

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Abschlussbericht zu Arbeitspaket C4 „M100 Prototypen Motor“

Ford- Werke GmbH

Untersuchung der technischen Grundlagen zur Standardisierung
von Methanolkraftstoffen in Europa

Zuwendungsgeber: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
Projektträger: TÜV Rheinland
Förderkennzeichen: 19I20005E

Laufzeit des Vorhabens: 01.08.2020 – 31.12.2022

Forschungsstelle: Ford Werke GmbH

Dr.-Ing. Arnd Sommerhoff

17.03.2023

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Abschlussbericht zu Arbeitspaket C4 – Ford- Werke GmbH im Projekt „Untersuchung der technischen Grundlagen zur Standardisierung von Methanolkraftstoffen in Europa“	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Sommerhoff, Arnd Groeger, Jens Khosravi, Maziar	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2022
	6. Veröffentlichungsdatum 31.01.2023
	7. Form der Publikation Schlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Ford Werke GmbH Süsterfeldstr. 200 52072 Aachen	9. Ber.-Nr. durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen* 19I20005E
	11. Seitenzahl 48
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. Literaturangaben 8
	14. Tabellen 3
	15. Abbildungen 39
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung In diesem vom BMWi geförderten Verbundvorhabens „Methanolstandard“ sollen die technischen Grundlagen für die Normung von Methanol-Kraftstoffen in Europa untersucht werden. Wesentlicher Bestandteil des Forschungsvorhabens ist neben der Standardisierung die Optimierung der ottomotorischen Verbrennungskonzepte. Auch die Kraftstoffproduktion, die sicherheitsrelevanten Merkmale wie Sichtbarkeit und Toxizität der Flamme sollen untersucht werden. Es sollte geprüft werden, ob der IMPCA-Standard für Methanol, der bereits in der Schifffahrt verwendet wird, direkt für die Straßentransportanwendungen verwendet werden kann oder, ob eine Additivierung erforderlich ist, um einen sicheren Kaltstart sowie Materialkompatibilität zu realisieren. Im Arbeitspaket C wird die Nutzung von Methanol in der Anwendung im PKW mit M100, sowie mit M15 untersucht. Dazu werden grundlegende Untersuchungen am Einzylinder-Prüfmotor durchgeführt. Dabei werden das Kaltstartverhalten und die Abgasemissionen von Methanol untersucht. Weiterhin soll das Wirkungsgradpotential von Methanol identifiziert werden. Das von Ford zu bearbeitende Unterpaket von C -Arbeitspaket C4- umfasste den Aufbau eines Prototypmotors mit entsprechendem Brennverfahren und angepasstem Einspritzsystem für höhere Einspritzmengen für die Verwendung von M100. Mit diesem Motor wurde eine Kalibrierung für M100 entwickelt. Auf Basis dieser Vorarbeiten wurde schließlich ein fahrfähiges Demonstrationsfahrzeug aufgebaut, welches dem Projektpartner FEV zur weiteren Entwicklung einer Kaltstartkalibrierung zur Verfügung gestellt wurde. Selbst ohne eine Anpassung des Einspritzsystem an die mehr als doppelt so hohen Einspritzvolumina von Methanol gegenüber dem herkömmlichen Kraftstoff (Super, 98 RON) konnte unter Beibehaltung der Maximalleistung ein deutlich verbesserter Wirkungsgrad verbunden mit geringeren Emissionen nachgewiesen werden. Mit dem speziell für bessere Gemischaufbereitung entwickelten Einspritzsystem zeigte der Motor im Bestpunkt einen um 10 % verbesserten effektiven Wirkungsgrad. Da keines der verwendeten Einspritzsysteme für den Einsatz von Methanol vom Hersteller freigegeben war, traten entsprechend Probleme durch gesteigerten Verschleiß der Komponenten auf, die zu Prüfstandausfällen führten. Desweiteren wurden auch Probleme mit Verdünnung durch Methanol & Wasser bzw. veränderten Schmiereigenschaften des Öls während der Prüfstanduntersuchungen beobachtet.	
19. Schlagwörter Methanol, M100, Verbrennungsmotor, CO ₂ -neutral, Kaltstart	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. Type of Document (e.g. report, publication) Final report	
3. Title Final report on work packages C4 – Ford-Werke GmbH in the “Closed Carbon Cycle Mobility Project Climate-neutral fuels for future transport applications”		
4. Author(s) (Last Name, Given Name) Sommerhoff, Arnd Gröger, Jens Khosravi, Maziar		5. End of Project December 31 th 2022
		6. Publication Date 31.01.2023
		7. Form of Publication Final report
8. Performing Organization(s) (Name, Address) Ford Werke GmbH Süsterfeldstr. 200 52072 Aachen		9. Originator's Report No.
		10. Reference No.* 19I20005E
		11. No. of Pages 48
12. Sponsoring Agency (Name, Address) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn		13. No. of References 8
		14. No. of Tables 3
		15. No. of Figures 39
16. Supplementary Notes		
17. Presented at (Title, Place, Date)		
18. Abstract In this joint project "Methanol Standard" funded by the BMWi, the technical bases for the standardization of methanol fuels in Europe are to be examined. In addition to standardization, an essential part of the research project is the optimization of combustion concepts for gasoline engines. The fuel production, the safety-relevant features such as visibility and toxicity of the flame are also to be examined within the research project. It should be checked whether the IMPCA standard for methanol, which is already used in shipping, can be used directly for road transport applications or whether additives are required to realize safe cold start and material compatibility. In work package C, the use of methanol in passenger cars with M100 and M15 is examined. For this purpose, fundamental investigations are carried out on the single-cylinder test engine. The cold start behavior and the exhaust emissions of methanol are examined. Furthermore, the efficiency potential of methanol should be identified. The sub-package of C -work package C4- to be processed by Ford included the construction of a prototype engine with a corresponding combustion process (higher compression ratio) and an adapted injection system for higher injection quantities for the use of M100. A calibration for M100 was developed with this engine. On the basis of this preliminary work, a drivable demonstration vehicle was finally built, which was made available to the project partner FEV for the further development of a cold start calibration. Even without adapting the injection system to the injection volume of methanol, which is more than twice as high as that of conventional fuel (Super, 98 RON), a significantly improved efficiency combined with lower emissions could be demonstrated while maintaining the maximum output. With the injection system specially developed for better mixture preparation, the engine showed a 10% improvement in effective efficiency at its best point. Since none of the injection systems used was approved by the manufacturer for the use of methanol, problems arose due to increased wear on the components, which led to test bench failures. Furthermore, problems with oil-dilution by methanol and water or changed lubricating properties of the oil were also observed during the test bench investigations.		
19. Keywords Methanol, M100, Internal combustion engine, CO ₂ -neutrality, cold-start		
20. Publisher		21. Price

Inhaltsverzeichnis

I. Kurzdarstellung	5
1. Aufgabenstellung	5
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	5
3. Planung und Ablauf des Vorhabens	6
4. Stand der Wissenschaft und Technik	8
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	9
II. Eingehende Darstellung	10
1. Erzielte Ergebnisse	10
2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Verwendungsnachweises	47
3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	47
4. Voraussichtliche Nutzen im Sinne der Verwertbarkeit im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplanes	48
5. Anderweitige Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens an anderer Stelle	48
6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse	48

I. Kurzdarstellung

1. Aufgabenstellung

In diesem Forschungsprojekt sollen die technischen Grundlagen für die Normung von Methanol-Kraftstoffen in Europa untersucht werden. Wesentlicher Bestandteil des Forschungsvorhabens ist neben der Standardisierung die Optimierung der ottomotorischen Verbrennungskonzepte. Auch die Kraftstoffproduktion, die sicherheitsrelevanten Merkmale wie Sichtbarkeit und Toxizität der Flamme und die Methanolproduktion sollen innerhalb des Forschungsvorhabens untersucht werden. Es sollte geprüft werden, ob der IMPCA-Standard für Methanol, der bereits in der Schifffahrt verwendet wird, direkt für die Straßentransportanwendungen verwendet werden kann oder, ob eine Additivierung erforderlich ist, um einen sicheren Kaltstart sowie Materialkompatibilität zu realisieren. Zunächst sollen Untersuchungen an einem Einzylindermotor durchgeführt werden und die Ergebnisse dann anschließend an einem Prototypen-Motor umgesetzt werden. Eine weitere Option für die Verwendung von erneuerbarem Methanol im Verkehr zur Reduzierung der gesamten Kohlendioxidemissionen sind Methanol-Benzin-Gemische (M15), die in zukünftigen Serienmotoren als „Drop-In“- Kraftstoffe sowie höhere Gemische in Flex-Fuel-Motoren untersucht werden. Dies bietet eine kurzfristige Möglichkeit zur Dekarbonisierung des Straßenverkehrs. Eine mögliche Sektorkopplung und die Schaffung von Synergien mit dem maritimen Transport soll erörtert werden.

Im Arbeitspaket C wird die Nutzung von Methanol in der Anwendung im PKW mit M100, sowie M15 untersucht. Dazu werden grundlegende Untersuchungen am Einzylinder-Prüfmotor durchgeführt. Dabei werden das Kaltstartverhalten und die Abgasemissionen von Methanol untersucht. Weiterhin soll das Wirkungsgradpotential von Methanol identifiziert werden. Auf den Versuchen aufbauend soll ein Prototyp-Motor für M100 entwickelt werden.

Das von Ford zu bearbeitende Unterpaket von C -Arbeitspaket C4- umfasst den Aufbau eines Prototypmotors für die Verwendung von M100. Mit der anschließenden Untersuchung auf diesem Motor soll eine Kalibrierung für M100 entwickelt werden. Auf Basis dieser Vorarbeiten soll schließlich ein fahrfähiges Demonstrationsfahrzeug gebaut werden, welches dem Projektpartner FEV zur Entwicklung einer Kaltstartkalibrierung zur Verfügung gestellt werden soll.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Ford ist eine Tochtergesellschaft des fünftgrößten Automobilherstellers der Welt, der Ford Motor Company. Im Forschungs- und Innovationszentrum der Ford-Werke in Aachen arbeiten seit der Gründung im Jahr 1994 rund 350 Wissenschaftler und Ingenieure aus mehr als 25 Nationen mit Universitäten, namhaften Instituten, Wettbewerbern und Zulieferern zusammen und machen Mobilität ökologisch verträglich und sicher. Bei der Entwicklung neuer Motorgenerationen und alternativer Antriebstechnologien wurden im Ford-Fahrzeugportfolio Motoren mit alternativen Kraftstoffen verbaut und in Serie gefertigt. (CNG, LPG, Ethanol, E-Antriebe, Brennstoffzelle, H₂-Verbrennungsmotor).

Für die Entwicklung eines geeigneten Brennverfahrens für M100 stehen CAE-Experten mit den entsprechenden Simulationstools, Designer für die Konstruktion erforderlicher Hard-

ware-Änderung, Werkstätten zum Umbau der Prototypenmotoren und Aufbau des Demonstrationsfahrzeuges sowie geeignete Motorprüfstände mit dem entsprechenden betreuenden Personal sowohl am Standort Aachen als auch in Köln-Merkenich (John-Andrews Entwicklungszentrum) zur Verfügung.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das vorliegende Forschungsprojekt beinhaltet insgesamt 5 Arbeitspakete, welche über eine angesetzte Projektlaufzeit von 24 Monaten durchgeführt werden sollten. Abbildung 1 zeigt eine Übersicht über die Struktur des Projektes.

Aufgrund verschiedener Verzögerungen bei allen Projektpartner aufgrund der COVID-19 Pandemie und anderen äußeren Einflüssen wurde eine kostenneutrale Laufzeitverlängerung um 5 Monate beantragt und seitens des Projektträgers genehmigt.

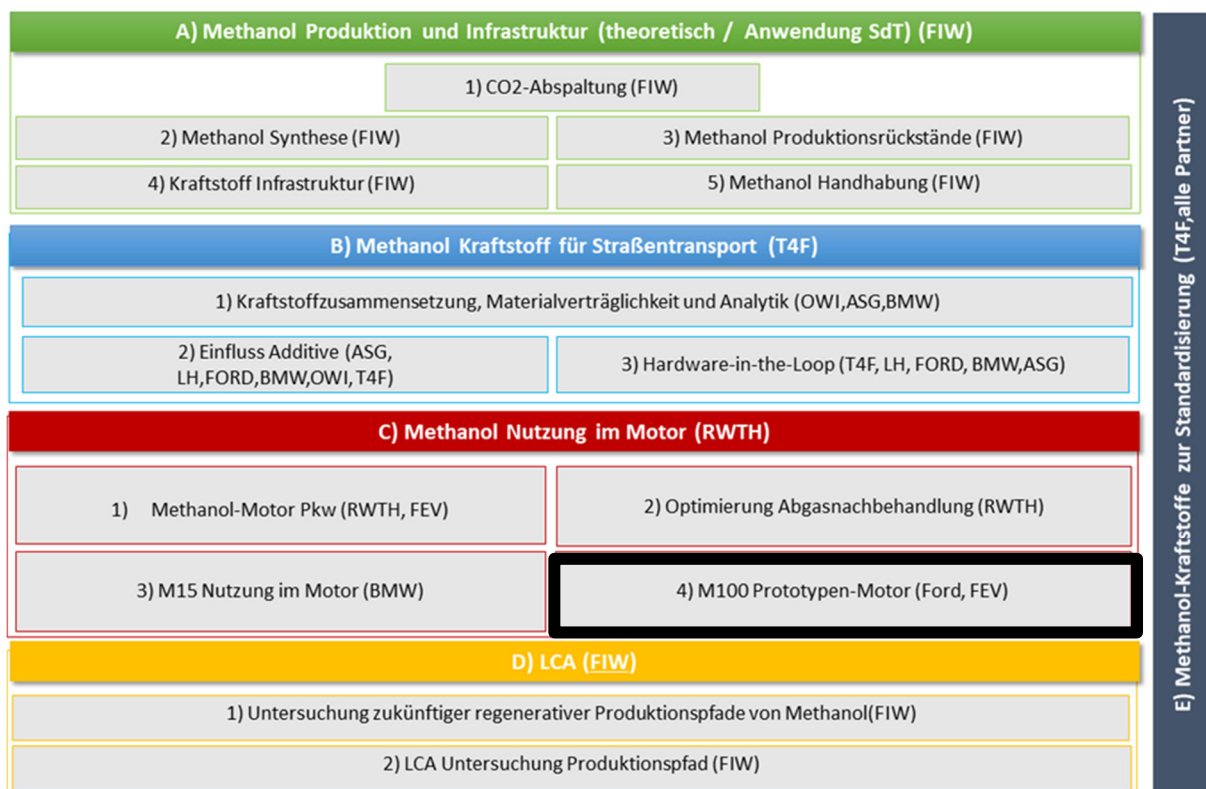


Abb. 1 Projektstruktur von Methanolstandard

Der Ford Anteil an diesem Verbundprojekt bezieht sich auf das Arbeitspaket C4. Basierend auf den Informationen aus Arbeitspaket C1 erfolgt eine 3D-CFD basierte Optimierung der Strahlagen und Brennraumform, um eine ausreichende Kaltstartfähigkeit darstellen zu können und um das Verdichtungsverhältnis so anzupassen, dass die vorteilhaften Klopf Eigenschaften später im Betrieb ausgenutzt werden können. Mit den Ergebnissen der CFD-Optimierung werden anschließend Prototypmotoren aufgebaut, die anschließend bei Ford zur Kalibrierung der Motorsteuerung genutzt werden. Schließlich erfolgt die Installation des Pro-

totypmotors in einen Fahrzeugdemonstrator (Abb.2), welches beim Projekt Partner FEV benutzt wird, um ihre Kaltstartstrategie zu implementieren und diese für den Methanolbetrieb zu optimieren.

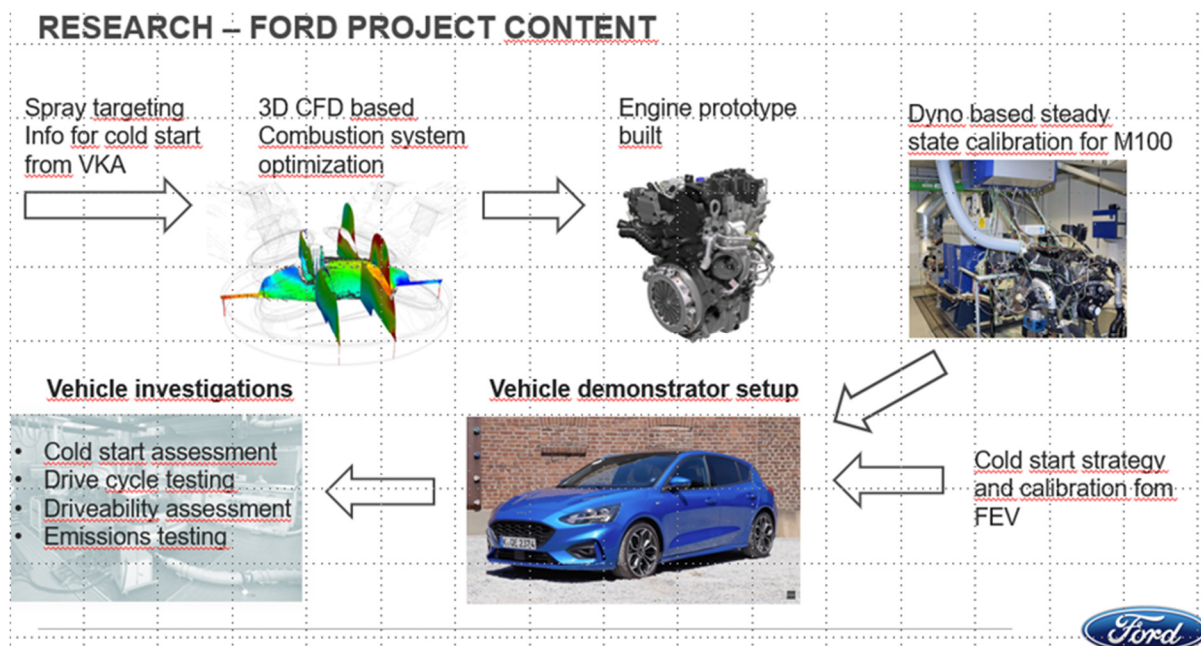


Abb. 2 Visualisierung Arbeitspaket C4

Seit Beginn des Projektes erschwerten Personalausfälle bedingt durch Corona, Flutkatastrophe 2021 und weitreichende Umstrukturierungen im Hause Ford die Durchführung des Projektes. Durch diese Ausfälle war der Motoraufbau, der Prüfstands- und Testbetrieb gar nicht oder nur in eingeschränktem Maße möglich. Neben diesen internen logistischen Erschwernissen ist auch unglücklicherweise der Motor im Betrieb mehrfach durch kapitalen Motorschaden ausgefallen, wodurch es zu nicht eingeplanten enormen Mehraufwänden und Verzögerungen kam, einerseits Hardware (Beschaffung & Kosten), Reparatur und Wiederaufbau betreffend und andererseits durch Motorinbetriebnahme, Einfahren und Testwiederholungen bei der Prüfstandsausnutzung.

In Summe ergaben sich Verzögerungen, welche die Abarbeitung der im Projektantrag vereinbarten Aufgaben/ Ziele in der ursprünglich geplanten Zeit nicht mehr zuließen.

Neben den schon genannten Problemen konnte die Fertigstellung des Fahrzeugdemonstrators durch Lieferverzögerung des für Methanolbetrieb spezifizierten Einspritzsystems von nahezu 9 Monaten ebenfalls erst im August 2022, also einen Monat nach dem ursprünglich geplanten Projektende, fertiggestellt und der FEV für weitere Entwicklungsarbeiten übergeben werden. Mit der bewilligten Verlängerung von 5 Monaten waren die abschließenden Arbeiten in diesem Arbeitspaket erst möglich und konnten erfolgreich abgeschlossen werden.

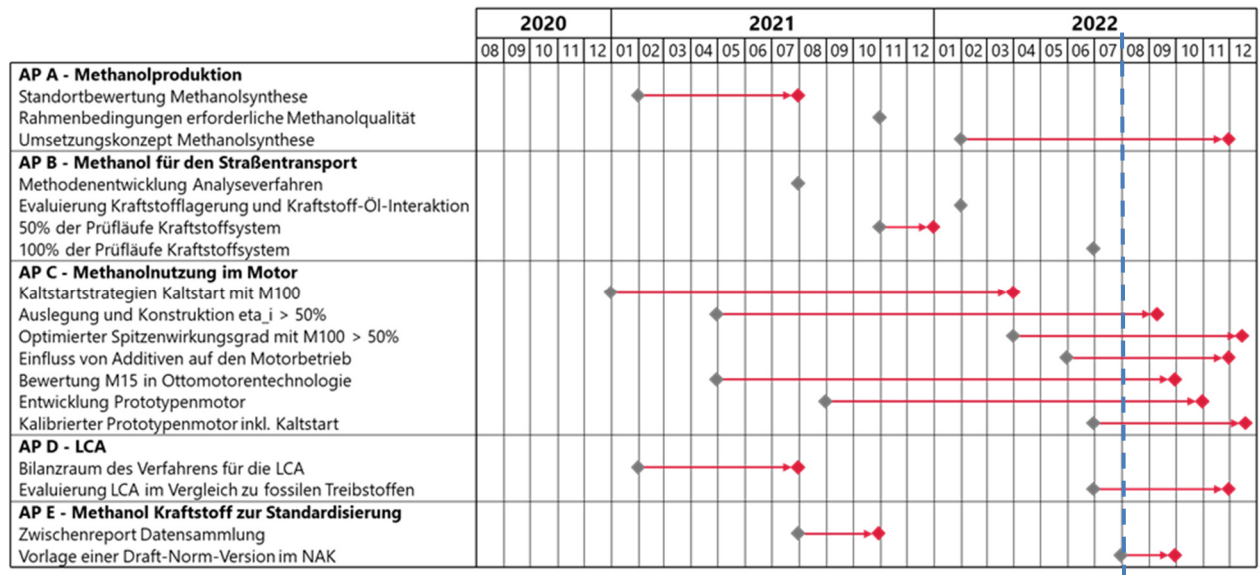


Abb. 3 *Letzter Status Zeitplan*

4. Stand der Wissenschaft und Technik

Durch Forderungen nach „Low Emission Vehicles“ (LEV) der kalifornischen Umweltschutzbehörde stieg in den 90-iger Jahren die Bedeutung sogenannter „sauberer Kraftstoffe“ (clean fuels). Insbesondere vor dem Hintergrund kurzfristiger Alternativen hatte Methanol seinerzeit neben gasförmigen Alternativkraftstoffen einen hohen Stellenwert. In dieser Zeit wurden am Lehrstuhl für Angewandte Thermodynamik der RWTH Aachen und der FEV zahlreiche Forschungsarbeiten an verschiedenen Brennverfahren für Methanol mit Kanal- und/ oder Direkteinspritzung /1/ auf Basis eines PKW- Dieselmotors durchgeführt. Besonderes Augenmerk galt wegen der hohen Zündunwilligkeit von Methanol der kontrollierten Entflammung, wozu verschiedene Zündverfahren untersucht wurden. /1,2,3,4,6/. Wegen der komplexeren Handhabung aufgrund seiner toxischen und aggressiven Eigenschaften, und der Versorgungsunsicherheit durch fehlende Infrastruktur hatte sich Methanol im Markt nicht etablieren können.

