



ehemals: Fachhochschule (FH)
heute: Hochschule für angewandte Wissenschaften (HAW)

MWM Planertage 2017

Numerische Werkzeuge in der Brennverfahrensentwicklung von Erdgasmotoren zur Einhaltung zukünftiger Stickoxidgrenzwerte



Prof. Dr.-Ing. Maurice Kettner
Institut für Kälte-, Klima- und Umwelttechnik (IKKU)
Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft

maurice.kettner@hs-karlsruhe.de

Tel. 0721 925 1845

www.hs-karlsruhe.de/ikku/motorentchnik/



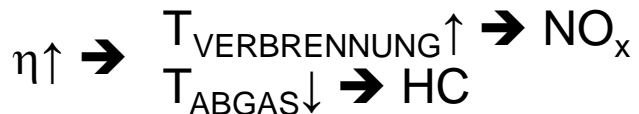
Der Verbrennungsmotor steht egal ob im Fahrzeug, Schiff oder als Kraftwerksantrieb unter „Beobachtung“ der Öffentlichkeit!!

Wenig fachlich differenzierte Berichterstattung und (politische) Diskussion!

Der Gasmotor hat (noch immer) den Ruf als sauberer Antrieb, da rußfrei und geringe CO₂.

Trotzdem gibt es auch hier insbesondere bei Magermotoren u.a. 2 große Herausforderungen:

- NO_x
- HC (insb. Methanschluß)



Diesel-Affäre

38.000 Todesfälle durch erhöhten Stickoxid-Ausstoß

Stickoxide sind ungesund, für Diesel-Fahrzeuge gelten deshalb Grenzwerte - die in den vergangenen Jahren zum Teil nicht eingehalten wurden. Forscher haben jetzt abgeschätzt, wie viele Menschen deshalb vorzeitig verstorben sind.

Was geht uns der „VW-Skandal“ an?



Auspuff eines Dieselfahrzeugs



Montag, 15.05.2017 17:28 Uhr

Drucken Nutzungsrechte Feedback

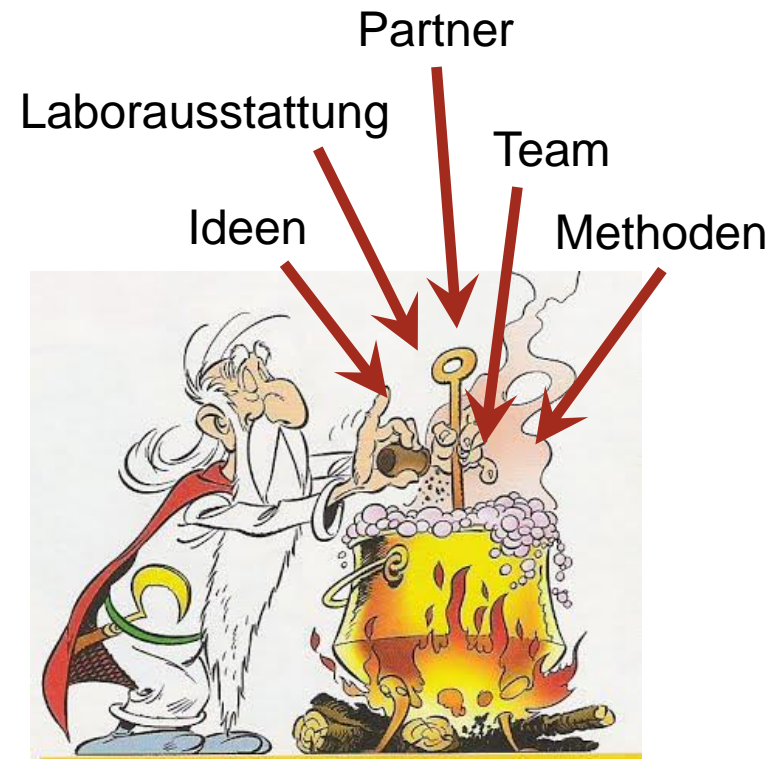
Rund 38.000 Menschen sind einer Hochrechnung zufolge wegen nicht eingehaltener Abgasgrenzwerte bei Dieselfahrzeugen allein im Jahr 2015 vorzeitig gestorben. 11.400 dieser Todesfälle entfallen auf die EU, berichtet ein Forscherteam um Susan Anenberg von der Organisation Environmental Health Analytics (LLC) in Washington. Die Gesamtzahl vorzeitiger Todesfälle durch Stickoxide aus Dieselabgasen lag demnach für die weltgrößten Automärkte bei 107.600.



Inhalt

1. Einleitung
2. Simulationsgrundlagen
3. Optimierungsstudie 4-Zylinder-Gasmotor
 - a. Ladungswechseloptimierung
 - b. Verdichtungsanhebung
 - c. Abgasrückführung
4. Zusammenfassung und Ausblick

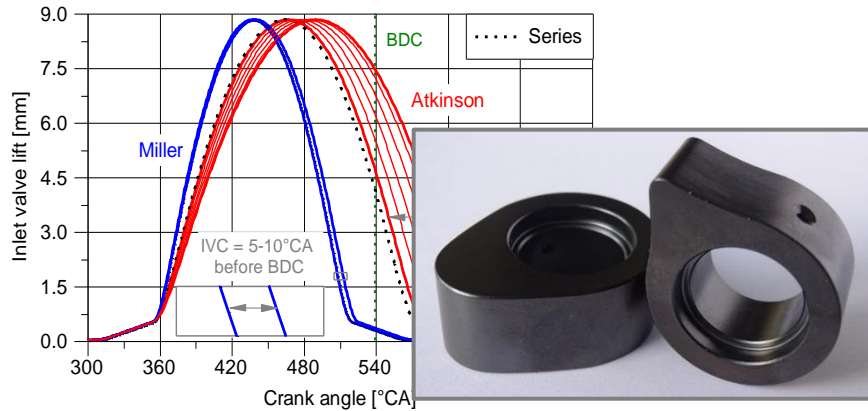
Zutaten für die Gasmotorenforschung



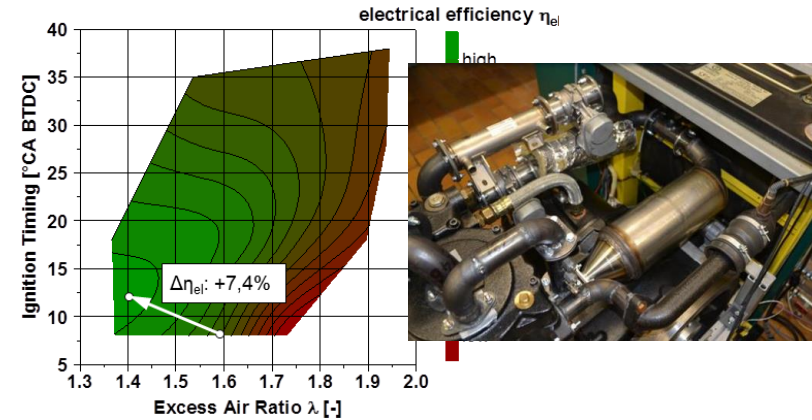


Forschungsbereich Motorentechnik

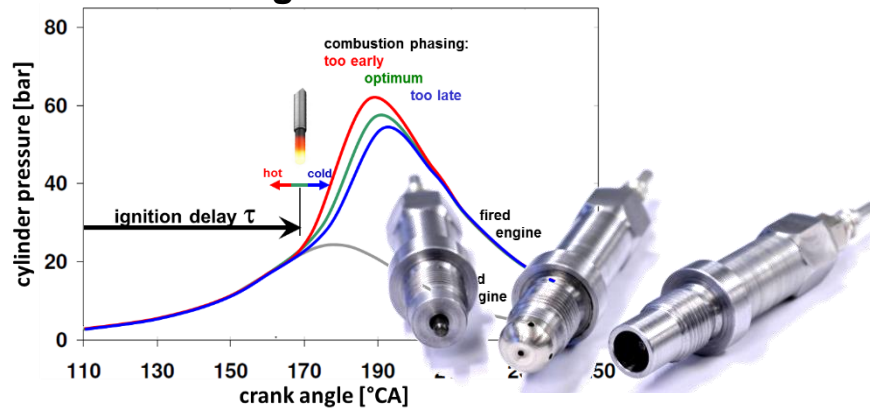
Miller-Verfahren für Saugmotoren



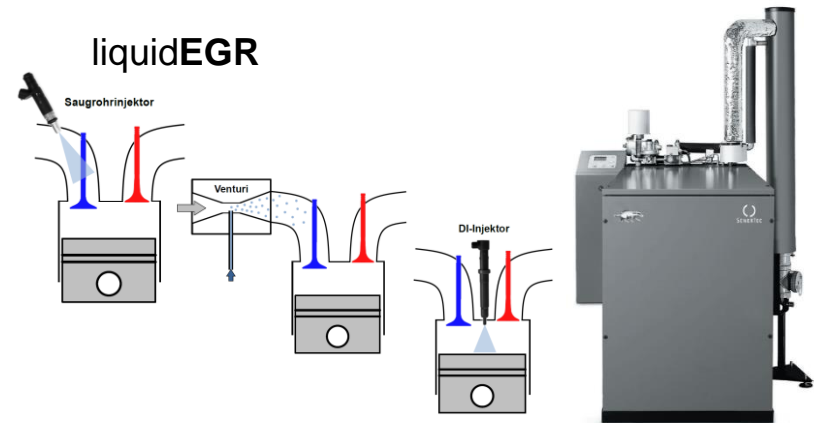
NO_x Speicherkatalysator



Hot Surface Ignition - HSI



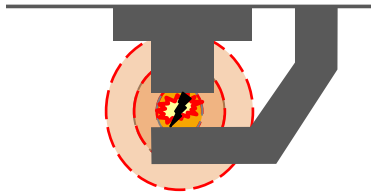
liquidEGR



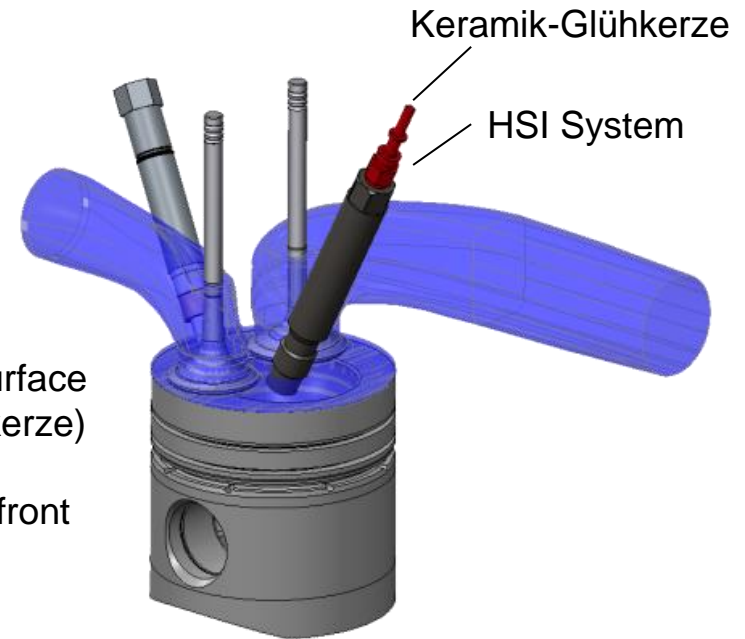
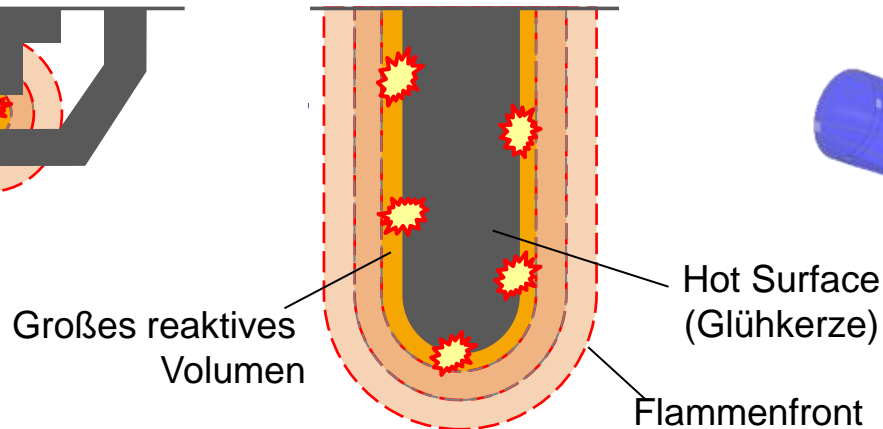


