

NEUE ENERGIEN 2020

Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Kurztitel:

Large Engine

Langtitel:

Leistungs- & Wirkungsgradsteigerung bei Emissionsreduktion in Großgasmotoren mit spezieller Betrachtung des Einsatzes von Sondergasen im motorischen Betrieb

1. Einleitung

Aufgabenstellung

Schwerpunkte des Projektes

Einordnung in das Programm

Verwendete Methoden

Aufbau der Arbeit

2. Inhaltliche Darstellung

3. Ergebnisse und Schlussfolgerungen

4. Ausblick und Empfehlungen

5. Literaturverzeichnis

6. Anhang

1. Einleitung

Hocheffiziente und dezentrale Energieerzeugungsanlagen auf der Basis von Großgasmotoren wurden in den letzten Jahren vermehrt nachgefragt. Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK-Anlagen) erzeugen Strom und Wärme dezentral vor Ort und bieten dabei höchstmögliche Effizienz in der Energieumwandlung von über 90 Prozent bei minimaler Umweltbelastung. Obwohl die Wirtschaftskrise des Jahres 2009 auch bei großen Gasmotorenanlagen zu spüren war, wird von Experten von einem weiteren beträchtlichen Marktwachstum in der Leistungsklasse größer 5 MW / Motor in den kommenden fünf Jahren ausgegangen, vor allem getrieben von der weltweit steigenden Energienachfrage sowie erhöhten Umwelt- und Klimaschutzanforderungen [3], [4], [5], [6]. In dieser Leistungsklasse ist aufgrund des hohen technischen und wirtschaftlichen Risikos weltweit nur eine sehr eingeschränkte Wettbewerberzahl potentiell in der Lage die Nachfrage zu decken.

Diese Aspekte bildeten die Ausgangslage für die Projektidee zur Entwicklung eines neuartigen 20-Zylinder Gasmotors mit einem Leistungsziel von > 8 MW und signifikanten ökologischen und ökonomischen Zielvorgaben:

- Steigerung des mechanischen und damit des elektrischen Wirkungsgrades
- Steigerung der Gasflexibilität
- Erhöhung von Leistungsdichte und Leistung im Sondergasbetrieb
- Minimierung der Abgasemissionen

Die Optimierung und Weiterentwicklung innovativer Verbrennungstechnologien und der erstmalige Einsatz eines vergleichsweise schnell drehenden Motors in dieser Leistungsklasse spielen bei der Erreichung dieser Ziele eine entscheidende Rolle. Durch Erhöhung des effektiven Mitteldrucks wird die Leistungsdichte des Motors erhöht und die spezifischen Kosten und Emissionen weiter gesenkt. Primäres Projektziel ist die Nachweiserbringung auf prototypischen Prüfstandsanlagen, dass für einen schnell laufenden Großgasmotor im Erd- und Sondergasbetrieb sowohl für die erzielbare Leistung als auch die Höhe des Gesamtwirkungsgrades bei gleichzeitiger Emissionsreduktion ein Alleinstellungsmerkmal im Wettbewerb erreicht werden kann. Damit soll der Technologievorsprung der Projektpartner weiterhin in Österreich erhalten und ausgebaut werden.

Die Projektkonstellation wurde in Form einer Partnerschaft von renommierten österreichischen Institutionen gewählt, deren Expertise sowohl im Bereich der fortgeschrittenen Verbrennungstechnologien als auch im Bereich der Motorenkonstruktion und – simulation angesiedelt ist. Eine

integrierte Produktentwicklung schafft für diesen neuartigen Gasmotor schlüsselfertige, flexible Lösungen für verschiedenste Anwendungen weltweit wie beispielsweise die energetische Nutzung von großen Gasmengen der Stahlerzeugungsindustrie, welche ansonsten nur nutzlos abgefackelt werden.

2.1 Aufgabenstellung

Primäres Projektziel ist die Darstellung eines 20 Zylinder Motors mit 9,5 MW (Abb. 1). Weiters die Nachweiseinbringung auf prototypischen Prüfstandsanlagen, dass für einen schnell laufenden Großgasmotor im Erd- und Sondergasbetrieb sowohl für die erzielbare Leistung als auch die Höhe des Gesamtwirkungsgrades bei gleichzeitiger Emissionsreduktion ein Alleinstellungsmerkmal im Wettbewerb erreicht werden kann. Damit soll der Technologievorsprung der Projektpartner weiterhin in Österreich erhalten bleiben.

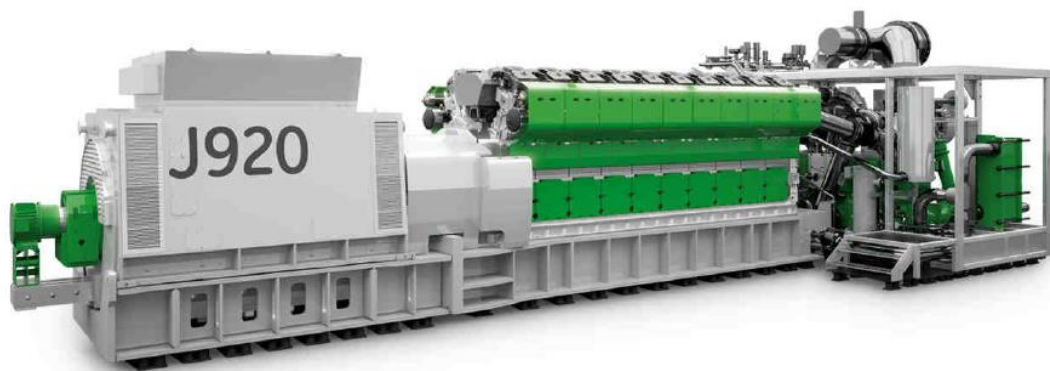


Abbildung 1: J920 Gasmotor

2.2 Schwerpunkte des Projektes

Zur Erreichung der Projektziele wurden folgende Aspekte als Schwerpunkte gesetzt

- Projekt Management und technische Projektbetreuung
- Motorsteuerungs- und Überwachungskonzept
- Systemeinbindung
- Prototypbeschaffung
- Validierung von Sub-Systemen und Komponenten
- Verbrennungsoptimierung
- Konstruktion und begleitende Berechnungen

2.3 Einordnung in das Programm

Das Forschungs- und Technologieprogramm Neue Energien 2020 des Klima- und Energiefonds baut u.a. auf den Ergebnissen des Strategiepoces e2050 auf und berücksichtigt die besonderen Anliegen und Schwerpunktsetzungen des Klima- und Energiefonds. Der Programmschwerpunkt umfasst effizienten Energieeinsatz, erneuerbare Energieträger sowie intelligente Energiesysteme. Über das Thema Energieeffizienz hinaus ist die Steigerung der Ressourceneffizienz und -suffizienz Inhalt dieses Schwerpunktes. Das Projekt ‚Large Engine‘ ist im Themenbereich ‚Energieeffizienz in Industrie und Gewerbe‘ angesiedelt und orientiert sich an den im folgenden aufgelisteten Programmzielen.

