

RESEARCH & DEVELOPMENT for Internal Combustion ENGINES



Prof. PhD. ME

Victor Gheorghiu

<http://victor-gheorghiu.de/>

<http://www.rd4e.com/>

**Hamburg University of Applied
Sciences**

**Department of Mechanical Engineering
& Production**

Prof. Dr.-Ing.

Victor Gheorghiu

victor-gheorghiu@haw-hamburg.de

grg@rd4e.com

**HAW Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg**

**Department Maschinenbau und
Produktion**

Can the internal combustion engines become even cleaner and more effective?

Ways to simultaneously increase the indicated efficiency (ISFC) and the indicated mean pressure (IMEP) while maintaining or even reducing the raw emissions of internal combustion engines (ICE).

VCSR is the abbreviation for a crankshaft drive with Variables Compression and Stroke Ratios.

Können die Verbrennungsmotoren noch sauberer und effektiver werden?

Wege zur gleichzeitigen Erhöhung des indizierten Wirkungsgrads und des indizierten Mitteldrucks unter Einhaltung oder sogar Minderung der Rohemissionen bei Verbrennungsmotoren.


VCSR ist die Abkürzung für einen asymmetrischen Kurbeltrieb mit verlängertem Expansionshub und variablem Verdichtungsverhältnis.



Introduction

The conventional reciprocating engine is a highly developed combustion engine.


It was improved for more than 100 years, especially with regard to efficiency.

The further the engine is developed, the less the gains in efficiency become, as it converges the theoretical (ideal) process. [2] Click on the icon  to play the following animations!!



Einleitung

Der konventionelle Hubkolbenmotor ist eine sehr ausgereifte Verbrennungskraftmaschine. Über mehr als ein Jahrhundert hinweg wurde er weiterentwickelt und auf diese Weise vor allem hinsichtlich des Wirkungsgrades stark verbessert. Je weiter die Entwicklung in konventioneller Bauart fortschreitet, desto geringer werden die erreichbaren Steigerungen im Wirkungsgrad. [2]

Klick man auf das Symbol , um die folgenden Animationen abspielen!!

Introduction

No major gains in sweet spot efficiency can be expected on up to date conventional engines.

To build a combustion engine with significantly higher efficiency the actual working process has to be reconsidered.

The cycle simulations are performed with AVL-BOOST and the kinetic & animations of VCSR with Matlab/Simulink/Simscape.



Einleitung

An heutigen Motoren konventioneller Bauart sind im Bestpunkt keine deutlichen Verbesserungen des Wirkungsgrades zu erwarten.

Um einen Motor mit einem deutlichen höheren Wirkungsgrad zu bauen, muss also die eigentliche Prozessführung neu überdacht werden.



Introduction to Ultra-Downsizing

This study or presentation deals with a highly turbocharged reciprocating piston engine with extended expansion and continuously adjustable compression ratio.

The extended expansion promises a significant enhancement in efficiency compared to conventional engines.

This new concept is further referred to Ultra-Downsizing [\[1\]](#).

Einleitung zu Ultra-Downsizing

Diese Untersuchung bzw. Präsentation beschäftigt sich mit einem hoch turboaufgeladenen Hubkolbenmotor mit verlängerter Expansion und kontinuierlich einstellbarem Verdichtungsverhältnis.

Diese versprechen eine deutliche Steigerung des Wirkungsgrades im Vergleich zum konventionellen Hubkolbenmotor.

Dieser neue Konzept ist weiter als Ultra-Downsizing benannt [\[1\]](#).



INTERNAL
COMBUSTION
ENGINES

Ultra-Downsizing

The ultra-downsizing is introduced as an even higher stage of downsizing of ICE.

Ultra-downsizing will be implemented here by means of:

- Real Atkinson cycles (i.e. cycles with extended expansion) using VCSR asymmetrical crank mechanisms with continuous VCR capabilities
- Combined with multi-stage high-pressure turbocharging and very intensive intercooling.
- This will allow an increase of ICE performance while keeping the thermal and mechanical strain strength of engine components within the current usual limits.

Ultra Downsizing

Die Ultra-Downsizing wird als eine noch höhere Stufe von Downsizing der Verbrennungsmotoren eingeführt.

Ultra-Downsizing wird hier implementiert durch:

- Reale Atkinson Zyklen (d.h. Zyklen mit verlängerter Expansion) mithilfe des VCSR asymmetrischen Kurbeltriebs mit variablem Verdichtungsverhältnis
- Kombiniert mit mehrstufiger Hochdruck-Turboaufladung und sehr intensiver Ladeluft-Kühlung.
- Dies ermöglicht eine Erhöhung der Leistung, während die thermische und mechanische Belastungen der Motorkomponenten innerhalb der aktuell üblichen Grenzen beibehalten werden.



INTERNAL
COMBUSTION
ENGINES

Ultra-Downsizing

Methodology

For this study a small size SI NA MPI engine is taken into account for this purpose:

(Opel ECOTEC 3 Cylinder 1 Liter displacement, CR = 10.1, Euro 4).

The possibilities of load control of such classical SI engine are:

- Throttling,
- Variation of exhaust gas recirculation rate (EGR) or
- Variation of intake valve opening time (IVOT) i.e. the implementation of Quasi-Atkinson or Miller Cycles.

Initial Situation:



www.victor-gheorghiu.de,

www.rd4e.com

Ultra Downsizing

Methodik

Ein kleiner nicht aufgeladene Otto-Motor mit Saugrohreinspritzung wird beispielhaft dafür herangezogen:

(Opel ECOTEC 3 Zyl. 1 Liter Hubraum, Verdichtungsverhältnis = 10,1, Euro 4).

Die Möglichkeiten der Laststeuerung eines solchen klassischen Otto-Motors sind:

- Drosselung,
- Variation der Abgasrückführrate (AGR) oder
- Variation der Einlassventil-Öffnungsdauer, d.h. die Implementierung von Quasi-Atkinson- oder Miller-Zyklen.

Ausgangssituation:



BSFC of the ECOTEC engine, measured on test bench

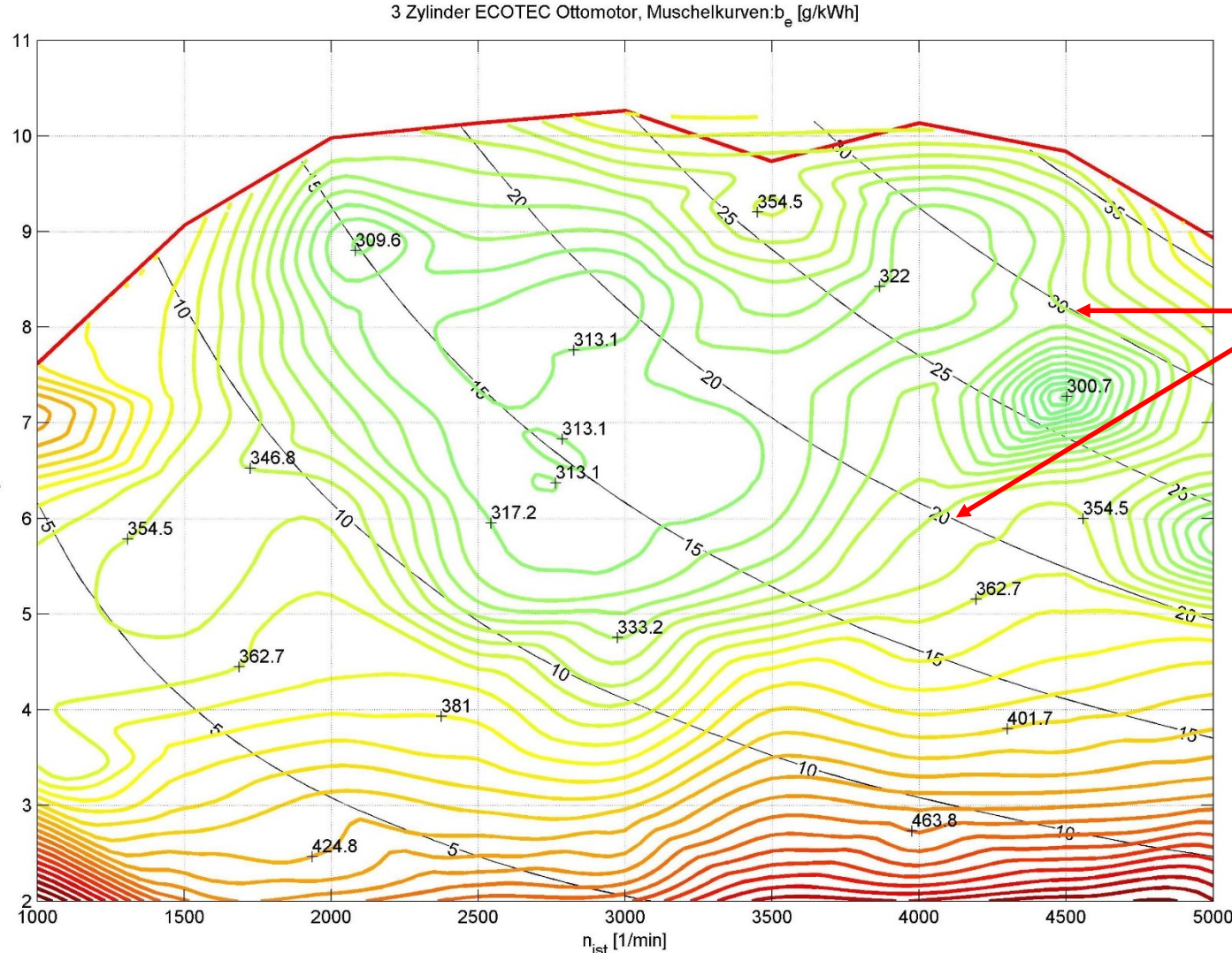
[g/kWh]

Spez. Kraftstoffverbrauch des ECOTEC Motors auf dem Prüfstand

[g/kWh]

BMEP,
effektiver Mitteldruck

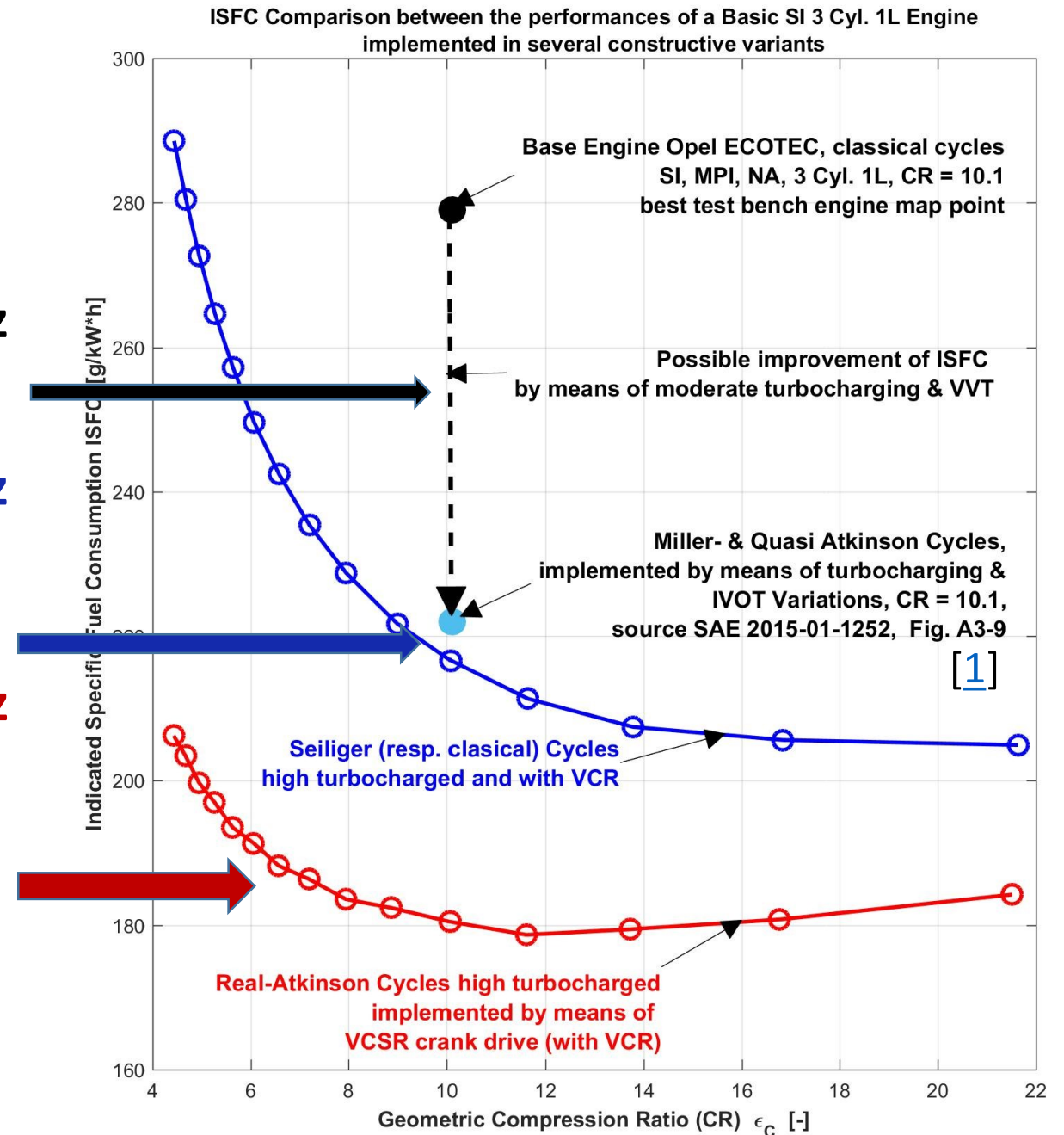
[bar]



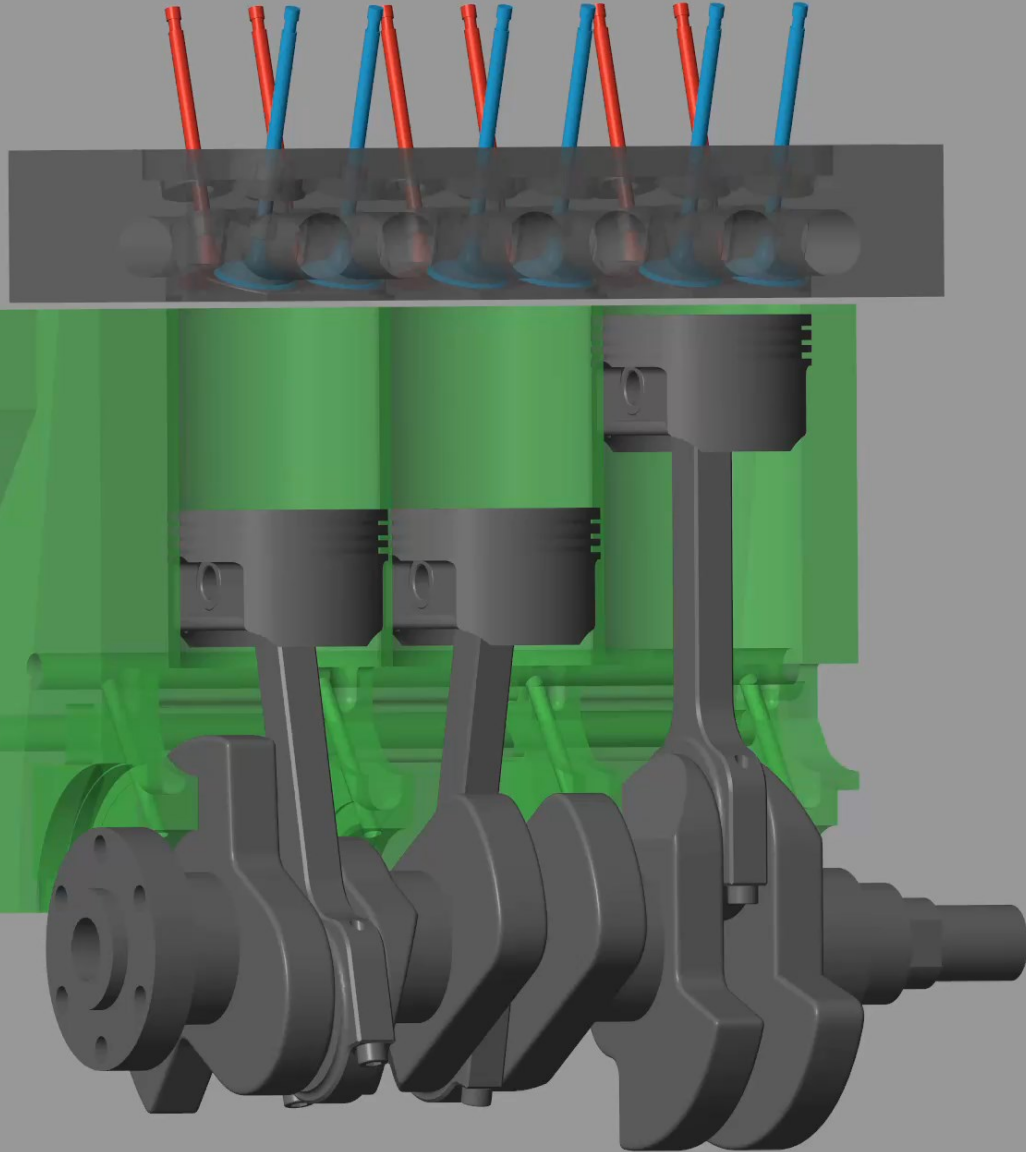
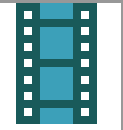
Ultra-Downsizing of ICE