Hot Surface Ignition HSI

Konventionelle
Funkenzündung



Hot Surface Ignition

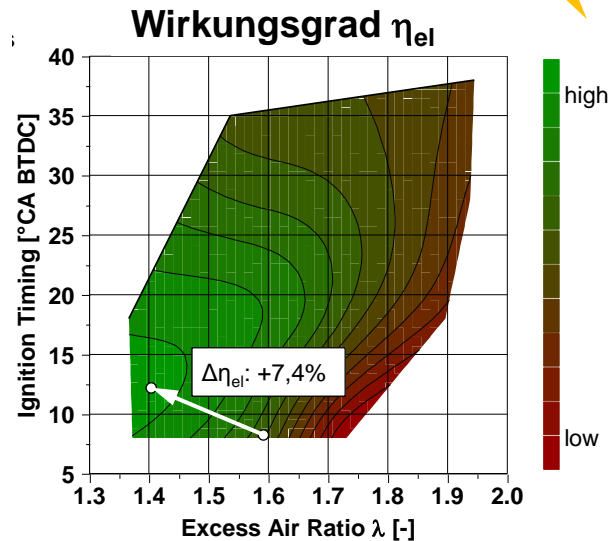
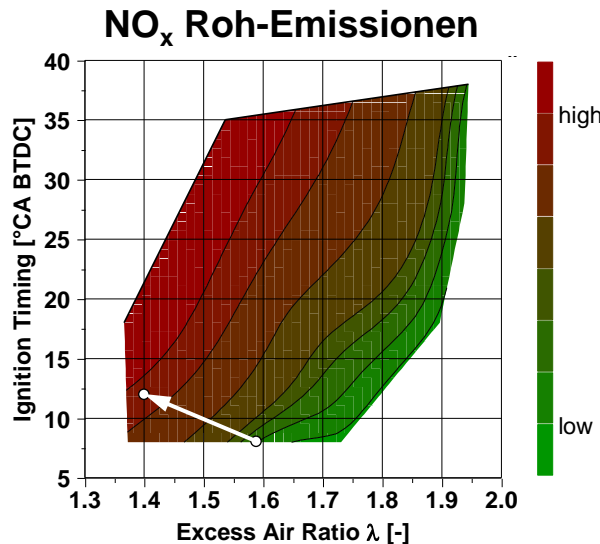
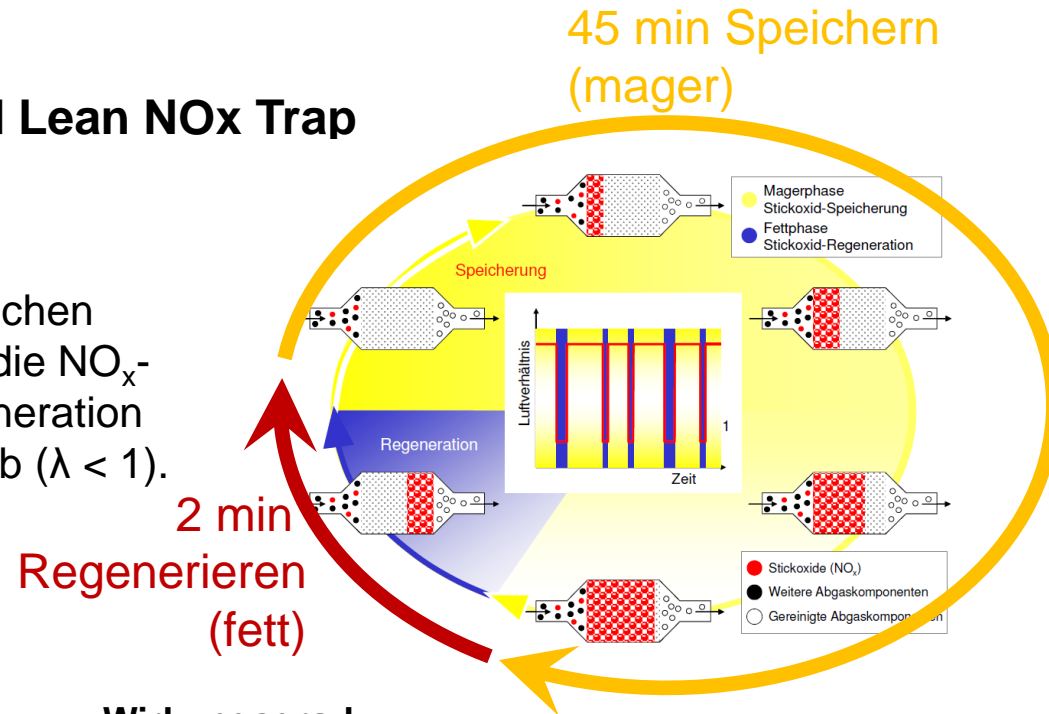


- Ziel: Zündsystem ohne funkenerosiven Verschleiß
- intensivere Entflammung im Vergleich zur konventionellen Funkenzündung
- chemische Reaktion ist von der Oberflächentemperatur abhängig
→ „Zündzeitpunkt“ wird durch die Oberflächentemperatur gesteuert



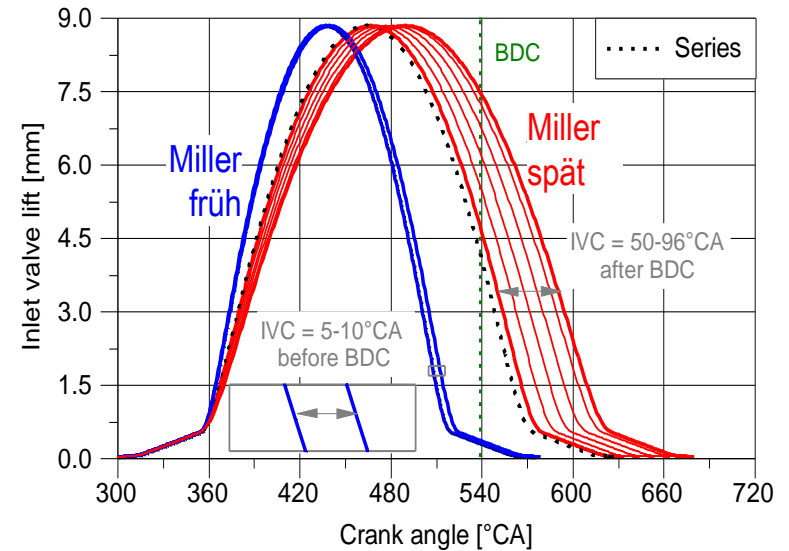
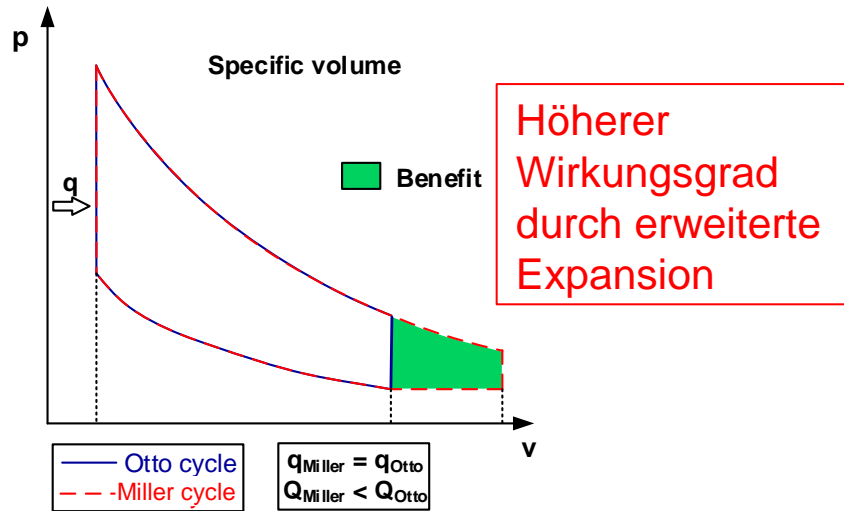
I-LeNT - Ion current controlled Lean NO_x Trap

- Magerbetrieb: ~~3-Wege-Katalysator~~
- Idee: Verwendung eines handelsüblichen PKW-NO_x-Speicherkatalysators für die NO_x-Einlagerung im Magerbetrieb. Regeneration durch unterstöchiometrischen Betrieb ($\lambda < 1$).

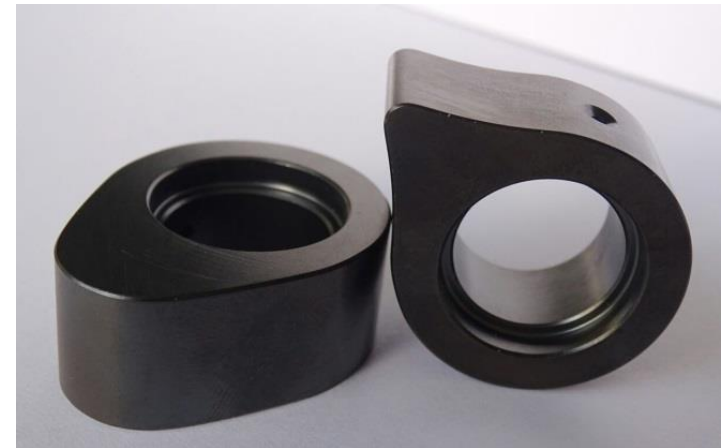
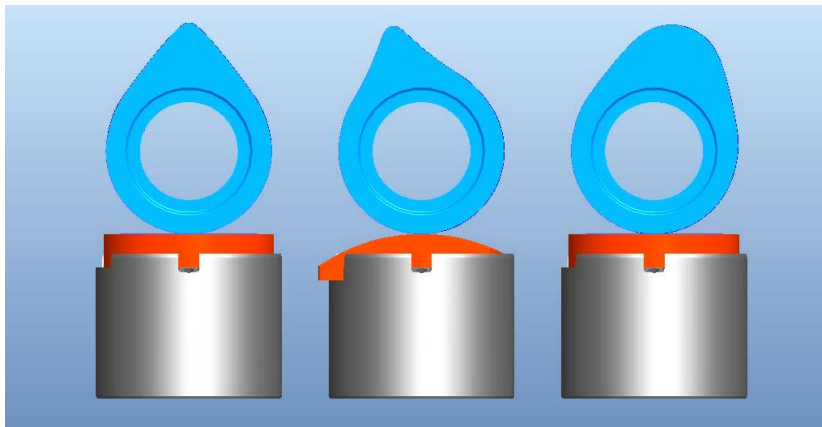




MillerEGR: Miller-Steuerzeiten für Erdgas-Saugmotoren



Serie Miller früh Miller spät





liquidEGR

Zielsetzung:

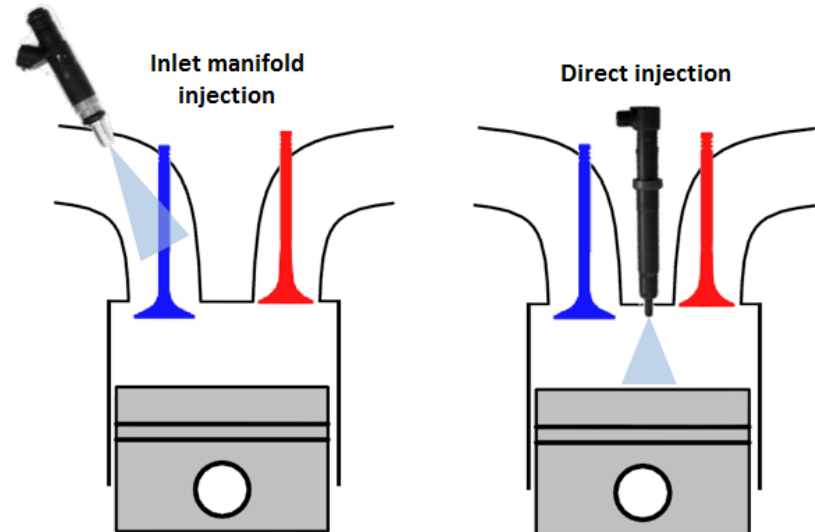
- Senkung der NO_x -Emissionen bei Erdgas-Magermotoren
- Wirkungsgradsteigerung bei Erhalt der Systemleistung

Grundlagen:

- Direkt- oder Saugrohreinspritzung von Abgaskondensat
- Senkung der Verbrennungstemperatur; Reduktion von NO_x und Klopfneigung
- Wirkungsgradsteigerung durch Anhebung des Verdichtungsverhältnisses

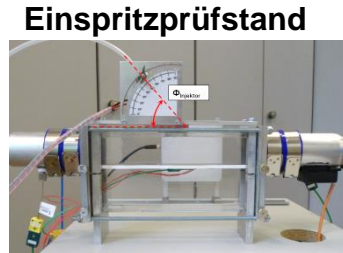


Abgas-Kondensator





Zündungsprüfstand



Einspritzprüfstand



3 Erdgas-Motor-Prüfstände



ABB Abgas-Analyse



Verbrennungsbombe



Ionenstromsensor



Flowbench



Ansaugluft-Konditionierung

Forschungsbereich KWK / Motorentchnik

Mit Fokus auf:

- Emissionen
- Wirkungsgrad
- Leistung

Drittmittel: ca. 350.000 €/Jahr

- 8 wiss. Mitarbeiter (4 Doktoranden)



Druckindizierung HD/ND (AVL und Dewetron)

Gaschromatographie

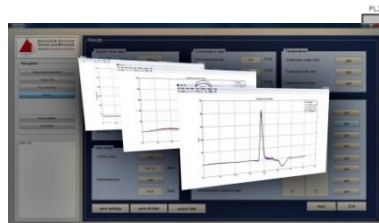


Wasserstoff-Elektrolyseur

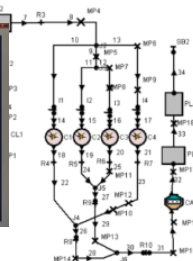
Real-Time-ECU



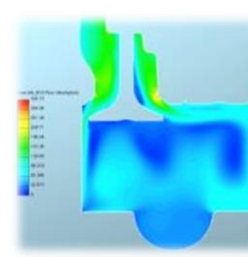
Statistische Versuchsplanung



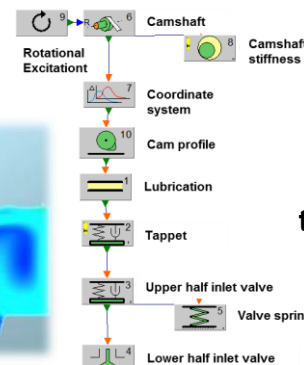
CYPRAN
CYlinder PResure
ANalysis



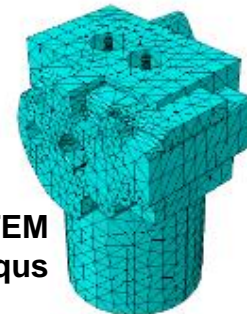
1D-CFD
AVL BOOST



3D-CFD
AVL FIRE



3D-MKS
AVL Excite

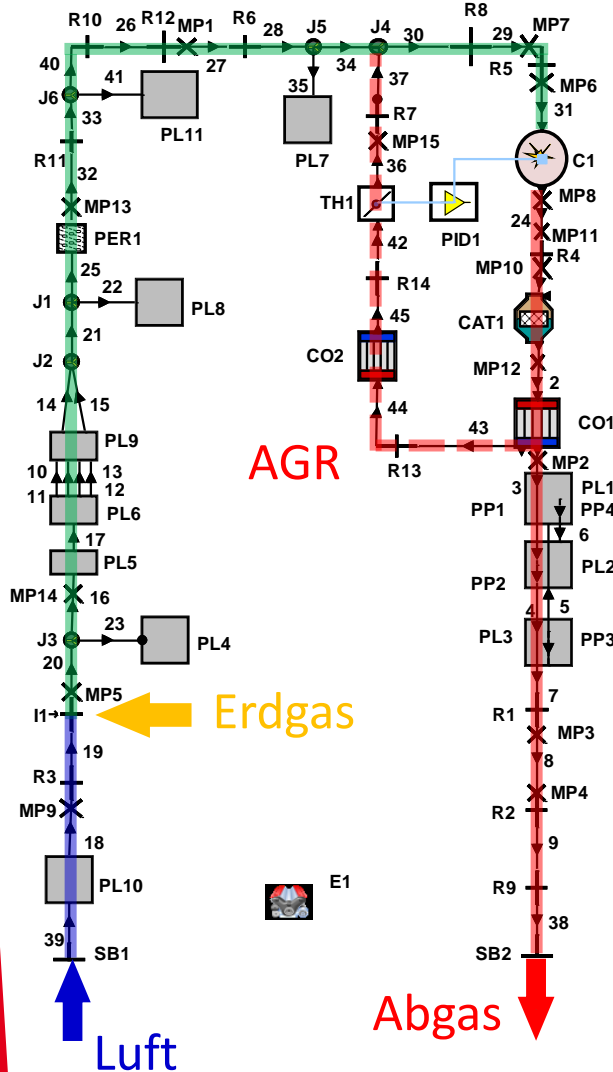


therm. FEM
Abaqus



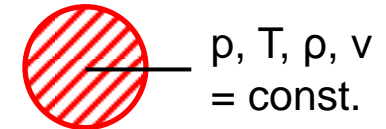
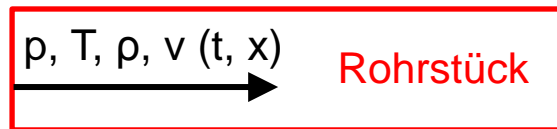
Kooperationsvertrag

1D-CFD Motorprozesssimulation - Grundlagen



- Abbildung des Motors als 1D-Modell in Form von Rohrstücken, Hohlräumen und Zylinder(n)
- Berechnung von Druck, Temperatur, Dichte und Geschwindigkeit als Funktion der Zeit und des Ortes

Querschnitt

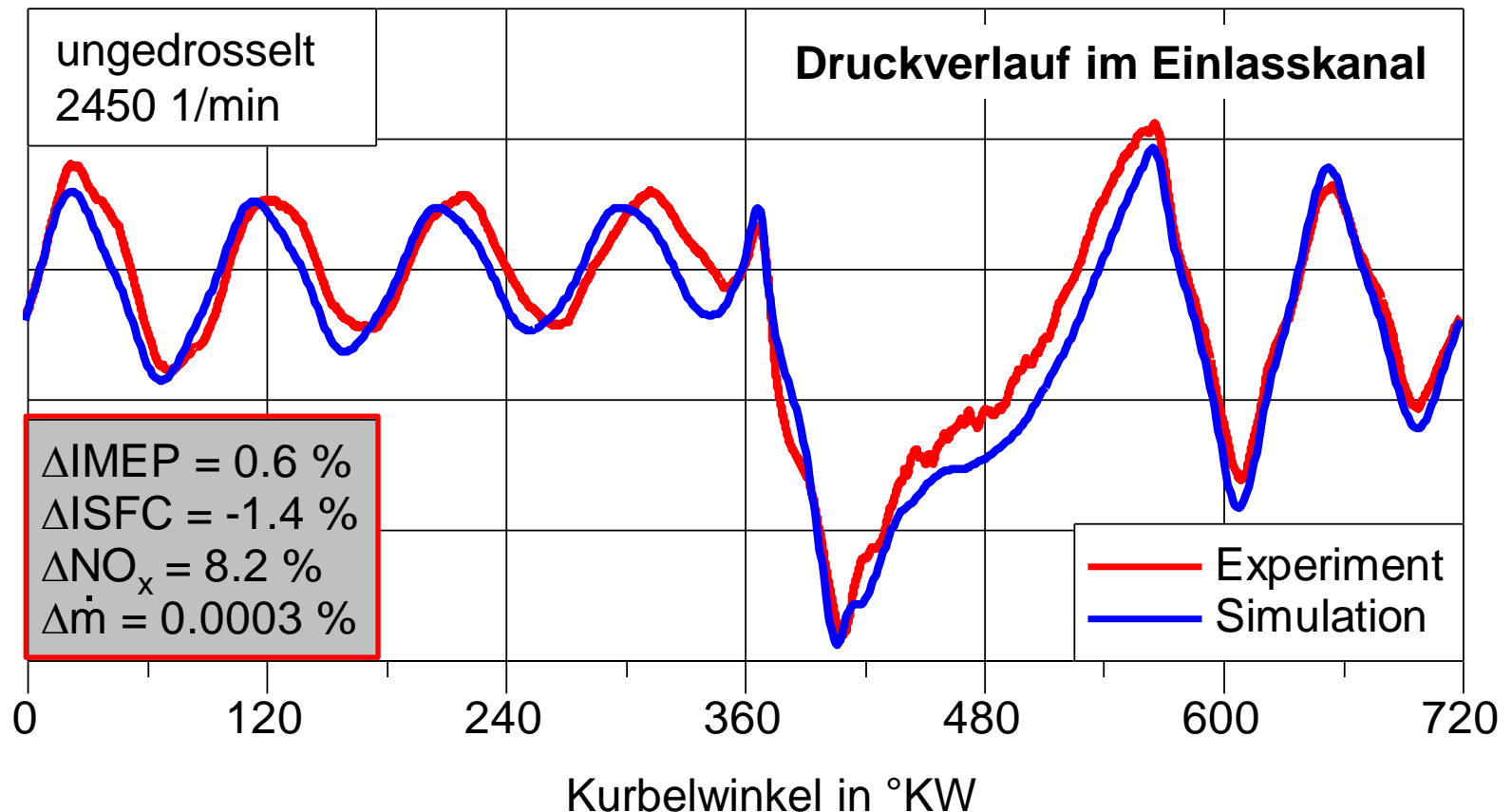


- Berechnung des Ladungswechsels unter Berücksichtigung der während des Motorbetriebs auftretenden Druckwellen
- Bestimmung motorischer und thermodynamischer Größen zu jedem Zeitpunkt an jedem Ort (entlang des Strömungspfad)
- Simulation durch „beliebige“ Variationen auf Basis des physikalisch abgestimmten Modells



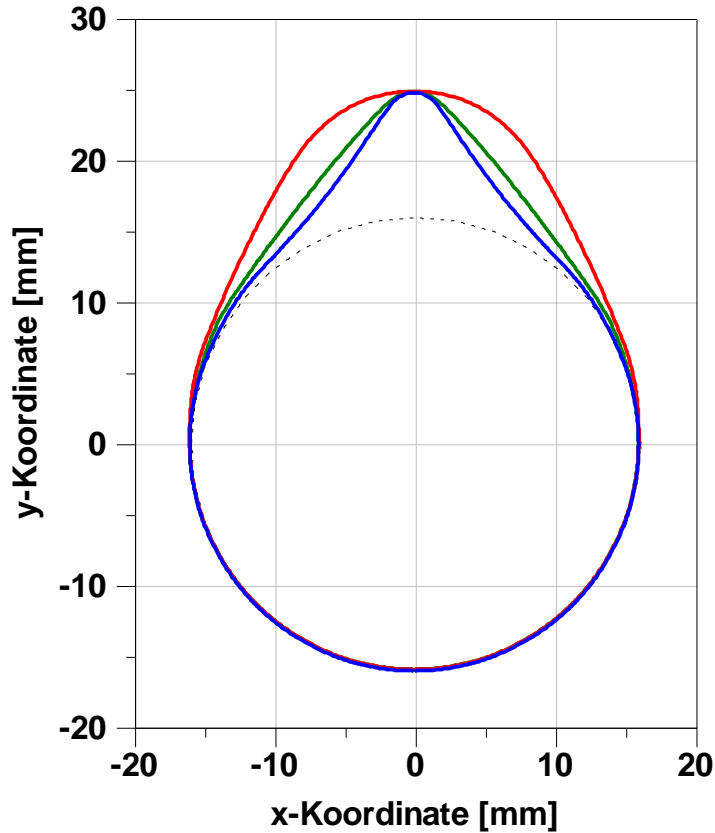
1D-CFD Motorprozesssimulation - Grundlagen

Modellvalidierung des Referenz-Setups im Referenzbetriebspunkt;
erfordert genaue Messdaten: Niederdruck- und Hochdruckindizierung,
Massenströme, Temperaturen, ...)