In jüngsten Studien zum Thema CO₂-neutrale Kraftstoffe gewann Methanol wieder an Bedeutung. Für das Konsortium „Closed Carbon Cycle Mobility“ (C³-Mobility) wurden daher am Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen der RWTH Aachen neben Gemische diverser Alkoholkraftstoffe mit konventionellen Kraftstoffen auch die direkte Nutzung von Methanol als Reinstoff als Alternativkraftstoffe für Verbrennungsmotoren am 1-Zylinder-Prüfmotor auf Basis eines direkteinspritzenden Ottomotors im stöchiometrischen Betrieb untersucht /7/. Bei diesen Experimenten konnte für Methanol bei mittlerer Drehzahl und Last (2500 U/min @ $p_{mi} = 12$ bar) eine Wirkungsgradverbesserung von 7 % bei gleicher Schwerpunktlage zum konventionelle ROZ 98 Referenzkraftstoff ermittelt werden. Als Grund dafür wird neben der hohen laminaren Flammgeschwindigkeit, die Zündverzug und Brenndauer verkürzt, im Wesentlichen die hohe Verdampfungsenthalpie angesehen. Die daraus resultierenden niedrigen Brennraumtemperaturen haben eine verringerte Kompressionsarbeit und geringere Wandwärmeverluste und niedrigere Nox-Emissionen zur Folge. Desweiteren ergaben sich aufgrund des geringen Kohlenstoffanteils von Methanol deutlich geringer HC-Emissionen. Bei gleicher Drehzahl und maximal erreichbarer Last mit Referenzkraftstoff ($p_{mi} = 18$ bar) wurde mit Methanol sogar ein Wirkungsgrad von über 42% gleichbedeutend einer Verbesserung bis

zu 23% gegenüber dem Referenzkraftstoff nachgewiesen. Aufgrund der hohen Klopfestigkeit von Methanol konnte der Verbrennungsschwerpunkt weiterhin verbrauchsoptimal bei etwa 8°KW nach OT eingestellt werden, während für den Referenzkraftstoff bereits eine Verschiebung dessen um 20 °KW nach spät erforderlich war. Mit Methanol ist darüber hinaus eine deutliche Laststeigerung bis $p_{mi} > 27$ bar möglich. Untersuchungen an einem niedrigen Drehzahl- und Lastpunkt (1200 U/min @ $p_{mi} = 3$ bar) konditioniert für Motorstart (Motoröl und Kühlwasser 30°C) zeigte Methanol eine gute Verbrennungsstabilität. Der Abgaswärmestrom bei Einsatz von Methanol ist in diesem für Katalysator-Heizen repräsentativen Betriebspunkt deutlich geringer als mit Referenzkraftstoff. Er kann jedoch mit spätem Zündzeitpunkt auf das gleiche Niveau angehoben werden.

Im Magerbetrieb kann der bereits sehr gute Wirkungsgrad für Methanol noch weiter gesteigert werden /8/.

Literatur:

- /1/ F.A. Sommerhoff; „Experimentelle und theoretische Betrachtung zum Einsatz von Methanol in einem Motor mit Funkenzündung“; Dissertation RWTH Aachen, 1997
- /2/ U. Hilgers; „Untersuchung zur Anwendung der Methanol-Glühzündung bei Dieselmotoren mit Direkteinspritzung“; Dissertation RWTH Aachen 1987
- /3/ H. Schuhmacher; „Glühzündungs-Dieselmotor mit Zentraleinspritzung für den Betrieb mit reinem Methanol“; Dissertation RWTH Aachen 1988
- /4/ B. Bartunek, N. Schorn, R. Schmidt, H. Heinreich, K. Weidmann; Verwendung von Methanol in PKW-Motoren mit Direkteinspritzung – Aspekte Alternativer Energieträger für Fahrzeugantriebe; Tagung Wolfsburg, 24.-26.11.1992, VDI Berichte 1020
- /5/ C.M. Möser; „Untersuchung an einem kleinaufgeladenen Methanol-Glühzündungsmotor mit Direkteinspritzung“; Dissertation RWTH Aachen, 1995
- /6/ R. Schmidt; „Untersuchung an einem direkteinspritzenden Methanol-Schichtlademotor für den PKW-Betrieb“; Dissertation RWTH Aachen, 1999
- /7/ C. Wouters, B. Lehrheuer, B. Heuser, S. Pischinger; „Ottomischkraftstoffe mit Methanol, Ethanol und Butanol“; MTZ März 2020
- /8/ C. Wouters, A. Kuznik, F. Negüs, E. Wenz, S. Pischinger, C. Beidl, M. Bargende, P. Eilts; „ICE2025+: Ultimate System Efficiency“; 30th Aachen Colloquium Sustainable Mobility 2021

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Um die geplanten Arbeiten der jeweiligen Arbeitspakete durchführen zu können, war eine enge Kooperation zwischen den jeweiligen Partner zwingend erforderlich.

Die in Arbeitspaket C1 als Basis für die Verbrennungsentwicklung des Prototypmotors geplanten Voruntersuchungen auf dem Einzylindermotor am VKA (RWTH) konnten aufgrund

von Teilemangel nicht plangemäß durchgeführt werden. Somit konnten keine entsprechenden Erkenntnisse aus dem Arbeitspaket C1 bei der Auslegung des Verbrennungssystems des Prototypmotors in C4 berücksichtigt werden.

Im Arbeitspaket C4 hat Ford einen Fahrzeugdemonstrator aufgebaut, mit dem die FEV weiterführende Entwicklungs- und Kalibrierarbeiten durchführen musste. Ein intensiver Austausch zwischen Ford & FEV garantierte den Aufbau des Fahrzeuges mit den entsprechend geforderten Signal-Ein- und Ausgängen, mit den benötigten Sensoren und der gewünschten Messtechnik sowie die Bereitstellung der für den Betrieb erforderlichen Daten und Informationen.

II. Eingehende Darstellung

1. Erzielte Ergebnisse

Im Folgenden soll in den jeweiligen Arbeitspaket gesammelten Erkenntnisse detailliert eingegangen werden, um die Verwendung der zur Verfügung gestellten Fördermittel zu dokumentieren und den zu Beginn des Projekts festgelegten Zielen gegenüberzustellen.

Eine vollständige Substitution herkömmlicher Kraftstoffe in konventionellen Verbrennungsmotoren durch Methanol ist aufgrund seiner chemischen und physikalischen Stoffeigenschaften (Tab. 1) ohne entsprechende Maßnahmen am Gesamtfahrzeug oder eine entsprechende Additivierung des Kraftstoffes nicht möglich. Die höhere Aggressivität der Alkohole infolge der hohen elektrischen Leitfähigkeit und des gebundenen Sauerstoffs kann zu Korrosionsproblemen des Kraftstoffsystems und zu Veränderungen der Materialeigenschaften von Dichtungen führen. Dieser Effekt macht die Wahl geeigneter Werkstoffe oder Beschichtungen verbunden mit den Nachteilen höherer Kosten erforderlich. Schmierungsprobleme in Einspritzpumpen, welche durch die geringe Viskosität von Alkoholkraftstoffen auftreten können, lassen sich neben einer geeigneten Werkstoffauswahl durch Fremdschmierung vermeiden. Darüber hinaus ist wegen des reduzierten volumetrischen Heizwertes von Methanol beim Einsatz im Motor das Einspritzsystem an die erheblich größeren einzuspritzenden Kraftstoffmengen anzupassen.

	Einheit	Euro-Super	Methanol
unterer Heizwert H_u	MJ/kg	41.7	19.7
Stöch. Luftbedarf LST	-	14.05	6.5
λ - Zündgrenze	-	0.4 - 1.4	0.34 - 2.0
Molmasse	kg/kmol	98	32
Wasserstoffgehalt	-	0.13	0.12
Kohlenstoffgehalt	-	0.85	0.38
Sauerstoffgehalt	-	0.02	0.5
Oktanzahl RON	-	98	114.4
Motorenkennzahl MOZ	-	85	94.6
Siedetemperatur	°C	30 - 190	65
Verdampfungswärme	kJ/kg	420	1165
Dichte	kg/m ³	735	795

Tab. 1 Physikalische & Chemische Eigenschaften von Methanol und Super-Kraftstoff

Durch die hohe Verdampfungswärme von Methanol wird eine starke Abkühlung des Kraftstoff-Luftgemisches während der Gemischbildung hervorgerufen. Bei Ottomotoren mit Saugrohreinspritzung führt dies zur starken Kühlung des Ansauggemisches und demzufolge zu einer Erhöhung des Liefergrades. Die Verdampfung von Methanol im Brennraum hat die Kühlung der Zylinderladung und somit die Reduktion der Kompressionsarbeit zur Folge. Die bei niedrigen Temperaturen ablaufende Verbrennung läßt eine geringere NO_x-Schadstoffbildung und eine geringe thermische Belastung der Bauteile erwarten. Insgesamt kann durch die höhere Verdampfungswärme bei gleichzeitig höherem volumetrischen Kraftstoffeinsatz von Methanol mit einer intensiven Innenkühlung des Motors gerechnet werden, wodurch die Wandwärmeverluste herabgesetzt werden.

Die höhere Oktanzahl und die fehlende Klopfneigung von Methanol erlaubt in Ottomotoren eine Erhöhung des Kompressionsverhältnisses und somit eine Steigerung des Wirkungsgrades und der Maximalleistung.

Das Siedeverhalten und die hohe Verdampfungswärme von Methanol bieten Potenziale hinsichtlich Effizienz und Vollast, sie stellen aber auch gleichzeitig Anforderungen und Risiken beim Kaltstart und kaltem Motor dar.

In diesem Arbeitspaket „M100 Adaption auf einem Serienfahrzeug“ bestand die Aufgabe, ein Serienfahrzeug für den Einsatz von M100 aufzubauen und eine Kalibrierung für den besonders kritischen Bereich, den Kaltstart, zu entwickeln. Zunächst wurde mit CFD das Brennverfahren und das Einspritzsystem hinsichtlich Gemischaufbereitung, Zünd- und Verbrennungseigenschaften von Methanol ausgelegt und definiert. Dieses Brennverfahren verbunden mit einem Einspritzsystem für höhere Durchflüsse und Einspritzdrücke wurde in einem 1l 3 Zylinder Serienmotor mit 125 PS realisiert und anschließend in einem intensiven Testprogramm abgeprüft, optimiert und eine Kalibrierung für den Einsatz von M100 angepasst. Später wurde ein weiterer Motor mit den optimierten Hardware- und Software-Änderungen in einen PKW (Ford Focus, C-Klasse) eingebaut. Zudem ist in diesem Fahrzeug das Kraftstoff-System für eine höhere Methanolfestigkeit auf alkoholkraftstofftaugliche (E85) Komponenten, wie Dichtungen in Kraftstoffleitungen und Kraftstoffvorförderpumpe, umgestellt worden. All diese vorbereitenden Aufgaben wurden auf der Seite von Ford umgesetzt. Die Kaltstartuntersuchungen selbst wurden schließlich bei dem Partner FEV durchgeführt.

Auslegung Verbrennungssystem für Methanol mit CFD

Da die Kaltstartvoruntersuchungen am Einzylindermotor aus dem Arbeitspaket C1 (VKA-RWTH) wegen Teilmangel für den Prüfstand nicht rechtzeitig durchgeführt wurden, konnten entsprechende Erkenntnisse in die im Folgenden beschriebene Auslegung nicht einfließen.

Die 3D-CFD-Simulationen des Verbrennungssystems im Ford-Motor wurden mit der CONVERGE-Software von Convergent Science durchgeführt. Dieses Programm eignet sich besonders gut für bewegliche Geometrie und Kolbenmotoren und bietet automatisierte Vernetzung, einschließlich adaptiver Netzverfeinerung, fortschrittliche RANS-Turbulenzmodelle, KH-RT-Spray mit Flash-Siede-Verdampfungsmodell, verschiedene Verbrennungsmodelle sowie einen detaillierten Chemielöser für Klopfen und Emissionsmodellierung. Das Simulationstool und die physikalischen Modelle, die für Turbulenz, Spray, Zündung und Verbrennung

verwendet werden, sind gut etabliert und validiert. CONVERGE wurde bei Ford und in der gesamten Branche ausgiebig für Motorsimulationen eingesetzt.

Charakteristische Motorparameter, wie Tumble, turbulente kinetische Energie (TKE), Lambda im Brennraum, Lambda an der Zündkerze, Verbrennungsdauer, Aufprall des flüssigen Kraftstoffs auf die Wand wurden in den Simulationen zur Optimierung des Verbrennungssystems bewertet.

Die Aufgabe der numerischen Modellierung umfasste die Kalibrierung und Validierung der Spray-, Wandbeaufschlagungs- und Verbrennungsmodelle sowie die Optimierung des Injektors und des Kolbenbodens speziell für Einsatz von Methanol. Flüssigkeitsdichte, Verdampfungstemperatur, unterer Heizwert, stöchiometrisches Luft-Kraftstoff-Verhältnis und RON von Methanol unterscheiden sich erheblich von Benzin (s. Tab. 1). Daher ist die Optimierung des Injektors entscheidend für den ordnungsgemäßen Betrieb des Motors mit Methanol. Aufgrund der besseren Antiklopfeigenschaften von Methanol, ROZ 114 gegenüber Benzin ROZ 98, kann das Verdichtungsverhältnis eines mit Methanol betriebenen Motors erhöht werden, um die Motoreffizienz zu verbessern. Zusätzlich wird durch die höhere Verdampfungsenthalpie, Methanol 1165 kJ/kg vs. Benzin 420 kJ/kg, die Ladungstemperatur während der Kompression reduziert. Als solches wird erwartet, dass der effektive Motorwirkungsgrad des Motors durch den Methanolbetrieb verbessert wird.

Unter der Annahme eines konstanten Motorwirkungsgrads ist die erforderliche Kraftstoffdurchflussrate des Motors im Vergleich zum Benzinbetrieb etwa um den Faktor 2,2 höher. Das Kraftstoffsystem wurde gegenüber dem Serienmotor aufgerüstet, um die Durchflussrate der Einspritzventile zu optimieren, die Größe der Kraftstofftröpfchen zu minimieren und folglich die Homogenisierung zu verbessern. Der Raildruck der Kraftstoffeinspritzung wurde um 100 bar erhöht und der Injektor wurde von 5-Loch- auf ein symmetrisches 6-Loch-Design geändert. Das Strahlbild des Injektors, nämlich der XY- und XZ-Winkel des Injektors, wurde für mehrere Betriebsbedingungen optimiert. Das Strahlbild (Abb. 4) wird für die Betriebsbedingung, hohe Last bei mittlerer Drehzahl, optimiert und die optimierte Injektorgeometrie wird in den anderen Betriebspunkten validiert.

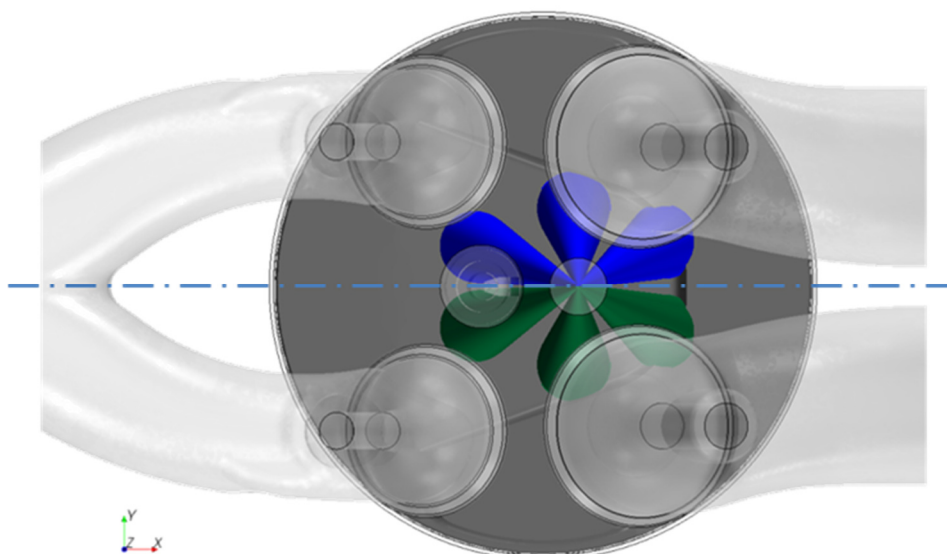


Abb. 4 *Strahlbild des für Methanol optimierten Injektors*

Die hohe Verdampfungsenthalpie in Verbindung mit einer höheren erforderlichen Kraftstoffmasse führt im Vergleich zu Ottomotoren zu einer stärkeren Wandbeaufschlagung und Wandfilmbildung. Das Verhältnis der Kraftstoffmasse im gebildeten Wandfilm relativ zur eingespritzten Masse ist in Abbildung 5 für verschiedene Motordrehzahlen und Einspritzdauern bei gleicher konstanter Einspritzmenge gezeigt. Die durchgezogene Linie repräsentiert einen frühen Einspritzbeginn während die unterbrochene Linie einen 30°KW späteren Einspritzbeginn darstellt. Zum Vergleich sind auch 2 Punkte bei 4000 U/min für Benzin (grüne Dreiecke) eingetragen. Wie erwartet nimmt dieses Verhältnis mit zunehmender Motordrehzahl aufgrund höherer Luftgeschwindigkeit und Turbulenz ab.

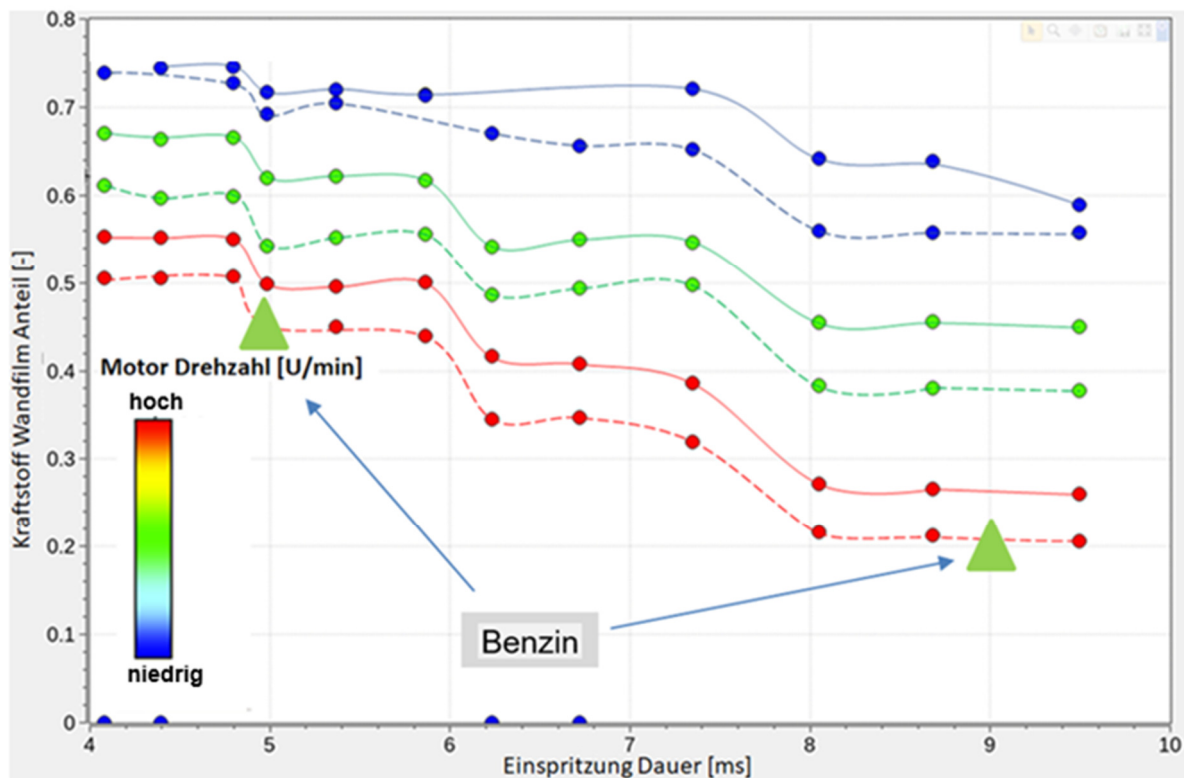


Abb. 5 rel. Kraftstoff im Wandfilm über Einspritzdauer für verschiedene Motordrehzahlen bei gleicher Einspritzmenge

Eine längere Einspritzdauer bedingt durch niedrigeren Injektordurchfluß sorgt für einen schwächeren Strahlimpuls. Bei einer Einspritzung während des Ansaugtaktes führt dies zudem zu einem zunehmenden Anteil des eingebrachten Kraftstoffes nahe UT, d.h. bei größtmöglichem Abstand zwischen Injektor und Kolben. Die damit verbundenen geringeren Wechselwirkungen zwischen dem Kraftstoffstrahl und dem Kolbenboden haben eine schwächere Wandfilmbildung an der Brennraumwand (Kolbenmulde und Zylinderrohr) zur Folge.

Die Bedeutung des Injektordurchflusses für die Gemischbildung ist im nächsten Diagramm (Abb. 6) abzuleiten. Simulationen wurden bei Nennleistung mit verschiedenen Einspritzventildurchflussraten durchgeführt. Die Standardabweichung des Luft-Kraftstoff-Verhältnisses (Y -Achse) im OT wird als repräsentativ für die Mischungsqualität zu Beginn der Verbrennung angesehen und ein möglichst niedriger Wert ist anzustreben. Hier ist ersichtlich, dass bei

Nennleistung mit Einspritzdauern bis zu 240 °KW, entsprechend der niedrigen Injektordurchflussrate, bereits eine akzeptable Mischung erreicht werden kann.

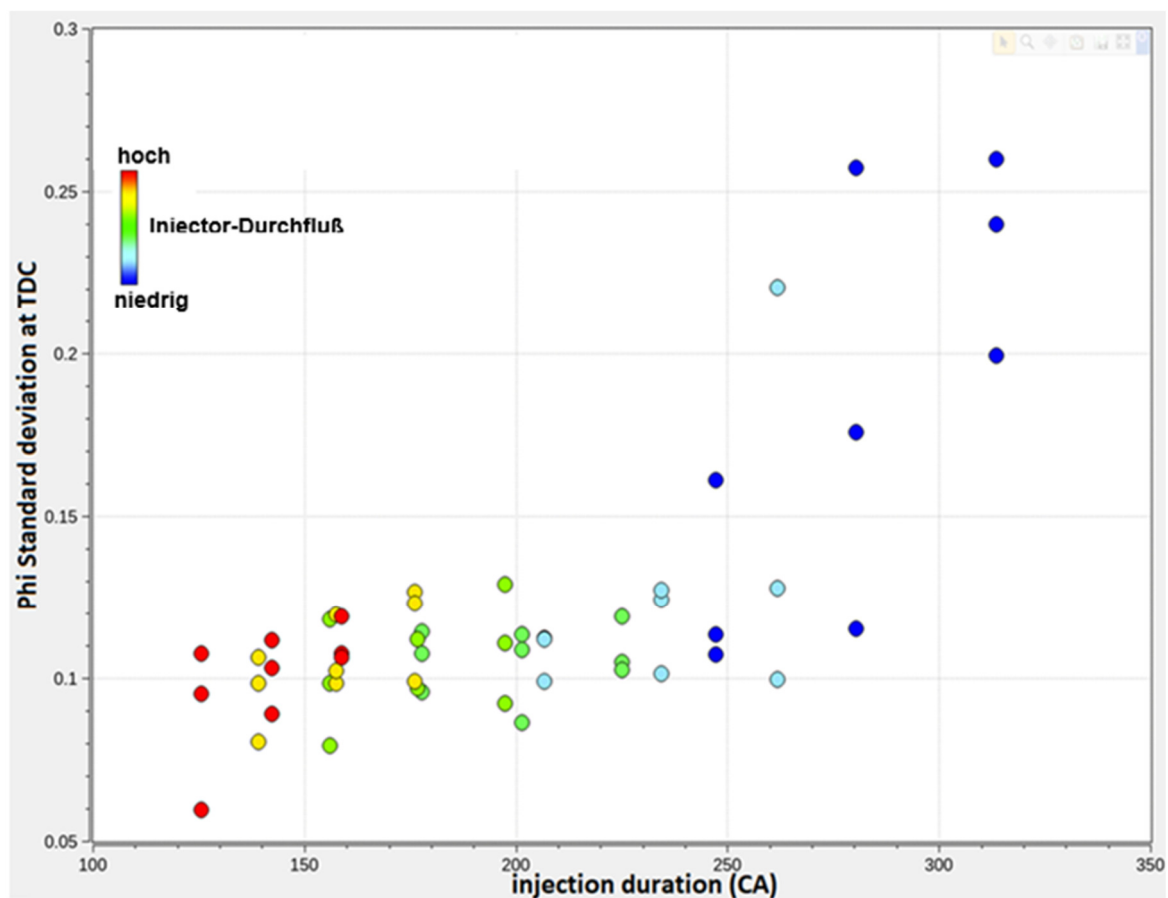


Abb. 6 Mischungsgüte über Einspritzdauer für verschiedene Injektordurchflüsse im Nennleistungspunkt

Als nächstes wurde die Stabilität der Leerlaufverbrennung untersucht. Hier wurden der Raildruck und der Zeitpunkt des Einspritzbeginns variiert, um die Wandfilmbildung zu minimieren und die Lambda-Verteilung an der Zündkerze zum Zündzeitpunkt zu optimieren. Ein SOI von 650 °KW wurde als optimal erachtet. Im Diagramm 7 ist das Zündkerzen-Lambda durch Kreise und das Zylinder-Lambda im oberen Totpunkt durch Quadrate dargestellt. Die Farben zeigen den Raildruck an. Das Ziel der Untersuchung besteht darin, die geeigneten Einspritzparameter zu ermitteln, die zu einem weitgehend stöchiometrischen Luft-Kraftstoff-Verhältnis an der Zündkerze zum Zündzeitpunkt führen. Bei diesem Einspritzbeginn lassen sich ideale Mischungen mit Raildrücken im mittleren dargestellten Druckbereich realisieren.

