

## Master Studiengang

### Verbrennungsmotoren 3 (VM3) / WS 2016-17

#### Termine:

- **Vorlesung VM3:** jeweils Dienstags, von 09:00 bis 10:30 Uhr  
Ort: Raum R 07 im Verwaltungsgebäude,  
Albert-Einstein-Str. 2
  
- **Übung VM3:** jeweils Mittwochs  
Zeit: 11.00 bis 13.00 Uhr  
Raum: 109 PC-Pool  
Seminarleiter: Dr. M. Niendorf

#### Externe Bachelor-/Masterarbeiten:

- Externe Bachelor-/Masterarbeiten müssen im Vorfeld mit Lehrstuhl abgestimmt werden
- Seitens LKV werden keine Vertraulichkeitserklärungen sowie Sperrfristen für Bachelor-/Masterarbeiten durch Industriepartner akzeptiert!



## Literatur:

- Pischinger, R. et al: Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine, Springer-Verlag
- Bosnjakovic, F.; Knoche, K.F.: *Technische Thermodynamik, Teil I*, Steinkopff-Verlag
- Baehr, H.D.: *Thermodynamik*, Springer-Verlag
- Hiereth, H.: Aufladung der Verbrennungskraftmaschine, Springer-Verlag
- Brass, H.-H., Seiffert, U.: Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, Vieweg
- LKV Vorlesungsskript

## Zeitschriften:

- Motortechnische Zeitschrift (MTZ)



## Vorlesungsskript:

- Vorlesungsfolien werden jeweils nach der Vorlesung auf der Website des Lehrstuhls LKV eingestellt

<http://www.lkv-rostock.de/>

### Anmeldung Uni-Rostock (Vorlesungsunterlagen)

- Benutzername
- Passwort

### Öffnen pdf-Datei:

- Passwort: seiliger



1. Entwicklungstendenzen bei Kraftstoffen, Brennverfahren, CO<sub>2</sub>-Gesetzgebung und Emissionen
2. Entwicklungstendenzen bei Ottomotoren mit innerer und äußerer Gemischbildung sowie Steigerungsmöglichkeiten der spezifischen Motorleistung
3. Entwicklungstendenzen / Steigerung der spezifischen Leistung bei Dieselmotoren (innere Gemischbildung)
4. Wechselwirkungen von Brennverfahren und Abgasnachbehandlungsmodulen für Otto- und Dieselmotoren
5. Indizieren von Verbrennungsmotoren
  - Bedeutung der Zylinderdruckindizierung
  - Piezoelektrische/Piezo-resistive Druckaufnehmer
  - Bestimmung des oberen Totpunktes
  - Nulllinienfindung
  - Wahl der Abtastschrittweite
  - Glättverfahren



### 5. Fortgeschrittene Motorinnenrechnung

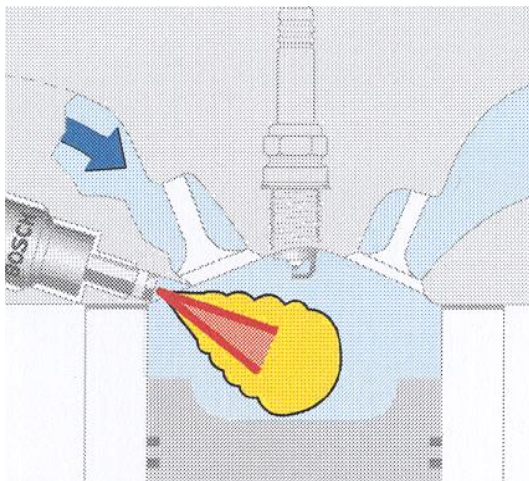
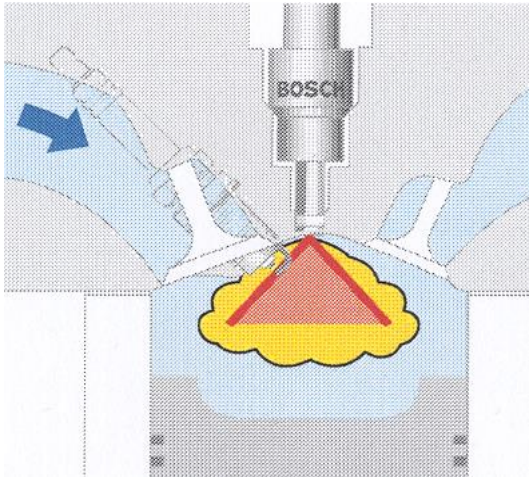
- spezifische Motorgrößen
- Wärmeübergang (Woschni, Hohenberg, Bargende)
- VIBE Brennverlauf

### 6. Messtechnik

- Druck- und Temperaturerfassung
- Abgasmesstechnik
- Sensorik



### Benzin-Direkteinspritzung (BDE) / Strahlgeführt



#### Verfahrenskonzept

- Kraftstoff wird gegenüber WgBV über Mehrlochventil und weitestgehend unter Vermeidung von Wandkontakten eingebracht
- Sichere Entflammung durch geeignete Zuordnung von Injektor und Zündkerze erforderlich

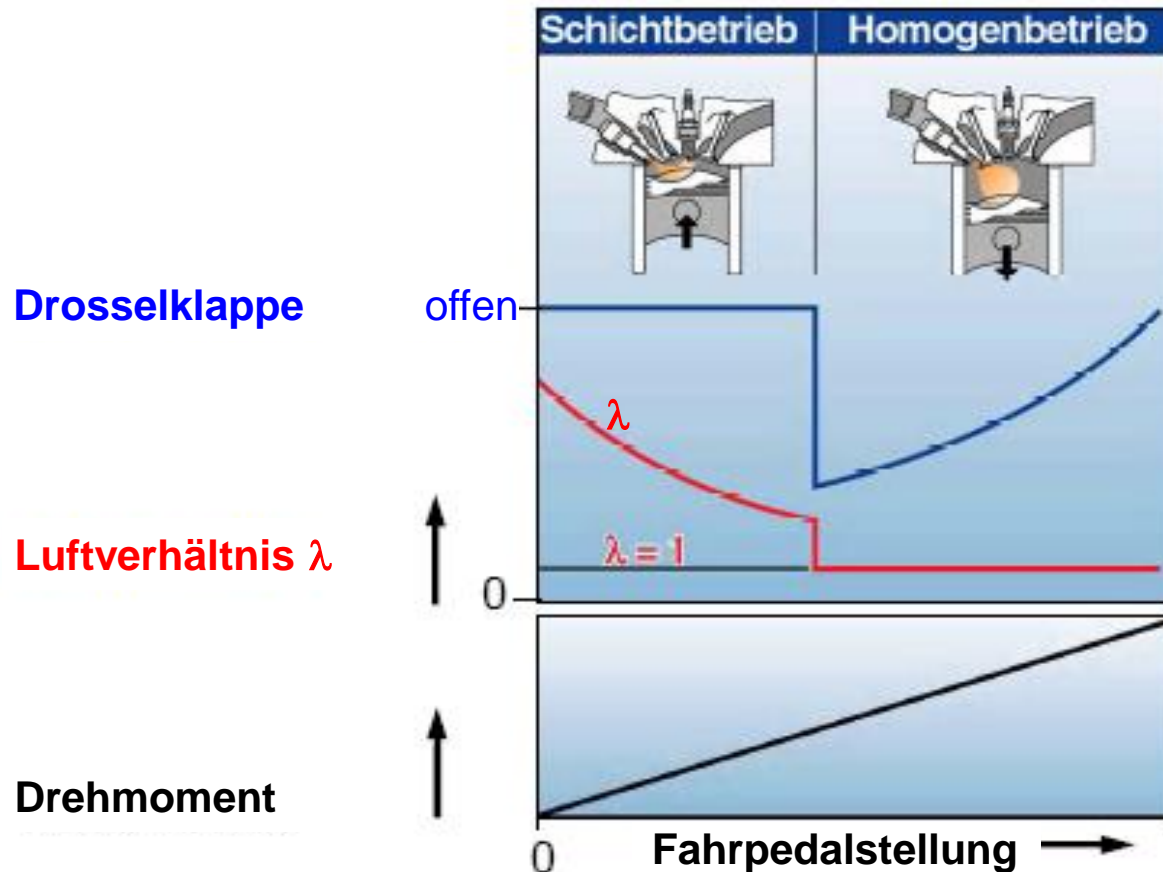
#### Vorteil

- Deutlich verringerter Kraftstoff-Wandauftrag – bessere Gemischhomogenisierung
- Erweiterter Zündwinkelbereich zum WgBV mit günstigeren Verbrennungsschwerpunkt

#### Nachteile

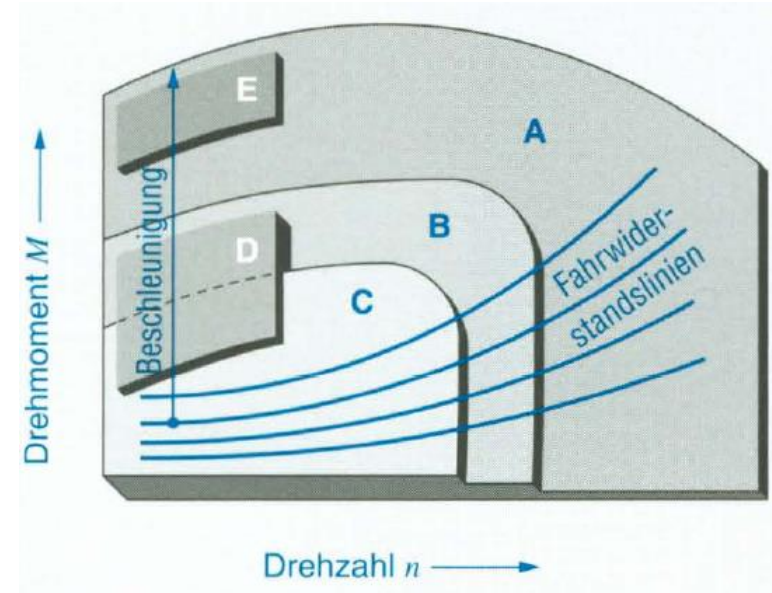
- Höhere Anforderungen an Zerstäubungs- und Gemischbildungsprozess
- Höherer Kraftstoffsystemdruck notwendig
- Genaue Abstimmung von Einspritzung und Ladungsbewegung
- Standzeitforderungen an Zündkerze größer

## Umschaltstrategie Schichtbetrieb ( $\lambda > 1$ ) / Homogenbetrieb ( $\lambda = 1$ )



## Betriebsarten

- Bei der Benzin-Direkteinspritzung sind sechs Betriebsarten bekannt (s. Bild):
  - Schichtbetrieb,
  - Homogenbetrieb,
  - Homogen-Mager-Betrieb,
  - Homogen-Schicht-Betrieb,
  - Homogen-Klopfschutz-Betrieb und
  - Schicht-Katheizen.

