

Gegenwärtige und zukünftige Problematik der Verbrennungsmotoren für reine und hybride Fahrzeugantriebe

Woche der Energie 2006

Prof. Dr.-Ing. Victor Gheorghiu
HAW-Hamburg, Fakultät TI, Dept. M+P

Problematik des Ottomotors für den Fahrzeugantrieb

Sprung aufgezungen von den zu großen spezifischen Kraftstoff-Verbräuchen



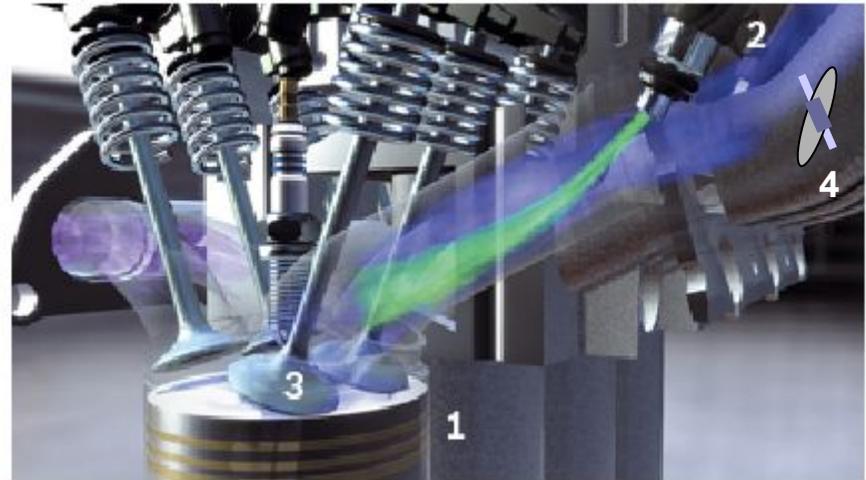
- Klassischer Ottomotor mit **homogener Gemischbildung** in allen Betriebspunkten (d.h. mit Saugrohreinspritzung)
 - Quantitätsregelung der Last (Drosselung der angesaugten Gemischmasse)
 - Einhaltung des Lambda-Fensters und Einsatz des 3-Wege-Katalysators

- Moderner Ottomotor mit inhomogener Gemischbildung im unteren Lastbereich, d.h. mit Qualitätsregelung der Last ermöglicht durch
 - Schichtladung mit Direkteinspritzung (GDI, FSI) und Entdrosselung
 - Einsatz des Speicherkatalysators (für NO_x)
- Einsatz der gekühlten Abgasrückführung (AGR)
- Turbo- u. mechanische Aufladung
- Downsizing
- Vollvariabler Ventiltrieb
 - Phasenverschiebung
 - Ventilhubänderung
- Zylinderabschaltung
- Variables Verdichtungsverhältnis
- Einsatz von Atkinson- oder Miller-Kreisprozessen usw.

Problematik des Ottomotors für den Fahrzeugantrieb

Schwächen des klassischen Ottomotors

- Klassischer Ottomotor mit **homogener Gemischbildung** in allen Betriebspunkten (d.h. mit Saugrohreinspritzung)
 - **Quantitätsregelung der Last (Drosselung der angesaugten Gemischmasse)**
 - Einhaltung des Lambda-Fensters und Einsatz des 3-Wege-Katalysators



1 Kolben, 2 Einspritzventil, 3 Einlassventil, 4 Drosselklappe

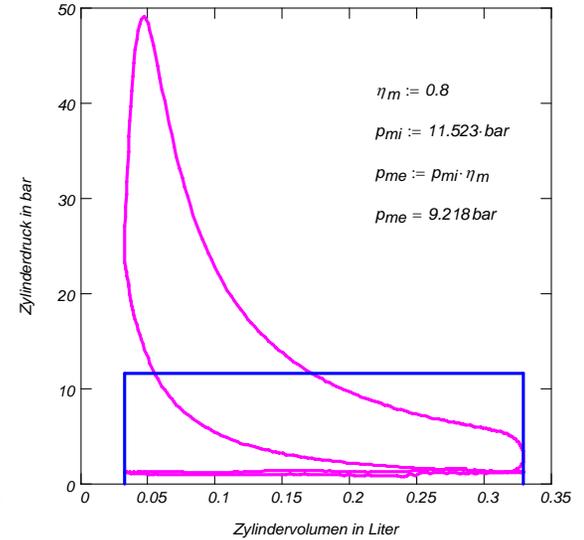
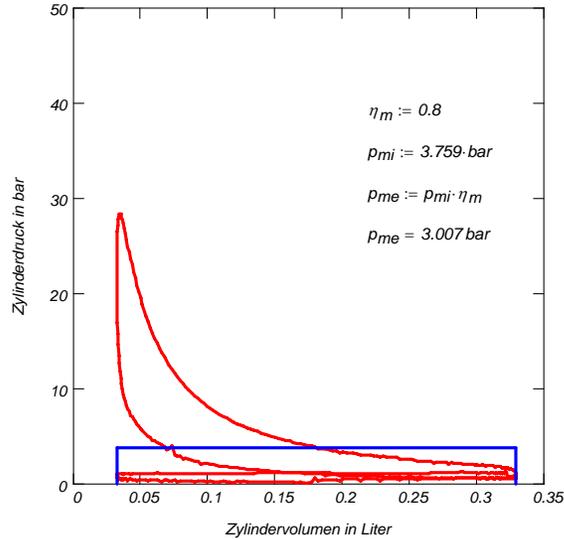
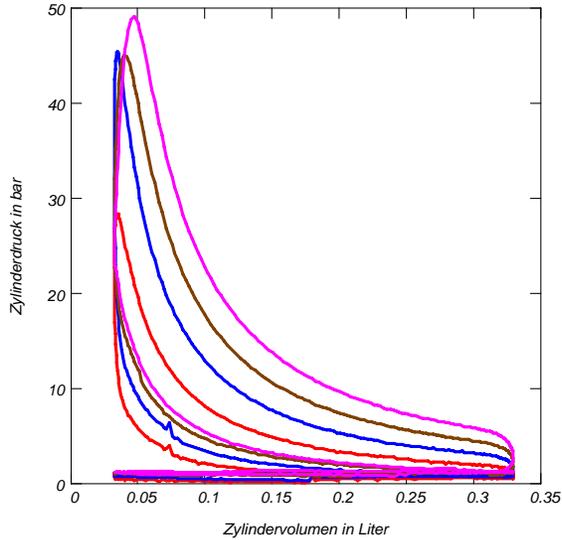
So arbeitet die Saugrohreinspritzung

Bei der Saugrohreinspritzung entsteht das Luft-Kraftstoff-Gemisch außerhalb des Brennraums im Saugrohr. Das Einspritzventil (2) spritzt den Kraftstoff vor das Einlassventil (3). Im Ansaugtakt strömt das Gemisch durch das geöffnete Einlassventil in den Verbrennungsraum. Die Einspritzventile sind so ausgewählt, dass der Kraftstoffbedarf des Motors jederzeit - auch bei Vollast und hohen Drehzahlen - gedeckt ist.

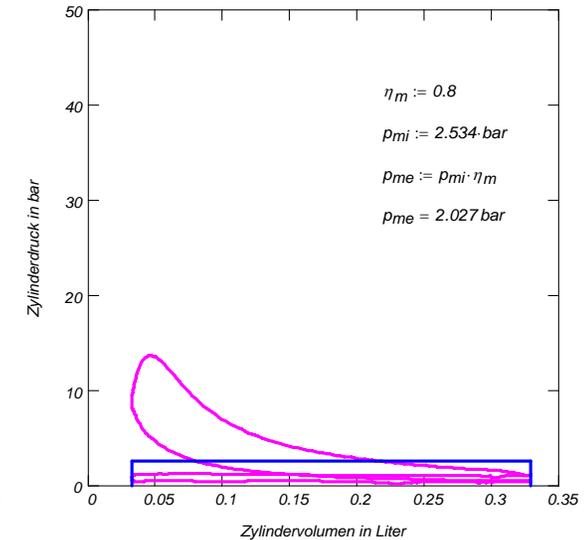
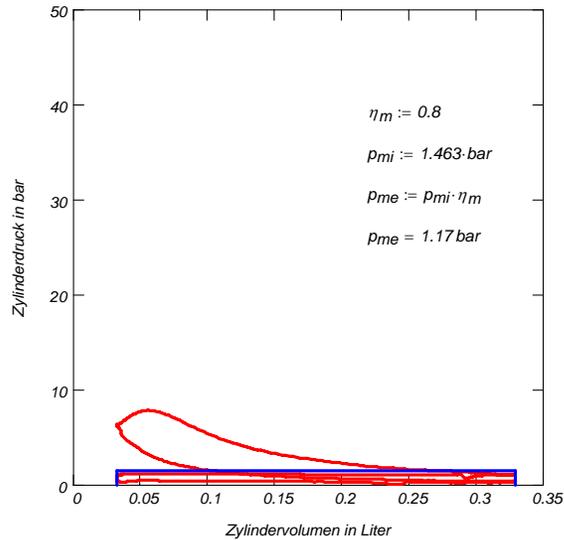
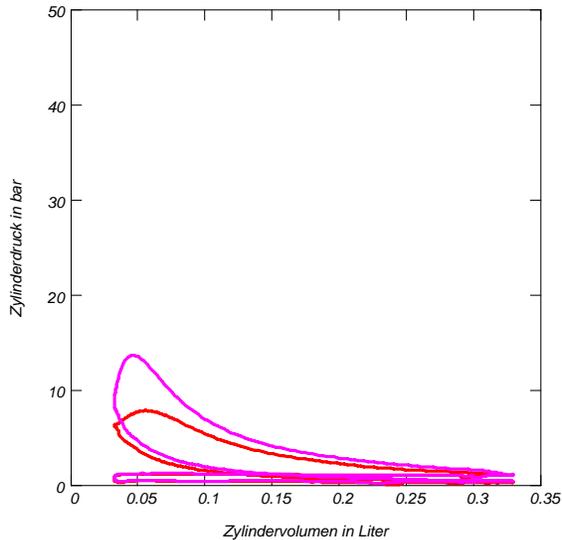
Problematik des Ottomotors für den Fahrzeugantrieb

Quantitätsregelung der Last durch Drosselung

Motordrehzahl 3000 1/min



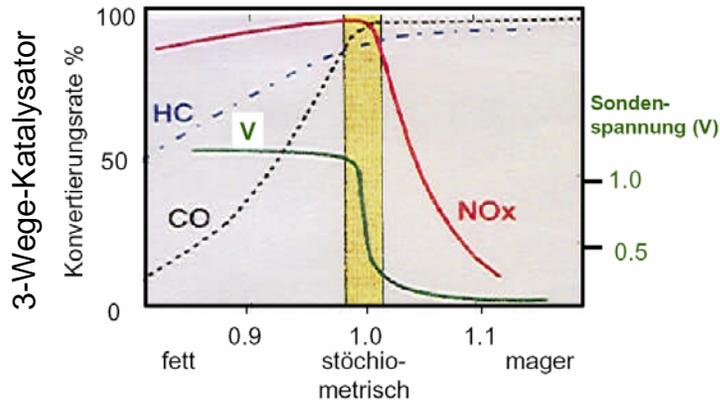
Motordrehzahl 1000 1/min



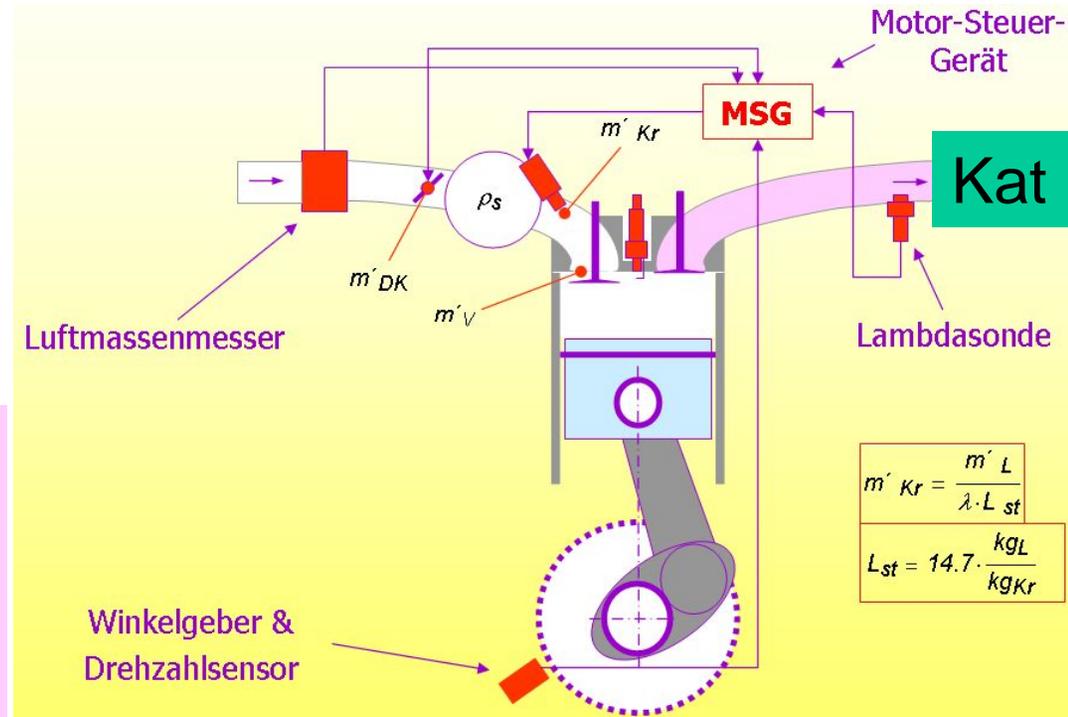
Erklärungen zu den indizierten und effektiven Mitteldrücken

Problematik des Ottomotors für den Fahrzeugantrieb

Schwächen des klassischen Ottomotors



- Klassischer Ottomotor mit **homogener Gemischbildung** in allen Betriebspunkten (d.h. mit Saugrohreinspritzung)
 - Quantitätsregelung der Last (Drosselung der angesaugten Gemischmasse)
 - **Einhaltung des Lambda-Fensters und Einsatz des 3-Wege-Katalysators**

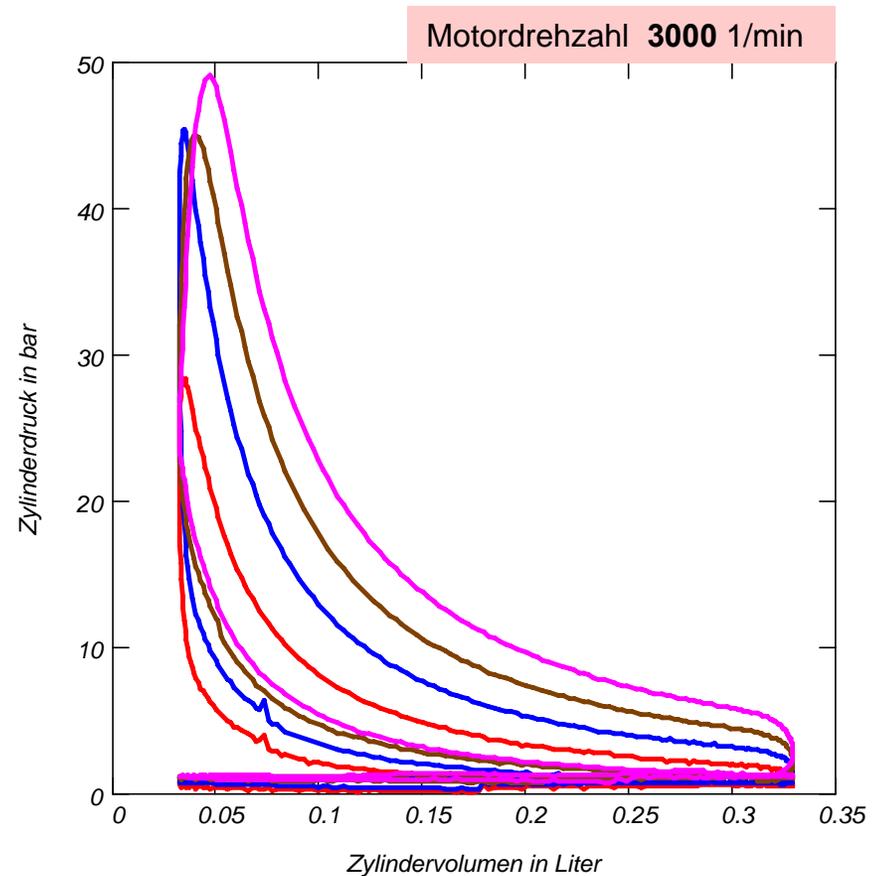
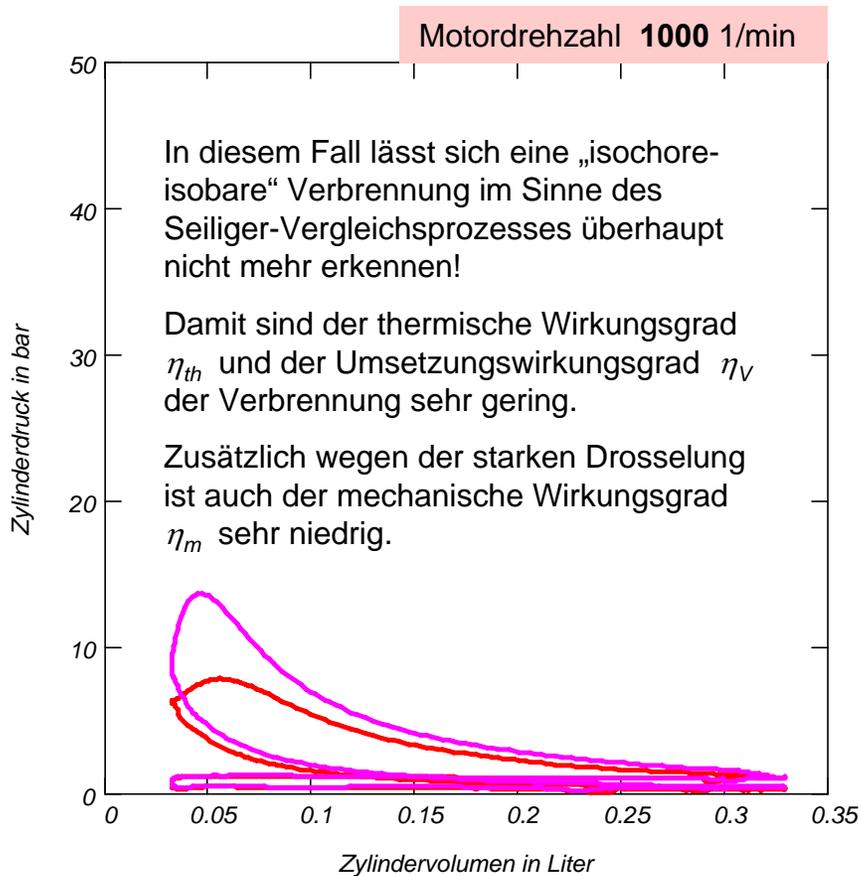


