



Vorlesung

Verbrennungskraftmaschinen I

Prof. Dr.-Ing. Kurt Imren YAPICI

yapici@eccing.de

1 Einleitung

2 Aufbau und Funktion

3 Thermodynamische Grundlagen

4 Kenngrößen - Kennfelder

5 Ladungswechsel und Ventiltrieb

6 Ottomotor

7 Dieselmotor

8 Aufladung 1

8 Aufladung 2

9 Gestaltungsmerkmale

10 Kräfte und Momente

11 Öl- und Kühlkreislauf

12 Reibung

13 Mess- und Prüftechnik

14 Hybridtechnik

ältere Auflagen tw. veraltet

Einführend - Übersichten:

- Otto- und Dieselmotoren, Grohe / Russ, Vogel Fachbuch, 14. Auflage, 2007
- Handbuch der Kfz-Technik, Band 1, Balzer u.a., Motorbuch Verlag, 2000

Vertiefend:

- Verbrennungsmotoren, Merker / Schwarz / Stiesch / Otto, Teubner, 2004
- • Ottomotoren-Management, Bosch, Vieweg, 3. Auflage, 2005
- • Dieselmotoren-Management, Bosch, Vieweg, 4. Auflage, 2004
- • Kraftfahrzeug-Motoren, Küntscher / Hoffmann, Vogel, 4. Auflage, 2006
- Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, Bosch, 26. Auflage, 2007
- • Handbuch Verbrennungsmotor, v. Basshuysen / Schäfer, Vieweg, 4. Auflage, 2005
- • Handbuch Dieselmotoren, Mollenhauer, 3. Auflage, 2007 (Springer e-Book)
- Internal Combustion Engine Fundamentals, Heywood, McGraw-Hill, 1988

Bücher vor 2000 sind in Details zur Gemischbildung / Brennverfahren / Abgasnachbehandlung veraltet.

Sehr zu empfehlen:

- MTZ, Motortechnische Zeitschrift (Bibl. Paul-Bonatz)

- **Fachgebundene Ziele**
 - Aufbau und Funktion VM
 - mechanische und thermodynamische Systeme
 - Baugruppen und Bauteile
 - Beanspruchungen
 - Anwendungen

- **Fachübergreifende Ziele**
 - Technologien für Massenmärkte
 - Fertigung und Kostenentstehung bei Serienfertigung
 - Kundeneinfluss auf Produktentwicklung
 - E-Mobilität

Warum beschäftigen wir uns mit Verbrennungskraftmaschinen ?

- Bedeutung von Verbrennungsmotoren

Warum gibt es hier derzeit soviel Entwicklung ?

- Brennstoff-Vorräte begrenzt
- Emissionen, Klimaänderung

Warum ist ein Verbrennungsmotor so wie er ist ?

- Kolbenmaschine vs. Turbomaschine
- Alternativen ?

- Der VM ist ein vielseitiger Antrieb
- Die Entwicklung ist sehr vorangetrieben
- Es existieren sehr große Investitionen (Fabriken)

- Der VM hat noch Potenzial in der Motorenmechanik (Reibung)
- Weiter bestehen noch thermodynamische Potentiale (Verbrauch)

- Ein realer Ersatz existiert nicht (Kosten, Verbrauch, Dauerhaltbarkeit)

1 Einleitung

Prognose zu Hybridfahrzeugen

Hybride in Europa	
2000	923
2002	1 048
2004	11 478
2006	69 916
2008	232 366
2010	449 028

Angaben: Pkw-Stückzahlen, Verkaufsprognose für Mild- und Full-Hybrid-Elektrofahrzeuge
Quelle: Frost & Sullivan B126

**AUTOMOBIL
ENTWICKLUNG**

Prognose 2003

1 Einleitung

Prognose zu Hybridfahrzeugen

- Prognose von namhaften Spezialisten aus 2003
- Aussage : in 2010 soll es über 459.000 Hybridfahrzeuge in EU geben
- Tatsache : 29.000 in Deutschland (ca. 40.000 in EU), Folie 10

- Wir sehen daraus, dass Prognosen von Technikentwicklungen selten passen

1 Einleitung

Bestand Fahrzeuge (KBA), 01.01.2024

Jahr (jeweils 1. Juli/ab 2001 1. Januar)	Benzin	Diesel	Flüssiggas (LPG) (einschl. bivalent)	Erdgas (CNG) (einschl. bivalent)	Elektro (BEV)	Hybrid		Sonstige	Insgesamt
						insgesamt	dar. Plug-in		
2010	30.449.617	10.817.769	369.430	68.515	1.588	28.862	-	1.846	41.737.627
2011	30.487.578	11.266.644	418.659	71.519	2.307	37.256	-	17.600	42.301.563
2012	30.452.019	11.891.375	456.252	74.853	4.541	47.642	-	965	42.927.647
2013	30.206.472	12.578.950	494.777	76.284	7.114	64.995	X	2.532	43.431.124
2014	29.956.296	13.215.190	500.867	79.065	12.156	85.575	X	2.081	43.851.230
2015	29.837.614	13.861.404	494.148	81.423	18.948	107.754	X	1.833	44.403.124
2016	29.825.223	14.532.426	475.711	80.300	25.502	130.365	X	1.682	45.071.209
2017	29.978.635	15.089.392	448.025	77.187	34.022	165.405	20.975	10.894	45.803.560
2018	30.451.268	15.225.296	421.283	75.459	53.861	236.710	44.419	10.717	46.474.594
2019	31.031.021	15.153.364	395.592	80.776	83.175	341.411	66.997	10.445	47.095.784
2020	31.464.680	15.111.382	371.472	82.198	136.617	539.383	102.175	10.245	47.715.977
2021	31.435.340	15.060.124	346.765	83.067	309.083	1.004.089	279.861	10.116	48.248.584
2022	31.005.134	14.824.262	331.481	82.309	618.460	1.669.051	565.956	10.181	48.540.878
2023	30.556.538	14.437.489	326.853	80.630	1.013.009	2.337.897	864.712	10.620	48.763.036
2024	30.235.032	14.142.184	313.723	77.421	1.408.681	2.911.262	921.886	10.382	49.098.685

Hinweise:

Durch die Harmonisierung der Fz.-Papiere werden Fahrzeuge mit besonderer Zweckbestimmung (Wohnmobile, Krankenwagen u. a.) ab dem 1. Januar 2006 den Pkw zugeordnet. Ab 1. Januar 2008 nur noch angemeldete Fahrzeuge ohne vorübergehende Stilllegungen/Außerbetriebsetzungen.

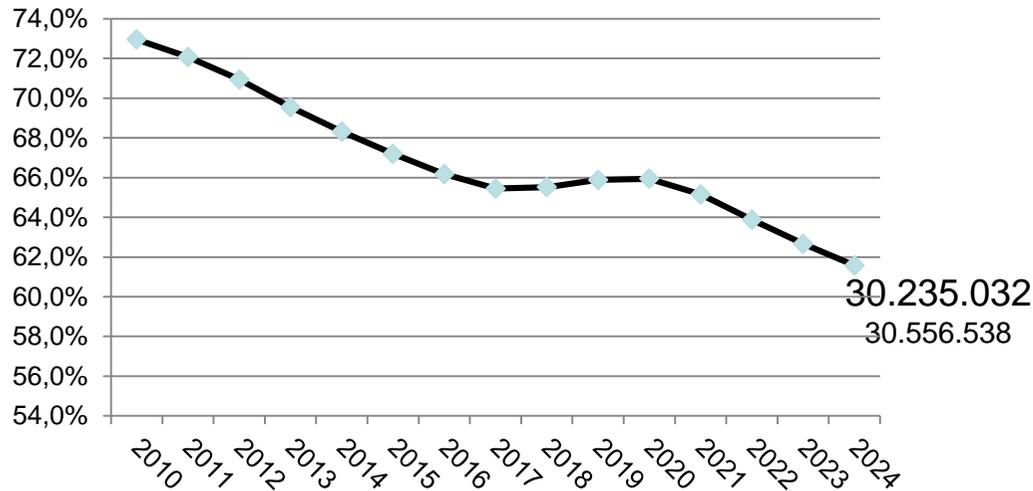
Benzin: Ab 1. Januar 2017 ohne Ethanol.

© Kraftfahrt-Bundesamt, Flensburg

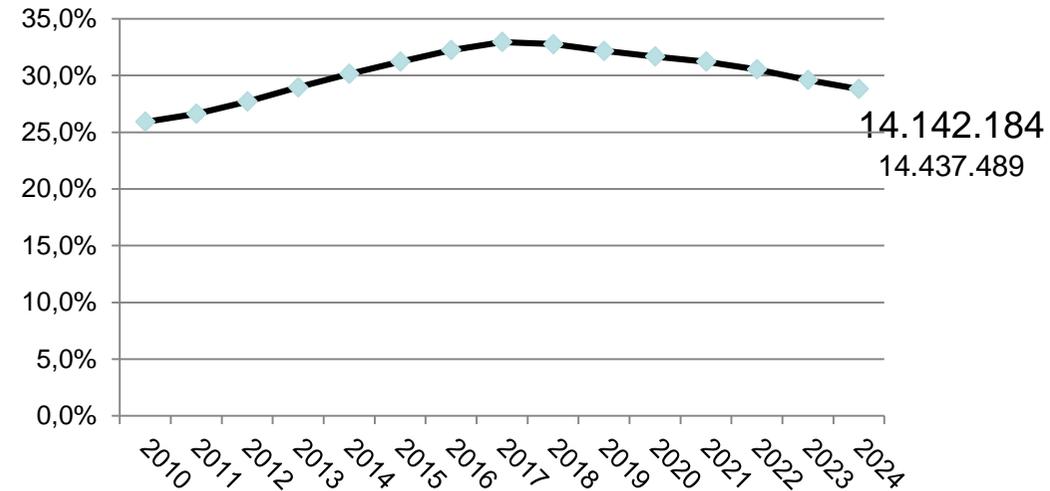
1 Einleitung

Bestand Fahrzeuge – Entwicklung der Anteile (KBA)

