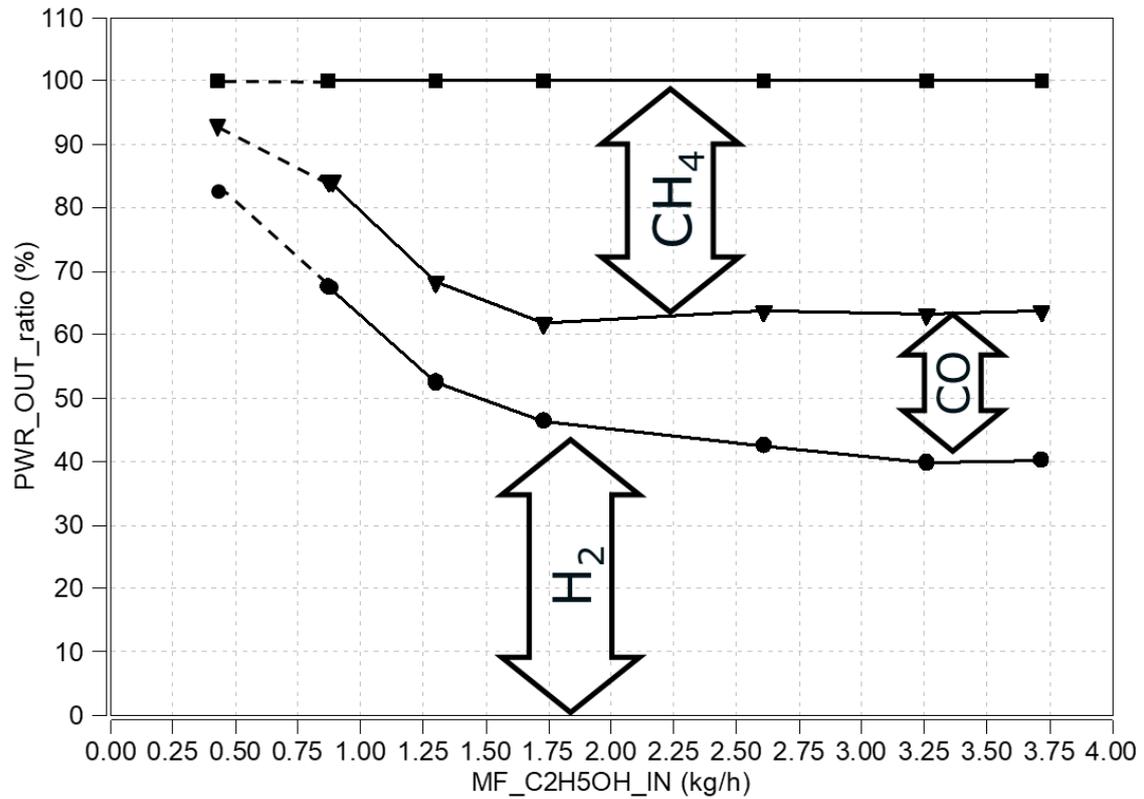


Abbildung 17: Anteile in Heizwert von Synthesegas in Abhängigkeit der eindosierte Kraftstoffmasse, T = 500°C

Abbildung 17 zeigt die Anteile der drei Hauptkomponenten (Energieträger) zum Heizwert des Reformergases für die Gastemperatur von 500°C. Mit einer Erhöhung des Kraftstoffdurchsatzes sinkt der Anteil von Wasserstoff - dafür steigen die Anteile von Methan (CH₄), und Kohlenstoffmonoxid (CO).

Die gewonnenen Messergebnisse werden auch verwendet, um das erstellte 1D-Simulationsmodell der Reformereinheit zu parametrieren. Das Reformiermodell basiert auf einem Katalysatormodell, bei dem die Reaktionskinetik der entsprechenden chemischen Reaktionen so abgestimmt wird, dass die bestmögliche Übereinstimmung mit Messergebnissen erreicht wird. Es sind folgende Reaktionen berücksichtigt:

- Dampfreformierung: $C_2H_5OH + 3H_2O \rightarrow 2CO_2 + 6H_2$
- Wassergas-Shift-Reaktion: $CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$

In der Abbildung 18 sind die Ergebnisse des Modellabgleichs für die Wasserstoff-Konzentration und die Gastemperatur am Reformeraustritt für einen Gasdurchsatz von 28 kg/h und einen Kraftstoffdurchsatz von 2 kg/h dargestellt.