Problematik des Ottomotors für den Fahrzeugantrieb

Quantitätsregelung der Last durch Drosselung

Effektiver Wirkungsgrad:

$$\eta_e = \eta_i \cdot \eta_m = \eta_{th} \cdot \eta_V \cdot \eta_m$$



Problematik des Ottomotors für den Fahrzeugantrieb

Sprung aufgezungen von den zu großen spezifischen Kraftstoff-Verbräuchen



- Klassischer Ottomotor mit **homogener Gemischbildung** in allen Betriebspunkten (d.h. mit Saugrohreinspritzung)
 - Quantitätsregelung der Last (Drosselung der angesaugten Gemischmasse)
 - Einhaltung des Lambda-Fensters und Einsatz des 3-Wege-Katalysators

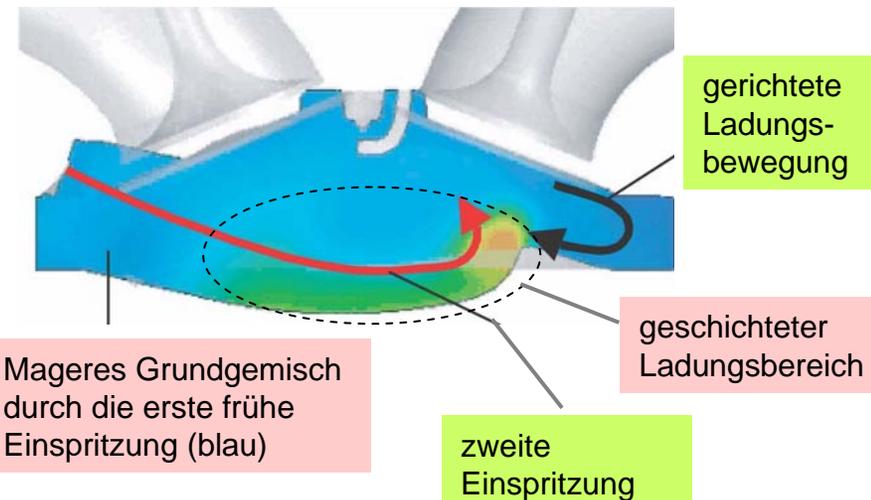
- Moderner Ottomotor mit **inhomogener Gemischbildung** im unteren Lastbereich, d.h. mit **Qualitätsregelung der Last** ermöglicht durch
 - Schichtladung mit Direkteinspritzung (GDI, FSI) und Entdrosselung
 - Einsatz des Speicherkatalysators (für NO_x)
- Einsatz der gekühlten Abgasrückführung (AGR)
- Turbo- u. mechanische Aufladung
- Downsizing
- Vollvariabler Ventiltrieb
 - Phasenverschiebung
 - Ventilhubänderung
- Zylinderabschaltung
- Variables Verdichtungsverhältnis
- Einsatz von Atkinson- oder Miller-Kreisprozessen usw.

Problematik des modernen Ottomotors für den Fahrzeugantrieb

- Moderner Ottomotor mit **inhomogener Gemischbildung** im unteren Lastbereich, d.h. mit **Qualitätsregelung der Last** ermöglicht durch
 - **Schichtladung mit Direkteinspritzung** (GDI, FSI) und **Entdrosselung**
 - Einsatz des Speicherkatalysators (für NO_x)



Quelle: Firma VW

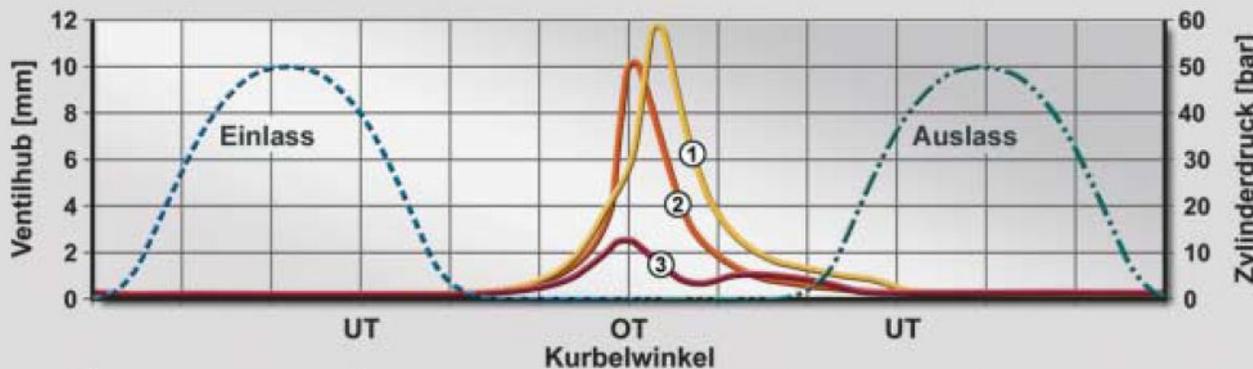


Problematik des modernen Ottomotors für den Fahrzeugantrieb

Möglichkeiten und Flexibilität der Direkteinspritzung

Drei zielgerechte Strategien für Homogen- bzw. Schichtbetrieb

Schichtbetrieb durch Mehrfach-Einspritzung



Zündzeitpunkt

Strategie

hohe Last



①

Doppeleinspritzung
Homogenbetrieb

mittlere Last



②

Dreifacheinspritzung
Schichtbetrieb

niedrige Last



und

schnelle Kat-
Aufheizung

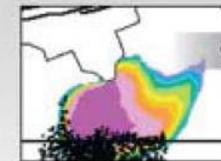


③

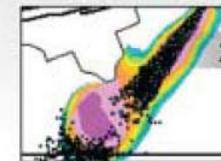
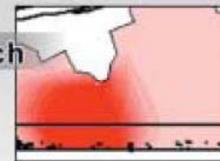
Dreifacheinspritzung
Homogen – Split Betrieb

Gemischbildung

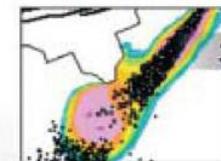
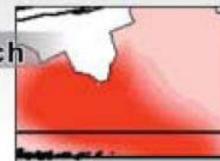
Verbrennung



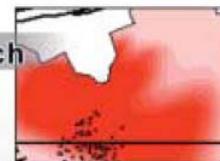
1-fach



2-fach



3-fach



Luftverhältnis [-]
fett 1,0 mager

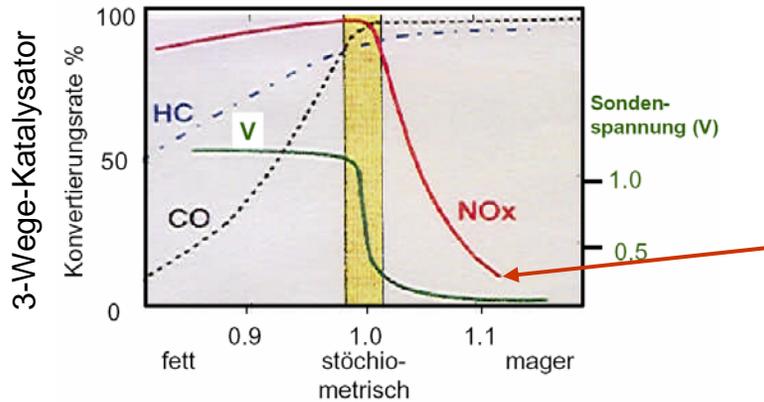
Aufnahmezeitpunkt:
ZZP

Temperatur [°C]
0 2000

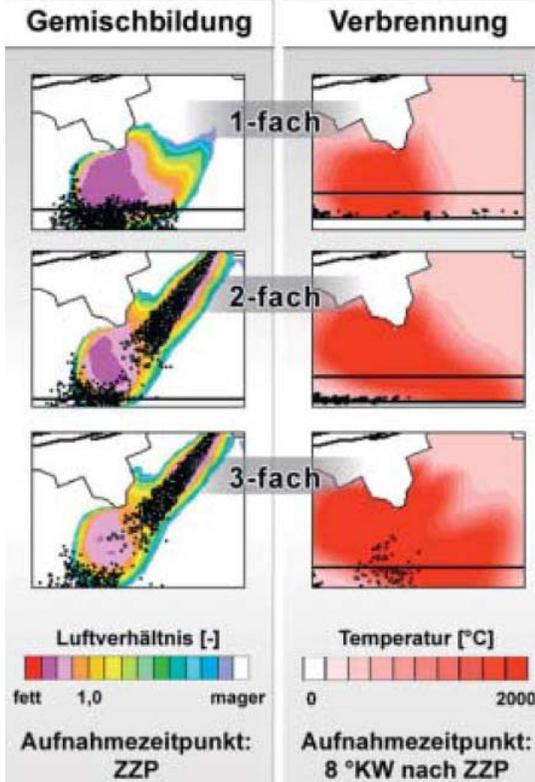
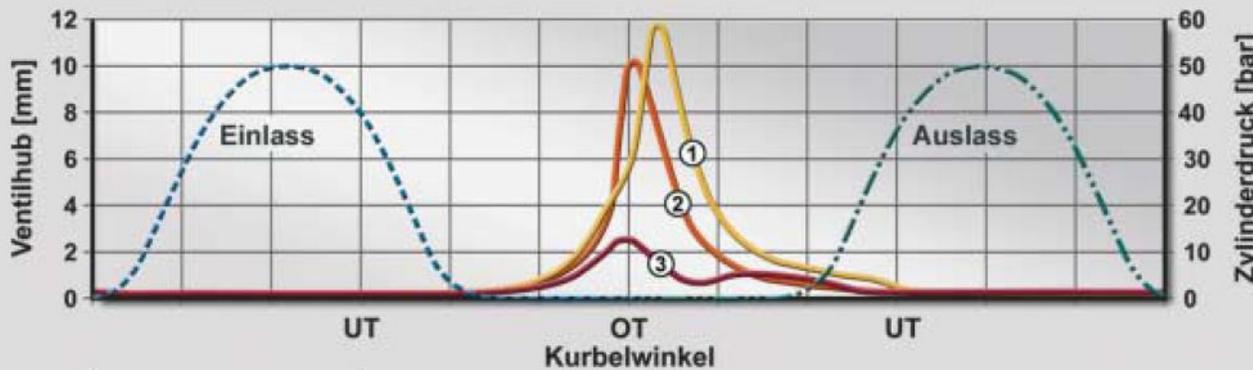
Aufnahmezeitpunkt:
8 °KW nach ZZP

Problematik des modernen Ottomotors für den Fahrzeugantrieb

Schichtladung durch mehrfache Direkteinspritzung



Das entstandene Problem besteht darin, dass der 3-Wege-Katalysator in Falle der **mageren** ($1,0 < \lambda < 1,5$) und **sehr mageren Gemische** ($1,5 < \lambda < 6$) die **NO_x**-Emission nicht mehr reduzieren kann!



Zündzeitpunkt

Strategie

hohe Last



①

Doppeleinspritzung
Homogenbetrieb

mittlere Last



②

Doppeleinspritzung
Schichtbetrieb

niedrige Last

und

schnelle Kat-
Aufheizung



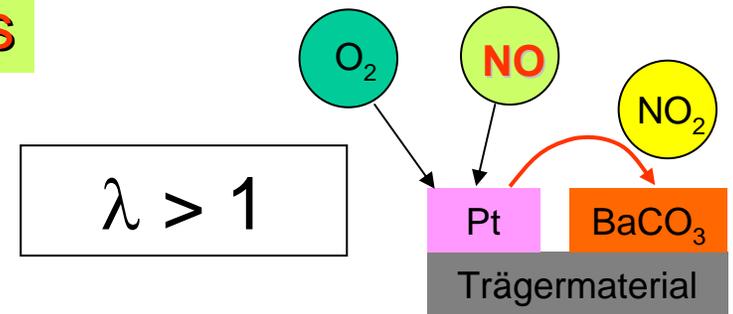
③

Dreifacheinspritzung
Homogen – Split Betrieb

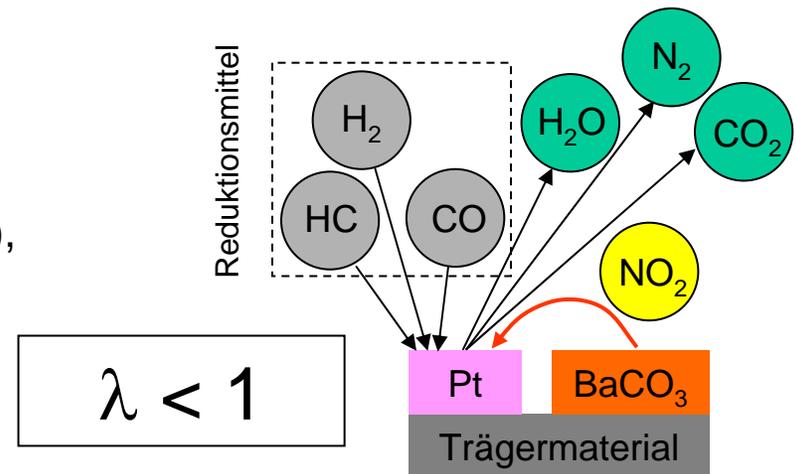
Problematik des modernen Ottomotors für den Fahrzeugantrieb

Einsatz des NO_x -Speicherkatalysators

- Das Funktionsprinzip des NO_x -Speicherkatalysators besteht darin,
 - dass während der **mageren Phasen**, bei denen der Motor mit Luftverhältnissen $\lambda > 1$ betrieben wird, die produzierenden Stickoxide (NO_x) zwischengespeichert werden, und
 - in den so genannten **Regenerationszyklen** (von kurzer Dauer, üblich 2 bis 10 Sekunden), in welchen der Motor zwangsweise fett (d.h. mit Luftverhältnissen $\lambda < 1$) gefahren wird, zu N_2 umgesetzt werden kann.



a) Speicherphase im Magermotorbetrieb

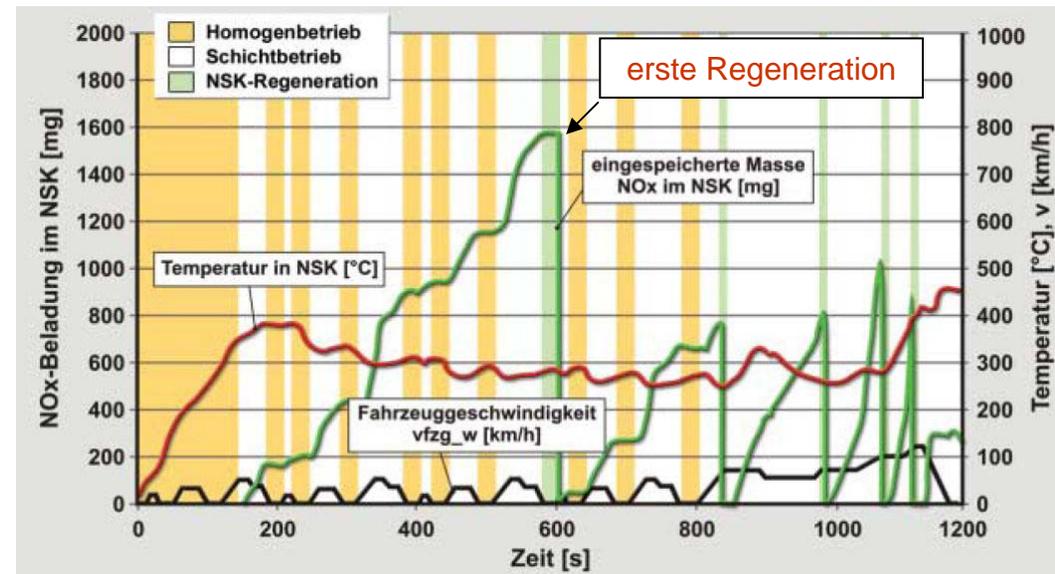
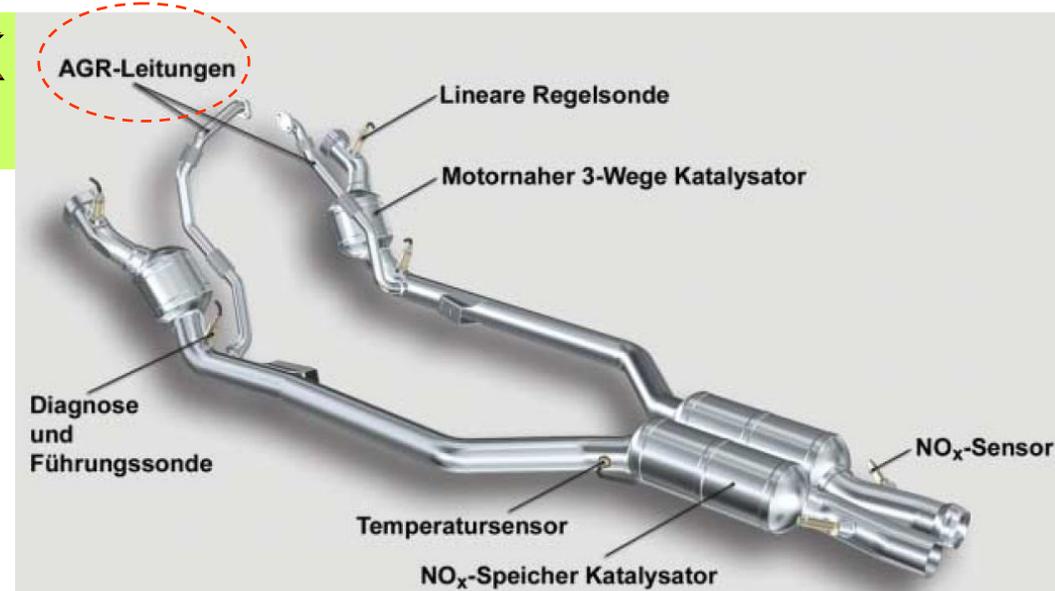


b) Regenerationsphase im Fettmotorbetrieb

Problematik des modernen Ottomotors für den Fahrzeugantrieb

Einsatz und Betrieb des NSK = NO_x-Speicherkatalysators

- Die 3-Wege- und NO_x-Speicher-Katalysatoren werden aktiv nur oberhalb einer Abgastemperatur von ca. 300°C (d.h. für NSK erst nach den ersten 3 Minuten!)
- Um die Aufheizung der 3-Wege-Katalysatoren in der Motorstartphase zu beschleunigen und somit die inaktive Phase zu verkürzen, werden sie mit kleinen Abmessungen und sehr nah am Motor angebracht.
- Die Konvertierungsraten der 3-Wege- und NO_x-Speicher-Katalysatoren werden über lineare Lambdasonden (vor und nach dem Kat) bzw. NO_x-Sensoren (nach dem Kat) überwacht.