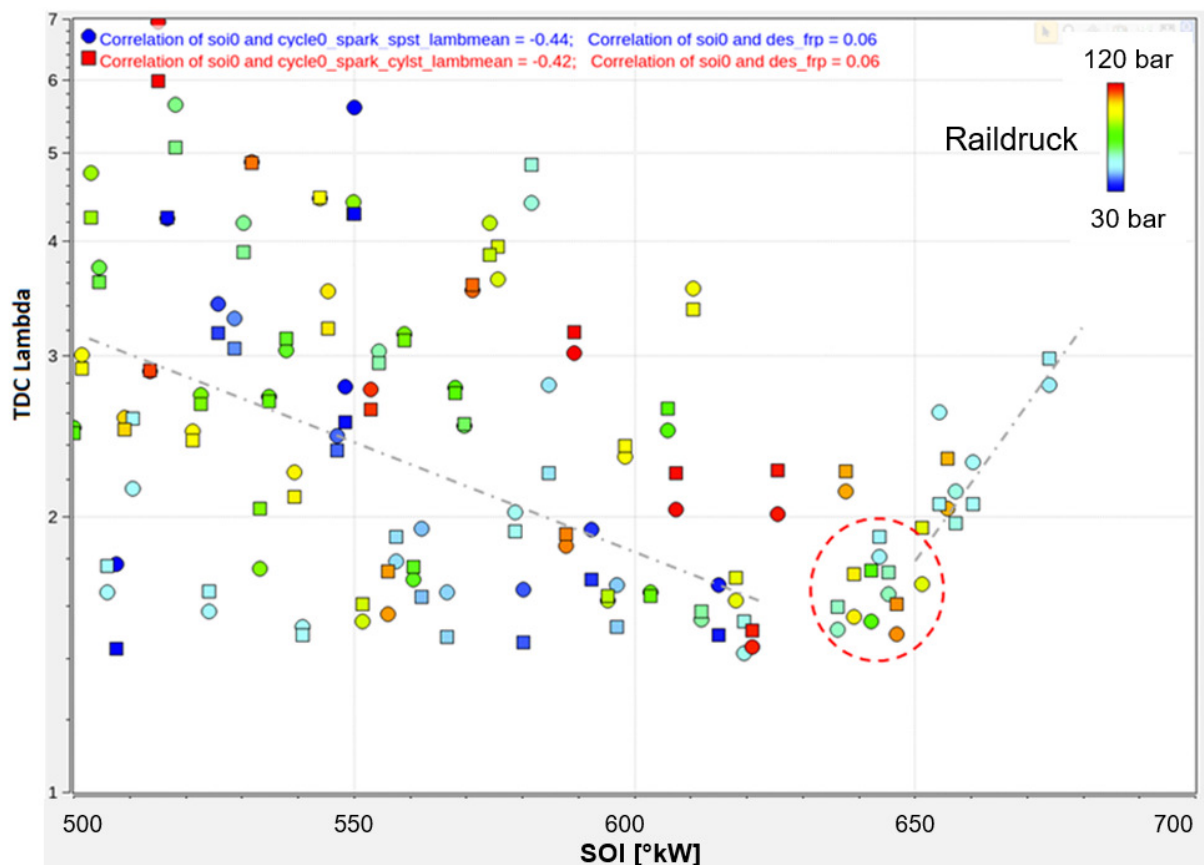


Abb. 7 *Lambda im OT über Einspritzbeginn für verschiedene Raildrücke im Leerlaufbetrieb*

Anpassung des Motors und Kalibrierung für Methanoleinsatz

Für die Prüfstanduntersuchungen wurde speziell auf den Einsatz von Methanol ausgerichtet ein Motor mit höherem Verdichtungsverhältnis und neu ausgelegter Brennraummulde aufgebaut. Die Voruntersuchungen und auch die Optimierungen der Zündzeitpunkte und Einspritzparameter für den Einsatz von Methanol wurden am Serieneinspritz-System des Motors durchgeführt. Sowohl durch die uneingeschränkte Verfügbarkeit und die schnelle Ersatzteilbeschaffung als auch durch die vorhandene Kommunikation des Einspritzsystems zum Motorsteuergerät sollte dies einen reibungslosen Prüfstandbetrieb erlauben. Später wurden die speziell für die erhöhten Einspritzmengen bei Verwendung von Methanol ausgelegten Injektoren in 2 Varianten: Low Flow und High Flow Injektoren, s. Tabelle 2 in Verbindung mit einem 350 bar fähigen -anstatt 250 bar- Hochdruckeinspritzsystem eingesetzt und getestet. Zudem wurde zur Durchflusssteigerung des Prototypeinspritzsystem der treibende Nocken für die Hochdruckpumpe um 50% erhöht und demzufolge musste eine spezielle Nockenwelle gefertigt und eingebaut werden. Da die bestellten Injektoren um 8 Monate verspätet ausgeliefert wurden, ist das gesamte Basis-Testprogramm unter Verwendung des Serien-Einspritzsystems erfolgt. Leider blieb schließlich nicht ausreichend Zeit, um für die neue Hardware-Konfiguration sämtliche verbrennungsrelevanten Parameter erneut abzu prüfen und zu optimieren. Somit wurden für die im Folgenden diskutierten Untersuchungen die auf dem Seriensystem optimierten Einstellungen verwendet und nur bei Auffälligkeiten gezielt Parameter-Optimierungen durchgeführt, um das bestmögliche Ergebnis zu erzielen.

			Variation			
			Benzin		Methanol	
			5-Loch Inj.	5-Loch Inj.	6-Loch Inj.	6-Loch Inj.
					Low-Flow	High-Flow
	Einheit	Basis				
Motor		Serie-EU6	Prototyp			
Kraftstoff		EU-Super	Methanol			
Hubraum	ccm		1000			
Zylinder	-		3			
Kompressionsverhältnis	-	Basis	+10%			
Einspritz-System			Serie		Prototyp	
Nocke für HD-Pumpe	mm	Basis			+50%	
max. Einspritzdruck	bar	250			350	
Lochanzahl	-	5			6	
Durchfluß (100 bar)	ccm/s	Basis			Basis	+60%

Tab. 2 Übersicht der Änderungen am Serienmotor für Methanolbetrieb

Bei der Umstellung von Benzin auf Methanol blieben der Luftpfad eingeschlossen der Turbolader und der Ladeluftkühler sowie die Steuerzeiten und VCT-Einstellungen in allen Betriebspunkten unverändert. Mit den Verbrennungseigenschaften von Methanol (Heizwert & stöchiometrischer Luftbedarf) berechnet sich bei gleichem Wirkungsgrad ein um 1,5% niedrigerer Luftbedarf gegenüber Benzin. Damit ist eine Anpassung des Luftpfades in diesem Projekt nicht erforderlich.

Wegen des mehr als doppelt so hohen Kraftstoffeinsatz von Methanol werden die verbrennungsrelevanten Größen wie Einspritzbeginn (SOI) und Zündzeitpunkte (ZZP) variiert, um die verbrauchsoptimalen Einstellungen zu ermitteln. Wegen der längeren Einspritzdauern wurde im ganzen Kennfeld nur die Einfacheinspritzung verwendet. Eine Mehrfacheinspritzung wäre aufgrund der verlängerten Einspritzdauer nur bei geringen Einspritzmengen technisch möglich und somit nur im begrenzten Bereich des Kennfeldes umsetzbar gewesen. Ein möglicher Vorteil wird nur geringes Gewicht im Gesamtergebnis haben und da der hohe Aufwand im Projekt nicht eingeplant war, wird die Verwendung und Anpassung der Mehrfacheinspritzung für den Betrieb mit warmem Motor nicht betrachtet.

Abbildung 12 zeigt die Drehmomentkurve des verwendeten Motors mit den WLTC-relevanten Betriebspunkten in der Serienanwendung des Demonstratorfahrzeuges. Für die Optimierung der Methanolanwendung wurde besonderes Augenmerk auf den WLTC-relevanten Bereich sowie auf hohe Lasten eingeschlossen Drehmoment- und Leistungspunkt gelegt. Im Bild sind die Variationen durch Symbole an den jeweiligen Betriebspunkten dargestellt, die im Folgenden diskutiert werden.

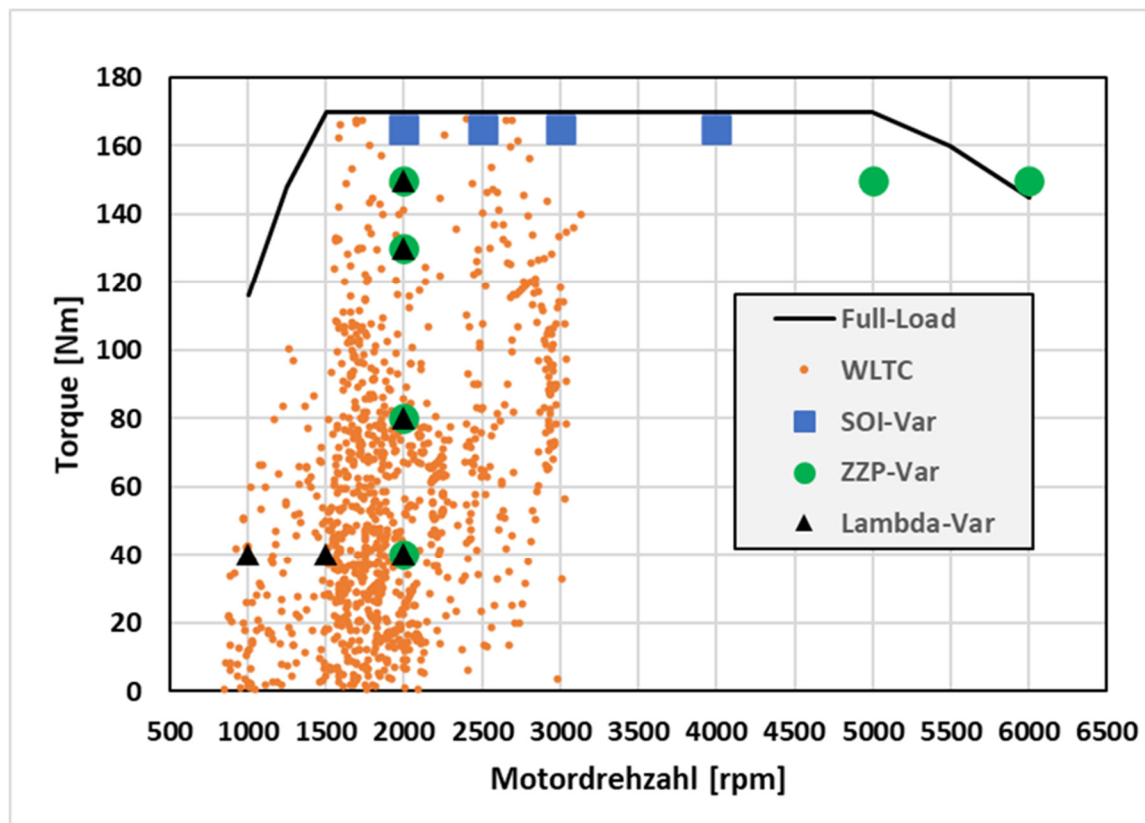


Abb. 12 *Parametervariation an ausgewählten Punkten im Motorkennfeld*

Zunächst wurden die Einspritzbeginne (SOI) untersucht. Abbildung Abb. 13 zeigt Einspritzbeginnvariationen bei verschiedenen Drehzahlen und hohen Lasten bei konstantem Saugrohrdruck von 1,6 bar (abs.). Da diese Vorgabe auch konstante eingespritzte Kraftstoffmenge bedeutet, kann durch Effizienzänderung bei einer SOI-Verschiebung das Drehmoment und der spezifische Verbrauch variieren.

Mit sinkender Drehzahl zeigt sich eine wachsende Auswirkung der Einspritzbeginnlage auf den Wirkungsgrad (η_{eff}) und das erzielte Drehmoment. Von frühen Einspritzbeginnenden kommend ergibt sich bei den dargestellten Drehzahlen bis 4000 U/min eine Verbesserung im Wirkungsgrad und Drehmoment bis zu einem bestimmten Einspritzzeitpunkt. Bei späteren Einspritzbeginnenden und der SOI-Variation @ 4000 U/min bleiben diese Größen unverändert.

Die Analyse des Einspritzendes (EOI) zeigt ein konstantes Verbrauchsoptimum bei EOI später als 180 °kW vor OT -also nach UT. Bei 4000 U/min liegt der EOI in allen getesteten Punkten bereits nach UT, somit ist das Verbrauchsoptimum erreicht und es ergeben sich keine Änderungen.

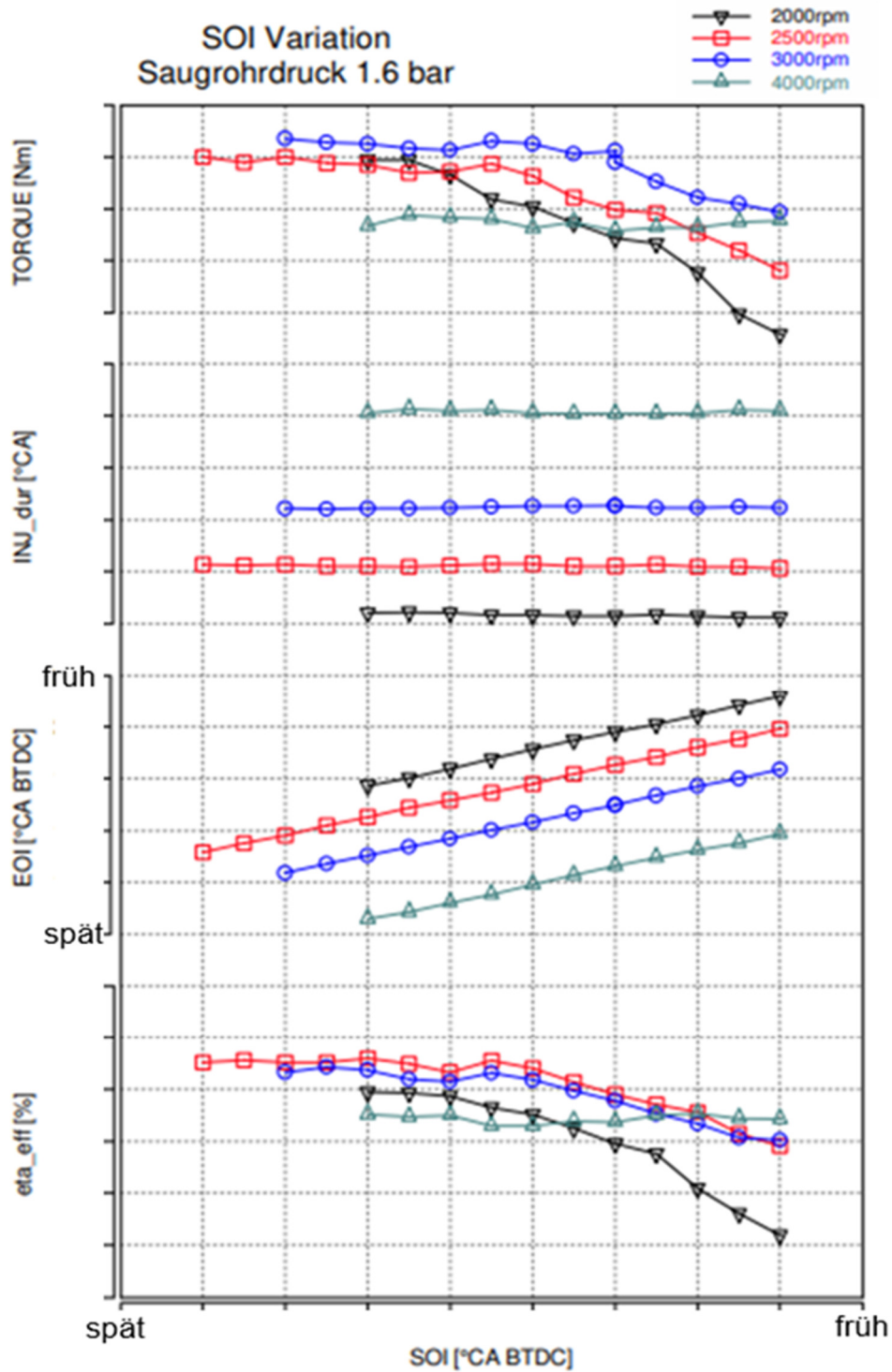


Abb. 13 SOI-Variation mit Serieneinspritzsystem bei 1,6 bar Saugrohrdruck @ verschiedenen Drehzahlen: Wirkungsgrad & Einspritzparameter

Die Kombination ungünstiger Einspritzlagen (Einspritzbeginne und Einspritzende) werden ebenfalls anhand der Emission bestätigt (Abb. 14). Im verbrauchsoptimalen Bereich liegen HC, CO und O2-Emissionen auf einem Minimum.

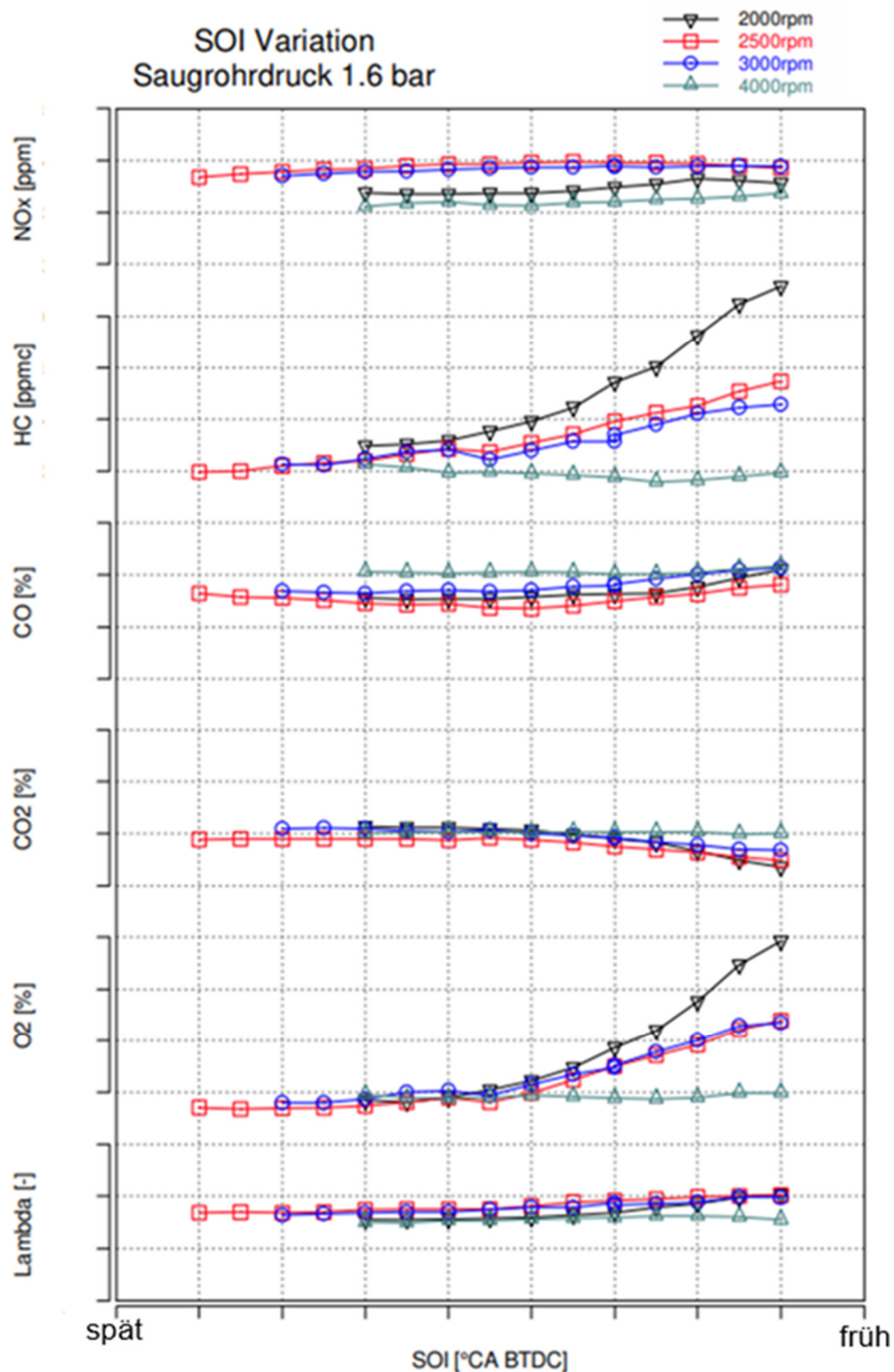


Abb. 14 SOI-Variation mit Serieneinspritzsystem bei 1,6 bar Saugrohrdruck @ verschiedenen Drehzahlen: Emissionen vor Katalysator

Die folgenden Diagramme (Abb.15 – 16) stellen die Ergebnisse von Zündzeitpunktvariationen (ZZP) bei 2000 U/min und verschiedenen Drehmomenten dar. Für alle Messreihen lässt sich ein Verbrauchsoptimum bei einer Verbrennungsschwerpunktlage (MFB50) zwischen 8 – 10°KW nach OT ableiten. Bei hohen Lasten, hier dargestellt durch 150 Nm, könnte ein geringfügig späterer Zündzeitpunkt den maximalen Zylinderdruckgradienten (RPMAX) entschärfen und mehr Reserve zum Spitzendrucklimit (140 bar) des Motors geben ohne signifikante Einbußen im Wirkungsgrad.

