

Schlussbericht – Hochschule Heilbronn (HHN)

Vorhaben: Verbundprojekt: HydroLoc – Dekarbonisierung im Schienenverkehr durch Nachrüstung von Diesellokomotiven mit hocheffizienten zero-emission Wasserstoffmotoren

FKZ: 13FH123KA0

Teilvorhabe: Konstruktion, Brennverfahren

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Karsten Wittek

Ausf. Stelle: Hochschule Heilbronn (HHN) – Fakultät für Mechanik und Elektronik
Labor für Kolbenmaschinen
Max-Planck-Strasse 39
74081 Heilbronn

Ber.-Zeitraum: 01.08.2021 bis 31.10.2024 (verlängert um 3 Monate)

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 13FH123KA0 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Heilbronn, 14.07.2025

Ort, Datum

Prof. Dr.-Ing. Karsten Wittek

Autor

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS.....	2
I. KURZDARSTELLUNG	3
1. Aufgabenstellung.....	3
2. Voraussetzungen.....	3
3. Planung und Ablauf des Vorhabens	3
4. Ergebnisse.....	4
II. EINGEHENDE DARSTELLUNG	5
1. Erzieltes Ergebnis.....	5
1.1. Vorabuntersuchungen zum Brennverfahren am 3.6L-Motor.....	5
1.2. 16L-Motor, Baustufe I	7
1.3. Versuchslokomotive, Aufbau und Erprobung	9
1.4. Entwicklung Kanaleinblasesysteme.....	11
1.5. 16L-Motor, Baustufe II	13
1.6. Variable Verdichtung	17
2. Zusammenfassung der Ergebnisse, Verwertung und Transfer	19
3. Veröffentlichung der Ergebnisse	20

I. Kurzdarstellung

1. Aufgabenstellung

Die Hochschule Heilbronn hatte im Verbundprojekt drei Hauptaufgaben zu bearbeiten:

1. Durchführung Motorumrüstung auf H2-Betrieb

Der Dieselmotor einer Rangierlokomotive ist auf H2-Betrieb umzurüsten. Dies umfasst im Wesentlichen die Applikation eines Gaseinblasesystems und eines Zündsystems sowie die Absenkung des Verdichtungsverhältnisses.

2. Durchführung Brennverfahrensentwicklung

Der umgerüstete Motor ist auf dem Motorenprüfstand aufzubauen und in Betrieb zu nehmen. Eine entsprechende Funktionsstruktur ist in einem Versuchsmotorsteuergerät zu implementieren. Anhand von stationären Betriebspunkten wird das Brennverfahren entwickelt. Maßgabe ist die Einhaltung eines zulässigen Stickoxidemissionsniveaus bei allen Betriebspunkten. Das stationäre Motorbetriebsverhalten wird anhand von Prüfstandsmessungen untersucht und charakterisiert.

3. Realisierung und Erprobung einer kontinuierlich variablen Verdichtung

Die Technologie einer kontinuierlich variablen Verdichtung soll an einem H2-Motor implementiert werden. Anhand von Versuchen ist zunächst das mechanische Betriebsverhalten zu charakterisieren. In einem zweiten Schritt wird untersucht, wie das Brennverfahren und insbesondere der Wirkungsgrad durch den Einsatz dieser Variabilität beeinflusst werden kann.

4. Darstellung eines Demonstratorfahrzeuges

Der auf H2-Betrieb umgerüstete Motor wird in eine 3-achsige Rangierlokomotive eingebaut und in Betrieb genommen. Anschließend wird das Fahrzeug auf einer Versuchsgleichstrecke erprobt.

2. Voraussetzungen

Die Projektumfänge an der HHN wurden am Labor für Kolbenmaschinen unter Leitung von Professor Wittek durchgeführt. Das Team bestand aus einem Doktoranden, einem Projektingenieur sowie weiteren Mitarbeitern des Kolbenmaschinenlabors. Als Infrastruktur standen dem Team eine mechanische Werkstatt, eine Motorenaufbauwerkstatt sowie Motorenprüfstände mit moderner Messtechnik zur Verfügung. Der Projektleiter verfügte über fundierte Kenntnisse auf dem Gebiet der Motorenforschung und konnte sein Team entsprechend wissenschaftlich anleiten. Die Durchführung des Vorhabens erfolgte auf Basis des Zuwendungsbescheides vom Juni 2021.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt wurde dem Zuwendungsbescheid entsprechend geplant und auf Basis gängiger Projektmanagement Richtlinien in Absprache mit den Konsortialpartnern durchgeführt. Der ursprünglich geplante Vorhabenzeitraum war von 01.08.2021 bis 31.07.2024. Im Laufe der Bearbeitung hat sich gezeigt, dass der Aufwand zur Realisierung der Gaseinblasung unterschätzt worden ist. Ursprünglich geplant war, handelsübliche Injektoren zu verwenden. Im Zuge der Konstruktion hat sich jedoch gezeigt, dass dies keine zufriedenstellende Lösung

ergeben würde. Zudem wurden zeitgleich vielversprechend erscheinende Erfindungen für neuartige Gaseinblasesysteme vom Projektleiter getätigt. In Absprache mit dem Projektträger wurden entsprechende Arbeitsumfänge zur prototypischen Realisierung dieser neuen Systeme durchgeführt. Der Vorhabenzeitraum wurde in Abstimmung mit dem Projektträger um 3 Monate bis zum 31.10.2024 verlängert.

4. Ergebnisse

Die technisch-wissenschaftlichen Ziele des Vorhabens wurden alle erfüllt. Zudem wurden zwei neuartige Gaseinblasesysteme konstruiert, realisiert und im Motor getestet. Insbesondere das letztere der beiden Systeme hat sich hinsichtlich seines Betriebsverhaltens als hervorragend herausgestellt. Im Einzelnen wurden folgende Ergebnisse erreicht:

Motorversuche zunächst durchgeführt an einem vorhandenen 3.6L H₂-Motor mit Kanaleinblasung haben gezeigt, dass die Drehmoment- und Leistungswerte der Diesebasisvariante mit H₂-Betrieb sogar übertroffen werden konnte.

Mittels Hochdruckabgasrückführung und Zündungsspätverstellung lassen sich die Stickoxidemissionen an der Volllast wirkungsvoll reduzieren.

In einer ersten Baustufe des 16L-Motors wurde eine hydraulisch betätigte Direkteinblasung realisiert. Der Injektor wurde zentral angeordnet, die Zündkerze wurde in Folge dessen exzentrisch angeordnet. Das Einblasesystem hat vom Prinzip her gut und zuverlässig funktioniert, was das Öffnungs- und Schließverhalten anbelangt. Allerdings lag das motorische Verhalten dieser realisierten Baustufe sehr weit hinter den Erwartungen. Die spezifischen Stickoxidemissionen lagen wesentlich höher als beim 3.6L-Motor. Als Ursache wurde eine schlechte Durchmischung der Ladung vermutet. Um den Gesamtprojektzeitplan zu halten, wurde entschieden, den Motor so wie er ist trotzdem in die Lok einzubauen.

Es wurde zusammen mit dem Team der htw saar die H₂-Versorgung an Bord der Lok realisiert und in Betrieb genommen. Der Baustufe I Motor wurde in die Lok integriert und erfolgreich in Betrieb genommen. Im September 2023 wurde die umgebaute H₂-Lok der Öffentlichkeit vorgestellt. Im Anschluss daran wurden wie geplant Fahrversuche auf der Schiene durchgeführt.

Es wurden zwei neuartige Konzepte zur Realisierung einer Kanaleinblasung untersucht und zunächst am 3.6L-Motor vorerprobt. Das zweite Konzept basierend auf einer mechanischen Einblasesteuerung wurde als überlegen bewertet und dieses Konzept wurde für den V8-Motor ausgelegt und prototypisch umgesetzt.

Die zweite Baustufe des 16L-Motors, nun umfassend eine zentrale Kerzenlage und eine Kanaleinblasung, hat wie erhofft hervorragende Ergebnisse auf dem Prüfstand geliefert. Das maximal getestete Drehmoment wurde durch die Prüfstandsbremse limitiert, entsprechend 1800 Nm. Die erreichte Maximalleistung beträgt 380 kW.

Eine kontinuierlich variable Verdichtung wurde am 3.6L-Motor appliziert. Die Aktuierung erfolgt hydraulisch und zylinderindividuell. Dadurch kann an jedem Zylinder eine closed-loop Lageregelung realisiert werden. Der aufgebaute Motor mit variabler Verdichtung (VCR-Motor) wurde zunächst auf dem Schleppprüfstand getestet und danach gefeuert unter Last. Die Verdichtung kann im gesamten Motorbetriebsbereich zuverlässig im Bereich von 10 bis 14 variiert werden. Gegenüber der Basisverdichtung konnte der Wirkungsgrad um ca. 6% erhöht werden.

II. Eingehende Darstellung

1. Erzieltes Ergebnis

1.1. Vorabuntersuchungen zum Brennverfahren am 3.6L-Motor

Es wurden grundlegende motorische Vorabuntersuchungen an einem bereits aufgebauten H2-Motor durchgeführt. Es wurde davon ausgegangen, dass die gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen in weiten Teilen auf den V8-Zielmotor übertragen werden können. Bei diesem „kleinen“ Motor erfolgt die Gemischbildung mittels einer Kanaleinblasung, Abbildung 1 zeigt den Versuchsträger für die Vorabuntersuchungen.