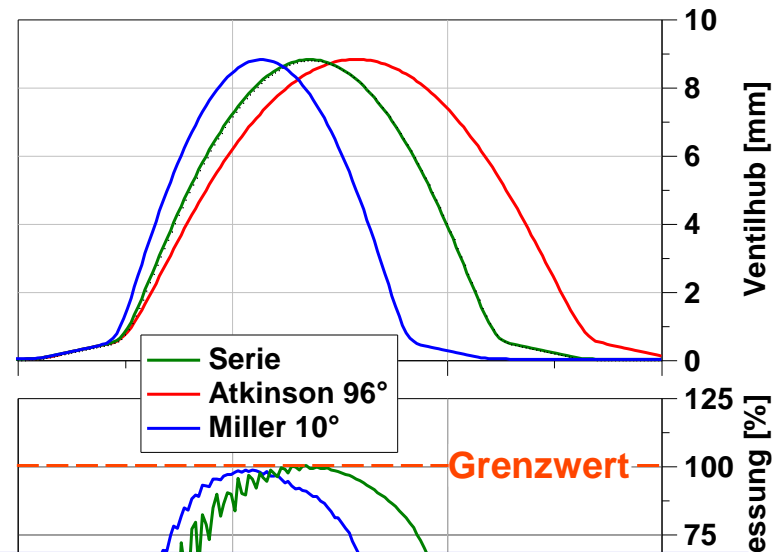


Mehrkörpersimulation - Workflow

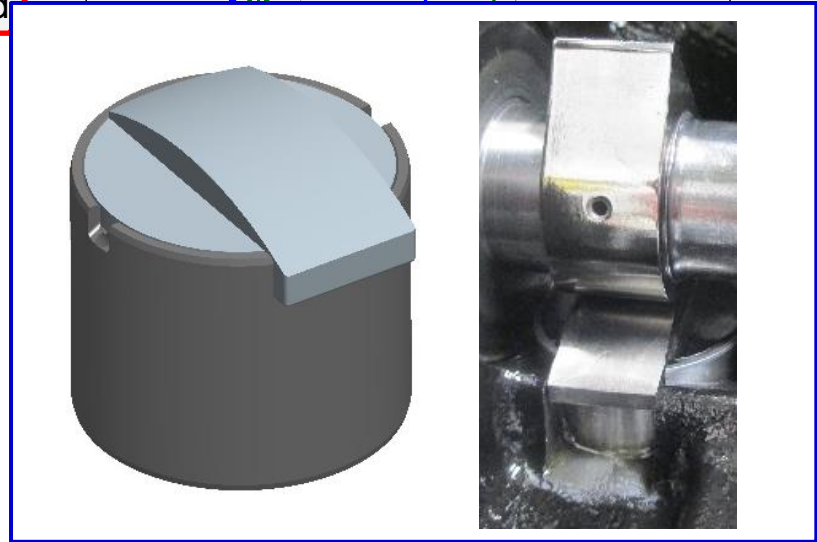


Zeit

System-
verhalten
Schleifkoord



→ Ballige Ausführung des Nockenfolgers bei Miller-Steuerzeiten

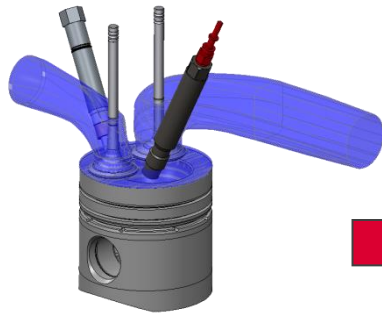


Ventihub [mm]
Herzse Pressure [%]



3D-CFD Ladungswechselsimulation - Workflow

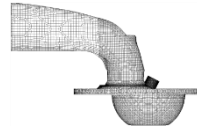
1 – CAD



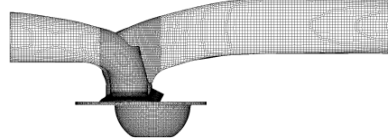
- Ableiten des detaillierten Strömungsvolumens anhand von CAD-Daten (Brennraum, Vorkammer,
- STL-Export für erf. Simulationsintervalle

2 – STL IMPORT

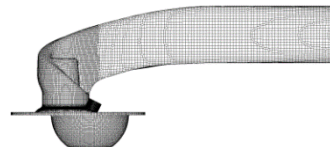
Ausschiebetakt
(-40 bis -16 °KW n. LOT)



Ventilüberschneidung
(-16 bis -3 °KW n. LOT)



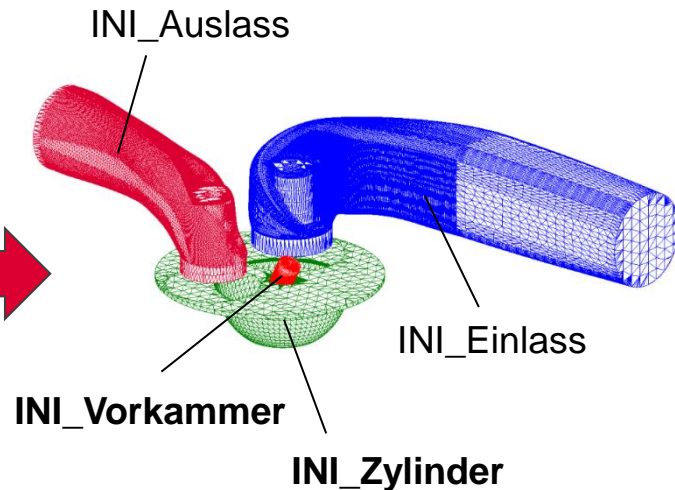
Ansaugtakt
(-3 bis 226 °KW n. LOT)



Komp./Exp.-Takt
(226 bis 505 °KW n. LOT)



3 – SELECTIONS / REFINEMENTS

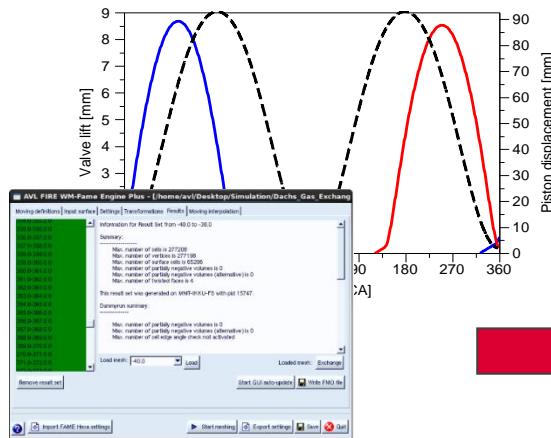


U.a.:

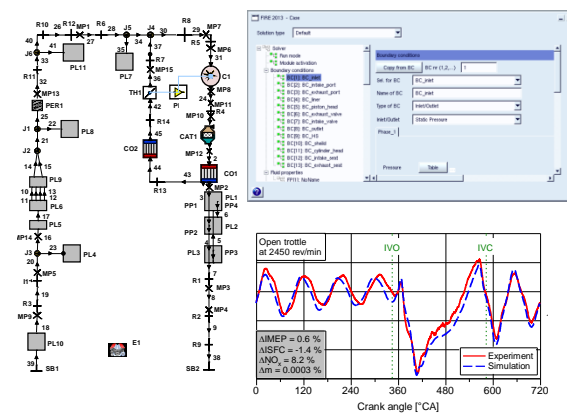
- Definition der Initialisierungsvolumina (v_{INI})
- Definition der „refinements“ (Selections für Netzverfeinerung)
- Definition der „boundary conditions“ (Selections für Randbedingungen)

3D-CFD Ladungswechselsimulation - Workflow

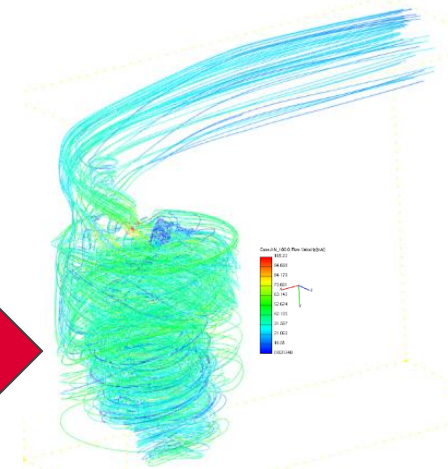
4 – MOVING MESH



5 – SIMULATION



6 – DATA EVALUATION



- Ventilkurvenimport
- Definition der Kurbeltriebgeometrie
- Erzeugen des bewegten Rechengitters mittels FEP (Fame Engine Plus)

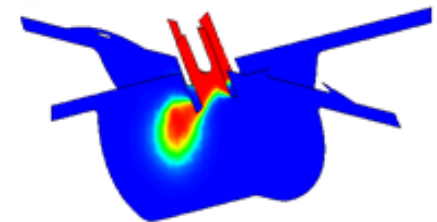
→ 180.000 – 800.000 Zellen

U.a.:

- Definition der Randbedingungen (BC) und Initialisierungsparameter im SSF
- BC für Einlass und Auslass aus abgestimmtem **AVL Boost**-Modell
- Definition von Kraftstoff / λ / AGR

→ Rechenzeit (12-Kern):ca. 3 Tage

- 2D-Daten aus case-file
- 2D/3D-Farbplots



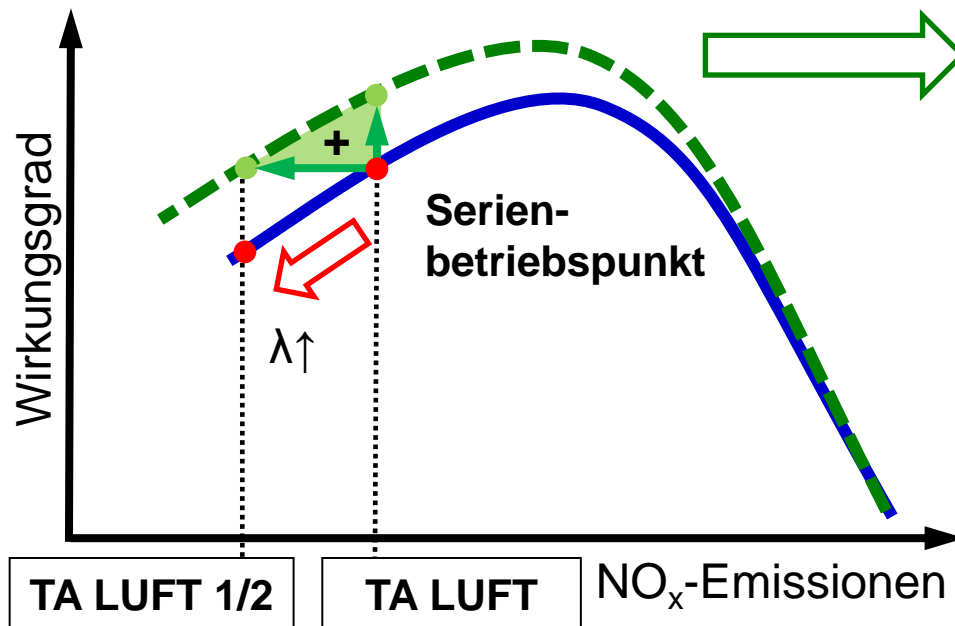
→ z.B. Flammenfortschritt HSI über ECFCM-3z-Modell



Motivation

Kleine Gasmotoren ($P_{el} < 50 \text{ kW}$) arbeiten überwiegend homogen mager
→ hoher Wirkungsgrad + niedrige NO_x (500 mg/m_N^3) + geringe thermische Bauteilbelastung

Aber: Verschärfung der NO_x Emissionen in 2018 in EU* $\approx 250 \text{ mg/m}_N^3$ ($< 50 \text{ kW}_{el}$)



Alternative Motorkonfiguration?

Homogener Magerbetrieb

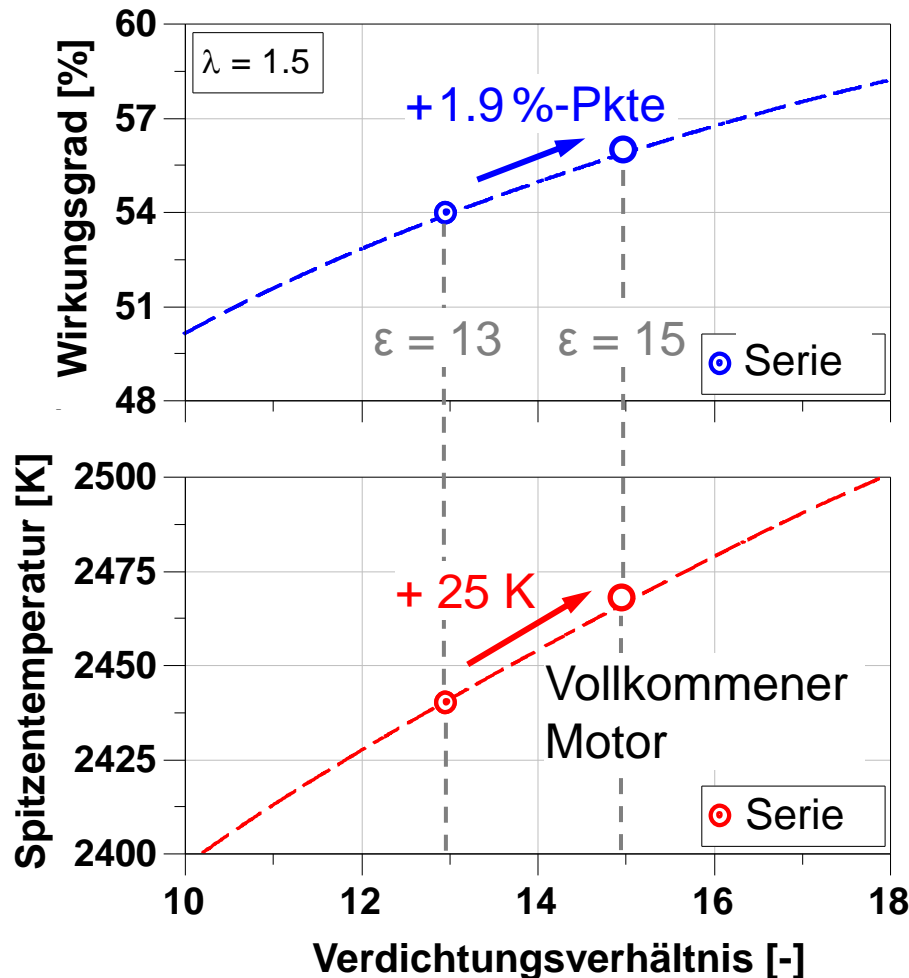
+ Verdichtungsanhebung

+ Ladungswechsel-Optimierung

+ Abgasrückführung



Primärmaßnahme: Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses → 0D-Simulation (vollkommener Motor – Gleichraumverbrennung)