Absenkung des indizierten Kraftstoffverbrauchs kann in den folgenden Schritten erfolgen:

- Verbesserungspotenzial beim Einsatz einer mäßigen Turboaufladung und von VVT
- Verbesserungspotenzial beim Einsatz eines Kurbeltriebs mit variablem Verdichtungsverhältnis (VCR) (z.B. Nissan Infinity VC-T Engine)
- Verbesserungspotenzial beim Einsatz des asymmetrischen Kurbeltriebs VCSR (Variable Compression and Stroke Ratios) zur Implementierung von realen Atkinson-Zyklen und Hochdruck Turboaufladung

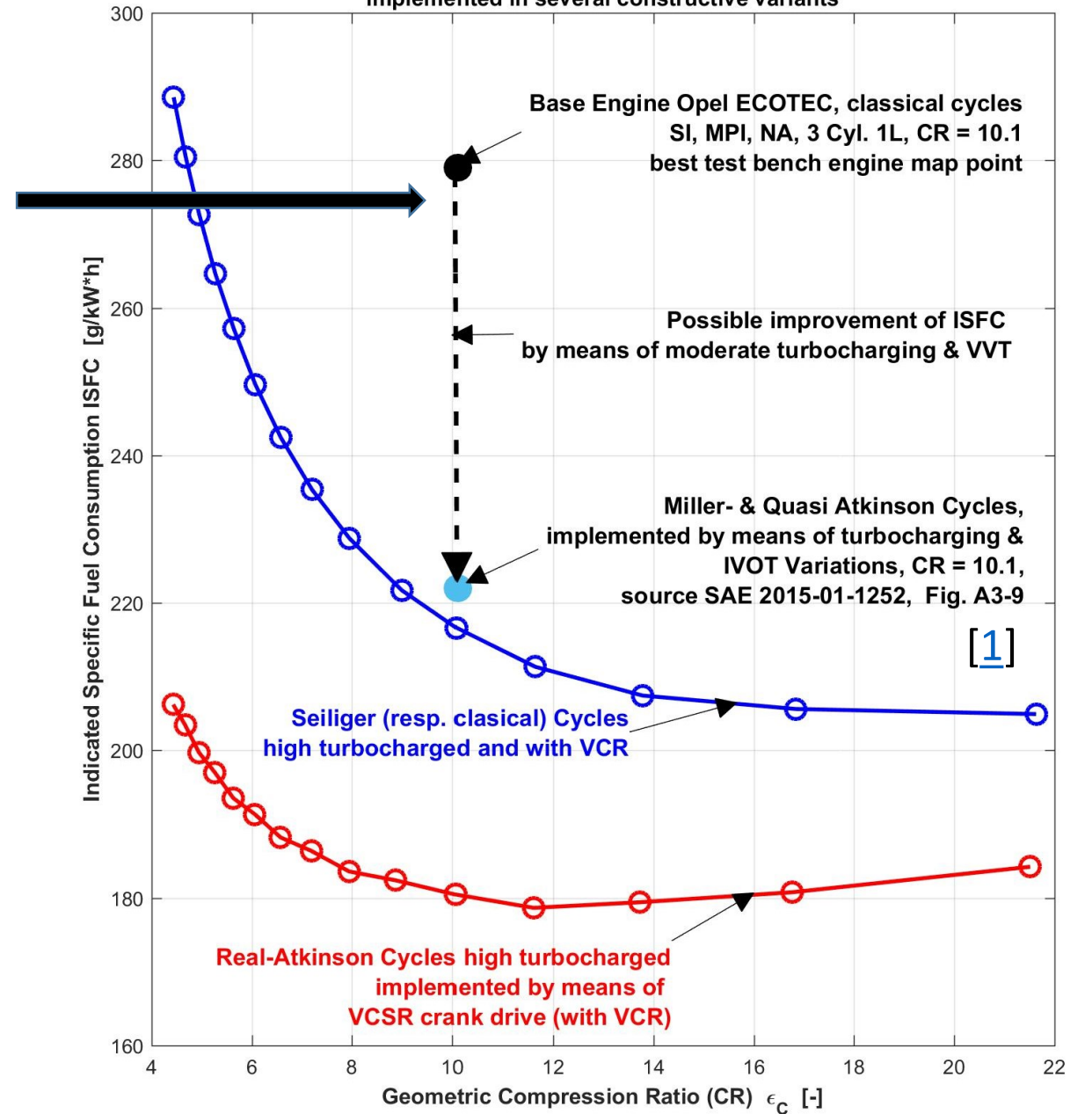


Basic Engine, Full load



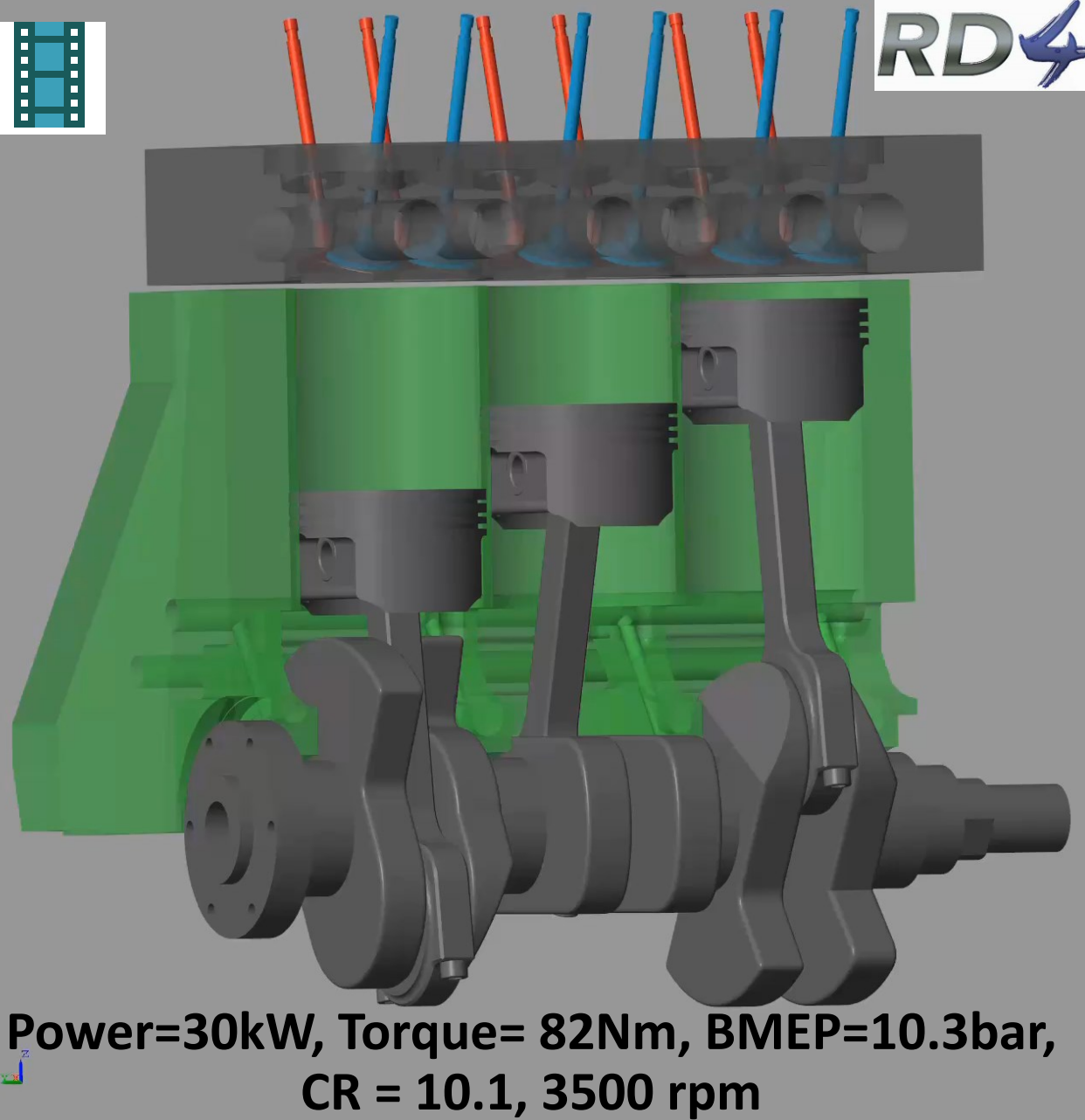
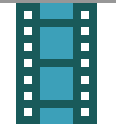
Power=30kW, Torque= 82Nm, BMEP=10.3bar,
CR = 10.1, at 3500 rpm

ISFC Comparison between the performances of a Basic SI 3 Cyl. 1L Engine implemented in several constructive variants