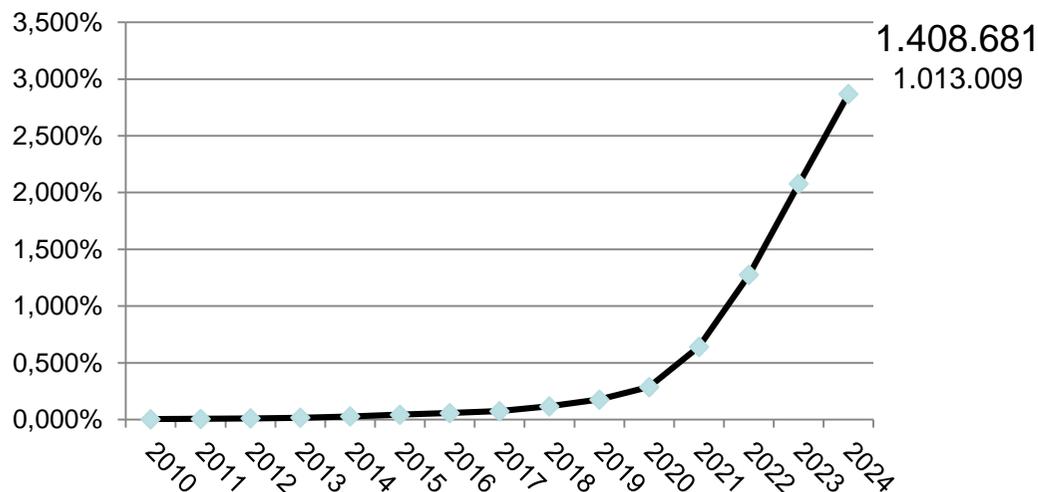
Benzinantrieb



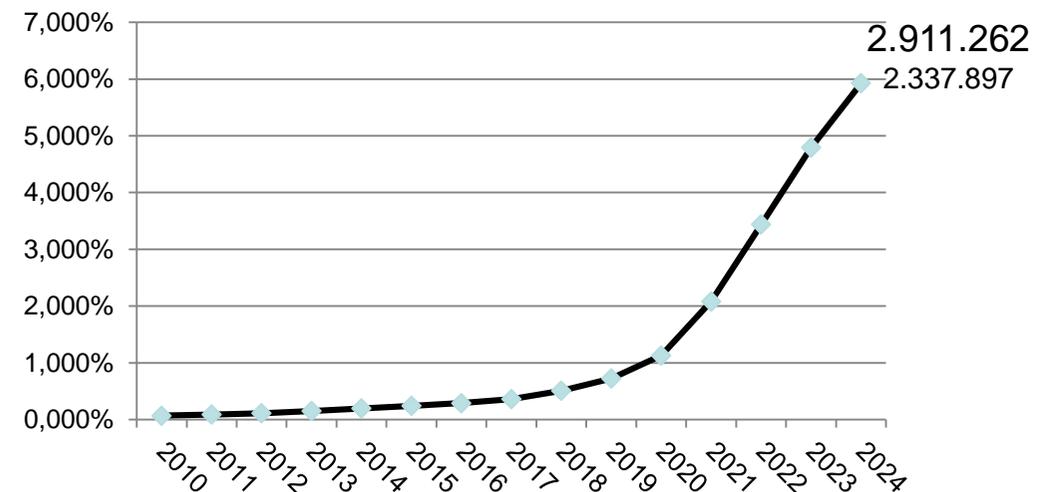
Dieselantrieb



Elektroantrieb

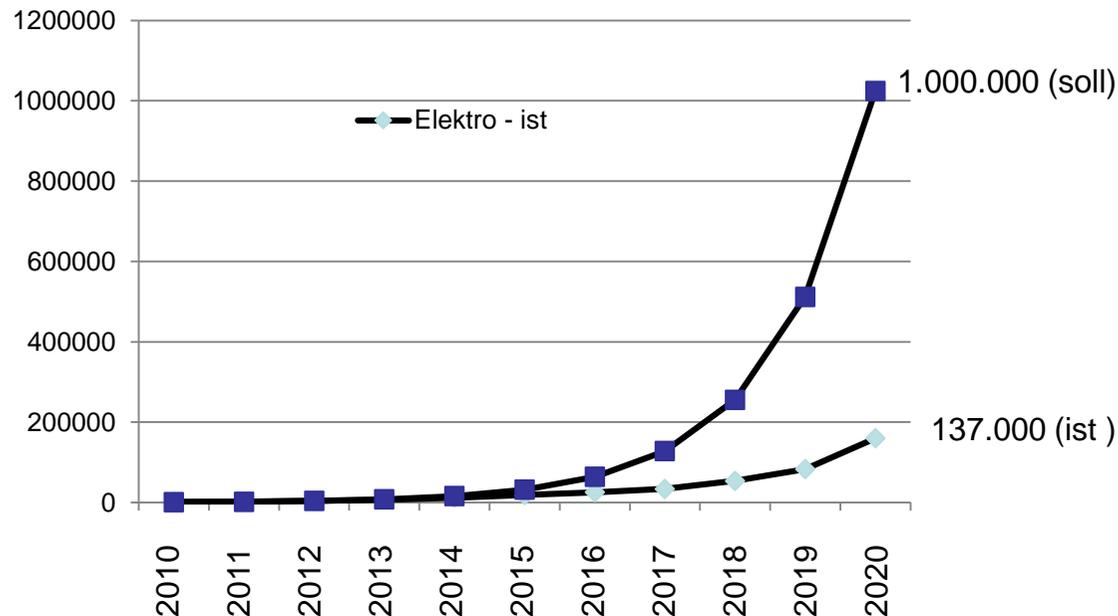


Hybridantrieb



1 Einleitung

Fahrzeuge mit elektr. Antrieb



Grundsätzliches :

- Gesamtenergiebedarf
 - Stromerzeugung
 - Herstellung
 - Recycling
- seltene Rohstoffe
- Invest in Stromnetz
- Kosten für 100 km (Mittelklassewagen, 2021)
 - elektr. sehr zurückhalt. Fahrweise : 6,20 €
 - elektr. normale Fahrweise : 8,15 €
 - VM Diesel : 7,50 €
 - VM; Erdgas CNG (Biogas) : 5,00 €

Hauptnachteile elektr. Antriebe :

- niedrige Reichweite
- geringe Lebensdauer der Batterie
- lange Ladezeit
- hohe Kosten

Weitere Nachteile elektr. Antriebe :

- höhere Systemmassen
- geringe Leistungsdichte
- früher Entwicklungsstand
- wenige Lademöglichkeiten
- begrenzte Rohstoffe

1 Einleitung

Fahrzeuge mit elektr. Antrieb – Vernunft / Unvernunft

Sinnvolle Nutzung von E-Fahrzeugen

- kleine Fahrzeuge
- Stadtautos
- kleine Zweiräder
- Lieferverkehr innerorts

- Reichweite < 100 km (15 kWh)
- Aufladung durch PV- / Windstrom
- keine Schnellaufladung (Lebensdauer!)

Sinnvolle Technik für E-Fahrzeuge

- Hybridbauweise
- 1 L - 3-Zyl. VM (z.B. 80 kW)
- betriebspunktoptimiertes System
- Technik : VCR, VVT, Hocho Aufladung)
- 40 kW E-Motor auf Kurbelwelle
- Reichweite < 100 km (15 kWh)

- Betrieb des VM im Bestpunkt ($\eta \uparrow$)
- Leistungsverzweigung
- überschüssige Energie zur Ladung der Batterie)

- Elektrobetrieb innerorts
- Längere Strecken VM
- Bei Bedarf : beide Motoren im Einsatz
- Keine Reichweitenproblematik

- → kleine Batterie
- → geringeres Mehrgewicht
- → geringere Mehrkosten

1 Einleitung

Fahrzeuge mit elektr. Antrieb – Strompreise *



Über uns

Erneuerbare Energien und Umlagen

Regelenergie

Systemdienstleistungen

Strommarktdesign

Datum

01.09.2024



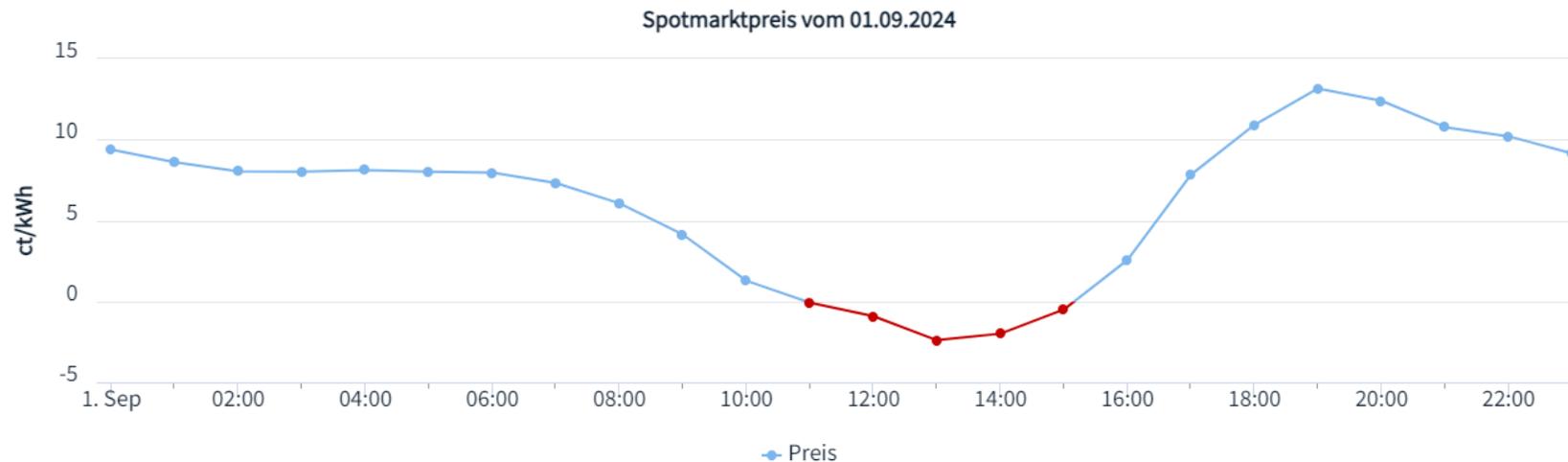
Aktuelle Daten anzeigen 

Erste Daten anzeigen 

Chart-Daten zuletzt aktualisiert: 03.10.2024, 15:05 Uhr (ME(S)Z)

Diagramm

Tabelle



* Erstattungspreise
für Einspeiser
Anlagen > 100 kWp

<https://www.netztransparenz.de/de-de/Erneuerbare-Energien-und-Umlagen/EEG/Transparenzanforderungen/Marktpr%C3%A4mie/Spotmarktpreis-nach-3-Nr-42a-EEG>

1 Einleitung

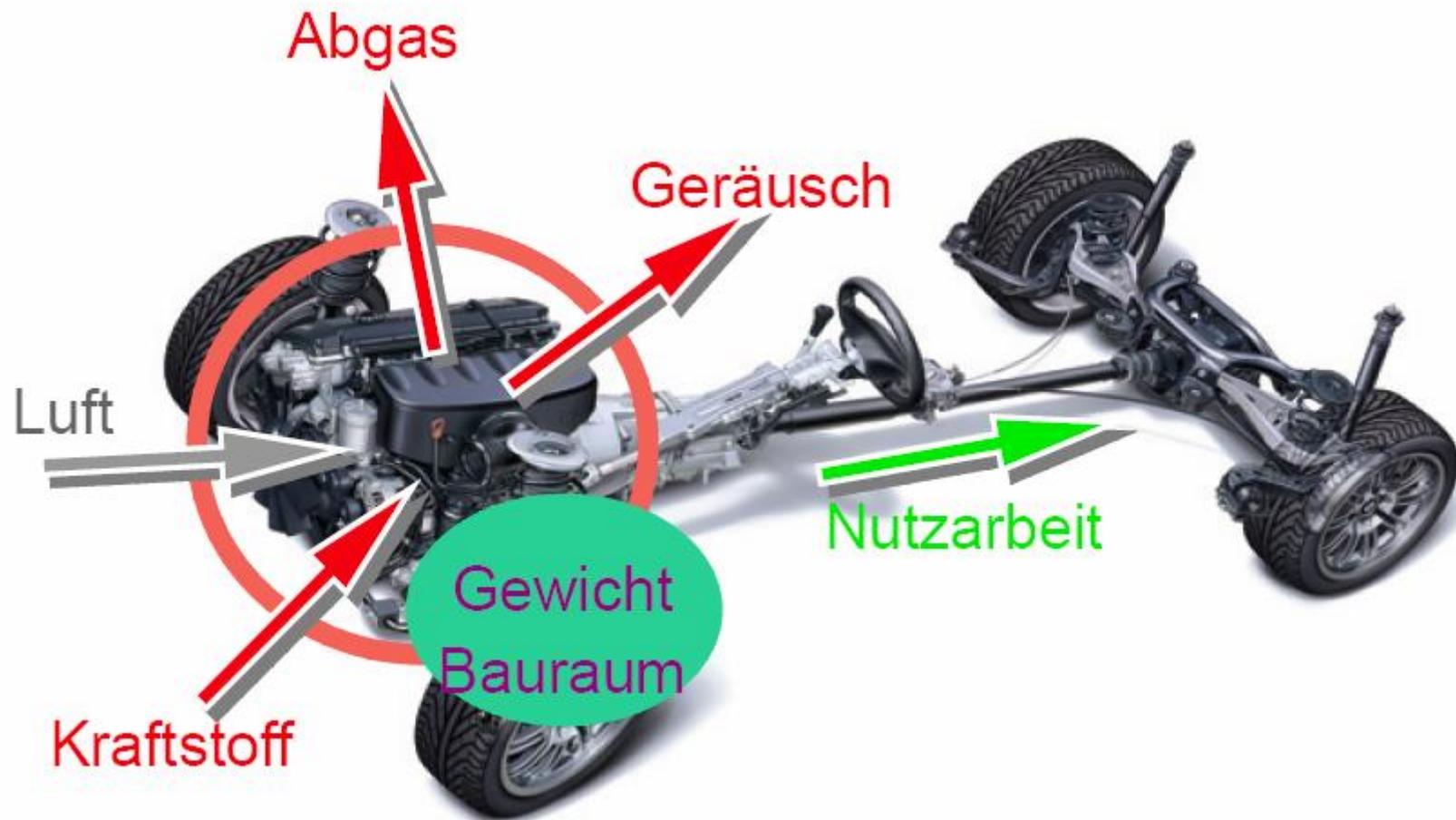
Fahrzeuge mit elektr. Antrieb – Vernunft / Unvernunft