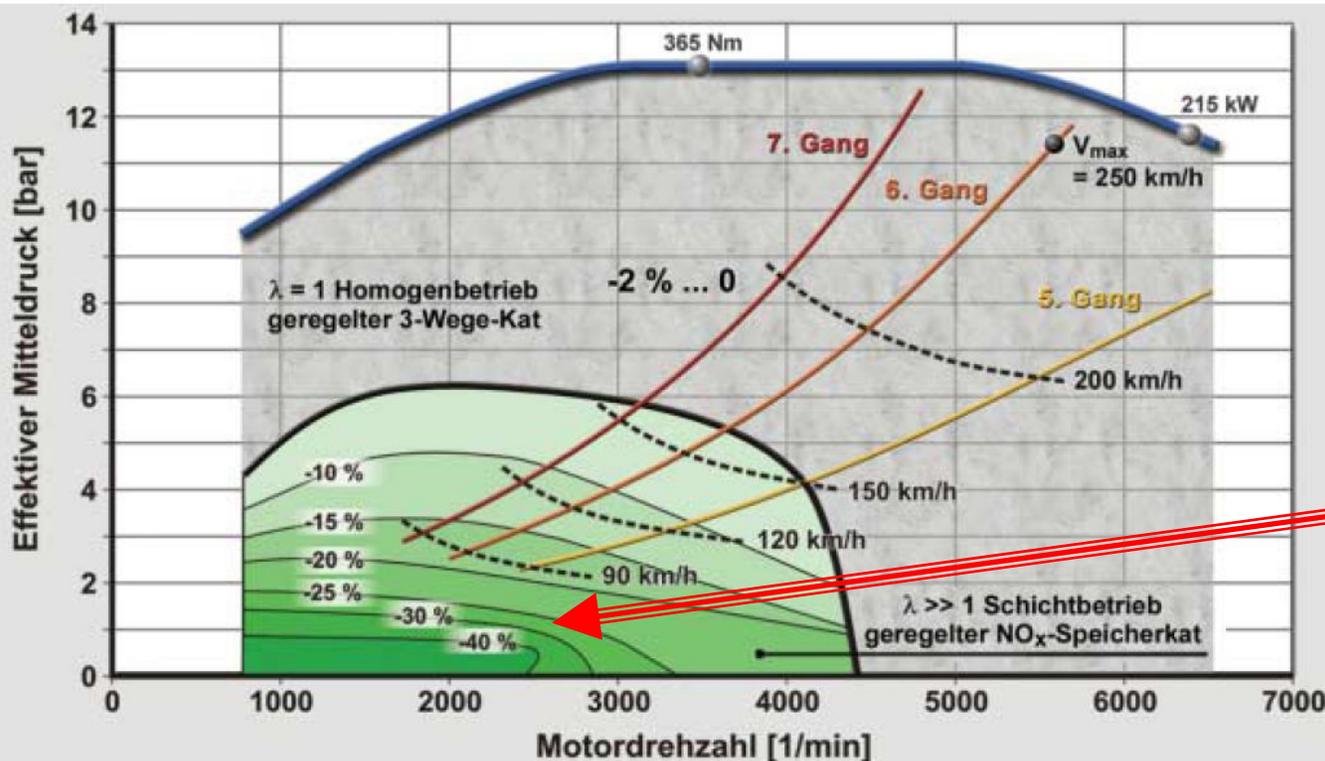


Problematik des modernen Ottomotors für den Fahrzeugantrieb

Warum der ganze Aufwand?



- Moderner Ottomotor mit inhomogener Gemischbildung im unteren Lastbereich, d.h. mit Qualitätsregelung der Last ermöglicht durch
 - Schichtladung mit Direkteinspritzung (GDI, FSI) und Entdrosselung
 - Einsatz des Speicherkatalysators (für NO_x) usw.



Darum!

Im Prozent ist der Verbrauchspotential des Schichtbetriebs gegenüber den Homogenbetrieb angegeben.

Problematik des modernen Ottomotors für den Fahrzeugantrieb

Sprung aufgezungen von den zu großen spezifischen Kraftstoff-Verbräuchen



- Klassischer Ottomotor mit **homogener Gemischbildung** in allen Betriebspunkten (d.h. mit Saugrohreinspritzung)
 - Quantitätsregelung der Last (Drosselung der angesaugten Gemischmasse)
 - Einhaltung des Lambda-Fensters und Einsatz des 3-Wege-Katalysators

- Moderner Ottomotor mit inhomogener Gemischbildung im unteren Lastbereich, d.h. mit Qualitätsregelung der Last ermöglicht durch
 - Schichtladung mit Direkteinspritzung (GDI, FSI) und Entdrosselung
 - Einsatz des Speicherkatalysators (für NO_x)
- **Einsatz der gekühlten Abgasrückführung (AGR)**
- Turbo- u. mechanische Aufladung
- Downsizing
- Vollvariabler Ventiltrieb
 - Phasenverschiebung
 - Ventilhubänderung
- Zylinderabschaltung
- Variables Verdichtungsverhältnis
- Einsatz von Atkinson- oder Miller-Kreisprozessen usw.

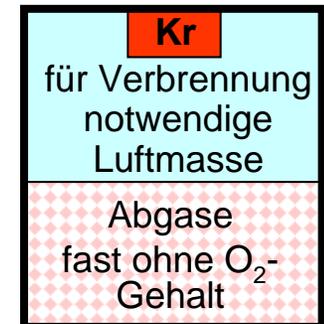
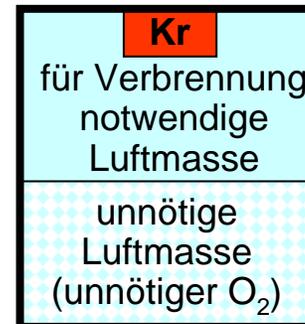
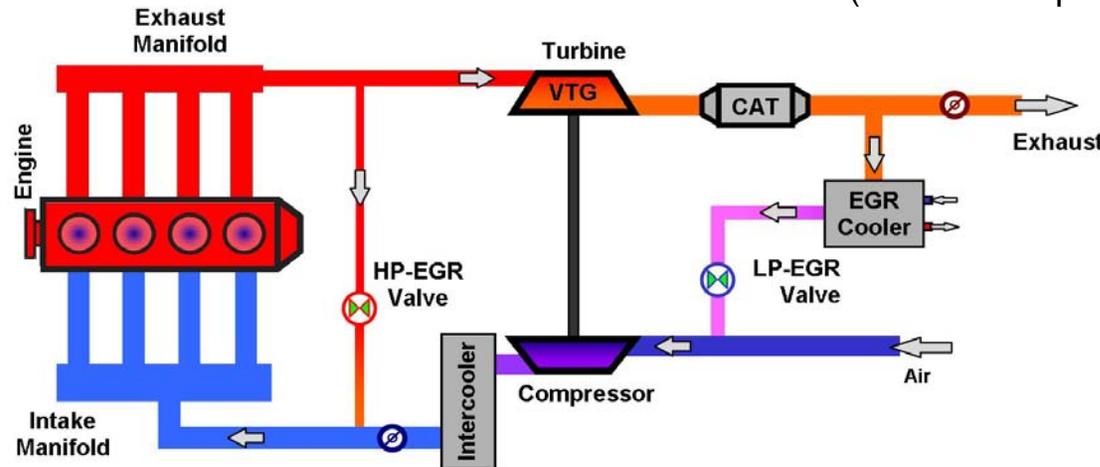
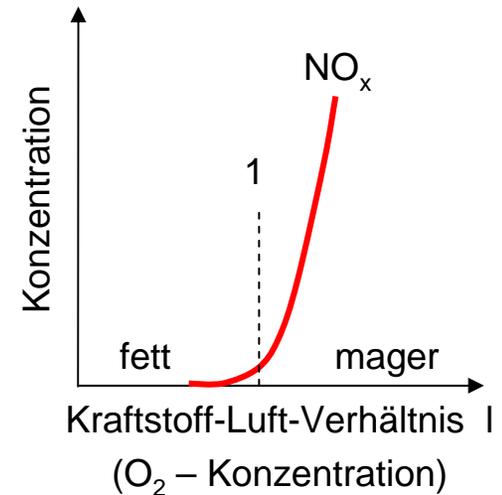
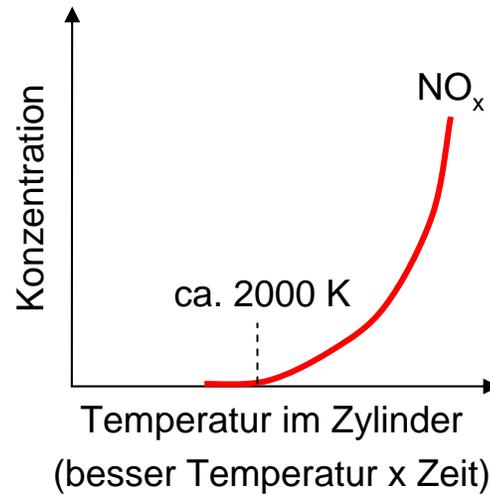
Problematik des modernen Ottomotors für den Fahrzeugantrieb

Minderung der NO_x -Produktion während Verbrennung durch den Einsatz der gekühlten Abgasrückführung (AGR)

$$\text{NO}_x = f(\text{O}_2, \text{Temperatur}, \text{Zeit})$$

Abgasrückführungsarten:

- innere AGR
- äußere AGR
 - Hochdruck AGR
 - Niederdruck AGR



Hubvolumen eines Ottomotors im Teillast ohne (links) und mit Abgasrückführung

Problematik des modernen Ottomotors für den Fahrzeugantrieb

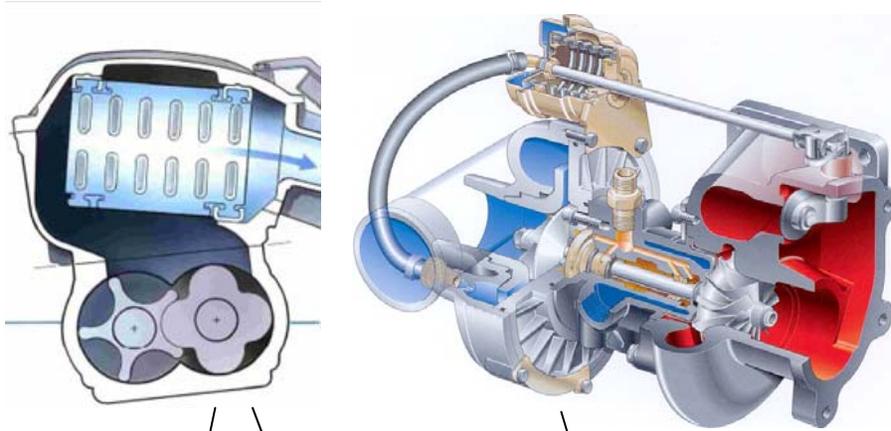
Sprung aufgezungen von den zu großen spezifischen Kraftstoff-Verbräuchen



- Klassischer Ottomotor mit **homogener Gemischbildung** in allen Betriebspunkten (d.h. mit Saugrohreinspritzung)
 - Quantitätsregelung der Last (Drosselung der angesaugten Gemischmasse)
 - Einhaltung des Lambda-Fensters und Einsatz des 3-Wege-Katalysators

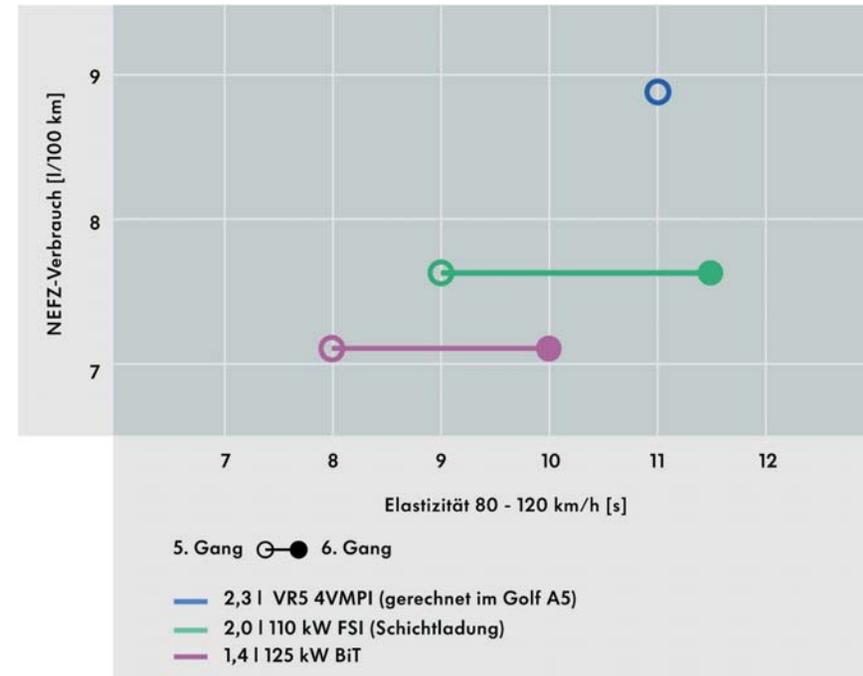
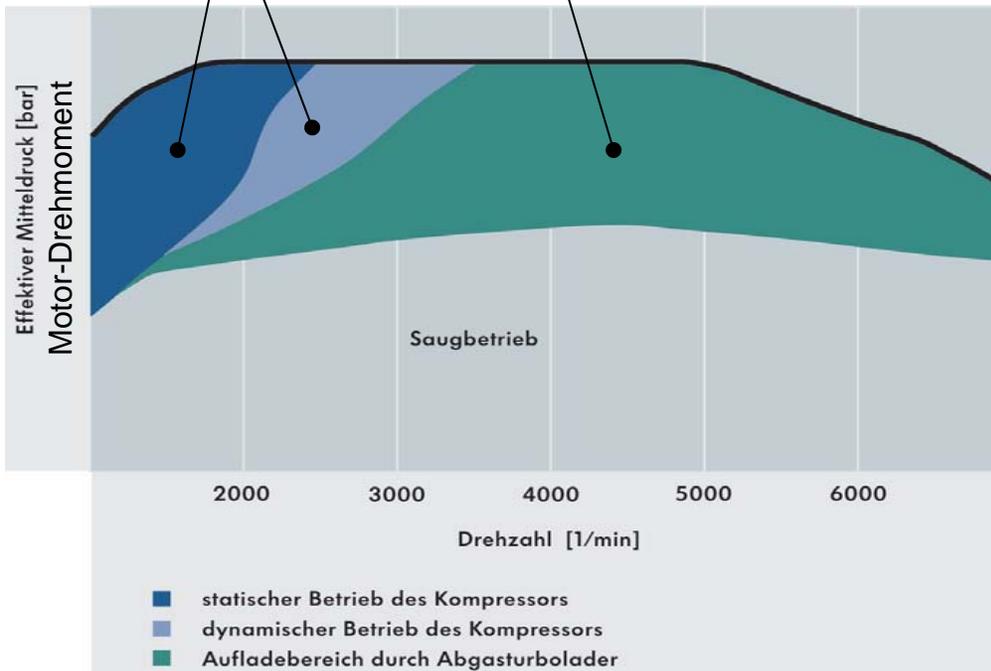
- Moderner Ottomotor mit inhomogener Gemischbildung im unteren Lastbereich, d.h. mit Qualitätsregelung der Last ermöglicht durch
 - Schichtladung mit Direkteinspritzung (GDI, FSI) und Entdrosselung
 - Einsatz des Speicherkatalysators (für NO_x)
- Einsatz der gekühlten Abgasrückführung (AGR)
- **Turbo- u. mechanische Aufladung**
- **Downsizing**
- Vollvariabler Ventiltrieb
 - Phasenverschiebung
 - Ventilhubänderung
- Zylinderabschaltung
- Variables Verdichtungsverhältnis
- Einsatz von Atkinson- oder Miller-Kreisprozessen usw.