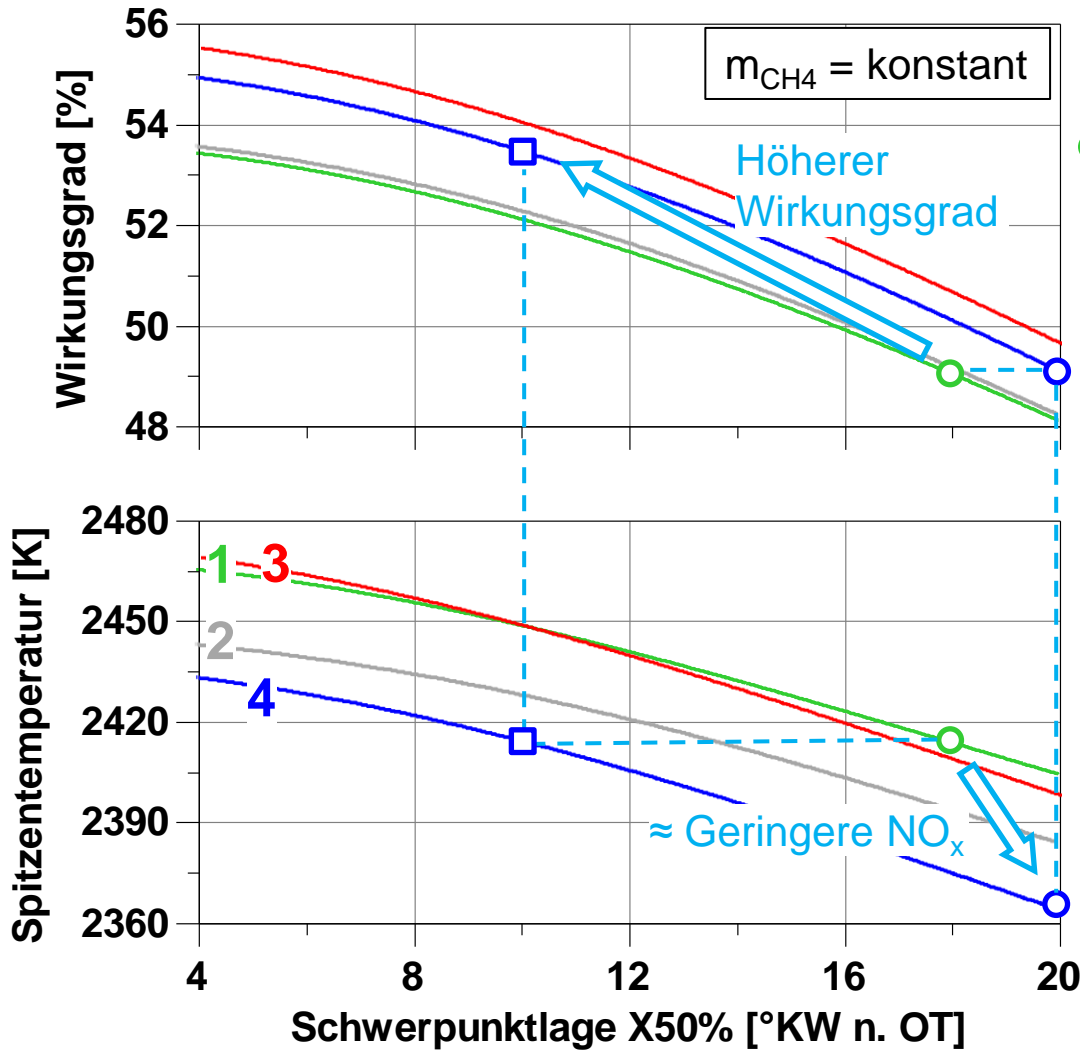


- Verdichtungsanhebung
 - Wirkungsgradsteigerung
 - Zunahme Verbrennungsspitzentemperatur
 - Höhere Klopfneigung
 - Höhere NO_x -Emissionen
- Temperatursenkende Maßnahmen:
 - Prozessstarttemperatur
Restgasverringern durch Ladungswechsel-Optimierung
 - Verbrennungstemperatur
Abgasrückführung mit hoher spezifischer Wärmekapazität c_v



Ansatz: Maßnahmen-Paket

→ 0D-Simulation (vollkommener Motor – Gleichraumverbrennung)



1. Serie: $T_0 = 313 \text{ K} / \varepsilon = 13$

○ Serienbetriebspunkt

$$\lambda = 1.5 / X50\% = 18 \text{ °KWnOT}$$

2. Optimierter LW.: $T_0 = 298 \text{ K}$

$$\eta \uparrow + T_{\max} \downarrow$$

3. Verdichtungsanhebung: $\varepsilon = 15$

$$\rightarrow \eta \uparrow + T_{\max} \uparrow$$

4. Zugabe AGR: $x_{EGR} = 20 \%$

$$c_v \uparrow \rightarrow T_{\max} \downarrow$$

$$\kappa \downarrow \rightarrow \eta \downarrow$$



Gasmotor Hoeckle HMG 434S

Brennverfahren

Gemischansaugend,
homogen mager

Nennleistung

39 kW

Zylinder

4

Hubvolumen

4.9 l

Verdichtungsverhältnis

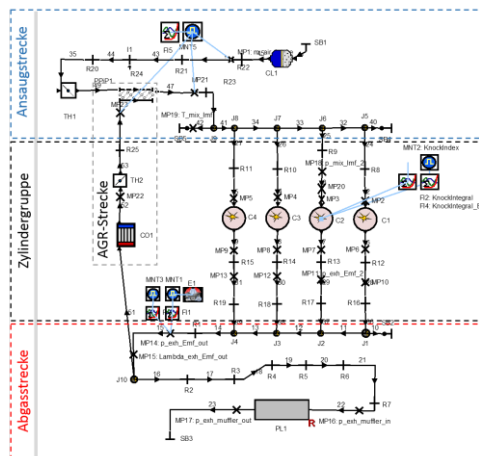
13.3:1

Nenn Drehzahl

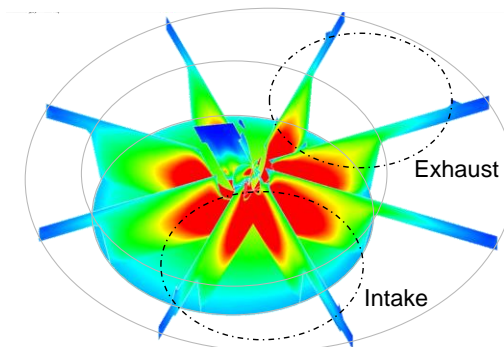
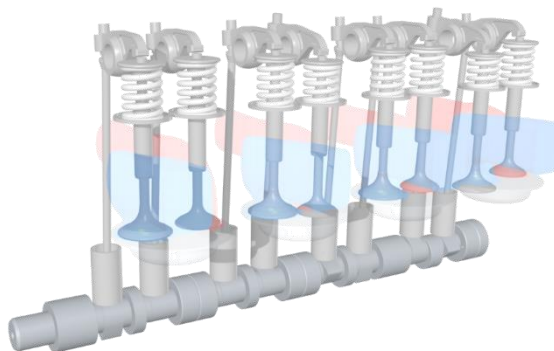
1500 1/min