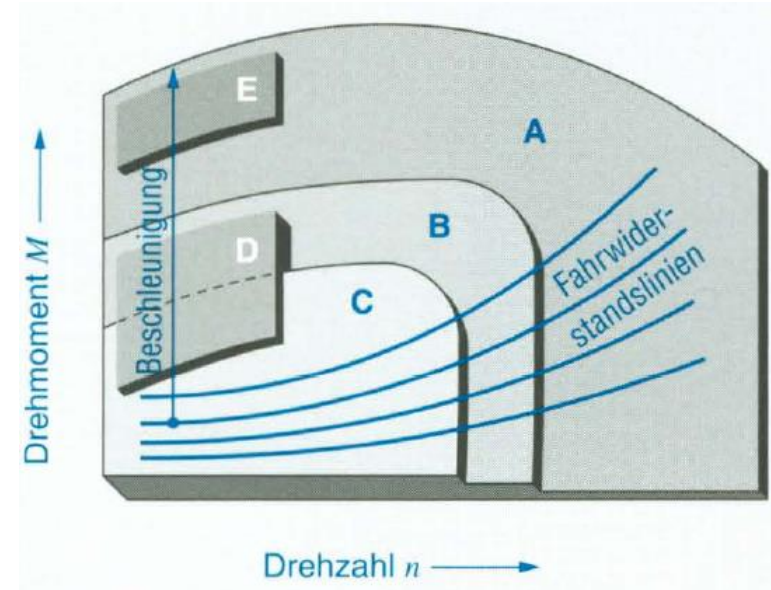


- A Homogenbetrieb mit  $\lambda = 1$ ; diese Betriebsart ist in allen Bereichen möglich
- B Magerbetrieb oder Homogenbetrieb  $\lambda = 1$  mit AGR; diese Betriebsart ist auch im Bereich C und D möglich
- C Schichtbetrieb mit AGR Betriebsarten mit Doppeleinspritzung:
- C Schicht-Katheizen-Betrieb; gleicher Bereich wie Schichtbetrieb mit AGR
- D Homogen-Schicht-Betrieb
- E Homogen-Klopfschutz-Betrieb

Quelle: Bosch

## Betriebsarten

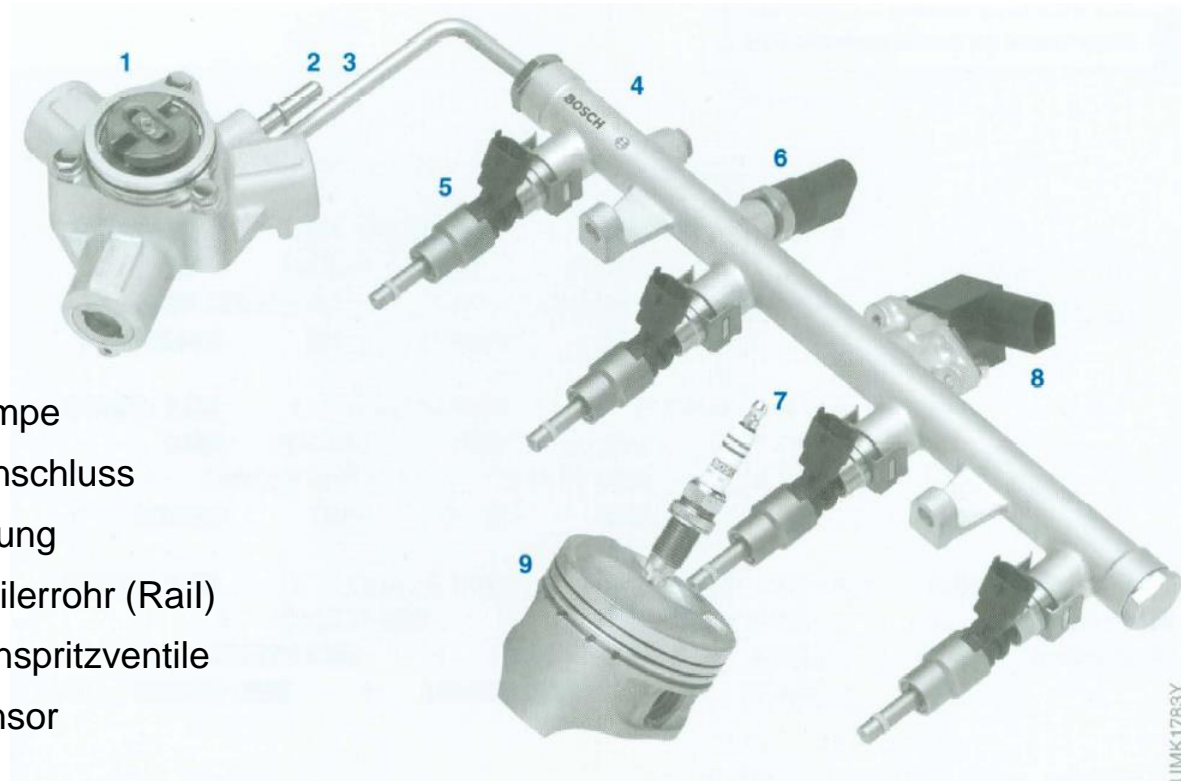
- Diese Betriebsarten ermöglichen eine **bestmögliche Anpassung für jeden Betriebszustand** des Motors.
- Die **Umschaltung der Betriebsart** im Fahrbetrieb geschieht **ohne Drehmomentsprünge** und damit vom Fahrer unbemerkt.
- Die Linien im Diagramm (s. Bild) zeigen, welche Betriebsarten bei einer starken Beschleunigung (hohe Drehmomentänderung bei zunächst unveränderter Drehzahl) und bei einer langsamen Beschleunigung (geringe Drehmomentänderung bei zunehmender Drehzahl) durchfahren werden.



- A Homogenbetrieb mit  $\lambda = 1$ ; diese Betriebsart ist in allen Bereichen möglich
- B Magerbetrieb oder Homogenbetrieb  $\lambda = 1$  mit AGR; diese Betriebsart ist auch im Bereich C und D möglich
- C Schichtbetrieb mit AGR Betriebsarten mit Doppeleinspritzung:
- C Schicht-Katzeisen-Betrieb; gleicher Bereich wie Schichtbetrieb mit AGR
- D Homogen-Schicht-Betrieb
- E Homogen-Klopfschutz-Betrieb

Quelle: Bosch

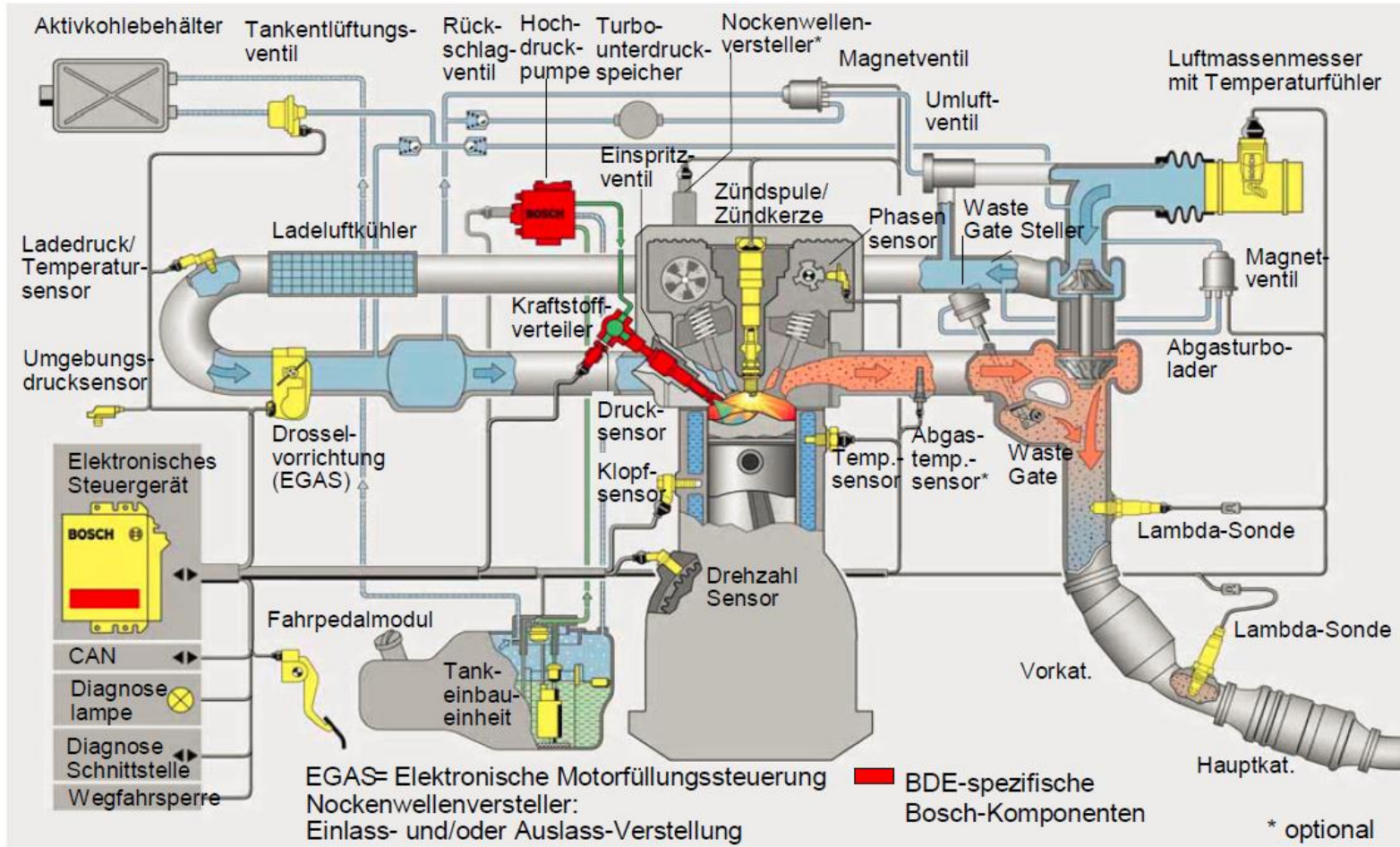
## Komponenten der Benzin-Direkteinspritzung



- 1 Hochdruckpumpe
- 2 Niederdruckanschluss
- 3 Hochdruckleitung
- 4 Kraftstoffverteilerrohr (Rail)
- 5 Hochdruck-Einspritzventile
- 6 Hochdrucksensor
- 7 Zündkerze
- 8 Drucksteuerventil
- 9 Kolben