Problematik des modernen Ottomotors für den Fahrzeugantrieb



Turbo- und mechanische Aufladung

Downsizing



Problematik des modernen Ottomotors für den Fahrzeugantrieb

Sprung aufgezungen von den zu großen spezifischen Kraftstoff-Verbräuchen

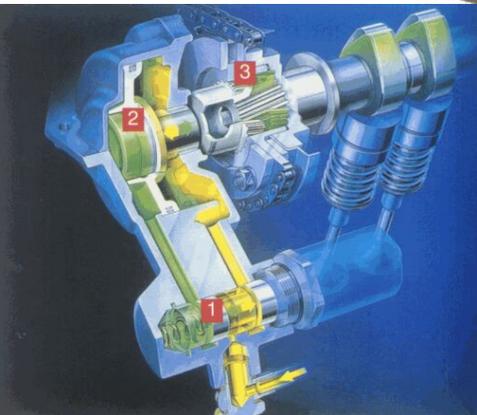


- Klassischer Ottomotor mit **homogener Gemischbildung** in allen Betriebspunkten (d.h. mit Saugrohreinspritzung)
 - Quantitätsregelung der Last (Drosselung der angesaugten Gemischmasse)
 - Einhaltung des Lambda-Fensters und Einsatz des 3-Wege-Katalysators

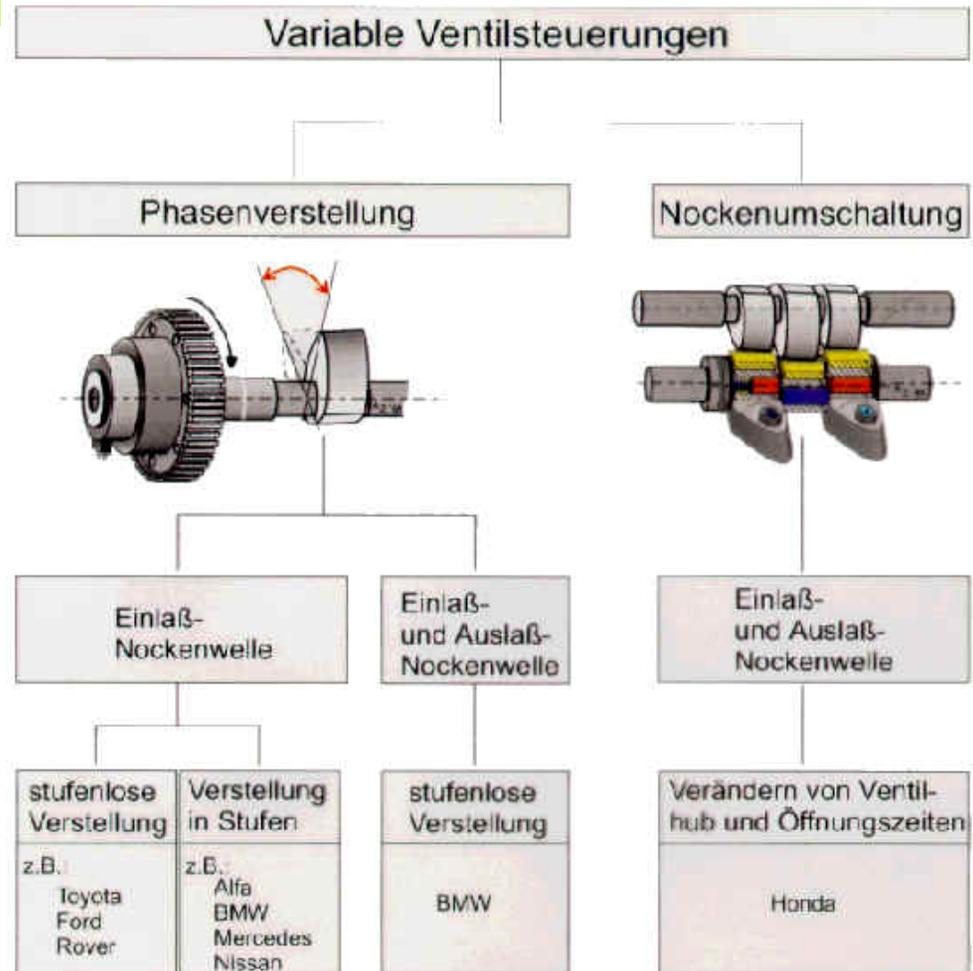
- Moderner Ottomotor mit inhomogener Gemischbildung im unteren Lastbereich, d.h. mit Qualitätsregelung der Last ermöglicht durch
 - Schichtladung mit Direkteinspritzung (GDI, FSI) und Entdrosselung
 - Einsatz des Speicherkatalysators (für NO_x)
- Einsatz der gekühlten Abgasrückführung (AGR)
- Turbo- u. mechanische Aufladung
- Downsizing
- **Vollvariabler Ventiltrieb**
 - **Phasenverschiebung**
 - **Ventilhubänderung**
- **Zylinderabschaltung**
- Variables Verdichtungsverhältnis
- Einsatz von Atkinson- oder Miller-Kreisprozessen usw.

Problematik des modernen Ottomotors für den Fahrzeugantrieb

- **Vollvariabler Ventiltrieb**
 - Phasenverschiebung
 - Ventilhubänderung
- **Zylinderabschaltung**

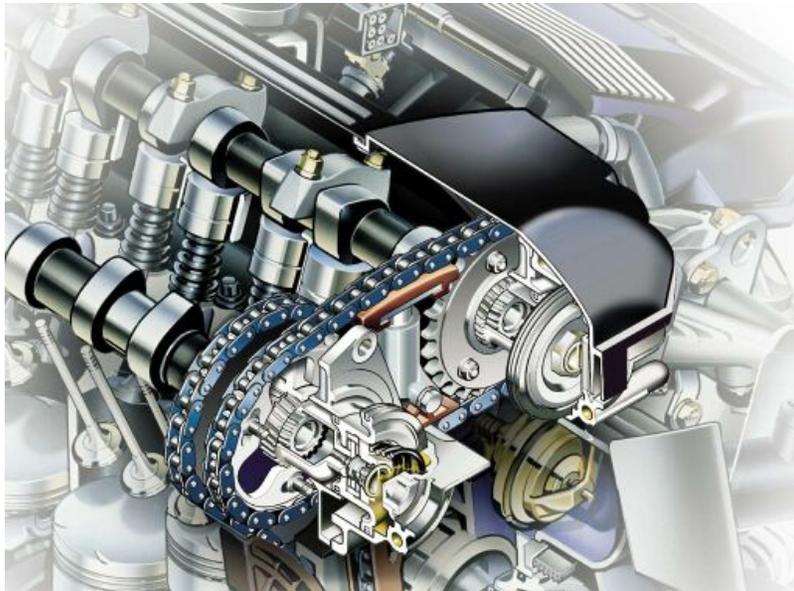
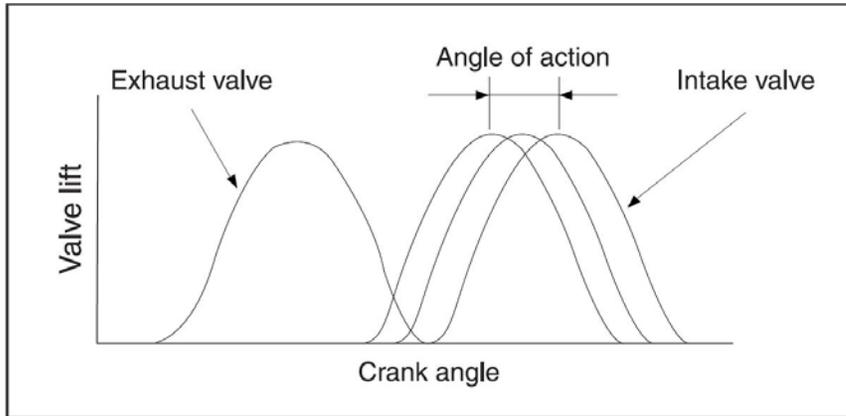


- 1 = Magnetventil
- 2 = Hydraulische Verstelleinheit
- 3 = Zahnwellenrad mit Schrägverzahnung innen

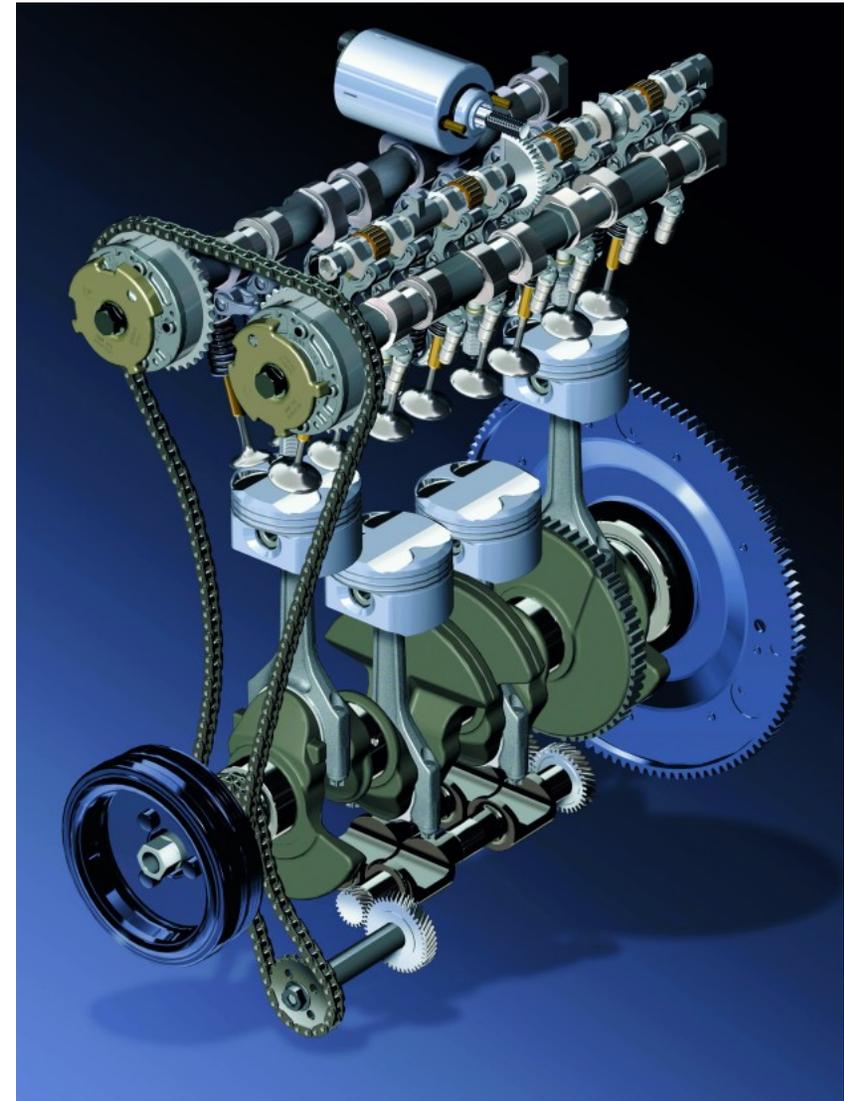


Problematik des modernen Ottomotors für den Fahrzeugantrieb

VVT-i valve timing (conceptual diagram)

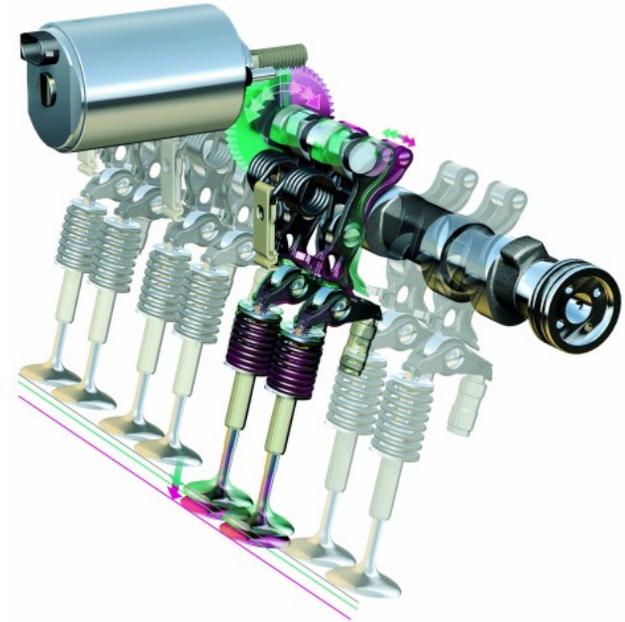
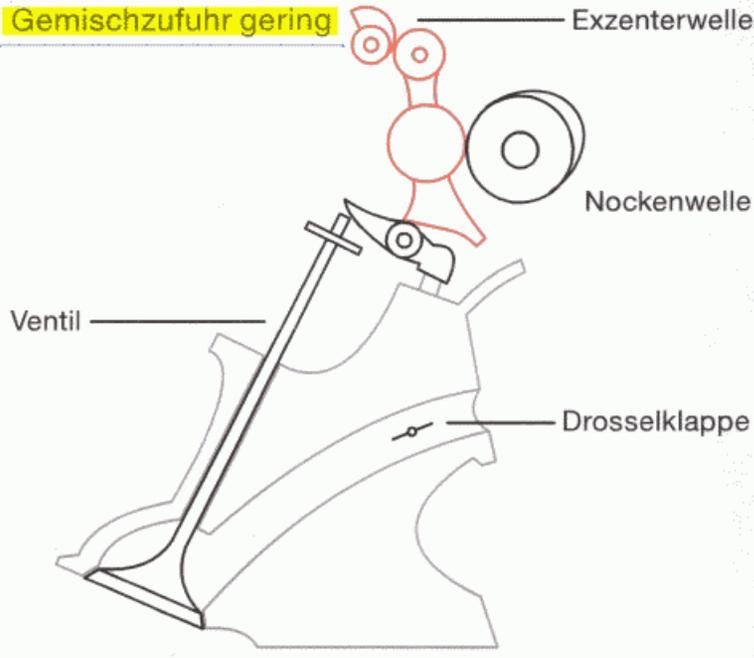


Quelle: Firma BMW
VANOS System / Phasenverschiebung



Quelle: Firma BMW
VALVETRONIC System

Problematik des modernen Ottomotors für den Fahrzeugantrieb



VALVETRONIC ermöglicht einen **vollvariablen Ventilhub von 0,0 bis zu 9,7 Millimeter**.

Er wird durch einen elektromotorisch **verstellbaren Zwischenhebel** erreicht, der zwischen der Nockenwelle und dem Schlepphebel, der das Ventil betätigt, platziert ist.

Dabei arbeitet die VALVETRONIC nicht nur präzise, sondern auch extrem schnell. Die Verstellung von Minimal- auf Maximalhub kann in nur 0,3 Sekunden geschehen.

Problematik des modernen Ottomotors für den Fahrzeugantrieb

Sprung aufgezungen von den zu großen spezifischen Kraftstoff-Verbräuchen



- Klassischer Ottomotor mit **homogener Gemischbildung** in allen Betriebspunkten (d.h. mit Saugrohreinspritzung)
 - Quantitätsregelung der Last (Drosselung der angesaugten Gemischmasse)
 - Einhaltung des Lambda-Fensters und Einsatz des 3-Wege-Katalysators

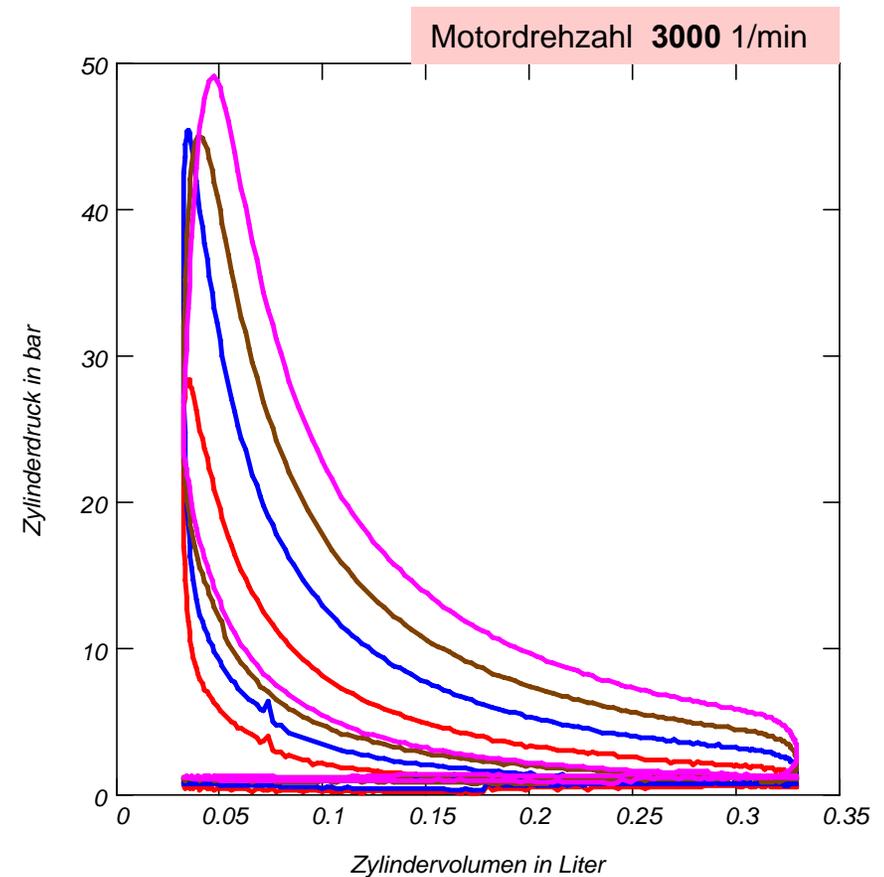
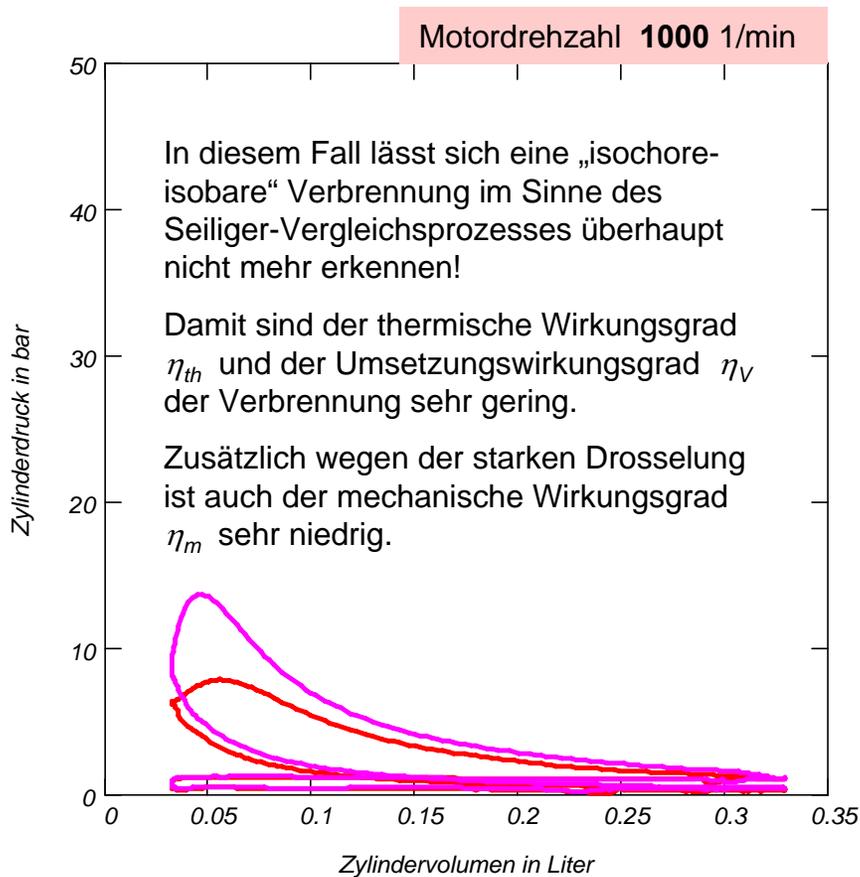
- Moderner Ottomotor mit inhomogener Gemischbildung im unteren Lastbereich, d.h. mit Qualitätsregelung der Last ermöglicht durch
 - Schichtladung mit Direkteinspritzung (GDI, FSI) und Entdrosselung
 - Einsatz des Speicherkatalysators (für NO_x)
- Einsatz der gekühlten Abgasrückführung (AGR)
- Turbo- u. mechanische Aufladung
- Downsizing
- Vollvariabler Ventiltrieb
 - Phasenverschiebung
 - Ventilhubänderung
- Zylinderabschaltung
- **Variables Verdichtungsverhältnis**
- **Einsatz von Atkinson- oder Miller-Kreisprozessen usw.**