1. Energie-strategische Ziele	2. Systembezogene Ziele	3. Technologie-strategische Ziele
<ul style="list-style-type: none"> 1.1 Sicherstellung der Kriterien der Nachhaltigkeit: ökonomisch, ökologisch und sozial dauerhaft 1.2 Erhöhung der Ressourcen- und Energieeffizienz des Wirtschaftssystems 1.3 Reduktion der Importabhängigkeit bei Energieträgern 1.4 Reduktion des Energiebedarfs durch verbraucherseitige Maßnahmen 1.5 Aufbau und Sicherung langfristig klimaschützender Raum- und Wirtschaftsstrukturen 1.6 Erzielung struktureller und langfristig quantitativ maßgeblicher Effekte 1.7 Verbesserung des Wissens über langfristige Entwicklungen, ihre Kosten und Wirkungen 	<ul style="list-style-type: none"> 2.1 Reduktion des Verbrauchs fossiler und nuklearer Energieträger 2.2 Erschließung von Ressourcen erneuerbarer Energieträger 2.3 Verbesserung der Umwandlungseffizienz 2.4 Entwicklung intelligenter und robuster Energiesysteme 2.5 Entwicklung von Schlüsseltechnologien 2.6 Herstellung einer Optionsvielfalt bei Technologien und Energieträgern 2.7 Multiplizierbarkeit, Hebelwirkung und Signalwirkung 2.8 [Kosten-)Effizienz der Treibhausgas-Reduktion: Euro pro Tonne CO₂-Äquivalent pro Jahr, über die Kyoto-Periode und über die technisch-wirtschaftliche Nutzungsdauer der Investition 	<ul style="list-style-type: none"> 3.1 Unterstützung von Innovationssprüngen (z. B. „Faktor10- Technologien“) 3.2 Verbesserung der Innovationsfähigkeit von Betrieben 3.3 Erhöhung des inländischen Wertschöpfungsanteils im Energiesystem 3.4 Forcierung von Kooperationen und Partnerschaften zwischen Wissenschaft und Wirtschaft 3.5 Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit durch verbesserte Ressourceneffizienz 3.6 Verstärkung interdisziplinärer Kooperationen und des Systemdenkens 3.7 Verstärkung internationaler Kooperationen und Ausbau der internationalen Führungsrolle 3.8 Förderung von Qualifikationen im Energie- und Klimaschutzbereich und Ausbau des Forschungsstandortes 3.9 Stärkung der Technologie- und Klimakompetenz österreichischer Unternehmungen 3.10 Generierung von Sekundärnutzen bzw. Spin Offs durch eine Technologie 3.11 Kooperationen mit Gebietskörperschaften und Unternehmungen aus Industrie, Energie- und Versicherungswirtschaft

Abbildung 2: NE2020 Programmziele [1]

Die Verwendung von Erdgas sowie Sondergasen leistet einen wesentlichen Beitrag zur Reduktion von Treibhausgasen. Die Effizienz des Energieumsatzes ist hierbei von

entscheidender Bedeutung. Das geförderte Projekt ‚large engine‘ trägt durch die Entwicklung innovativer Technologien, z.B. im Bereich der Verbrennung, und den damit erreichbaren hohen Gesamtwirkungsgraden wesentlich zur Erreichung der NE202 Programmziele bei. Das Projekt ‚large engine‘ wurde in Zusammenarbeit mit namhaften Österreichischen Institutionen durchgeführt und trägt damit sowohl zur Erhöhung des inländischen Wertschöpfungsanteils als auch der Stärkung der Technologie und Klimakompetenz österreichischer Unternehmen bei. Nicht zuletzt führt die Erweiterung des GE Jenbacher Produktportfolios in den Leistungsbereich über 8 MW mit den damit verbundenen Technologien und Erkenntnissen zu einer Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit.

2.4 Verwendete Methoden

Für die thermodynamische Auslegung des J920-Motors wurde die am LEC abgeleitete und in Zusammenarbeit mit der Gasmotorensparte von GE in Jenbach erfolgreich angewandte Methodik LDM (LEC **D**evelopment **M**ethodology) zur Entwicklung und Optimierung von Verbrennungskonzepten für Großmotoren eingesetzt [9]. Diese Methodik basiert auf einer gezielten Kombination von Simulation und experimentellen Untersuchungen an Einzylinder-Forschungsmotoren (SCE – Single Cylinder Engine) sowie Vollmotoren (MCE – Multi Cylinder Engine), siehe Abb. 2.

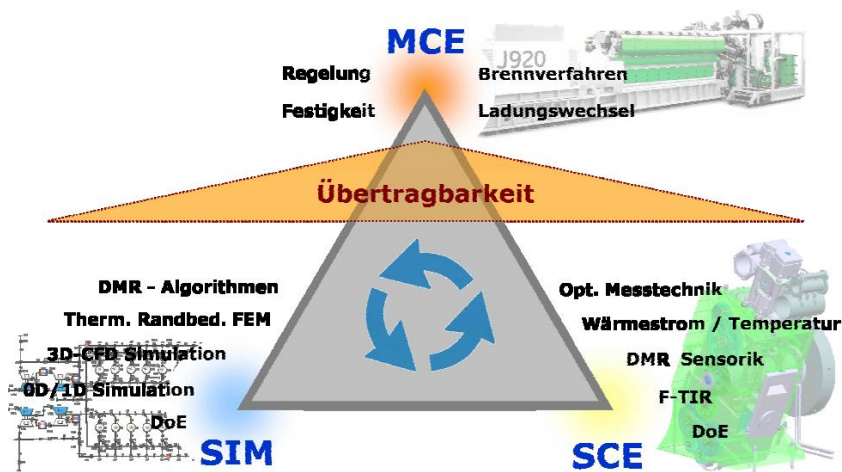


Abbildung 2: LEC Entwicklungsmethodik (LDM)