1D-CFD Simulation

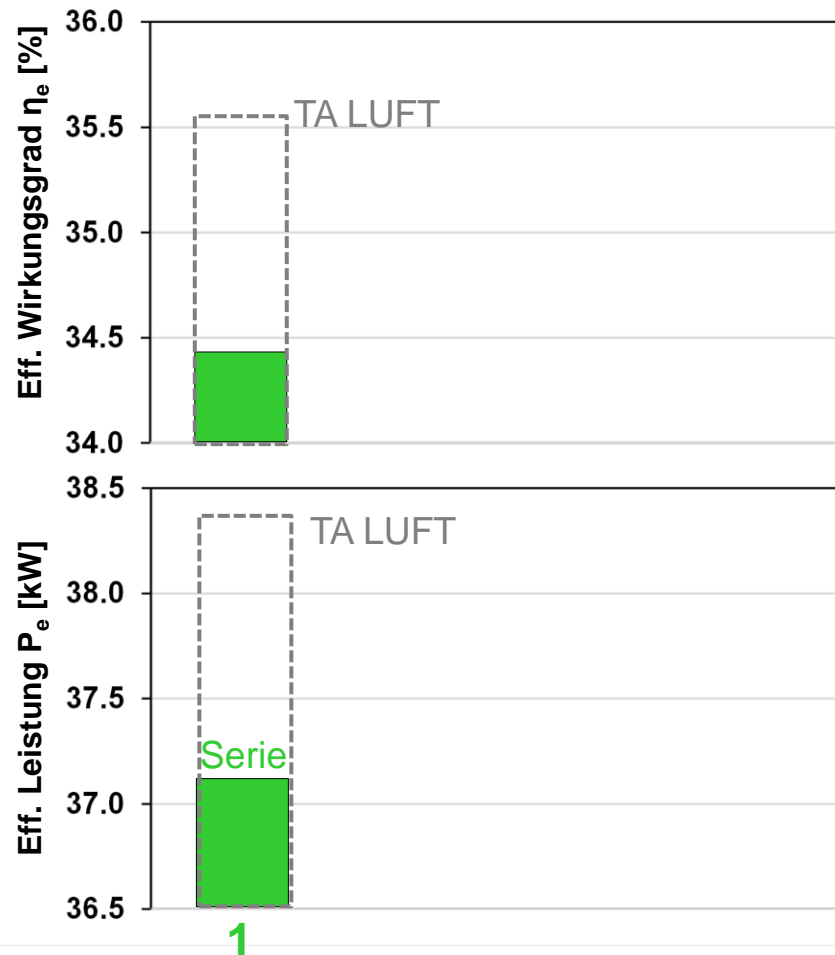


MKS-Ventiltrieb-Modell 3D-CFD LW-Berechnung





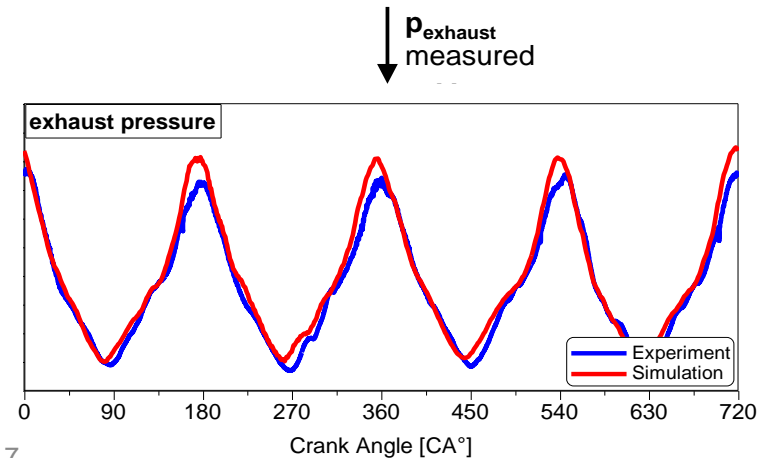
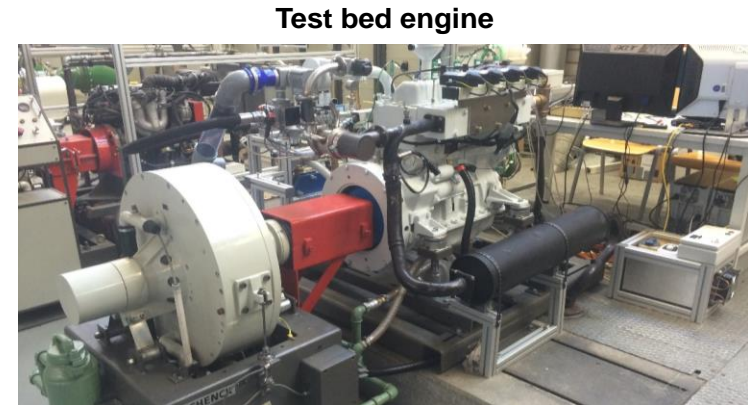
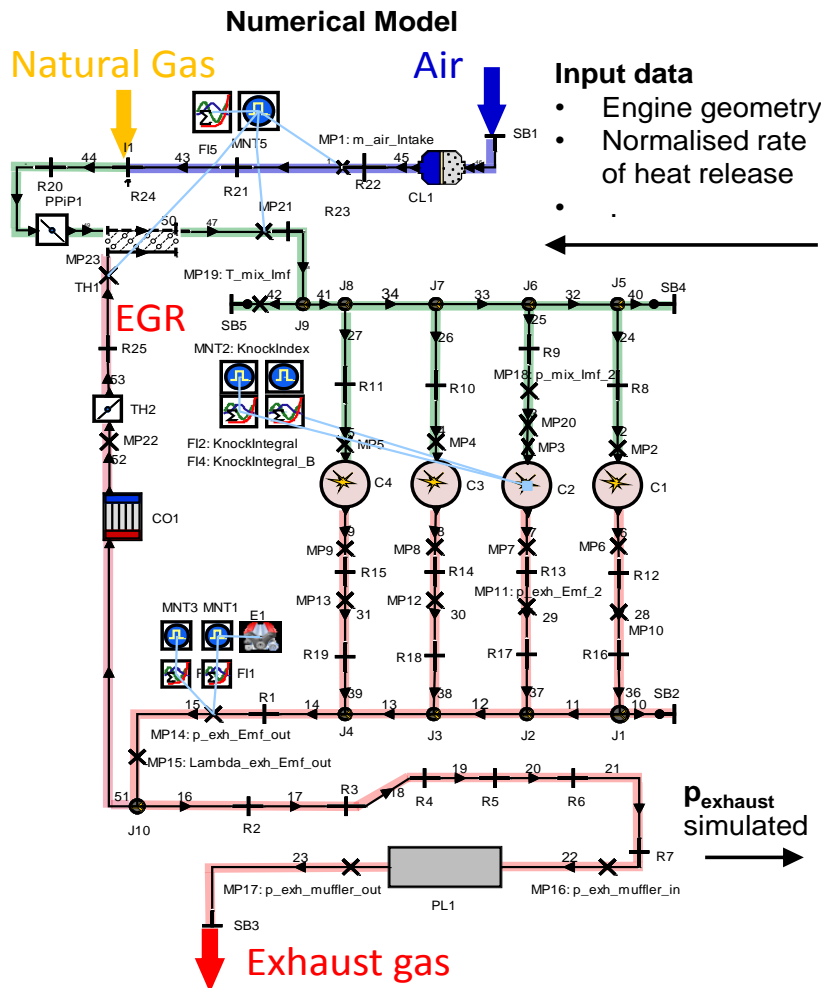
Ergebnisse bei $\text{NO}_x = 250 \text{ mg/m}_N^3$ (50 %TA-Luft)



1. Serie: Hohes λ and spätes X50% zur Einhaltung von 250 mg/m_N^3
 $\rightarrow \eta_e = 34.4 \% P_e = 37.1 \text{ kW}$

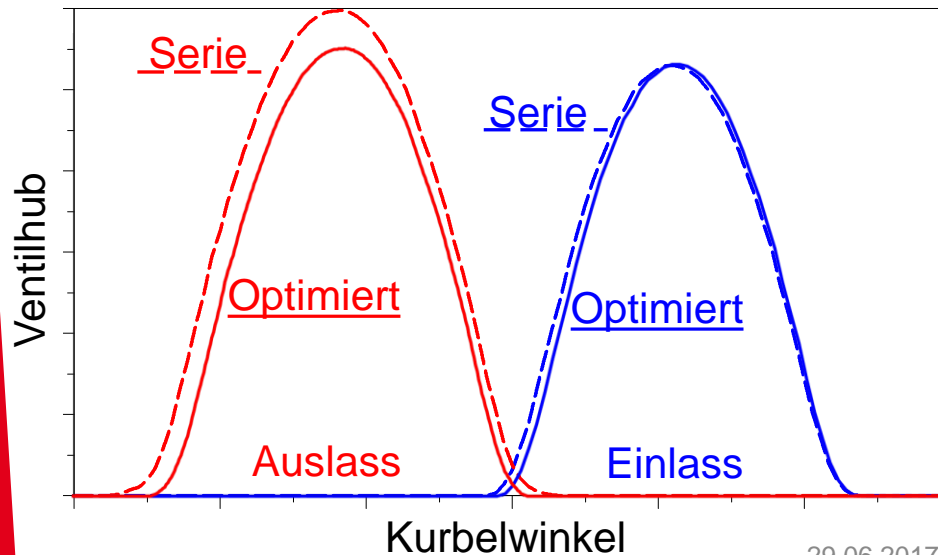
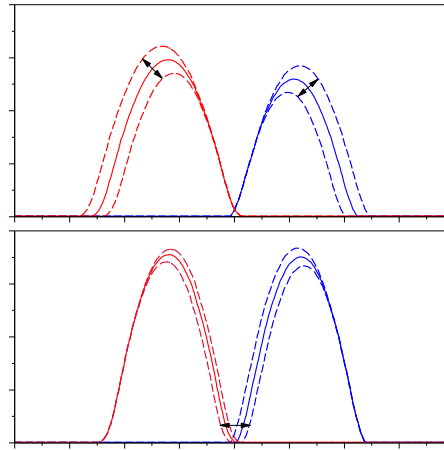
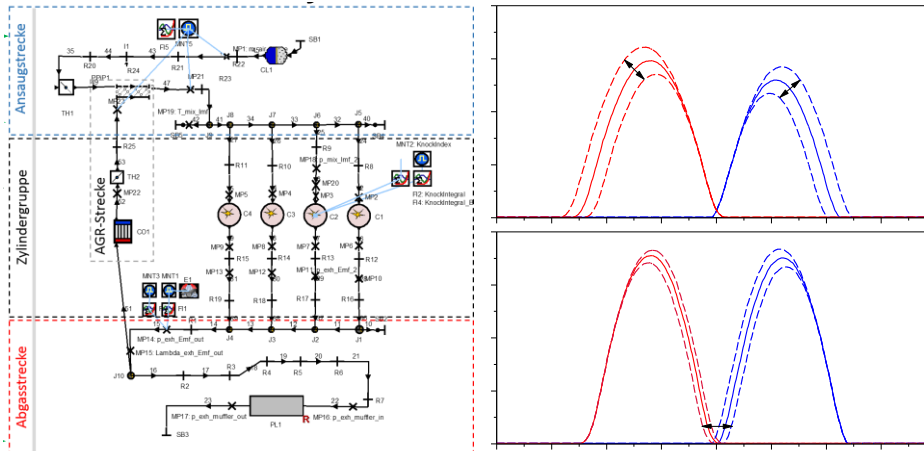


1D-CFD Motorprozesssimulation - Grundlagen Modellaufbau und -validierung im Referenzbetriebspunkt





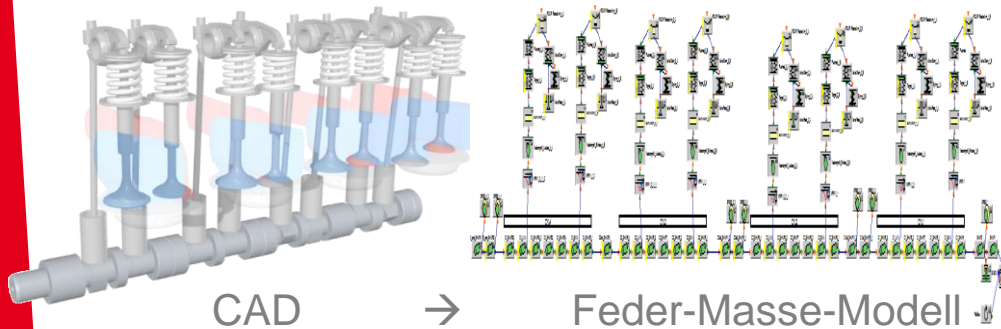
Verringerung des Restgasgehalts – 1D Simulation



- Basis: Seriensteuerzeiten des Turbo-Dieselmotors
 - Variation der Steuerzeiten zur Verringerung des Restgasgehalts
 - Auslassöffnen später
- verlängerte Expansionsphase
- Geringe Ventilüberschneidung:
- Weniger Restgas strömt von Auslass in Zylinder bzw. von Zylinder in Einlass
- $\Delta x_{\text{RESTGAS}} = -1.7 \text{ \%-Punkte}$
- $\Delta T_{\text{EINLASSSCHLUSS}} = -13 \text{ K}$



Schleifkoordinaten der Nocken aus MKS-Ventiltriebs-Simulation



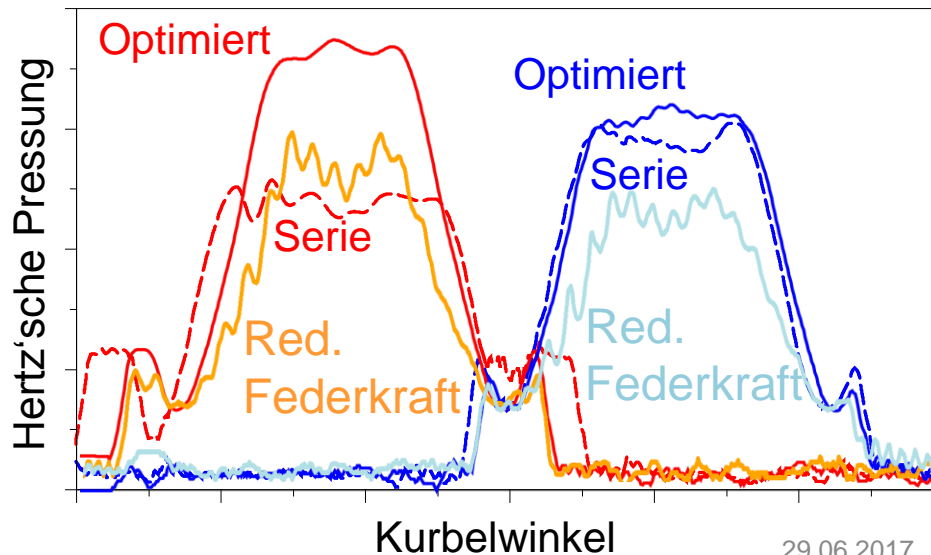
Ziel: Seriennockenwelle als Halbzeug

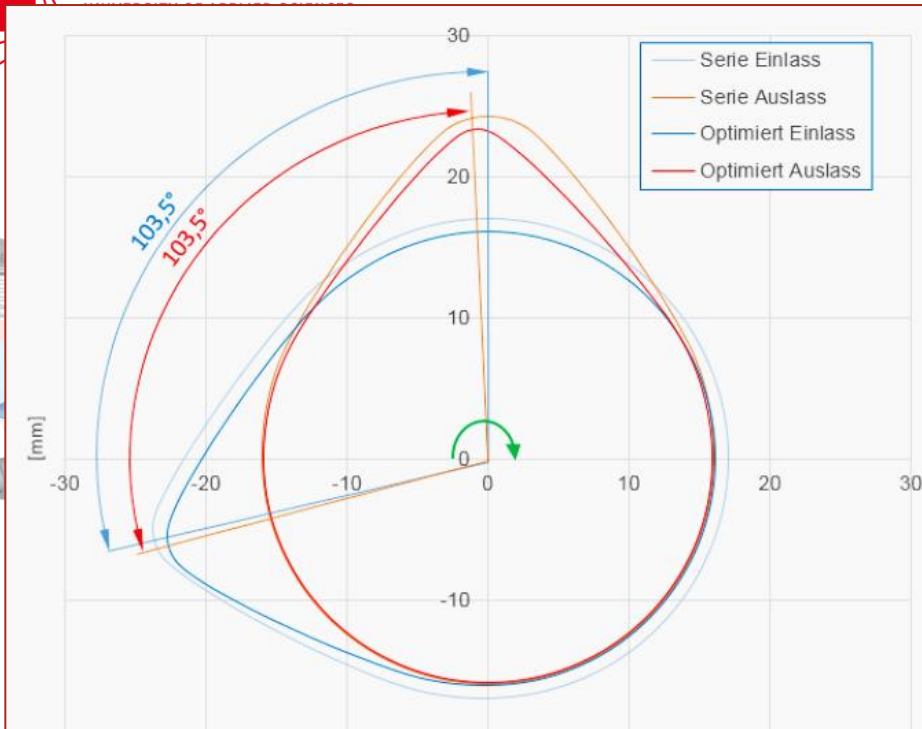
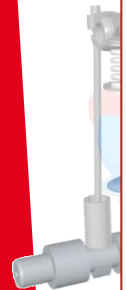
- Auslasssteuerzeiten erfordern schärferes Nockenprofil
- Verringerung des Grundkreisdurchmessers für Einlassöffnen in Richtung “spät”

→ Erhöhung der Hertz'schen Pressung!