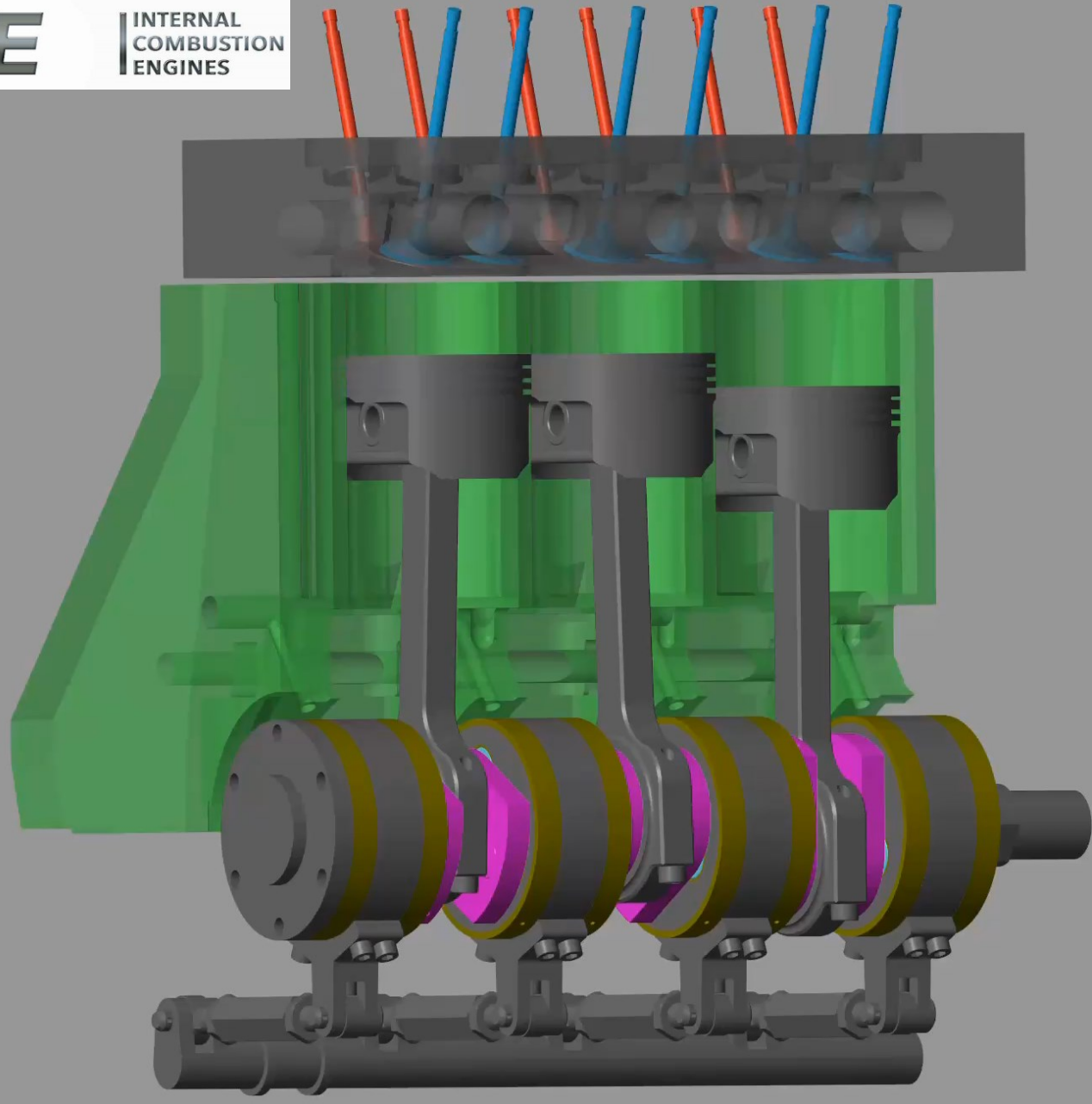
Basic Engine, Full load

VCSR Engine



Power=30kW, Torque= 82Nm, BMEP=10.3bar,
CR = 10.1, 3500 rpm

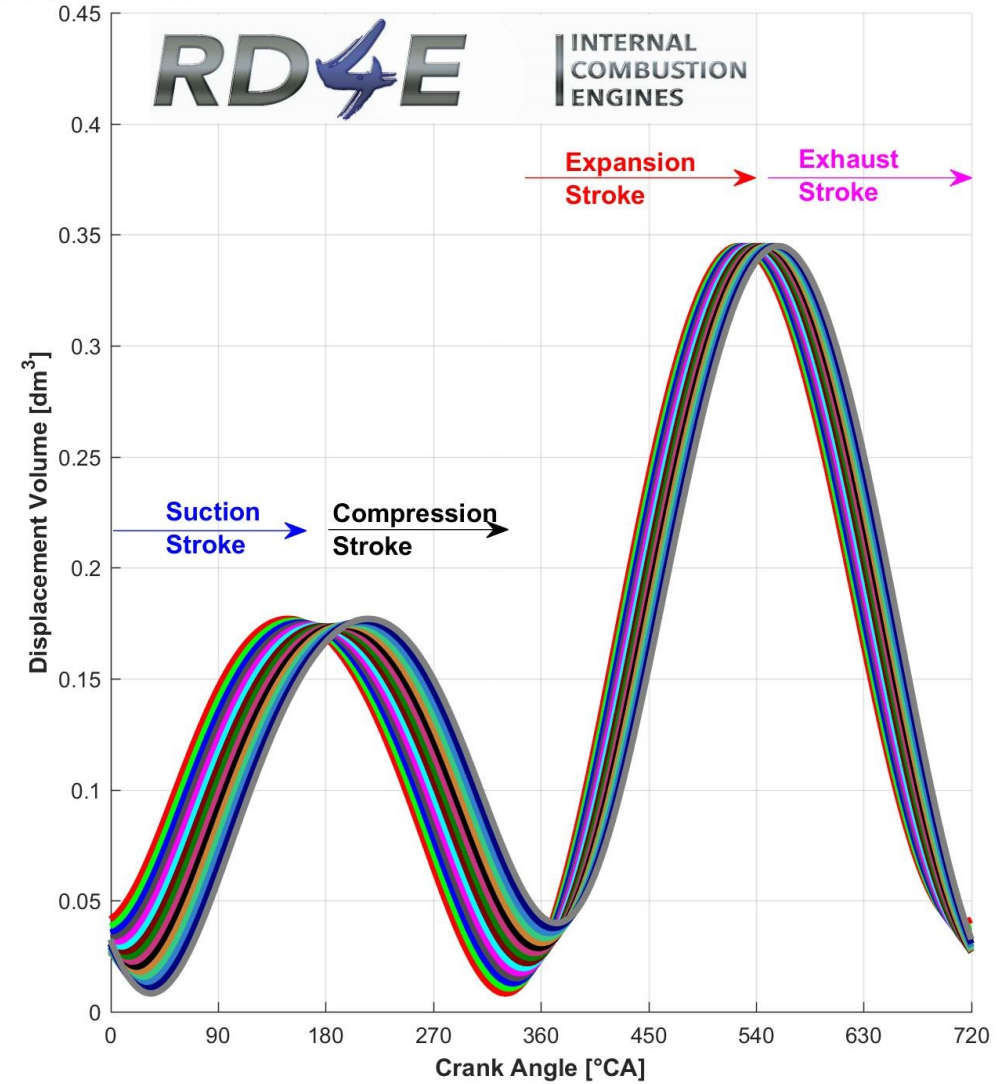
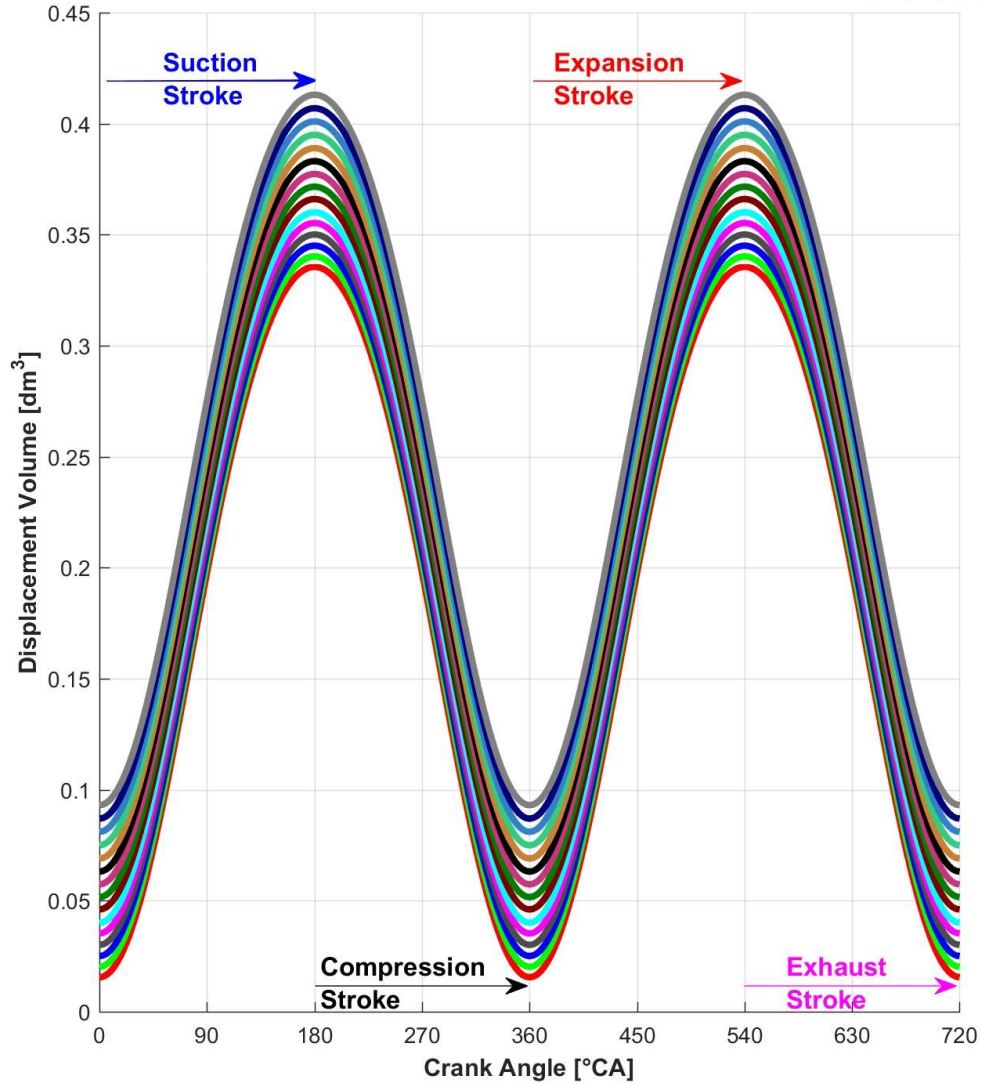
INTERNAL
COMBUSTION
ENGINES



Basic Engine with VCR

VCSR Engine

Displacement Volume comparison of the Seiliger (with identical stroke lengths & VCR) and Real-Atkinson cycles, the last is implemented by means of the VCSR asymmetrical crankshaft drive; with variable stroke lengths & VCR = VCSR



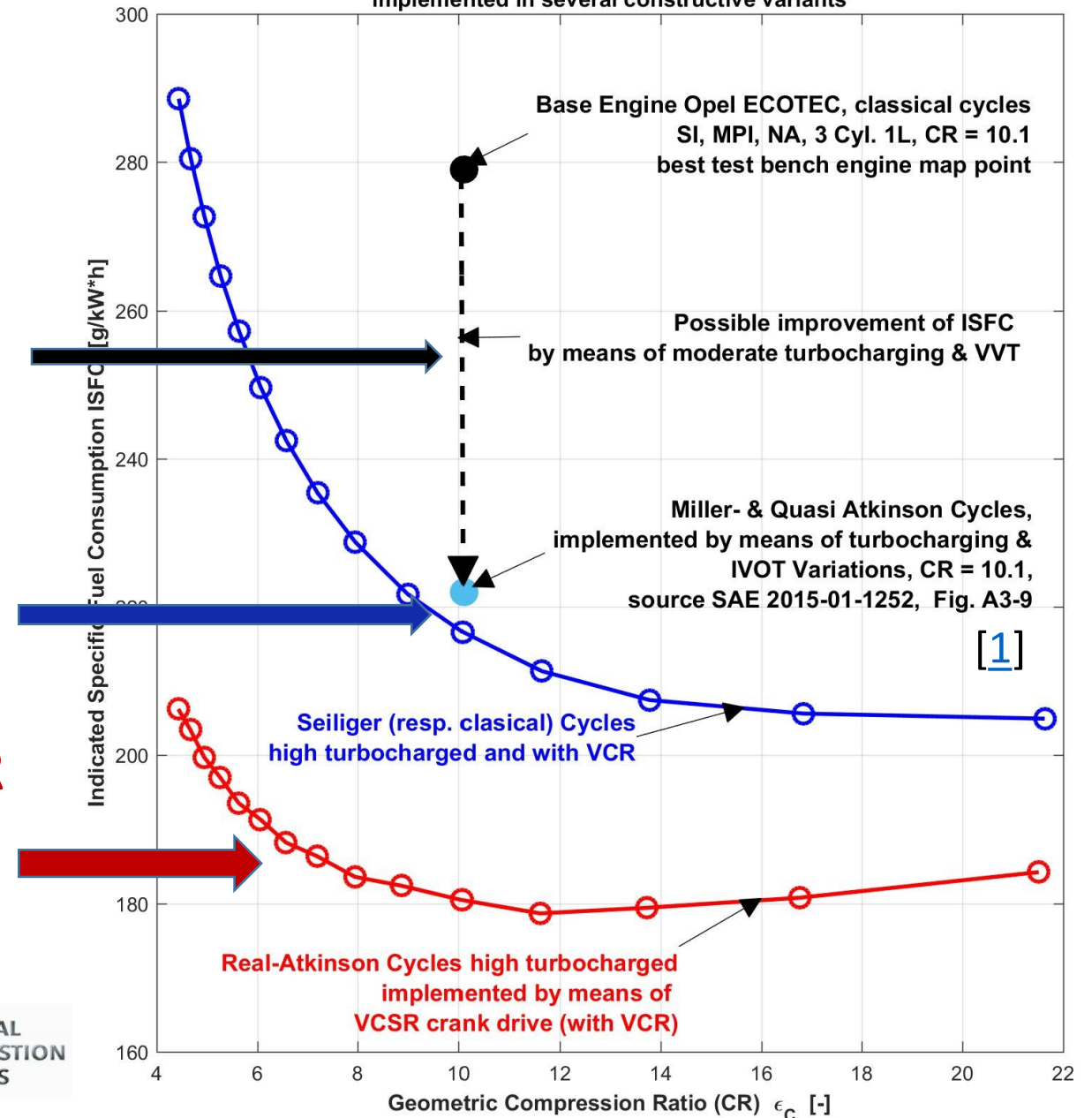
Ultra-Downsizing of ICE

Decrease of the indicated fuel consumption can be carried out in the following steps:

- Improvement potential of a moderate turbocharging and use of VVT
- Improvement potential of a crankshaft drive with variable compression ratio (VCR) (see e.g. Nissan Infinity VC-T Engine)
- Improvement potential of the asymmetric crankshaft drive VCSR (Variable Compression and Stroke Ratios) for Implementing of Real Atkinson cycles and high-pressure turbocharging [1]



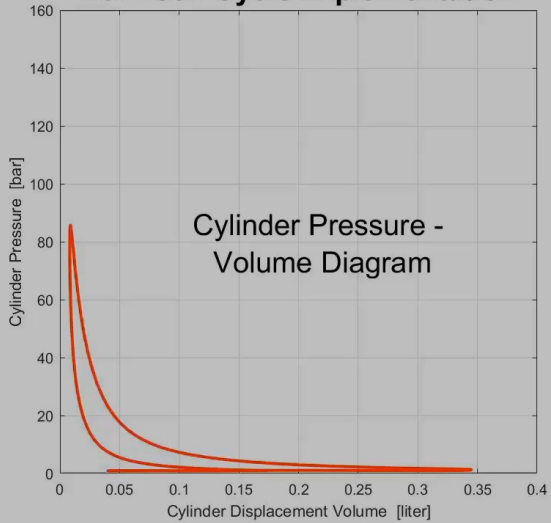
ISFC Comparison between the performances of a Basic SI 3 Cyl. 1L Engine implemented in several constructive variants



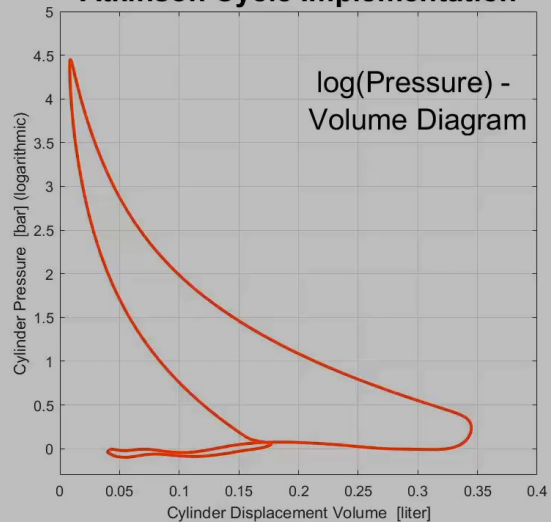
VCSR Engine at Low-Load, Speed 3500 rpm,

indicated Torque = 43.3 Nm, indicated Power = 15.87 kW

Atkinson Cycle Implementation



Atkinson Cycle Implementation



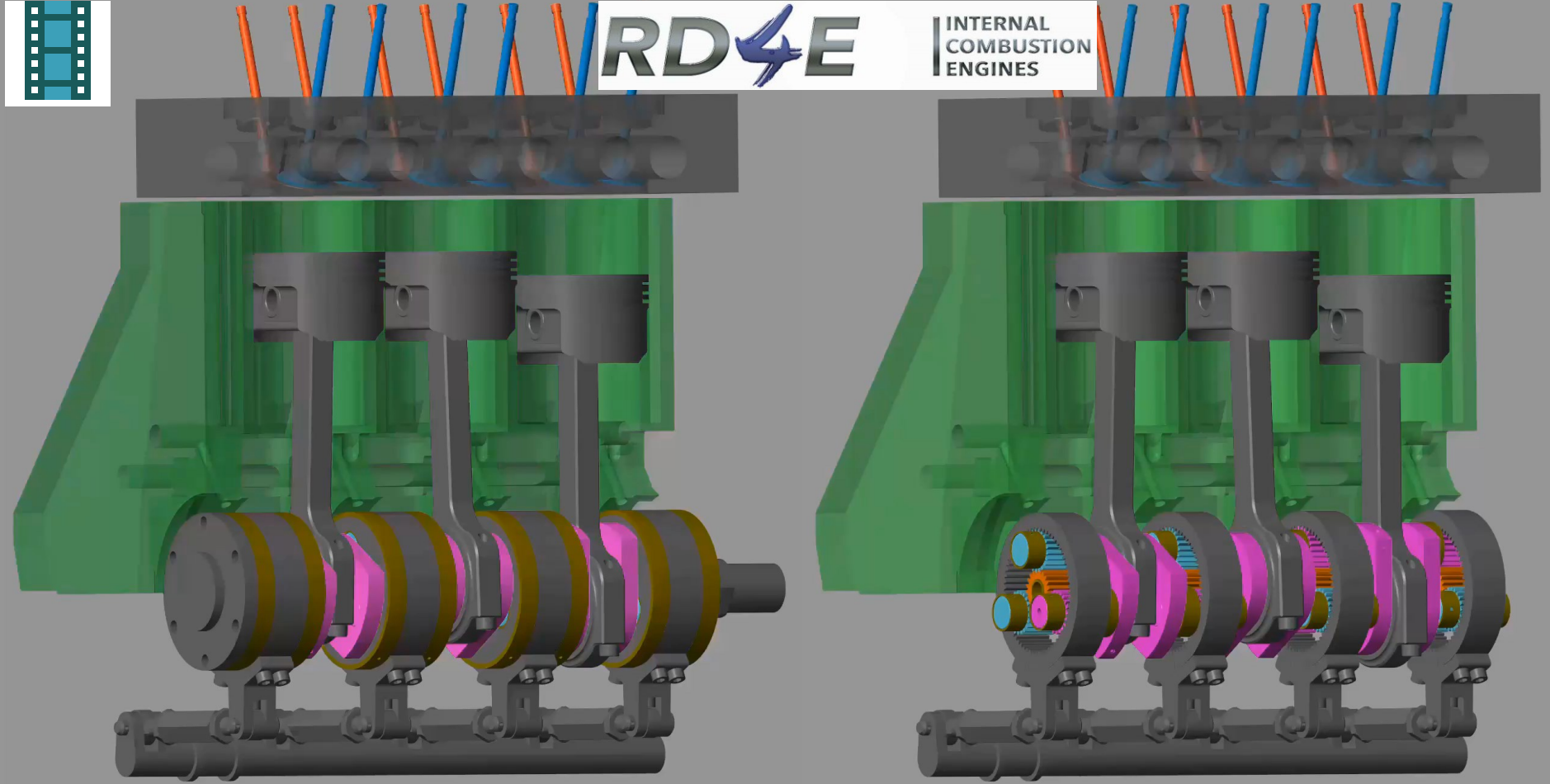
Low-Load by High Compression Ratio (CR)



RD4E

Low-Load by High Compression Ratio (CR)