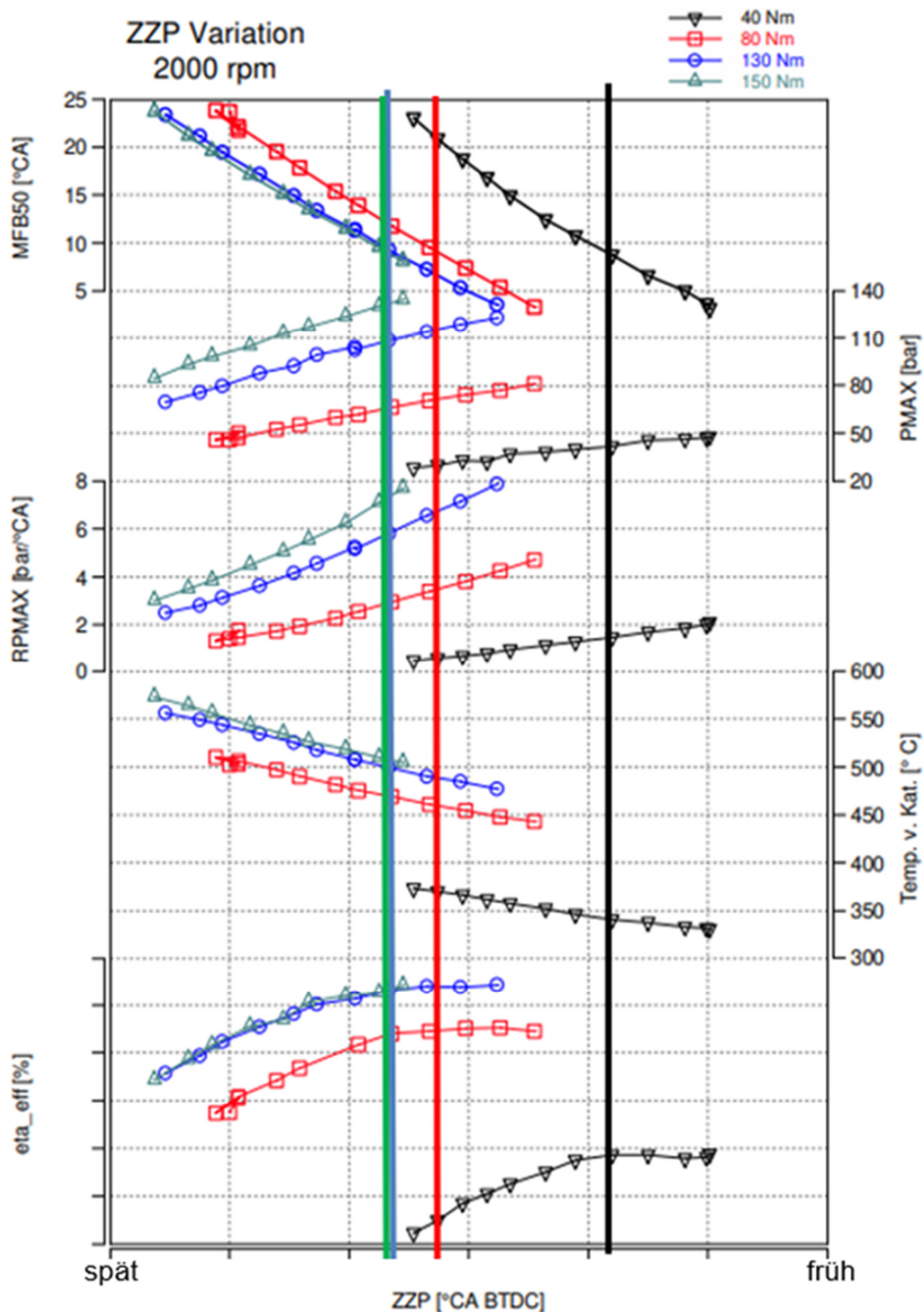


Abb. 15 ZZP-Variation mit Serieneinspritzsystem bei 2000 U/min @ verschiedenen Lasten: Verbrennung, Wirkungsgrad, Temperatur v. Katalysator

Bei niedrigen Drehmomenten, erkennbar z.B. bei 40 Nm, liegt die Abgastemperatur vor Katalysator unter 400 °C. Eine gute Konvertierung wird ab 450 °C erwartet. Bei Bedarf lässt sich mit entsprechenden Verbrauchsnachteilen die Konvertierung des Katalysators durch Verschiebung des Zündzeitpunktes nach spät steigern.

Die Zündzeitpunktvariation bei hohen Lasten und Drehzahlen zeigt (Abb. 16), daß eine wirkungsgradoptimale Einstellung durch die Zylinderspitzenenddruckbegrenzung limitiert ist. Mit der Drehzahl fällt der maximale Zylinderdruckgradient bei gleichem Zylinderspitzenenddruck. Somit wird diese Größe mit zunehmender Drehzahl unkritischer.

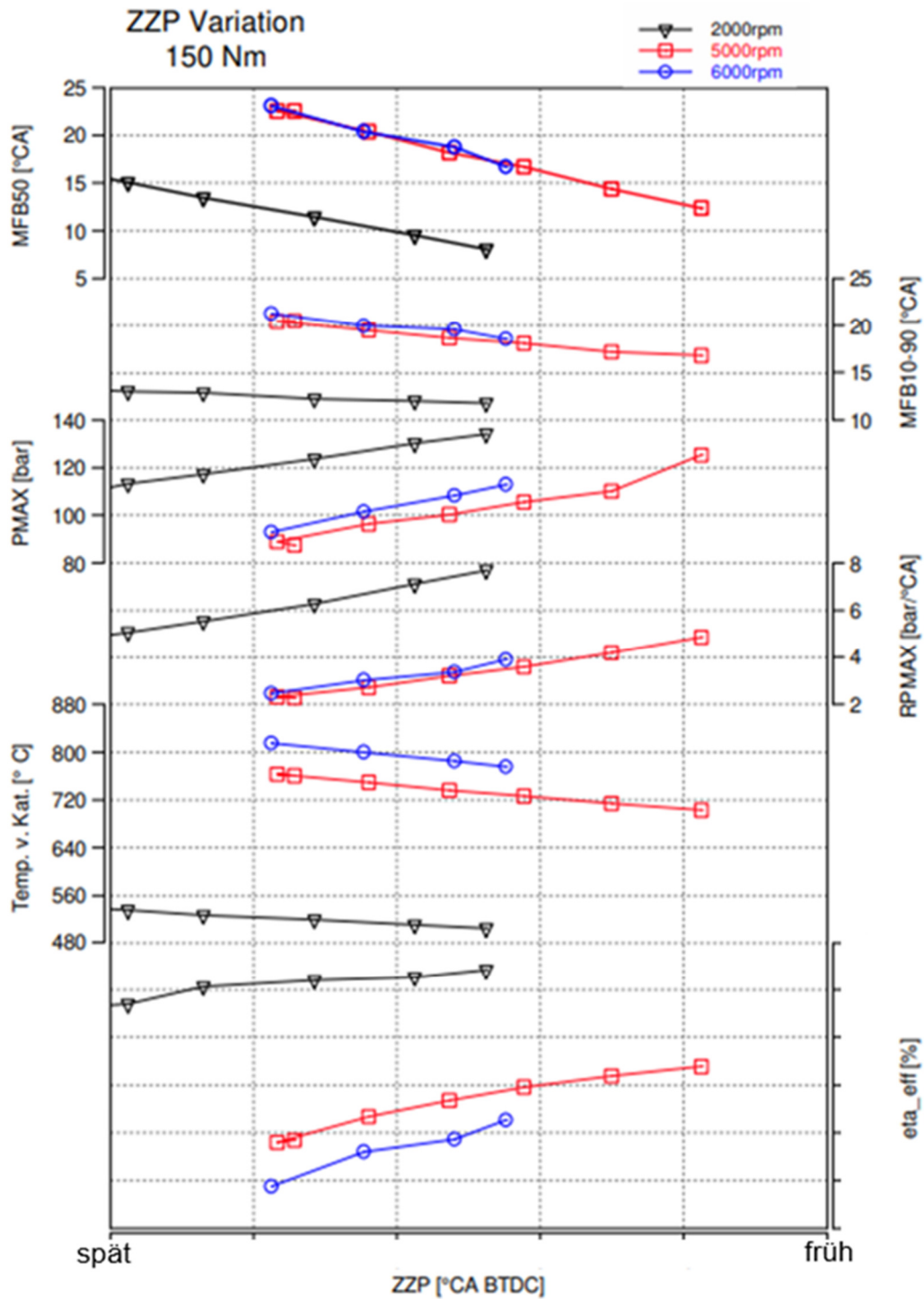


Abb. 16 ZYP-Variation mit Serieneinspritzsystem bei 150 Nm @ verschiedenen Drehzahlen: Verbrennung, Wirkungsgrad, Temperatur vor Katalysator

Bei 2000 Motorumdrehungen kann ein Wirkungsgrad von 40% dargestellt werden ohne Motorlimits zu überschreiten.

Klopfen konnte an keiner Stelle im Kennfeld detektiert werden.

Als nächstes werden die Ergebnisse der Lambda-Variationen bei unterschiedlichen Drehzahlen und Lasten anhand der Emissionen diskutiert. Bild 17 zeigt die Emissionen über Lambda aus der Abgasanalyse bei niedrigem Drehmoment für verschiedene Drehzahlen.

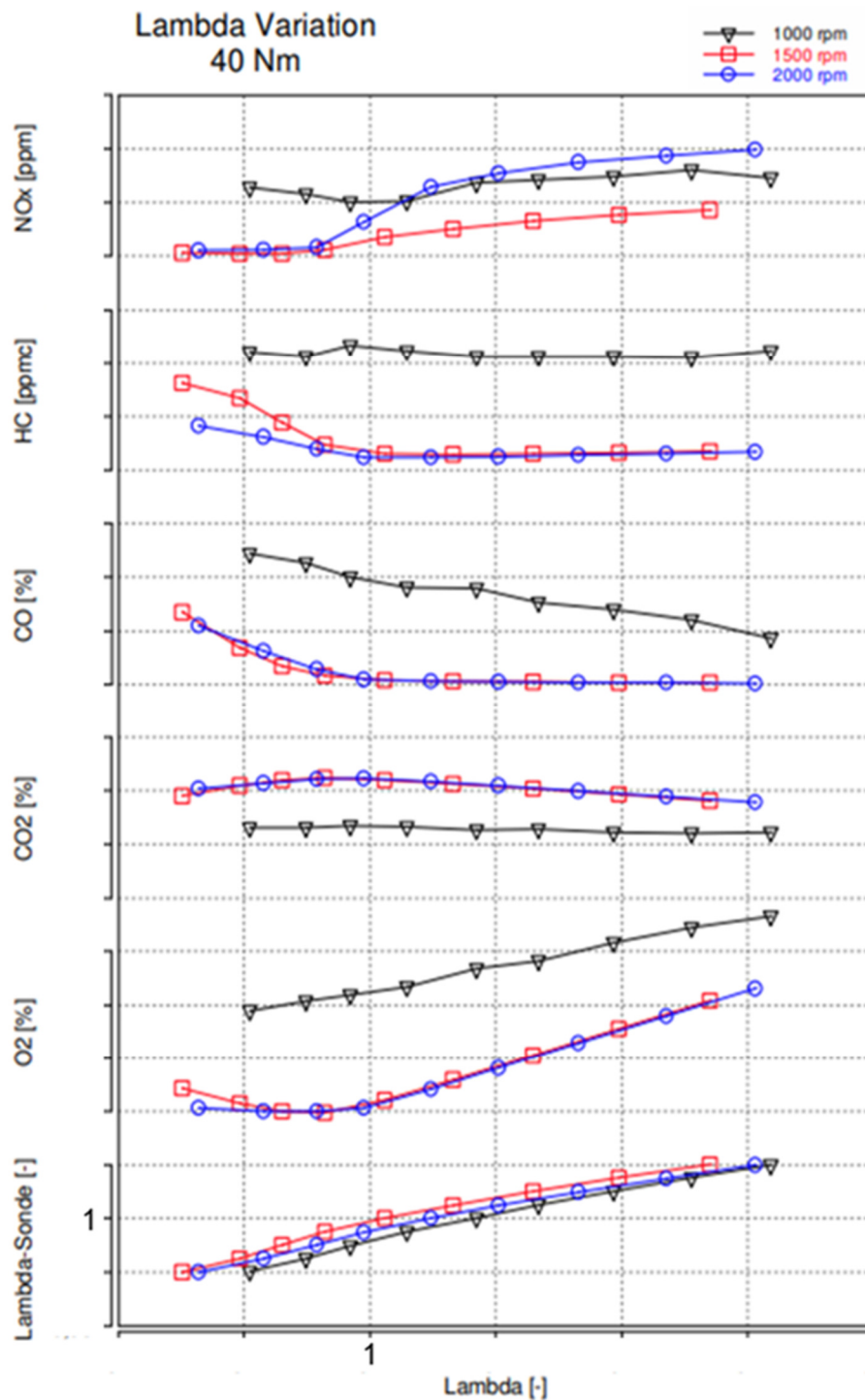


Abb. 17 Lambda-Variation mit Serieneinspritzsystem bei 40 Nm @ verschiedenen Motordrehzahlen: Emissionen vor Katalysator

Ein charakteristischer Verlauf der Abgaskomponenten über Lambda ist für die Drehzahlen 1500 und 2000 U/min zu erkennen. Hier sinken die Stickoxidemissionen vom mageren Bereich ($\lambda > 1$) kommend bis $\lambda = 1$. Im fetten Bereich ($\lambda < 1$) bleiben die Nox-Emissionen konstant auf einem niedrigen Niveau, während die Werte für HC und CO aufgrund unvollständiger Verbrennung durch Sauerstoffmangel ansteigen. Bei 1000 U/min weisen die erhöhten Emissionen aller Spezies (außer CO₂) über den gesamten Lambda-Variationsbereich auf eine schlechte Gemischaufbereitung hin, demzufolge der eingebrachte Kraftstoff und Sauerstoff nicht vollständig zusammenfinden und umgesetzt werden können.

Mit den Ergebnissen der umfangreichen Voruntersuchungen einzelner Parameter wurde die Kalibrierung für das Fahrzeug entwickelt und optimiert. Abweichung der Zündzeitpunkte nahe Vollast vom ermittelten Optimum in Richtung „spät“ dienen lediglich einem sicheren Betrieb, um den Motor mit ausreichender Reserve zum Spitzendrucklimit zu betreiben. Dies gilt insbesondere für das Fahrzeug, da hier eine Zylinderdruckindizierung anfangs nicht vorgesehen war. Die Klopfregelung hilft hier nicht, da bei Methanol kein Klopfen detektiert wurde. In der Serienentwicklung würde gleichermaßen die Robustheit der Kalibrierung verbessert werden und man somit näher an die Motorlimits wie z.B. Spitzendruckbegrenzung gehen kann. Hier ließe sich noch Potential in Hinblick auf Verbrauch und Leistungssteigerung heben.

Die in folgenden Lastschnitten durch Drehmoment- bei 1500 U/min und Leistungs-Punkt bei 5500 U/min vorgestellten Daten wurden mit der angepassten Kalibrierung für Methanol aus der Motorsteuerung gefahren. Die Diagramme präsentieren die Ergebnisse mit dem Serieneinspritzsystem („Methanol 5-Loch Inj.“) und dem Prototypsystem unter Verwendung des „6-Loch, Low Flow“ Injektors („Methanol 6-Loch Inj.“), welche den anfänglichen Messungen des modifizierten Motors (höheres Verdichtungsverhältnis) mit Benzin und dem Serieneinspritzsystem („Benzin 5-Loch Inj.“) gegenübergestellt werden (Abb. 18 – 25). Die hier verwendeten Einspritzventile haben alle den gleichen statischen Durchfluß von 11 ccm/s.

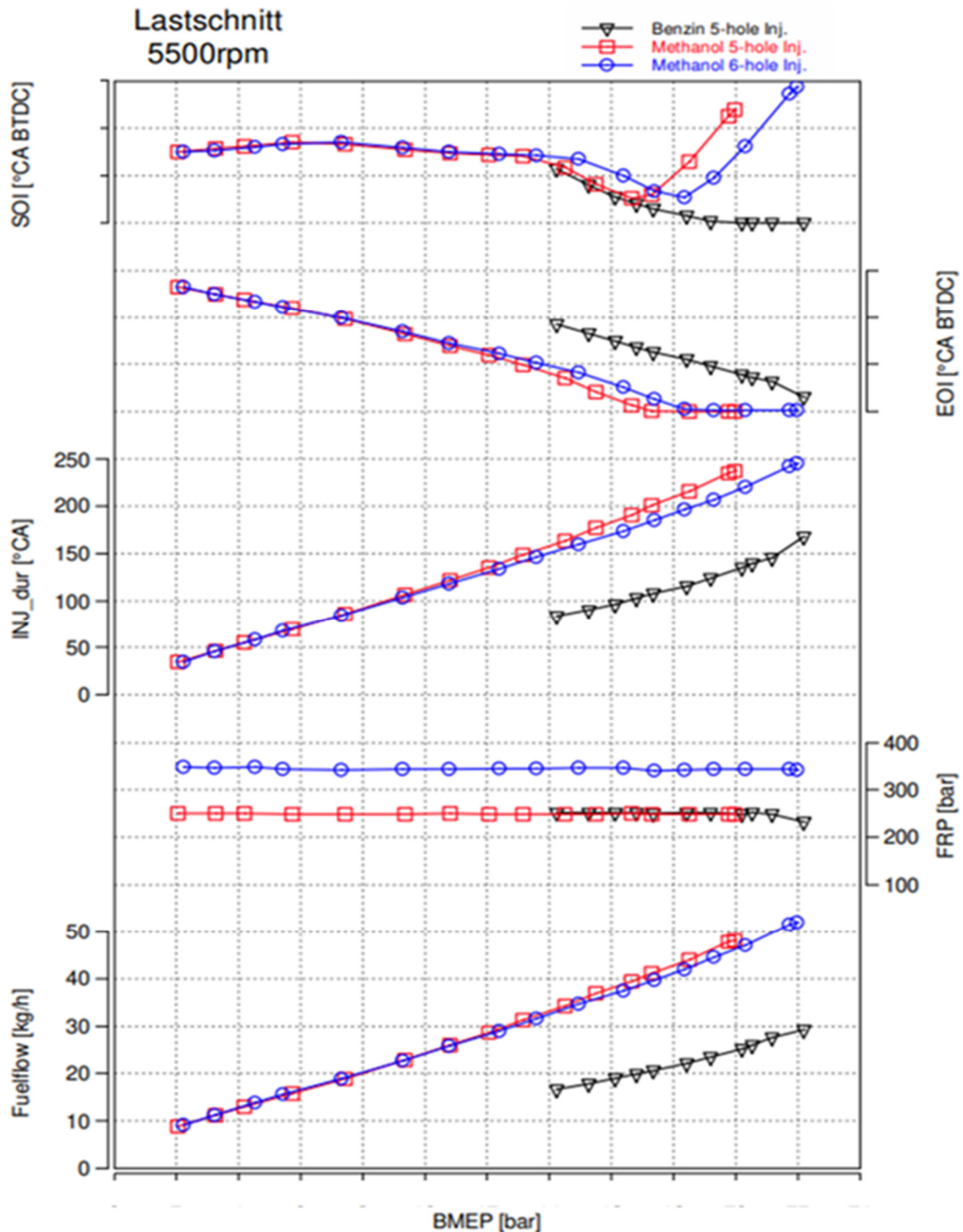


Abb. 18 Lastschnitt bei 5500 U/min – Vergleich Methanol vs. Benzin: Einspritzparameter

Beim Wechsel von Benzin auf Methanol (Abb. 18) muss aufgrund des niedrigen Heizwertes nahezu die doppelte Kraftstoffmasse (Fuelflow) eingebracht werden. Durch die höhere Dichte von Methanol fällt die Einspritzdauer (INJ_dur) jedoch nicht doppelt so lang aus und kann mit dem neuen Einspritzsystem durch die Steigerung des Einspritzdruckes von 250 auf 350 bar („Methanol 6-Loch Inj.“ vs. „Methanol 5-Loch Inj.“) weiter reduziert werden. Bei Drehzahl von 5500 U/min und nahe Vollast ergibt sich mit für Methanol durch die lange Einspritzdauer ein sehr spätes Einspritzende (EOI). Um ein Einspritzende später als ein Grenzwert

zur Zündung zu vermeiden, welcher in der Motorsteuerung festgelegt ist, wird der Einspritzbeginn (SOI) entsprechend von der Motorregelung vorgezogen. Bei Verwendung des 350 bar Einspritzsystems im Vergleich zum Seriensystem erfolgt diese Korrektur bei entsprechend höheren Lasten bzw. größeren Einspritzmengen.

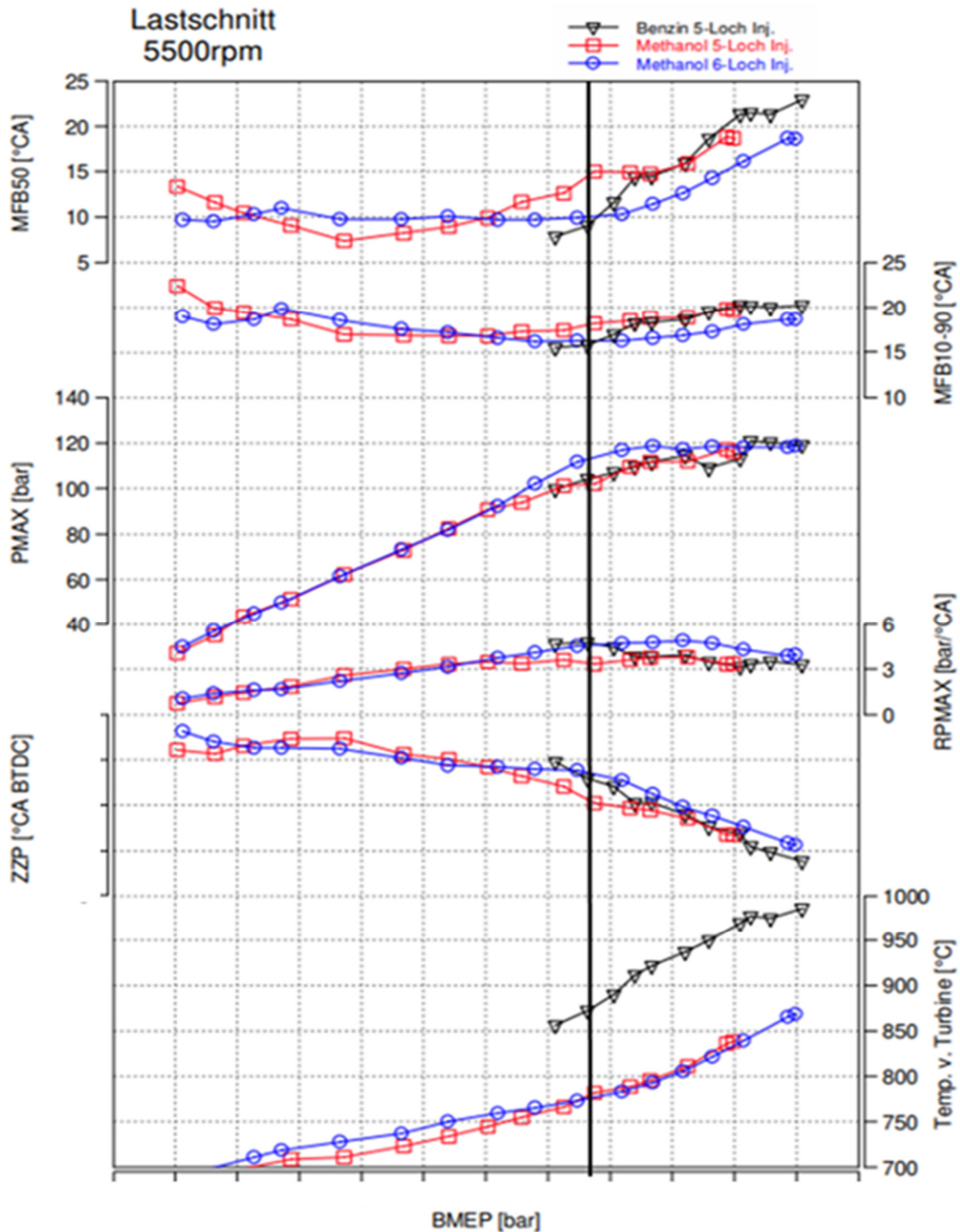


Abb. 19 Lastschnitt bei 5500 U/min – Vergleich Methanol vs. Benzin: Verbrennung

Abbildung 19 zeigt für die Meßreihe „Methanol 6-Loch Inj.“ einen optimierten Verlauf durch verbrauchsoptimale Einstellung des Zündzeitpunktes von MFB50 auf etwa 10°kW nach OT bis Erreichen des Zylinderspitzendruckes von 120 bar. Zu höheren Lasten wird der Zündzeitpunkt so gewählt, dass der Spitzendruck 120 bar nicht überschritten wird.