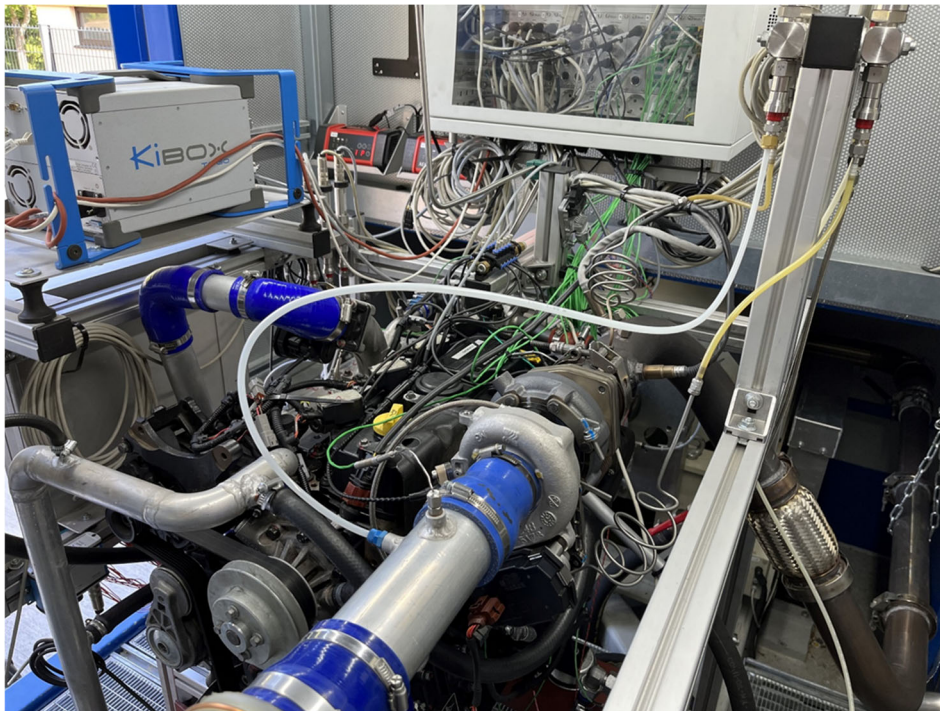


Abbildung 1: Bereits vorhandener, voll instrumentierter 3.6L-H2-Motor aufgebaut auf dem H2-Motorenprüfstand

Abbildung 2 zeigt motorische Ergebnisse aus einer Kennfeldvermessung. Die Abgasturboaufladung des Motors wurde dabei zunächst nicht modifiziert. Die Last wurde einzig über die Einblasedauer eingestellt. Der Zündzeitpunkt wurde in den Betriebspunkten jeweils soweit möglich wirkungsgradoptimal eingestellt, d.h. es wurde eine Verbrennungsschwerpunktlage von 8° n.OT eingestellt. Unter diesen Randbedingungen konnten vergleichsweise hohe Volllastmitteldrücke erreicht werden, welche stellenweise die Werte des Seriidieselmotors übertreffen. Die indizierten Wirkungsgrade liegen in etwa gleich auf mit denen des Seriidieselmotors. Allerdings steigen die spezifischen Stickoxidemissionen bei dieser Betriebsstrategie hin zu hohen Lasten deutlich an. Bemerkenswert ist der klare Zusammenhang zwischen Luftverhältnis und NO_x-Emissionen.

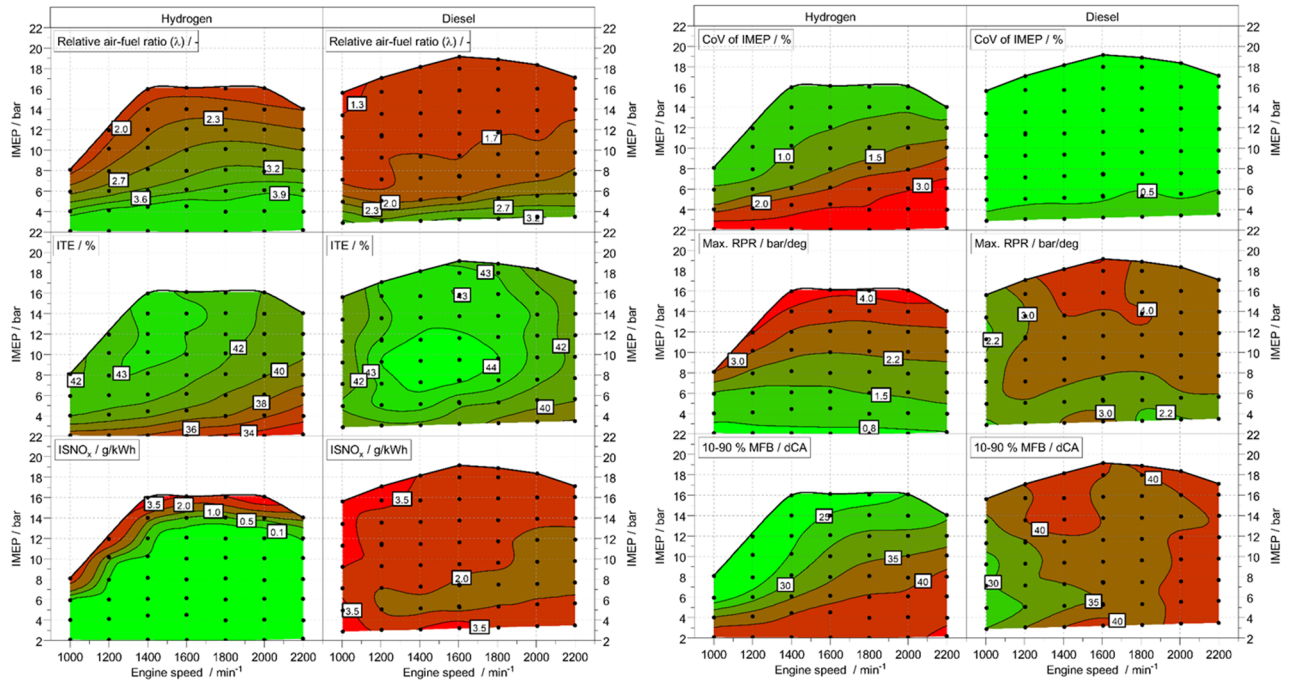


Abbildung 2: Betriebsverhalten vor Volllastoptimierung, Serien ATL, 50%MFB 8°, keine AGR, SOE 360° vOT

In weiteren Versuchsreihen wurde untersucht, wie die Stickoxidemissionen im oberen Lastbereich reduziert werden können. Untersuchte Maßnahmen dabei waren:

- Erhöhung der Waste-Gate-Federvorspannung um den Ladedruck anzuheben
- Spätverstellung der Zündung
- Gekühlte Abgasrückführung

Abbildung 3 zeigt das erreichte Ergebnis in Form eines optimierten Volllastmitteldruckverlaufes. Ziel war es, die spezifische NO_x-Emission unter 1 g/kWh zu drücken. Bei Drehzahlen oberhalb $n = 1400 \text{ min}^{-1}$ konnte ein Verlauf dargestellt werden, der oberhalb des Verlaufes des Seriidieselmotors liegt. Bei Drehzahlen unterhalb $n = 1400 \text{ min}^{-1}$ bricht der Mitteldruck vergleichsweise stark ein.

Zusammenfassend kann hier gesagt werden, dass das Betriebsverhalten nach der Optimierung dem Verhalten des Dieselmotors sehr nahekommt. Der entscheidende Vorteil gegenüber dem Diesel ist aber die Tatsache, dass die Stickoxidemissionen ohne jegliche Abgasnachbehandlung auf ein sehr niedriges Niveau gebracht werden können.

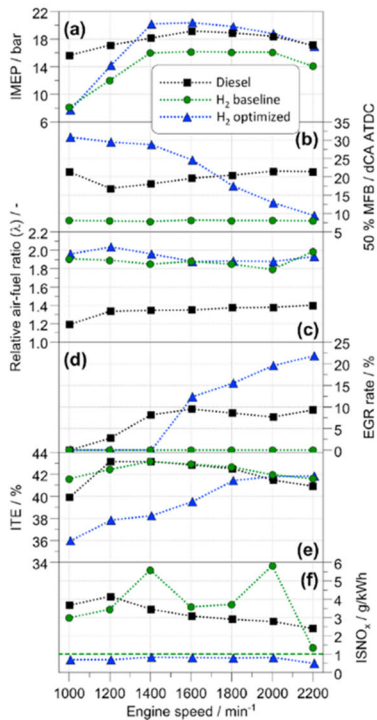


Fig. 9. Full load operation of the engine with diesel, H₂ baseline and H₂ optimized (with original WG TC).