Quelle: Bosch

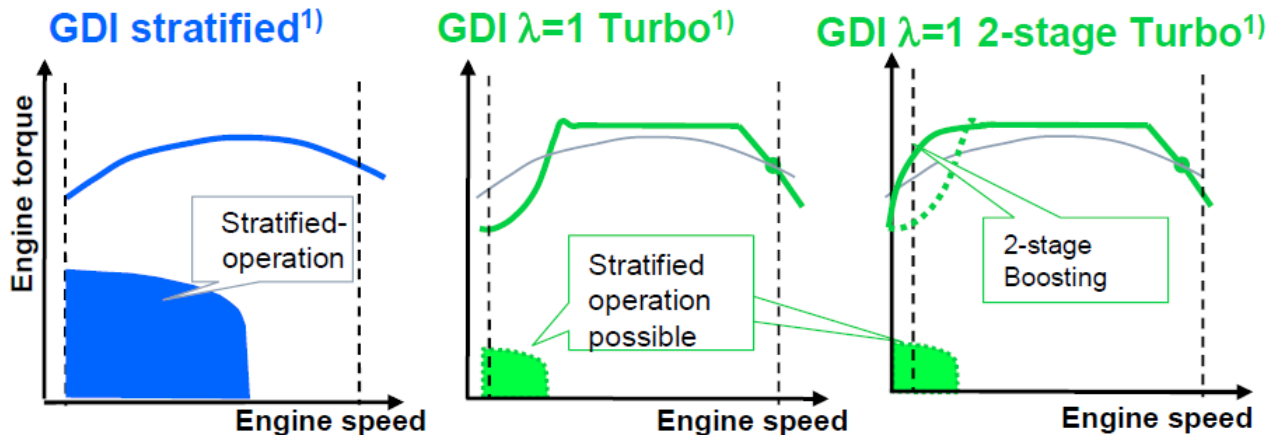
## BDE Ottomotor mit Aufladung (Downsizing)



Quelle: Bosch



## BDE Ottomotor mit Aufladung (Downsizing)



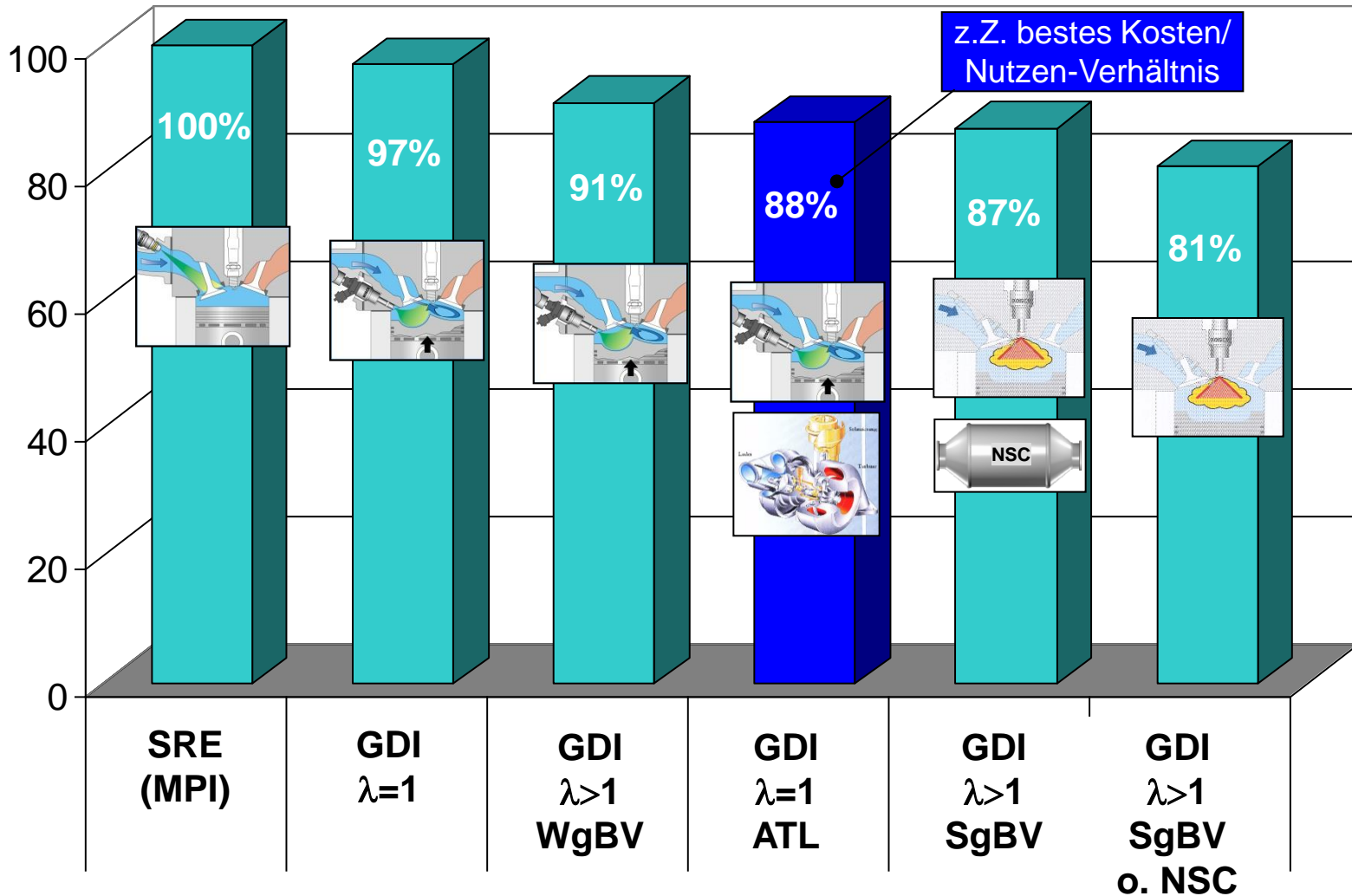
Zusatzkosten	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Direct-Injection</li> <li>■ Exh. treatment</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Direct-Injection</li> <li>■ Turbo Charger</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Direct-Injection</li> <li>■ Turbo Charger</li> <li>■ (E-)Booster</li> </ul>
Zusatzwert	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Fuel Economy +10% <sup>2)</sup></li> <li>■ Veh. response 😊</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Fuel Economy +15% <sup>2)</sup></li> <li>■ Veh. response 😊</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Fuel Economy +15% <sup>2)</sup></li> <li>■ Veh. response 😊 😊</li> </ul>

<sup>1)</sup> Engines with identical output power (turbocharged engine downsized) <sup>2)</sup> vs. Basic PFI-System

Quelle: Bosch



## Einspritzkonzepte / Kraftstoffverbrauch im NEDC



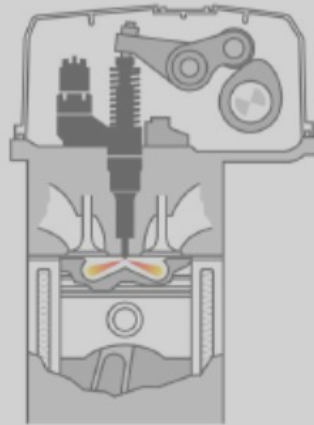
1. Entwicklungstendenzen bei Kraftstoffen, Brennverfahren, CO<sub>2</sub>-Gesetzgebung und Emissionen
2. Entwicklungstendenzen bei Ottomotoren mit innerer und äußerer Gemischbildung sowie Steigerungsmöglichkeiten der spezifischen Motorleistung
3. Entwicklungstendenzen / Steigerung der spezifischen Leistung bei Dieselmotoren (innere Gemischbildung)



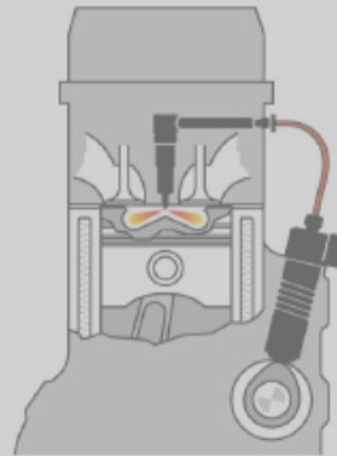
**VP 44**  
Radialkolben –  
Verteiler- Ein-  
spritzpumpe