Problematik des modernen Ottomotors für den Fahrzeugantrieb

Quantitätsregelung der Last

Effektiver Wirkungsgrad:

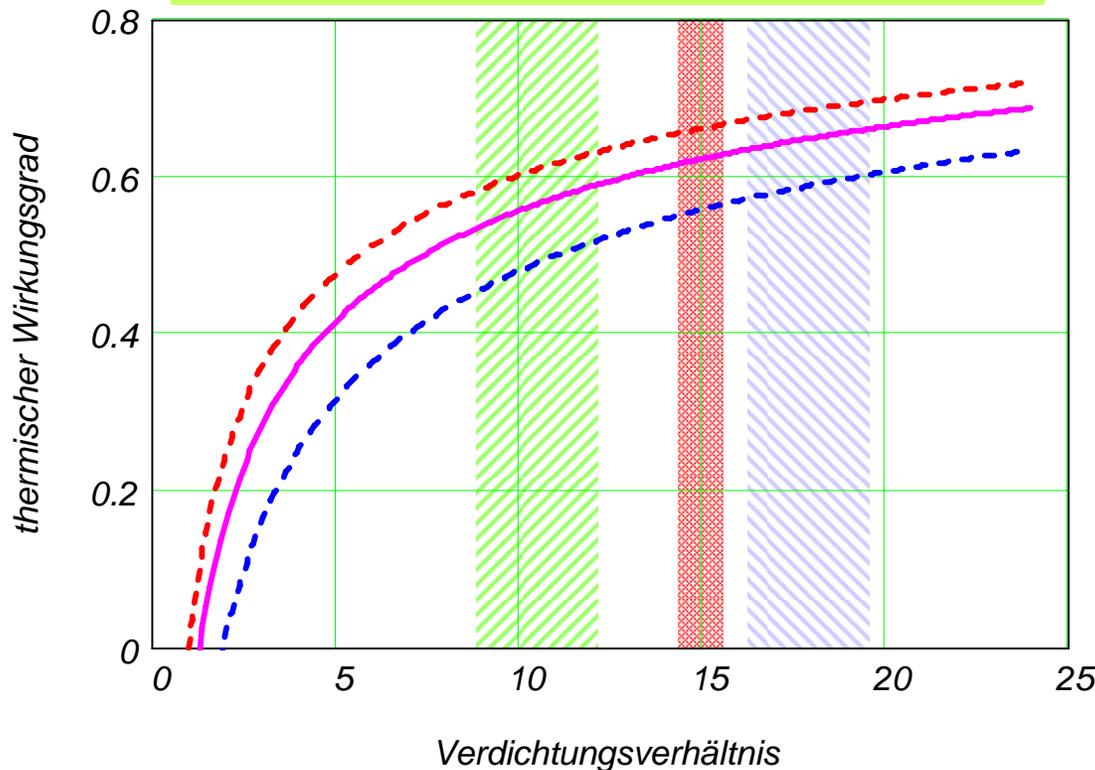
$$\eta_e = \eta_i \cdot \eta_m = \eta_{th} \cdot \eta_V \cdot \eta_m$$



Problematik des modernen Ottomotors für den Fahrzeugantrieb

Variables Verdichtungsverhältnis

Einfluss des Verdichtungsverhältnisses auf den thermischen Wirkungsgrad η_{th}

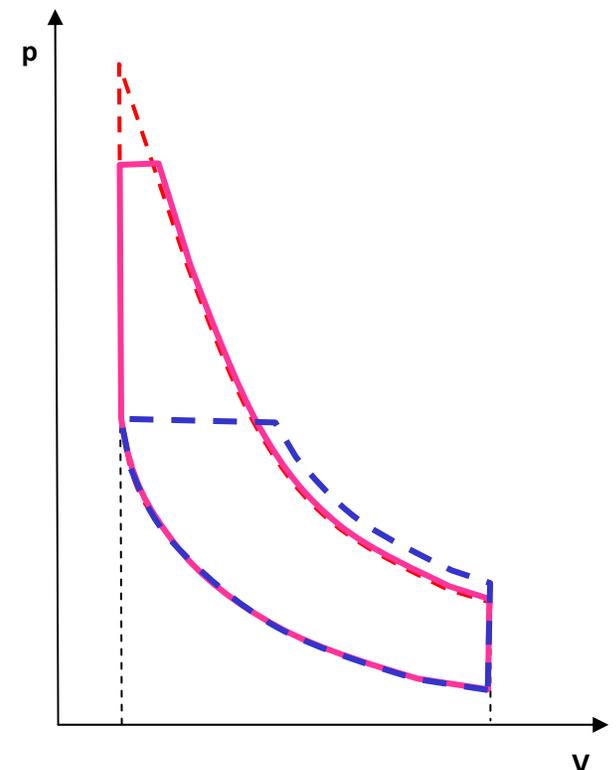


--- Otto
 --- Diesel
 — Seiliger

Verdichtungsverhältnis

Bereich der heutigen Ottomotoren
 Bereich der heutigen Dieselmotoren
 Optimalbereich aus heutiger Sicht

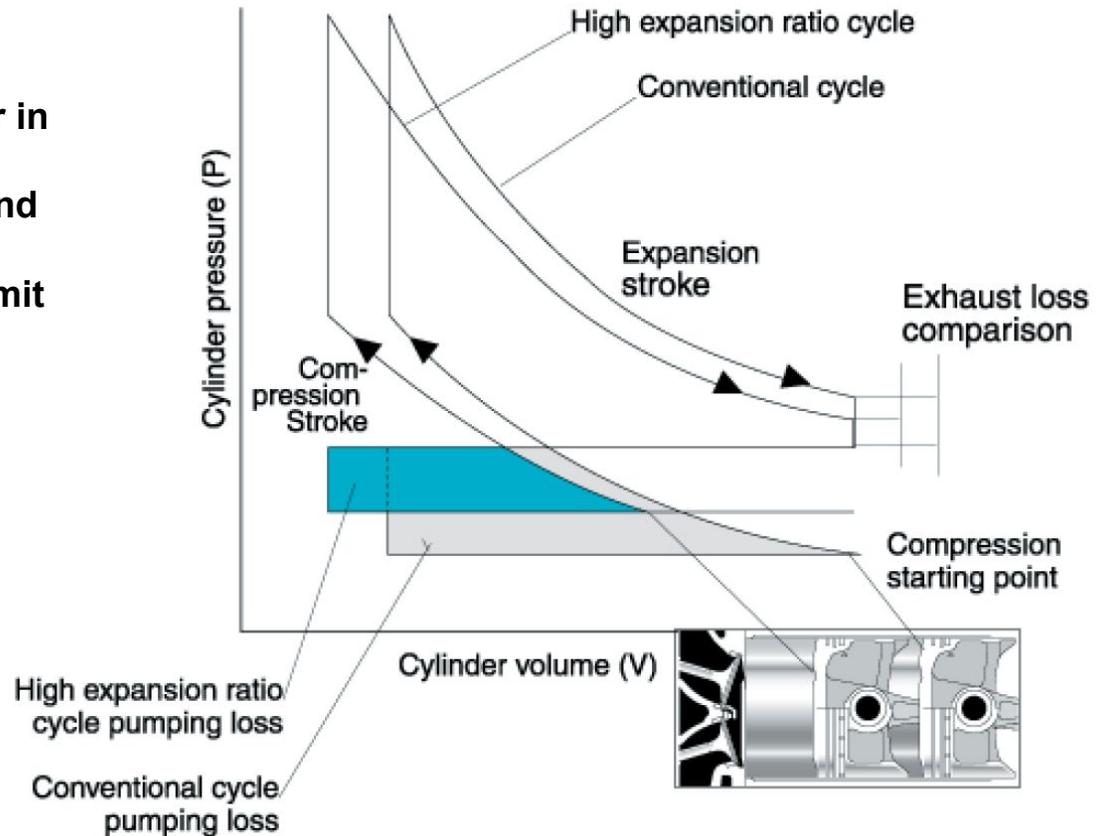
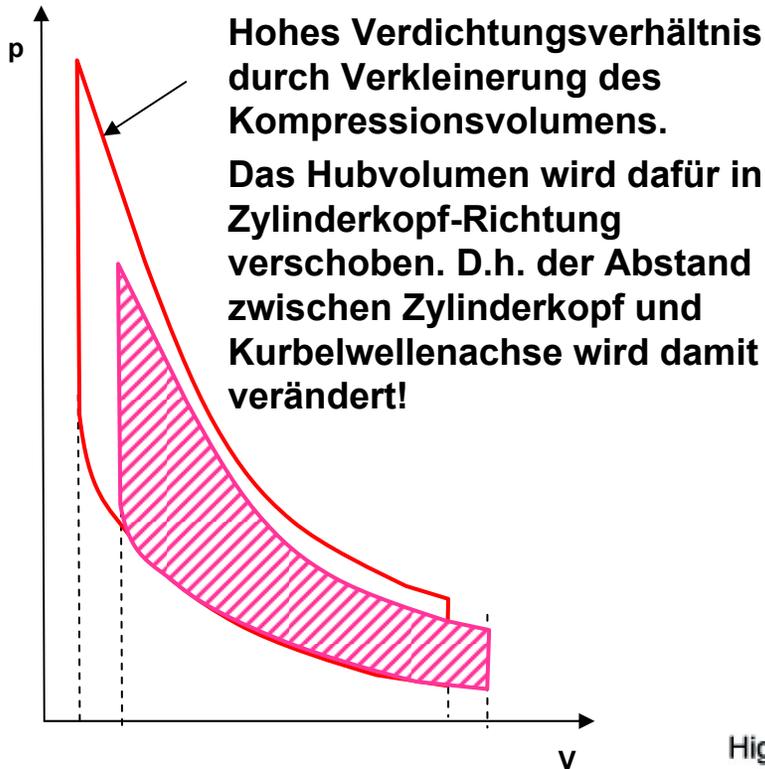
$$\eta_e = \eta_i \cdot \eta_m = \eta_{th} \cdot \eta_V \cdot \eta_m$$



--- Otto
 --- Diesel
 — Seiliger

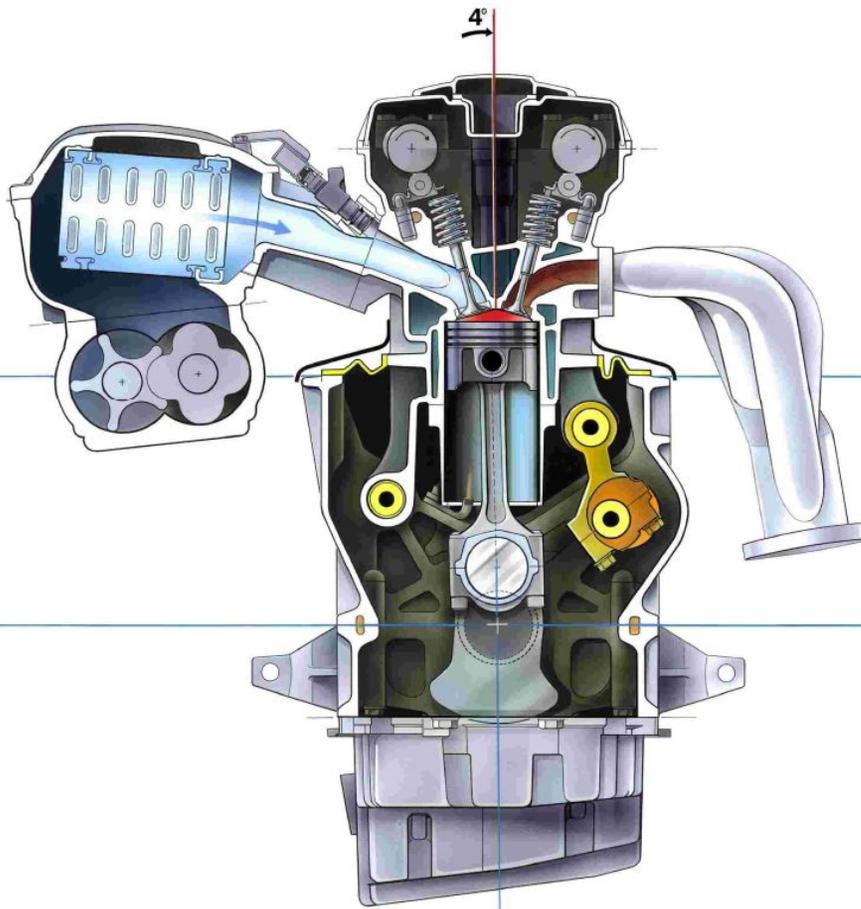
Problematik des modernen Ottomotors für den Fahrzeugantrieb

Hohes Verdichtungsverhältnis + Atkinson-Prozess

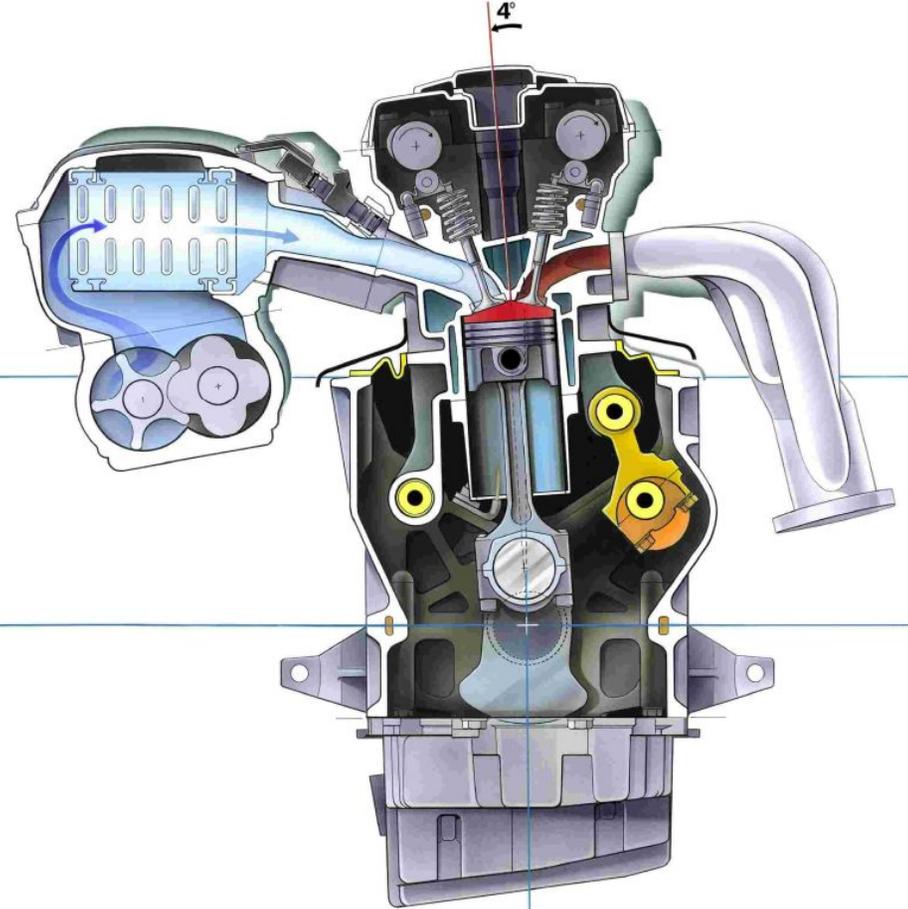


Problematik des modernen Ottomotors für den Fahrzeugantrieb

Variables Verdichtungsverhältnis



14:1



8:1

Problematik des modernen Ottomotors für den Fahrzeugantrieb

Variables Verdichtungsverhältnis

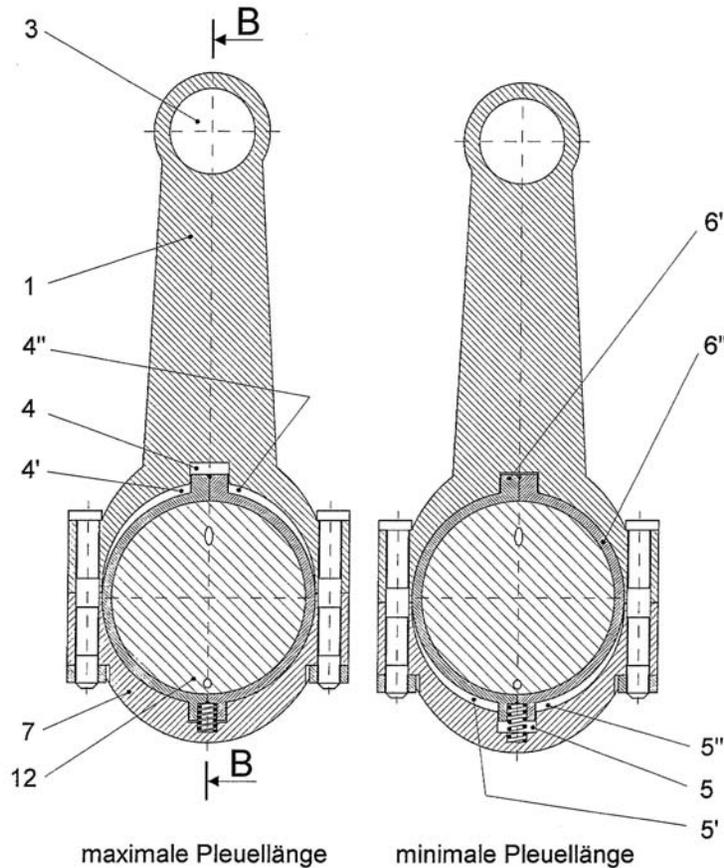
ZEICHNUNGEN SEITE 3

Nummer: DE 198 44 200 A1
 Int. Cl. 6: F 02 B 75/32
 Offenlegungstag: 17. Juni 1999