INTERNAL COMBUSTION ENGINES



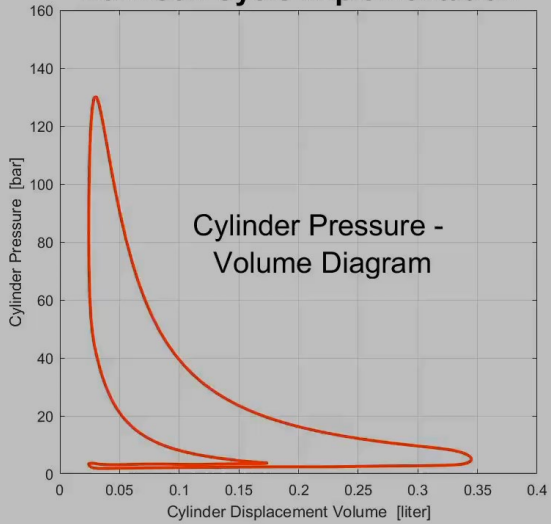
IMEP = 5.26 bar CR = 20.78 IFCE = 0.449

IMEP = 5.26 bar CR = 20.78 IFCE = 0.449

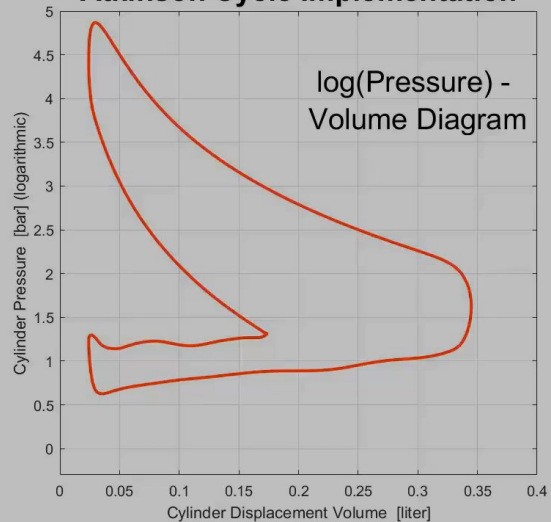
VCSR Engine at Middle-Load, Speed 3500 rpm,

indicated Torque = 186 Nm, indicated Power = 68.1 kW

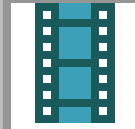
Atkinson Cycle Implementation



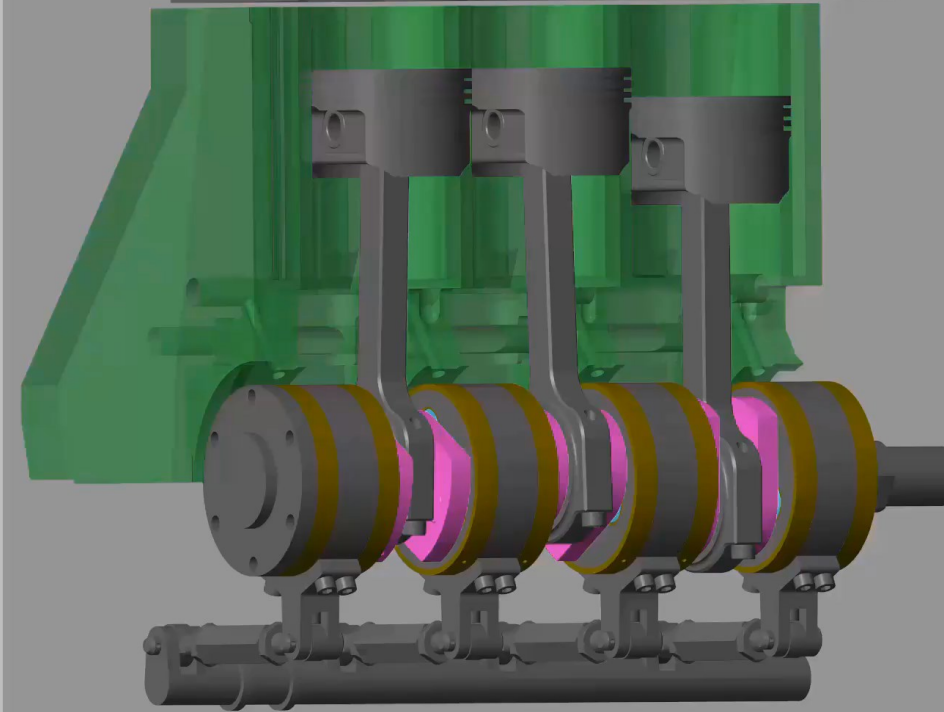
Atkinson Cycle Implementation



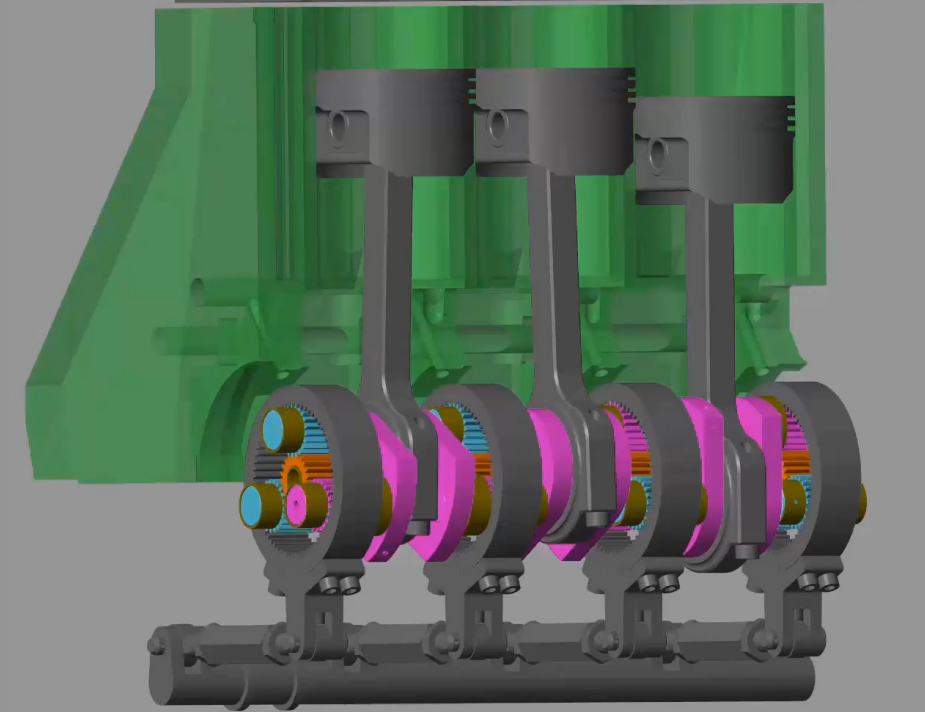
Part-Load by Middle Compression Ratio (CR)



Part-Load by Middle Compression Ratio (CR)



IMEP = 22.57 bar CR = 7.15 IFCE = 0.445

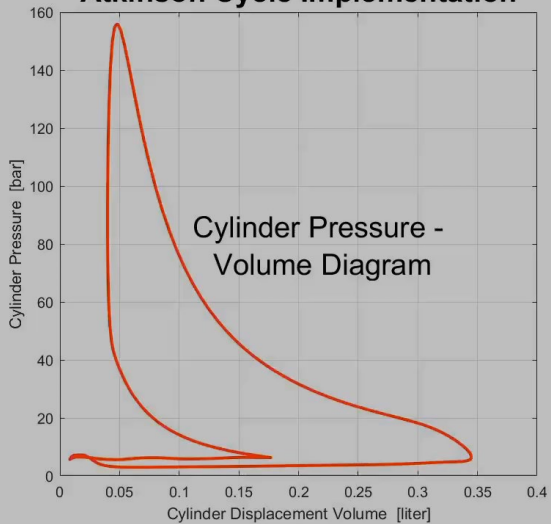


IMEP = 22.57 bar CR = 7.15 IFCE = 0.445

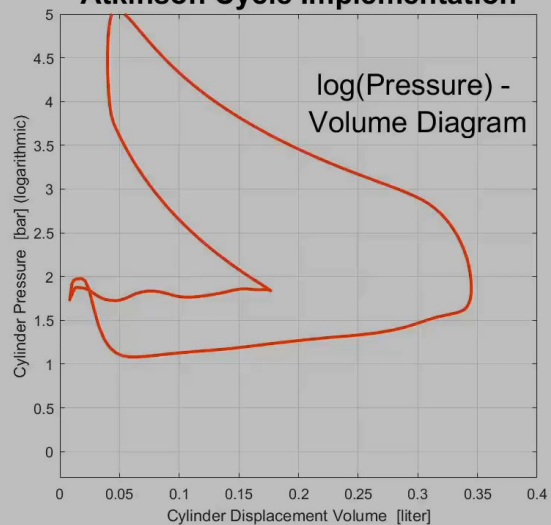
VCSR Engine at Full-Load, Speed 3500 rpm,

indicated Torque = 294 Nm, indicated Power = 107.6 kW

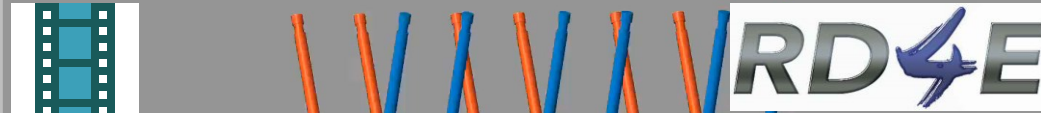
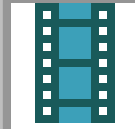
Atkinson Cycle Implementation



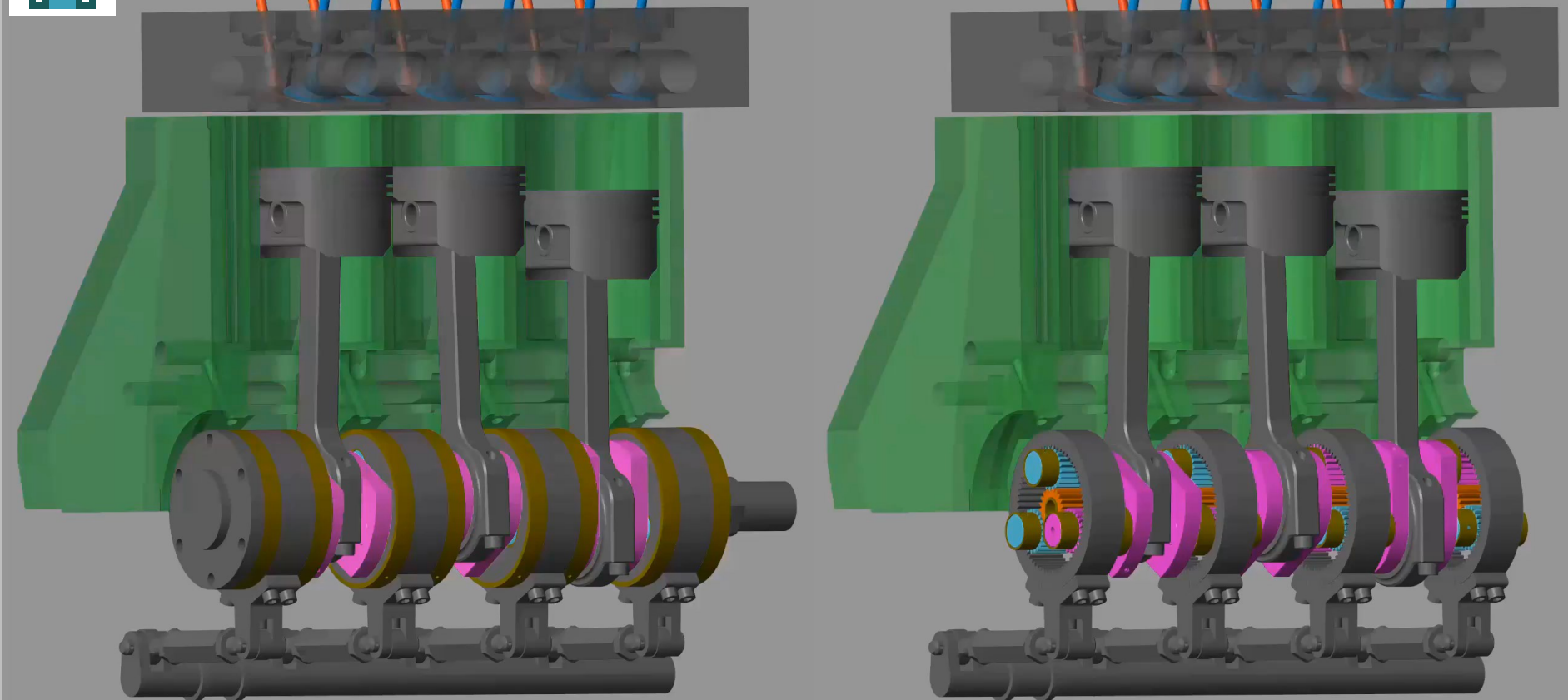
Atkinson Cycle Implementation



Full-Load by Low Compression Ratio (CR)



Full-Load by Low Compression Ratio (CR)



IMEP = 35.66 bar CR = 4.43 IFCE = 0.402

IMEP = 35.66 bar CR = 4.43 IFCE = 0.402

Ultra-Downsizing

Objectives of Ultra Downsizing (1/7):

- Maximized utilization of the exhaust gas enthalpy for the highest possible external compression of the fresh charge and reduction of the necessary internal compression work
- Intensive cooling of the highly compressed fresh charge before the intake to reduce the combustion temperatures and hereby the NO_x-raw emission reduction
- Shortened suction stroke, in order to absorb exactly the amount of highly compressed and very well cooled charge mass, as is necessary for the desired IMEP (without appreciable backflows into the inlet channels)

Ultra Downsizing

Ziele von Ultra Downsizing (1/7):

- Maximale Nutzung der Abgasenthalpie zur höchstmöglichen äußeren Verdichtung der frischen Ladung und somit zur Reduzierung der inneren Verdichtungsarbeit
- Intensive Kühlung der hochverdichteten frischen Ladung vor dem Ansaugen zur Reduzierung der Verbrennungstemperaturen und somit der NO_x-Rohemission
- Verkürzter Ansaughub, um genau nur so viel hoch verdichtete und sehr gut gekühlte Ladungsmasse anzusaugen, wie für den erwünschten Mitteldruck notwendig ist (ohne merkliche Rückströmungen in den Einlass-Kanälen)



Ultra-Downsizing

Objectives of Ultra Downsizing (2/7):

- Shortened compression stroke and continuously adapted CR to achieve exactly the desired final compression pressure
- Extended expansion stroke to increase the indicated efficiency while still providing enough overpressure and enthalpy for turbo charging (i.e., for external compression of the fresh charge)
- Long exhaust stroke to ensure sufficient emptying of the cylinder
- Optimal design of the heat release (i.e. the heat is partially released isochorically up to $\max(p)$, isobarically up to $\max(T)$ and the remainder isothermally) [1]



Ultra Downsizing

Ziele von Ultra Downsizing (2/7):

- Verkürzter Verdichtungshub und dazu kontinuierlich angepasstes Verdichtungsverhältnis, um genau den erwünschten End-Verdichtungsdruck zu erreichen
- Verlängerter Expansionshub, um den indizierten Wirkungsgrad zu erhöhen, aber gleichzeitig noch über genug Überdruck und Enthalpie für die Turboaufladung (d.h. für die äußere Verdichtung der frischen Ladung) bereit zu stellen
- Langer Ausschiebehub, um eine ausreichende Entleerung des Zylinders zu gewährleisten
- Optimale Gestaltung der Wärmefreisetzung (maximal möglicher Isochoranteil bis $\max(p)$, maximal möglicher Isobaranteil bis $\max(T)$ und den Rest möglichst isotherm freisetzen) [1]

Ultra-Downsizing

Objectives of Ultra Downsizing (3/7):

Description of asymmetric crankshaft drive (VCSR)

- The VCSR is certainly more complicated than a classic crankshaft drive.
- The VCSR has two cranks (a shaft and an eccentric) for each cylinder, which are synchronized via disc-shaped planetary gears.
- The interior looks like as an assembly of several disc-shaped planetary gears (PG). [[11](#)], [[12](#)]
- Each cylinder is located between two such disk-shaped planetary gears.