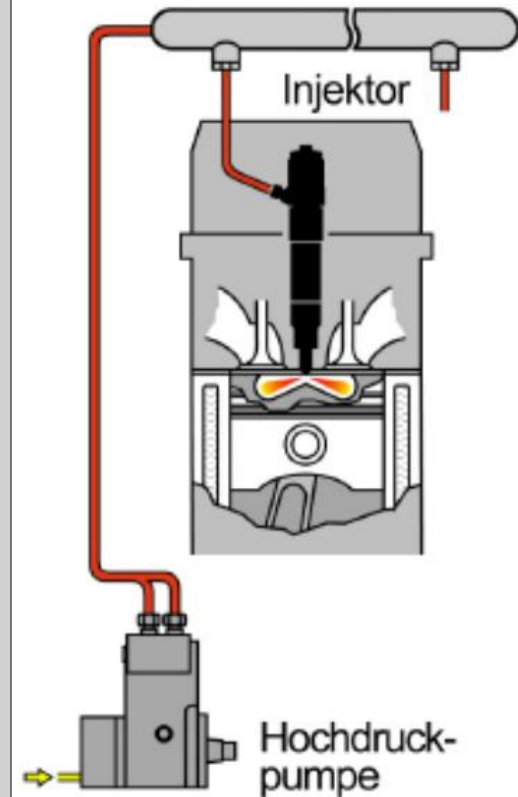
**UIS (PDE)**  
Unit-Injector-  
System



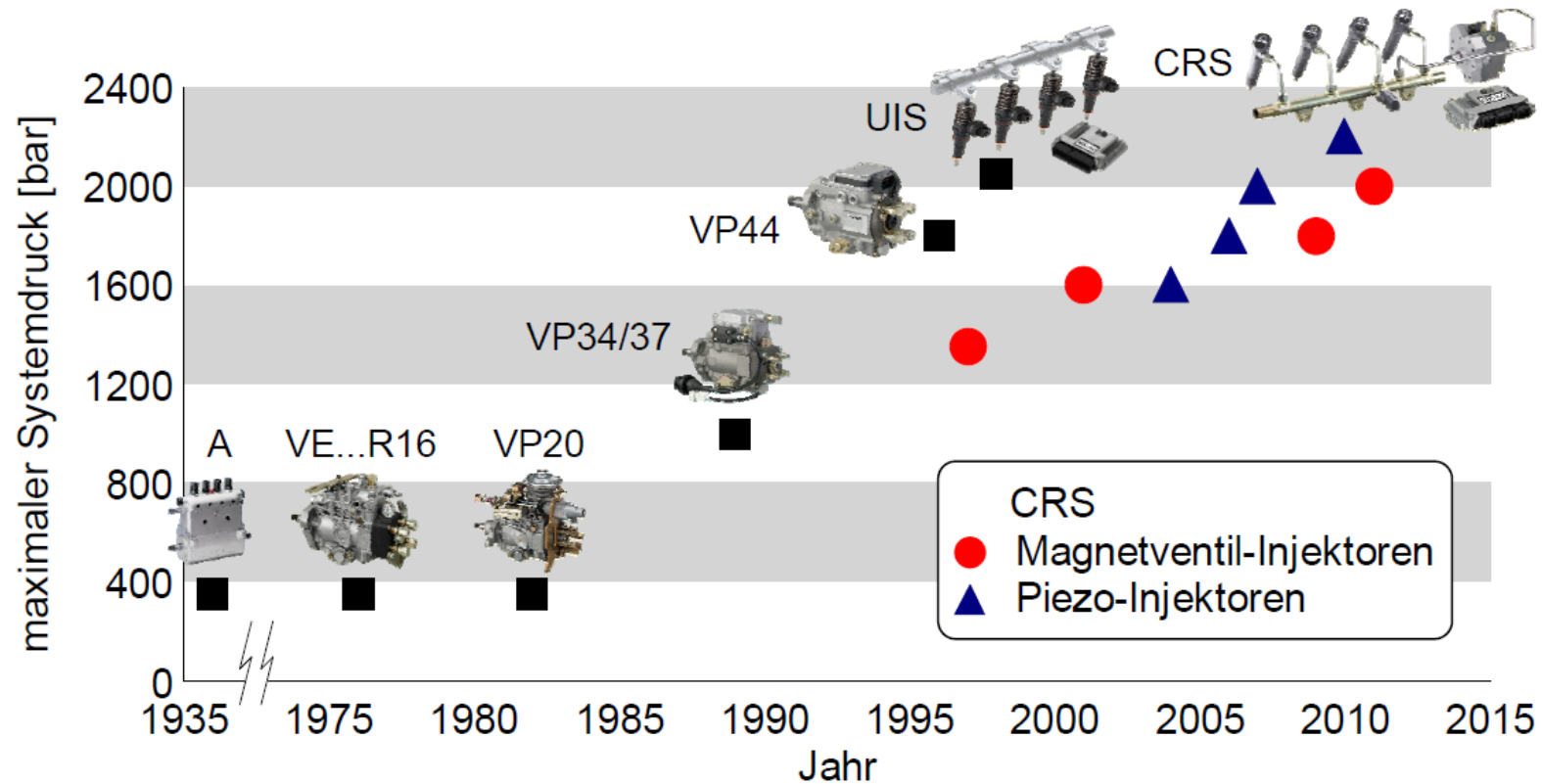
**UPS**  
Unit-Pump-  
System



**CRS**  
Common-Rail-  
System



Quelle: Bosch

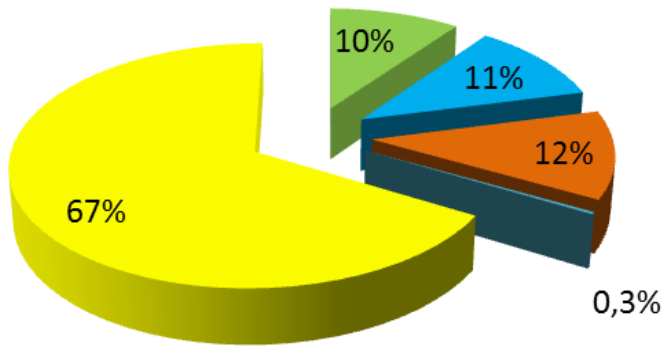


Entwicklung des maximalen Einspritzsystemdrucks bei Pkw-Dieselsystemen

Quelle: Bosch

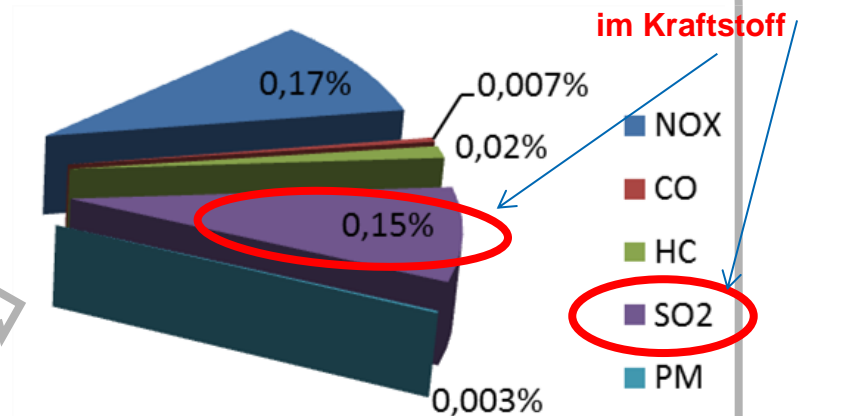
# Motivation

## Rohemissionen von Dieselmotoren



Abgaszusammensetzung eines Dieselmotors

■ N2  
■ O2  
■ H2O  
■ CO2  
■ Schadstoffe

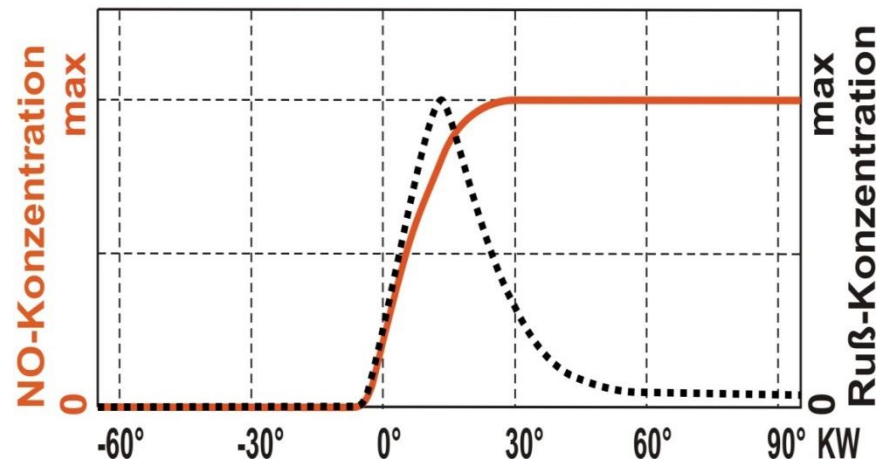
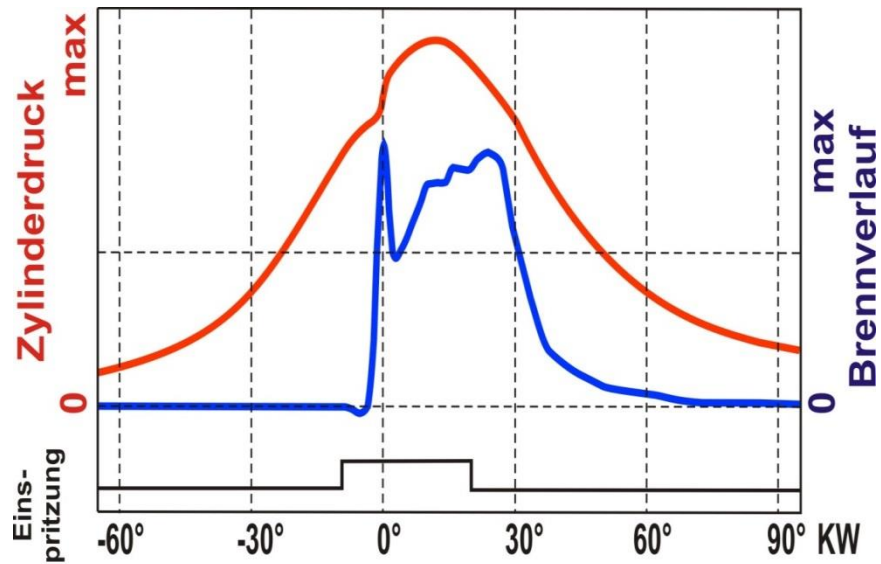


Zusammensetzung der Schadstoffe

Nur bei Schwefel im Kraftstoff

- Dominant: NO/NO<sub>x</sub>- und Partikel-Emissionen – deshalb strikte Grenzwerte
- HC- und CO-Emissionen sind am Dieselmotor von untergeordneter Bedeutung
- (SO<sub>x</sub> kann motorintern nicht reduziert werden)
- Bei aschefreie Kraftstoffen (z.B. DK nach EN590) kann Ruß als Leitgröße für die PM-Emissionen betrachtet werden

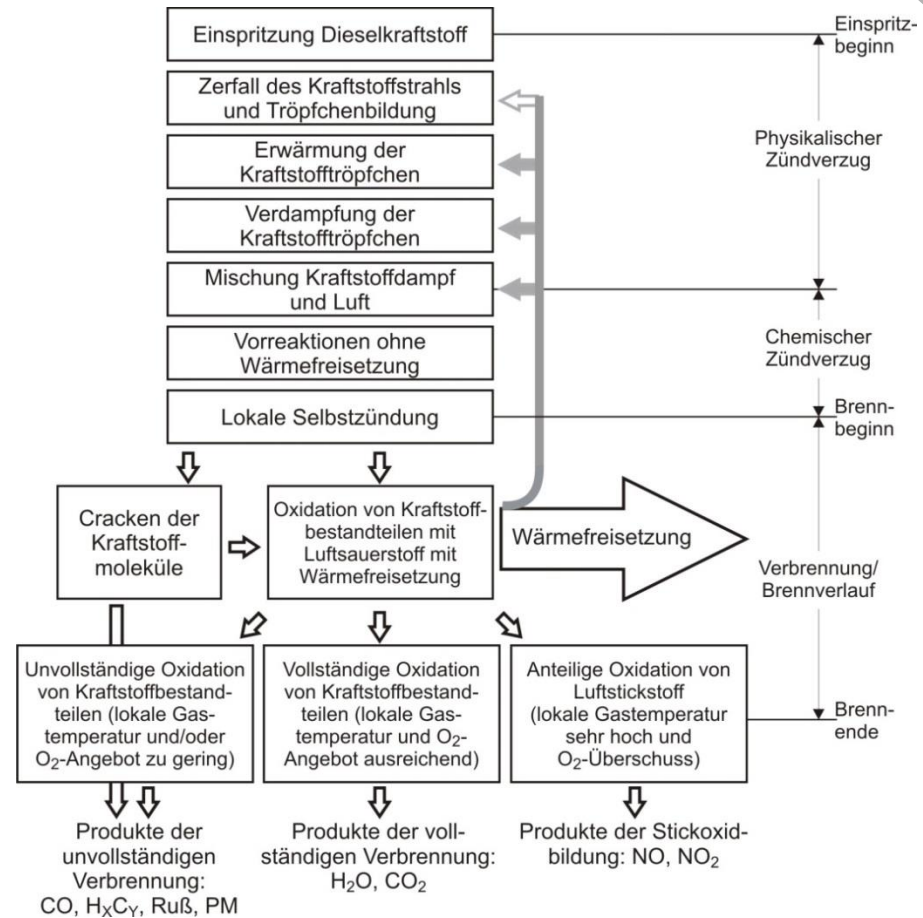
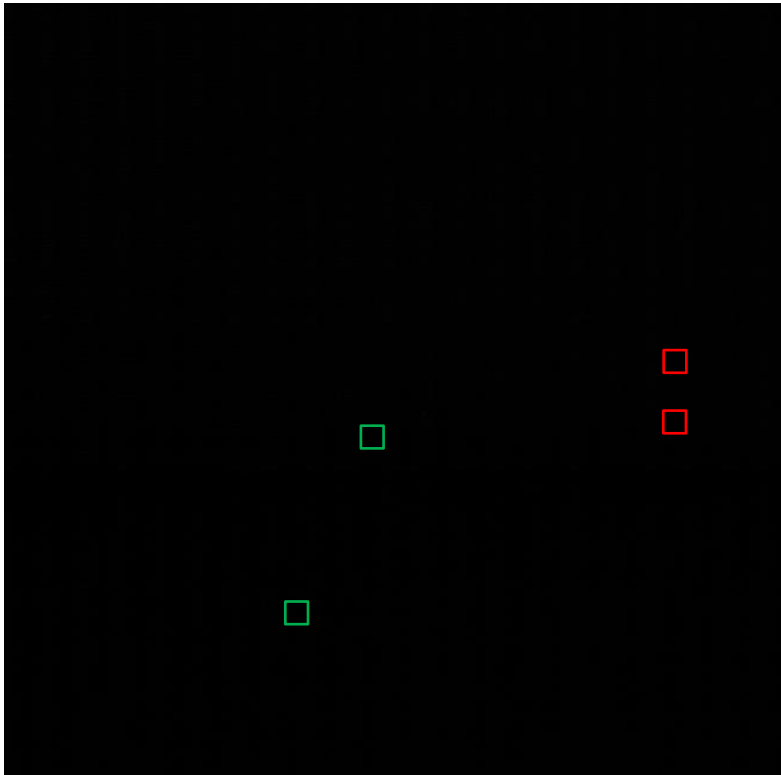
# Dieselmotorenverfahren und Schadstoffentstehung



## Dieselmotorischer Innenprozess

- Wärmefreisetzung beginnt nach Zündverzug mit vorgemischter Verbrennung, danach diffusive Verbrennung
  - Sehr hohe Flammentemperaturen zu Beginn der Wärmefreisetzung, relativer langsamer Ausbrand zum Brennende
  - NO-Bildung in der Phase der höchsten Temperaturen
  - Für Ruß ist eine Bildungsphase und eine Oxidationsphase zu beobachten
- ? Wie ist der Innenprozess zu gestalten?