- Reduktion der Federkraft möglich, da $n_{\text{NENN}} = 1500 \text{ 1/min}$

→ Verringerung der Hertz'schen Pressung





5-Ventiltriebs-Simulation

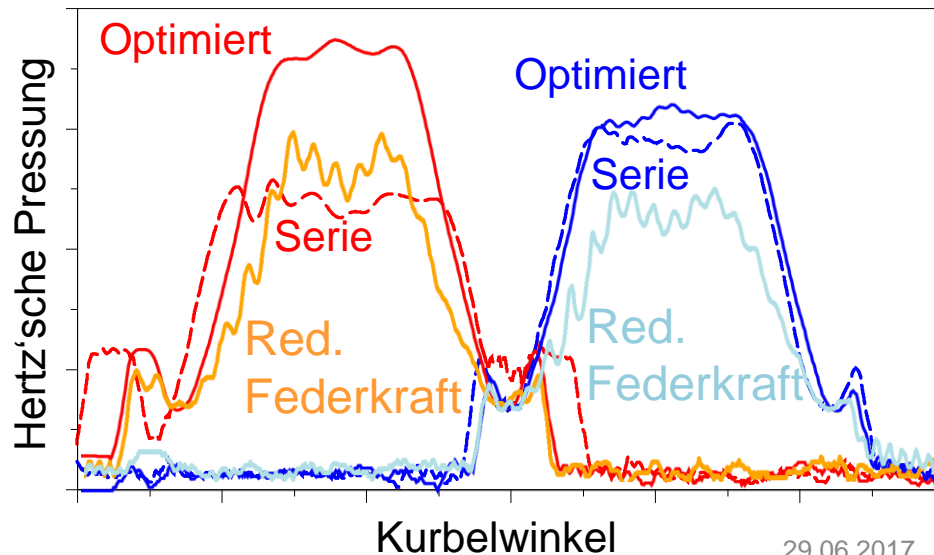
Ziel: Seriennockenwelle als Halbzeug

- Auslasssteuerzeiten erfordern schärferes Nockenprofil
- Verringerung des Grundkreisdurchmessers für Einlassöffnen in Richtung "spät"

→ Erhöhung der Hertz'schen Pressung!

- Reduktion der Federkraft möglich, da $n_{NENN} = 1500$ 1/min

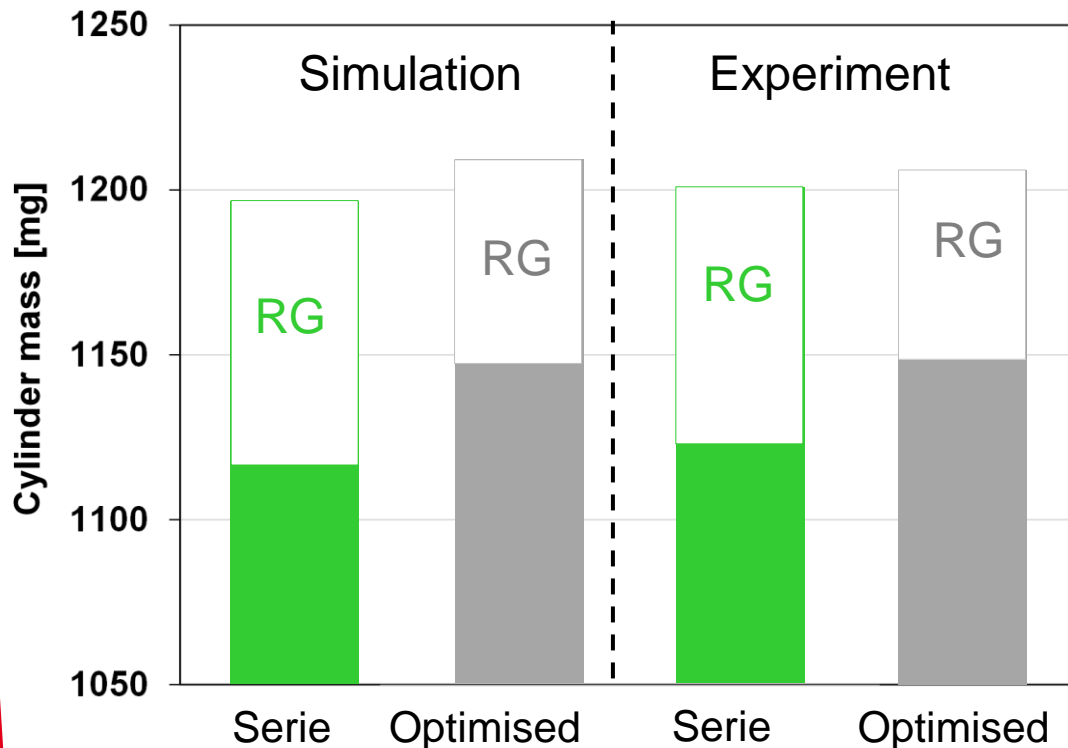
→ Verringerung der Hertz'schen Pressung





Ergebnisse der Ladungswechseloptimierung

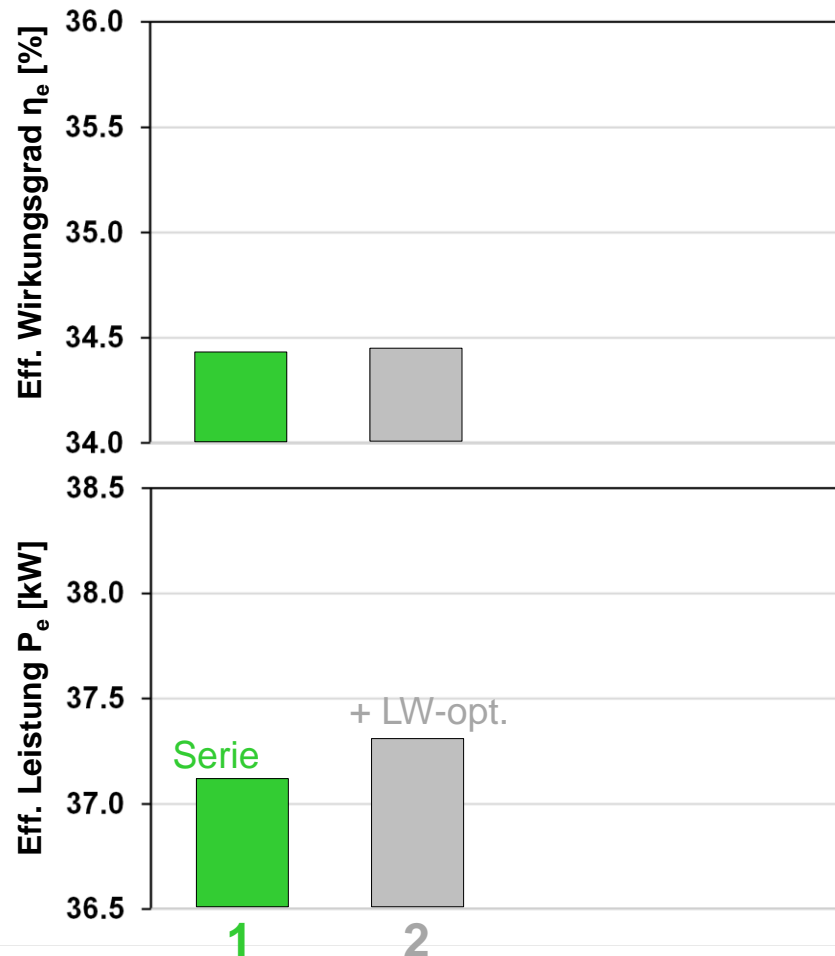
- Vergleich des Motorbetriebs bei gleichen $X_{50\%}$ und λ
- Bestimmung des Restgasgehalts durch Modellansatz von [Bargende and Spicher 2003] \rightarrow Analyse von $p_{Abg}(\alpha)$, $p_{Ans}(\alpha)$ and T_{Abg}



- Optimierter Ladungswechsel führt zu erhöhter Frischladungsmasse
- Geringerer Restgasgehalt (RG)
Exp.: $\Delta x_{RG} = -1.8$ %-Punkte
- Geringe Abweichung zwischen Messung und Simulation



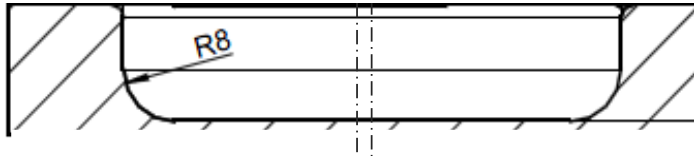
Ergebnisse bei $\text{NO}_x = 250 \text{ mg/m}_N^3$ (50 %TA-Luft)



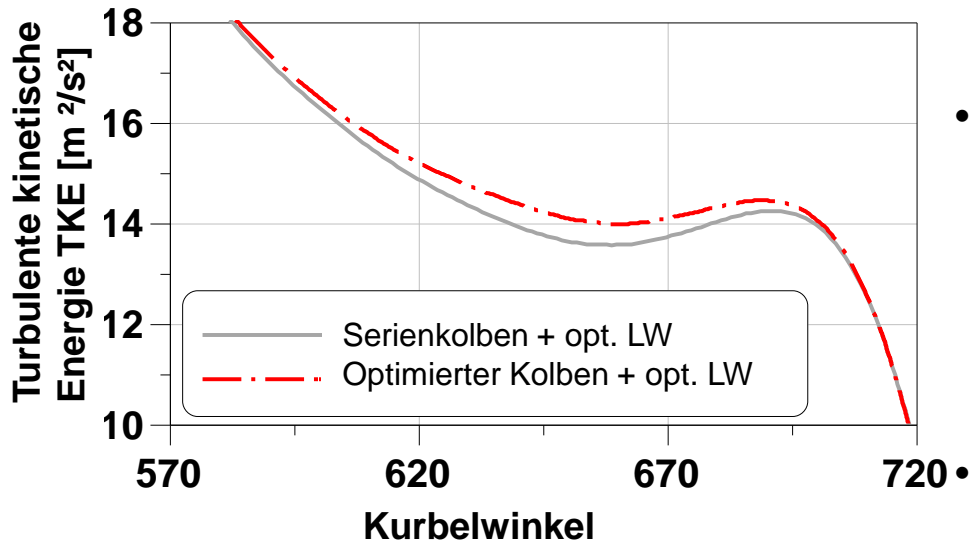
1. Serie: Hohes λ and spätes X50% zur Einhaltung von 250 mg/m_N^3
 $\rightarrow \eta_e = 34.4 \% P_e = 37.1 \text{ kW}$
2. Ladungswechseloptimierung:
Vergleichbarer Wirkungsgrad bei gesteigerter Motorleistung

Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses

Serie ($\varepsilon = 13,3$)



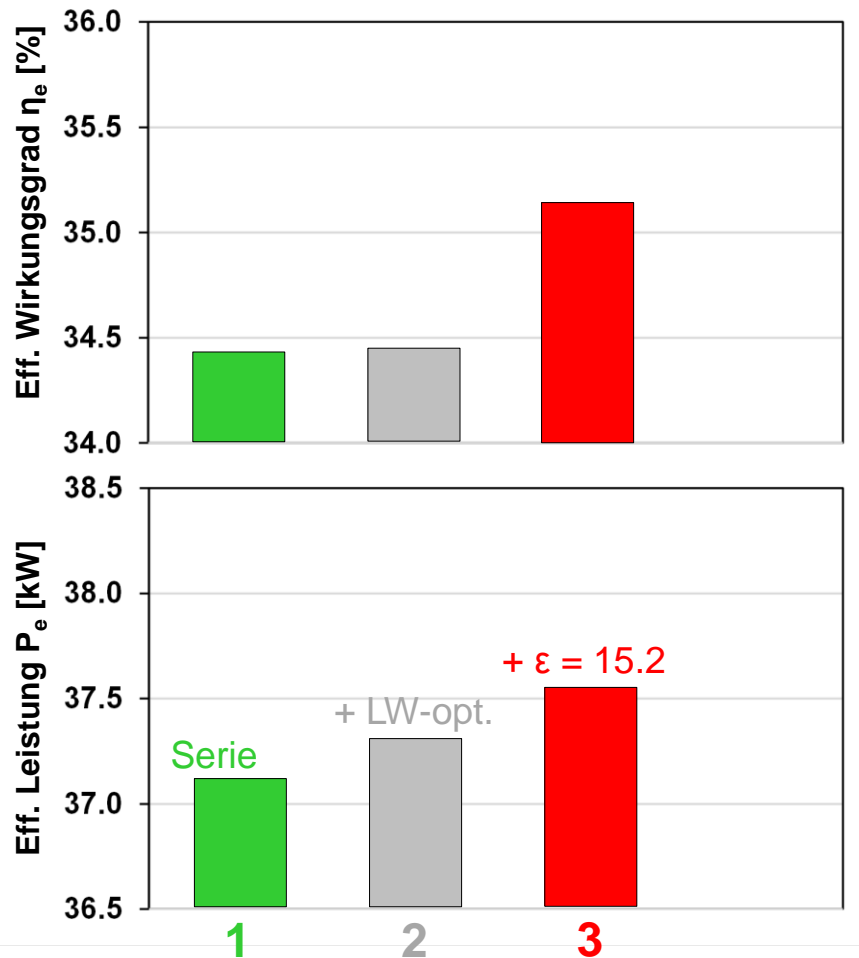
Optimiert ($\varepsilon = 15,2$)