Ultra Downsizing

Ziele von Ultra Downsizing (3/7):

Beschreibung des Asymmetrischen Kurbeltriebs (VCSR)

- Der VCSR ist sicherlich komplizierter als ein klassischer Kurbeltrieb.
- Der VCSR hat für jeden Zylinder zwei Kröpfungen (Wellen- und Exzenter-Kröpfungen), die über scheibenförmige Planetengetriebe synchronisiert sind.
- Der VCSR sieht im Inneren wie eine Ansammlung von mehreren scheibenförmigen Planetengetrieben (PG) aus. [[11](#)], [[12](#)]
- Jeder Zylinder liegt zwischen zwei solchen scheibenförmigen Planetengetrieben.



INTERNAL
COMBUSTION
ENGINES

Ultra-Downsizing

Objectives of Ultra Downsizing (4/7):

Description of the VCSR crank drive

- The special feature of these planetary gearboxes is:
- The alternating torques of two adjacent cylinders engage in PG above the eccentric shafts and accumulate in the planetary carriers.
- Simulation tools for the interpretation of PG such as MDESIGN and KISSSoft do not deal with this application!
- Therefore the VCSR was modeled, simulated, animated and designed with Matlab / Simulink / Simscape. The Atkinson-cycle simulation was carried out with Boost AVL.



Ultra Downsizing

Ziele von Ultra Downsizing (4/7):

Beschreibung des Asymmetrischen Kurbeltriebs (VCSR)

- Die Besonderheit dieser Planetengetrieben ist:
- Die wechselartigen Drehmomente von zwei benachbarten Zylinder greifen in PG über den Exzenterkröpfungen ein und summieren sich in den Planetenträgern auf.
- Simulationstools zur Auslegung von PG wie MDESIGN und KISSSoft behandeln diesen Anwendungsfall nicht!
- Daher wurde der VCSR mit Matlab / Simulink / Simscape modelliert, simuliert, animiert und ausgelegt. Die Simulation des Atkinson-Zyklus wurde mit Boost AVL durchgeführt.

Ultra-Downsizing

Objectives of Ultra Downsizing (5/7):

Description of the asymmetrical VCSR crank drive

- The ring gear is retained and rotated relatively for a few degrees against a zero-position for continuous adjustment of the CR.
- In this version of the VCSR, all four strokes take place only in one revolution of the shaft.
- The torque is delivered at half the speed of the flywheel. Similar to the two-stroke engines
- In the implementation of the Atkinson cycle by VCSR, the following should be weighed against the expected efficiency gain:



Ultra Downsizing

Ziele von Ultra Downsizing (5/7):

Beschreibung des Asymmetrischen Kurbeltriebs (VCSR)

- Das Hohlrads wird festgehalten und nur zur kontinuierlichen Einstellung des Verdichtungsverhältnisses einige wenige Grad gegenüber einer Nullstellung verdreht wird.
- In diese Version des VCSR Kurbeltriebs erfolgen alle vier Hübe nur in einer Umdrehung der Welle.
- Das Drehmoment wird bei halber Drehzahl des Schwungrades abgegeben. Ähnlich wie bei Zweitaktmotoren.
- Bei der Implementierung des Atkinson-Zyklus durch VCSR soll man gegenüber dem zu erwarteten Wirkungsgrad-Gewinn folgendes abwägen:

Ultra-Downsizing

Objectives of Ultra Downsizing (6/7):

Considerations for implementation:

- Construction complexity, number of components in motion, simplicity of mass balance
- Increasing in weight, in necessary space, in friction, etc.
- Therefore, a crankshaft with extended expansion has to offer also the continuous variation of the compression ratio in order to be accepted.
- The VCSR crankshaft is a good solution for an asymmetric crankshaft drive that can be implemented with a reasonable degree of complexity.



INTERNAL
COMBUSTION
ENGINES

Ultra Downsizing

Ziele von Ultra Downsizing (6/7):

Abwägungen bei der Implementierung:

- Aufbau-Komplexität, Anzahl der beweglichen Bauteile, Einfachheit des Massenausgleichs
- Zunahme des Gewichts, des notwendigen Bauraums, der Reibungen usw.
- Daher muss ein Kurbeltrieb mit verlängerter Expansion auch die kontinuierliche Variation des Verdichtungsverhältnisses anbieten, um akzeptiert werden zu können.
- Der VCSR Kurbeltrieb stellt eine gute Lösung für einen asymmetrischen Kurbeltrieb dar, die mit einem vernünftigen Grad an Komplexität usw. realisierbar ist.

Ultra-Downsizing

Objectives of Ultra Downsizing (7/7):

Implementation of the asymmetric crankshaft drive (VCSR)

- The main dimensions of the existing crankcase are almost unaffected by the implementation of the VCSR.
- In a tunnel crankcase design, the VCSR can be implemented most simply. Due to the large diameter of the shaft bearings, needle bearings could be used instead of plain bearings.
- The VCSR can be manufactured as a separate component by a supplier company and installed in all engine manufacturers (cars, trucks, etc.) according to the modular principle.



Ultra Downsizing

Ziele von Ultra Downsizing (7/7):

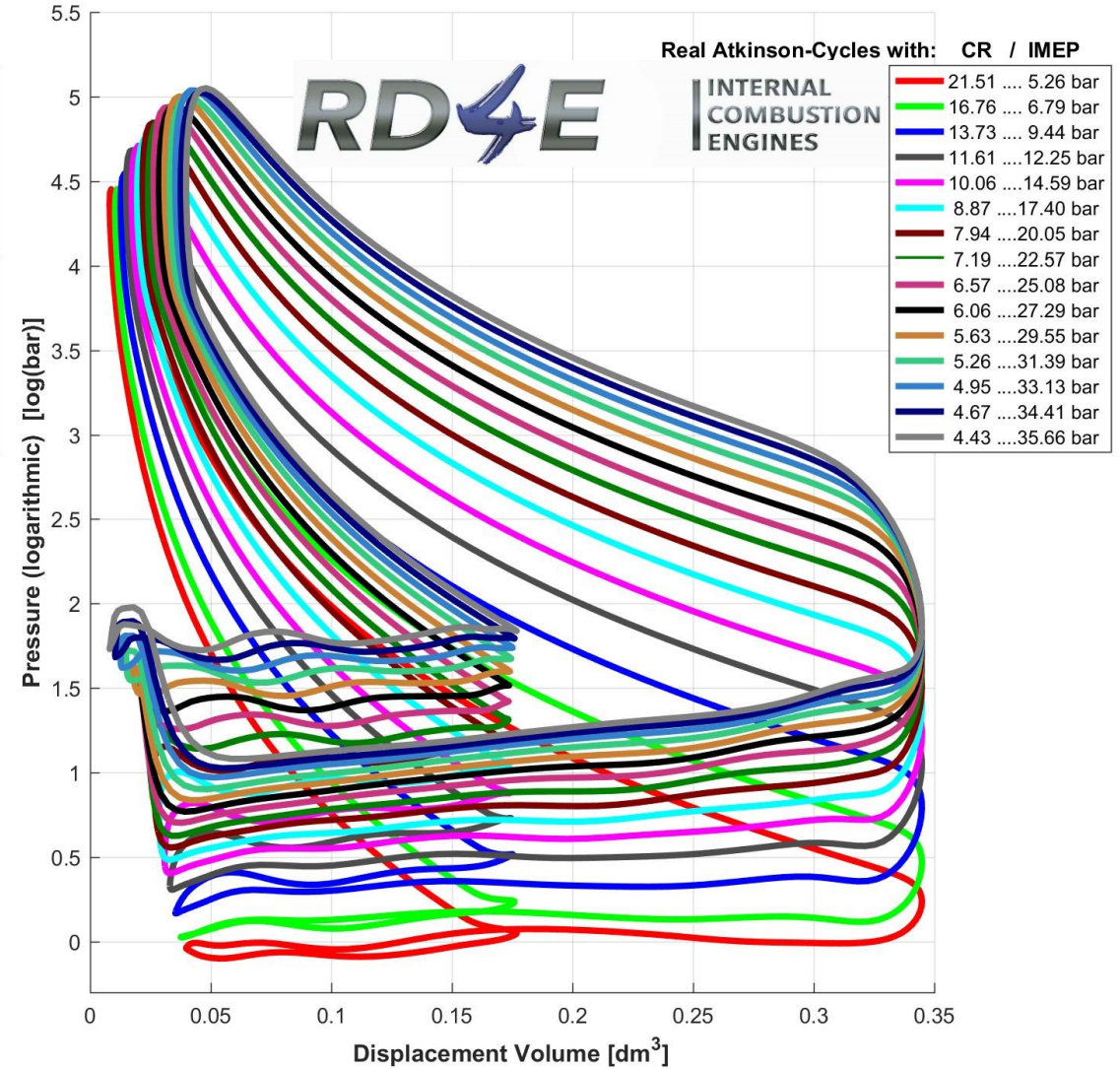
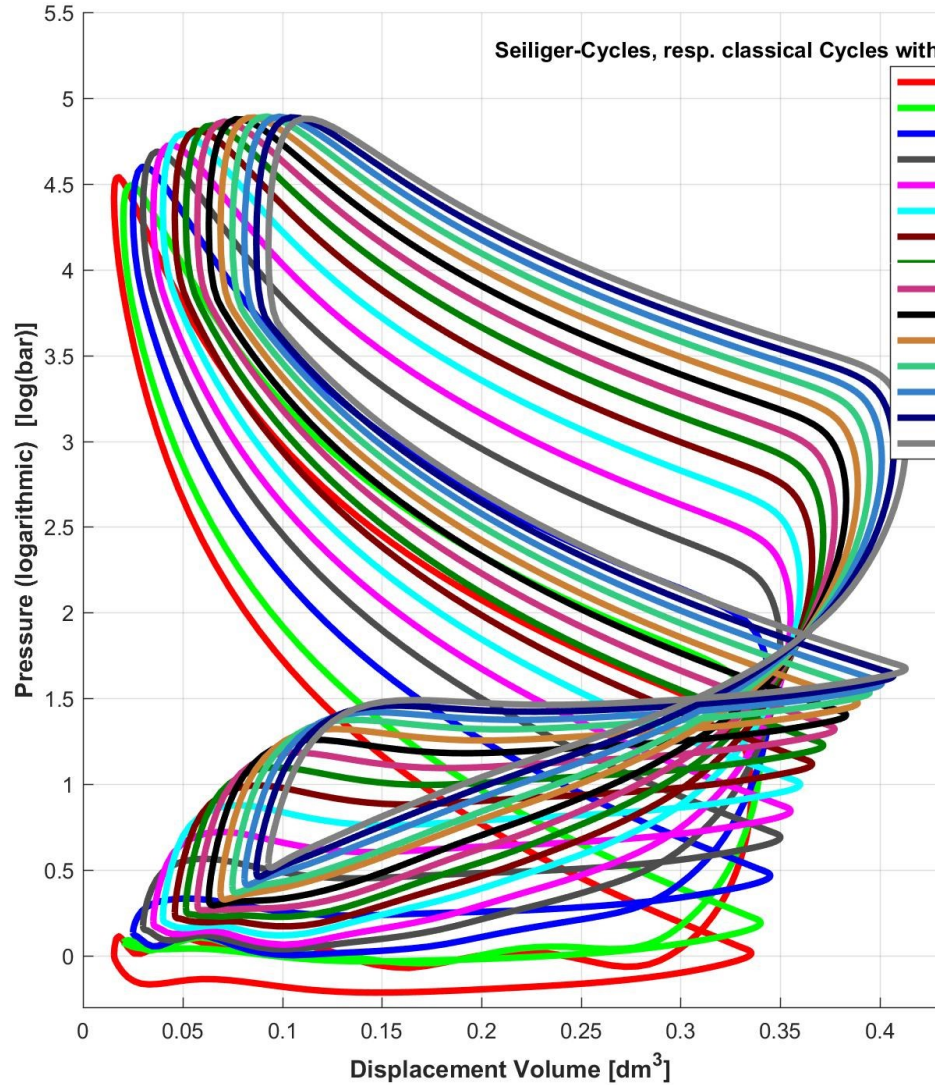
Implementierung des Asymmetrischen Kurbeltriebs (VCSR)

- Die Hauptabmessungen der vorhandenen Kurbelgehäuse sollen sich durch den Einsatz des VCSR fast kaum verändern.
- In einer Tunnel-Kurbelgehäuse-Bauart kann der VCSR am einfachsten implementiert werden. Wegen der großen Durchmesser der Wellenlager könnten Nadellager anstelle von Gleitlager zum Einsatz kommen.
- Der VCSR kann dabei als ein getrenntes Bauteil von einer Zulieferfirma gefertigt und bei allen Motorenhersteller (PKW, LKW usw.) gemäß des Baukastenprinzips eingebaut werden.