Zur Simulation werden sowohl die dreidimensionale CFD Methode als auch die null- und eindimensionale Motorprozessrechnung eingesetzt. Während die 3D-CFD-Simulation vor allem

für die Detailoptimierung der relevanten Vorgänge (wie etwa Gemisch-bildung und Verbrennung in Vorkammer und Hauptbrennraum, Bestimmung des Klopf-verhaltens, etc.) eingesetzt wird, werden null- und eindimensionale Motorprozesssimulationen für die Voroptimierung maßgeblicher Motorparameter (Verdichtungsverhältnis, Steuerzeiten, etc.) angewandt. Ein wesentlicher Vorteil der null und eindimensionalen Modelle ist in den kurzen Rechenzeiten zu sehen, die die Untersuchung einer großen Anzahl von Parametervariationen erlauben. Eine wesentliche Voraussetzung für die Anwendbarkeit der dargestellten Methodik bildet die Sicherstellung der Übertragbarkeit der Ergebnisse vom Einzylinder-Versuch auf den Vollmotor. Hierzu ist es notwendig, vergleichbare Randbedingungen wie am Vollmotor zu realisieren. Neben gleichen thermischen Randbedingungen ist dies insbesondere die Darstellung gleicher Bedingungen zu Beginn des Hochdruckteils (Temperatur, Druck und Zusammensetzung des Arbeitsgases). Diese werden im Rahmen der dargestellten Methodik in einem iterativen Prozess auf Basis der 1D-Ladungswechselsimulation von Vollmotor und Einzylinder-Aufbau bestimmt.

Aufgrund der hohen Komplexität des Systems und der Vielzahl der freien Parameter wurde auch intensiv auf den Einsatz der DoE-Methode (Design of Experiments) für die simulatorische Bestimmung der optimalen Auslegung des Brennverfahrens mit Hilfe der 1D Ladungswechselrechnung zurückgegriffen. Freie Parameter, die auf Basis dieser Vorgehensweise optimiert wurden, waren insbesondere das Verdichtungsverhältnis, die Verbrennungsführung, die Steuerzeiten und die Turboladerauslegung in Abhängigkeit von der betrachteten Gasqualität (Methanzahl). Als Ziel der Auslegung wird immer ein möglichst hoher Motorwirkungsgrad angestrebt, wobei die Randbedingungen:

- zulässiger NO_x-Grenzwert,
- maximal erlaubter Zylinder-Spitzenruck und
- kloppfreier Betrieb

einzuhalten sind.

Zu Beginn wird der „Messplan“ (in diesem Fall „Simulationsplan“) mit Hilfe der Eingangsparameter und deren Variationsbreiten auf Basis statistischer Ansätze aufgebaut. Die Berechnung der interessierenden Antwortgrößen erfolgt im 1DLadungswechselprogramm, wobei die wesentliche Voraussetzung die Verfügbarkeit geeigneter Simulationsmodelle zur Abbildung der Brennrate, der NO_x-Bildung und des Klopfens ist. Am LEC wurden dazu entsprechende Modelle entwickelt, vgl. etwa [10], [11].

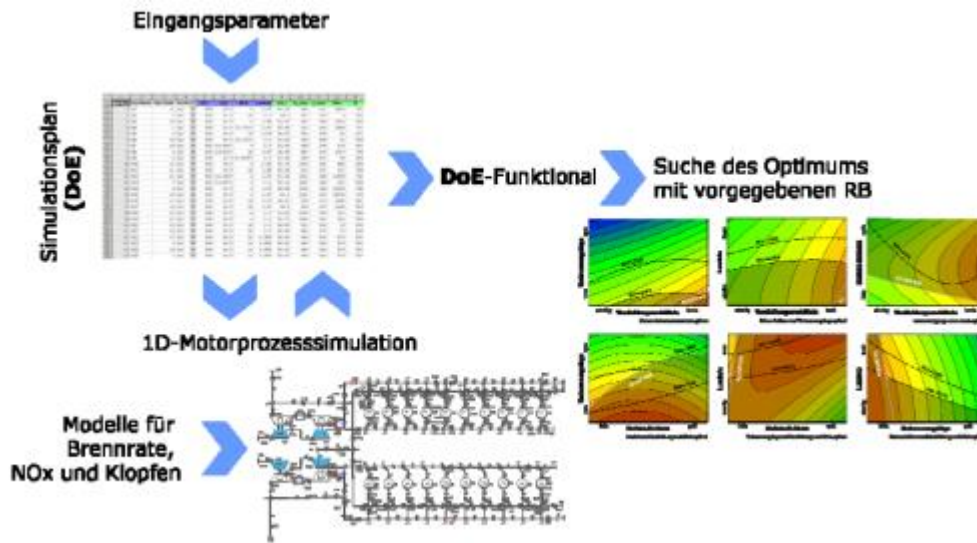


Abbildung 3: Vorgehensweise bei der Anwendung der DoE-Methode für die Simulation

Die notwendige Detailabstimmung der Parameter des Brennratenmodells, die in der Regel auf Basis von Messungen am realen Versuchsträger erfolgen muss, wurde im vorliegenden Fall durch den Abgleich mit den Verbrennungsrechnungen aus der 3D-CFD-Simulation durchgeführt. Zwischen den auf diese Weise ermittelten Antwortgrößen und den Eingangsparametern wird ein funktionaler Zusammenhang abgeleitet, mit dem in weiterer Folge die Suche des Optimums erfolgt. In Abb. 3 sind beispielhaft die Ergebnisse aus einer Untersuchung mit den Parametern Verdichtungsverhältnis, Luftverhältnis, Miller-Steuerzeit und Verbrennungslage in vereinfachter Form (zweidimensionale Abhängigkeiten) dargestellt.