Im markierten Lastpunkt haben „Benzin 5-Loch Inj.“ und „Methanol 6-Loch Inj.“ einen gleichen Zündzeitpunkt. Hier ist ein Vergleich zwischen Benzin und Methanol hinsichtlich der Verbrennungseigenschaften der unterschiedlichen Kraftstoffe sinnvoll. Die hohe Verdampfungsenthalpie von Methanol führt zu einer starken Abkühlung der Zylinderfüllung und trotz Zündung und Verbrennung auf niedrigerem Temperaturniveau (s. auch Abb. 20) weisen aufgrund der hohen Flammengeschwindigkeit von Methanol beide Kraftstoffe in diesem Punkt einen ähnlichen Zündverzug -nicht dargestellt-, eine vergleichbare Verbrennungsschwerpunktage als auch eine nahezu gleiche Brenndauer „MFB10-90“ auf. Die Verbrennung bei niedrigeren Temperaturen hat ebenfalls eine starke Absenkung der Abgastemperatur (Temp. v. Turbine) als auch geringere NOx-Emissionen (Abb. 21) zur Folge. Bei der Umstellung von Benzin auf Methanol ergibt sich im Leistungspunkt eine Reduktion der Abgastemperatur um 120 °C, von 980°C auf 860°C. Hier sind bei Methanol keine Maßnahmen wie fetter Betrieb zur Abgastemperaturabsenkung erforderlich und es wäre hinsichtlich Temperaturfestigkeit der Turbine eine Umstellung auf kostengünstigere Materialien möglich.

Exemplarisch für hohe Last und Motordrehzahl in Abbildung 20 dargestellt, zeigt der Zylinderdruck- und der Summenbrennverlauf unter Verwendung identischer Hardware bei Einsatz von Methanol im Vergleich zu Benzin deutlich den Effekt der hohen Verdampfungsenthalpie von Methanol auf die Zylinderfüllung. Auch wenn eine größere Masse (Luft plus Kraftstoff) im Fall von Methanol im Brennraum eingeschlossen ist, sorgt dessen hohe Verdampfungsenthalpie zu einer starken Abkühlung und somit zu einem schwächeren Druckaufbau während der Kompression. Bei gleichem ZZP ergibt sich trotz niedrigerem Druck- und Temperaturniveau für Methanol ein geringfügig kürzerer Zündverzug und ein schnellerer Umsatz. Mit der höheren Füllung erfolgt eine stärkere Druckzunahme während der Verbrennung, so dass schließlich der Spitzendruck auf nahezu den Wert von Benzin hinausläuft.

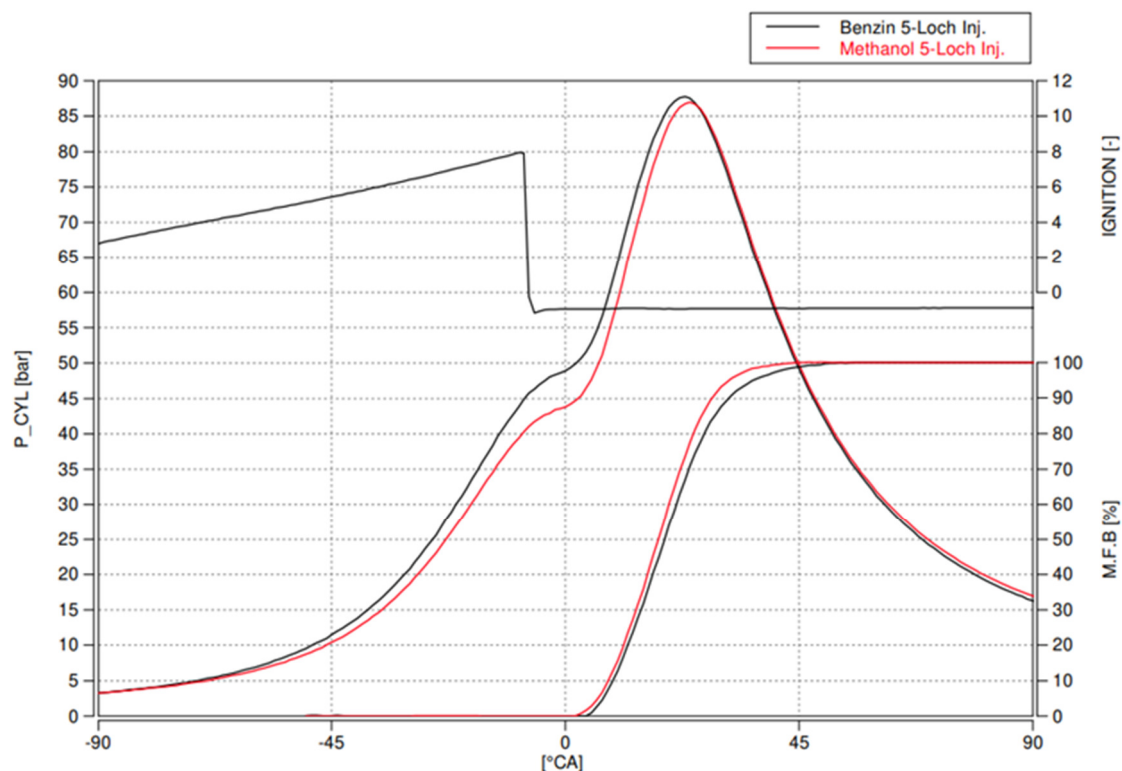


Abb. 21 Zylinderdruck & Summenbrennverlauf bei hoher Last und Motordrehzahl und gleichem ZZP: Methanol vs. Benzin

Neben den niedrigeren Nox-Emissionen (Abb. 22) werden mit der verbesserten Gemischbildung und Verbrennung unter Verwendung des angepassten Injektors „Methanol 6-Loch Inj.“ deutlich weniger HC-Emissionen produziert. Gegenüber Benzin betragen sie nur noch 50%. Darüber hinaus zeigt Methanol verglichen mit Benzin bei gleichem Lambda einen 5% geringeren CO₂-Ausstoß.

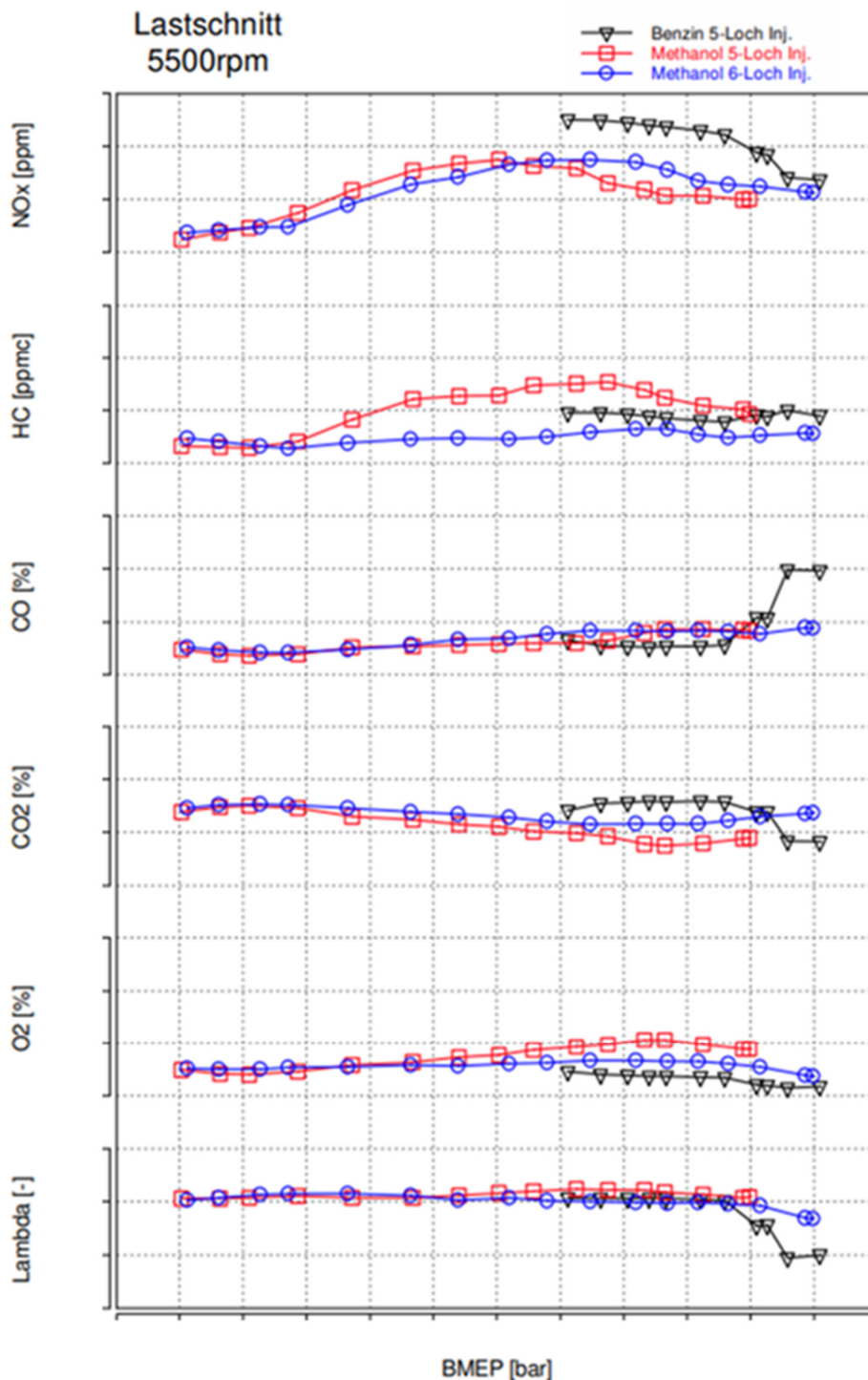


Abb. 22 Lastschnitt bei 5500 U/min – Vergleich Methanol vs. Benzin: Emissionen vor Katalysator

Selbst ohne eine Anpassung am Einspritzsystem („Methanol 5-Loch Inj.“), ist der Motor unter Verwendung von Methanol bei besserem Wirkungsgrad und Verbrauch, äquivalent zu Benzin (SFC_Benzin; ~7% bei hoher Last) dargestellt, in der Lage, seine Leistungsziele von 100 kW zu erreichen (Abb. 23). Mit der Umstellung auf das Prototyp-Einspritzsystem, also Anhebung des maximalen Einspritzdruckes auf 350 bar und Verwendung eines 6-Loch- anstelle eines 5-Loch-Injektors für eine gleichmäßigere Gemischverteilung im Brennraum, wird der Wirkungsgrad und Verbrauch in diesem Betriebspunkt nochmals um mehr als 2.5% verbessert.

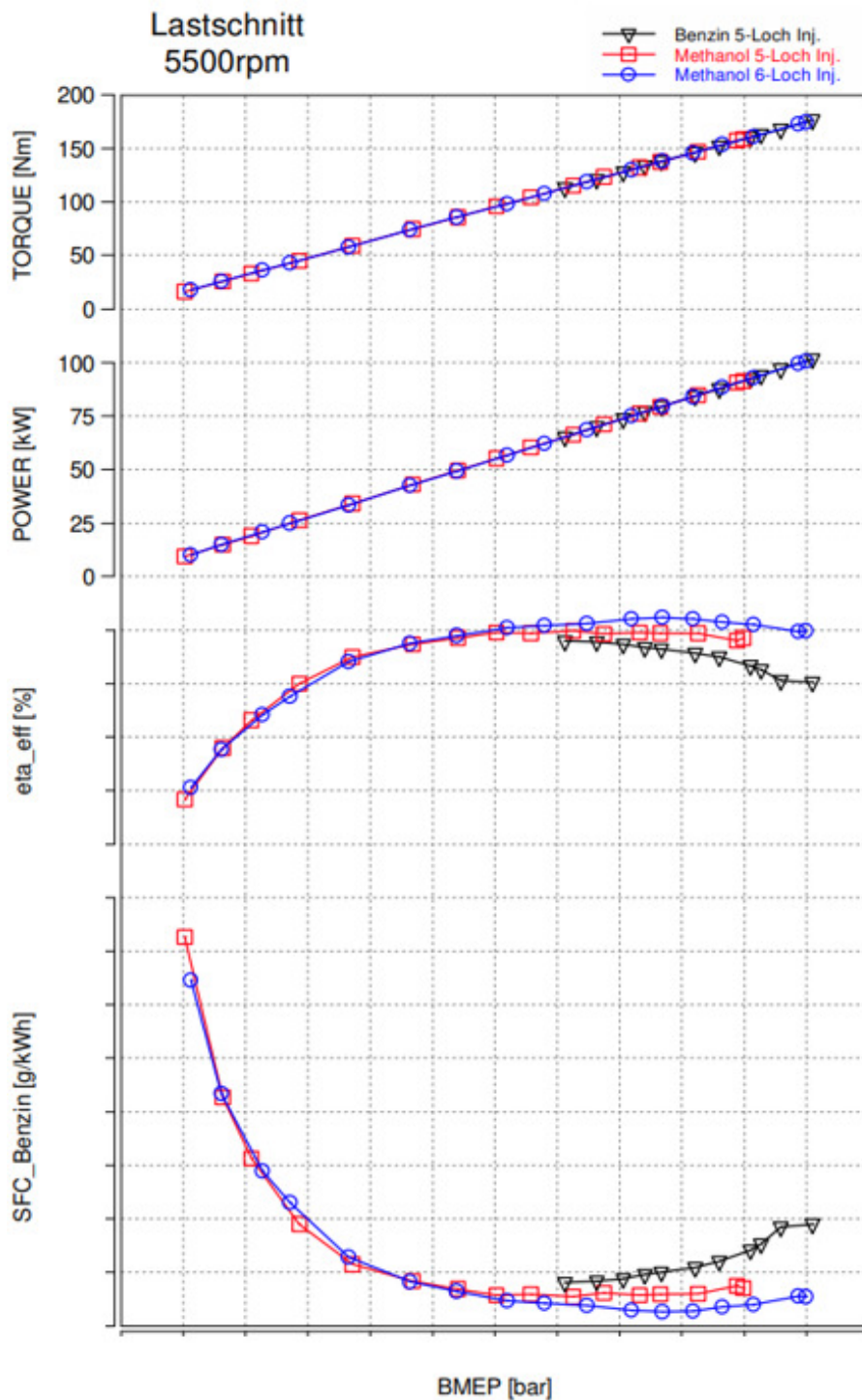


Abb. 23 Lastschnitt bei 5500 U/min – Vergleich Methanol vs. Benzin: Leistung & Wirkungsgrad

Die Verwendung von Methanol (Abb. 24) zeigt auch einen um 13 % geringeren Luftbedarf. Dies erfordert einen geringeren Ladedruck und führt zu einer deutlich niedrigeren Temperatur nach Kompressor. Mit der geringeren Arbeitsleistung des Kompressors muß auch dem Abgasstrom weniger Energie entnommen werden und damit weniger aufgestaut werden, was der Effizienz des Motorgesamtsystem zuträglich ist. Für die Serienentwicklung eines für Methanolanwendung optimierten Motors ist eine angepasste Turboladerauslegung und eine Überprüfung des Leistungsbedarfs des Ladeluftkühlers zu empfehlen.

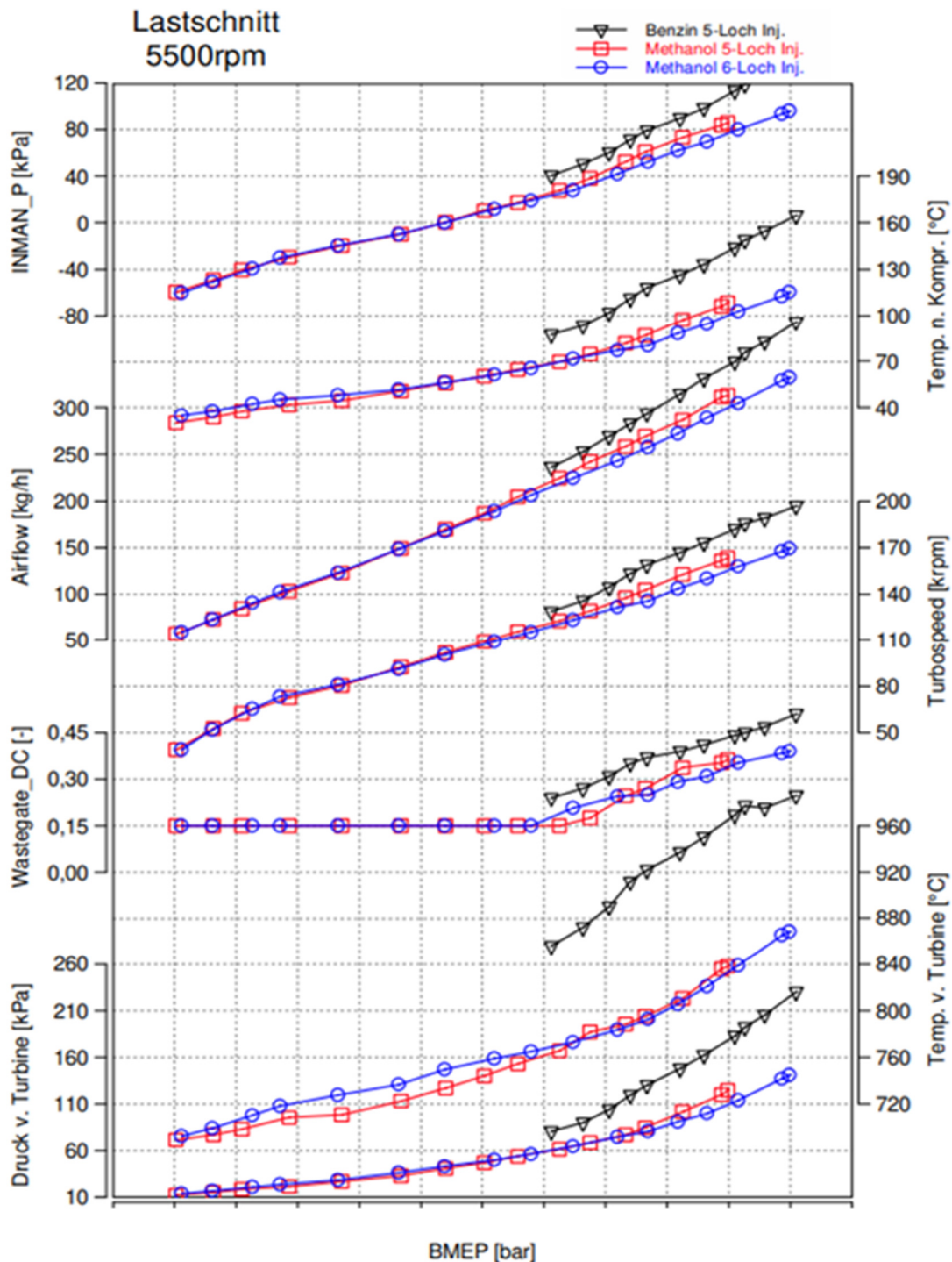


Abb. 24 Lastschnitt bei 5500 U/min – Vergleich Methanol vs. Benzin: Turbo

Im maximalen Drehmomentpunkt bei 1500 U/min (Abb. 25) erreicht der Motor mit Methanol ein höheres Drehmoment bei Pedalstellung von 100%. Für Methanol ergibt sich für den gesamten Lastschnitt ein höherer Wirkungsgrad und ein günstigerer Verbrauch. Zur Volllast hin zeigt sich mit dem neuen Einspritzsystem eine zusätzliche Verbesserung im Wirkungsgrad und Verbrauch.

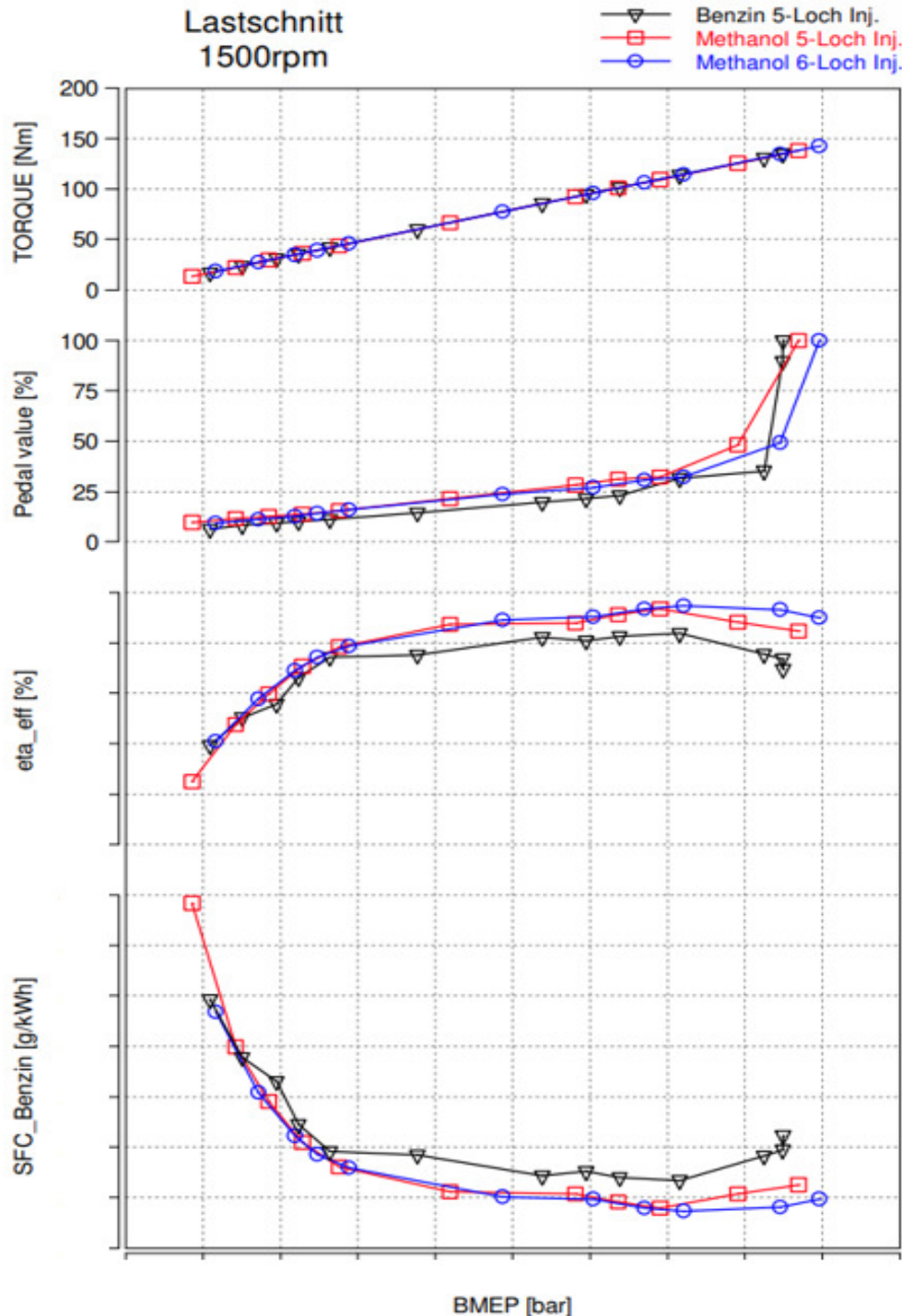


Abb. 25 Lastschnitt bei 1500 rpm – Vergleich Methanol vs. Benzin: Leistung & Wirkungsgrad

Diese Wirkungsgradverbesserung durch den Einsatz des Prototypeneinspritzsystem läßt sich auch in den HC Emissionen bei höheren Lasten erkennen (Abb. 26). Hier steigen die HC-Emissionen durch schlechte Gemischbildung und unvollständige Verbrennung bei dem

Serieneinspritzsystem signifikant an, während sie mit dem Prototypsystem auf gleichem niedrigem Niveau bleiben.