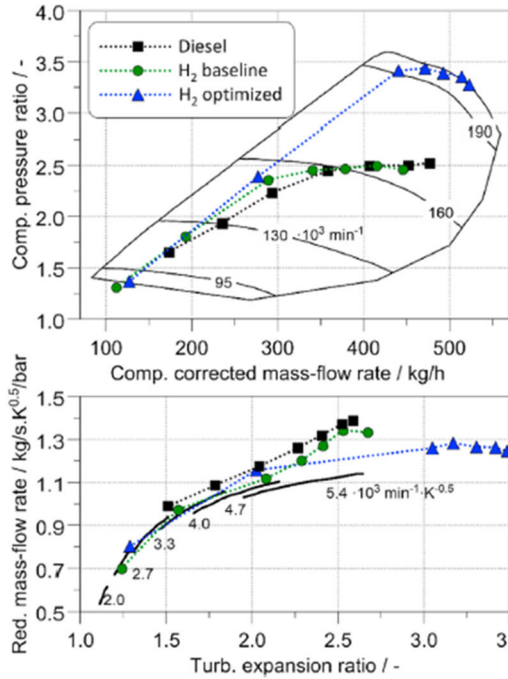


Fig. 10. Full load operating points inserted into the compressor map and turbine curves.

n < 1600 min-1
AGR Ventil zu
n > 1600 min-1
AGR Ventil voll auf
WG max pre-loaded

Abbildung 3: Volllastoptimierung unter Verwendung des Serien-ATL

1.2. 16L-Motor, Baustufe I

Es wurden auf dem Markt verfügbare Einblaseinjektoren untersucht. Der durchflussstärkste Injektor (Keihin-Injektor) kann einen stationären Düsendurchfluss 7,7 kg/h bereitstellen. Um die genannten Leistungszielwerte zu erreichen, müssten je Zylinder 4 solcher Keihin-Injektoren verbaut werden. Eine solche Applikation am Saugrohr des Motors wurde als realisierbar aber als nicht praktikabel bewertet. Vor diesem Hintergrund wurde der Beschluss gefasst, für den Zielmotor ein eigenes Einblasesystem zu konzeptionieren und prototypisch zu realisieren.

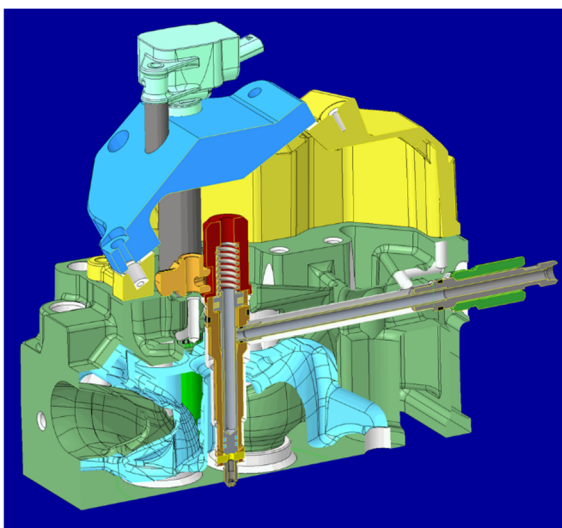


Abbildung 4. Konstruktion einer Direkteinblasung mit hydraulischer Betätigung im Zylinderkopf des 16L-Motors

Dieses Einblasesystem beruht auf einer hydraulischen Betätigung. Abbildung 4 zeigt einen Schnitt durch einen Einzelzylinderkopf. Der neue DI-Injektor ist so konstruiert, dass dieser in den Aufnahmeschacht für den Dieselinjektor hineinpasst. Über eine Lanze wird das Druckfluid zugeführt. Konzentrisch zu dieser Lanze strömt das Brenngas zur Injektorspitze.

Die periodische Bereitstellung des Betätigungsdruckes erfolgt durch eine hydraulische Ventilsteuereinheit. In einem ersten Schritt wurde dieses neue Einblasesystem an einem einzelnen Zylinderkopf außermotorisch getestet. Nachdem die Funktion experimentell bestätigt worden ist, wurde der Beschluss gefasst, dieses Konzept am Gesamtmotor zu applizieren.

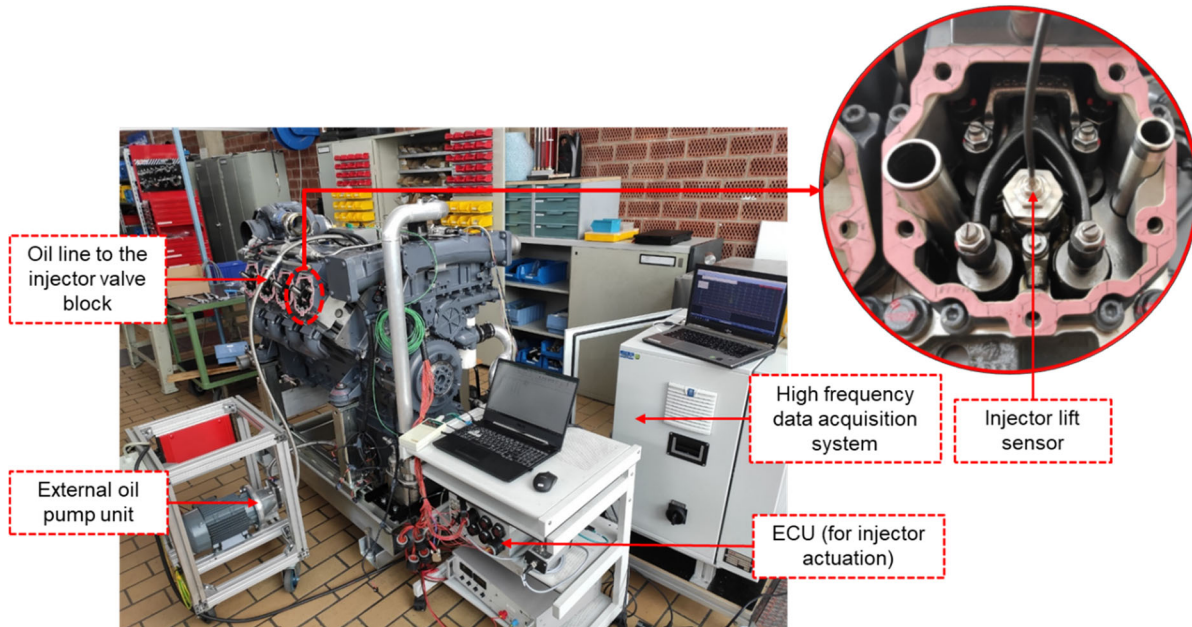


Abbildung 5: Charakterisierung des Öffnungs- und Schließverhaltens der hydraulisch betätigten Gaseinblasung

Abbildung 6 zeigt das vorläufig erzielte Betriebsverhalten mit dem 16 L H2-Motor. Die erreichten Vollastmitteldrücke liegen weit unterhalb der Erwartungen. Der maximale Mitteldruck wird bei 1600 min^{-1} erreicht und beträgt lediglich 9,2 bar. Im Drehzahlbereich unterhalb von 1600 min^{-1} wird das Moment durch die vom Turbolader geförderte Luftmasse begrenzt. Die eingeblasene Kraftstoffmasse wurde jeweils so weit erhöht, bis der gesetzte NOx-Grenzwert von 1 g/kWh erreicht worden ist. Im Drehzahlbereich oberhalb von 1600 min^{-1} liefert der Lader genügend Luft. Hier konnte die Kraftstoffmasse deshalb nicht weiter erhöht werden, da klopfende Verbrennungszyklen auftraten. Zudem wurden auffallend hohe Werte der zyklischen Schwankungen im indizierten Mitteldruck beobachtet. Die hohen Mitteldruckschwankungen könnten mit der exzentrischen Zündkerzenlage zusammenhängen. Die auffällig hohe Klopfempfindlichkeit könnte mit einer unzureichenden Gemischhomogenisierung zusammenhängen.

Zur Klärung dieser Vermutungen soll ein zweiter Baustand des 16 L H2-Motors realisiert werden. Vorab jedoch wurde dieser erste Baustand in die Lok eingebaut.

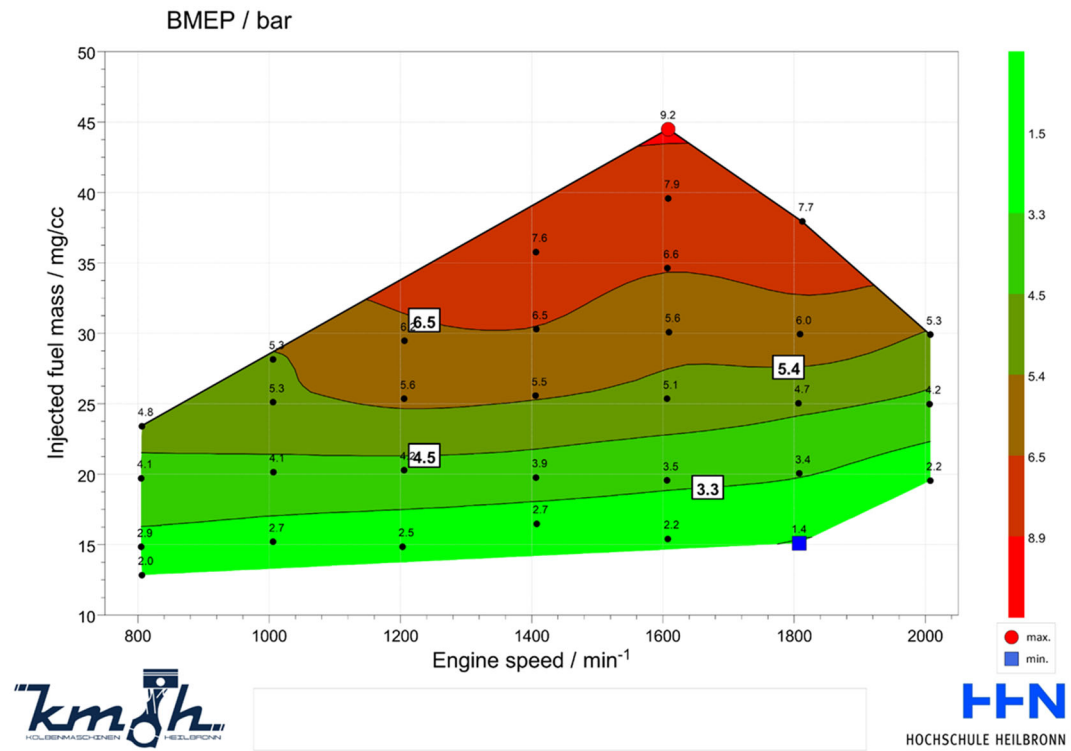


Abbildung 6: Kennfeldvermessung Baustufe I

1.3. Versuchslokomotive, Aufbau und Erprobung



Abbildung 7: Motor Baustufe I montiert im Motormodul der Lokomotive



Abbildung 8: Einbau Motor und H₂-Versorgung in die Lokomotive Vor-Ort bei Reuschling