2.5 Aufbau der Arbeit

Im ersten Projektabschnitt wurde die Konstruktion des 20 Zylindermotors bis zum 3D-Konzept vorangetrieben. Mit dem Ziel die „Powerunit“, bestehend aus Pleuel, Kolben, Zylinderbuchse und Zylinderkopf inklusive der Ventilsteuerung bereits 1 Jahr nach Projektstart auf dem Einzylinder Motor zu betreiben wurden Auslegung, Konstruktion und Berechnung vorgezogen und die Teile beschafft. Der Zylinderkopf wurde als „Rapid Prototyping“ Teil ausgeführt, die Finale Auslegung erfolgte parallel zu den Einzylinder versuchen. Ein weiterer Schwerpunkt war die Ausarbeitung eines Regelungskonzeptes für die 20 Zylindermotoren. Dazu gehörte die Auslegung von Komponenten der Motorregelung und -überwachung. (Motorbestückung Sensorik, Aktorik, Zündanlage, Peripherie). Regeltechnische Simulationsmodelle wurden

aufgesetzt. In der „Preliminary Design Phase“ der Systems-Konstruktion wurde unter

Berücksichtigung des Transportes ein Aufstellungskonzept entworfen. Für die spezifizierten hydraulischen Einbindungsvarianten wurden technische Schemata erstellt, die die Basis für die Konstruktion der Anlage darstellten. Die Spezifikation der Anlagen - Hauptkomponenten, sowie die Anordnung der einzelnen Baugruppen incl. der elektrischen Interfaces des Aggregates für die gesamte Typenreihe vom V12 bis V24 Zylinder waren die nächsten Schritte. Die Detaillierung der Konstruktionen und die Vorbereitungen für die ersten Pilotanlagen erfolgten im nächsten Projektabschnitt. Parallel zur ersten Konstruktionsphase wurde mittels FMEA Methodik der Validierungsplan erarbeitet. Am Einzylinder wurden folgende Validierungsarbeiten durchgeführt: dynamisches Verhalten des Ventiltriebs, Temperaturmessungen an Kolben, Büchse und Zylinderkopf. Parallel zur Fertigstellung der Detailkonstruktion des 20 Zylindermotors erfolgten die Beschaffung der MCE Prototypenteile sowie die Durchführung von Komponententests.

Zur Einhaltung des ambitionierten Zeitplans wurde auf eine konsequente „Concurrent Engineering“ Strategie mit Einkauf, Lieferanten und Fertigung gesetzt. Die Beschaffung der Teile erfolgte hochgradig parallel zur Fertigstellung der Konstruktionsarbeiten. Erkenntnisse aus den Einzylinder- und Komponentenprüfständen flossen unmittelbar ein. Neben den Arbeiten am Motor waren die hydraulischen und elektrischen Anlagenumfänge darzustellen. Als Beispiel dafür seien Generator, Abgasanlage und Kühlsysteme aufgeführt.

2. Inhaltliche Darstellung

2.1 Motorsteuerungs- und Überwachungskonzept

Die Regelung (Motorkernregelung und Klopfüberwachung) wurde unter Berücksichtigung der Randbedingungen 2-stufiger Aufladung, Port Injektion und Zylinderdrucksensorik entworfen und am J920 Prototypmotor validiert. Als besondere Herausforderung stellt sich die Entwicklung der Leerlaufdrehzahl- und Niederlastregelung über Zylinderabschaltung, sowie die Gleichstellung der Verbrennung in den einzelnen Zylindern dar. Des Weiteren gilt der über Zylinderdrucksensoren geführten Klopfüberwachung besondere Aufmerksamkeit bei der Entwicklung des Motorschutzes.

Die zylinderindividuelle Gasdosierung benötigt eine hochgenaue jedoch gleichzeitig äußerst robuste Ansteuerung der Gasventile. Die Berechnung der Ventilöffnungsdauer muss dabei in Echtzeit zyklusbasiert erfolgen und auf veränderte Bedingungen der Ladeluft (Druck, Temperatur) als auch des Gases (Druck Temperatur) ebenso schnell reagieren. Mit Hilfe der im Rahmen dieses Förderprojekts entwickelten Regelungsstrategie konnte die geforderte Genauigkeit eingehalten werden.

Im Falle der Leerlaufdrehzahlregelung galt es, möglichst rasch die Zieldrehzahl zu erreichen, zugleich aber Drehzahlüberschwingen über die Toleranzgrenze hinaus weitestgehend zu vermeiden. Die Leerlaufdrehzahl muss anschließend bis zur erfolgreichen Synchronisierung innerhalb eines vorgegebenen Toleranzbandes gehalten werden. Geregelt wird die Drehzahl über das Zu- bzw. Abschalten der Gaszufuhr einzelner Zylinder. Die zugrundeliegenden Regelalgorithmen konnten am J920 erfolgreich validiert werden.

Um einen optimierten Motorbetrieb mit höchsten Wirkungsgraden und geringsten Emissionen zu erreichen, ist es notwendig, die Gasdosierung der einzelnen Zylinder derart zu steuern, dass die Verbrennung in den unterschiedlichen Zylindern möglichst gleich abläuft. Die am J920 umgesetzte Zylindergleichstellung ermöglicht, den Motor mit allen Zylindern näher an der Klopfgrenze und damit näher am Wirkungsgradoptimum zu betreiben. Mit den implementierten Algorithmen konnten die maximalen Abweichungen der Spitzendrücke vom Mittelwert deutlich gesenkt werden. Der Kalibrierungsaufwand bei Erstinbetriebnahme des Motors konnte ebenfalls deutlich reduziert sowie das System Motor für einen vollautomatischen Betrieb vorzubereitet werden.

Die Motorklopfüberwachung wurde am J920 erstmals bei einem Gasmotor von GE Jenbacher über Zylinderdrucksensoren realisiert. Die Auswahl der Filter und des zu beobachteten Frequenzbereichs erfolgte auf Basis der Untersuchungen am Einzylinder-Versuchsmotor. Das Drucksignal wird daher in diesem Bereich typischer Frequenzen gefiltert und ausgewertet, um klopfende Verbrennung von diversen akustischen Phänomenen einwandfrei trennen und zuverlässig diagnostizieren zu können. Parallel zur Überwachung der typischen Klopf Frequenzen wird der Spitzendruck jedes Zylinders überwacht, um bei Überschreiten eines in der Motorsteuerung hinterlegten Grenzwertes in erster Instanz die Leistung des Zylinders zu reduzieren bzw. bei weiterhin anhaltender Grenzwertüberschreitung den Motor abzuschalten. Weitere zu entwickelnde Funktionen werden in Zukunft auch die Erkennung von Verbrennungsaussetzern in einzelnen Zylindern erlauben.

2.2 Systemeinbindung

Der J920 wurde zur Vereinfachung von Transport, Aufstellung und Wartung modular ausgelegt. Das zentrale Motormodul wird durch das Generatormodul und das Auflade- und Kühlmodul ergänzt. Das Generator- und das Versorgungs (TCA) Modul (siehe Abb. 4) wurden im Rahmen der Systems Konstruktion ausgelegt und validiert.