Tesla Ladestation an der Burg Warberg (südöstlich von Helmstedt) mit passendem Diesel-Großaggregat.
Jetzt wird alles gut :-)



1 Einleitung

Verbrennungsmotor als Fahrzeugantrieb



1 Einleitung

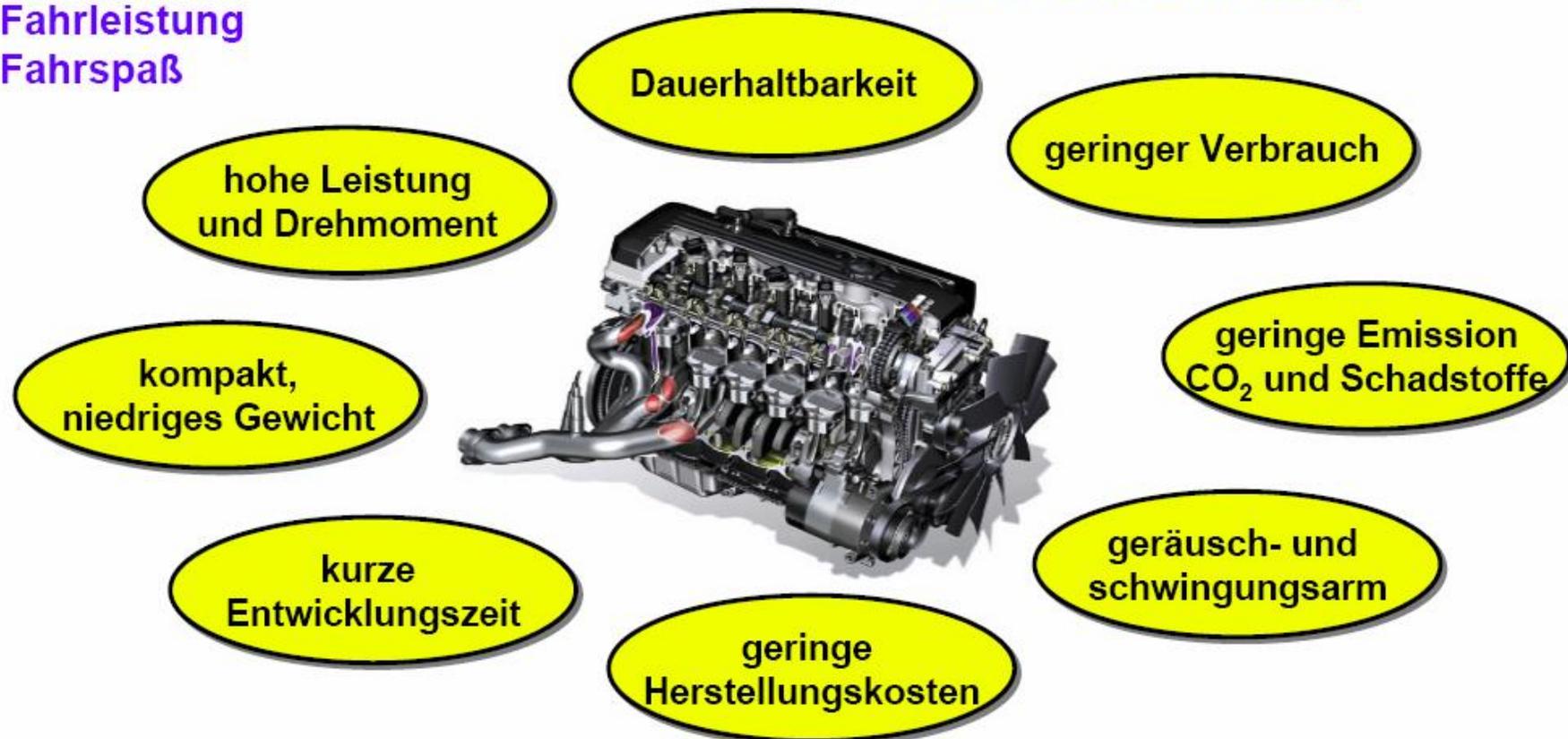
Anforderungen

Kundenwünsche

- **Komfort**
- **Zuverlässigkeit, Qualität**
- **geringe Anschaffungskosten**
- **geringer Verbrauch / Betriebskosten**
- **Fahrleistung**
- **Fahrspaß**

Umweltanforderungen / Gesetze

- **Schadstoffemission**
- **CO₂-Emission (Treibhauseffekt)**
- **Recycling**
- **Ressourcenschonung**



Warum beschäftigen wir uns mit Verbrennungskraftmaschinen ?

- Bedeutung von Verbrennungsmotoren

Warum gibt es hier derzeit soviel Entwicklung ?

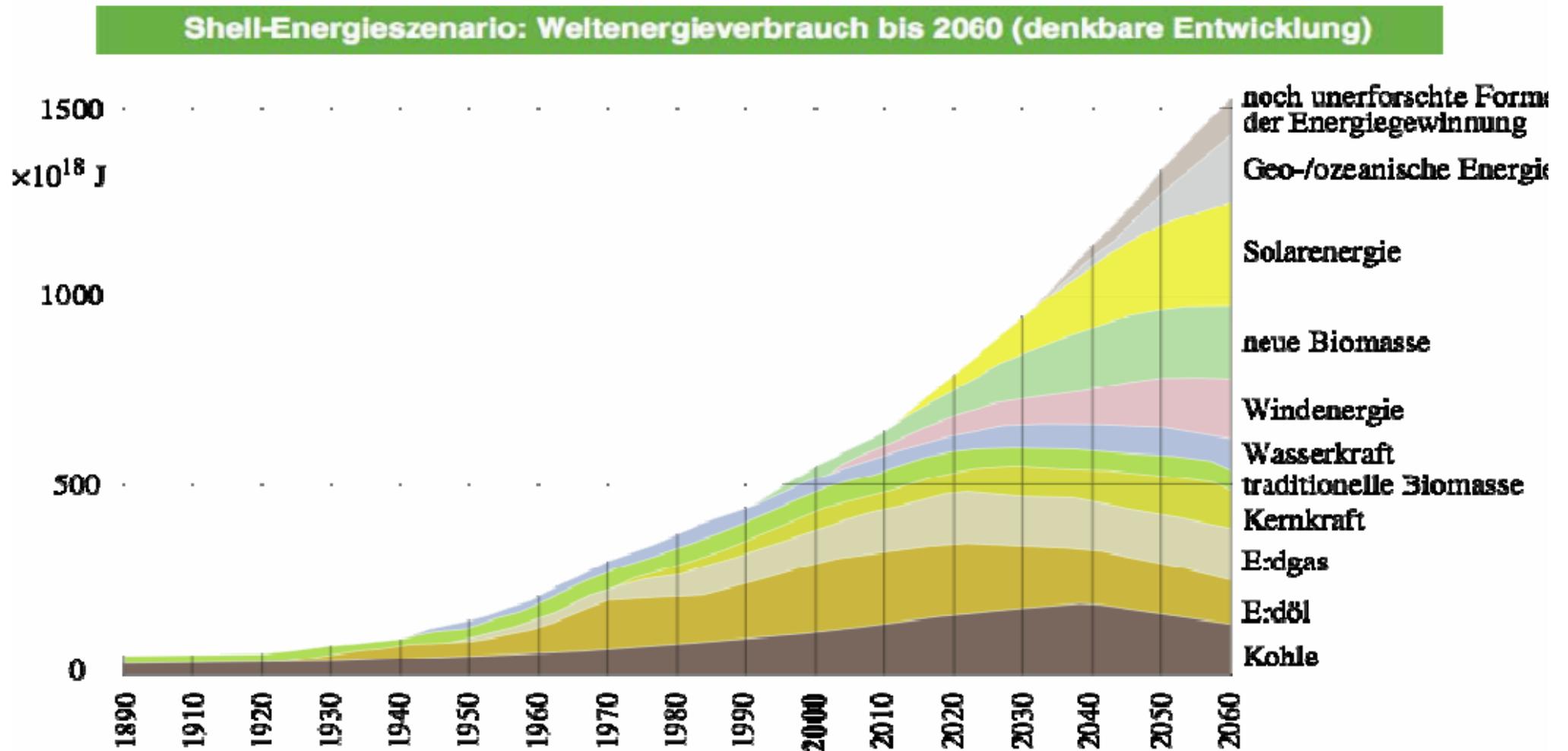
- **Brennstoff-Vorräte begrenzt**
- **Emissionen, Klimaänderung**

Warum ist ein Verbrennungsmotor so wie er ist ?

- Kolbenmaschine vs. Turbomaschine
- Alternativen ?

1 Einleitung

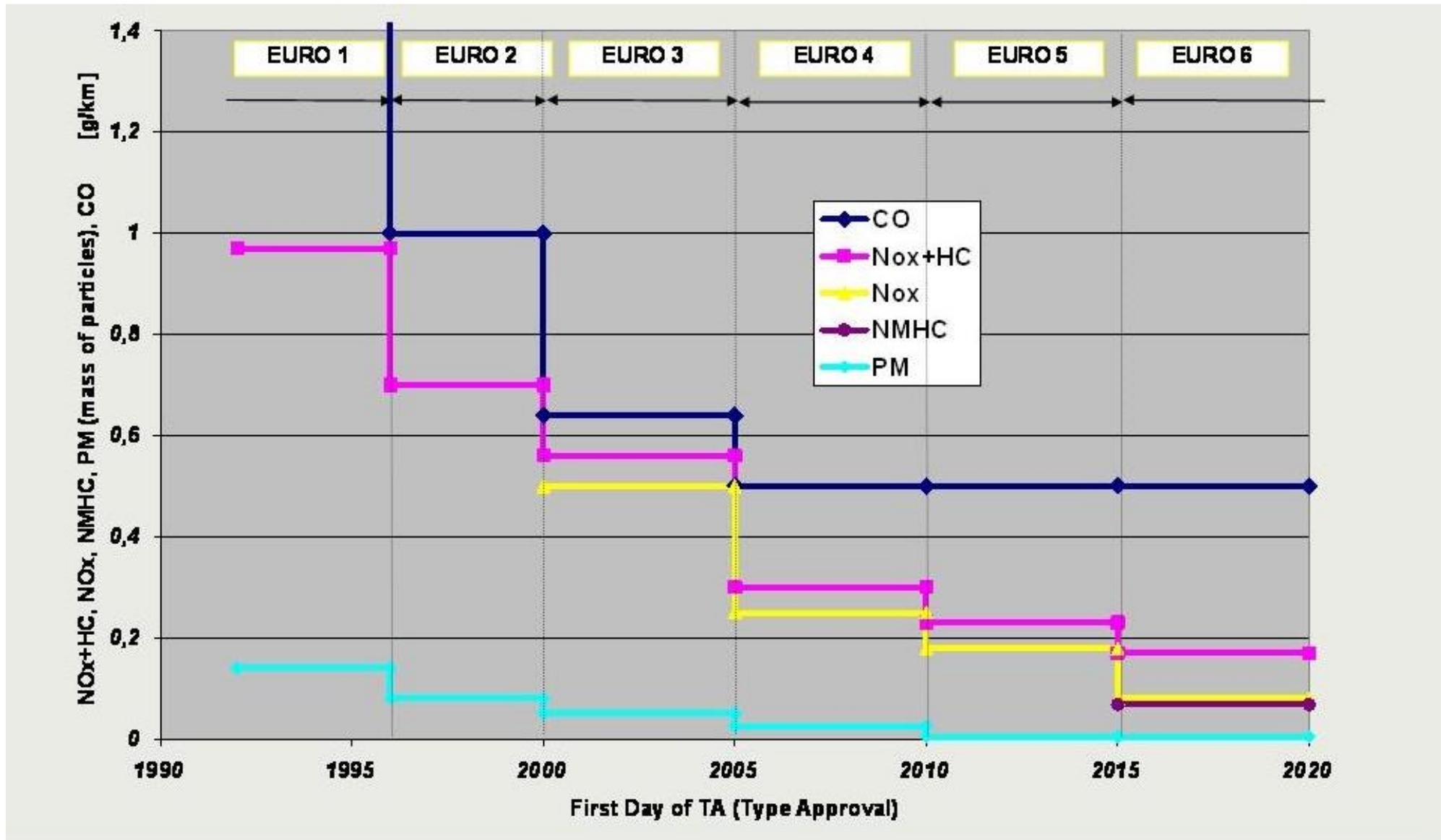
Perspektiven der globalen Energieversorgung