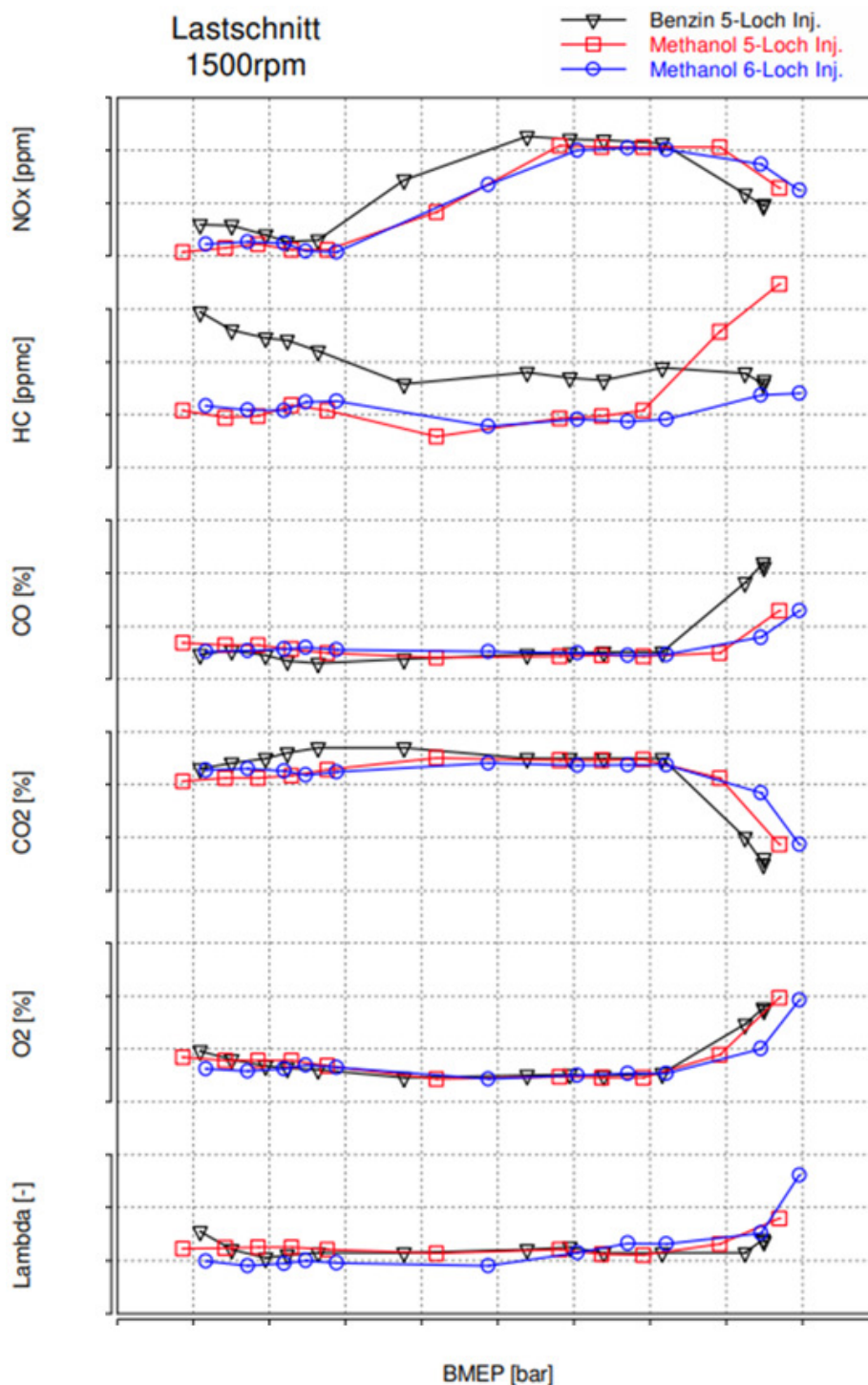


Abb. 26 Lastschnitt bei 1500 rpm – Vergleich Methanol vs. Benzin: Emissionen vor Katalysator

Selektion der Einspritzventile

Die Strahlausrichtungen der neuen Einspritzventile wurden für die Methanolverwendung auf das Verbrennungssystem mit höherem Kompressionsverhältnis ausgelegt, wobei der Durchflusskennwert des Low-Flow Injektors dem des Serieninjektors entspricht. Der High-Flow Injektor hat einen für Methanoleinsatz auf den Leistungspunkt hochskalierten Durchflusskennwert.

Erwartungsgemäß sollte bei hohen Drehzahlen und um den Leistungspunkt der High-Flow Injektor das Optimum hinsichtlich Gemischbildung und Verbrennungsqualität darstellen. Daher wird zunächst ein Vergleich beider Injektoren am Lastschnitt bis zum Leistungspunkt bei 5500 U/min diskutiert.

Abbildung 27 zeigt den Einfluss beider, Low-Flow und High-Flow Injektoren („LoFlo“ vs. „HiFlo“) in einem Lastschnitt bis zum Leistungspunkt bei 5500 U/min auf die Einspritzparameter. Bei gleichen Raildrücken (FRP: ~ 350 bar) benötigt der High-Flow Injektor eine deutlich kürzere Einspritzdauer -150°KW im Leistungspunkt gegenüber 250°KW- als der Low-Flow Injektor. In Konsequenz muss mit dem High-Flow Injektor nicht der Einspritzbeginn (SOI) nach vorn gezogen werden, um ein sehr spätes Einspritzende (EOI) später als zu vermeiden.

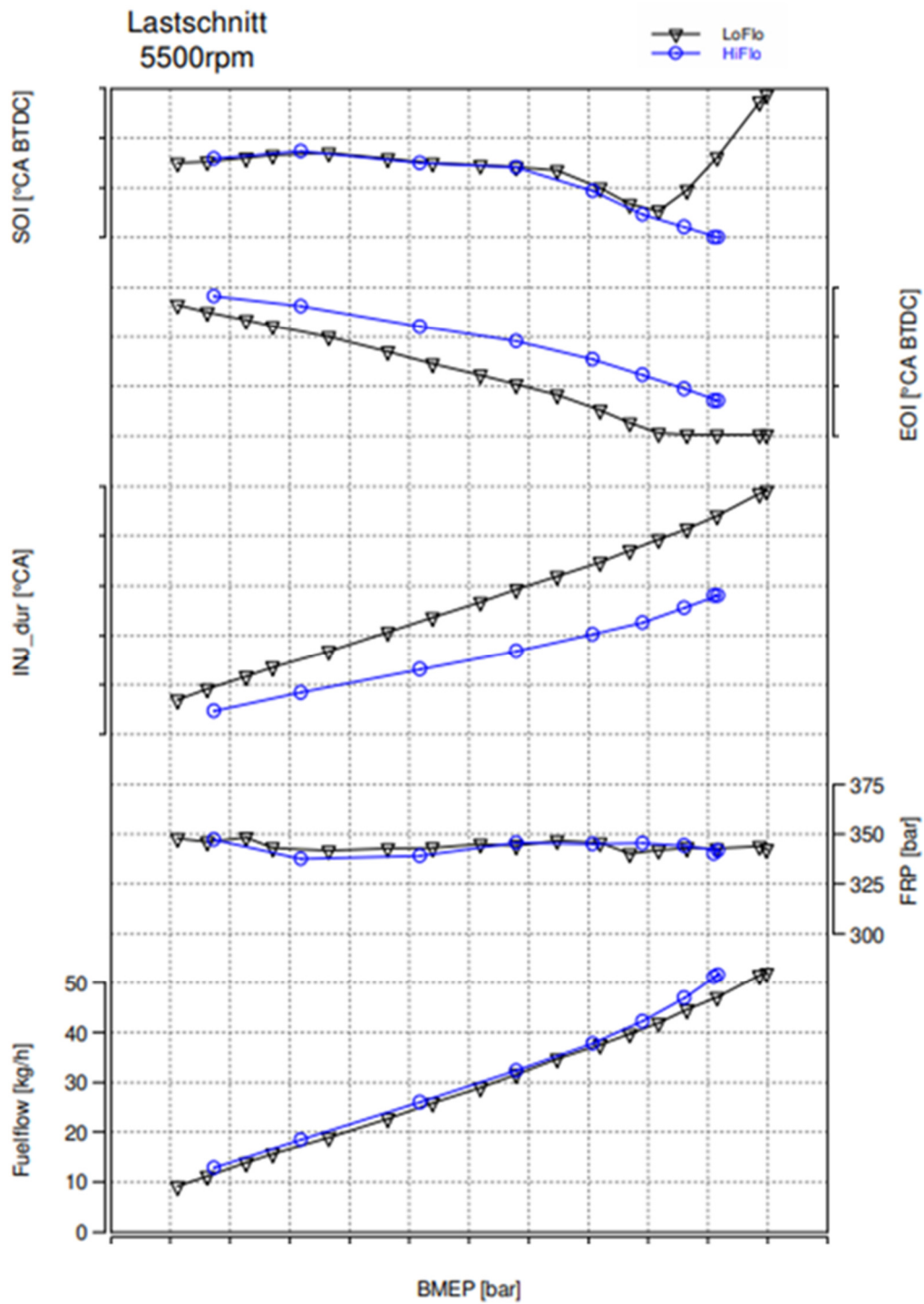


Abb. 27 Lastschnitt bei 5500 U/min - Low-Flow vs. High-Flow Injektor: Einspritzparameter

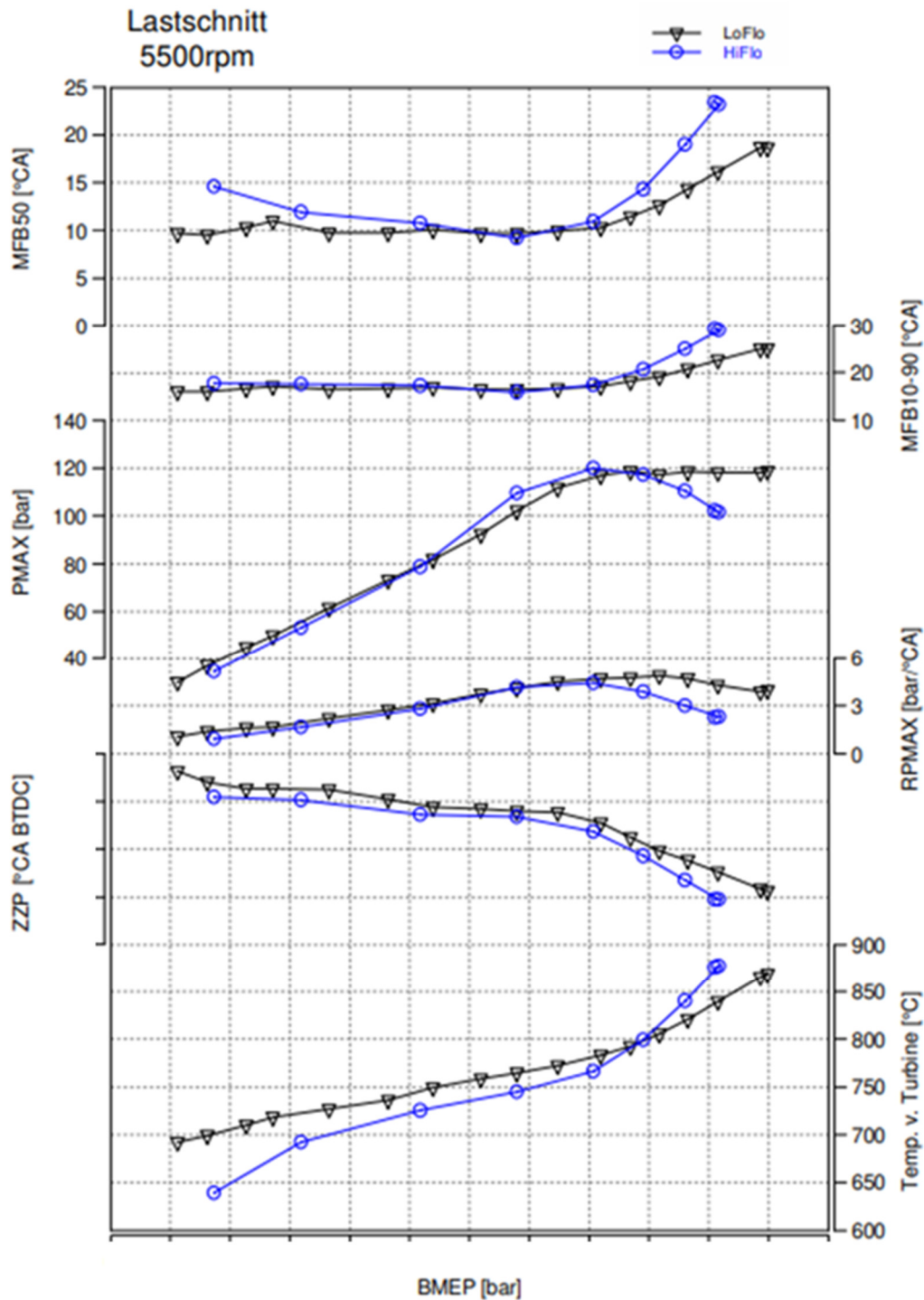


Abb. 28 Lastschnitt bei 5500 U/min - Low-Flow vs. High-Flow Injektor: Verbrennung & Abgastemperaturen

Die Darstellung (Abb. 28) stellt den Effekt der Einspritzventile auf die Verbrennung dar. Der High-Flow Injektor zeigt insbesondere bei hohen Lasten spätere Verbrennungsschwerpunktlagen (MFB50) und längere Brenndauern (MFB10-90). Dies führt zu niedrigeren Spitzendrücken (PMAX), zu schwächeren Zylinderdruckgradienten (RPPMAX) und zu höheren Abgastemperaturen als bei der Verwendung des Low-Flow Injektors.

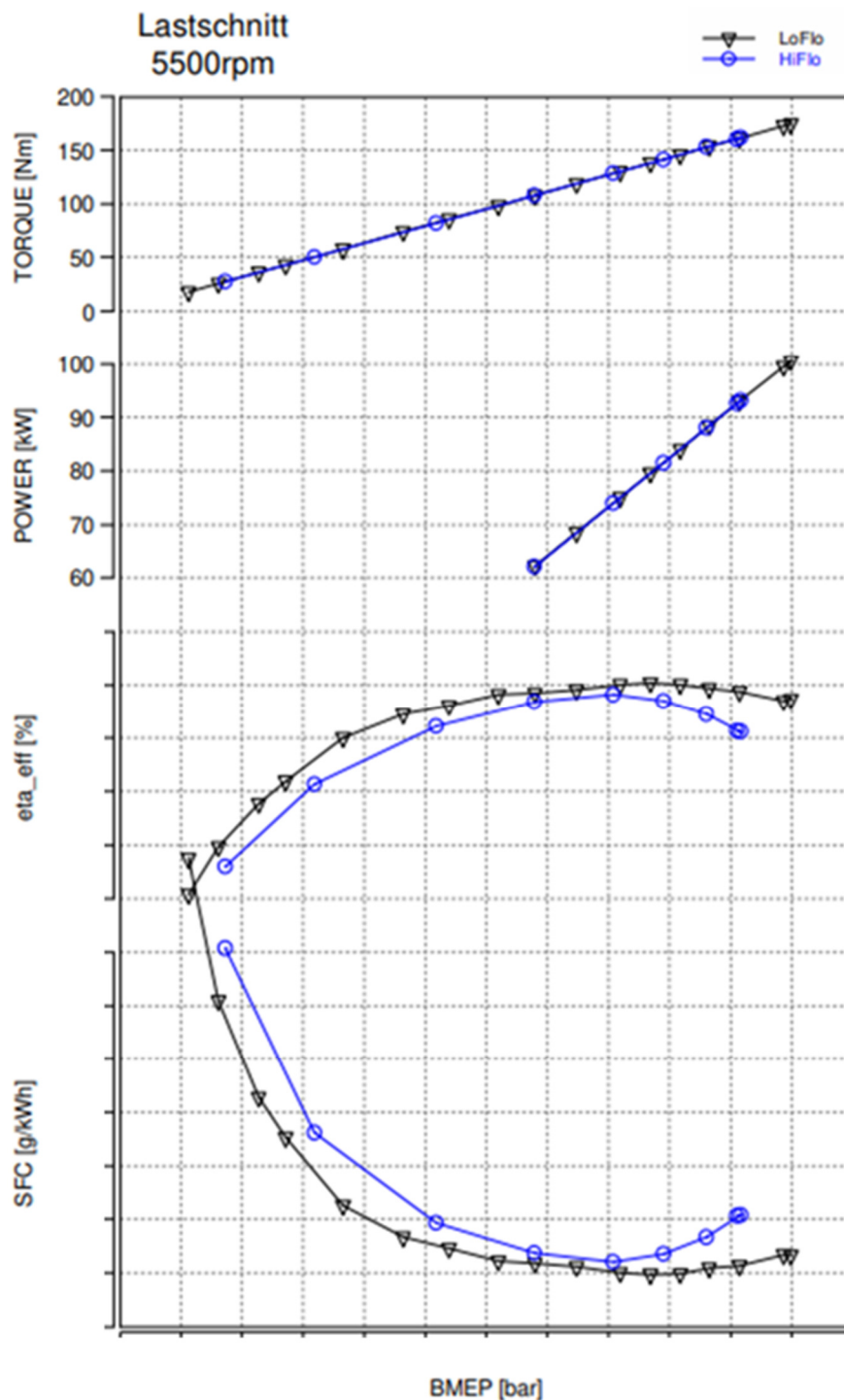


Abb. 29 Lastschnitt bei 5500 U/min - Low-Flow vs. High-Flow Injektor: Leistung & Wirkungsgrad

In Abbildung 29 ist zu sehen, daß der langsamere Umsatz bei Verwendung des High-Flow Injektors einen schlechteren Wirkungsgrad (η_{eff}) und einen deutlich höheren Verbrauch (SFC) zu Folge hat. Bei 100% Pedalstellung (nicht dargestellt) erreicht der Motor mit dem High-Flow Injektor somit nur 92 kW im Gegensatz zu 100 kW bei Einsatz des Low-Flow Injektors.

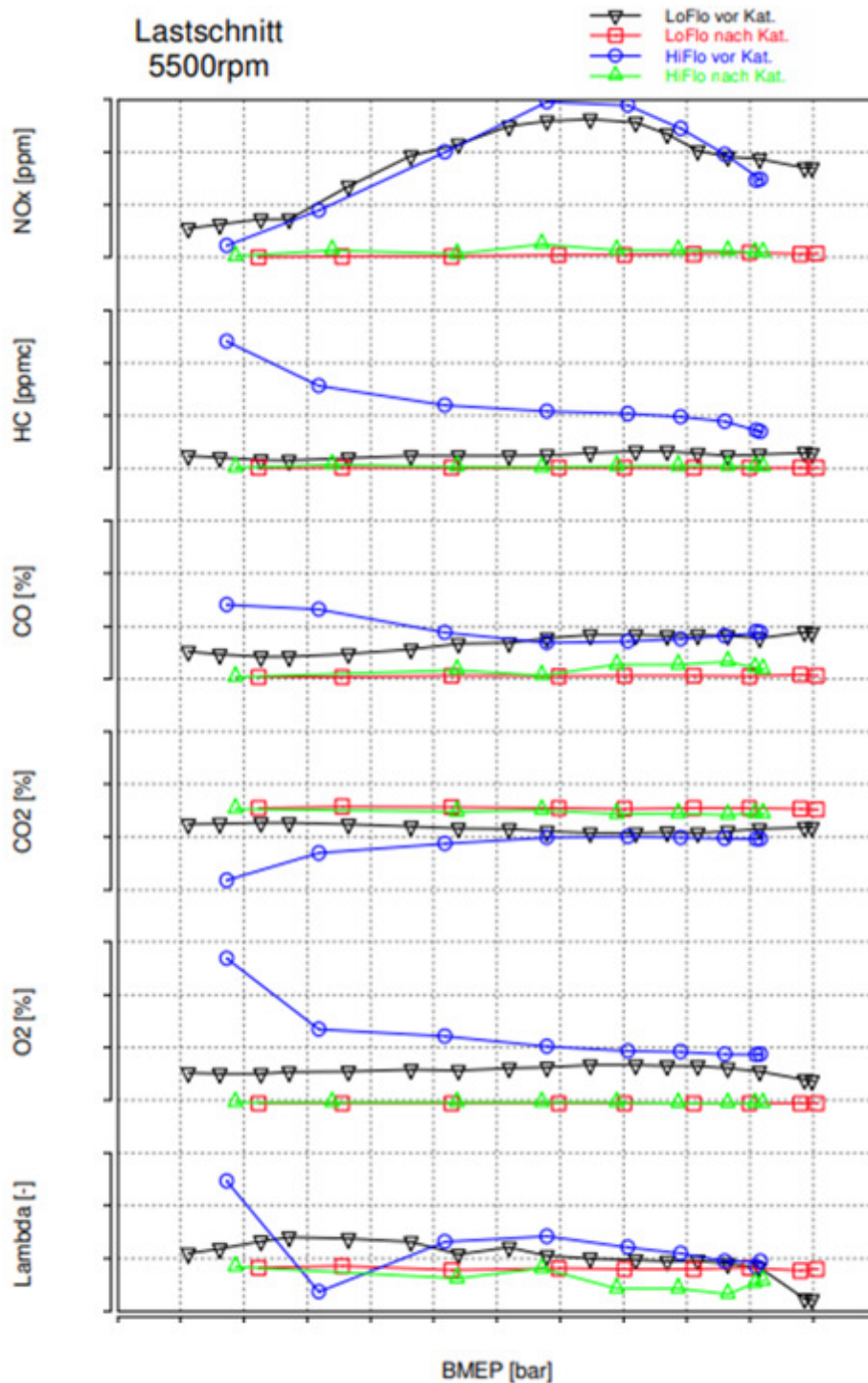


Abb. 30 Lastschnitt bei 5500 U/min - Low-Flow vs. High-Flow Injektor: Emissionen vor und nach Katalysator

Abbildung 30 zeigt die Emissionen vor und nach Katalysator unter Verwendung beider Einspritzventile. Da der Prüfstand keine 2-fache Emissionsanalyseeinrichtung verfügte und daher nicht gleichzeitig die Messung der Emissionen vor und nach Katalysator erfolgen konnten, wurden jeweils 2 Messreihen mit identischen Settings aber mit wechselnden Emissionsentnahmestellen gefahren. Somit ergeben sich für jeden Injektor 2 Messreihen, die die Darstellung von 4 Lambda-Reihen erklären. Die schlechtere Gemischbildung sowie der schlechte Umsatz mit dem High-Flow Injektor wird hier ebenfalls durch die hohen HC-, CO-

und O₂-Emissionen vor Katalysator bestätigt. Die Emissionen nach Katalysator zeigen eine gute Konvertierung.

Da der High-Flow Injektor nicht die erwarteten Vorteile bei hohen Drehzahlen und im Leistungspunkt zeigt, stellt sich nun die Frage, wie sie sich bei niedrigen Drehzahlen und im Bereich maximalen Drehmoments auf die Qualität der Gemischbildung bzw. Verbrennung auswirkt.

Bei dem Abtesten der Einspritzventile auf dem Motorprüfstand im niedrigen Drehzahlbereich war der High-Flow Injektor wegen instabiler Verbrennung und sehr unruhigem Motorlauf mit Drehzahlen ≤ 1500 U/min nicht zu betreiben. Aus dem Grunde ist der Lastschnitt bei 2000 U/min (Abb. 31 – 34) die niedrigste darstellbare Drehzahl für einen Vergleich mit dem High-Flow Injektor.