Das Auflademodul enthält folgenden Komponenten:

- Gasversorgung
- Aufladung
- Motorkühlung
- Ölkühlung
- Blowbyabscheidung

Highlight des Auflademoduls ist die 2-stufige Aufladeinheit.

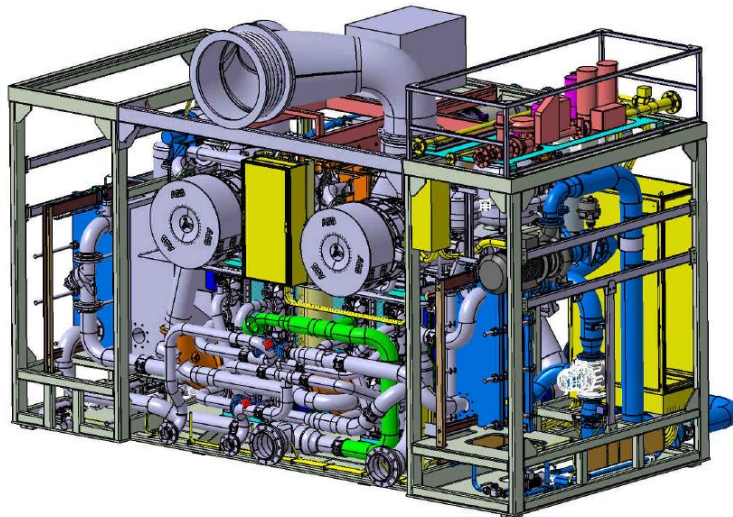


Abbildung 4: Versorgungsmodul des J920

Mit einer einstufigen Aufladung wären die notwendigen Verdichterdruckverhältnisse nur mit reduziertem Wirkungsgrad des Aufladesystems darstellbar. Daher fiel die Entscheidung zur Entwicklung der zweistufigen Aufladung als Basistechnologie, wie sie auch beim J 624 verwendet wird und ein großes Weiterentwicklungspotential besitzt.

Der Generator wurde für die Anwendung entwickelt und angepasst.

2.3 Prototypbeschaffung

Die Beschaffung und die Montage der Bauteile für den 1. Prototypen konnte 100% zeitgerecht abgeschlossen werden. Die Highlights im Projekt waren die Anlieferung und Fertigung der Hauptkomponenten, der Montagestart und die Anlieferung der fertig montierten Hauptkomponenten Motor (Abb. 5) und TCA Modul am Prüfstand.



Abbildung 5: Anlieferung des Motors zum Prüfstand

Um den ambitionierten Zeitplan halten zu können, musste die Beschaffung parallel zur Konstruktion gestartet werden. Die Projektrisiken konnten durch exakte Planung und gute Kommunikation erfolgreich mitigiert werden. Um einen Prototypen mit diesen Dimensionen bauen zu können, wurde er in zwei Abschnitte unterteilt – den Motor und das TCA Modul. Während das TCA Modul von Größe und Gewicht leichter umsetzbar und transportierbar war, war der Bau und Transport des Motors innerhalb des Werksgeländes auf Grund der außergewöhnlichen Dimensionen eine Herausforderung. So wurden die Komponenten, nach aufwendigen Transporten mittels Tiefladern (siehe Abbildung 5) u.a., erst im Prüfstand zusammengesetzt, was eine besonders genaue Planung in Bau und Ausführung erforderte, um das Risiko von Maßabweichungen zu minimieren.

2.4 Gemischbildungs- und Verbrennungsoptimierung

Ziel bei der Optimierung der Gemischbildungseinheit ist es, ein möglichst homogenes Gemisch zum Zündzeitpunkt im Brennraum darzustellen, um eine effiziente Verbrennung mit ausreichend großem Klopfabstand zu erreichen. Weiters sollte der Druckverlust über die Gemischbildungseinheit sowohl gasseitig als auch luftseitig minimal sein. Die Menge an Kraftstoff, welche im Ansaugrohr zurückbleibt, ist ebenfalls zu minimieren. Durch die Dynamik in den Ansaugrohren könnte restlicher Kraftstoff zu anderen Zylindern gelangen und dadurch die zylinderspezifischen Unterschiede ungünstig erhöhen.

Auf Basis der Ergebnisse aus der Vorauslegung mittels Simulationsmodellen wurden die aussichtsreichsten Varianten von Kolbenformen, Vorkammergeometrien und Gemischbildungsvarianten ausgewählt und für die experimentellen Untersuchungen am

Einzyylinder-Forschungsmotor vorbereitet. Zur Sicherstellung der Übertragbarkeit der Ergebnisse vom Einzyylinder-Forschungsmotor auf den Vollmotor wurde vorab das Ein- und Auslassröhrenwerk des Einzyylindermotors mittels 1D-Simulation berechnet. Zur Bestimmung der erreichbaren Motorfunktionswerte (Wirkungsgrad, Stabilität, Emissionen, Betriebsbereich, etc.) wurden ausgewählte Varianten am Einzyylinder-Forschungsmotor untersucht. Variiert wurden dabei die Kolbenform, Vorkammergeometrie und die Gemischbildungseinheit (PI). Aus diesen Untersuchungen wurde die optimale Motorkonfiguration bestimmt. Mit dieser Basiskonfiguration werden die gesetzten Ziele betreffend Wirkungsgrad, Emissionen und Betriebsbereich zum Projektende nahezu vollständig erreicht.

Im Rahmen des Projektes wurde eine Verbrennungsoptimierung für Sondergase an einem Einzyylinder-Forschungsmotor durchgeführt. Das grundsätzliche Ziel der Arbeiten bestand darin, Brennverfahren für ausgewählte Sondergase zu entwickeln, die bei maximaler Leistungsdichte minimale Emissionen (NO_x, CO, HC) und höchste Wirkungsgrade garantieren [8]. Für eine Potenzialabschätzung der erreichbaren Motorbetriebswerte und eine Voroptimierung der Verbrennungskonzepte wurden eigens entwickelte Simulationsmodelle eingesetzt. Die endgültige Bewertung der Motorfunktion wurde mit Hilfe von experimentellen Untersuchungen durchgeführt. Die bei der Verbrennungsoptimierung verwendete Methodologie ist in Abb. 6 dargestellt. Durch die Anwendung der 1D-Ladungswechselrechnung sowie der 0D-Motorprozesssimulation konnten Hub-/Bohrungsverhältnis, Verdichtungsverhältnis und Steuerzeiten vorausgelegt werden. Mit Hilfe der 3D-CFD-Methode erfolgte die Detailoptimierung der Gemischbildung sowie der Verbrennung und damit die Definition des für diesen Motor gewählten Saugrohreinblasekonzepts und der Brennraumgeometrie (Vorkammer und Hauptbrennraum).