Abbildung 9: Vorstellung der ersten H₂-Lok auf der Hausmesse bei Reuschling am 28.09.'23. Fernsehbeitrag im WDR, siehe link:

<https://www1.wdr.de/nachrichten/ruhrgebiet/hattingen-lokomotive-mit-wasserstoffantrieb-vorgestellt-100.html>

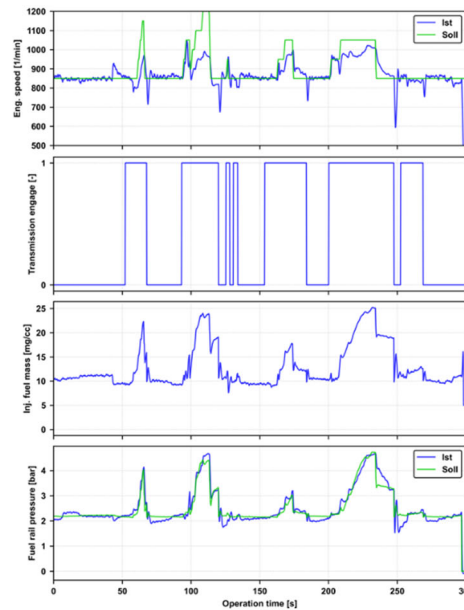


Abbildung 10. Fahrerprobungen auf dem Gleis bei Reuschling

1.4. Entwicklung Kanaleinblasesysteme

Das enttäuschende Betriebsverhalten der Baustufe I wurde zum großen Teil einer schlechten Gemischhomogenisierung zugeschrieben. Die Ergebnisse beim 3.6L-Motor, welcher mit einer Kanaleinblaspung ausgestattet ist, waren hingegen exzellent. Vor diesem Hintergrund wurde der Entschluss gefasst, bei Baustufe II auf eine Kanaleinblaspung zu setzen. Dadurch wird einerseits eine bessere Gemischhomogenisierung erwartet und zum anderen kann dann die Zündkerze wieder in der Brennraummitte positioniert werden. Zu diesem Zeitpunkt lagen zwei Ideen vor, wie eine entsprechend leistungsfähige Kanaleinblaspung realisiert werden kann. Abbildung 11 zeigt die beiden Ansätze, welche auch als Patent angemeldet worden sind.

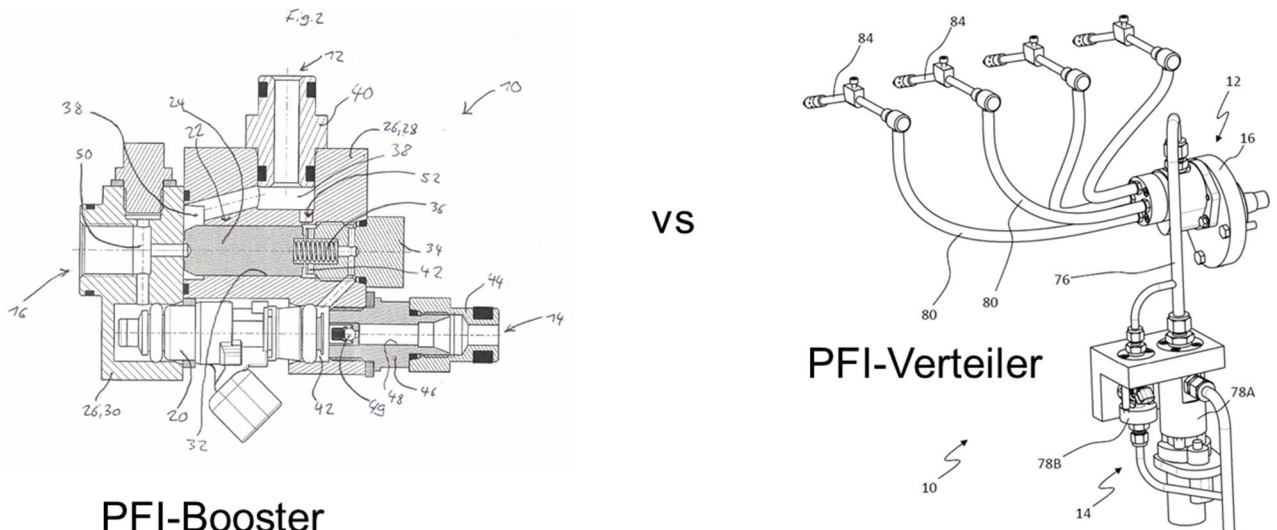


Abbildung 11: Die vorliegenden Erfindungen für ein Kanaleinblasesystem

Beim ersten System, dem PFI-Booster, kommt ein kleiner handelsüblicher CNG-Injektor von Bosch zum Einsatz. Dieser Injektor fungiert als Pilotventil. Über den sogenannten Booster-Kolben (32) wird die Hauptmenge eingebracht. Zwecks Realisierung einer hohen Dosierpräzision bei Teillast weist der PFI-Booster einen zweiten Anschluss auf, Bezugszeichen 14. Dieser Anschluss wird über ein Schaltventil zu- bzw. abgeschaltet. Bei Zuschaltung wird ein Abfall des Steuerdruckes im Steuerdruckraum 42 verhindert und in Folge dessen bleibt eine Betätigung des Booster-Kolbens 24 aus. Brenngas wird dann nur durch das Pilotventil eindosiert mit entsprechend hoher Dosiergüte.

Abbildung 12 zeigt Erprobungsergebnisse vom Motorenprüfstand. Im vorliegenden Fall wird der Motor bis zu einer Last von ca. 7 bar indiziertem Mitteldruck im Pilot-Mode betrieben, d.h. der Motor wird nur über das Pilotventil versorgt. Oberhalb dieser Last wird der Booster-Mode aktiviert.

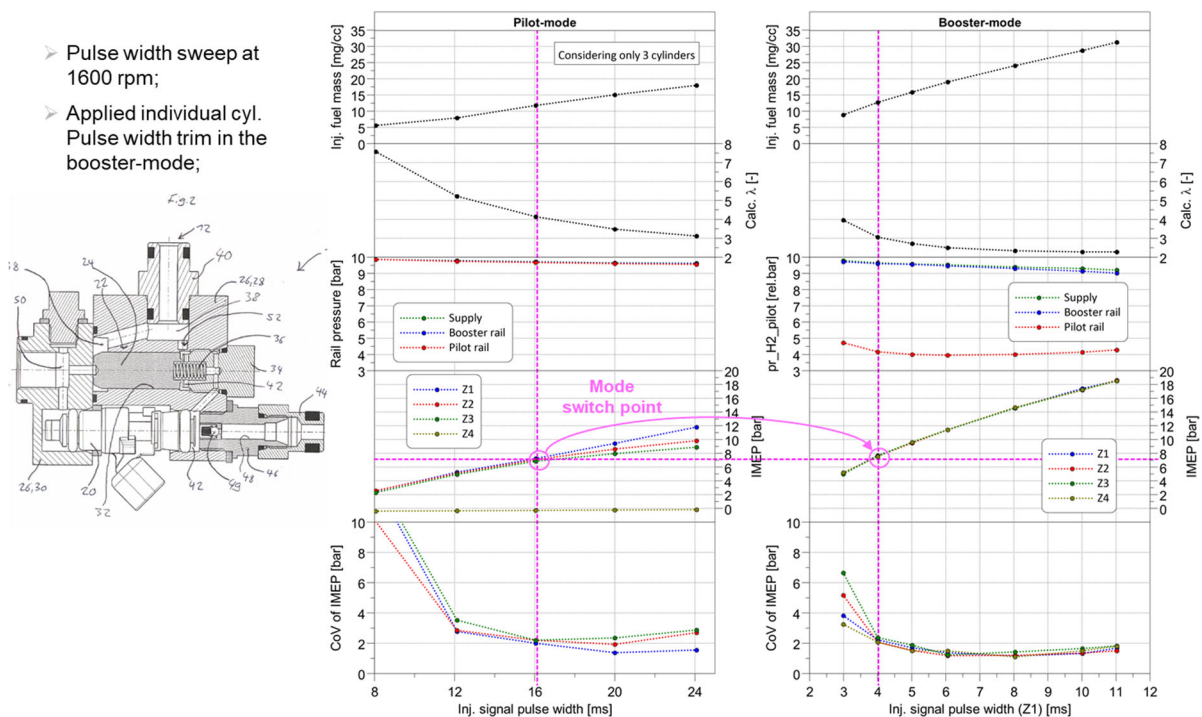


Abbildung 12: Erprobungsergebnisse des ersten Konzeptes (PFI-Booster)

Beim zweiten System, dem PFI-Verteiler, erfolgt die kurbelsynchrone Querschnittsfreigabe durch einen mit Nockenwellendrehzahl rotierenden Drehschieber. Diese Baugruppe wird als Gasverteiler bezeichnet. Stromaufwärts dieses Gasverteilers ist ein Proportionalventil angeordnet über welches ein gewünschter Massenstrom eingestellt wird. Abbildung 13 zeigt die Verläufe der Gasdrücke im Einlasskanal (unten), im Führungsrohr (mitte) und stromaufwärts des Gasverteilers (oben).