Basic Engine with VCR

VCSR Engine

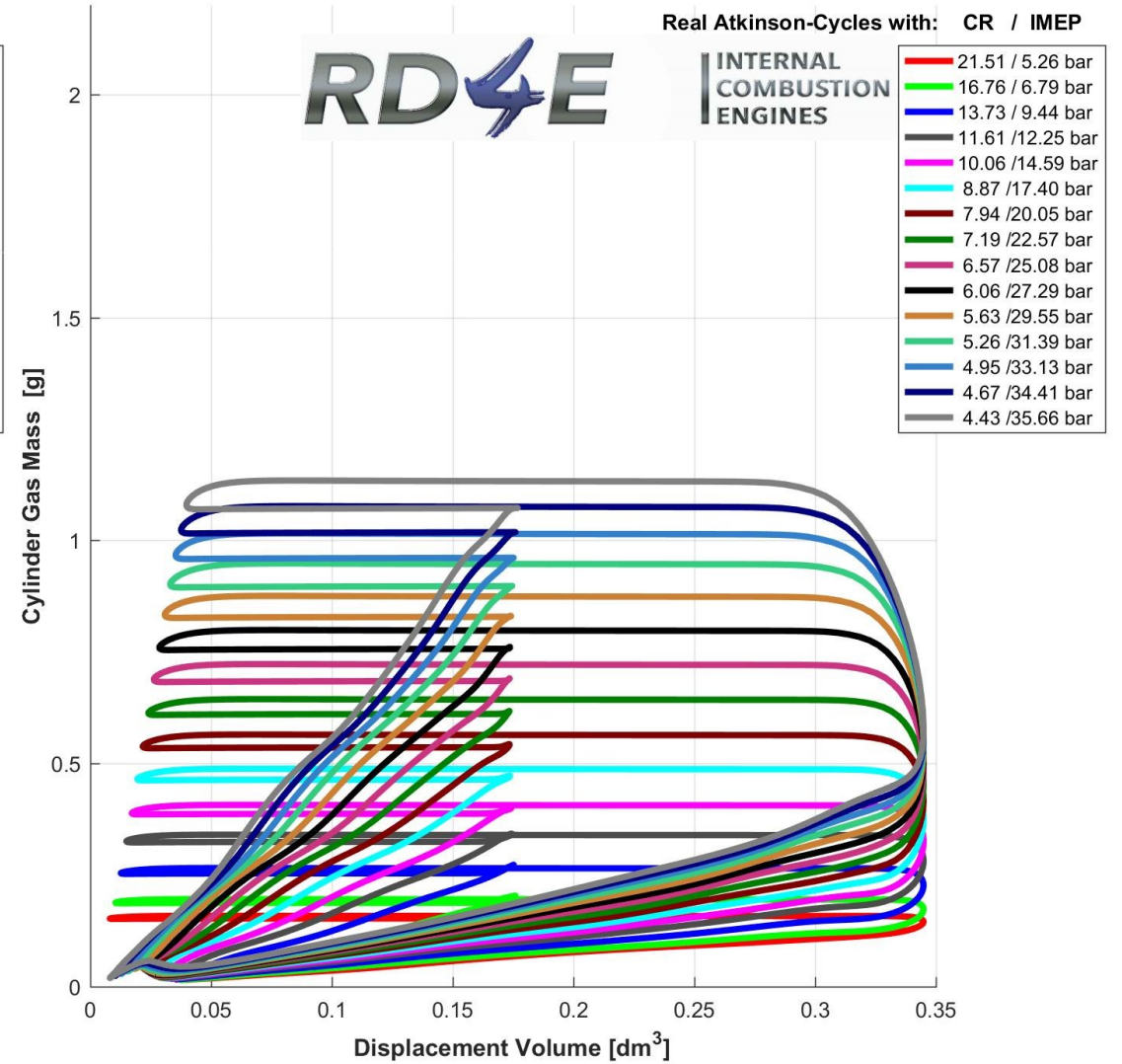
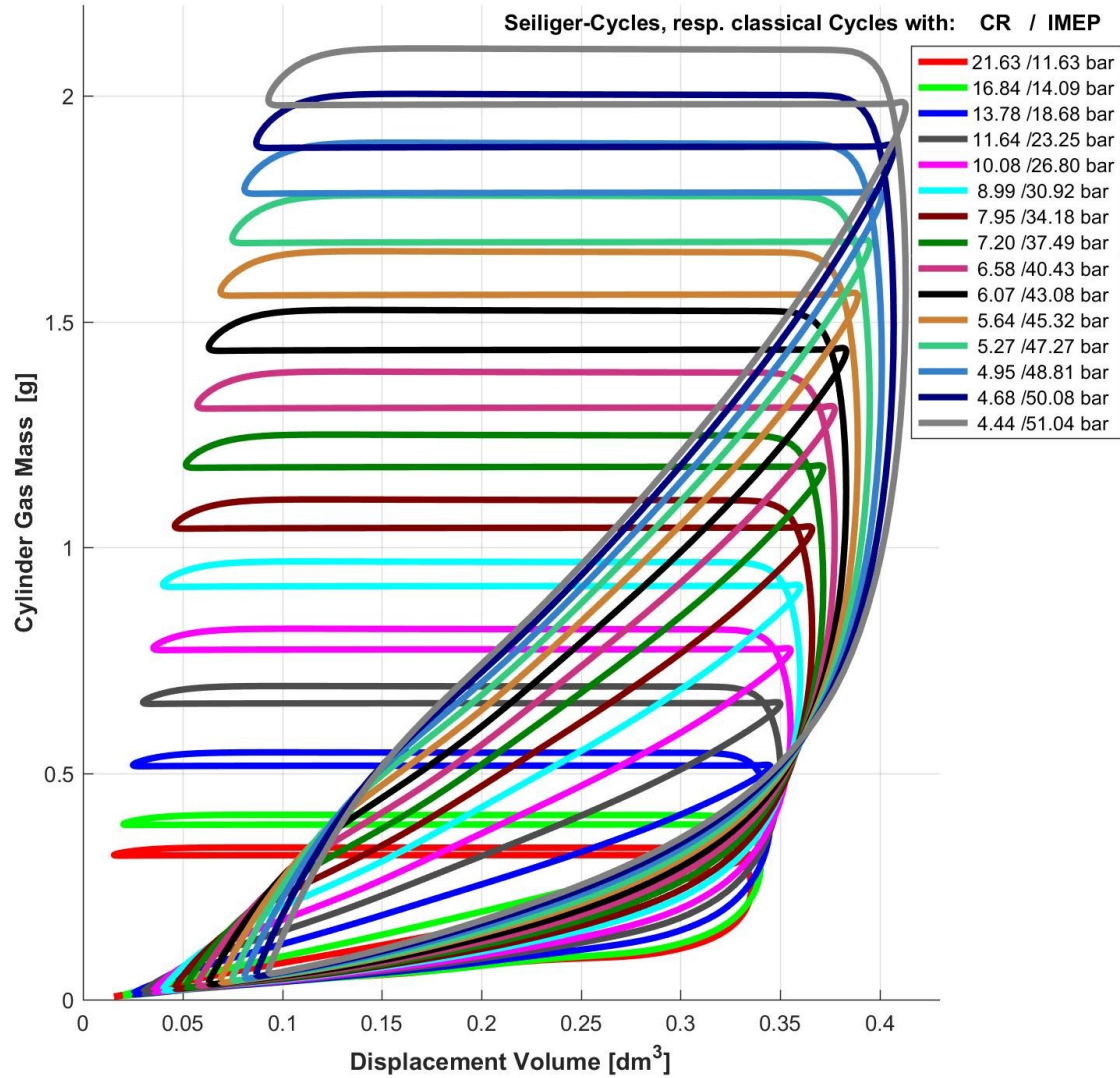
Performance comparison of the Seiliger (resp. classical) and Real-Atkinson cycles, the last is implemented by means of the VCSR asymmetrical crankshaft drive;
 AFR = 1, Heat Release (Vibe) und Heat Losses are kept identical in both cycles



Basic Engine with VCR

VCSR Engine

Performance comparison of the Seiliger (resp. classical) and Real-Atkinson cycles, the last is implemented by means of the VCSR asymmetrical crankshaft drive; AFR = 1, Heat Release (Vibe) und Heat Losses are kept identical in both cycles

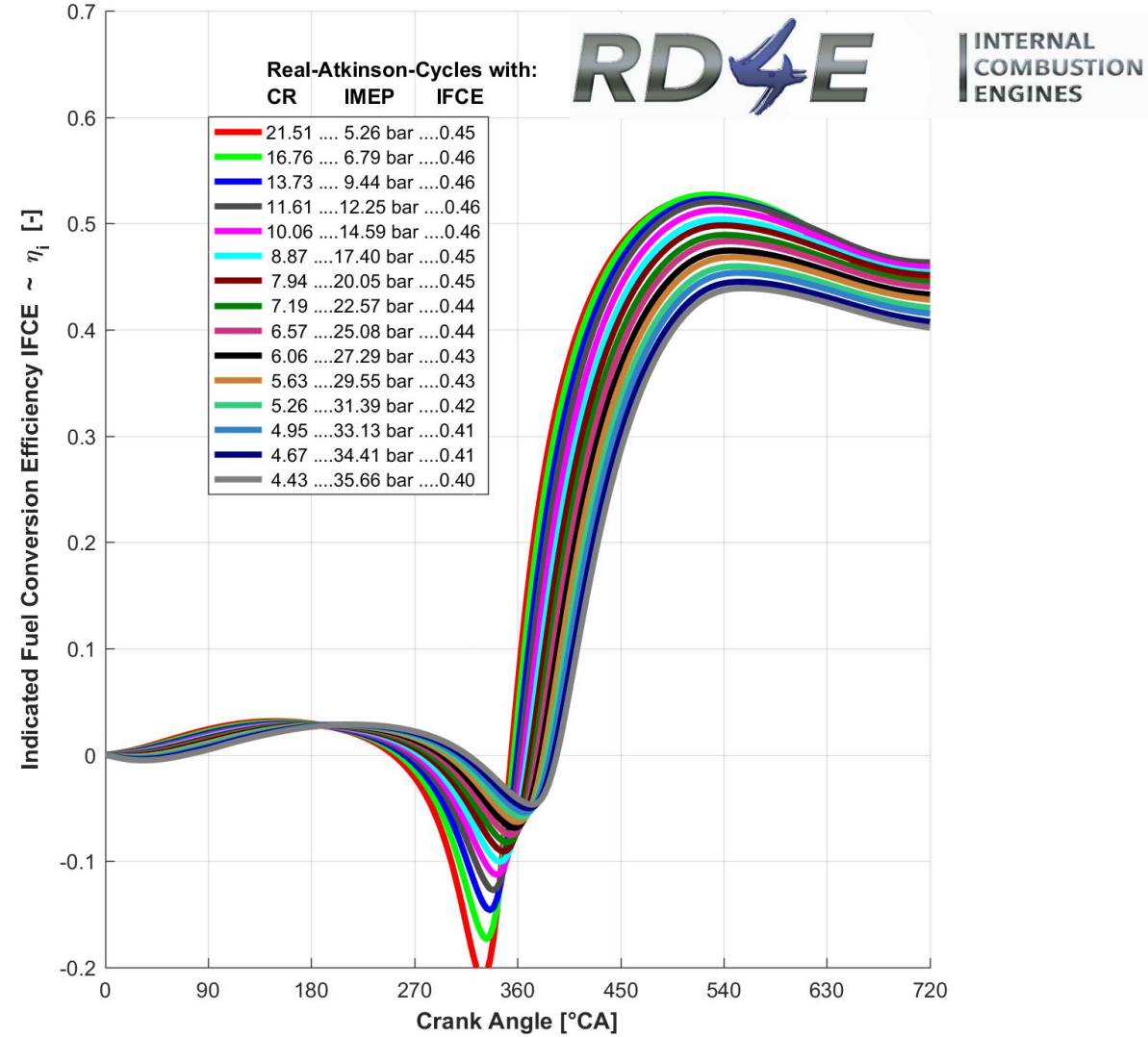
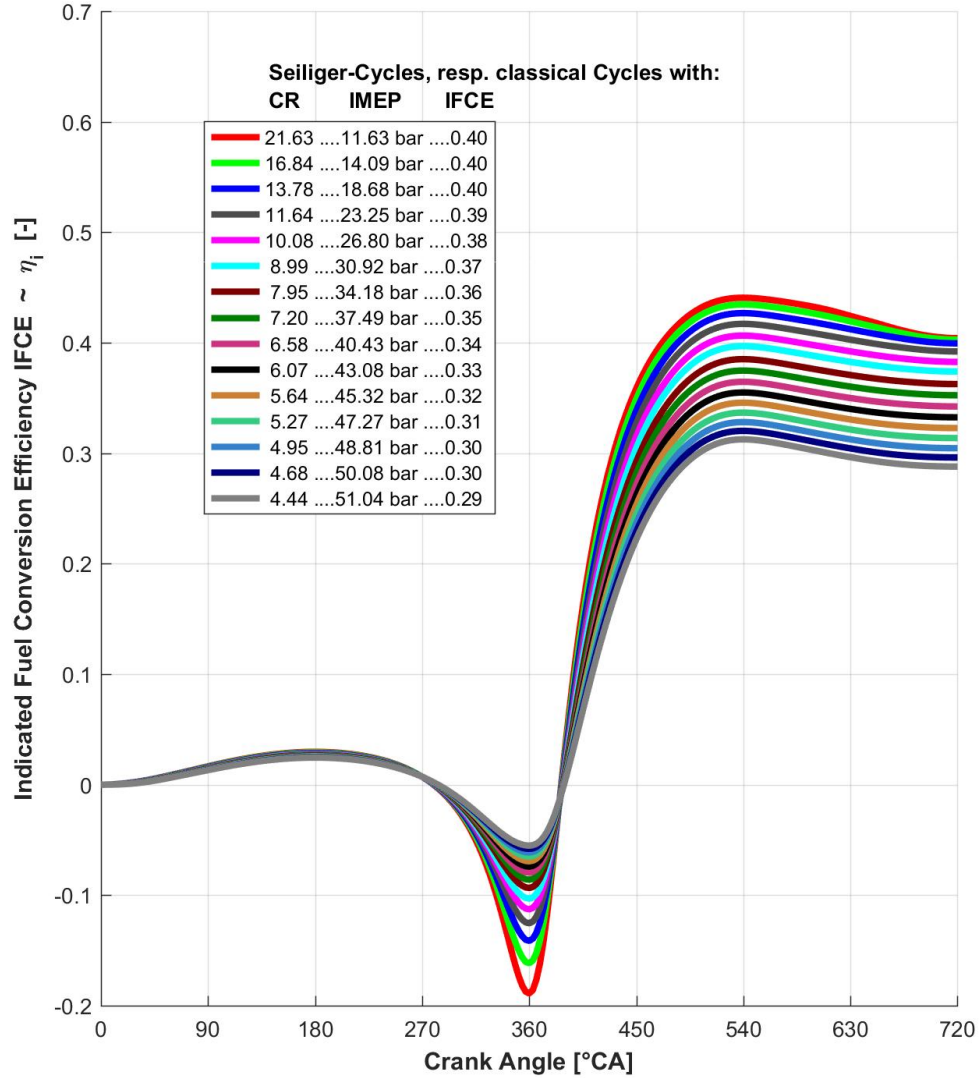


Basic Engine with VCR

VCSR Engine

IMEP = Indicated Mean Pressure; CR = Compression Ratio

Performance comparison of the Seiliger (resp. classical) and Real-Atkinson cycles, the last is implemented by means of the VCSR asymmetrical crankshaft drive; AFR = 1, Heat Release (Vibe) und Heat Losses are kept identical in both cycles

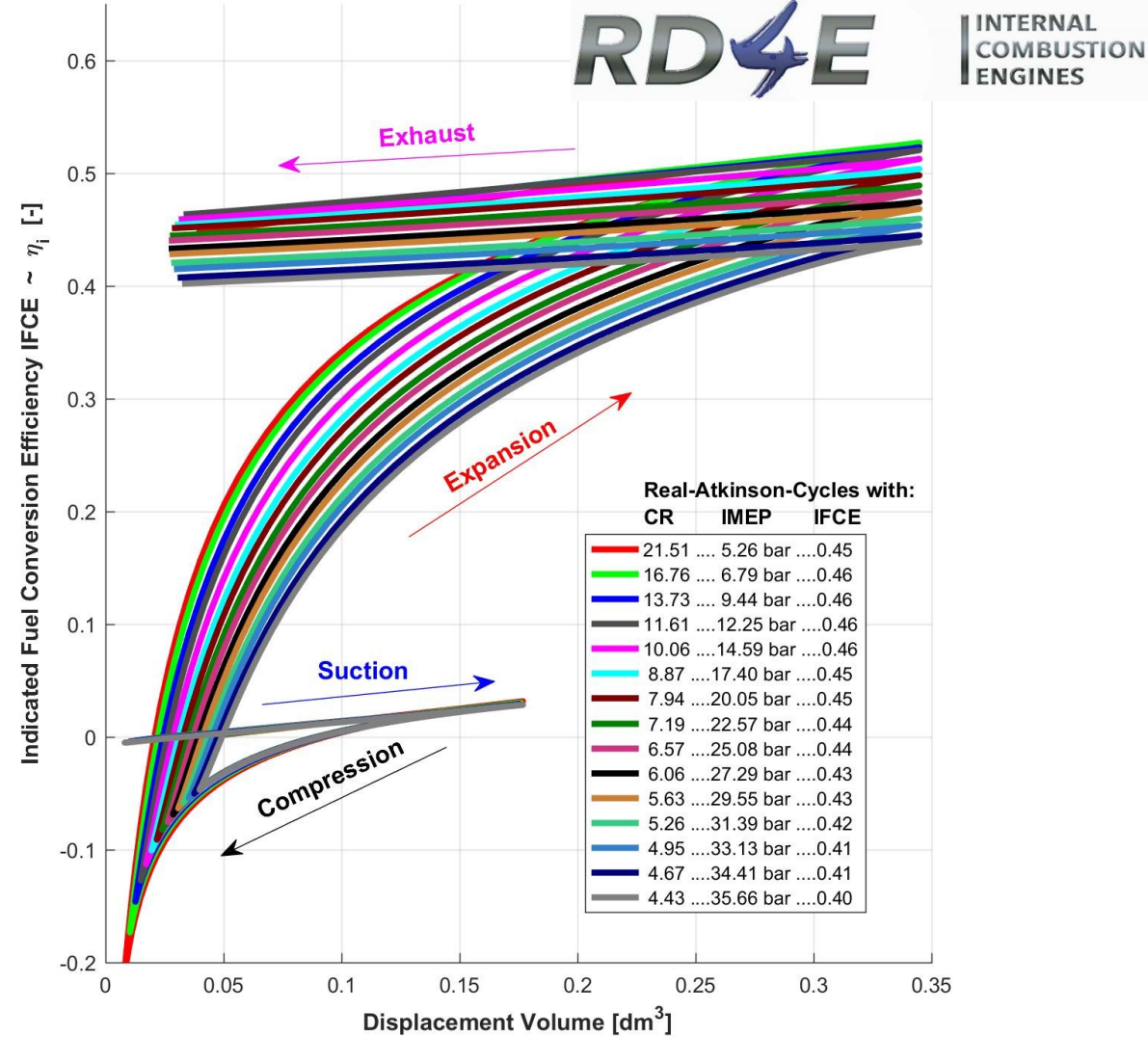
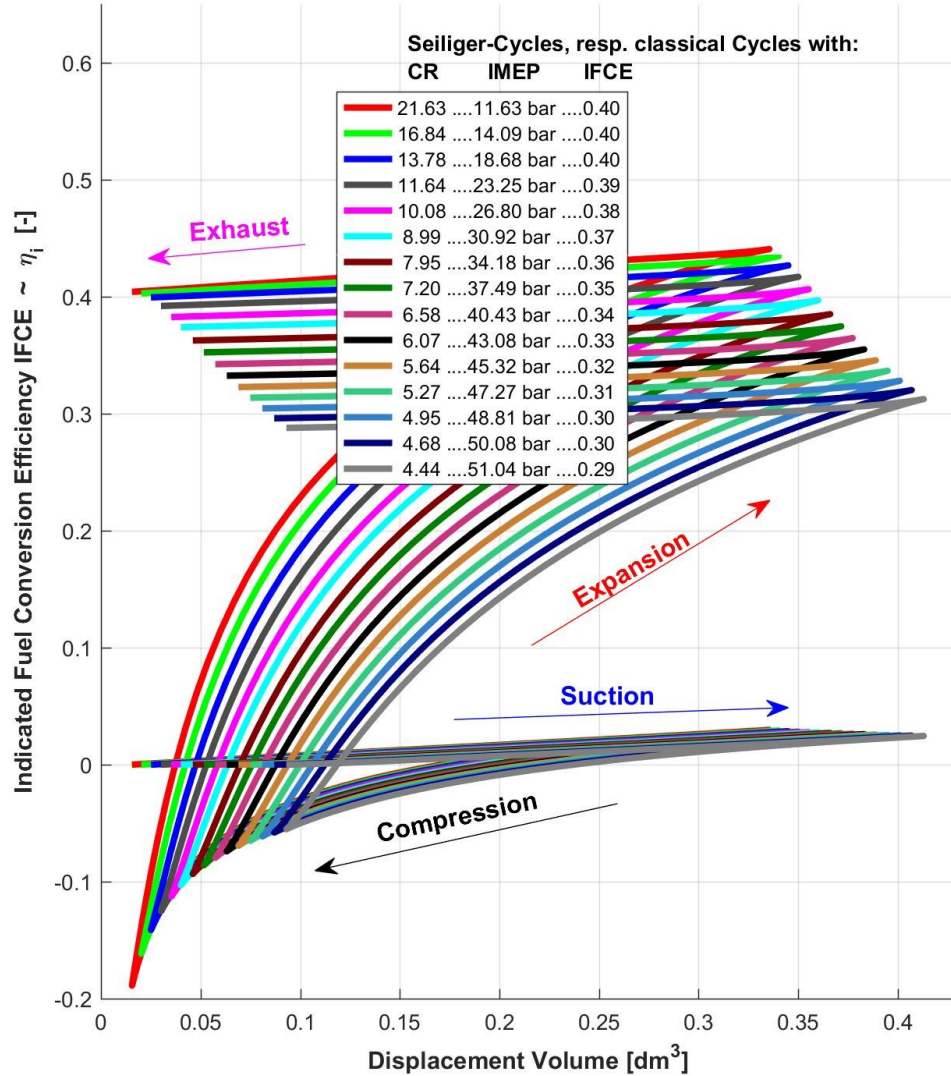