ZEICHNUNGEN SEITE 4

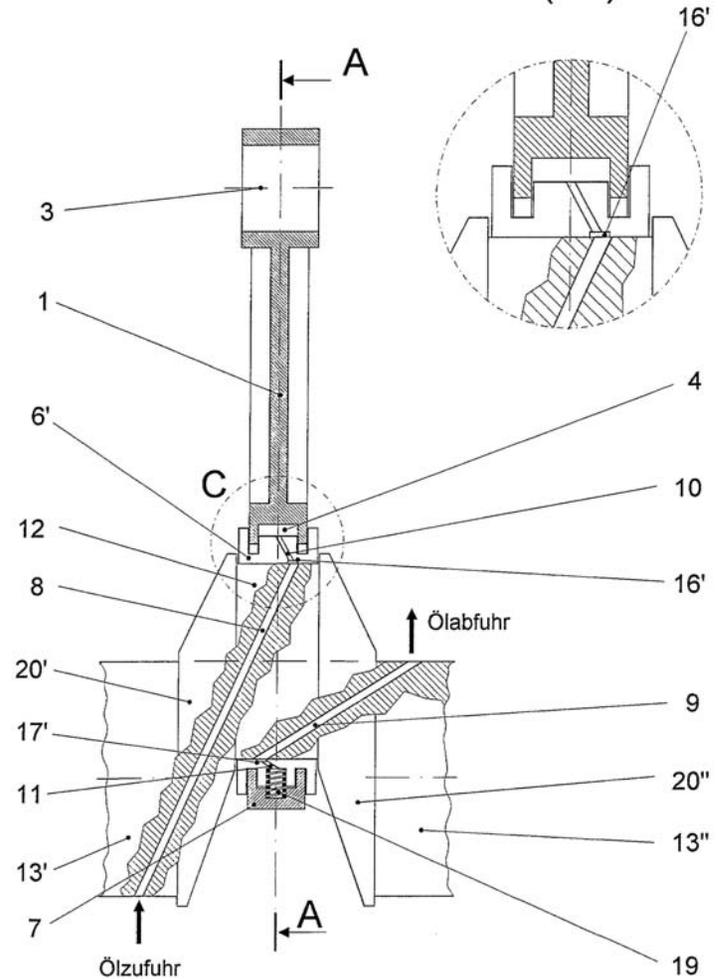
Nummer: DE 198 44 200 A1
 Int. Cl. 6: F 02 B 75/32
 Offenlegungstag: 17. Juni 1999

Schnitt A-A



Schnitt B-B

C (2:1)

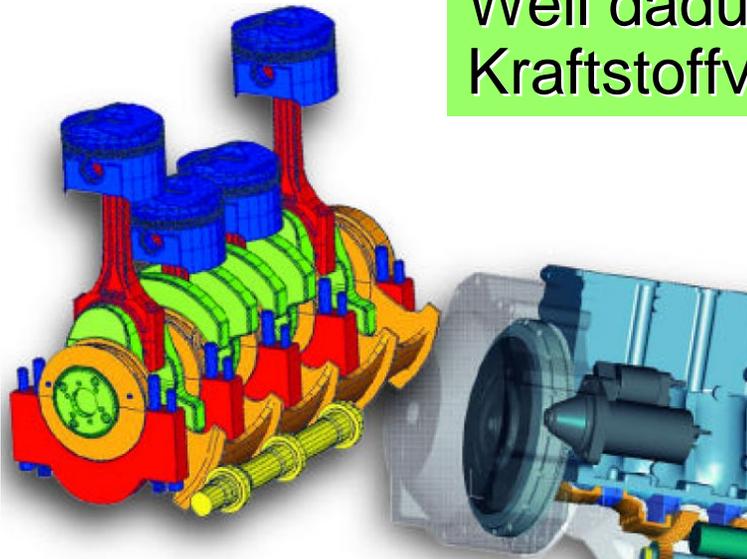


Problematik des modernen Ottomotors für den Fahrzeugantrieb

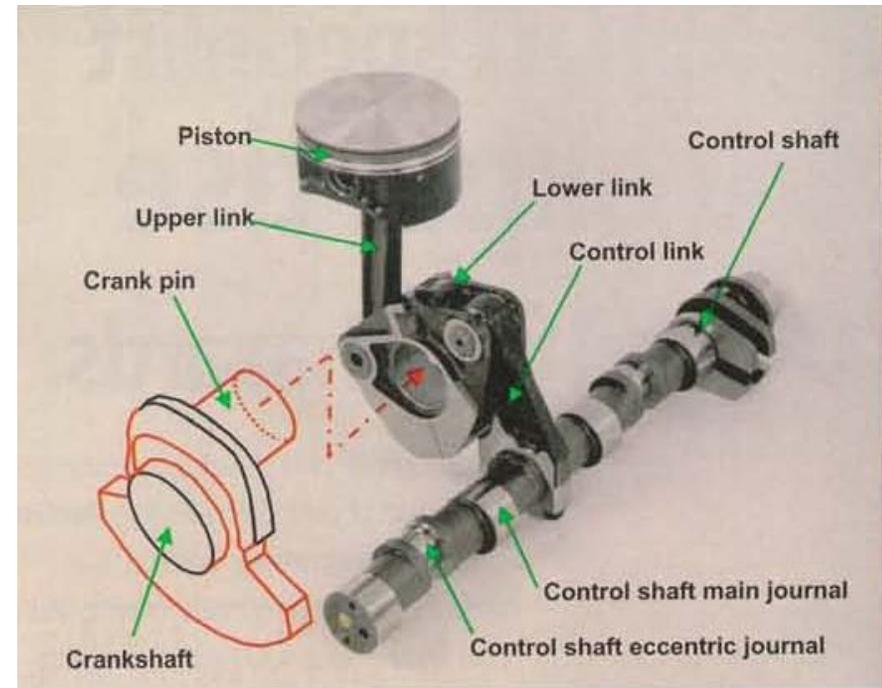
Variables Verdichtungsverhältnis

Warum der ganze Aufwand?

Weil dadurch eine Verringerung des Kraftstoffverbrauches bis 30% erreichbar ist!

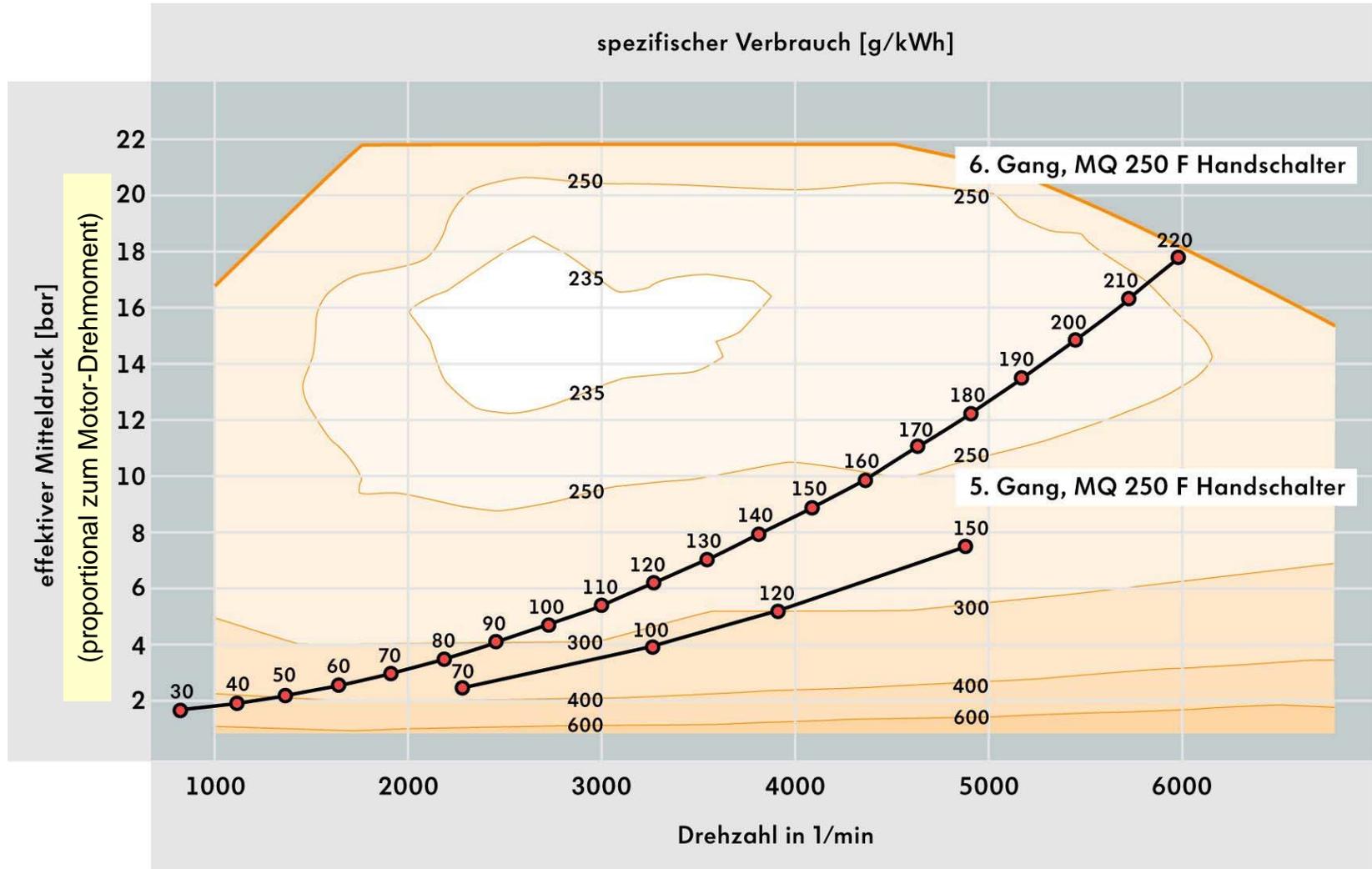


Variable Verdichtung durch Kurbelwellenverlagerung



Problematik aller Motoren für den reinen Fahrzeugantrieb

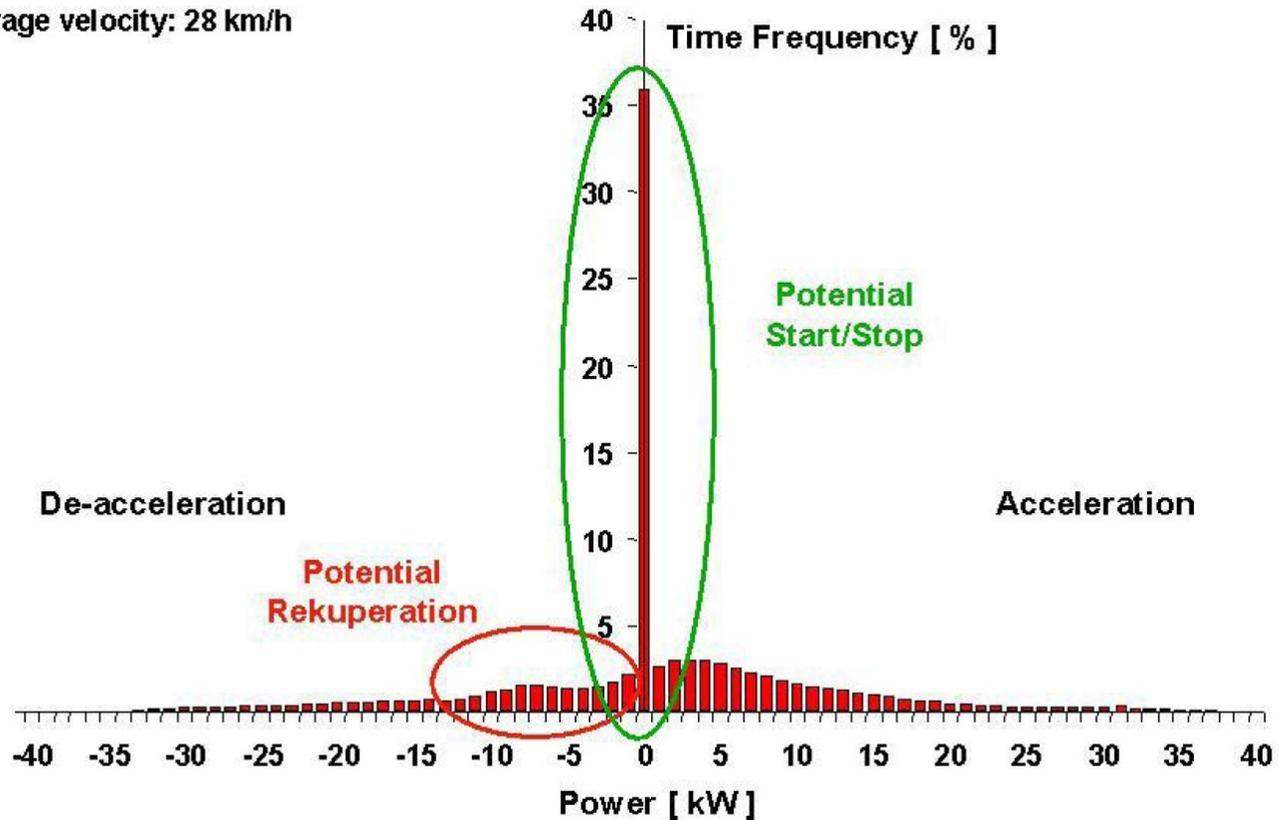
Gesamtkennfeld abdecken auch bei ungünstigen b_e !!!



Motivation für Hybridantriebe: Einsparpotenziale

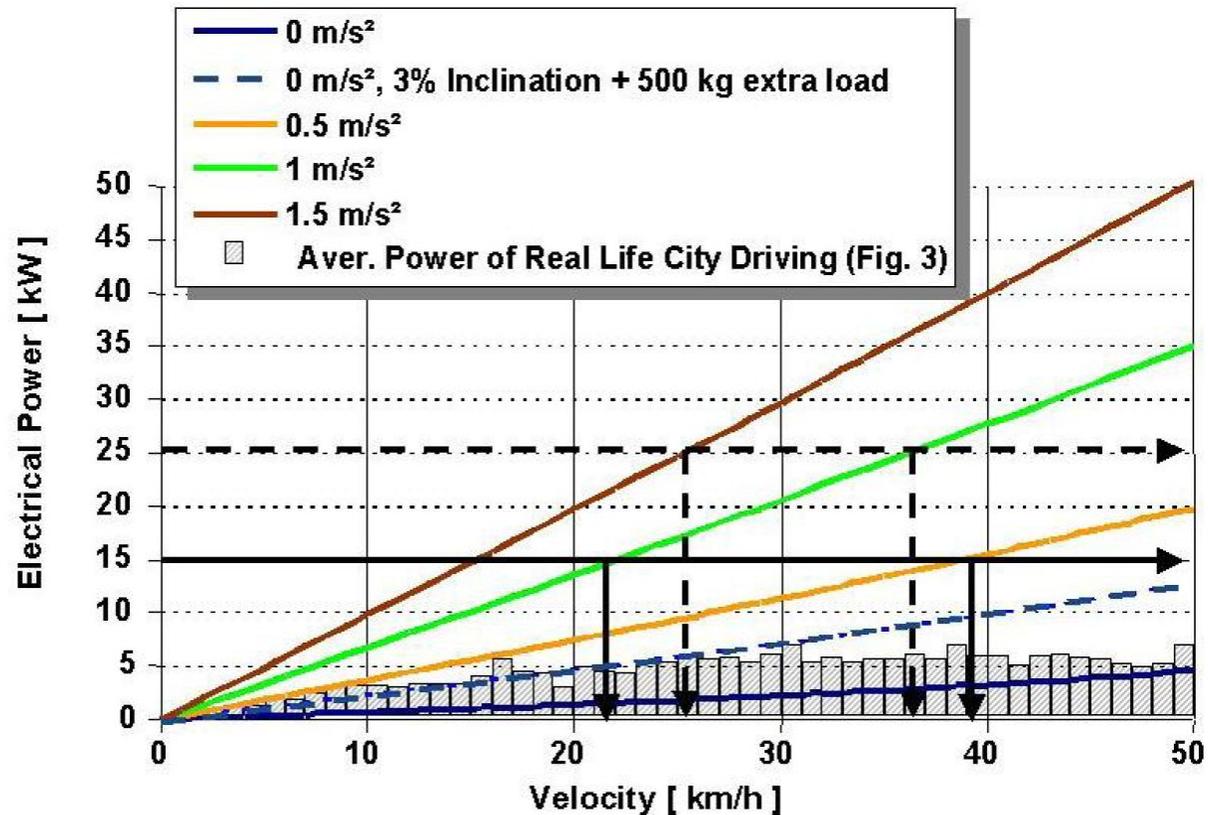
Baseline: 1.6L Gasoline MPFI 4V Engine, ITW 1470 kg