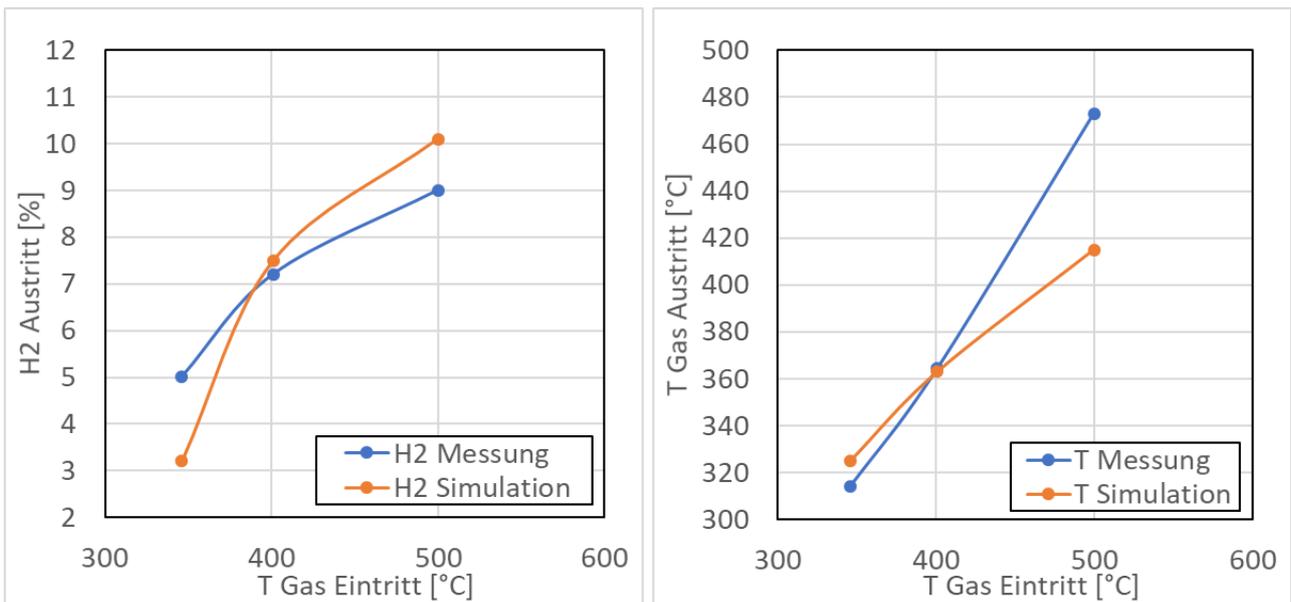


Abbildung 18: Ergebnisse des Modellabgleichs des Reformers: Wasserstoffkonzentration und Gastemperatur am Reformeraustritt für einen Gasdurchsatz von 28 kg/h und einen Kraftstoffdurchsatz von 2 kg/h

Das Modell kann zukünftig in die Motorprozessrechnung implementiert werden, wodurch VKM und Reformereinheit gemeinsam betrachtet und Interaktionen besser berücksichtigt werden können. Bei der VKM und dem Reformiermodell handelt es sich um zwei thermochemische Prozesse, die sich gegenseitig beeinflussen. Aus diesem Grund ist die Verfügbarkeit eines zuverlässigen Modells von sehr hoher Bedeutung, um die Optimierung des Gesamtsystems durchführen zu können. Das gewonnene Simulationsmodell kann auch in 3D-Simulationsmodelle integriert werden, bei denen die Gasströmung viel genauer abgebildet werden kann und damit exaktere Ergebnisse generiert werden können.

5 Ausblick und Empfehlungen

Wie bereits eingangs erwähnt, waren sämtliche Einzelmaßnahmen wirksam und zeigten die prognostizierten Wirkungsgradsteigerungen. Die Kombination sämtlicher untersuchter Maßnahmen führte allerdings nicht im vollen Ausmaß zu einer additiven Wirkungsgradsteigerung.