Quelle: Deutsche Shell AG

1 Einleitung

Emissionsgrenzwerte für Diesel-PKW

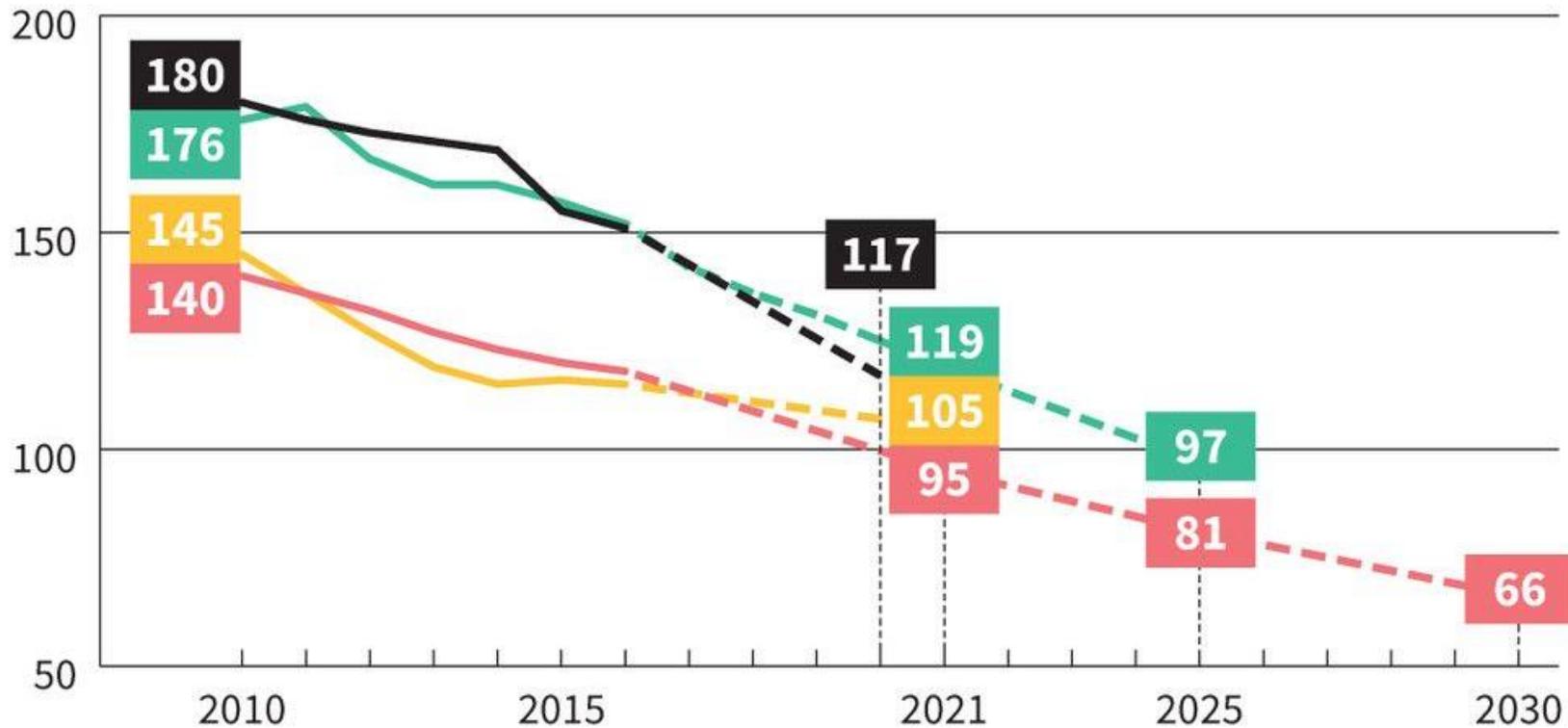


Wikipedia

1 Einleitung

CO2-Ausstoß in Gramm pro Kilometer

■ USA ■ EU ■ Japan ■ China



China: Nur Benziner

EU: 2025 und 2030 Vorschlag der EU-Kommission

Quelle: International Council on Clean Transport

© 2018 IW Medien / iwd

iwd

Warum beschäftigen wir uns mit Verbrennungskraftmaschinen ?

- Bedeutung von Verbrennungsmotoren

Warum gibt es hier derzeit soviel Entwicklung ?

- Brennstoff-Vorräte begrenzt
- Emissionen, Klimaänderung

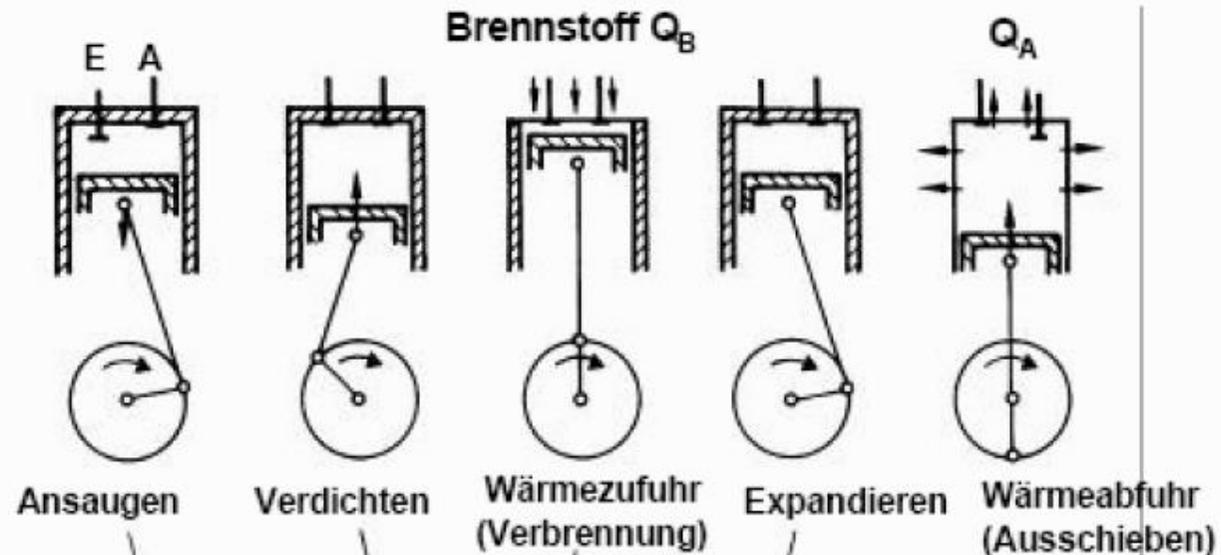
Warum ist ein Verbrennungsmotor so wie er ist ?

- Kolbenmaschine vs. Turbomaschine
- Alternativen ?

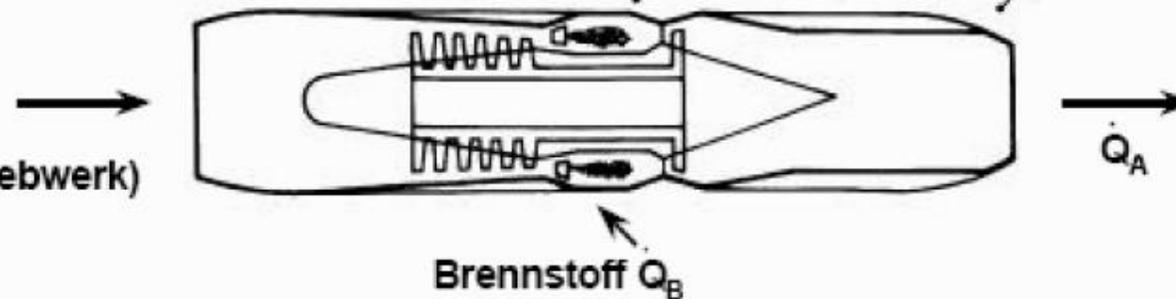
1 Einleitung

Kolbenmaschine vs. Strömungsmaschine

Kolbenmaschine
(Beispiel:
4-Takt-Motor mit
innerer Verbrennung)



Turbomaschine
(Beispiel:
Flugzeug - Strahltriebwerk)



Quelle: S. Pischinger, Skript Aachen

1 Einleitung

Alternativen zum Verbrennungsmotor

Gas-Turbinen-Antrieb

Laständerung problematisch
Kaum wirkliche Vorteile

Elektro-Motor + Batterie

Batterien zu geringe Energiespeicherdichte → Gewicht, geringe Reichweite

Elektro-Motor + Brennstoffzelle

Probleme (noch): Preis, Dauerhaftigkeit, Brennstoff, Gewicht
Wie wird Wasserstoff hergestellt ?

Kombinationen (Hybride): z.B. Verbrennungsmotor + Batterie + E-Motor

Intelligente Konzepte, Teilmärkte (z.B. Stop-and-Go)
Aber: Aufwand, Preis, Gewicht

→ **Wirkliche Alternative ? Wann ? Welche Rahmenbedingungen ?
Gesamt-Ökobilanz wichtig !**

Verbrennungskraftmaschinen I

Kapitel 2

Aufbau und Funktion

2 Aufbau und Funktion

Grundprinzip

Grundprinzip:

- Durch Verbrennung wird Wärme freigesetzt
- Druck steigt
- Treibt Kolben an



Quelle: D. Labuhn, O. Romberg "Keine Panik vor Thermodynamik!", Vieweg

2 Aufbau und Funktion

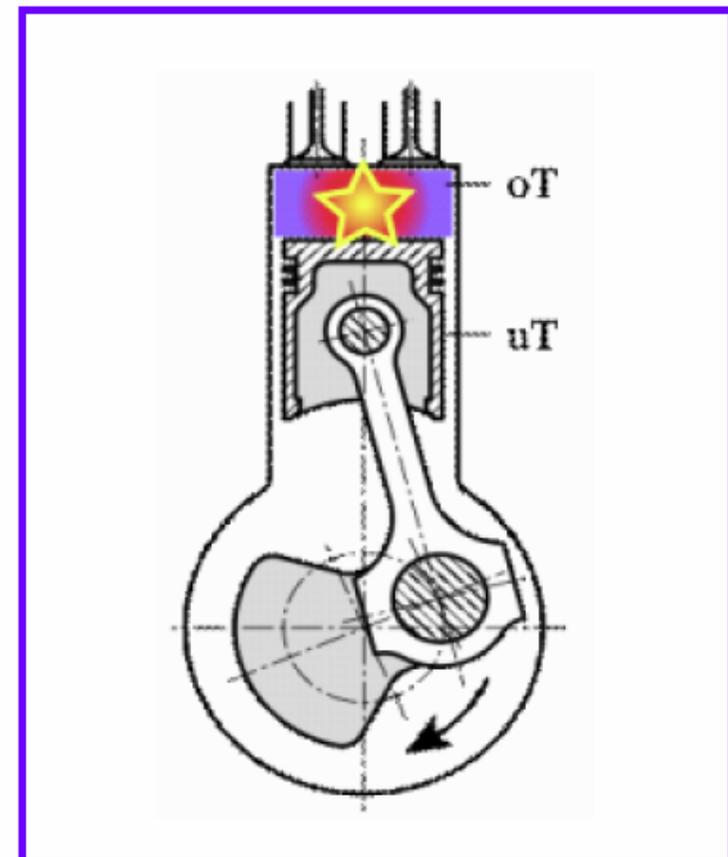
Grundprinzip

Notwendig:

- Brennstoff zuführen
- Luft zuführen
- Verbrennungsraum schließen
- Zünden
- Nachher Abgas entfernen

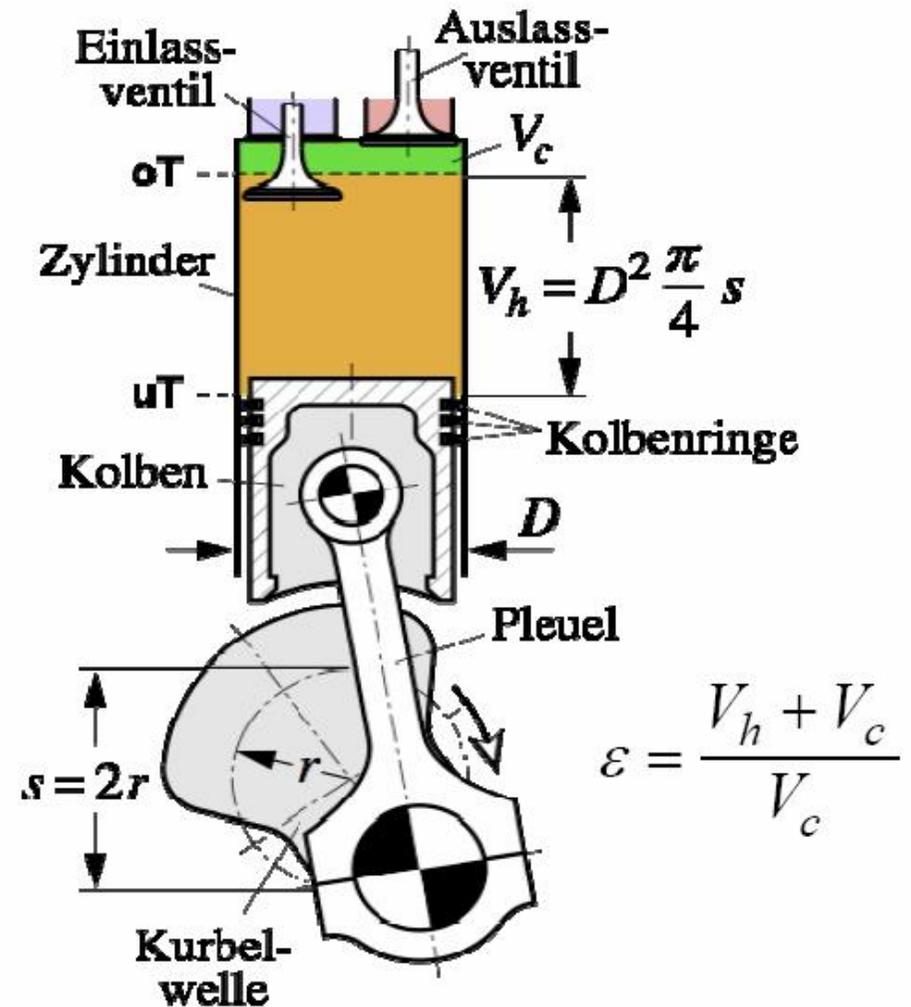
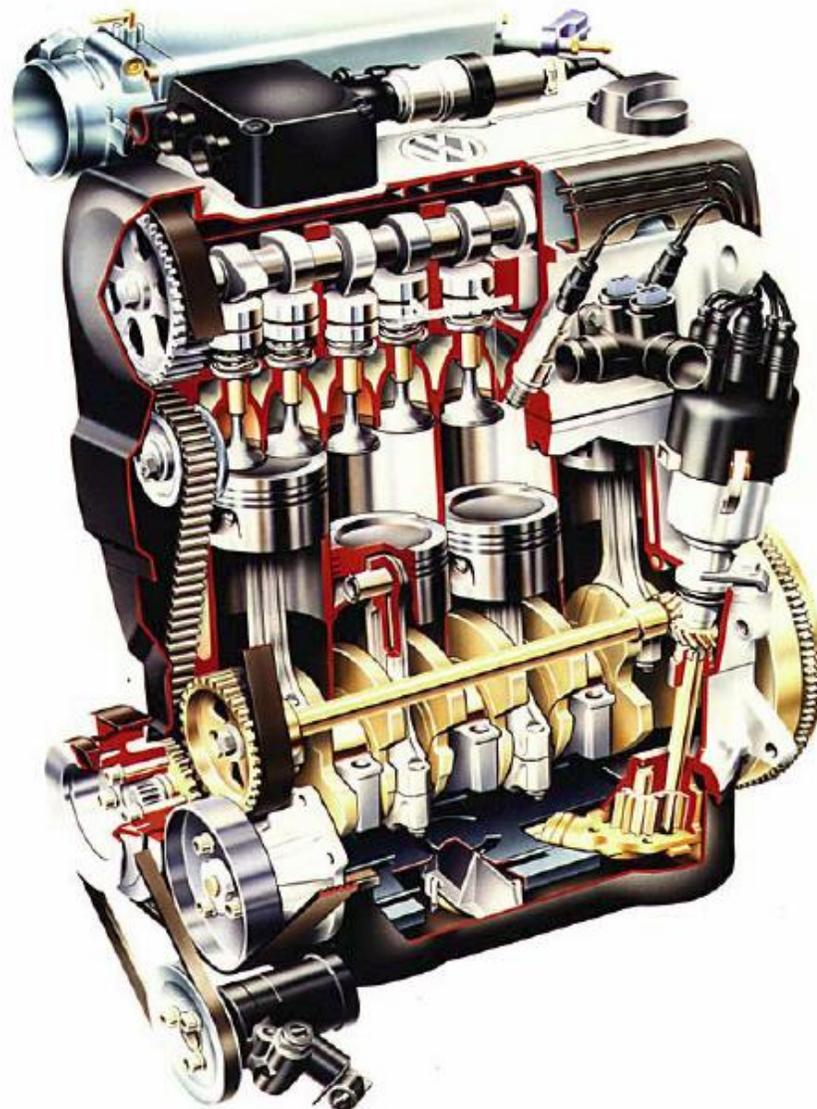
- Bewegung des Kolbens nutzen

- Das ganze "selbst-gesteuert"



2 Aufbau und Funktion

Grundaufbau PKW-Ottomotor



2 Aufbau und Funktion

Grundaufbau PKW-Ottomotor

- uT : unterer Wendepunkt des Kolbens
- oT : oberer Wendepunkt des Kolbens

- Weg zwischen oT und uT : Hub s
- Hub $s = 2 \times$ Kurbelradius r
- Hubvolumen : Hub \times Kreisfläche

- V_c : Rest-Brennraumvolumen bei Kolben oT

- Verdichtungsverhältnis :