Auch dieses zweite System wurde für den 3.6L-Motor prototypisch umgesetzt und auf dem Motorenprüfstand getestet. Infolge der mechanischen Querschnittsfreigabe ist sichergestellt, dass jedem Zylinder dieselbe Brenngasmenge je Zyklus zuströmt. Ebenso gibt es keinerlei Mengenschwankungen von Zyklus zu Zyklus.

Die weitaus bessere Dosierpräzision war der ausschlaggebende Grund, den PFI-Verteiler für den 16L-Motor weiter zu verfolgen.

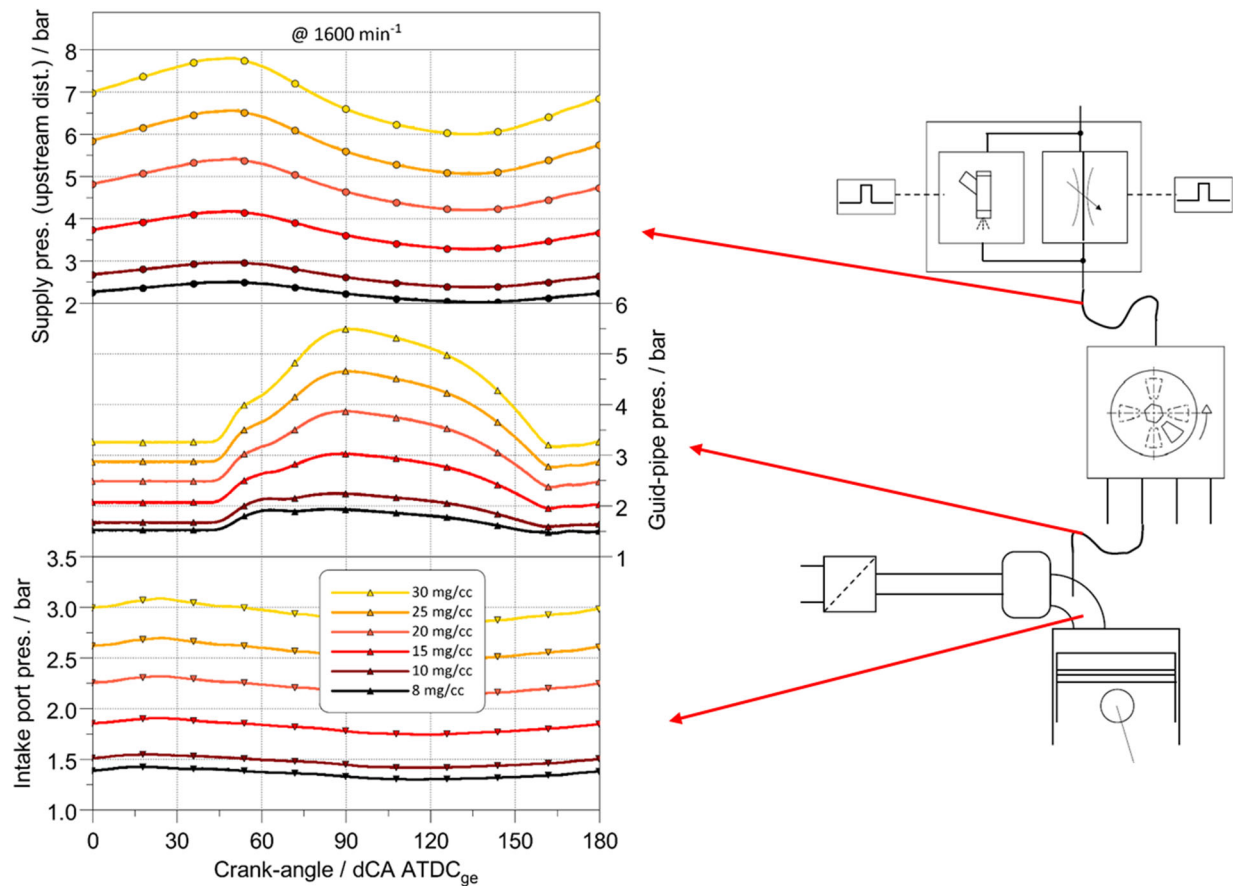


Abbildung 13: Erprobungsergebnisse des zweiten Konzeptes (PFI-Verteiler)

1.5. 16L-Motor, Baustufe II

In Baustufe II wurden folgende Veränderungen an der Motorhardware gegenüber der Baustufe I vorgenommen:

- Wechsel von DI auf PFI-Einblasesystem
- Zündkerze in Brennraummitte positioniert
- Substitution V8 ATL durch den ATL des V6 Motors

Abbildung 14 zeigt die Realisierung der Kanaleinblasedüsen in die beiden Kanäle des Einzelzylinderkopfes. Die einzelnen Düsen weisen Rückschlagventile auf und werden in den Kanälen mittels Schrauben befestigt. Über ein Verteilstück wird das Brenngas von einem zentralen Anschlusspunkt auf die beiden Düsen verteilt.

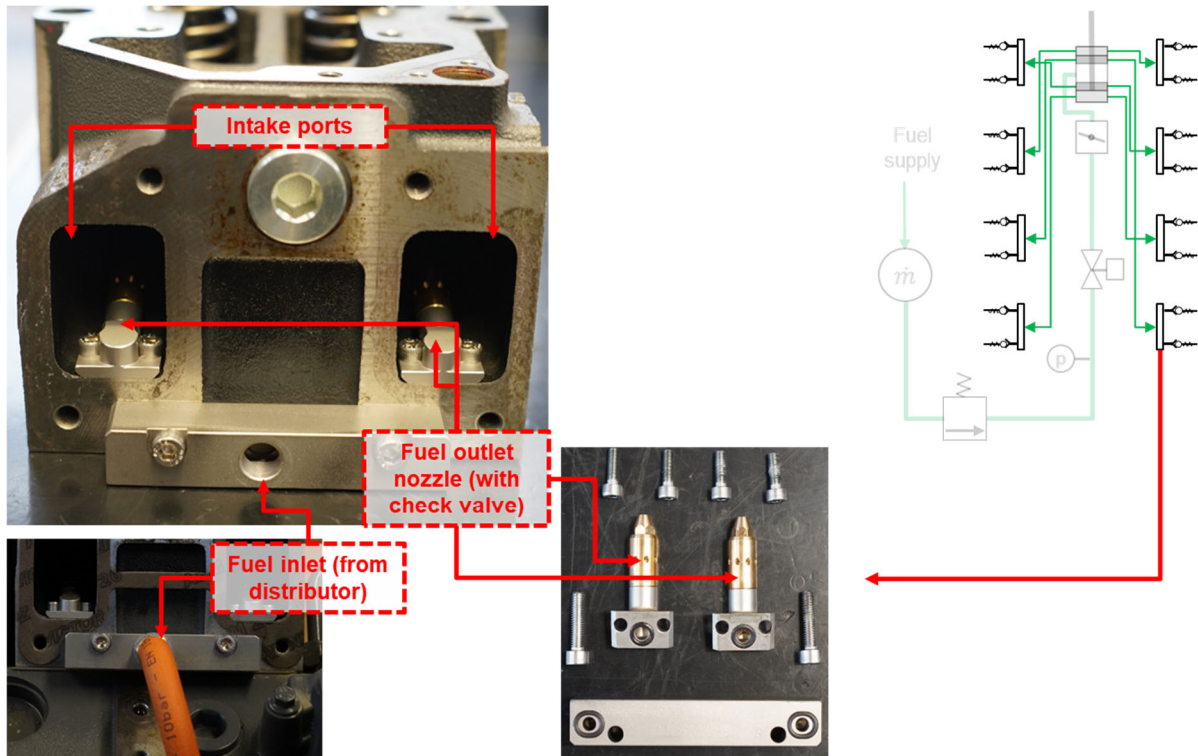


Abbildung 14: Realisierung der Kanaleinblasedüsen

Der Gasverteiler ist für den V8-Motor als Doppeldrehschieber ausgeführt. Wie beim 3.6L-Motor wird auch hier der Gasverteiler als Substitut für die Dieselhochdruckpumpe verbaut. Das Proportionalventil ist hier in das Gehäuse des Gasverteilers integriert. Abbildung 15 zeigt eine Schnittdarstellung der Baugruppe, während Abbildung 16 den Motor von oben zeigt. Zu sehen sind die orangenen Brenngasverteilerschläuche. Diese weisen alle eine gleiche Länge auf und leiten das Brenngas zu den Anschüssen an den Einzelzylinderköpfen.

Nach erfolgter Charakterisierung des Durchflussverhaltens des Einblasesystems wurde der Motor erneut auf dem Motorenprüfstand in Betrieb genommen. Die Motorsteuerungsfunktionen wurden dazu entsprechend angepasst.