- Verdichtungsanhebung
 $\varepsilon = 13,3$ zu $15,2:1$ durch „Auffüllen“
der Kolbenmulde
- Dieselkolben ($\varepsilon = 16,4$) als
Halbzeug daher geometrische
Einschränkungen
- Vergrößerte Quetschfläche und
schärfere Quetschkanten zur
Steigerung der Brennraumturbulenz
und Verringerung der Brenndauer
- 3D-CFD Simulationen zeigen
ähnliches Turbulenzniveau



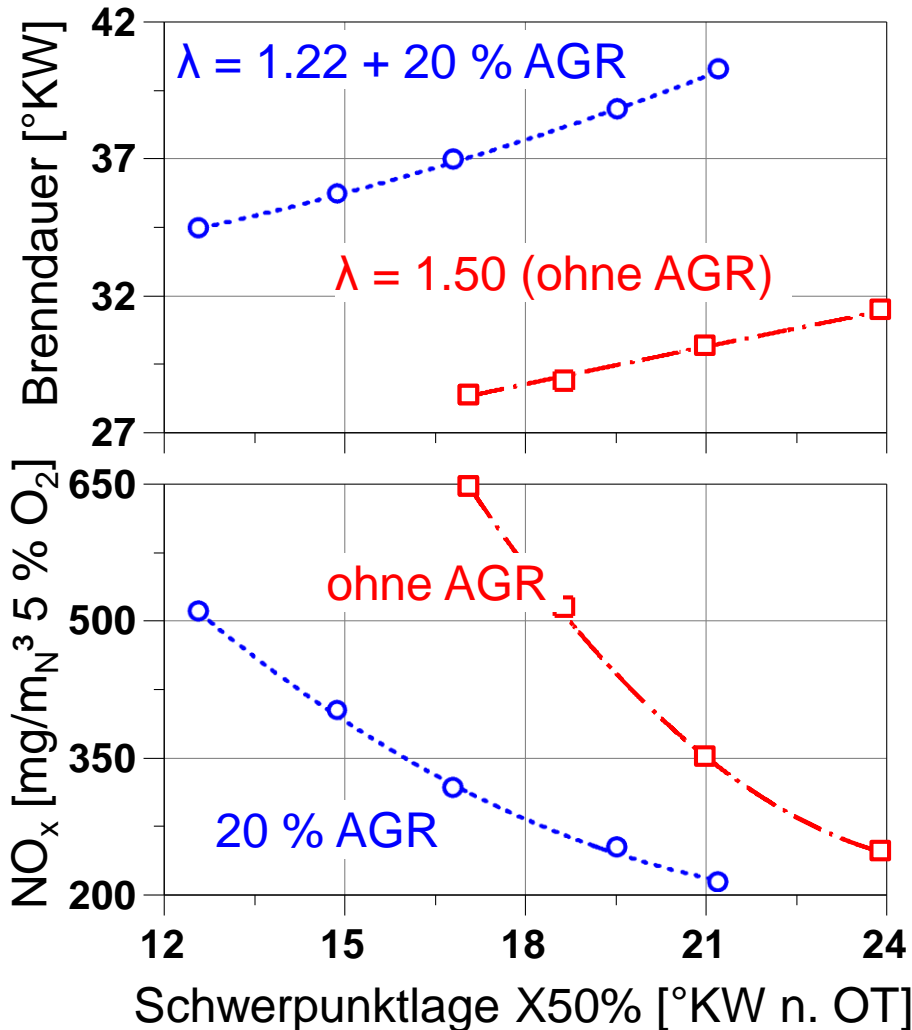
Ergebnisse bei $\text{NO}_x = 250 \text{ mg/m}_N^3$ (50 %TA-Luft)



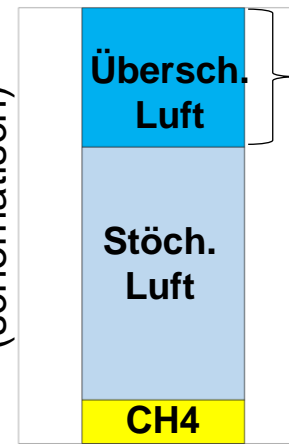
1. Serie: Hohes λ und spätes X50% zur Einhaltung von 250 mg/m_N^3
 $\rightarrow \eta_e = 34.4 \%$ $P_e = 37.1 \text{ kW}$
2. Ladungswechseleoptimierung:
Vergleichbarer Wirkungsgrad bei gesteigerter Motorleistung
3. $\epsilon = 13.3 \rightarrow \epsilon = 15.2$
Erhöhung von η_e and P_e
aber spätes X50% erforderlich



Abgasrückführung: $T_{AGR} = 80 \text{ °C}$ (realistisch für Serie)



Gemischzusammensetzung (schematisch)



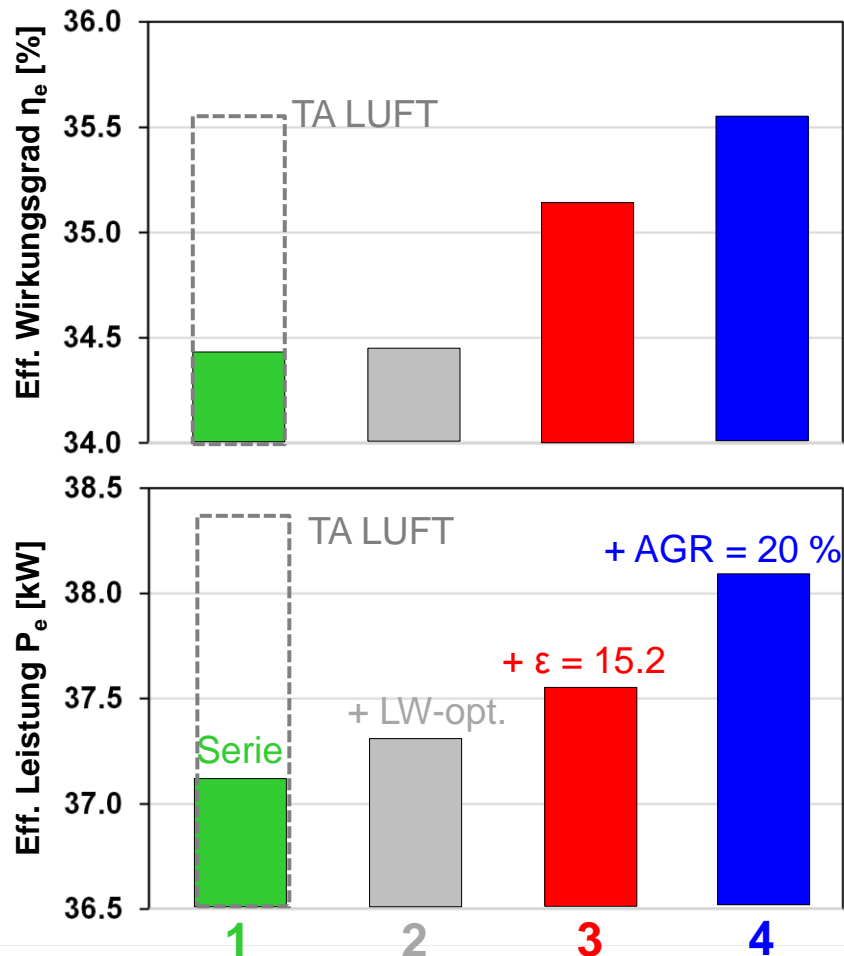
$\lambda = 1.5$
(ohne AGR)

$\lambda = 1.22$
+ $X_{AGR} = 20\%$

- AGR verlängert Brenndauer → Vorverlegung des Zündzeitpunkt erforderlich
- AGR verringert NO_x bei gleicher X50% → frühere X50% aber gleiche NO_x-Emissionen möglich



Ergebnisse bei $\text{NO}_x = 250 \text{ mg/m}_N^3$ (50 %TA-Luft)



1. Serie: Hohes λ and spätes X50% zur Einhaltung von 250 mg/m_N^3
 $\rightarrow \eta_e = 34.4 \% P_e = 37,1 \text{ kW}$
2. Ladungswechseloptimierung:
Vergleichbarer Wirkungsgrad bei gesteigerter Motorleistung
3. $\epsilon = 13.3 \rightarrow \epsilon = 15.2$
Erhöhung von η_e und P_e
aber spätes X50% erforderlich!
4. 20 % gekühlte AGR ermöglicht
Frühverschiebung der Verbrennung

1 \rightarrow 4: $\Delta\eta_e = + 1.1 \%$ -Punkte / $\Delta P_e = + 2,7 \%$



Zusammenfassung

- Deutliche Reduktion des Restgasgehalts durch Ladungswechseleoptimierung
 - Verdichtungserhöhung erhöht den Wirkungsgrad aber auch die NO_x -Bildung (späte Schwerpunktlagen X50% erforderlich!)
 - Gekühlte AGR erlaubt Frühverschiebung der Verbrennung
- $\Delta\eta_e = + 1.1$ %-Punkte / $\Delta P_e = + 2,7$ % bei $250 \text{ mg/m}_N^3 \text{ NO}_x$**

- Simulationsgestützte Entwicklung verringert den Bedarf an Prototypenteilen/Varianten deutlich (1. Prototyp = Zieldesign)
- Weitere Informationen zur Optimierungsstudie:

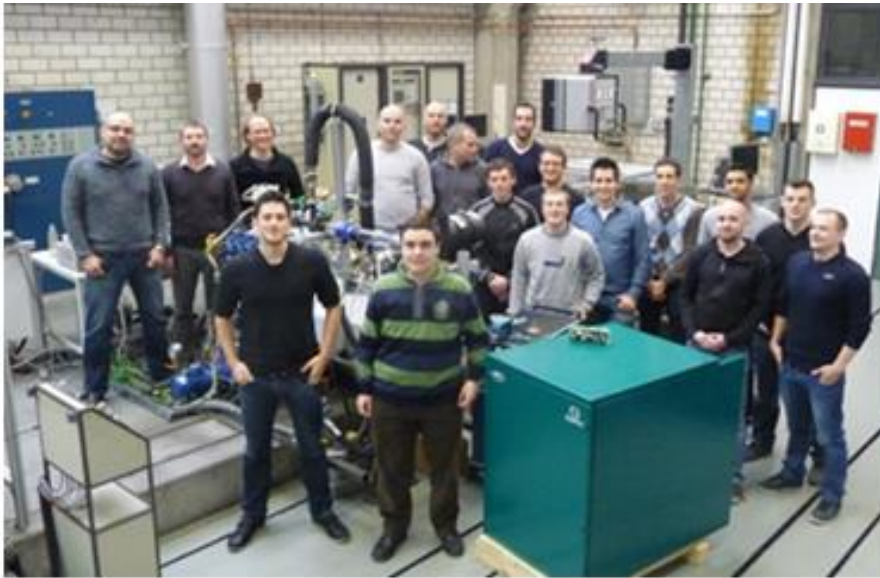
D. Neher, S. Fieg, W. Rieb, J. Bauer, M. Kettner, H. Biermann, N. Albrecht; Simulationsgestützte Entwicklung eines hochverdichteten gemischansaugenden magerbetriebenen Erdgasmotors zur Erfüllung zukünftiger Emissionsgrenzwerte; 10. Dessauer Gasmotoren-Konferenz, 2017

Ausblick

- Reduktion der Ventulfeder-Vorspannkraft zur Verringerung von Reibleistung und Hertz'scher Pressung
- Übertragung des Konzepts auf den stöchiometrischen Betrieb (3-Wege-Kat)
 - Analyse von Klopfen und Motorlebensdauer (Auslassventilsitz...)



VIELEN DANK



Das vorgestellte Forschungsbeispiel wurde u.a. vom BMWi im Rahmen der Förderlinie ZIM sowie den Unternehmen

- AVL List GmbH
 - Heinzmann GmbH & Co KG
 - Eberhard Hoesckle GmbH
- unterstützt



Zutat #4 für die Gasmotorenforschung: **MOTIVIERTES TEAM + PARTNER!**