Average velocity: 28 km/h



Beschleunigung und Verzögerung unter realen Stadtfahrbedingungen

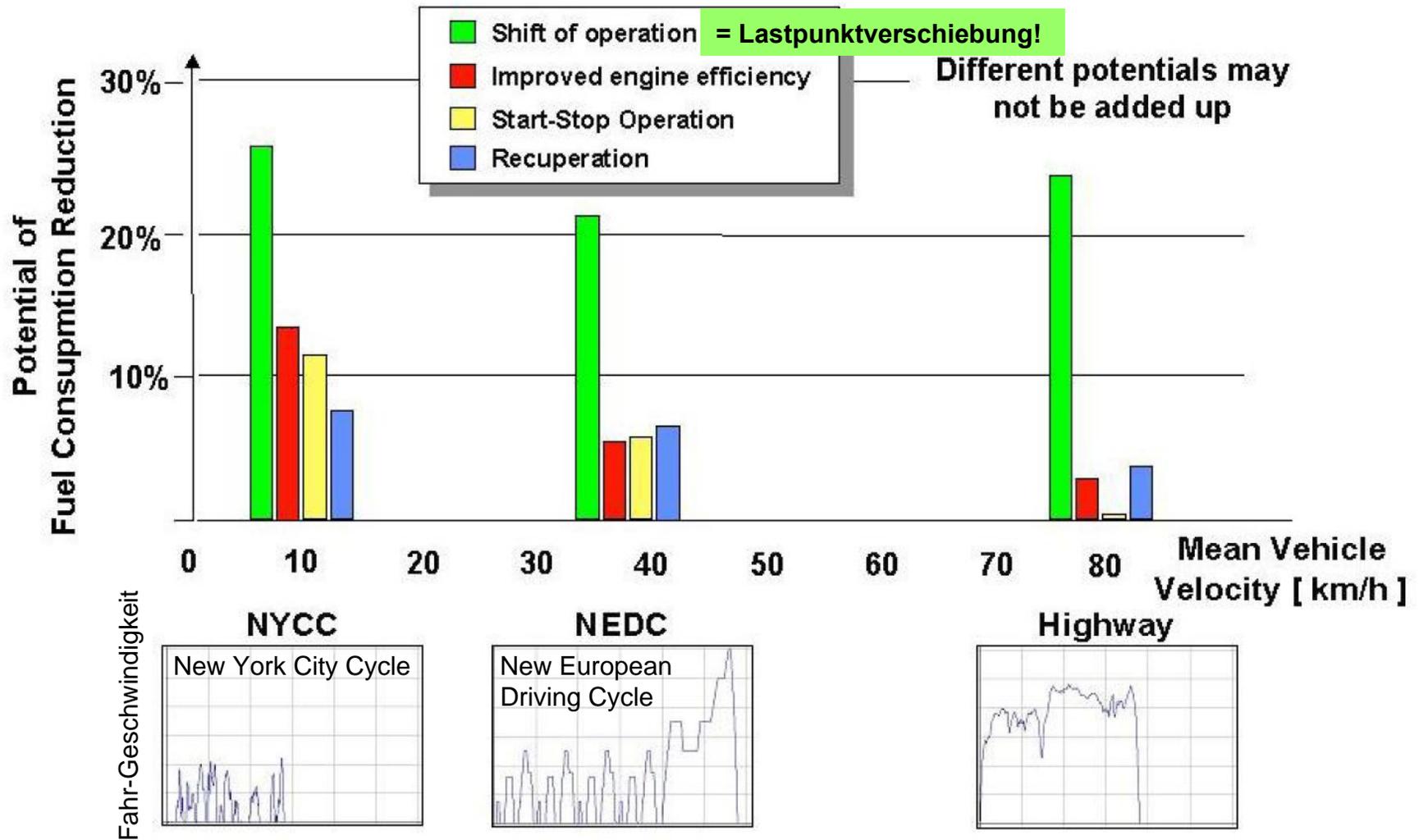
Motivation für Hybridantriebe: Elektrisches Fahren



Baseline: 1.6 L NA Engine, ITW 1470 kg

Motivation für Hybrid: Elektrisches Fahren

Motivation für Hybridantriebe: Einsparpotenziale



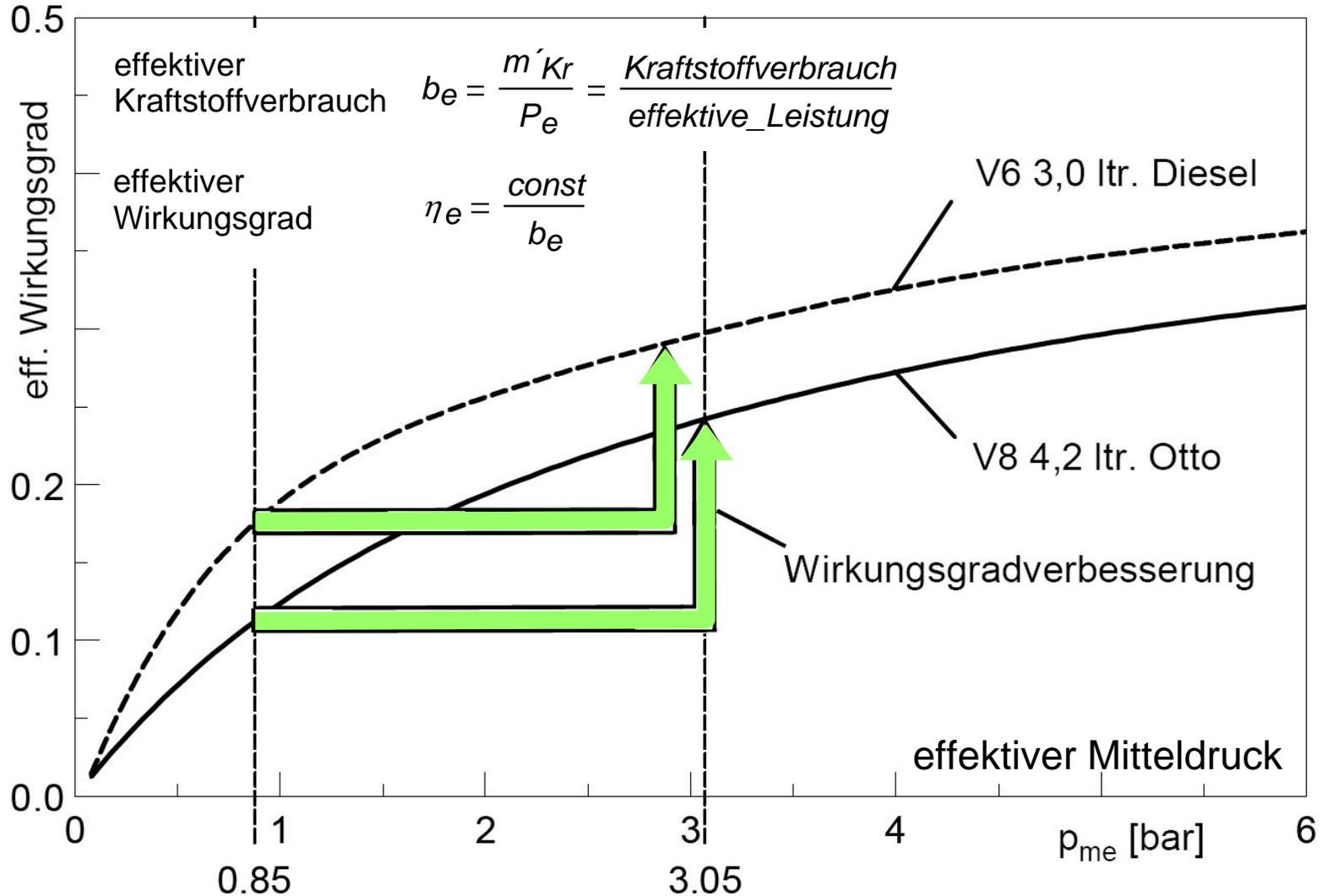
Baseline: 1.6L Gasoline MPFI 4V Engine, ITW 1470 kg

Quelle: Firma AVL, Dr. Fischer & Dr. Kirsten, Wiener Motoren-Symposium. 2006

Potenzial für Kraftstoffverbrauch bei verschiedenen Fahrzyklen

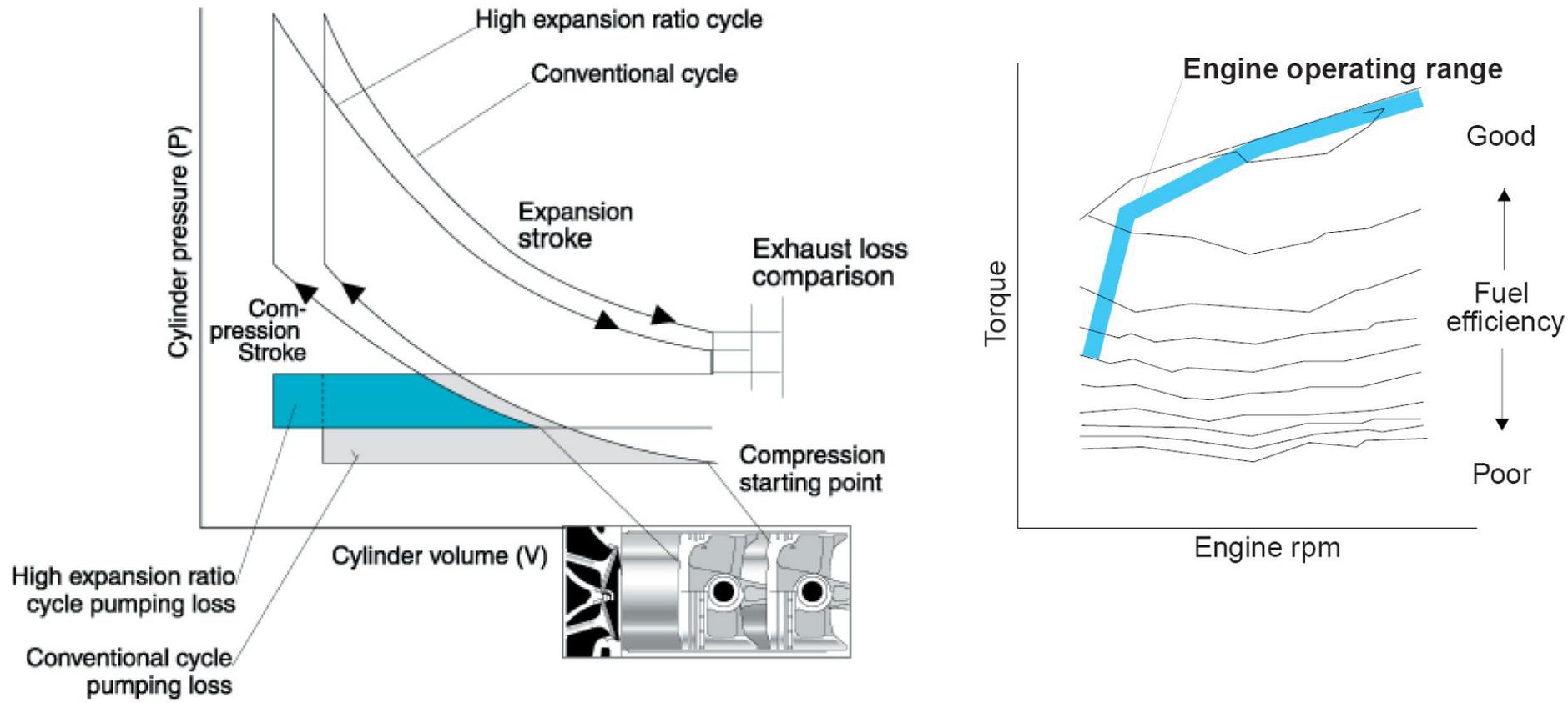
Motivation für Hybridantriebe: Einsparpotenziale

Erklärungen zur Lastpunktverschiebung

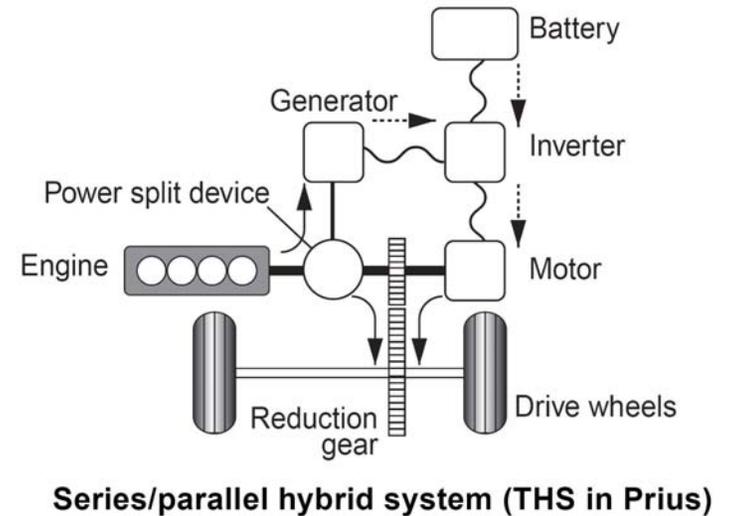
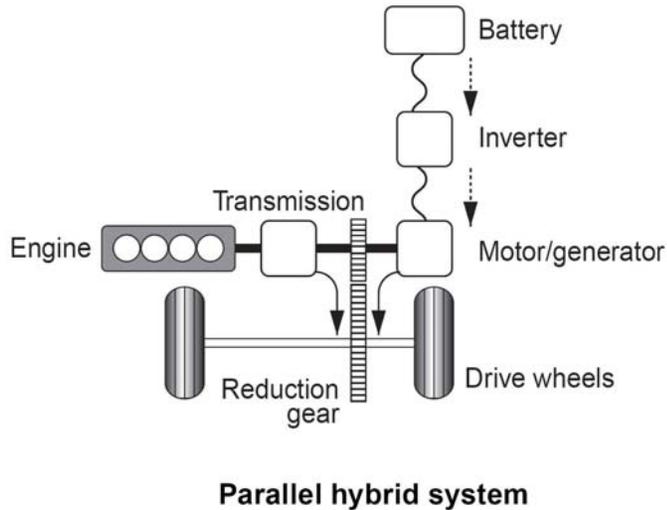
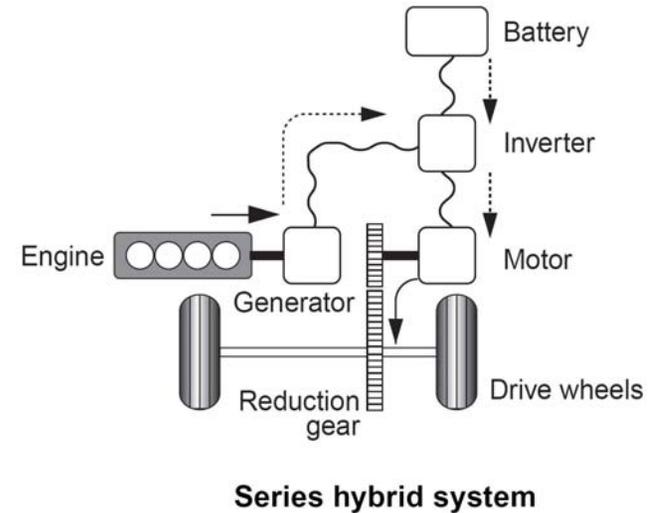
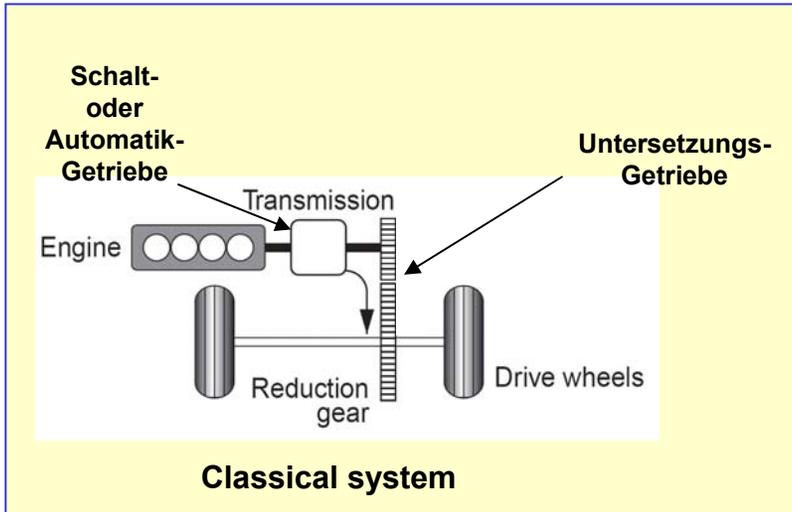


Problematik des modernen Ottomotors für den Fahrzeugantrieb

Hohes Verdichtungsverhältnis + Atkinson-Prozess + Lastpunktverschiebung



Übliche Arten von Hybridantrieben



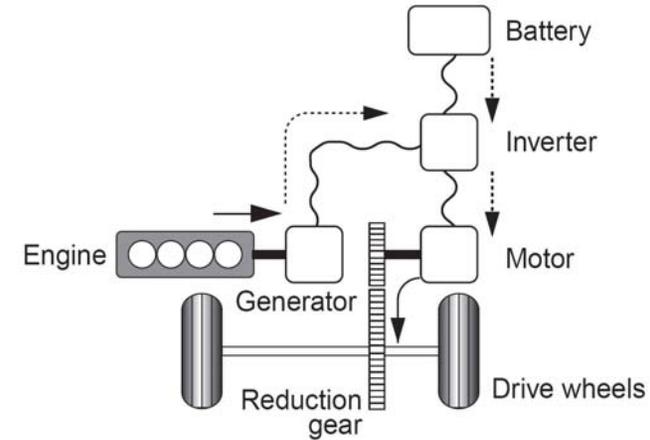
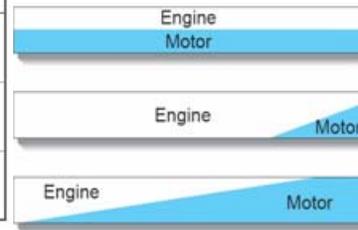
Übliche Arten von Hybridantrieben

Hybrid system comparison

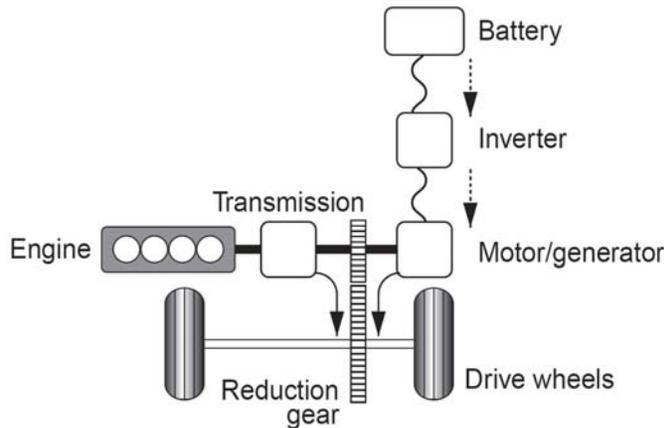
	Fuel economy improvement				Driving performance	
	Idling stop	Energy recovery	High-efficiency operation control	Total efficiency	Acceleration	Continuous high output
Series	●	⊙	●	●	○	○
Parallel	●	●	○	●	●	○
Series/parallel	⊙	⊙	⊙	⊙	●	●

⊙ Excellent ● Superior ○ Somewhat unfavorable

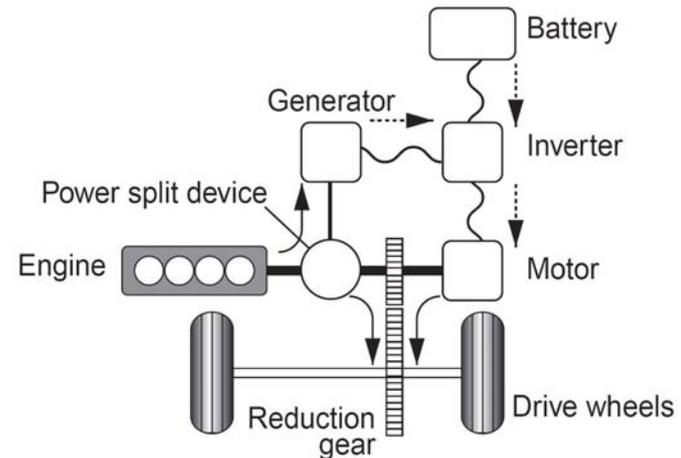
Ratio of engine and motor operation in hybrid systems (conceptual diagram)