Für den Austausch der für die jeweiligen Berechnungen notwendigen Randbedingungen war eine intensive Kopplung der 0D-, 1D- und 3D-Berechnungsmodelle notwendig, die über weitgehend standardisierte und automatisierte Prozesse realisiert wurde.

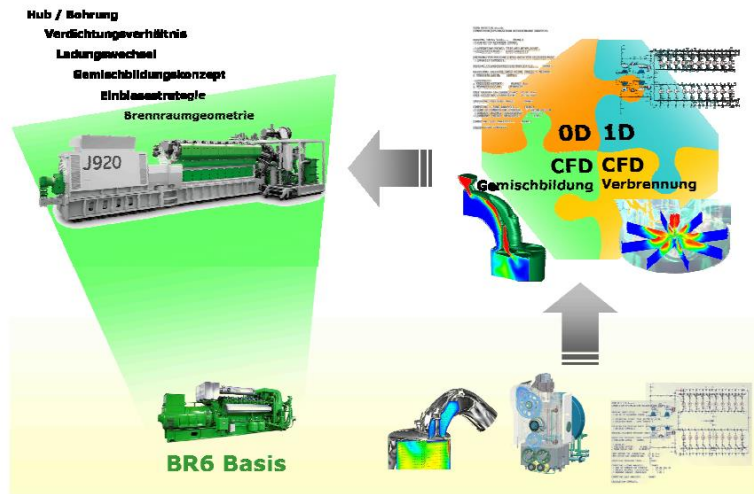


Abbildung 6: Übertragung des Verbrennungskonzeptes von BR6- auf den J920-Motor

Um die Qualität der Voraussagefähigkeit der Verbrennungssimulation zu bewerten, ist in Bild 7 ein Vergleich der Brennverläufe an der Volllast aus der 3D-CFD-Simulation und der Analyse einer am unten beschriebenen Einzylinder-Forschungsmotors durchgeführten Messung dargestellt. Die Simulation erfolgte mit dem 3D-CFD Code AVL FIRE. Es kann grundsätzlich eine sehr gute Übereinstimmung festgestellt werden. Damit konnten alle auf der Verbrennungsrechnung basierenden Optimierungsschritte bestätigt werden.

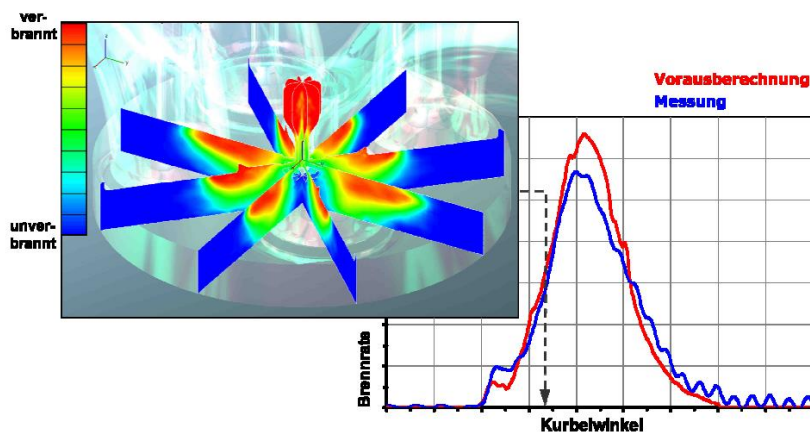


Abbildung 7: Vergleich vorausberechneter und gemessener Brennverlauf (Volllast)

Neben der Auslegung der Vorkammer und des Hauptbrennraums hat die Gemischbildungseinheit bei dem gewählten Konzept der Saugrohreninblasung eine entscheidende Bedeutung für Verbrennung und Klopfen. Grundsätzliches Ziel war die Erreichung einer möglichst homogenen Gemischverteilung im Zylinder zum Zündzeitpunkt bei einem vorgegebenen maximalen Überdruck der Gaszufuhr bezogen auf den Ladedruck zur

Minimierung der Verluste durch die Druckerzeugung. Die wesentlichen Einflussgrößen bestanden in der geometrischen Gestaltung des Luft- und Gaszufuhrtraktes und des Einblaseverlaufes (im Wesentlichen charakterisiert durch Öffnungszeitpunkt und Öffnungsdauer). In Abb. 8 sind die erzielten Ergebnisse für eine Basisvariante und eine optimierte Variante dargestellt. Die Bewertung der Homogenität erfolgte durch den Vergleich der Massenanteile im jeweiligen Lambda-Bereich. Bei der optimierten Variante liegen bereits 90% der Gemischmasse im definierten Zielbereich. Die Auswirkung der Gemischinhomogenitäten auf das Klopfverhalten ist in Abb. 9 dargestellt. Mit der optimierten Variante konnte das Klopfverhalten deutlich verbessert werden.