Basic Engine with VCR

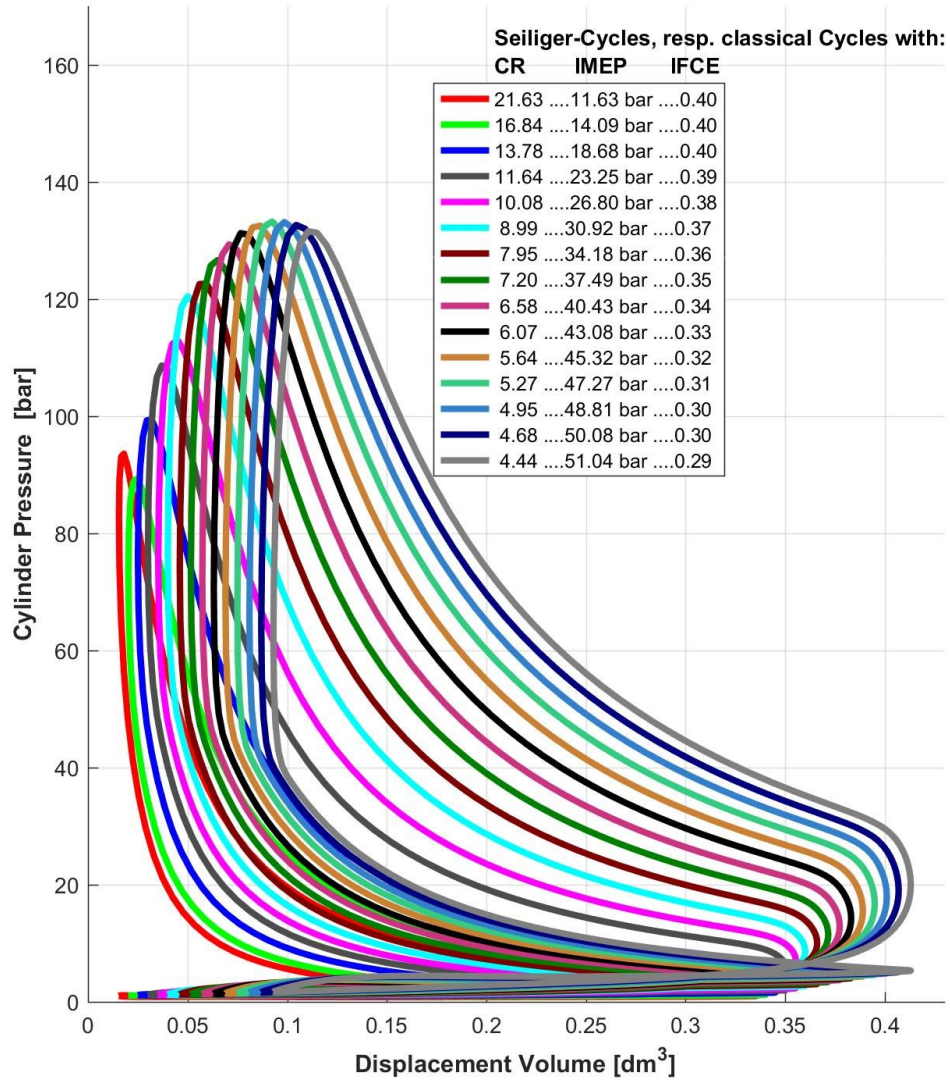
VCSR Engine

IMEP = Indicated Mean Pressure; CR = Compression Ratio

Performance comparison of the Seiliger (resp. classical) and Real-Atkinson cycles, the last is implemented by means of the VCSR asymmetrical crankshaft drive; AFR = 1, Heat Release (Vibe) und Heat Losses are kept identical in both cycles

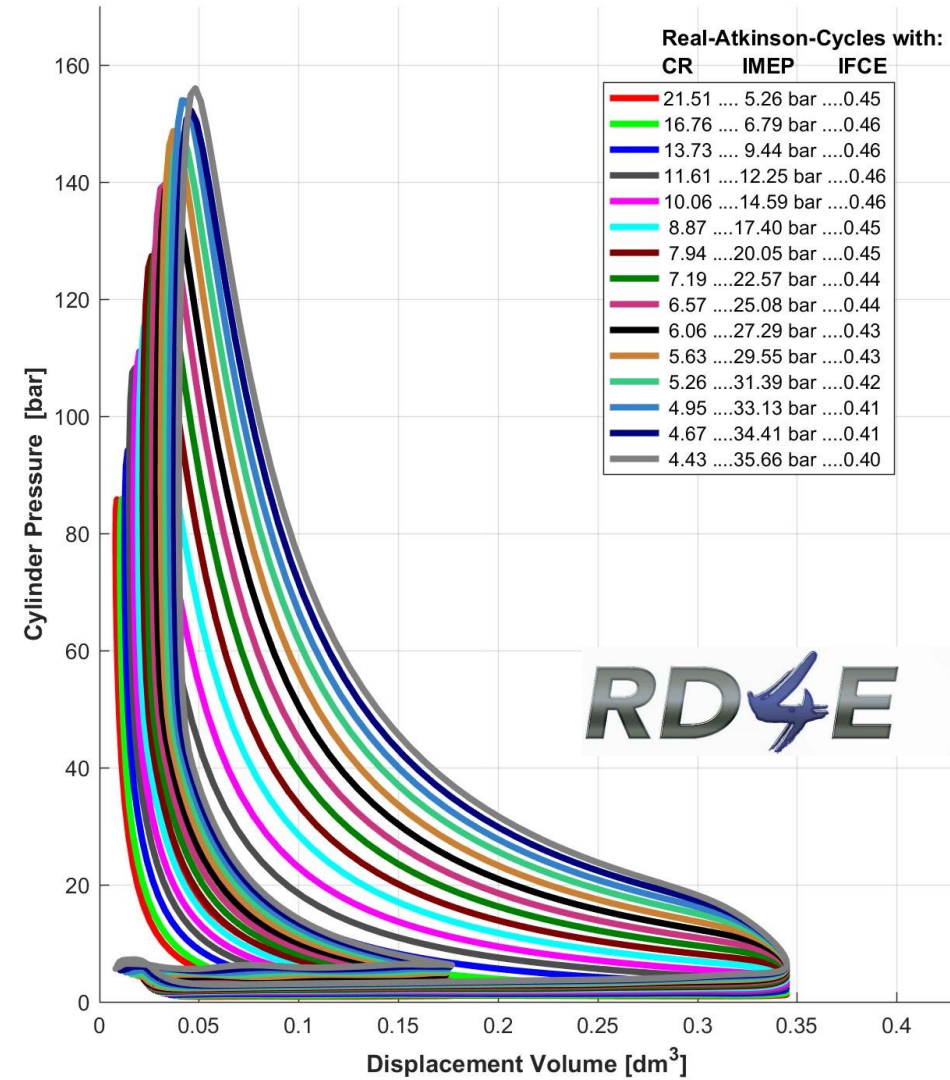


Basic Engine with VCR



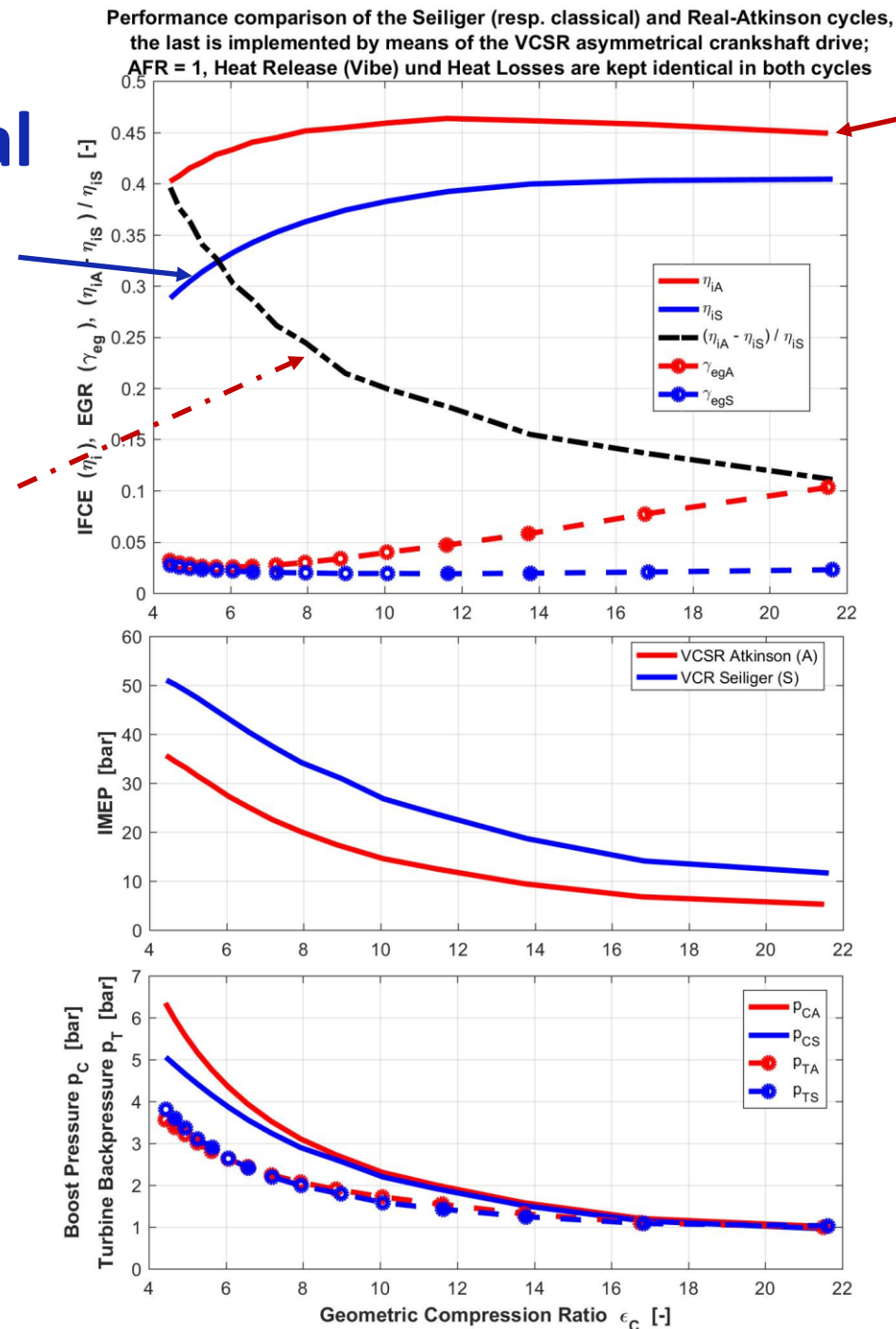
VCSR Engine

Performance comparison of the Seiliger (resp. classical) and Real-Atkinson cycles, the last AFR = 1, Heat Release (Vibe) und Heat Losses are