Series hybrid system

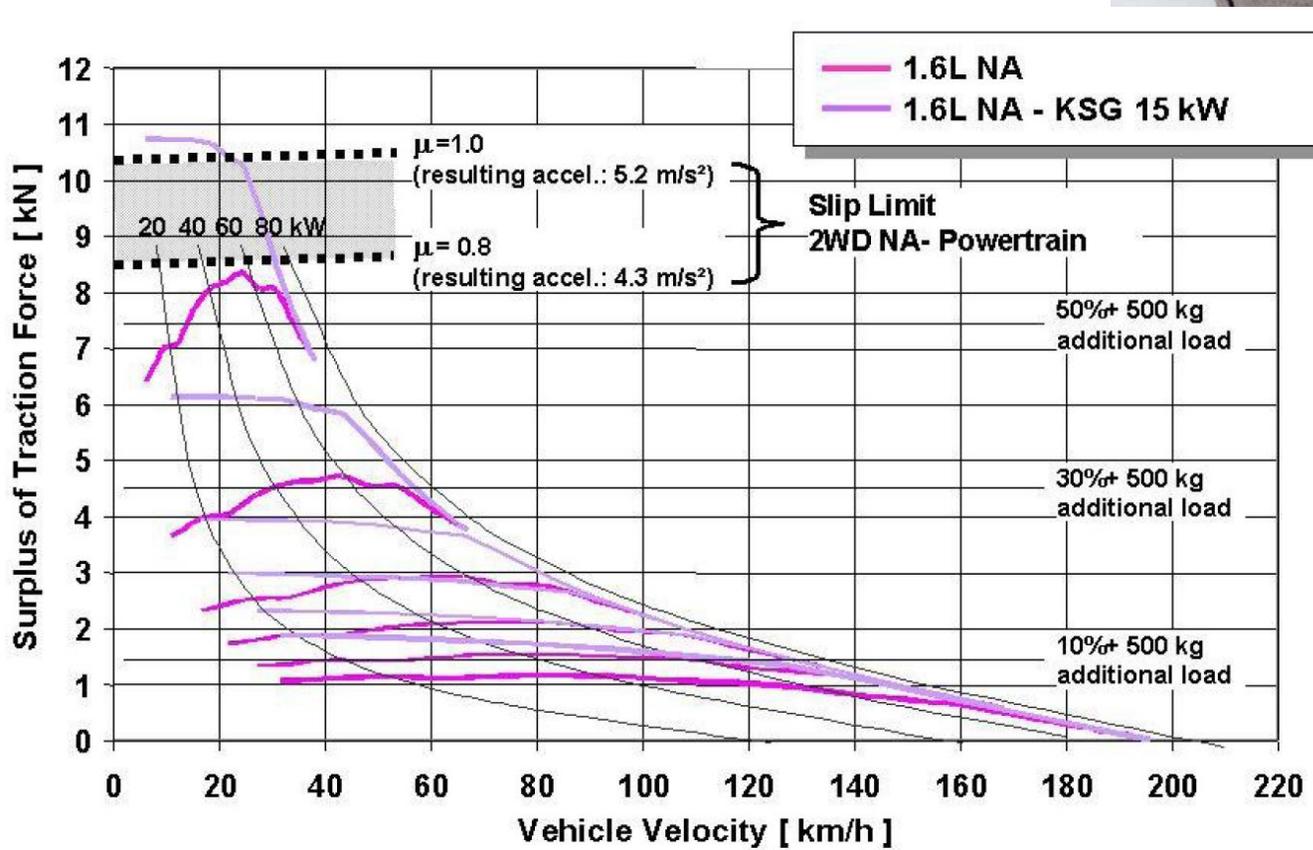
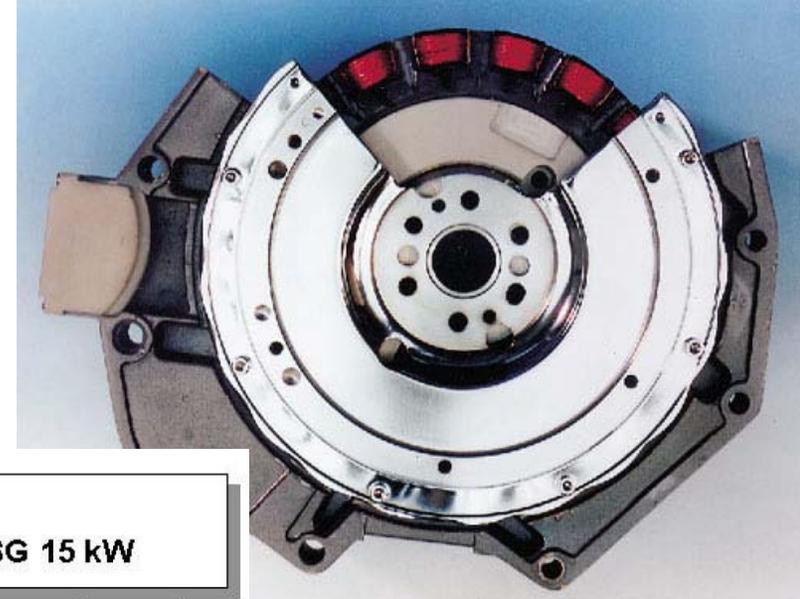


Parallel hybrid system



Series/parallel hybrid system (THS in Prius) (Power split hybrid system)

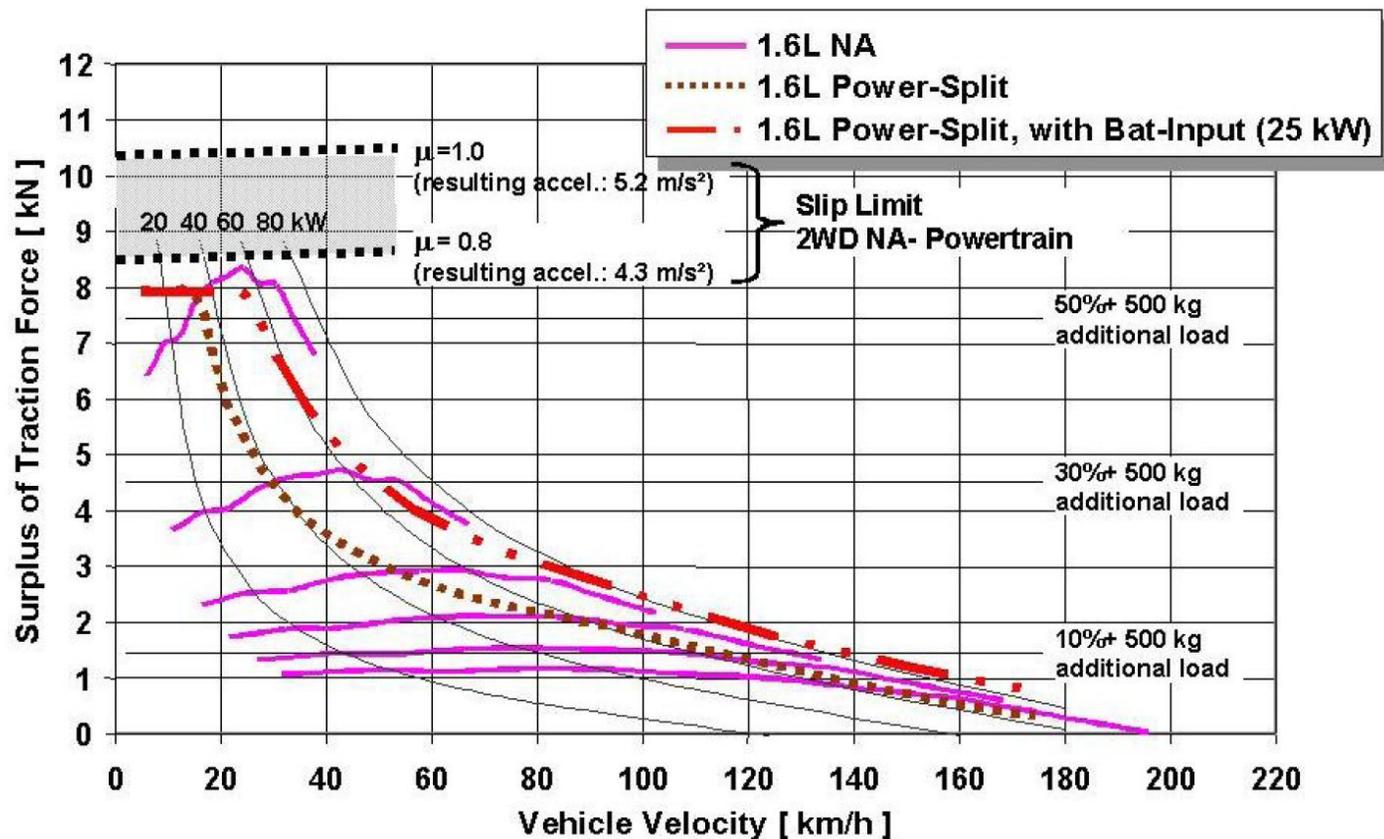
Beispiel eines parallelen Hybridantriebs mit Kurbelwellen-Starter-Generator (KSG)



Zugkraftüberschuss des 1.6L Saugmotors im Vergleich zum 1.6L Parallel-Hybrid (15 kW)

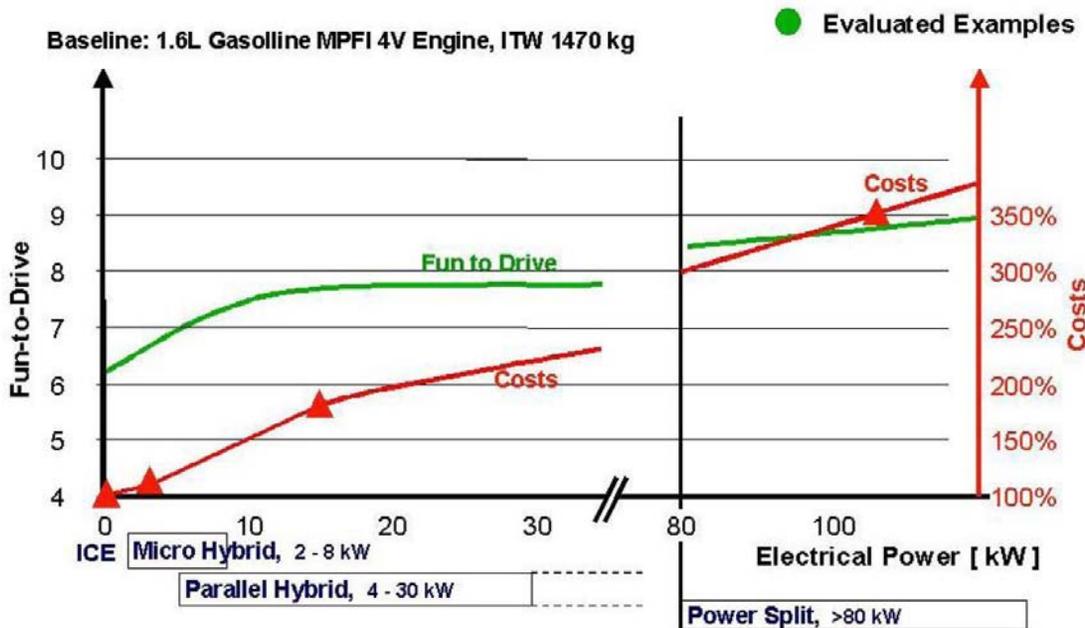
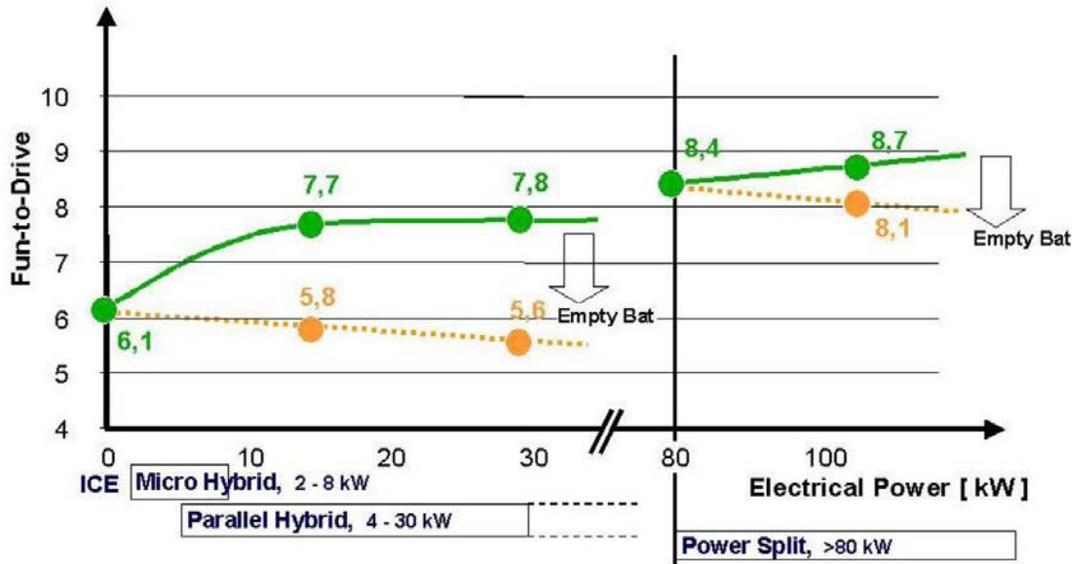
Quelle: Firma AVL, Dr. Fischer & Dr. Kirsten, Wiener Motoren-Symposium. 2006

Beispiel eines Hybridantriebs mit Power-Split-System



Zugkraftüberschuss des 1.6L Saugmotor im Vergleich zum 1.6L Powersplit-Hybrid

Vergleich bezüglich Fahrspaß und Kosten

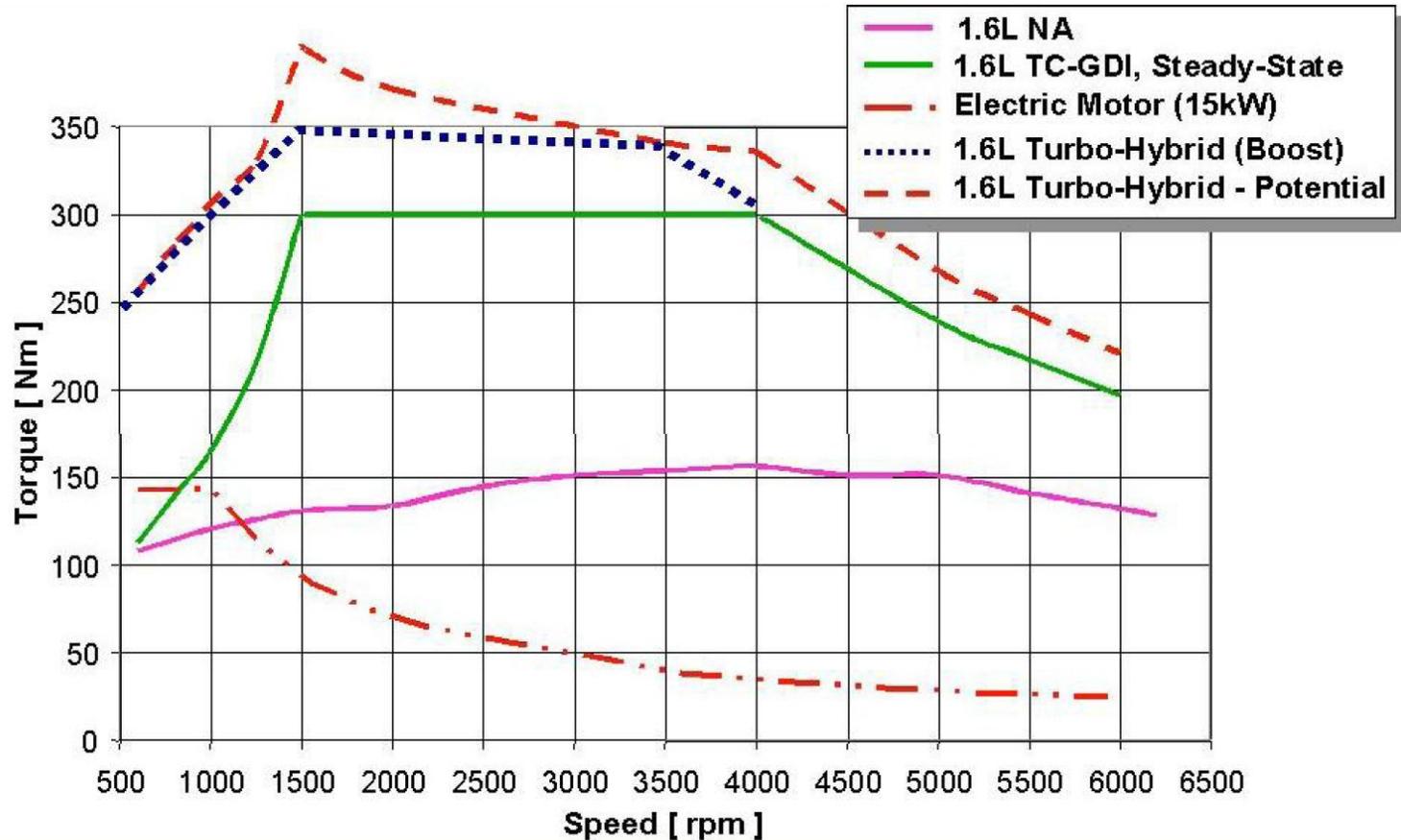


Baseline: 1.6L Gasoline MPFI 4V Engine, ITW 1470 kg

▲ Evaluated Examples

Quelle: Firma AVL, Dr. Fischer & Dr. Kirsten, Wiener Motoren-Symposium. 2006

Drehmoment-Charakteristik der verschiedenen Antriebskonzepte



Volllast-Charakteristik der verschiedenen Antriebskonzepte

Anforderungen an den Verbrennungsmotoren

Eigenschaften	Reine VM-Antriebe	Hybrid-Antriebe
Wirkungsgrade	hoch	sehr hoch
Emissionen	niedrig	sehr niedrig
Dynamik	hoch	niedrig
Leistungsdichte $\frac{kW}{kg}$, $\frac{kW}{m^3}$	hoch	mittel
Preis	mittel	niedrig