Abbildung 17 zeigt die motorischen Ergebnisse der Kennfeldvermessung. Die Vollastpunkte des Motors konnten mit der installierten Prüfstandsbremse nicht angefahren werden. Das maximale Bremsenmoment liegt bei 1800 Nm, so dass die höchsten angefahrenen Betriebspunkte einen indizierten Mitteldruck von ca. 16 bar aufweisen. Bei Drehzahlen oberhalb von 1200 min⁻¹ ist davon auszugehen, dass die Last motorseitig noch gesteigert werden kann, da hier noch keine nennenswerte Klopfneigung festgestellt wurde. Zudem ist der Spitzendruck noch vergleichsweise gering. Abbildung 18 zeigt den somit dargestellten Maximalmomenten- und Leistungsverlauf über der Drehzahl. Die spezifischen Stickoxidemissionen liegen bei Drehzahlen oberhalb von 1200 min⁻¹ auf einem sehr niedrigen Niveau. Die Stabilität, ausgedrückt durch die COV-Werte liegt im interessierenden Kennfeldbereich auf einem ähnlich niedrigen Niveau wie beim 3.6L-Motor. Der indizierte Wirkungsgrad liegt in weiten Teilen des Kennfeldes oberhalb von 40%.

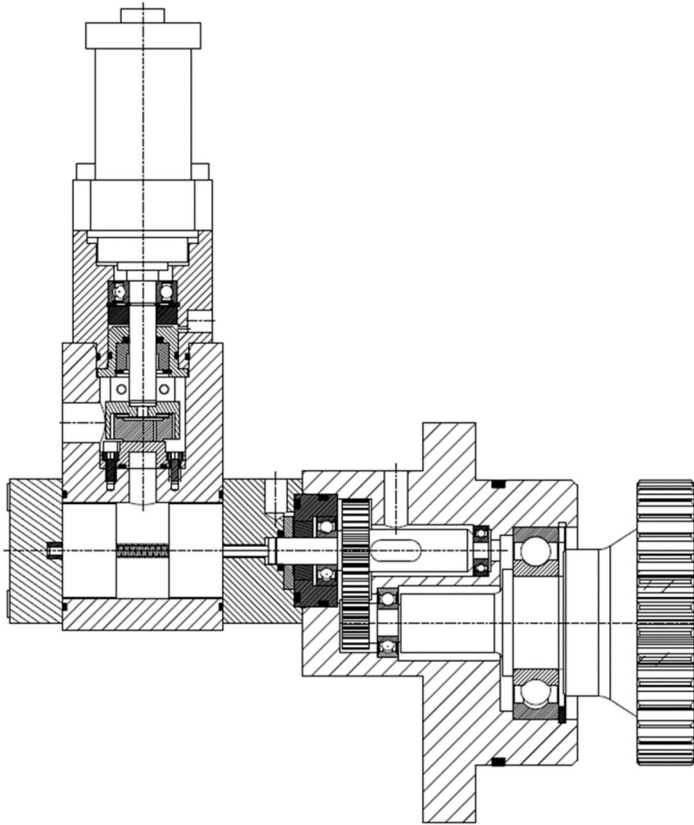


Abbildung 15: Gasverteiler mit Doppeldrehschieber und integriertem Mengensteller stromaufwärts

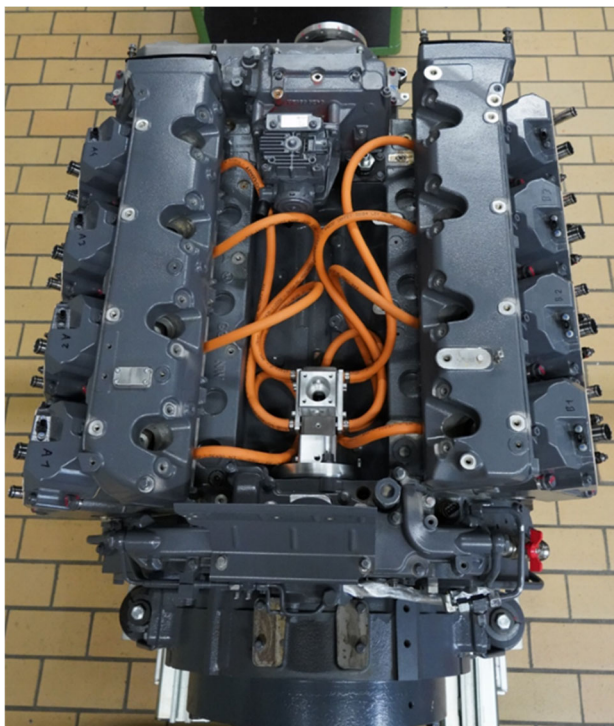


Abbildung 16: Aufbau Baustufe II Motor

- ITE above 40% could be kept on most of the operation range;
- 50% MFB could be operated close to optimum values in most of the operation range without any knocking occurrences;
- The turbocharger still lacks capacity below 1200 1/min, limiting the maximum achievable lambda and the LET and causing higher NOx emissions in the region;
- Peak firing pressure was not a limiting factor, therefore, a higher CR or more boost could still be used (if available);
- The CoV of IMEP was massively improved in comparison to the past setups. The probable cause for that is the centrally mounted spark plug;

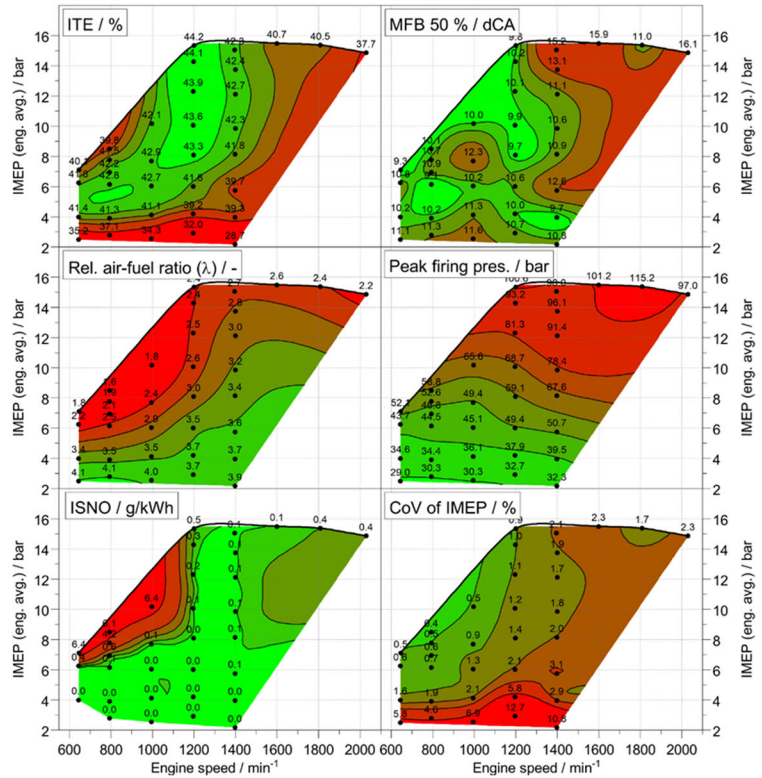


Abbildung 17: Kennfeldvermessung Baustufe II

- The torque limitation above 1200 1/min was imposed by the braking limit (1800 Nm);
- With the current turbocharger:
 - At 1000 1/min, the compressor entered into surge if the full load was extended. Below 1000 1/min, there is not enough flow through the turbine to generate boost;
 - At 1200 1/min, it should be possible to improve the torque, by little, as the compressor will probably soon run into surge operation;
 - At 1400 1/min, the torque can be improved without the used o HP-EGR;
 - From 1600 to 2000 1/min, HP-EGR may represent a good solution to improve the compressor operation region;
 - The 2000 1/min point was limited by the turbocharger operation (max. speed limitations);

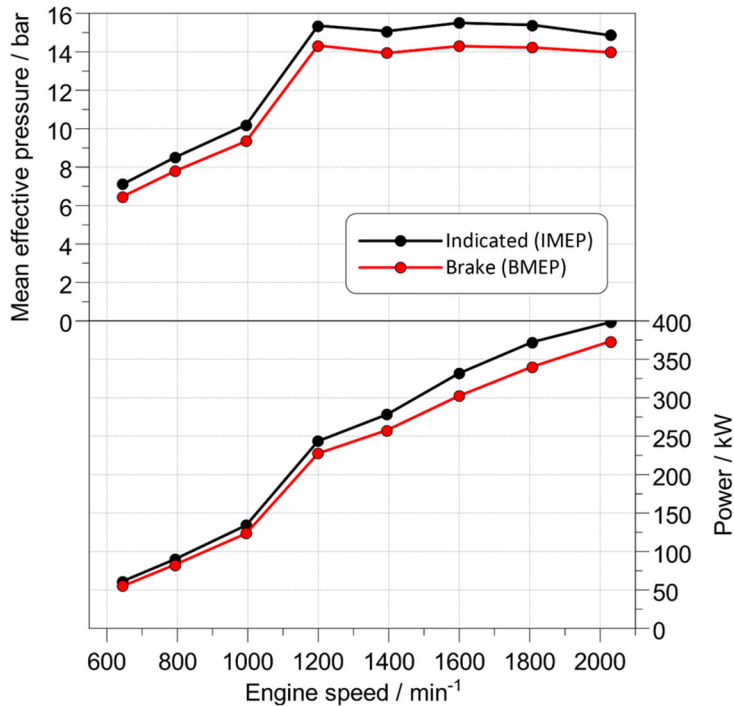


Abbildung 18: Baustufe II, erreichtes Vollastverhalten

1.6. Variable Verdichtung

Das Konzept einer stufenlosen Verdichtungsregelung mittels separater Steuerleitungen wurde konstruktiv ausdetailliert und prototypisch für den 3.6L-Motor umgesetzt. Abbildung 19 zeigt die realisierte Konstruktion. Abbildung 20 zeigt die prototypische Umsetzung.