# Dieselmotorenverfahren und Schadstoffentstehung



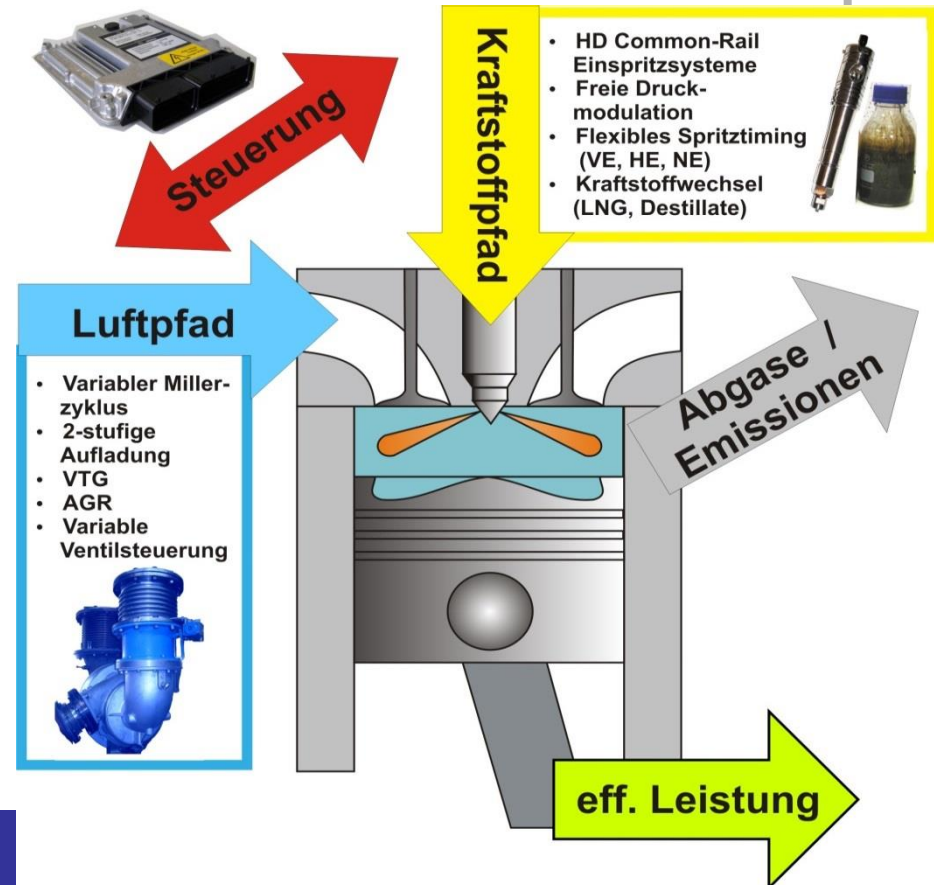
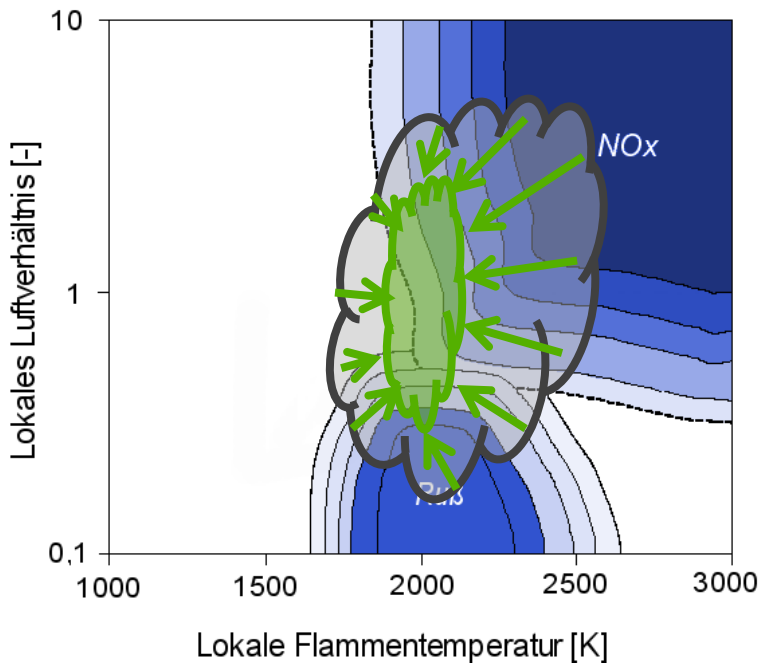
- Dieselmotorenverfahren ist stark heterogen: örtliche und zeitliche Temperatur- und Konzentrationsverteilung bestimmen Brennverlauf und lokale Emissionsentstehung
- Innenprozess analysieren und Emissionsentstehung verstehen

# Lösungsansatz zur motorinternen Emissionsreduzierung

- NO-Bildung in Zonen höchster Temperaturen und mageren Gemischs
- Ruß-Bildung in Zonen fetten Gemischs, Abbruch der Rußoxidation bei geringen Temperaturen

Lösungsansatz: Zeitliche und lokale Temperatur- und Konzentrationsverteilung steuern, das NO-Bildung vermieden und Rußemissionen gesenkt werden

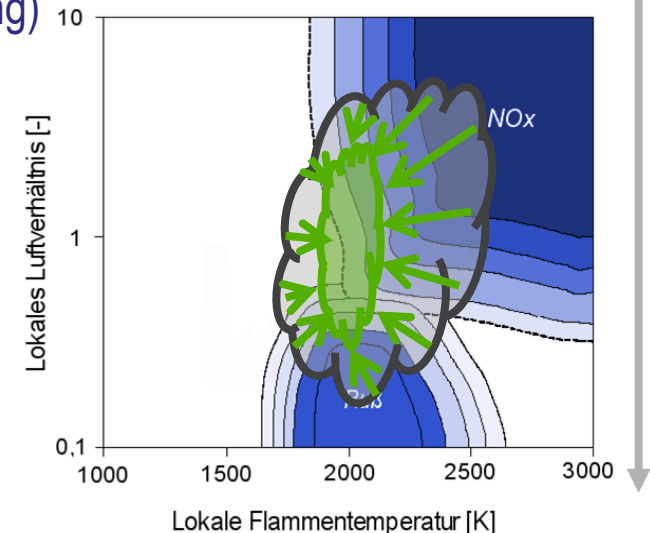
Verfügbare Mittel: Luftpfad und Kraftstoffpfad



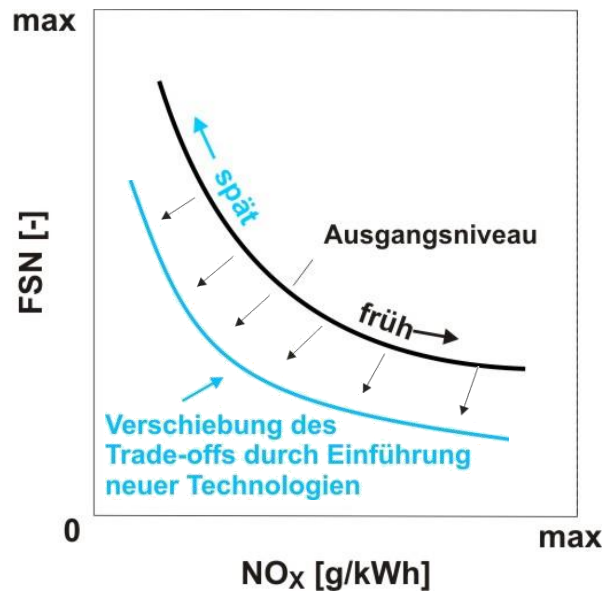
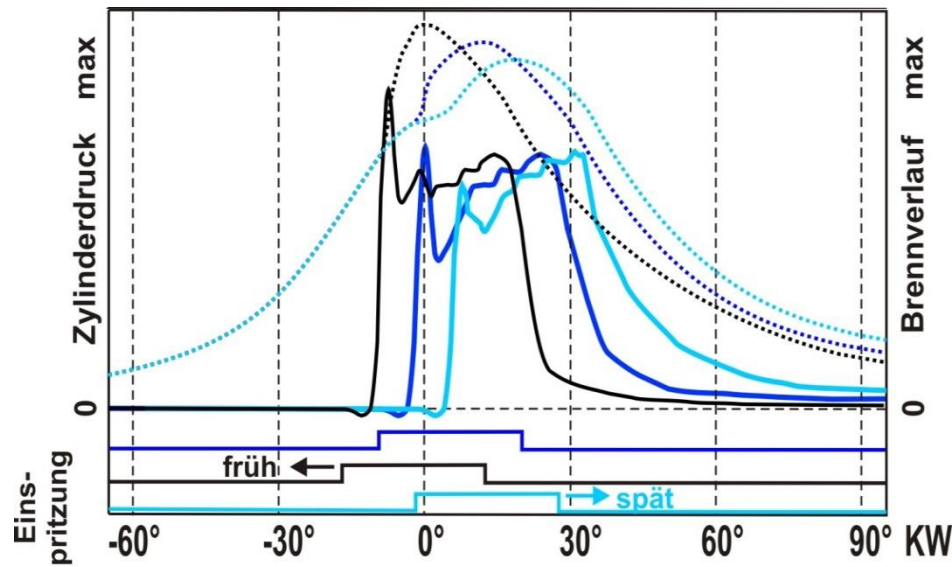
# Verfahren zur motorinternen Emissionsreduzierung

Vielfältige Verfahren zur motorinternen Emissionsreduzierung sind bekannt und werden einzeln oder in Kombination eingesetzt:

- Steuerung der Einspritzung (Zeitpunkt, Verlauf)
- Aufladung mit Ladeluftkühlung, ggf. mehrstufig
- Verbesserung der Gemischbildung durch Steigerung des Einspritzdrucks und Anpassung der Düsengeometrie
- Common-Rail Einspritzsysteme mit Mehrfacheinspritzung
- Einführung Millerzyklus (zylinderinterne Ladeluftkühlung)
- Gekühlte Abgasrückführung (AGR)
- Nasse Methoden (Wassereinspritzung, Kraftstoff-Wasser-Emulsion, Anfeuchtung der Ladeluft)
- Homogene Verbrennung
- Kraftstoffe (Gas, Cetanzahl)



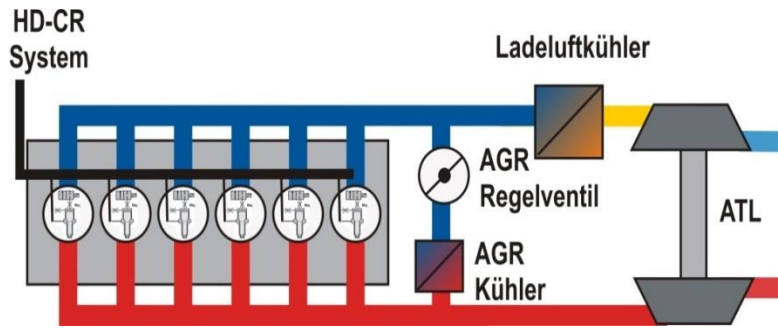
# Verfahren zur motorinternen Emissionsreduzierung



## Verschiebung des Einspritzzeitpunkts

- Verschiebung des Einspritzzeitpunkts führt zur Verschiebung des Brennbeginns und der Schwerpunktlage
- Änderung von Zündverzug und Reaktionsraten bedingen Änderungen der Spitzentemperaturen und Ausbrand
- Ergebnis: Verschiebung der Rohemissionen entlang eines Ruß-NO<sub>x</sub>-Trade-off
- Neue Technologien einführen, um Trade-off zu verschieben

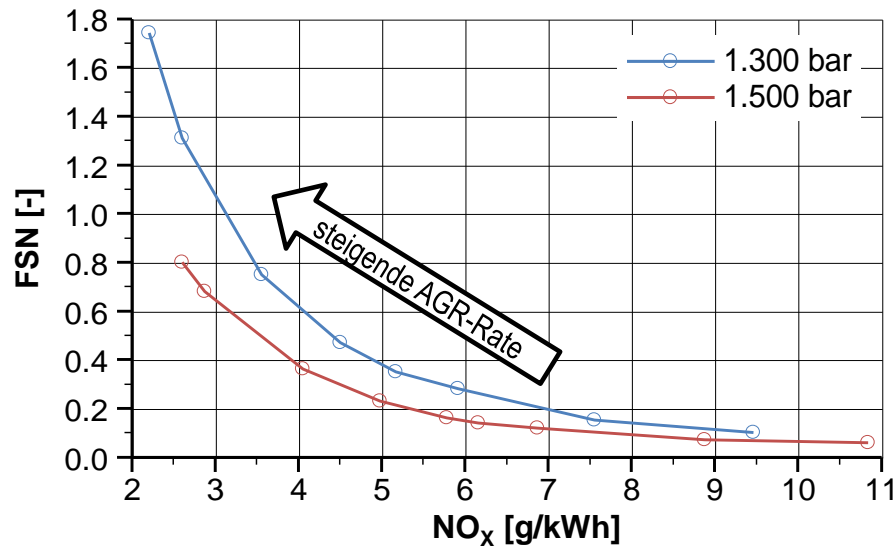
# Verfahren zur motorinternen Emissionsreduzierung



## Variation der AGR-Rate am MaK 6M20

$n = 1.000 \text{ min}^{-1}$ ,  $P = 75\% P_{\text{Nenn}}$

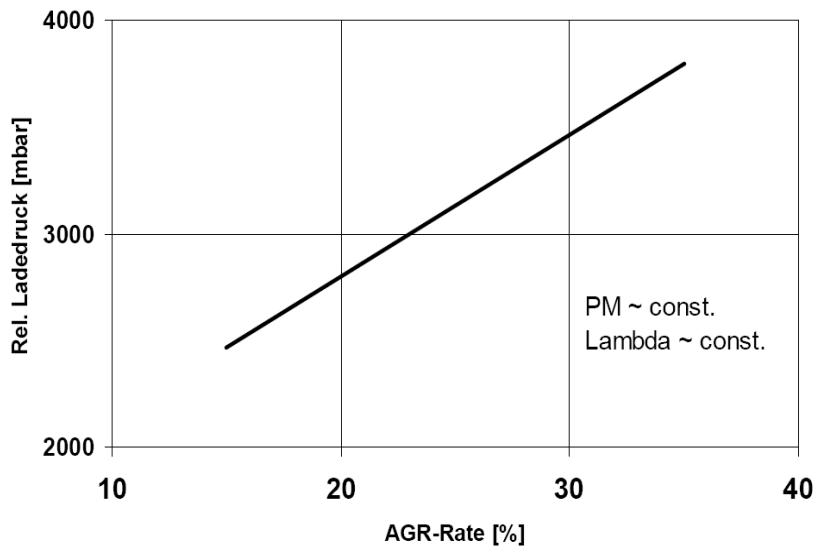
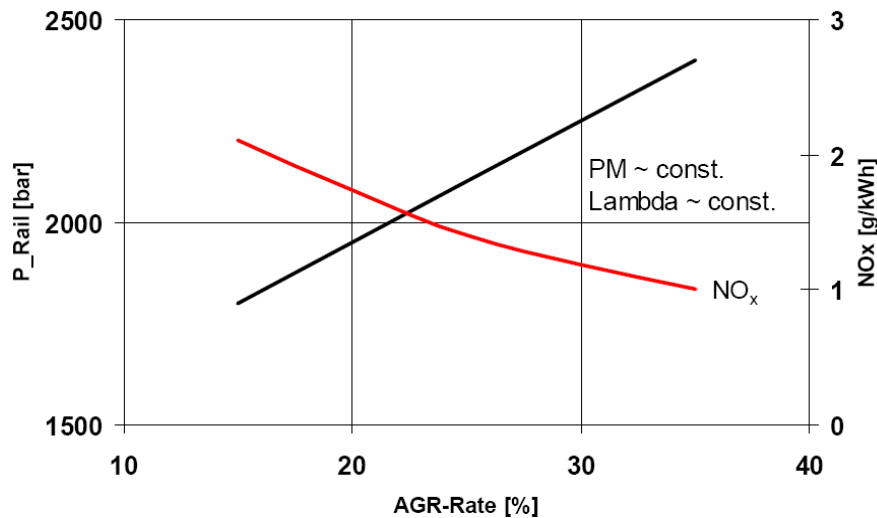
$p_{\text{Rail}} = 1.300 \text{ bar}$ ,  $AB = 10^\circ \text{ KW vOT}$



## Abgasrückführung (AGR), gekühlt

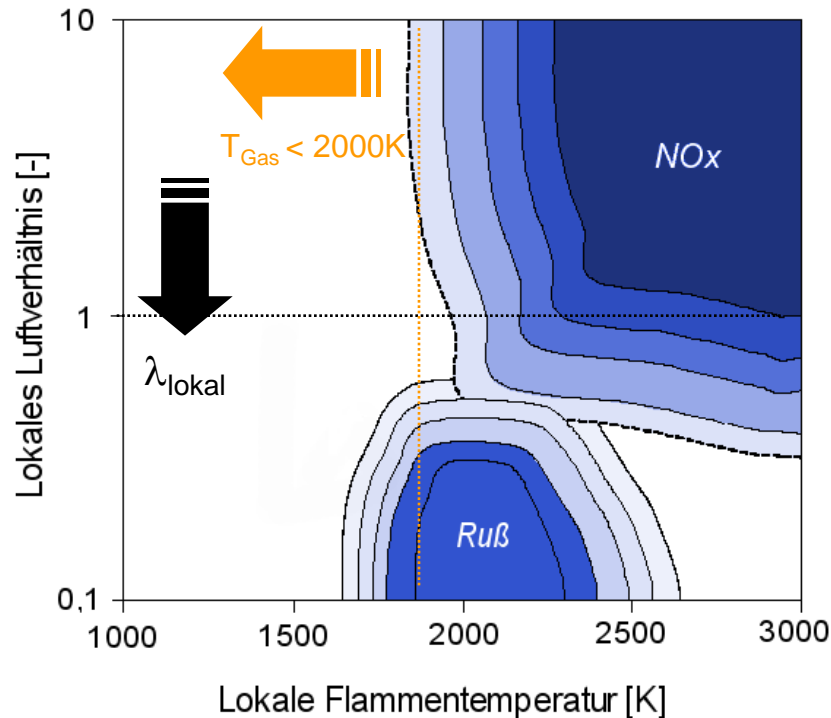
- ein Abgasteilstrom wird nach den Zylindern entnommen und über einen Kühler und Regelventil der Ansaugseite zugeführt
- Erhöhung des Inertanteils der Frischladung führt zur Senkung des Sauerstoffpartialdrucks, globales Lambda sinkt, bleibt aber größer 1
- Verdünnungseffekt führt zur Dämpfung der Spitzentemperaturen und damit zur NO-Reduzierung
- Bei hohen AGR-Raten kommt es zur Verlängerung der Brenndauer und des Ausbrands – steigende Ruß-Emissionen

# Verfahren zur motorinternen Emissionsreduzierung



## Abgasrückführung (AGR), gekühlt

- AGR-Raten bis 35% und höher erlauben signifikante NO<sub>x</sub>-Reduzierung
- Deutliche Erhöhung des Einspritzdrucks zur Reduzierung der ansonsten steigenden Ruß- bzw. Partikelemissionen notwendig
- Erhöhung des Ladedrucks zur Aufrechterhaltung des Luftverhältnisses um steigende Ruß- bzw. Partikelemissionen zu verhindern
- Tendenz zu Einspritzdrücken über 2.500 bar, 2-stufiger Aufladung, Niedertemperaturkühlung für AGR und Ladeluft