Abbildung 31 zeigt die Ergebnisse für Performance und Wirkungsgrad. Hier erstmalig dargestellt ist die Messgröße „NMEP_SDM“, welche die Stabilität der Verbrennung charakterisiert. Ein steigender Wert bedeutet eine zunehmend instabile und alternierende Verbrennung. Zu kleinen Lasten nimmt dieser Wert beim Einsatz des High-Flow Injektors deutlich zu. Das bedeutet, dass auch hier der Motor mit dem High-Flow Injektor nicht gut zu betreiben ist.

Der Low-Flow Injektor führt bei bei 100% Pedalstellung zu einem höheren Drehmoment, weil er über den gesamten Lastschnitt einen besseren Wirkungsgrad als der High-Flow Injektor aufweist, der bei hoher Last etwa 3%-Punkte über dem des High-Flow Injektors liegt und zu geringeren Lasten der Unterschied weiter zunimmt. Eine entsprechende Entwicklung ist auch im spezifischen Verbrauch zu erkennen.

Im nächsten Bild 32 ist zu erkennen, dass der Wirkungsgradverlust bei Verwendung des High-Flow Injektors gegenüber dem Low-Flow Injektor an der langsamen und unvollständigen Verbrennung infolge schlechter Gemischaufbereitung insbesondere bei niedrigen Lasten liegt. Auch die rapide Temperaturerhöhung über Katalysator bis zu 350 °C bei dem High-Flow Injektor zeugt von einer Umsetzung großer Anteile unvollständig verbrannten Kraftstoffes.

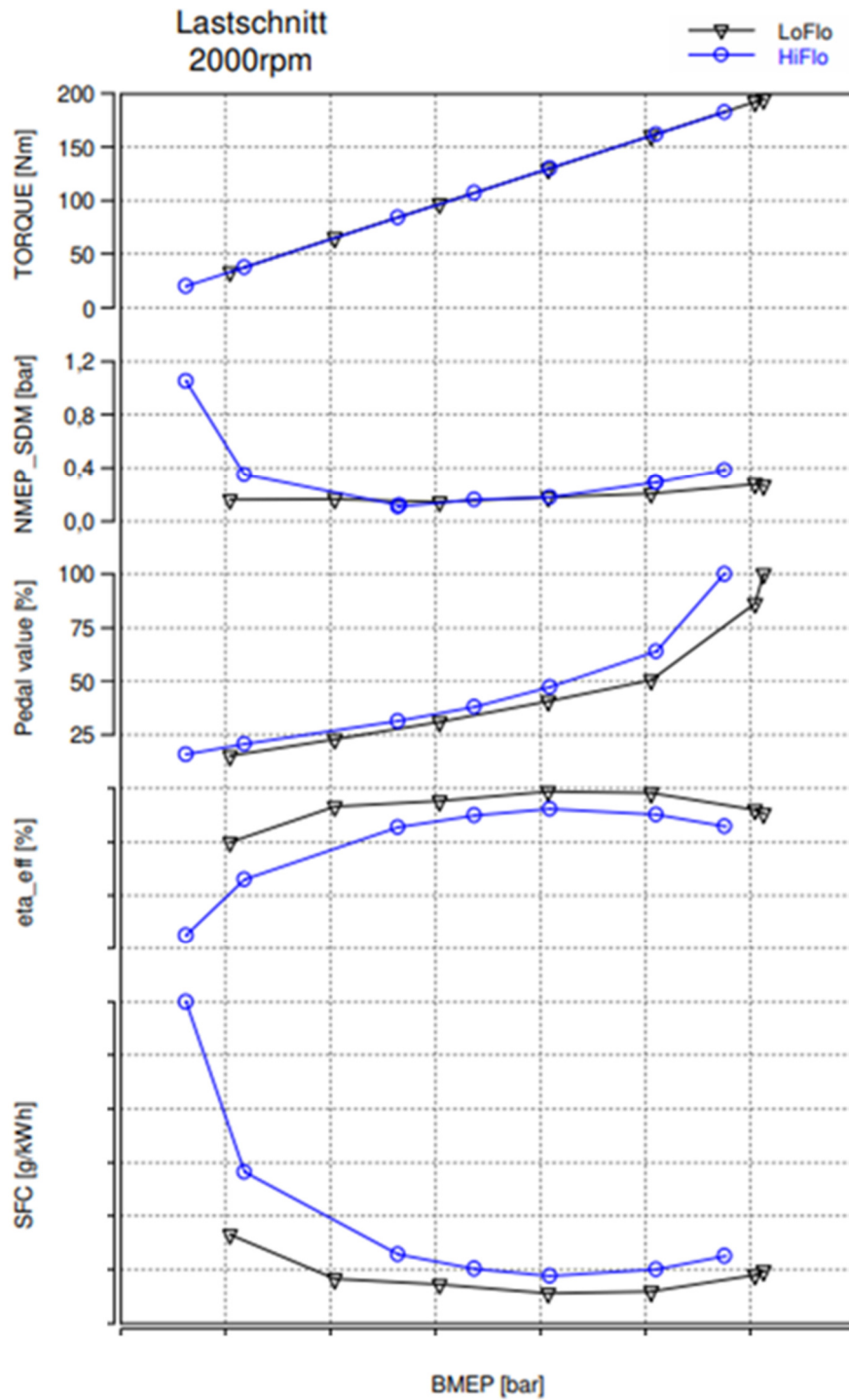


Abb. 31 Lastschnitt bei 2000 U/min - Low-Flow vs. High-Flow Injektor: Leistung & Wirkungsgrad

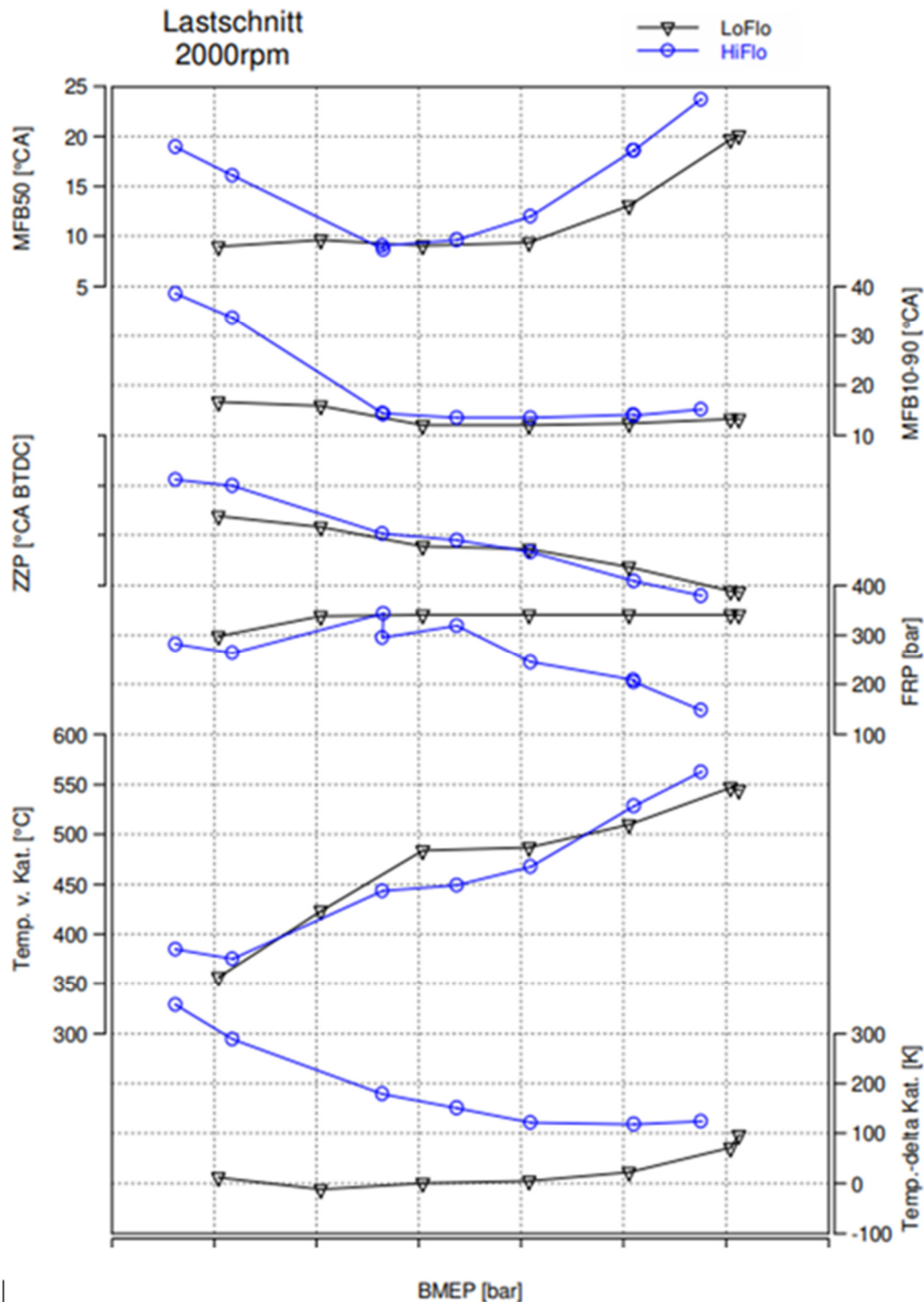


Abb. 32 Lastschnitt bei 2000 U/min - Low-Flow vs. High-Flow Injektor: Verbrennung & Abgastemperaturen

Da sich bei dem High-Flow Injektor mit den gewählten Einspritzparametern, unter anderem auch sehr hohe Raildrücke, eine unzureichende Gemischbildung bei niedrigen Lasten einstellt, wurde für eine tiefergehende Potentialabschätzung bei 2000 U/min und niedriger Last eine Raildruckvariation durchgeführt.

Abbildung 33 zeigt hinsichtlich effektiven Wirkungsgrades und Verbrauch bessere Werte bei niedrigeren Raildrücken.

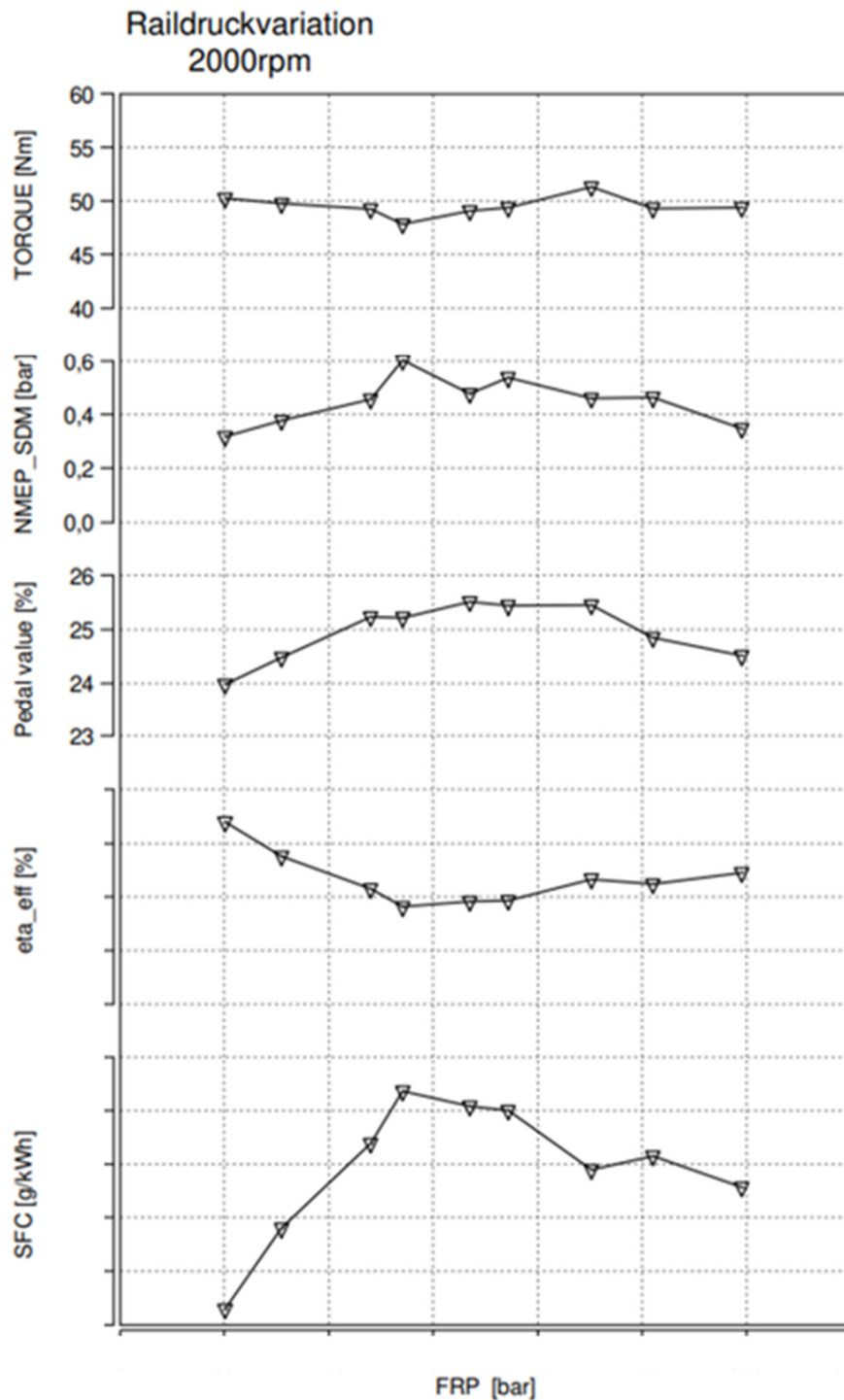


Abb. 33 Raildruckvariation bei 2000 U/min @ niedriger Last mit High-Flow Injektor: Leistung & Wirkungsgrad

Diese Aussage wird ebenfalls durch die Analyse der Verbrennungsparameter (Abb. 34) und der Emissionen (Abb. 35) bestätigt. Bei niedrigen Raildrücken ergibt sich eine bessere Gemischbildung verbunden mit kürzerem Zündverzug und schnellerer Verbrennung. Auch der geringere Temperaturanstieg über Katalysator und die sinkenden HC, CO und O₂-Emissionen sowie die steigenden NO_x und CO₂-Emissionen zeugen von einem besseren Kraftstoffumsatz.

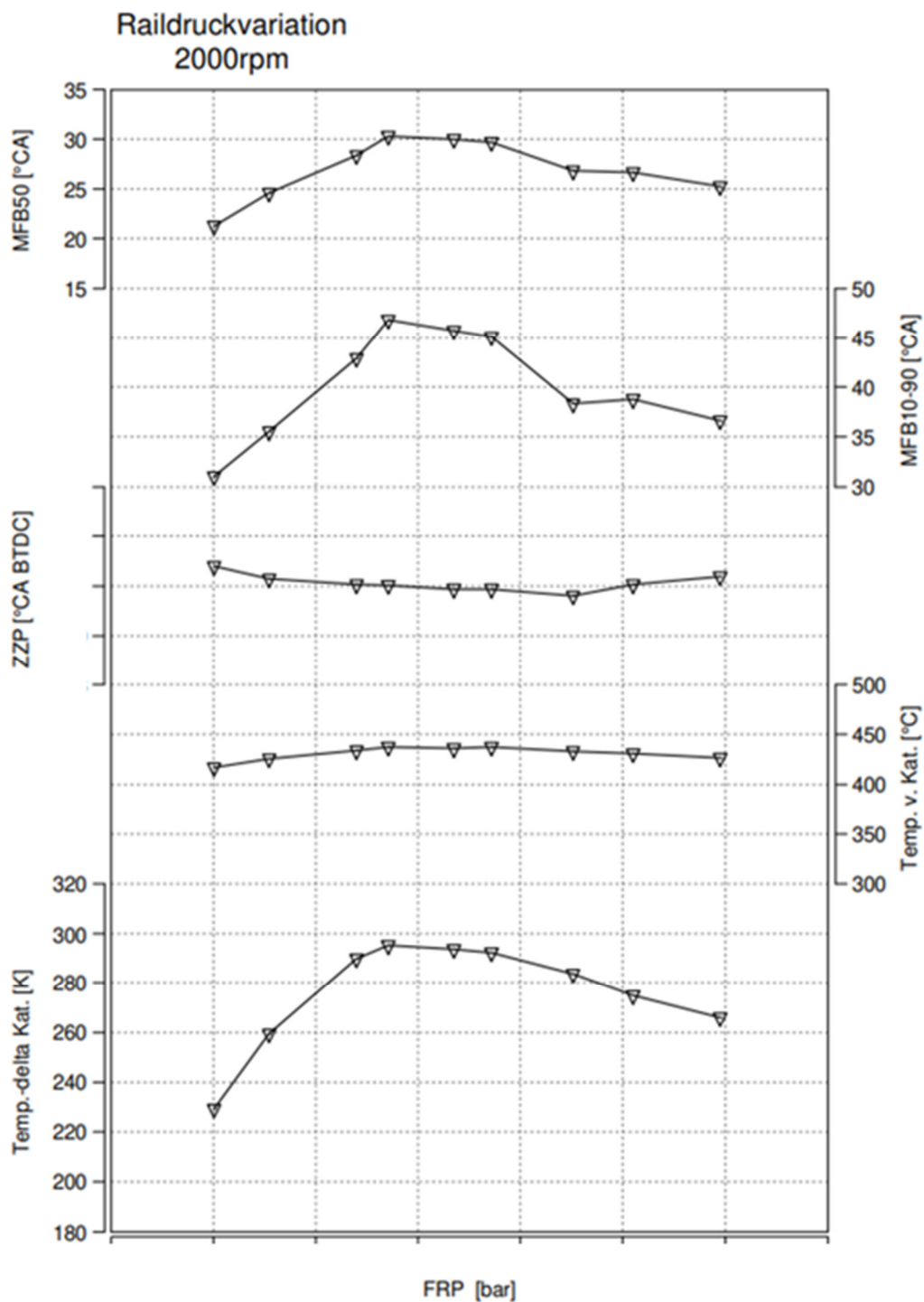


Abb. 34 Raildruckvariation bei 2000 U/min @ niedriger Last mit High-Flow Injektor: Verbrennung & Abgastemperaturen

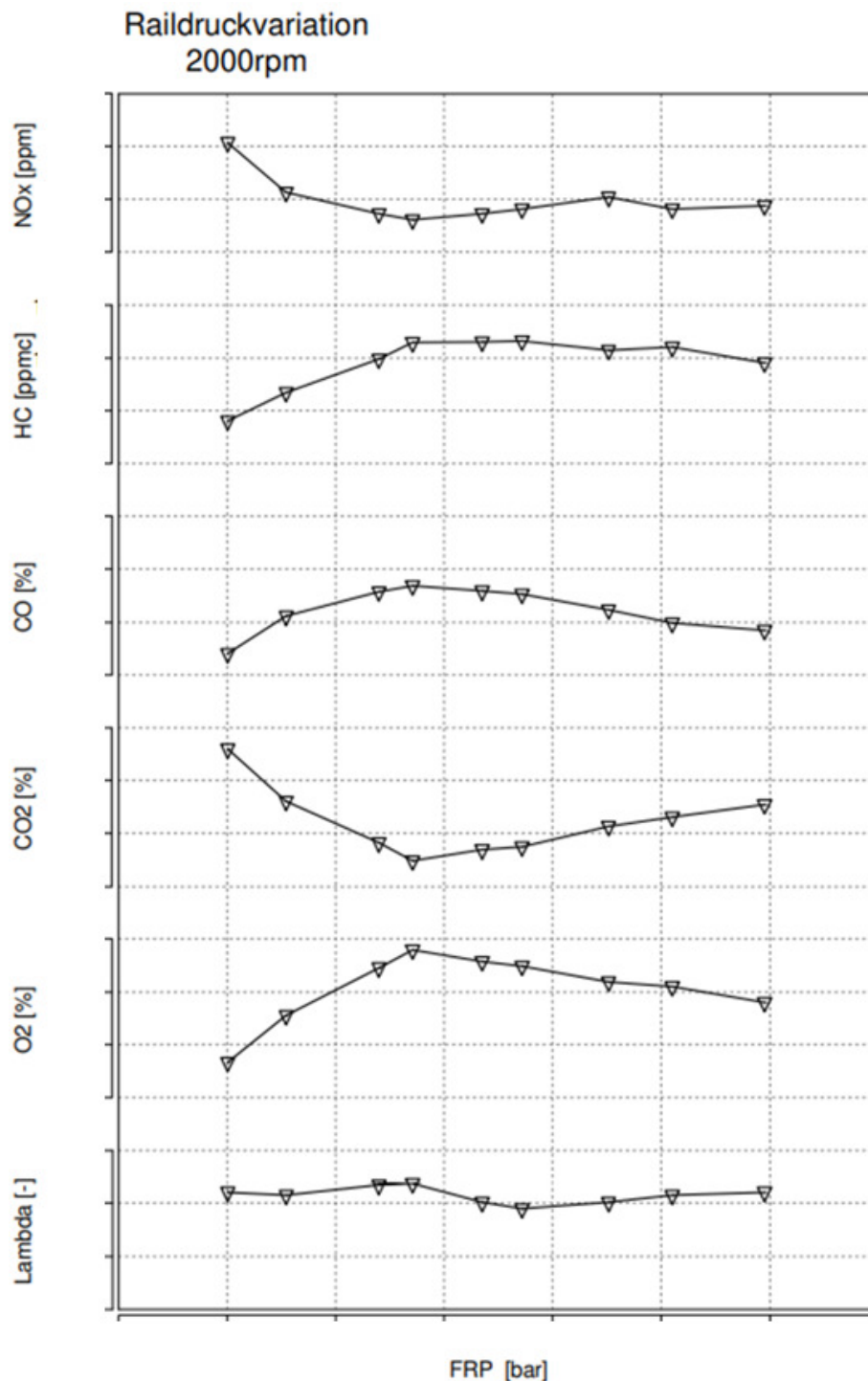


Abb. 35 Raildruckvariation bei 2000 U/min @ niedriger Last mit High-Flow Injektor: Emissionen vor Katalysator

In Abbildung 36 wird ein weiterer Umstand aufgezeigt, der bei dem High-Flow Injektor in Verbindung mit kleiner Einspritzmenge bzw. sehr kurzen Einspritzdauer für eine Absenkung des Raildruckes spricht. Das Bild zeigt für 3 verschiedene Fälle das Nadelhubsignal des Einspritzventils, das Zündsignal und auch den erzielten Zylinderdruckverlauf. Mit dem High-Flow Injektor ergeben sich bei hohen Raildrücken so kurze Einspritzereignisse, die kaum über die Abhebe-Phase der Düsen-nadel hinausgehen, also eine kaum nennenswerte Haltephase der Nadel aufweisen. Damit wird die Mengenregelung des Einspritzventils sehr instabil, was zu un-

gleichmäßigen Einspritzmengen pro Zylinder und pro Event und somit zu einem sehr unruhigen Motorlauf führt. In dem dargestellten Betriebspunkt konnte der Motor mit dem High-Flow Injektor bei 300 bar Raildruck noch betrieben werden. Jedoch ist ein Einsatz mit noch kürzerem Event also bei niedrigeren Lasten oder Drehzahlen mit gleichbleibend hohen Raildrücken nicht sinnvoll. Eine Absenkung des Raildruckes auf geringere Werte zum Beispiel auf 50 bar verlängert das Einspritzevent und führt zu einem stabileren Motorbetrieb. Die Verwendung des Low-Flow Injektors ist bei diesen geringen Einspritzmengen auch bei hohen Raildrücken lange geöffnet und somit gut regelbar, welches zu einer effizienten Gemischbildung und Verbrennung führt.