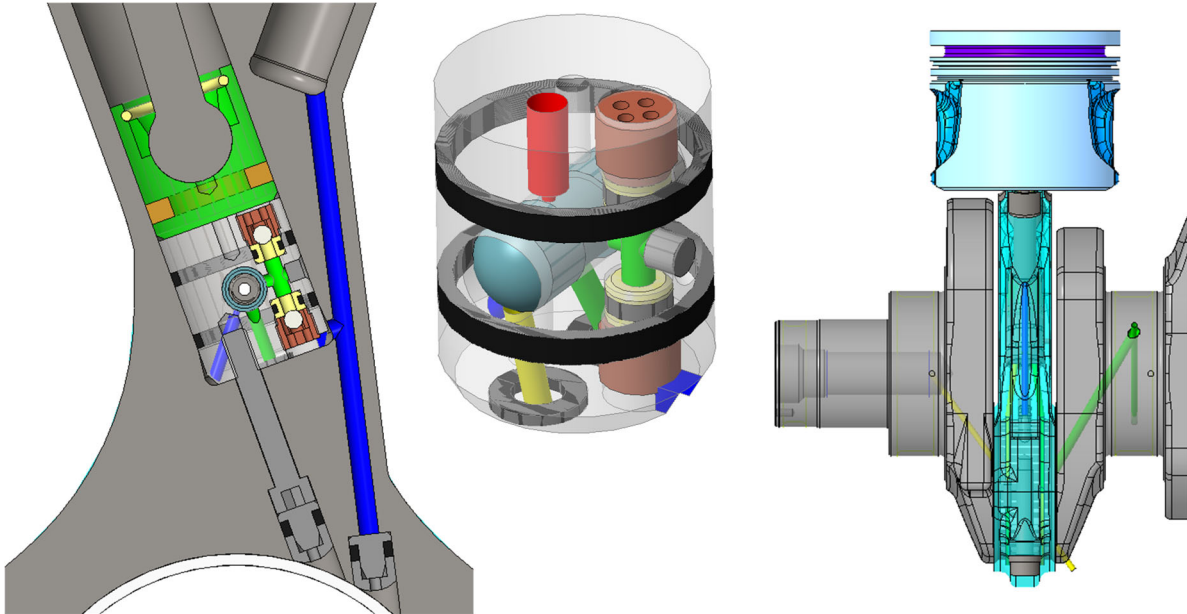


Abbildung 19: VCR-Pleuelstange mit hydraulisch betätigtem 3/2-Wegeventil, Kurbelwelle mit separaten Steuerdruckleitungen

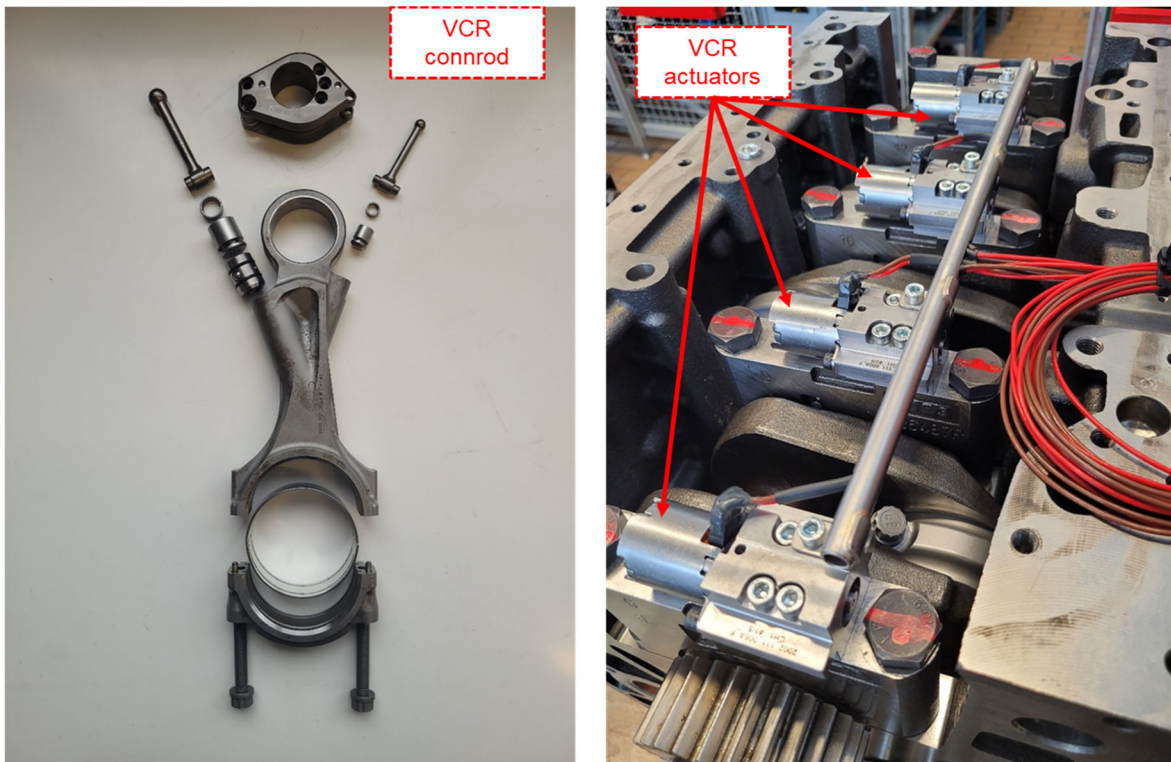


Abbildung 20: Realisierte VCR-Pleuel und Aktuierung

Über die genannten separaten Steuerdruckleitungen wird für jedes Pleuel eine individuelle Fluidverbindung zwischen dem 3/2-Wegeventil des Pleuels und einem an der Hauptlagerkappe befestigten Schaltventil hergestellt. Mit letzterem Ventil wird der Druck in der Steuerdruckleitung gestellt und darüber wird das bewegte 3/2-Wegeventil gestellt.

Abbildung 21 zeigen die Verläufe der Ist-Verdichtungen der einzelnen Zylinder über der Zeit. Bei diesem Versuch wurde die Verdichtung zunächst auf 11 angehoben, dann auf 12, 13 und schließlich auf den Maximalwert von knapp 14. Man sieht, dass alle Pleuel in etwa synchron verstellen und dann in ähnlicher Weise um den jeweiligen Sollwert pendeln.

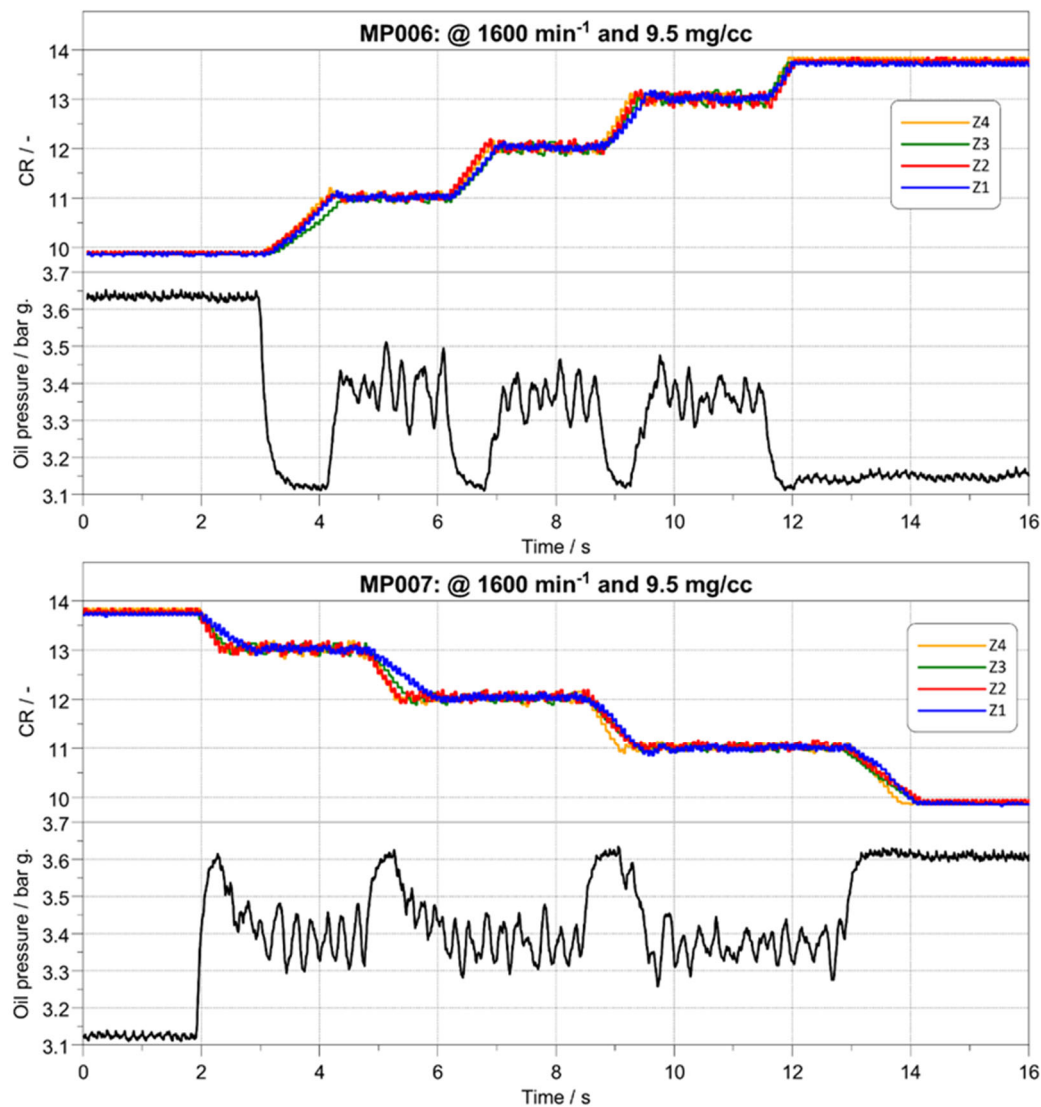


Abbildung 21: Einregelverhalten bei gefeuertem Motorbetrieb

Abbildung 22 zeigt den Einfluss der Verdichtung auf die Brennverfahrensvariablen anhand zweier Lastschnitte, zunächst beispielhaft ermittelt für die Minimal- und die Maximalverdichtung. Hier zeigen sich sehr ähnliche Phänomene, wie sie auch bei konventionellen Ottomotoren zu beobachten sind. Bei beiden Lastschnitten kann der Wirkungsgrad mit der hohen Verdichtung gegenüber Betrieb bei der Basisverdichtung von 10 in weiten Teilen signifikant angehoben werden. Der prozentuale Wirkungsgradzuwachs beträgt ca. 6%. Durch die Klopfneigung und die daraus resultierende