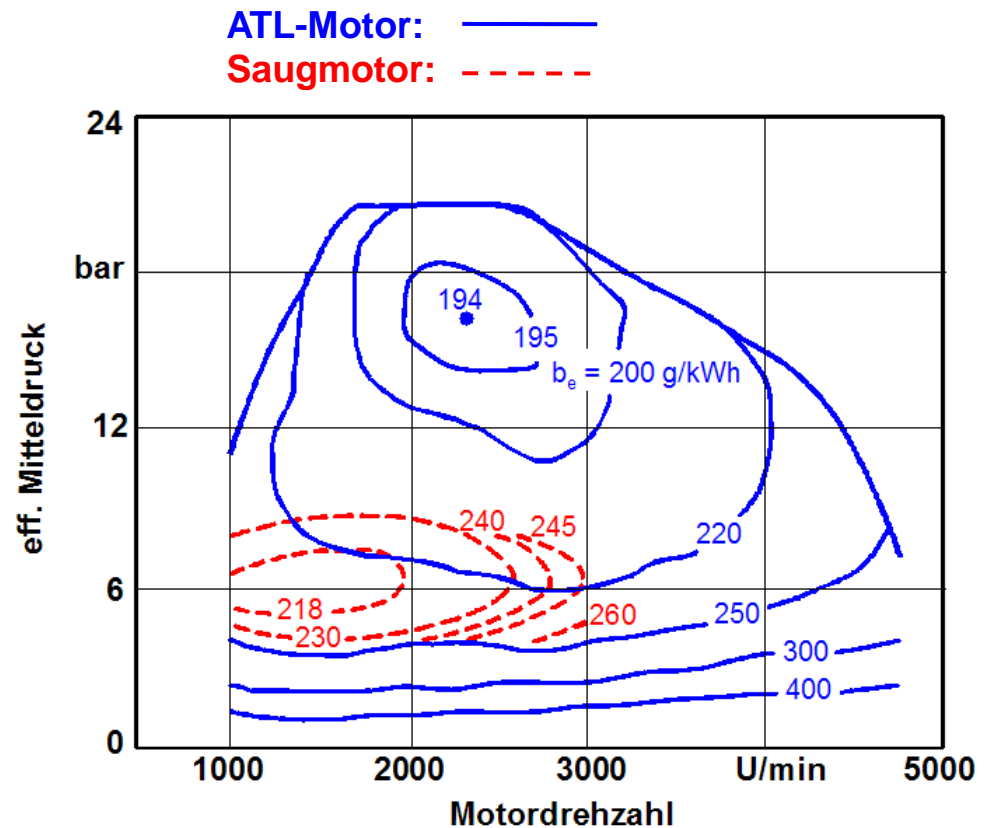


### Wirkweise AGR:

- Senkung der mittleren Gastemperatur durch rückgeführtes Abgas (Wärmekapazität von  $\text{CO}_2 \uparrow$ ,  $\text{H}_2\text{O} \uparrow$ ); damit verminderte thermische NO<sub>x</sub>-Bildung
- Verschleppung der Verbrennung durch niedrigeres  $\lambda$  ( $\text{O}_2$  sinkt über AGR))
- PM-Emissionen steigt infolge sinkenden  $\text{O}_2$ -Angebots / lokalen Luftmangels.

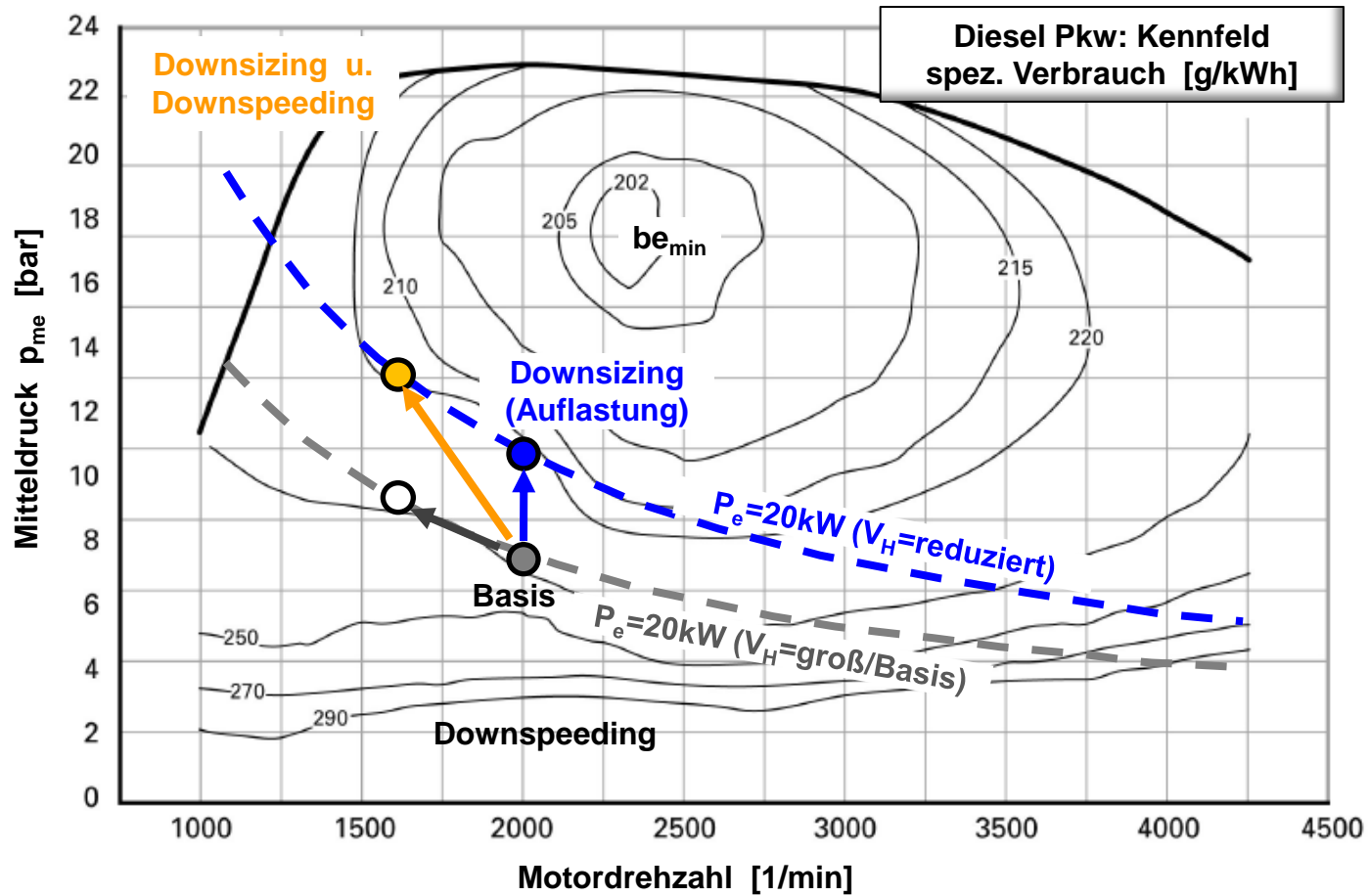
### Vergleich Saugmotor und ATL-Version (Gesamthubvolumen $V_H$ gleich)

- Mit Aufladung ist der spez. Verbrauch  $b_{e,min}$  gegenüber dem Saugmotor niedriger; somit der eff. Wirkungsgrad  $\eta_e$  besser.
- Hingegen sind die spezifischen Verbräuche bei ATL Motoren im unteren Teillastbereich infolge des negativen Spülgefälles höher.



**Diesel Verbrauchskennfeld:  
Vergleich Saug- und Aufladeverision**

## Vergleich hubraumgroßer Basismotor mit Downsizingausführung



## Downsizing mittels Hochaufladung (z.B. 2-stufigen ATL)

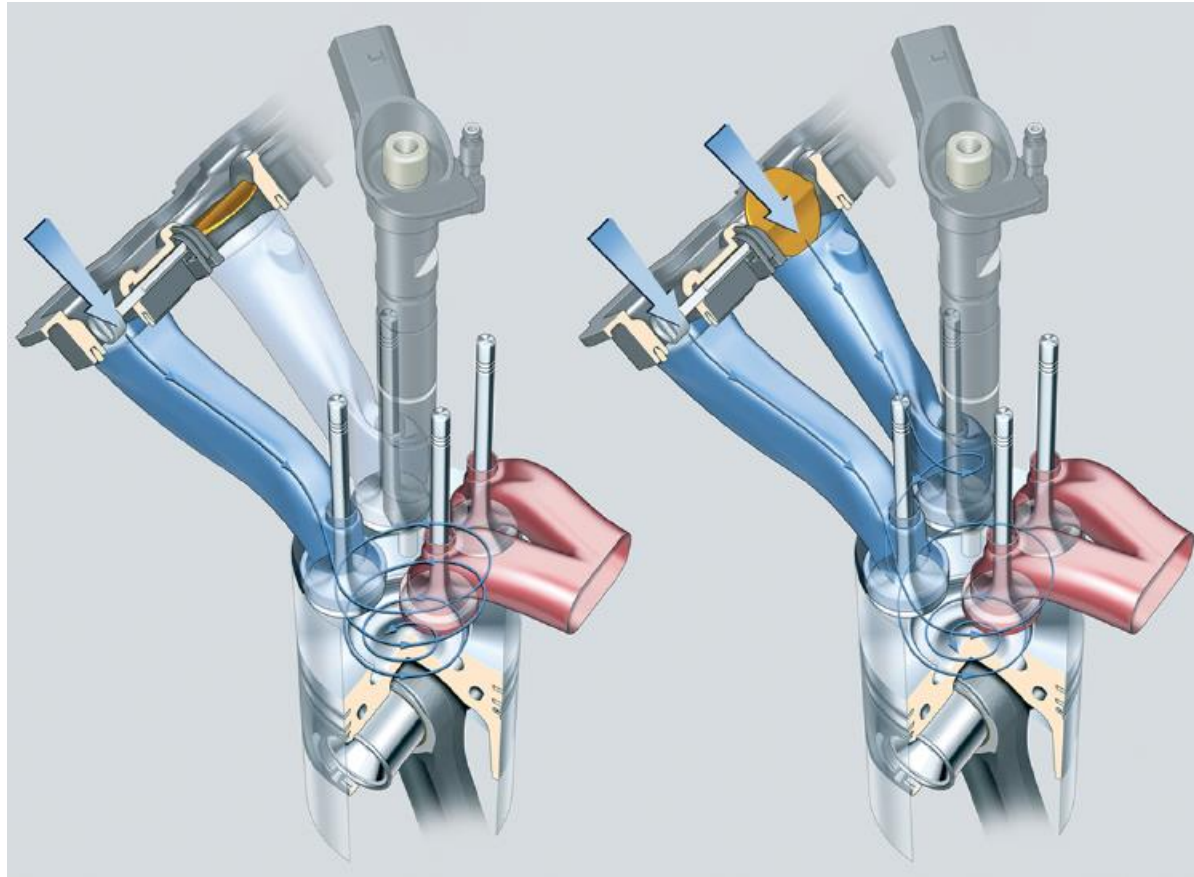
### Ziele Downsizing

- Verringerung des Hubvolumens bei gleichbleibender Leistung
- Geeignetste Maßnahme zur Verbrauchsreduzierung
- Betriebspunktverlagerung zu höheren Lasten (Mitteldrücken)
- Mechanischer Wirkungsgrad  $\eta_m \uparrow$
- Führt zur Verbrauchssenkung (insbesondere bei Teillast)
- Führt jedoch zu **erhöhten Anforderungen an der Vollast**

### Mögliche Umsetzung:

- Substitution z.B. 4-Zyl. Basismotor mit großem Hubvolumen auf z.B. 3-Zyl. Aggregat mit reduziertem  $V_H$
- „Hubraumverringerung durch Zylinderreduktion“
- Bedingung: Leistungsfähiges Aufladeaggregat