Folgende Erkenntnisse wurden generiert:

- Die Auswirkung der gekühlten Abgasrückführung war insbesondere in Kombination mit dem erhöhten Verdichtungsverhältnis auf Grund der abnehmenden Verbrennungsstabilität limitiert. Diesem Effekt könnte durch die Steigerung der Wasserstoffkonzentration in der Ansaugluft beim Einsatz des Reformers entgegengewirkt werden. Allerdings waren keine optimalen Bedingungen (auf Grund einer zu niedrigen Abgastemperatur) für den Betrieb des Reformers bei höheren AGR-Raten gegeben.
- Der Aufbau der Prototyp-Reformereinheit hat das Vorverdampfen des eindosierten Kraftstoffes nicht erlaubt. Daher wurde die Verdampfungswärme dem Abgas entzogen was den Effekt der Wärmerückgewinnung zusätzlich limitiert hat.
- Die Anhebung des Dampf-zu-Kohlenstoff-Verhältnisses (Steam-to-Carbon-Ratio) für eine Optimierung der Kraftstoffreformierung mittels Wassereinspritzung war kontraproduktiv, da die Wassereinspritzung eine zusätzliche Absenkung der Abgastemperatur zur Folge hatte.
- Die Auswertung der Messungen in Bezug auf die Wasserstoffkonzentration nach dem Reformer zeigte, dass der optimale Wirkungsgradbereich des Reformers im Betrieb mit dem Verbrennungsmotor nicht erreicht wurde.

Die Erkenntnisse lassen den Schluss zu, dass für die Erreichung des Ziels den effektiven Wirkungsgrad auf 45% zu heben, folgende Maßnahmen umgesetzt werden müssen:

Beibehaltung des Miller-Brennverfahrens mit dem angehobenen Verdichtungsverhältnis von 13,5.

Änderung des Zylinderkopfes hinsichtlich Kühlung: Entfall des integrierten Abgaskrümmers, um die Abgastemperaturen anzuheben → höhere Temperaturen für den Reformer.

Dadurch Steigerung der Wasserstoffkonzentration am Reformerausgang von 7% auf 9%.

Auslegung von Motor und Turbolader für extrem hohe AGR Raten, die auch mit einem Miller-Brennverfahren kombinierbar sind.

In Summe führt dies zu einer Stabilisierung der Verbrennung, wodurch deutlich höhere AGR-Raten möglich sind. In Folge kann die Wirkungsgradsteigerung durch AGR von derzeit 1,6% auf 1,76% angehoben werden. Damit wird ein effektiver Wirkungsgrad von 41,4 % erreicht.

Optimierung an der Reformereinheit: Auslegung und Ausführung von Reformereinheit für vollständiges Vorverdampfen von Kraftstoff mittels Abgasenergie sowie optimierte Gemischaufbereitung und kompakte Bauweise für weniger Wärmeverluste.

Mit diesen Maßnahmen steigt die Kraftstoffmasse, die reformiert werden kann („Substitution

Ratio“) und gleichzeitig auch der Wirkungsgrad des Wärmerückgewinnungsprozesses. Damit erhöht sich die Wirkungsgradsteigerung durch den Reformer wodurch in Kombination ein effektiver Wirkungsgrad von 45% erreichbar scheint.

6 Literaturverzeichnis

- [1] VDI. *VDI-Wärmeatlas; 11. Auflage.* s.l. : Springer Vieweg, 2013.
- [2] Pischinger, Rudolf, Klell, Manfred und Sams, Theodor. *Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine, 3. Auflage.* s.l. : SpringerWienNewYork, 2009.
- [3] Durst, Bernhard, et al. *Thermodynamische Wirkung der Wassereinspritzung beim Ottomotor – ein Konzeptvergleich.* Graz : s.n., 2015.
- [4] Fischer, Michael, et al. *Suppressing Knocking by Using CleanEGR - Better Fuel Economy and Lower Raw Emissions Simultaneously.* Berlin : Springer, 2017.
- [5] Martin, Juan-Carlos, et al. *On-board generation of hydrogen to improve in-cylinder combustion and after-treatment efficiency and emissions performance of a hybrid hydrogenegasoline engine.* s.l. : Elsevier, 2019.

7 Kontaktdaten

Assoc. Prof. Dr. Peter Hofmann
TU Wien - Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik
Getreidemarkt 9, 1060 Wien
+43 1 58801 – 315 01
peter.hofmann@ifa.tuwien.ac.at
www.ifa.tuwien.ac.at

Dipl.-Ing. Georg Klinglmayr
TU Wien - Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik
Getreidemarkt 9, 1060 Wien
+43 1 58801 – 315 01
georg.klinglmayr@ifa.tuwien.ac.at
www.ifa.tuwien.ac.at

Dipl.-Ing. Marco Certic
AVL List GmbH
Hans-List-Platz 1, 8020 Graz
+43 316 787 7535
marko.certic@avl.com
www.avl.com