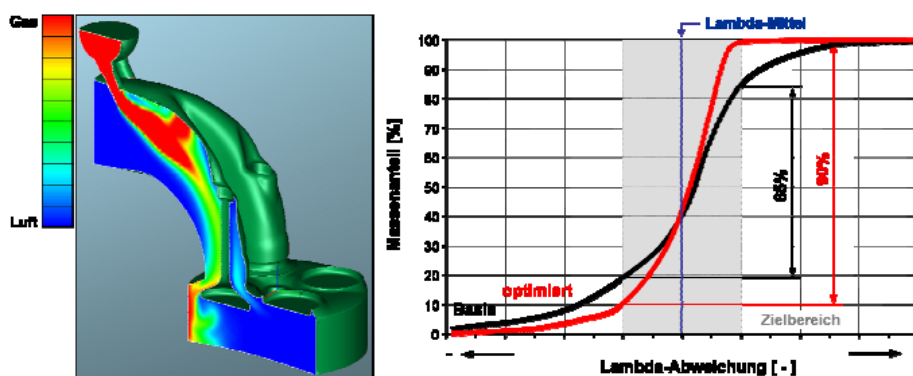


Abbildung 8: Bewertung der Gemischhomogenität

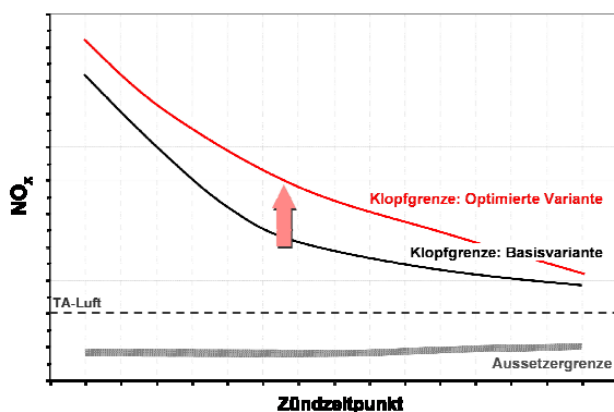


Abbildung 9: Auswirkung von Gemischinhomogenitäten auf das Klopfverhalten

2.5 Konstruktion und begleitende Berechnungen

Geplantes Ziel für den ersten Projektabschnitt war es, neben der Konzeptkonstruktion auch die Layoutkonstruktion inklusive aller begleitenden Berechnungen abzuschliessen. Die Layoutkonstruktion sollte auf dem in der Konzeptkonstruktion festgelegten Konzept aufsetzen und einen weiteren Detailierungsschritt darstellen. Zielsetzung der begleitenden

Auslegungsrechnungen war es, eine Konstruktion festzulegen bzw. diese abzusichern, welche die Zielwerte erfüllt. Diese Optimierungsrechnungen wurden in mehreren Iterationen mit konstruktiven Verbesserungen durchgeführt, bis schließlich sämtliche Bauteile die spezifizierten Anforderungen erfüllten.

Im Zuge der Layout Konstruktion konnten alle wesentlichen Motorbaugruppen im 3D CAD durchkonstruiert werden. In die Konstruktion flossen die Ergebnisse der Berechnungen (mechanische Berechnungen, CFD und FE Berechnungen) ein. Zudem wurde in intensiven Abstimmungen mit Lieferanten der Input seitens externer Zulieferer berücksichtigt.

Neben der eigentlichen Layoutkonstruktion der Motorbaugruppen war ein weiterer Schwerpunkt die Systemeinbindung von Generator und den Auxiliaries (Pumpen, Wärmetauscher usw.). Umfangreiche mechanische Auslegungs-berechnungen und FE Berechnungen zur Absicherung der Layoutkonstruktion wurden durchgeführt. Ein wesentlicher Schwerpunkt war dabei auch die FE-Absicherung von Pleuel, Zylinderkopf, Liner und Kurbelgehäuse.

Zur Bestimmung der thermischen Randbedingungen wurden für Zylinderkopf und Liner sowohl auf der Wasser- als auch auf der Gasseite CFD Simulationen durchgeführt. Als Vorbereitung für die Verbrennungsentwicklung am Prototypmotor wurden Sensoren für eine optische Sondermesstechnik konstruiert. Neben der Konstruktion der Sensoren wurde auch mit der Beschaffung der erforderlichen optischen Elemente (Linsen, Lichtleiter) begonnen. Die wesentliche Zielsetzung, die mit dieser optischen Sensorik verfolgt wird, ist, dass am realen Prototypmotor sehr detaillierte Informationen über den Verbrennungsvorgang (insbesondere im Fall von irregulären Verbrennungsvorgängen) gewonnen werden können. Dadurch kann zeitsparend und zielgerichtet die Verbrennung optimiert werden.

Zielsetzung innerhalb des nächsten Projektabschnitts war es, in einem iterativen Vorgehen mittels der FE- und CFD-Simulationen bzw. mittels detaillierter thermodynamischer Berechnungen das Layout Design weiter zu optimieren, so dass die hochgesteckten Ziele dargestellt werden können. Fokus dabei war es unter anderem, auch die angestrebten Zuverlässigkeits- bzw. Lebensdauerziele abzusichern bzw. eine ausreichende Robustheit zu erreichen.

Wesentlicher Schwerpunkt war die Durchführung der FE- und CFD Berechnungen. Die aus diesen Simulationen abgeleiteten konstruktiven Maßnahmen wurden im Zuge des Layout Design umgesetzt. Der Fokus der durchgeführten FE-Simulationen am Grundmotor lag bei

Zylinderkopf, Pleuel, Wassermantel und Zylinderbuchse. Für den Zylinderkopf wurden neben den klassischen Dauerfestigkeitsbetrachtungen auch die thermo-mechanische Schädigung analysiert und optimiert. Zielsetzung dabei war es, eine ausreichend hohe Anzahl von Start / Stop Zyklen (= Warm / Kalt Zyklen) sicherzustellen. Hohe thermische Zyklenzahlen ergeben sich insbesondere bei der „Peak Shaving“ (=Spitzenlastabdeckung) Applikation.

Neben den Simulationsrechnungen für den Grundmotor wurden auch umfangreiche Simulationen an der Aufladeeinheit durchgeführt. Schwerpunkt dabei war einerseits die strömungstechnische Optimierung (CFD-Simulation) und andererseits die Absicherung der Festigkeit (große Druckbehälter).

Für das gesamte Genset-Aggregat wurden Schwingungsanalysen durchgeführt. Die abschließenden thermodynamischen Simulationen hatten im Wesentlichen zum Ziel, die zylinderindividuellen Unterschiede in Luft- und Gasmenge zu minimieren. Zudem wurden Varianten für den Versuchsbetrieb festgelegt, um versuchstechnisch auftretende zylinderspezifische Unterschiede zu minimieren.

3. Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die wesentlichen Ergebnisse des Projektes lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Vollmotormessungen bestätigen den errechneten hohen Wirkungsgrad
- Inbetriebnahme des Vollmotorprüfstandes
- Inbetriebnahme der Einzylindermotoren-Prüfstände
- Die konsequente Anwendung und Interaktion von 0-, 1- und 3D Simulationsmodellen ermöglichte eine erfolgreiche Vorauslegung eines Motorkonzepts, das den hohen Anforderungen entsprechen kann.
- Die Wahl eines hohen Verdichtungsverhältnisses in Kombination mit einer abgestimmten Kolbenform und optimierter Vorkammer erlauben die Darstellung eines hohen effektiven Wirkungsgrads.
- Die günstige Positionierung der Gaszufuhr in das Saugrohr unterstützt sehr wesentlich die Homogenisierung des Luft/Gasgemisches was sich wiederum positiv in einem ausreichend hohem Klopfabstand zeigt.
- Das Ergebnis der Vorauslegung des Motorkonzepts stellt die Basis für die erste Anwendung am Vollmotor dar und ist auch Ausgangspunkt für die Weiterentwicklung des Konzepts hin zu höchsten Wirkungsgraden.
- Erfolgreicher Nachweis der Funktionalität der Kolbengruppe und des Ventiltriebs.
- Ermittlung der Belastungsgrenze der Pleuelgeometrie über den Pulsversuch und Optimierung der

Pleuelkonstruktion.

- Erfolgreiche Messung unter realen Betriebsbedingungen durch speziell entwickelte optische Messtechnik.
- Beeinflussung des realen Motorbetriebs durch die optische Messtechnik (keine Beeinflussung von Verbrennung, Klopfverhalten und Emissionen) sichergestellt.
- Berechnung der Temperaturen von Auslassventil und Vorkammerspitze mithilfe der Ergebnisse der optischen Messungen

Durch effektive Planung und konsequente, hochgradig parallele Projektausführung war es möglich innerhalb eines für ein Projekt dieser Größenordnung kurzen Zeitraumes den ersten Motor der neuen Motorenfamilie bis zum Prototypen voranzutreiben. Die hochgesteckten Ziele, im speziellen der el. Wirkungsgrad konnten in der Erstausführung nahezu erreicht werden, so zeigten erste Messungen mit der noch nicht optimierten Maschine Wirkungsgradwerte, die nur geringfügig unterhalb der Zielwerte lagen.

4. Ausblick und Empfehlungen

Das Potenzial von stationären Großgasmotoren ist trotz langjähriger, kontinuierlicher Entwicklung nicht ausgeschöpft [2]. Die intelligente Kombination innovativer Technologiebausteine mit der zweistufigen Aufladung als neuem Grundbaustein ermöglicht hierbei die Verschiebung bisheriger Grenzen hin zu höheren Mitteldrücken, höheren Wirkungsgraden und erweiterten Betriebsbereichen. Allerdings können diese Potenziale erst durch die simultane Optimierung von Ladungswechsel, Steuerzeiten, Brennverfahren, Gemischbildungs- und Regelungskonzepten verwirklicht werden. Der neue J920 demonstriert ein Design für einen elektrischen Wirkungsgrad von 48,7 % bei 9,5 MW Leistung und unter Einhaltung der TA Luft eindrucksvoll.

Die Validierung des Prototypenmotors und des ersten Pilotmotors wird vorangetrieben. Der 20 Zylinder Motor einer neuen, konsequent auf gasmotorischen Motorbetrieb ausgelegten Motorenbaureihe konnte im Projektzeitraum dargestellt werden. Die Entwicklung dieser neuen Motorenbaureihe sichert damit nachhaltig den Standort als Technologieführer für Gasmotoren ab. Weiterentwicklungen sind in Richtung weiterer Applikationen vorgesehen, z.B. in Richtung Dual Fuel sowie Einsatz des Motors bei mechanischen Direktantrieben zur Gaskompression. Aus dem geförderten Projekt gewonnene Erkenntnisse werden in zukünftige Projekte einfließen und dort weiterentwickelt werden.

5. Literaturverzeichnis

- [1] 1.AS NE2020 Leitfaden für die Projekteinreichung, Wien März 2008, Abrufbar im Internet, URL: <http://www.ffg.at/content/ne-2020-vorlagen-berichtslegung>
- [2] Trapp, C; Klausner, J.; Schaumberger, H; Haidn, M.; Lang, J.: Der Gasmotor der Zukunft - innovative Brennverfahren und Hochdruckaufladung für höchste Wirkungsgrade. CIMAC World Congress 2010, Bergen
- [3] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft), Internetfassung, 2002, S. 95 ff. URL: <http://www.taluft.com/taluft20020730.pdf>, Stand: 30.07.2010
- [4] Gothenburg Protocol: Protocol to the 1979 convention on long-range transboundary air pollution to abate acidification, eutrophication and ground-level ozone, Gothenburg, 1999, Abrufbar im Internet, URL: http://www.unece.org/env/lrtap/multi_h1.htm, Stand: 30.07.2010
- [5] Council of the European Union: Interinstitutional File: 2007/0286 (COD), Brüssel, 2009, Annex V S. 14
- [6] Environmental Protection Agency: Standards of Performance for Stationary Compression Ignition Internal Combustion Engines; Final Rule, in Federal Register 71 (11. July 2006), S. 39154 ff., Abrufbar im Internet, URL: <http://www.epa.gov/ttn/atw/nsps/cinsps/cinspspg.html>, Stand: 30.07.10
- [7] Wimmer, A.; Redtenbacher, C.; Trapp, C.; Klausner, J.; Schaumberger, H.: „Aktuelle Herausforderungen bei der Entwicklung von Brennverfahren für Großgasmotoren“, 1. Rostocker Großmotorentagung, Rostock, September 2010.
- [8] Trapp, C; Laiminger, S.; Chvatal, D.; Wimmer, A.; Schneßl, E.; Pirker, G.: „Die neue Jenbacher Gasmotoren-Generation von GE – mit zweistufiger Aufladung zu höchsten Wirkungsgraden“, 32. Internationales Wiener Motorensymposium 2011, Wien
- [9] Chmela, F., Dimitrov, D., Pirker, G., Wimmer, A.: „Konsistente Methodik zur Vorausschätzung der Verbrennung in Kolbenkraftmaschinen“; MTZ 67 Nr. 06, 2006
- [10] Chmela, F.; Pirker, G.; Dimitrov, D.; Wimmer, A.: „Globalphysikalische Modellierung der motorischen Verbrennung“. - in: „Simulation und Aufladung von Verbrennungsmotoren“. Seite 67 – 93, Springer Verlag, Berlin, 2008.
- [11] Schneßl, E.; Pirker, G.; Wimmer, A.: „Optimierung von Brennverfahren für Sondergasanwendungen auf Basis Simulation und Versuch am Einzylinder- Forschungsmotor“, MTZ-Konferenz „On-/Off-Highway Engines“, Friedrichshafen, November 2009.

6. Anhang

N/A