Improvement potential of a classical Engine with VCR

Efficiency gain of VCSR Engine versus classical Engine

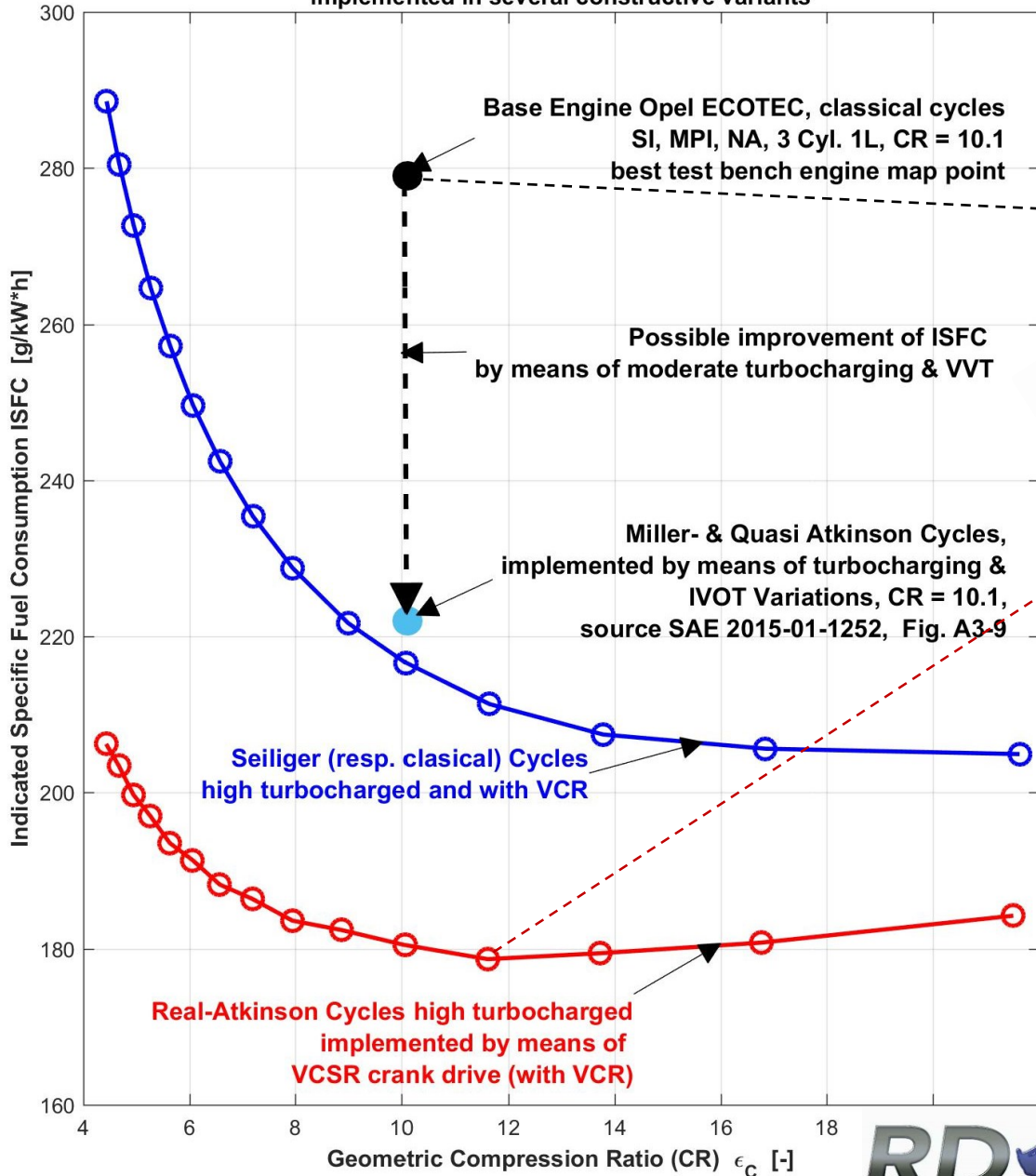


Improvement potential of the VCSR Engine

IFCE = Indicated Fuel Conversion Efficiency
 IMEP = Indicated Mean Pressure
 CR = Compression Ratio



ISFC Comparison between the performances of a Basic SI 3 Cyl. 1L Engine implemented in several constructive variants



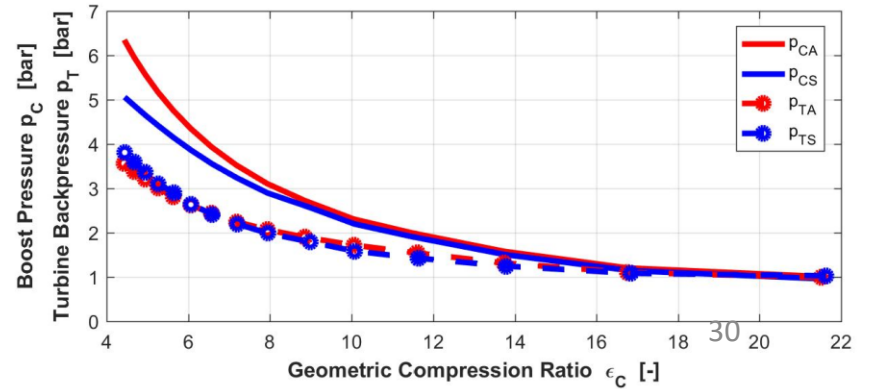
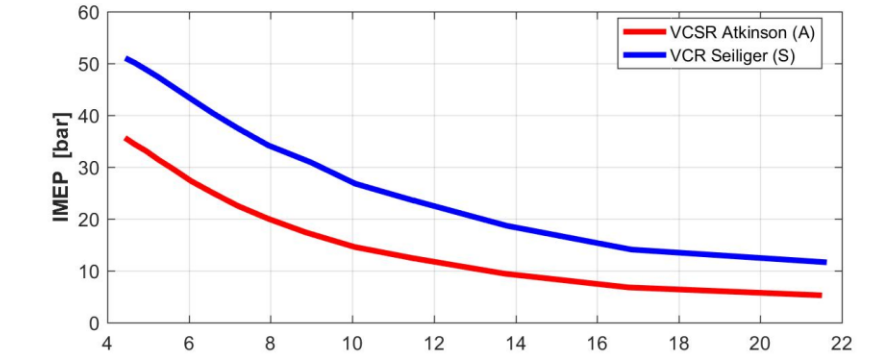
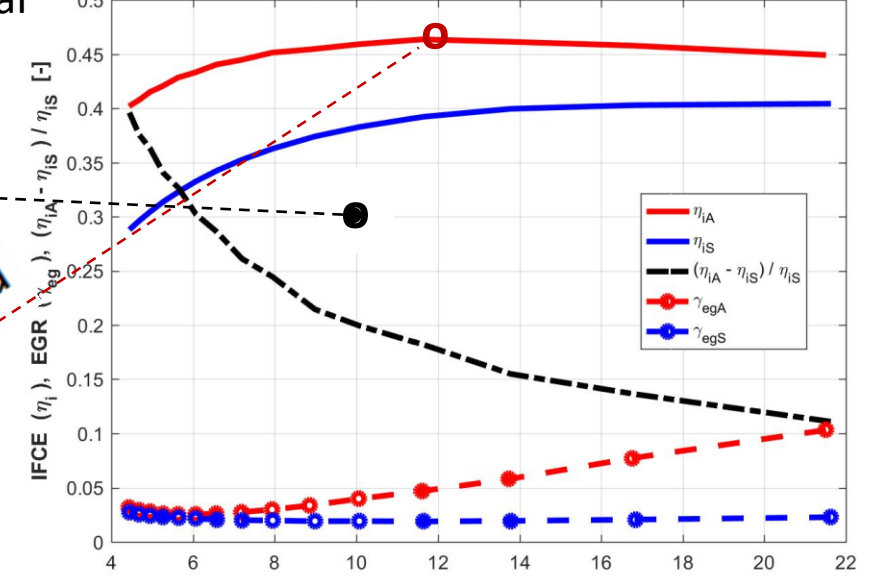
IFSC and IFCE are inversely proportional quantities!

$$ISFC = \frac{1}{IFCE \cdot H_u}$$

H_u Fuel lower heating value ca. 42 MJ/kg Heizwert des Kraftstoffes

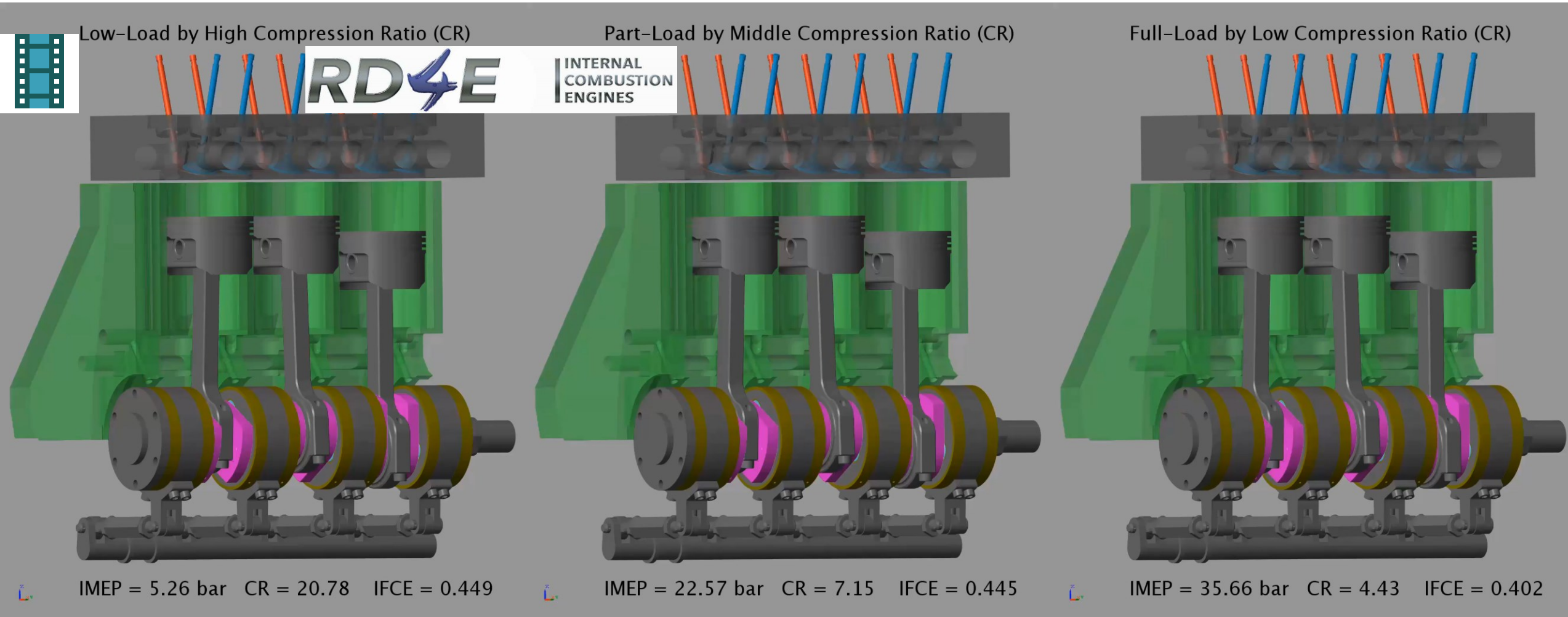
IMEP = Indicated Mean Pressure

Performance comparison of the Seiliger (resp. classical) and Real-Atkinson cycles, the last is implemented by means of the VCSR asymmetrical crankshaft drive; AFR = 1, Heat Release (Vibe) and Heat Losses are kept identical in both cycles



VCSR Engine from Low- to Full-Load, Speed 3500 rpm,

Full-Load: indicated Torque = 294 Nm, indicated Power = 107.6 kW



Ultra-Downsizing

Animations of all Asymmetric Crank Drives (VCSR) of the family described in [11] and [12] related to their Figures.

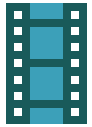


Fig. 1 - 4

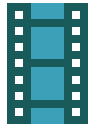


Fig. 5 - 9

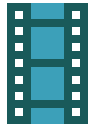


Fig. 10

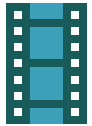


Fig. 11 - 14



Fig. 15 - 17

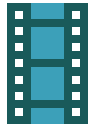


Fig. 18 - 20

Ultra Downsizing

Animationen aller Asymmetrischen Kurbeltriebe (VCSR) der Familie beschrieben in [11] und [12] bezogen zu ihren Figuren.



Fig. 1 - 4



Fig. 5 - 9



Fig. 10



Fig. 11 - 14



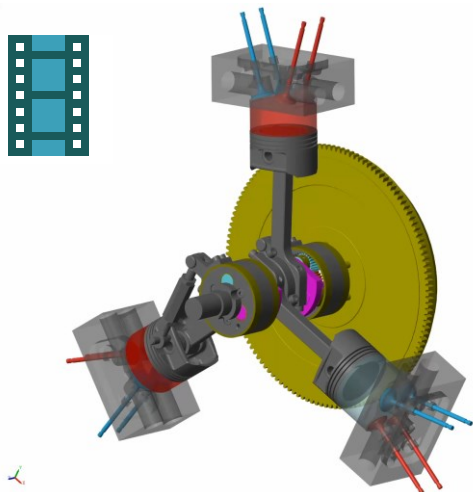
Fig. 15 - 17



Fig. 18- 20

Ultra-Downsizing

Animations of the Asymmetric Crank Drive (VCSR) described in [11] and [12] in figures 5 to 10 for 3 cylinders in a star or Y arrangement.



Low Load

high

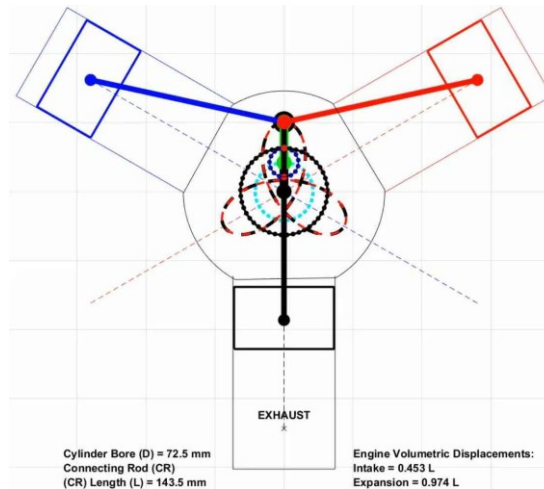
VCR



Mean Load

middle

VCR



Full Load

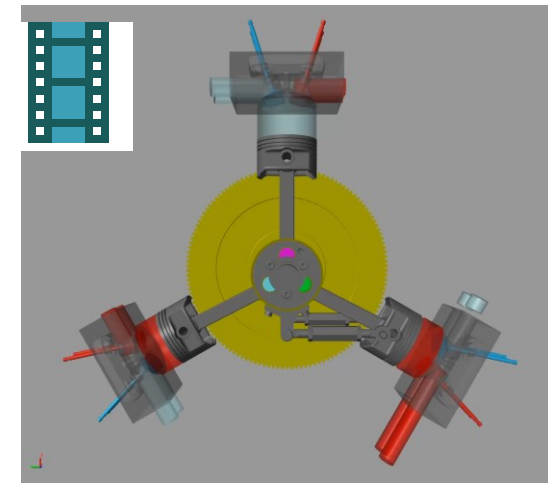
low

VCR



Ultra Downsizing

Animationen des Asymmetrischen Kurbeltriebs (VCSR) beschrieben in [11] und [12] in den Fig. 5 bis 10 für 3 Zylinder in einer Stern- bzw. Y-Anordnung.



Mittellast

mittleres

VCR



Vollast

niedriges

VCR



Literatur / References

1. [Gheorghiu, V. Ultra-Downsizing of Internal Combustion Engines, SAE World Congress, April 2015, Detroit, USA](#)
2. [Schutting, E. u.a. Herausforderungen und Lösungsansätze bei der Diagnostik eines Ottomotors mit verlängerter Expansion, Internationales Symposium für Verbrennungsdiagnostik, Baden-Baden 2014](#)
3. [Gheorghiu, V. Soot Sensor for Emission onboard control systems, SAE 2012 On-Board Diagnostics Symposium, Stuttgart](#)
4. [Gheorghiu, V. Neue Modelle für das Motormanagement \(HAW interne Präsentation\) 2004](#)
5. [Gheorghiu, V. Einsatz der Modellierung und Simulation in der Motorregelung \(HAW interne Präsentation\) 2005](#)
6. [Gheorghiu, V. Gegenwärtige und zukünftige Problematik der Verbrennungsmotoren für reine und hybride Fahrzeugantriebe \(HAW interne Präsentation\) 2006](#)
7. [Gheorghiu, V. u. a. Investigation on the fuel distribution in DI Diesel engine combustion chambers and its influence on soot emission, CIMAC 1991](#)
8. [Gheorghiu, V. System und Regelungskonzept für zukünftige Turbolader- Abgasrückführsysteme für turboaufgeladene Diesel Pkw, Aufladetechnische Konferenz Dresden 2005](#)
9. [Gheorghiu, V. u.a. Model of a Supercharged Diesel Engine with High and Low-Pressure EGR as Part of an NMPC for ECU Implementation, SAE 2007-24-0084, 2007](#)
10. [Gheorghiu, V. u.a. System Structure and Controller Concept for an Advanced Turbocharger/EGR System for a Turbocharged Passenger Car Diesel Engine, SAE 2005-01-3888, 2005](#)
11. [Gheorghiu, V., Patent Application DE 10 2013 003682 \(A1\) & Patent \(Patentschrift\) DE 10 2013 003682 \(B4\), 2018.](#)
12. [Gheorghiu, V., Patent Application EP 2772624 \(A1\), 2014.](#)

Copyright Victor Gheorghiu 2017-2020