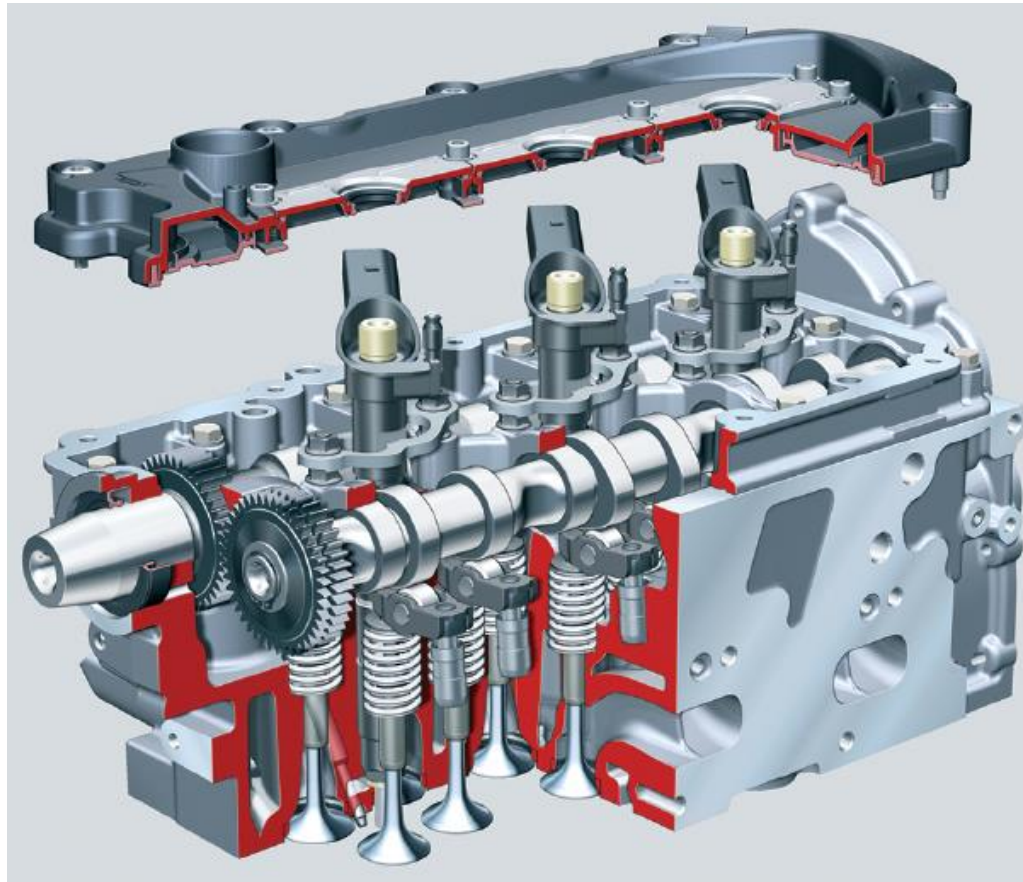
## Diesalbrennverfahren mit direkter Einspritzung



**4-Ventil Zylinderkopf mit zentraler Injektor-/Düsenlage**

Quelle: Audi

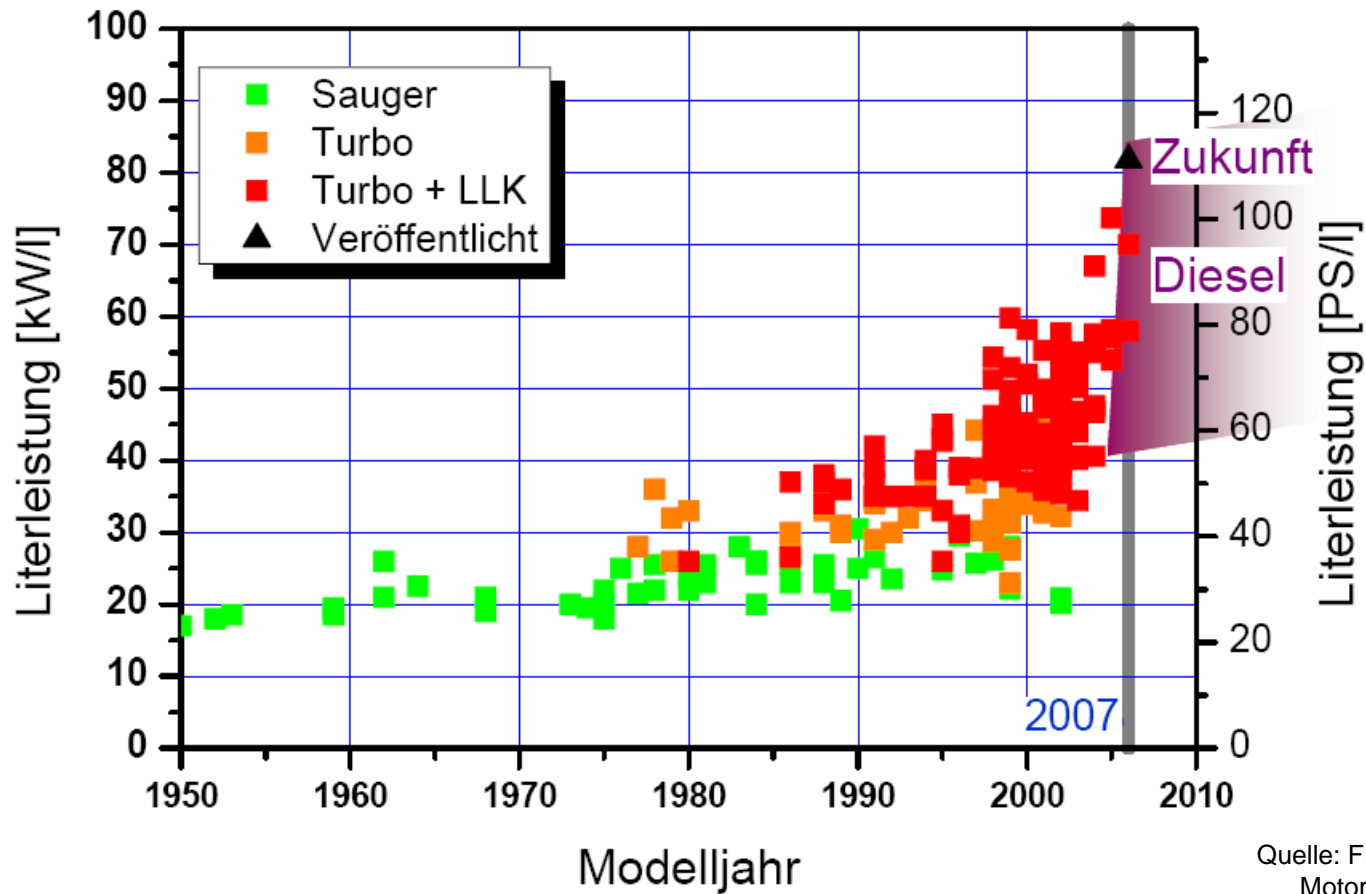
**Diesalbrennverfahren mit direkter Einspritzung**



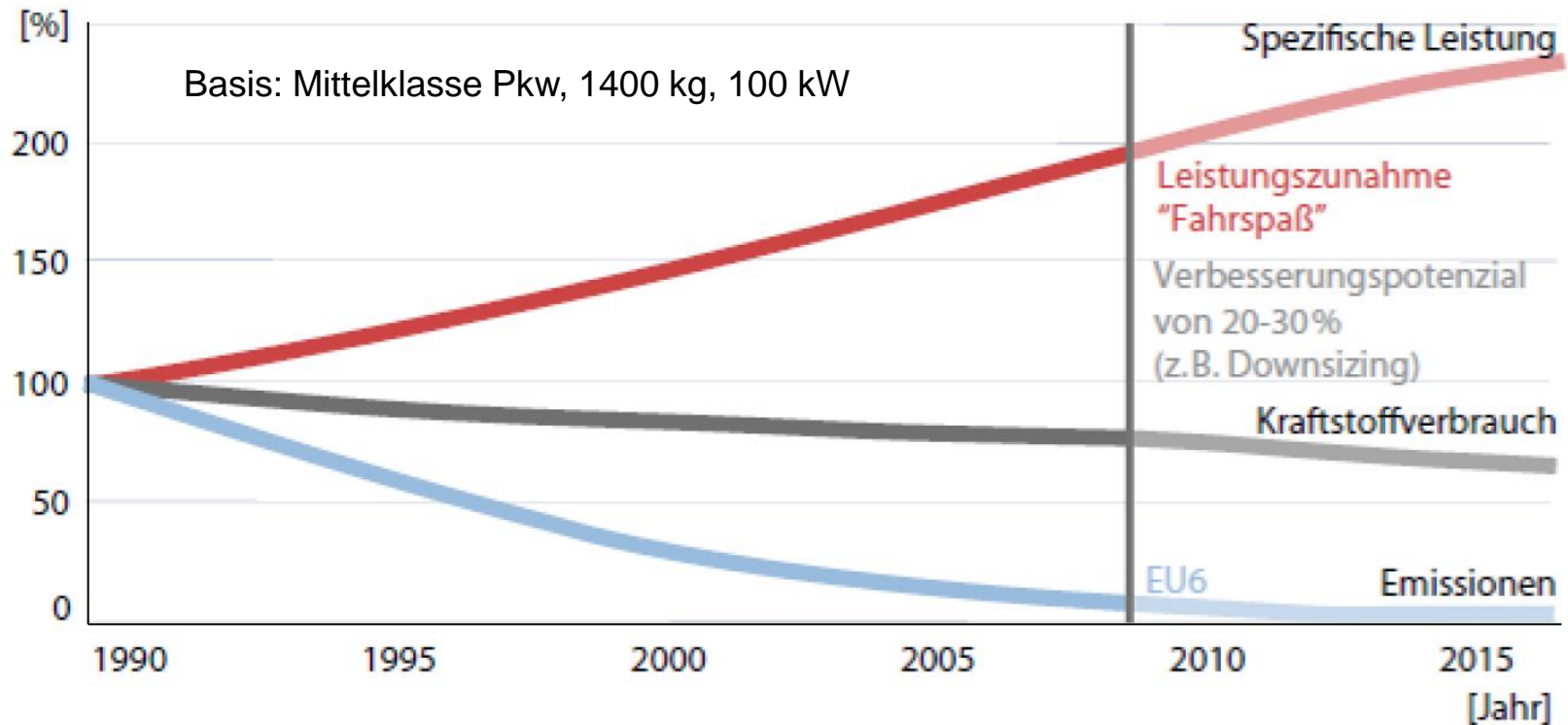
**4-Ventil Zylinderkopf mit obenliegender Nockenwelle  
und zentraler Injektor-/Düsenlage**

Quelle: Audi

## Entwicklung der spez. Leistung kW/l (PS/l) bei Diesel Pkw



Quelle: FEV / 7.Dresdner  
Motorenkolloquium



Entwicklung der spezifischen Leistung, des Kraftstoffverbrauchs und der Emissionen eines typischen Diesel Mittelklasse-Pkw, aus [7]

Quelle: Bosch