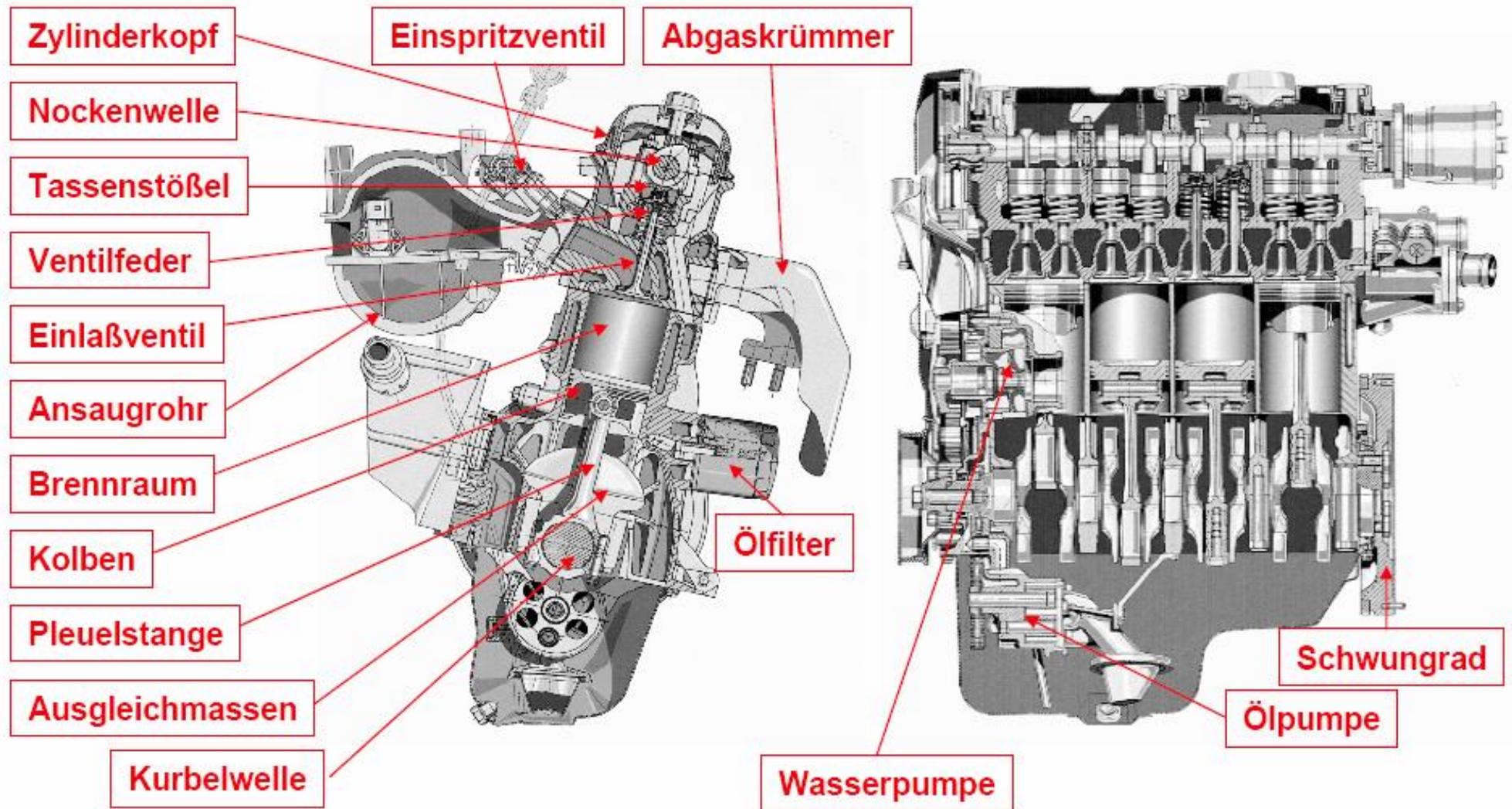
Gesamthubvolumen bei uT

----- = ϵ

Rest-Brennraumvolumen bei oT

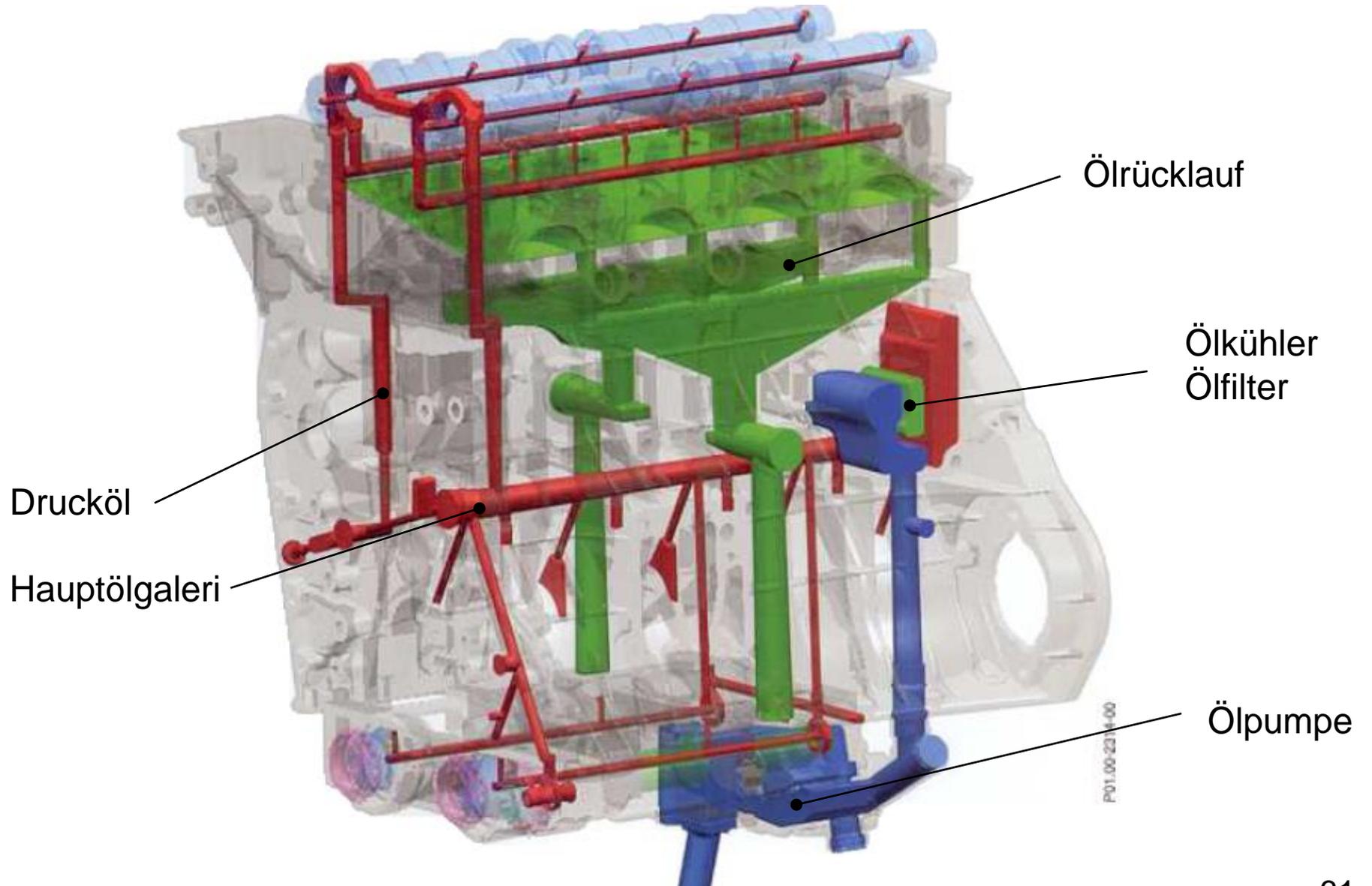
2 Aufbau und Funktion

PKW-Ottomotor (VW 1,4 L)



2 Aufbau und Funktion

Ölkreislauf – Mercedes M271



2 Aufbau und Funktion

Ölkreislauf – Mercedes M271

- Beispielhaft ein Funktionssystem des Verbrennungsmotors (VM)
- Kreislauf 1 : Drucköl (rot)
- Kreislauf 2 : Ölrücklauf (drucklos) (grün)

- Drucköl wird u.a. für Gleitlager benötigt (Ölpumpe)
- In den Lagerstellen wird es stark auf Scherung beansprucht
- Es dringt an den Gleitlagern seitlich drucklos aus
- Es gelangt durch Rücklaufkanäle in die Ölwanne
- Hier wird es beruhigt und entschäumt
- Über Ansaugschnorchel wird das Öl wieder angesaugt
- Dabei geht es über einen Filter und Ölkühler in die Hauptölgaleri
- Von dort aus an die Ölbedarfsstellen (Kurbelwelle, Zylinderkopf, Turbolader usw.)

2 Aufbau und Funktion

Ölkreislauf – Ölbedarfsstellen

Gezieltes Drucköl

Hauptlager
Pleuellager
Nockenwellenlager
ATL-Lager
VT-Tassen
MAG-Wellen

Spritzölversorgung

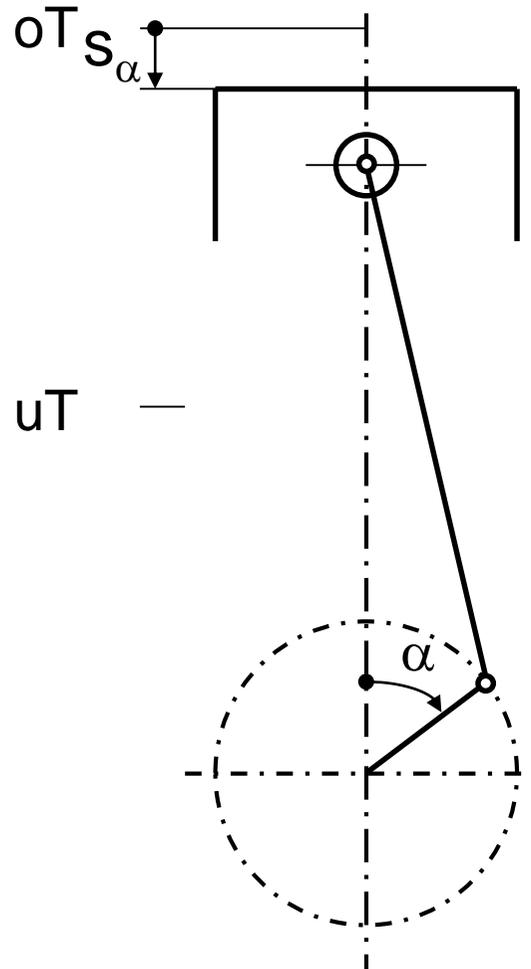
Laufbuchse
KW-Axiallager
Kolbenbolzen
Nockenkontakt
Ketten
Wälzlager

Kühlbedarf

Kolbenspritzdüse
Wälzlager
ATL Lager
Gleitlager allg.

2 Aufbau und Funktion

Kurbeltrieb - Kinematik



$$s_{\alpha} = r \left[(1 - \cos \alpha) + \frac{1}{\lambda_s} (1 - \sqrt{1 - \lambda_s^2 \cdot \sin^2 \alpha}) \right]$$

mit	r	Hubradius
	l	Pleuellänge
	α	Kurbelwinkel
	$\lambda_s = r / l$	Schubstangenverhältnis
	oT	oberer Totpunkt
	uT	unterer Totpunkt

2 Aufbau und Funktion

Kurbeltrieb - Kinematik

Kolbenweg :

$$s_{\alpha} = r \underbrace{\left[(1 - \cos \alpha) + \frac{1}{\lambda_s} \left(1 - \sqrt{1 - \lambda_s^2 \sin^2 \alpha} \right) \right]}_{f(\alpha)} = r f(\alpha)$$

für $l \gg r$ folgt als Näherung :

$$f(\alpha) \approx 1 - \cos \alpha + \frac{1}{4} \lambda_s (1 - \cos 2\alpha)$$

2 Aufbau und Funktion

Kurbeltrieb - Kinematik

Kolbengeschwindigkeit :

$$\dot{s}_\alpha = \frac{ds_\alpha}{dt} = \frac{ds_\alpha}{d\alpha} \omega$$

$\omega = d\alpha / dt$ Winkelgeschwindigkeit

$$ds_\alpha / d\alpha = r f'(\alpha)$$

$$\dot{s}_\alpha = r \omega f'(\alpha)$$

Näherung für $l \gg r$:

$$f'(\alpha) \approx \sin \alpha + \frac{1}{2} \lambda_s \sin 2\alpha$$

2 Aufbau und Funktion

Kurbeltrieb - Kinematik

Kolbenbeschleunigung :

$$\ddot{s}_\alpha = \frac{d^2 s_\alpha}{dt^2} = \frac{d^2 s_\alpha}{d\alpha^2} \omega^2 = r \omega^2 f''(\alpha)$$

Näherung für $l \gg r$:

$$f''(\alpha) \approx \cos \alpha + \lambda_s \cos 2\alpha$$

2 Aufbau und Funktion

Kurbeltrieb - Kinematik

Beispiel :