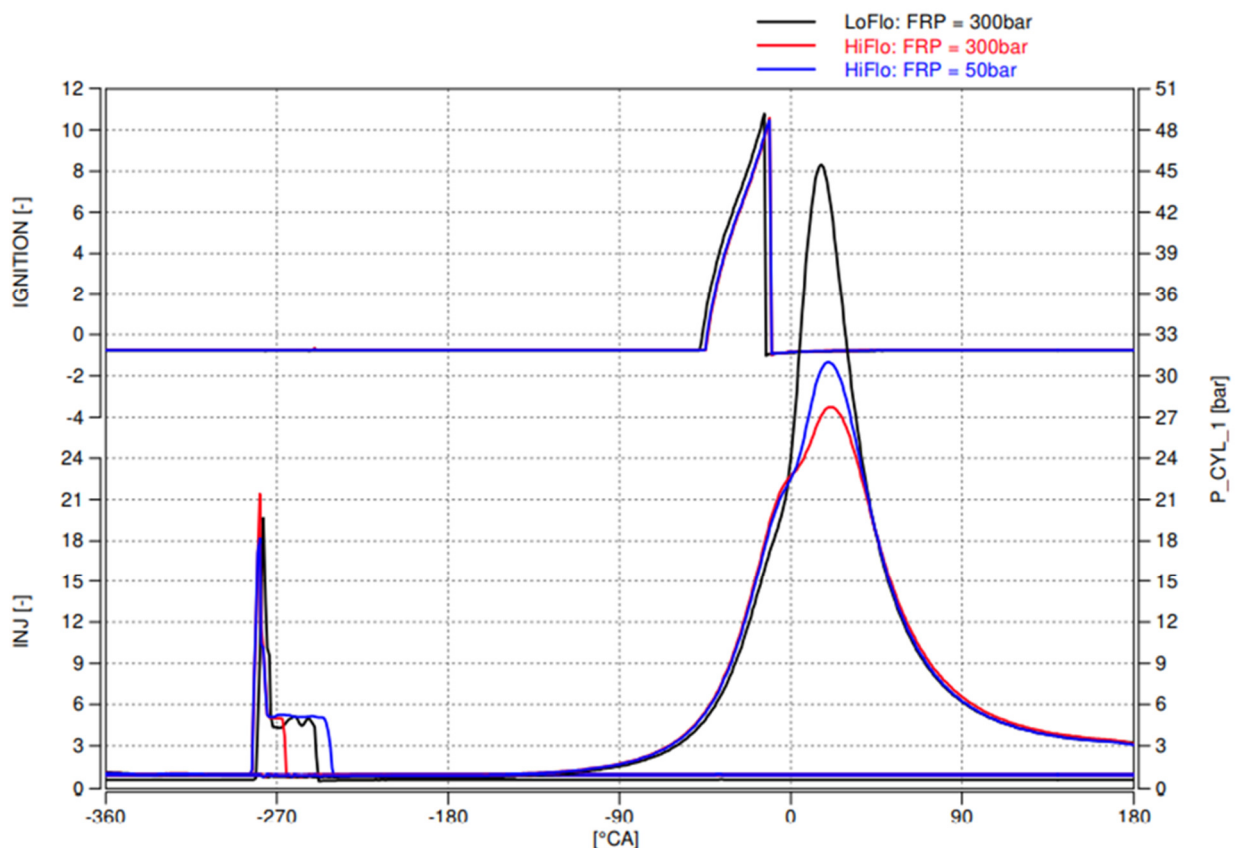


Abb. 36 Zylinderdruck, Nadelhub- & Zündsignal bei 2000 U/min @ 50Nm mit Low-Flow und High-Flow-Injektoren bei verschiedenen Raildrücken

Hiermit konnte nachgewiesen werden, daß der Low-Flow Injektor die geforderte Motorleistung darstellen kann und selbst im Leistungspunkt eine effizientere Gemischaufbereitung und Verbrennung und damit einen besseren Verbrauch als der High-Flow Injektor mit sich bringt. Somit wird der Low-Flow Injektor in Verbindung mit dem 350 bar Einspritzsystem für den Aufbau des Fahrzeugmotor ausgewählt. Abschließend zeigen die Iso-Kennfelder (Abb. 37 – 42) charakteristischer Motorgrößen das Ergebnis der für Methanol angepassten und optimierten Kalibrierung, die so für das Demonstrationsfahrzeug übernommen wurde.

In weiten Teilen des Motorkennfeldes konnte ein verbrauchsgünstiger MFB50 zwischen 8 – 10°KW nach OT umgesetzt werden. Nur bei hohen Lasten wurde der Zündzeitpunkt nach spät verschoben, um sicher zu stellen, dass Fehlfunktionen oder unbeabsichtigte ZZZP-Korrekturen in der Motorsteuerung nicht zur Überschreitung des Spitzendrucklimits führen. In der Serie wären diese Fehlfunktion ausgeschlossen und der ZZZP könnte bis zum Erreichen

des Spitzendrucklimits oder anderer z.B. akustischer Grenzen verbrauchsoptimal gesetzt werden.

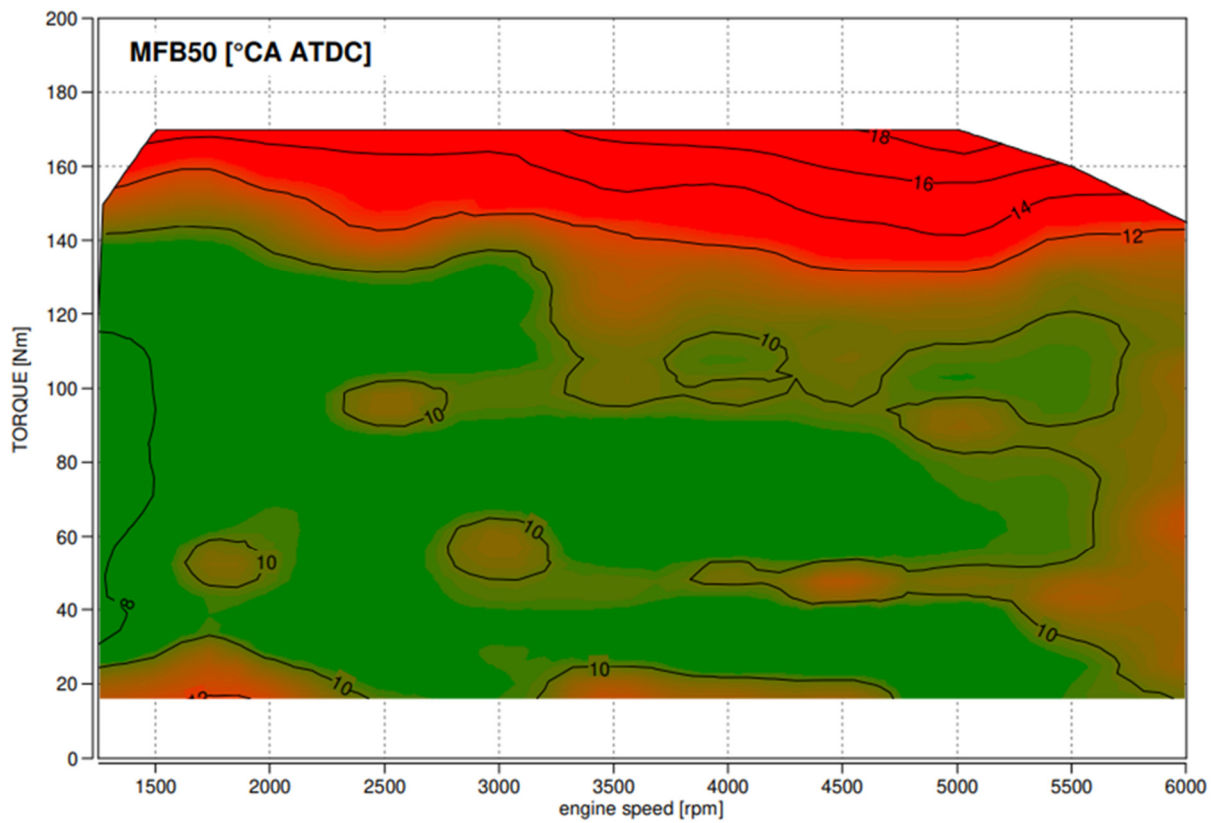


Abb. 37 Kennfeld für MFB50

Es ergibt sich für den Verbrauch bezogen auf Benzin (Abb. 38) ein Optimum von 215 g/kWh bei 3000 U/min und 140 Nm und eine große „Insel“ mit Werten unter 220 g/kWh im Bereich von 1600 bis 3600 U/min und von 108 bis 170 Nm. Zur Veranschaulichung der erzielten Verbesserung sind die mit Benzin ebenfalls auf dem Prototypenmotor allerdings noch mit Serieneinspritzsystem (Benzin-Serie) erfassten Ergebnisse im Bestpunkt (225 g/kWh) und bei 240 g/kWh eingeblendet. Im Vergleich zu Benzin ist bei Methanoleinsatz das um 10% bessere Verbrauchsoptimum deutlich ausgeweitet und zu höheren Lasten verschoben.

Entsprechend dem Verbrauchskennfeld stellt sich das Kennfeld für den effektiven Wirkungsgrad dar (Abb. 38). Beste Wirkungsgrad von fast 40% ergeben sich bei niedrigeren bis mittleren Drehzahlen im oberen Drittel der Last.

In dem Kennfeld für die Abgastemperatur vor Katalysator (Abb. 39) findet man den höchsten Wert von 800 °C im Leistungspunkt. Bei niedrigen Drehzahlen und Drehmomenten liegt die Temperatur unter 450°C, wodurch sich in einem herkömmlichen Katalysator eine schlechtere Konvertierung einstellt.

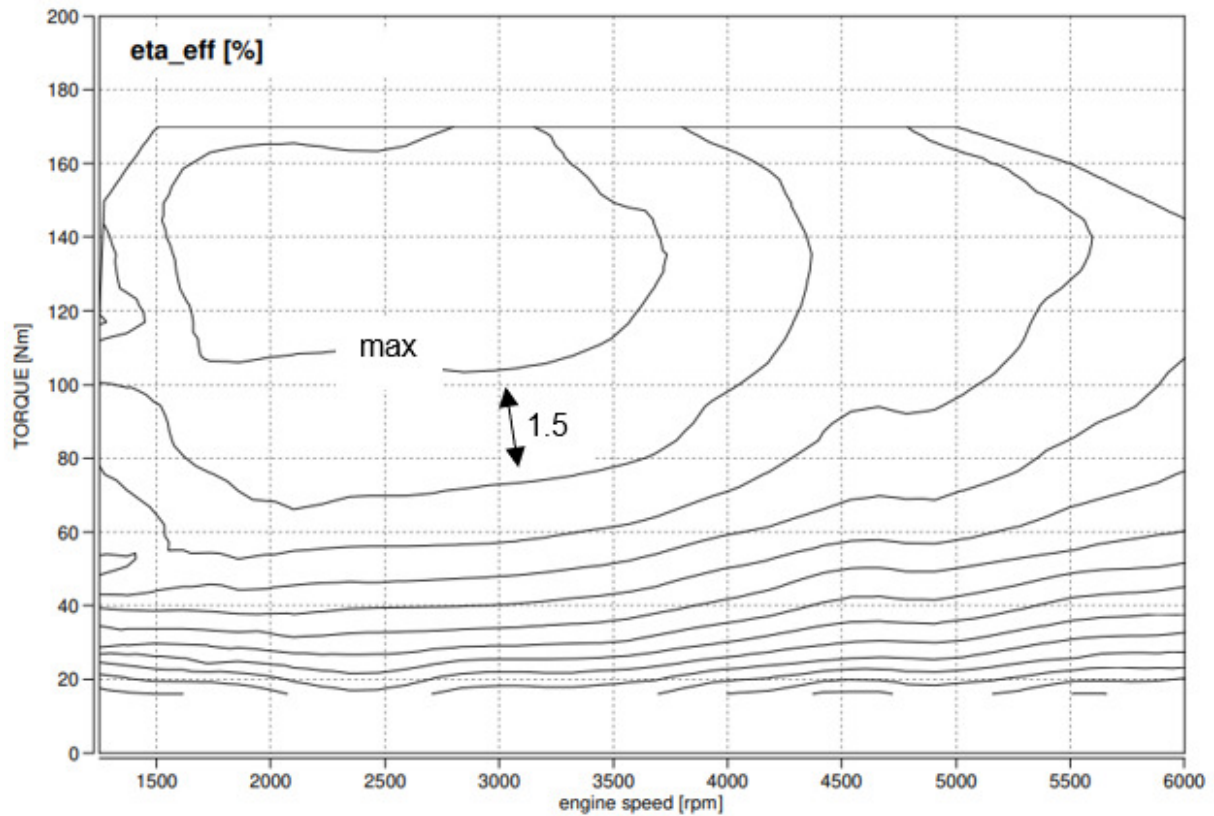


Abb. 38 Kennfeld für effektivem Wirkungsgrad

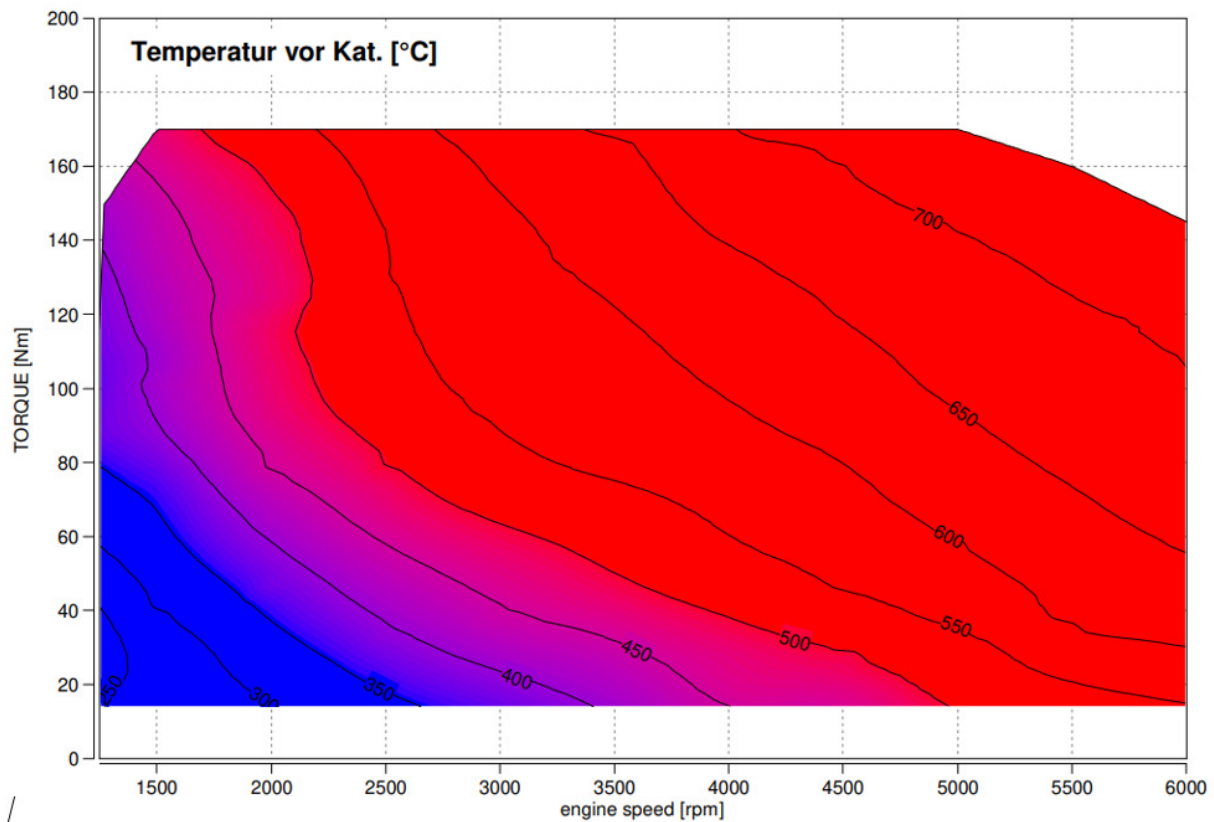


Abb. 39 Kennfeld für Abgastemperatur vor Katalysator

Empfehlung für die Serienentwicklung / Kosteneinsparung

In diesem Projekt wurde die gesteigerte Mengenanforderung für den Einsatz von Methanol im Vergleich zu Benzin (Super RON 98) bei der Auslegung des Einspritzsystems berücksichtigt, aber nicht die mangelnde Materialverträglichkeit des Kraftstoffes. Keiner der kontaktierten Einspritzsystemlieferanten im PKW-Sektor konnte Komponenten entwickelt für den robusten Betrieb mit M100 anbieten. Während der Basisuntersuchung konnte nach etwa 140 Stunden Betrieb mit Methanol die Hochdruckpumpe des Serieneinspritzsystems hohe Raildrücke nicht mehr halten. Das beobachtete Problem der Hochdruckpumpe entsprach auch der internen Untersuchung des Herstellers und rührte vom langsamen zunehmenden Verschleiß und schließlich Versagen des Druckregelventils.

Auch bei den bestellten Prototypenteilen eines weiteren Einspritzsystemherstellers konnten Probleme an Einspritzventilen und Pumpen bereits zum Teil nach sehr kurzer Einsatzzeit beobachtet werden. Die genauen Ursachen wurden nicht weiter untersucht, da diese Komponenten für den Einsatz von Methanol nicht freigegeben waren und somit mit entsprechenden Verschleißerscheinungen zu rechnen war.

Mit diesen Erfahrungen ist für ein mögliches weiteres Forschungsprojekt und insbesondere für die Serienentwicklung die Mitarbeit und Unterstützung eines Einspritzsystemlieferanten erforderlich, der ein robustes und serientaugliches Einspritzsystem im PKW-Sektor für Methanolbetrieb entwickelt.

In den durchgeführten Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass der Motor betrieben mit Methanol ohne Leistungssteigerung einen mehr als 10 % geringeren Luftbedarf aufweist. Hier könnte der Luftpfad hinsichtlich einer Gesamtsystemoptimierung durch angepasstes Turboladermatching und weniger intensive Ladeluftkühlung verbessert werden. Das kältere Abgas und die schwächere Anforderung an die Ladeluftkühlung im Leistungspunkt birgt Potenzial für Kosteneinsparung durch Wechsel auf weniger temperaturfeste Materialien bei der Turbine und Einführung kleinerer Ladeluftkühler oder weniger effiziente Kühl-Konzepte.

Wie auch schon erwähnt ist hier die Kalibrierung für das Fahrzeug nahe der Volllast mit sehr großer Reserve zu den Motorlimits erfolgt, um bei Fehlfunktion der Steuerung keinen Motorschaden zu riskieren. In der Serie ist diese Sorge nicht berechtigt und es wäre bei dem gewählten Verdichtungsverhältnis eine weitere Verbrauchsoptimierung bei höheren Lasten verbunden mit einer weiteren Leistungssteigerung möglich. Ohne das Ziel der Leistungssteigerung kann mit weiterer Erhöhung des Verdichtungsverhältnis sowohl der Verbrauch und das Kaltstartvermögen zusätzlich verbessert werden.

Kaltstartkalibrierung am Demonstrationsfahrzeug bei der FEV

Die weiterführenden Arbeiten bei der FEV umfassen die Kaltstartkalibrierung an einem Demonstratorfahrzeug. Dafür wurde ein Ford Focus (C-Klasse, 113 Zylinder Motor) mit für Methanoleinsatz angepasstem Brennverfahren, Einspritzsystem (Tab. 3) und Kalibrierung aufgebaut. Zudem ist in diesem Fahrzeug die Kraftstoffanlage gegen ein alkoholkraftstofftaugliches System ausgetauscht worden. Mit den Ergebnissen der umfangreichen Voruntersuchungen einzelner Parameter wurde eine verbrauchsoptimale Kalibrierung für das Fahrzeug

entwickelt. Abweichung der Zündzeitpunkte nahe Vollast vom ermittelten Optimum in Richtung „spät“ dienen lediglich einem sicheren Betrieb, um den Motor mit ausreichender Reserve zum Spitzendrucklimit zu betreiben. Dies gilt insbesondere für das Fahrzeug, da hier eine Zylinderdruckindizierung zur Überwachung anfangs nicht vorgesehen war.

	Einheit	Basis	Methanol
Motor		Serie-EU6	Prototyp
Kraftstoff		EU-Super	Methanol
Hubraum	ccm	1000	
Zylinder	-	3	
Kompressionsverhältnis	-	Basis	+10%
Einspritzpumpe			
max. Einspritzdruck	bar	250	350
Einspritzdüsen			
Lochanzahl	-	5	6
Durchfluß	ccm/s	Basis	=

Tab. 3 Änderungen beim Brennverfahren & Einspritzsystem für Methanoleinsatz

Bis zur Berichterstellung lagen noch keine Ergebnisse von der FEV vor, die hier hätten gezeigt werden sollen.

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Verwendungsnachweises

Der Hauptteil der in den Teilprojekt entstandenen Kosten entfielen im Wesentlichen auf die Personalkosten, welche bei Organisation, Simulation, Design, Prüfstandsleitung, Analyse und Durchführung der im Projekt angefallenen Arbeiten entstanden waren. Die ursprünglich geplanten Materialkosten, welche überwiegend für die Anpassung des Einspritzsystems auf die höhere Mengenanforderung bei Einsatz von Methanol kalkuliert waren, wurden im Laufe des Projekts abgerufen. Reisen sind aufgrund der COVID-Pandemie ausgefallen und somit dafür keine Kosten angefallen.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Arbeiten sowie die dafür aufgewandten Ressourcen waren notwendig und angemessen, da sie der im Projektantrag formulierten Planung entsprachen und alle wesentlichen im Arbeitsplan formulierten Aufgaben erfolgreich bearbeitet wurden. Im Antrag war die Beschaffung einer größeren Anzahl von Injektorvarianten geplant. Da aber der Lieferant des Serieneinspritzsystems keine Prototypen anbieten konnte, musste auf einen neuen Einspritzsystemhersteller, in diesem Fall Bosch, gewechselt werden. Das erforderte leider den Austausch des gesamten Einspritzsystems. Verbunden mit deutlich höheren Stückpreisen ließ dies schließlich nur eine Bestellung von zwei Injektorvarianten zu. Einsparungen von Reisekosten wurden anderweitig sinnvoll eingesetzt. Darüber hinaus war FORD bemüht die Projektziele auch durch zusätzliche Aufwendung eigener Ressourcen beim Personal, Serienteilen und Nutzung des Motorprüfstandes verbunden mit der Laufzeitverlängerung zu unterstützen.

4. Voraussichtlicher Nutzen im Sinne der Verwertbarkeit im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplanes

Ohne ein Mitwirken der Hersteller für Einspritzsysteme im PKW-Sektor wird es kein robustes und methanolfestes Einspritzsystem geben. Ohne ein robustes Einspritzsystem wird kein Automobilhersteller in Serie gehen.

Die in diesem Projekt gesammelten und dokumentierten Erkenntnisse sowie Erfahrungen liefern wichtige Hinweise in die Entwicklung eines serientauglichen Motors für Methanolbetrieb sei es bei Ford oder anderen Automobil- bzw. Motorenherstellern.

Jedoch, wie aktuell den Medien zu entnehmen ist, zieht sich Ford zunehmend aus der Entwicklung von Verbrennungsmotoren für den PKW-Sektor im europäischen Markt zurück. Es sollen in Europa ab 2030 ausschließlich Batteriefahrzeuge verkauft werden. Vielleicht wird es Anwendungen für Methanol bei Ford auf dem globalen Markt für schwere Fahrzeuge bzw. Nutzfahrzeuge geben. Aber darüber lassen sich noch keine Aussagen oder Prognosen machen. Von daher kann nicht ausgeschlossen werden, dass die hier gewonnen sehr wertvollen Erkenntnisse und Erfahrungen dem Hause Ford künftig nicht mehr von Nutzen sind.

5. Anderweitige Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens an anderer Stelle

Im Projektzeitraum sind uns keine Kenntnisse über Ergebnisse Dritter bekannt geworden, welche für die Durchführung des Vorhabens relevant waren.

6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Seitens Ford ist ausschließlich die Veröffentlichung des Berichts vom Gesamtvorhaben in der Depotbibliothek für Forschungsberichte für verschiedene Ministerien und forschungsfördernde Institutionen geplant.