Zündungsspätverstellung wird der Effizienzgewinn bei hohen Lasten etwas verringert. Bei 1600 min⁻¹ und 14 bar Mitteldruck erfolgt sogar eine Trendumkehr.

- The spark timing was delayed to keep NO_x emissions below the 1 g/kWh limit or when knocking appeared;
- Knocking was seen in the higher load points with the CR of 13.9:1 (High CR);
- CoV of IMEP was seen to rise at the last point of 1600 1/min, due to the knock occurrence and very delayed combustion. At this point, the compression pressure reached already 90 bar;
- The lambda values are kept approximately the same, even though a lower exhaust temperature is expected with higher CR;
- An offset of 3% in indicated efficiency was achieved for both speeds around 8 to 10 bar IMEP, reaching an efficiency of 47% with CR 13.9;
- As expected, the NO_x emissions with higher CR are higher due to the increase in combustion temperatures (correlating with peak firing pressure).

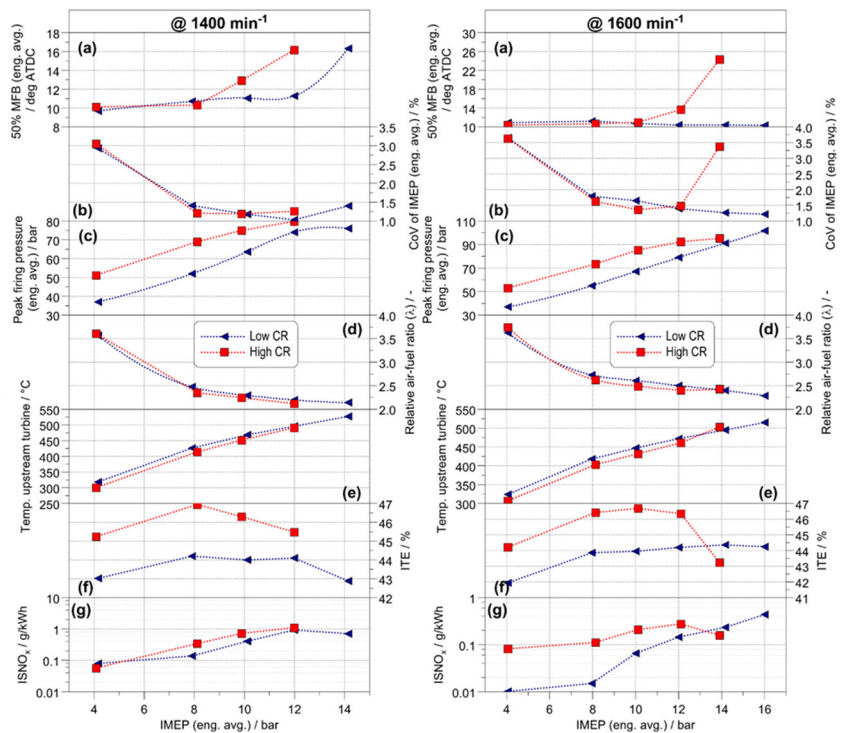


Abbildung 22: Thermodynamische Untersuchungen am VCR-Motor

2. Zusammenfassung der Ergebnisse, Verwertung und Transfer

Der in diesem Vorhaben erzielte Erkenntnisgewinn hat die Erwartungen des Forscherteams weit übertroffen. Dies betrifft insbesondere die Entwicklung der Gaseinblasetechnik, was sich erst im Laufe des Vorhabens als notwendig herausgestellt hat. Die am 3.6L-Motor durchgeführten Vollastuntersuchungen haben gezeigt, dass dieselähnliche Performance und dieseltypische Wirkungsgrade mit einem Kanaleinblasesystem erreicht werden. Die Entstehung von Stickoxidemissionen kann durch innermotorische Maßnahmen wirkungsvoll unterdrückt werden. Im zweiten Anlauf konnte auch mit dem großen 16L-Motor ein hervorragendes Betriebsverhalten erreicht werden. Das applizierte mechanisch gesteuerte Gaseinblasesystem ermöglicht eine sehr präzise Kleinstmengendosierbarkeit und kann an der Vollast die notwendigen Brenngasmengen reproduzierbar bereitstellen. Für die Lokomotive wurde eine Gasversorgung und ein Sicherheitskonzept entwickelt und realisiert unter Berücksichtigung bislang bekannter technischer Richtlinien. Die in das Vorhaben eingebrachte VCR-Technologie wurde signifikant weiterentwickelt. Das realisierte hydraulische Betätigungskonzept ermöglicht nun eine kontinuierliche Einstellbarkeit der Verdichtung. Anhand von Versuchen bei geschlepptem und bei gefeuertem Betrieb konnte das Umschaltverhalten charakterisiert werden. Es weist eine sehr präzise und reproduzierbare Einstellbarkeit auf. Das Potential zur Wirkungsgradsteigerung wurde untersucht und liegt bei ca. 6%.

Der gewonnene Erkenntnisgewinn und die neu entwickelten Konzepte sind insbesondere für Komponentenzulieferer als auch für Motorenhersteller von großem Nutzen. Die Ergebnisse stellen eine Blaupause für weitere Schienenfahrzeugumbauten dar. Für

Ingenieurdienstleister und Forschungseinrichtungen wurden aufgrund der neuen bestätigten Konzepte neue Betätigungsfelder geschaffen.

Für das Forscherteam der Hochschule Heilbronn war das HydroLoc-Projekt von herausragendem Nutzen. Für den an diesem Teilvorhaben beteiligten wissenschaftlichen Mitarbeiter stellen die Ergebnisse eine solide Basis für seine Dissertation dar, die voraussichtlich noch in diesem Jahr eingereicht werden wird. Während des Projektbearbeitungszeitraumes entstanden am Labor zahlreiche studentische Arbeiten, die sich mit Inhalten aus dem HydroLoc-Projekt beschäftigt haben. Zudem stand für die Vorlesungen ein sehr interessanter Versuchsträger zur Verfügung, an dem praktische Übungen zum Brennverfahren abgehalten worden sind.

Methodisch hat sich das Team dank des Projektes stark weiterentwickelt, insbesondere im Bereich Brennverfahren, Wasserstoffsicherheitstechnik, Gaseinblasetechnik, VCR, Steuerungstechnik sowie im Bereich der Motorenmesstechnik.

Die zahlreichen als vielversprechend bewerteten neuen Konzepte stellen für die Hochschule Heilbronn eine gute Ausgangsbasis zum Einwerben künftiger Forschungsprojekte dar.

3. Veröffentlichung der Ergebnisse

Die im Folgenden genannten Veröffentlichungen sind im Rahmen dieses Vorhabens entstanden:

- [1] K. Wittek, V. Cogo, G. Prante, Full load optimization of a hydrogen fuelled industrial engine, International Journal of Hydrogen Energy, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.06.198>.
- [2] J. Franzen, J. Sinnemann, U. Pinders, K. Wittek, Technologieoffenheit zur Gestaltung klimafreundlicher Fahrzeugflotten, ETR – Eisbahntechnische Rundschau | Dezember 2023 | NR. 12, Seite 49 – 52, 2023.
- [3] Wittek K et al., Development of a pneumatic actuated low-pressure direct injection gas injector for hydrogenfueled internal combustion engines, International Journal of Hydrogen Energy, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.023>.
- [4] S. Özdemir, F. Schmitt, C. Rudek, V. Cogo, G. Prante, K. Wittek, The Boosting System for an Off-road Hydrogen Internal Combustion Engine, in: 27. AUFLADETECHNISCHE KONFERENZ am 26. / 27. September 2023 in Dresden, 2023.
- [5] K. Wittek, V. Cogo, G. Prante, Pneumatisch aktiverter DI-Injektor für H2-Motoren, in: Coburger Mobilitätskongress, Coburg, 2022.

Zudem wurden vier Patente eingereicht:

10 2023 116 275A1	Offenlegungsschrift	H2 Einblasung, hydraulisch
10 2023 116 280A1	Offenlegungsschrift	H2 Einblasung, pneumatisch, nach außen öffnend
10 2024 122 496.7	Anmeldeschrift	H2 Einblasung, PFI-Booster
10 2024 132 881.9	Anmeldeschrift	H2 Einblasung, Verteiler