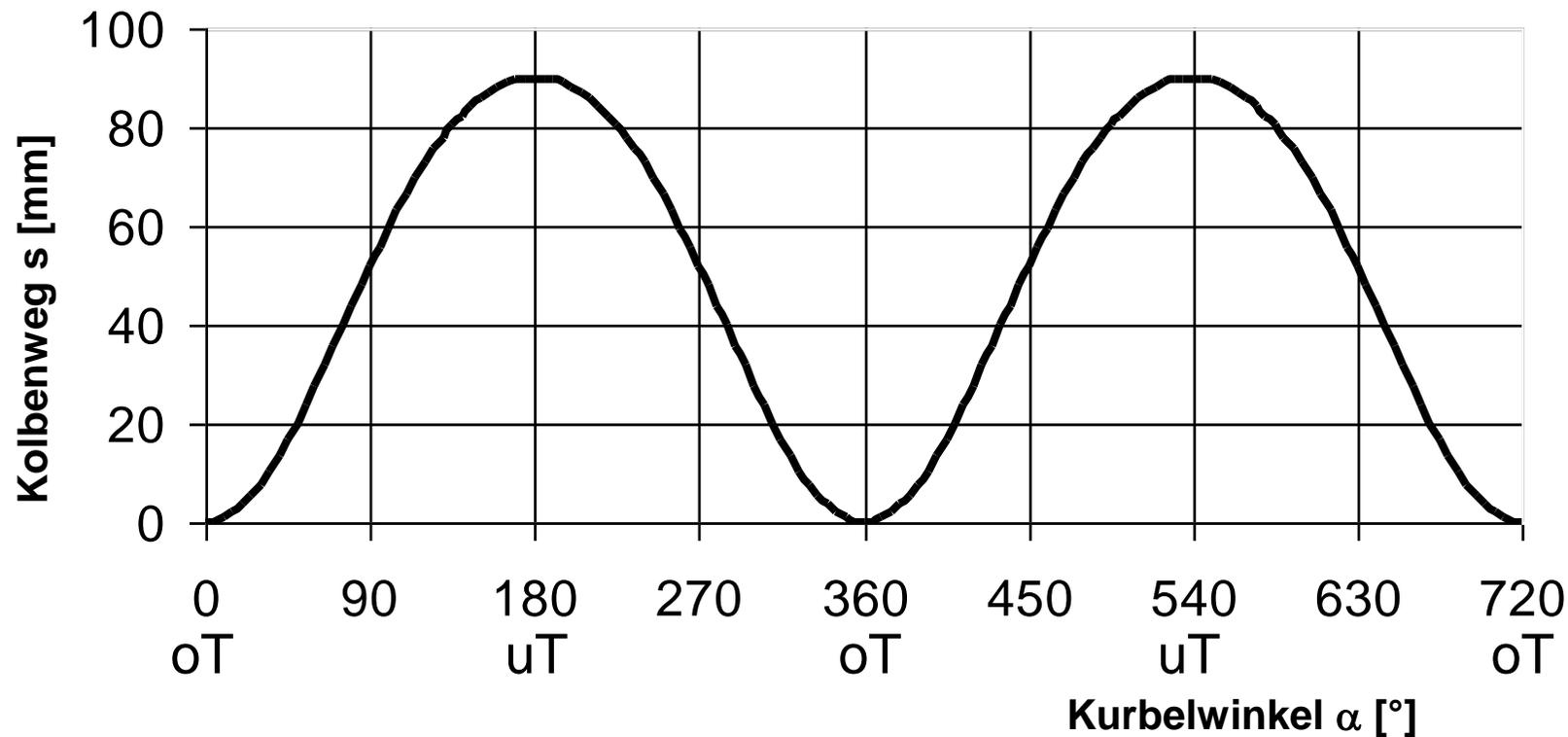
$$r = 45 \text{ mm}$$

$$l = 145 \text{ mm}$$

$$n = 3000 \text{ min}^{-1}$$

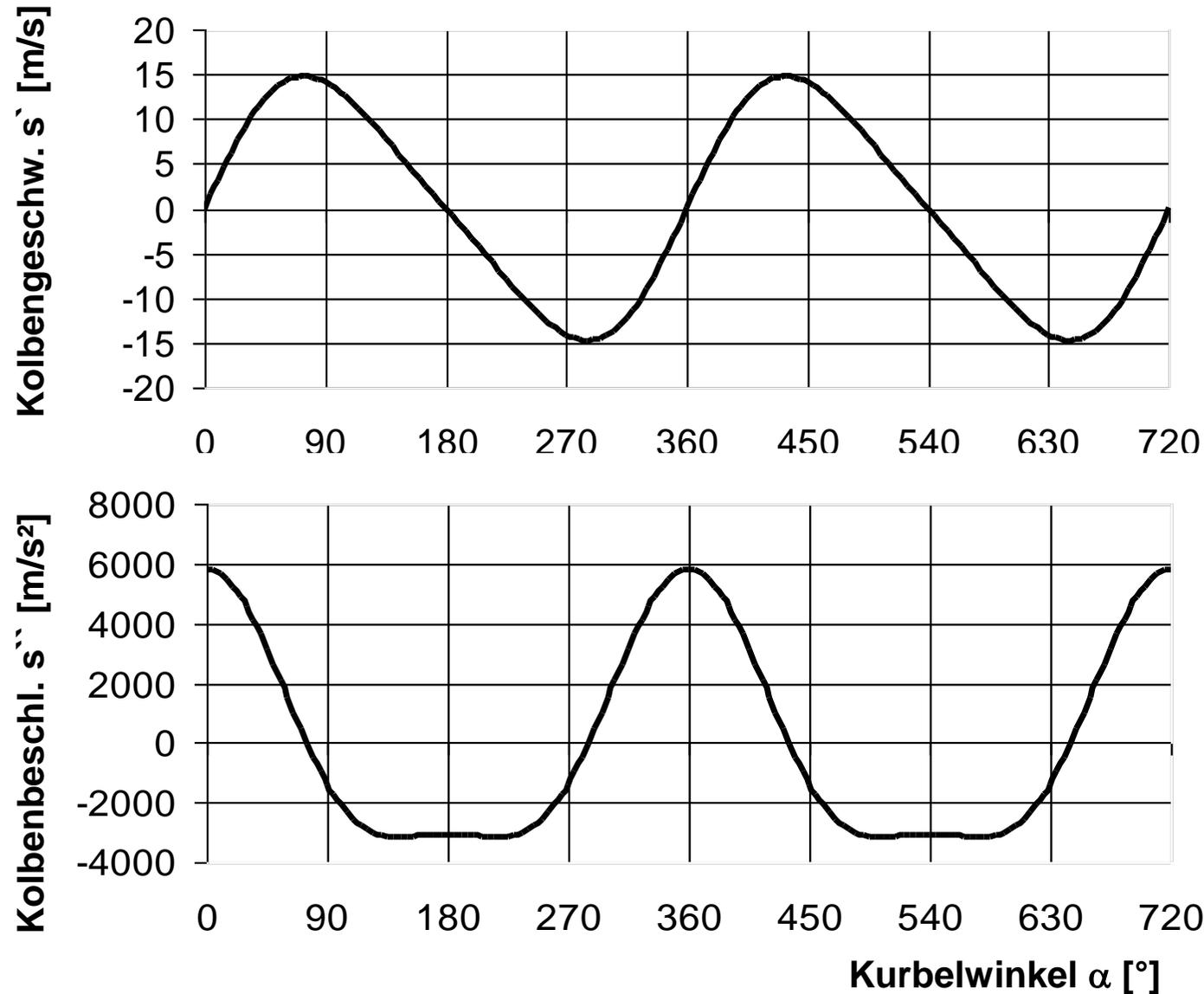
oT - oberer Totpunkt des Kolbens

uT - unterer Totpunkt des Kolbens



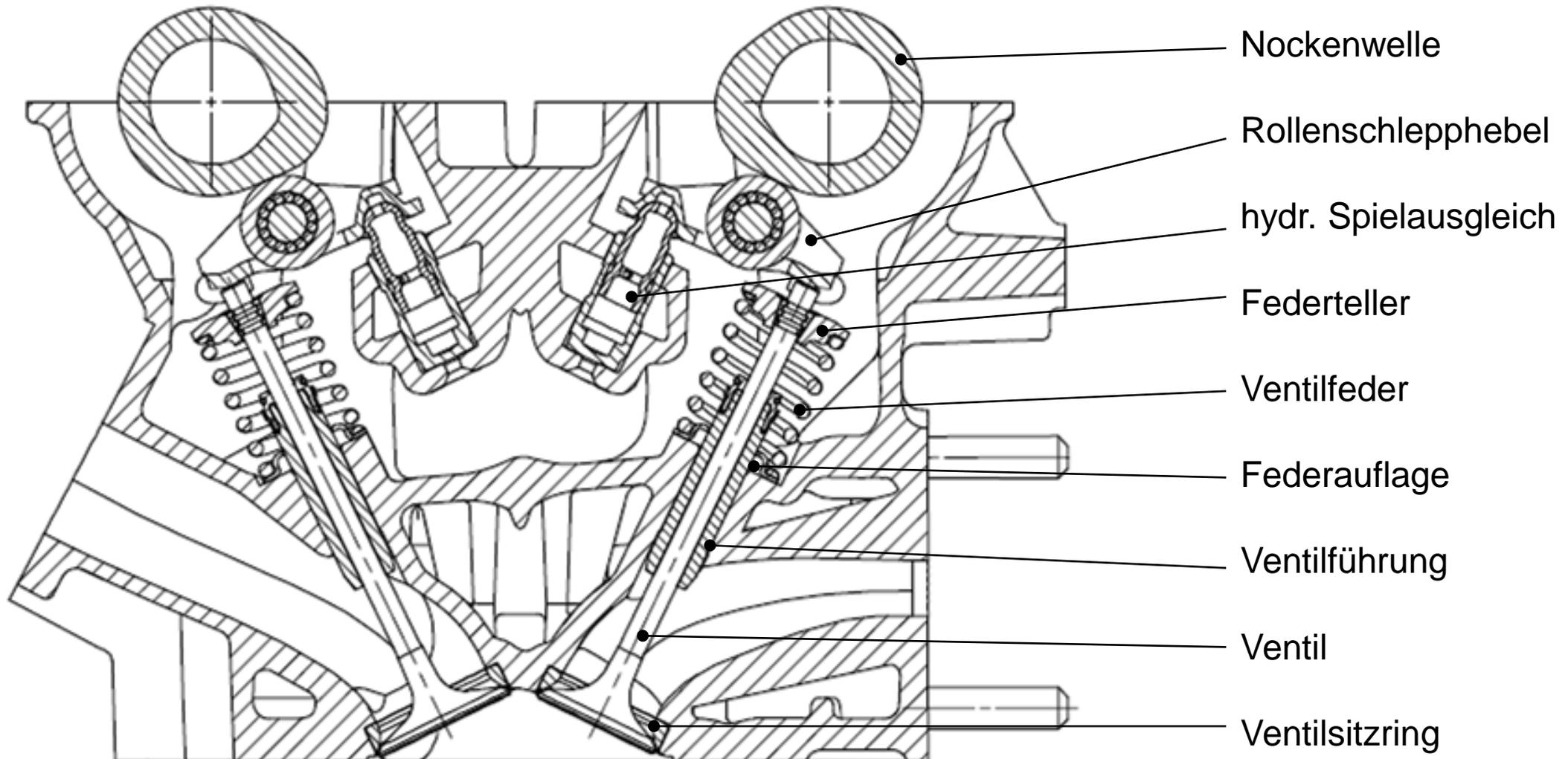
2 Aufbau und Funktion

Kurbeltrieb - Kinematik



2 Aufbau und Funktion

Ventiltrieb

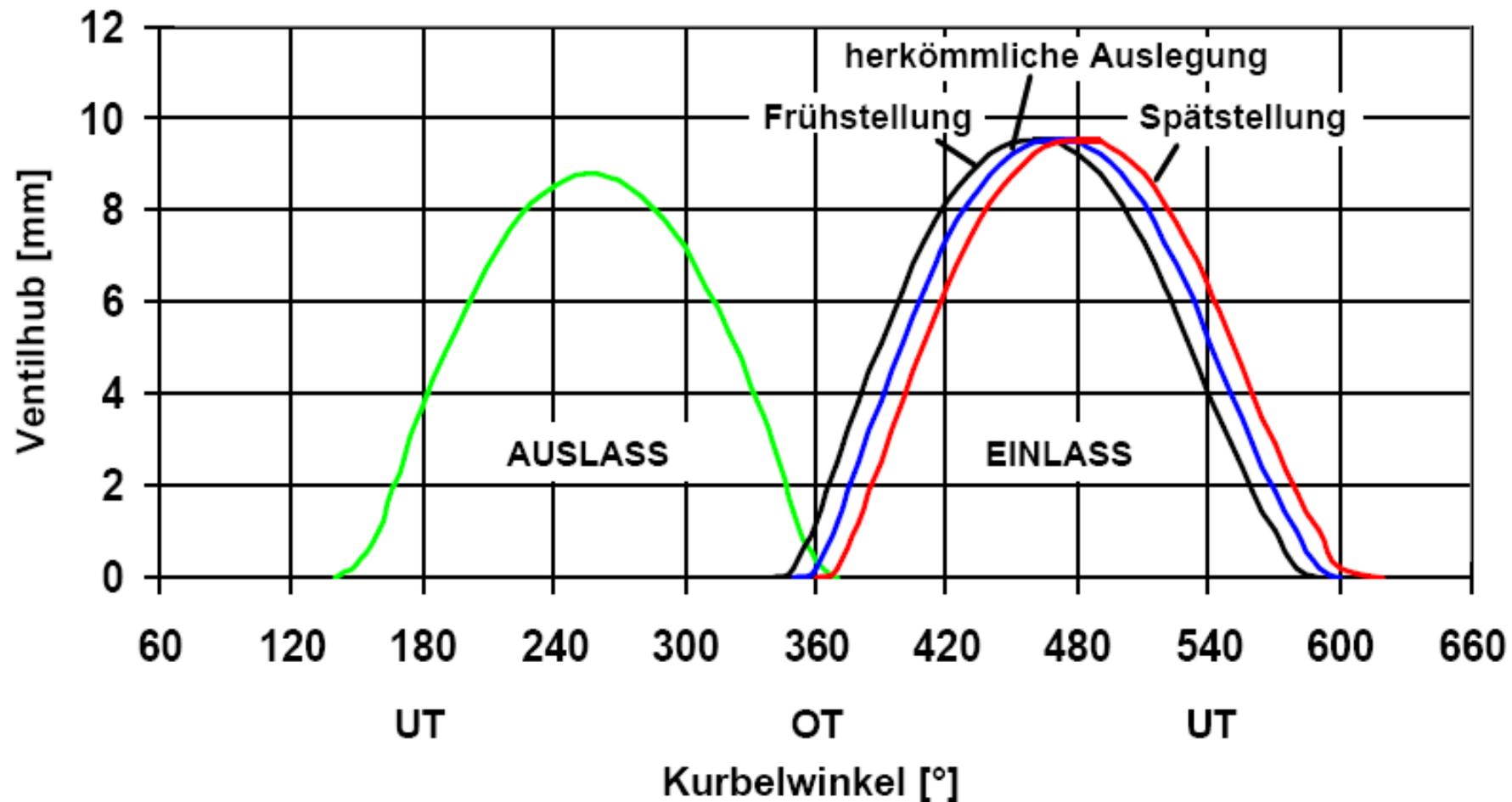


Quelle : MTZ

2 Aufbau und Funktion

Ventiltrieb - Ventilhubfunktion

Ventilhubfunktionen mit und ohne Überschneidung



Quelle : TH Aachen

2 Aufbau und Funktion

Ventiltrieb - Ventilhubfunktion

- Beispielhaft eine Variabilität des VM
- Verschiebbare Ventilerhebungskurven
- Realisiert durch Nockenwellen-Phasensteller

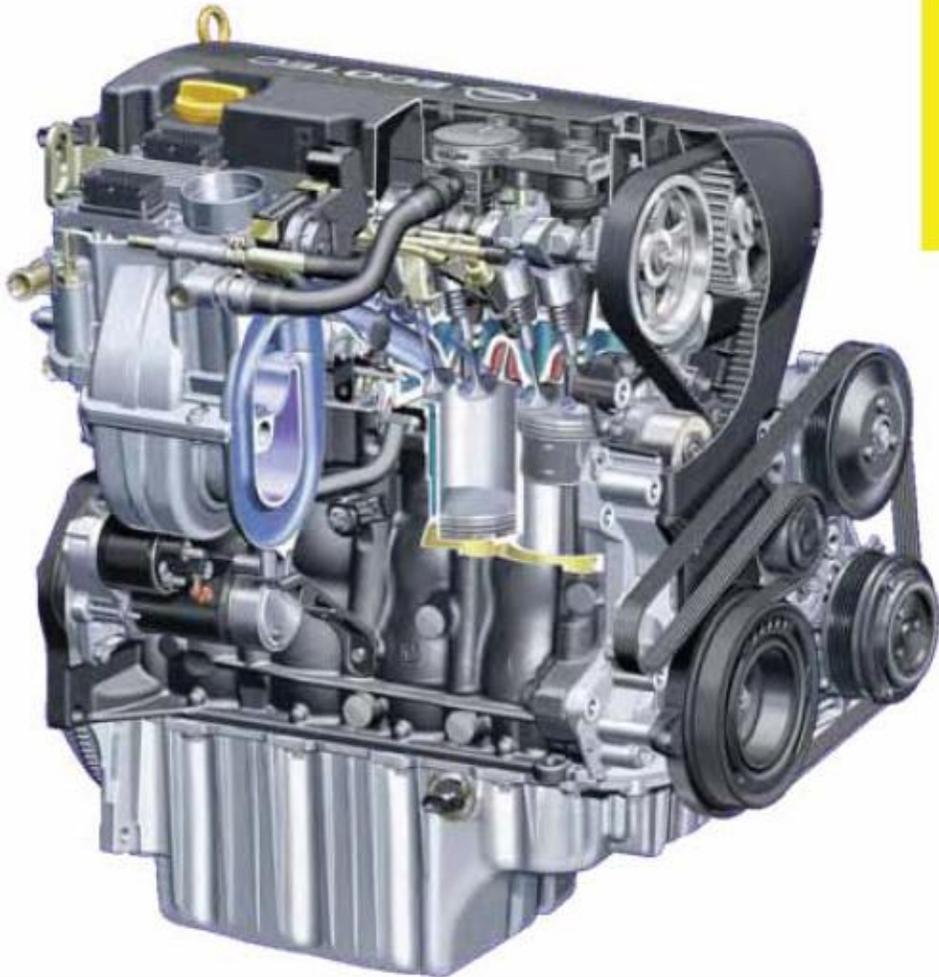
- Antrieb der NW durch die Kurbelwelle durch Riemen, Kette, Zahnräder
- Kopplung der NW mit Riemenrad mit verstellbarem Steller
- Damit wird die Ventilerhebungskurve verschoben
- Es ergibt sich ggf. eine Ventilüberschneidung

- Mit weniger oder mehr Ventilüberscheindung kann die innerzylindrische Strömung beim Ladungswechsel beeinflusst werden
- Damit wiederum die Steuerung der inneren Abgasrückführung
- AGR ist wichtig für die Steuerung der Verbrennungstemperatur und damit der entstehenden Abgasemissionen

2 Aufbau und Funktion

Beispiele

GM Powertrain Familie 1



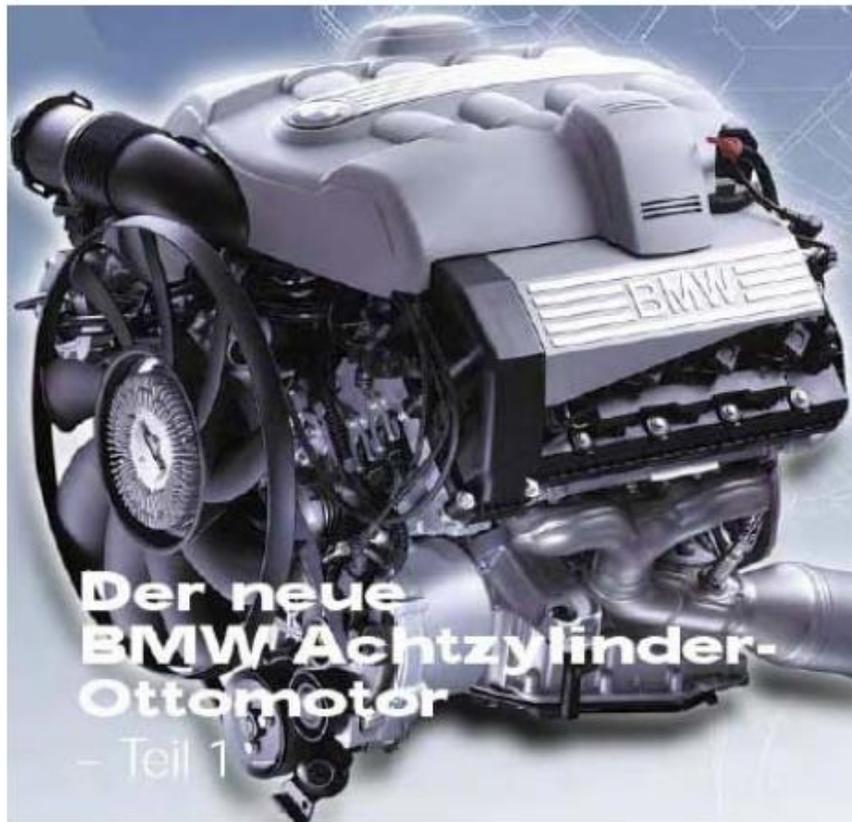
Kanalabschaltung mit Hoch-AGR
Mechanische Ventilspieleinstellung
Abgasnachbehandlung: Dreibege-
Katalysator

Bauart:	Reihe, 4-Zylinder
Hubraum:	1598 cm ³
Hub / Bohrung:	81,5 / 79 mm
Verdichtung:	10,5
Leistung:	76 kW @ 6000 1/min
max. Drehmoment:	147 Nm @ 3600 1/min
Kraftstoff:	ROZ 95
Emissionsstufe:	Euro IV
Gewicht (DIN70020):	114 kg

2 Aufbau und Funktion

Beispiele

BMW V8 4,4 l

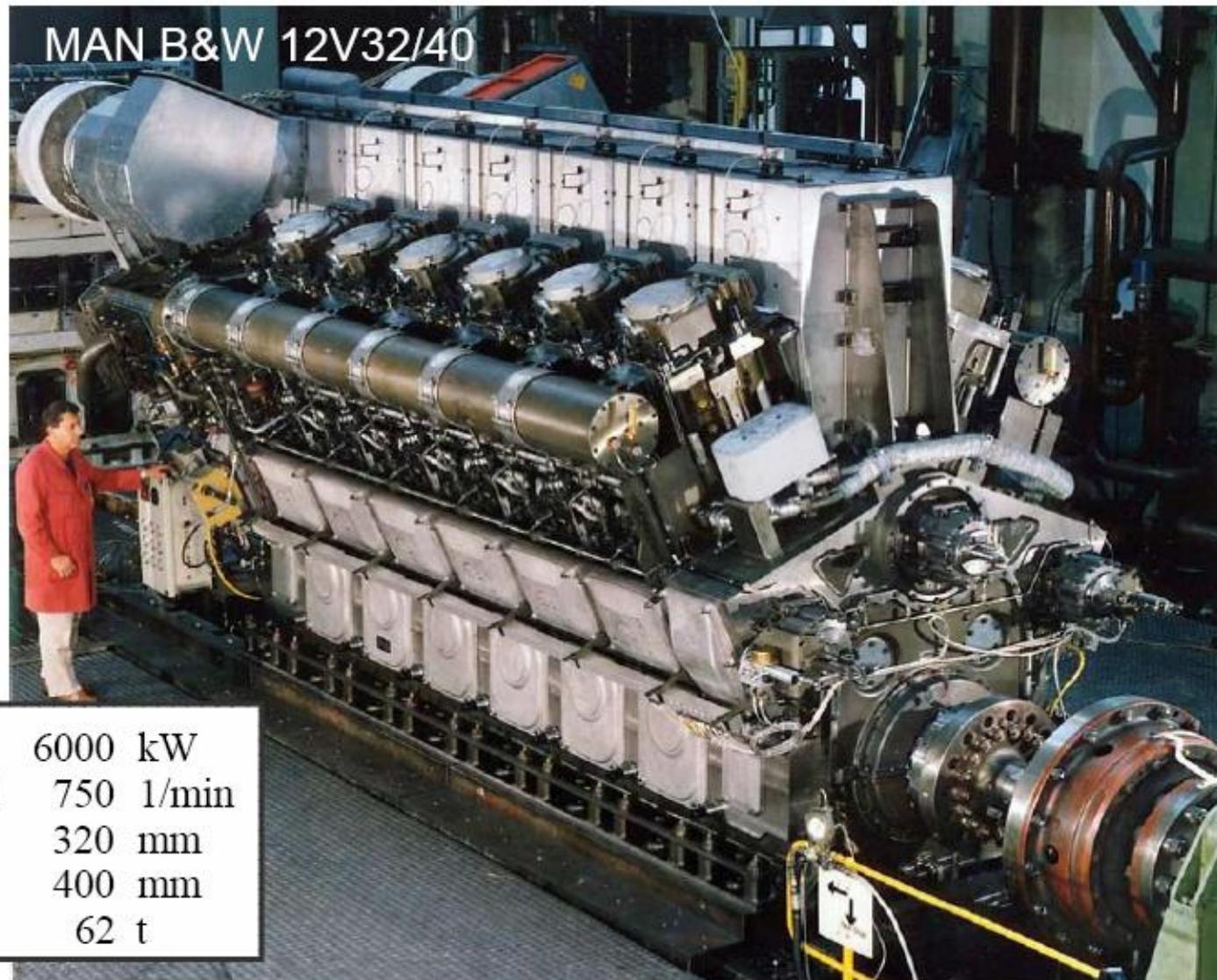


Mechan. variabler Ventiltrieb Übereutektischer Aluminium- Zylinderblock

Bauart:	V-8 Zylinder
Hubraum:	4398 cm ³
Hub / Bohrung:	82,7 / 92 mm
Zylinderabstand:	98 mm
V-Winkel	90°
Verdichtung:	10,0
Leistung:	245 kW @ 6500 1/min
Max. Drehmoment	450 Nm @36001/min
Kraftstoff:	ROZ 98
Motormasse:	211 kg
Abgasnorm:	EU IV

2 Aufbau und Funktion

Beispiele



2 Aufbau und Funktion

Beispiele

