

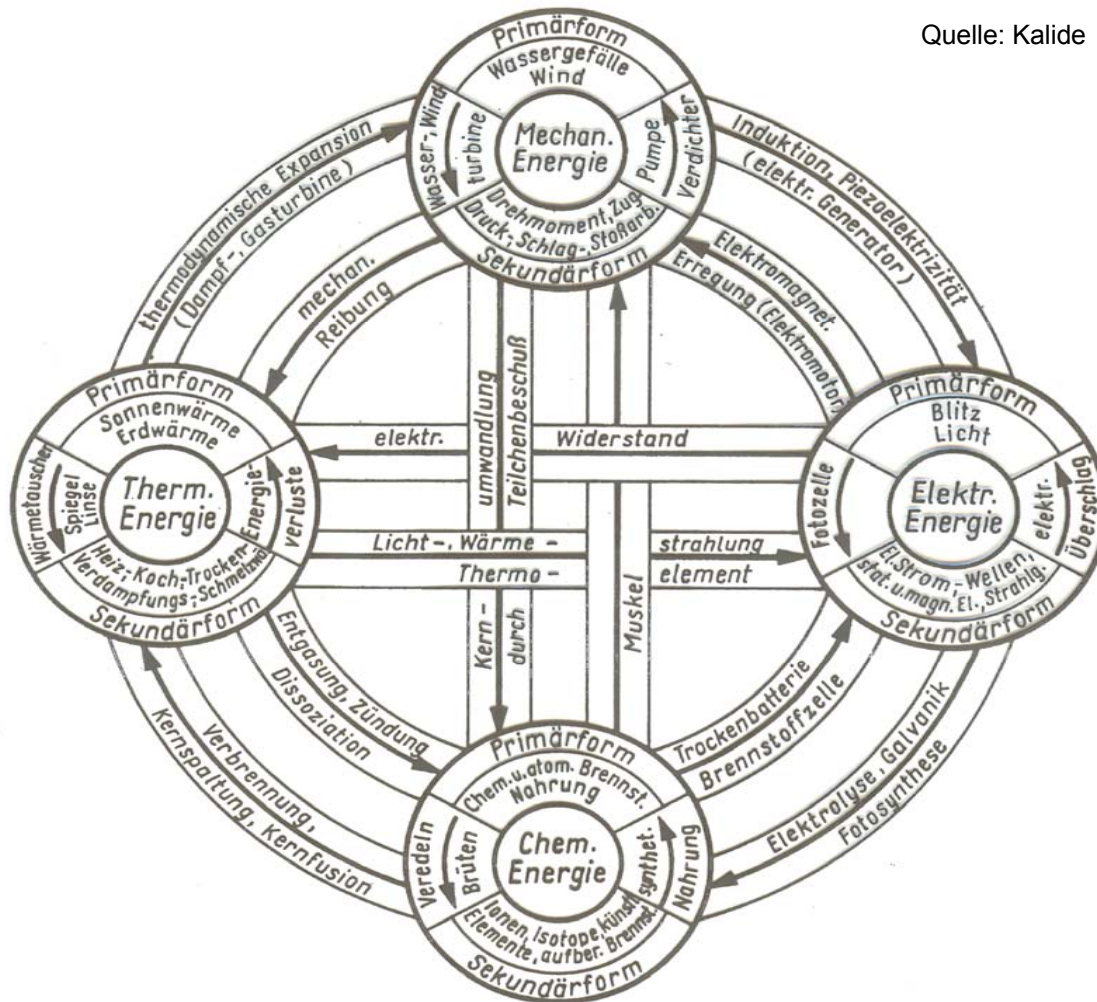
Quelle: Audi

Vorlesung **Verbrennungs- kraftmaschinen**

Direkteinspritzender Sechszylinder-V Motor
2,5 Liter, 110KW

Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers

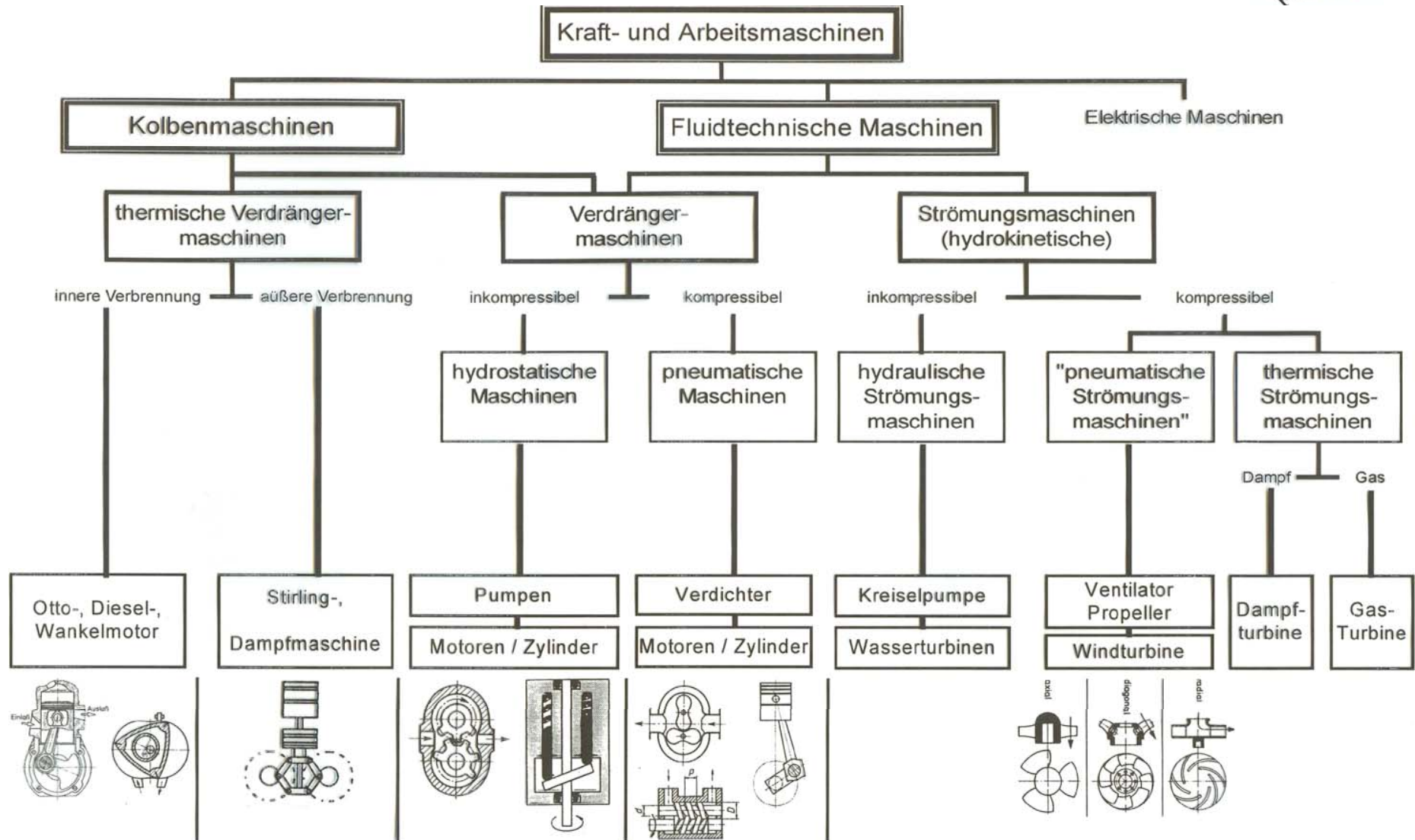
Quelle: Kalide



Schema technischer Energieumwandlung

| | | | | |
|-------------|------------|---|------------|-----------|
| Ausnutzung: | Chemisch | - | Thermisch | 80 - 92 % |
| | Thermisch | - | Mechanisch | 20 - 45 % |
| | Mechanisch | - | Elektrisch | 90 - 98 % |
| | Chemisch | - | Elektrisch | 45 - 50 % |

Übersicht über die Einteilung von Kraft- und Arbeitsmaschinen



Verbrennungskraftmaschinen

Prof. Dr.-Ing. E. Reimers

Verbrennungskraftmaschinen

1. Einführung, Abgrenzung, Gesamtüberblick

2. Brennkraftmaschinen

Kennzahlen, Berechnung

Konstruktive Aspekte

Wirkungsgrade, Muscheldiagramme, Kennfelder

Ladungswechsel

Brennverfahren

Gemischbildung / Einspritzsysteme

Aufladung

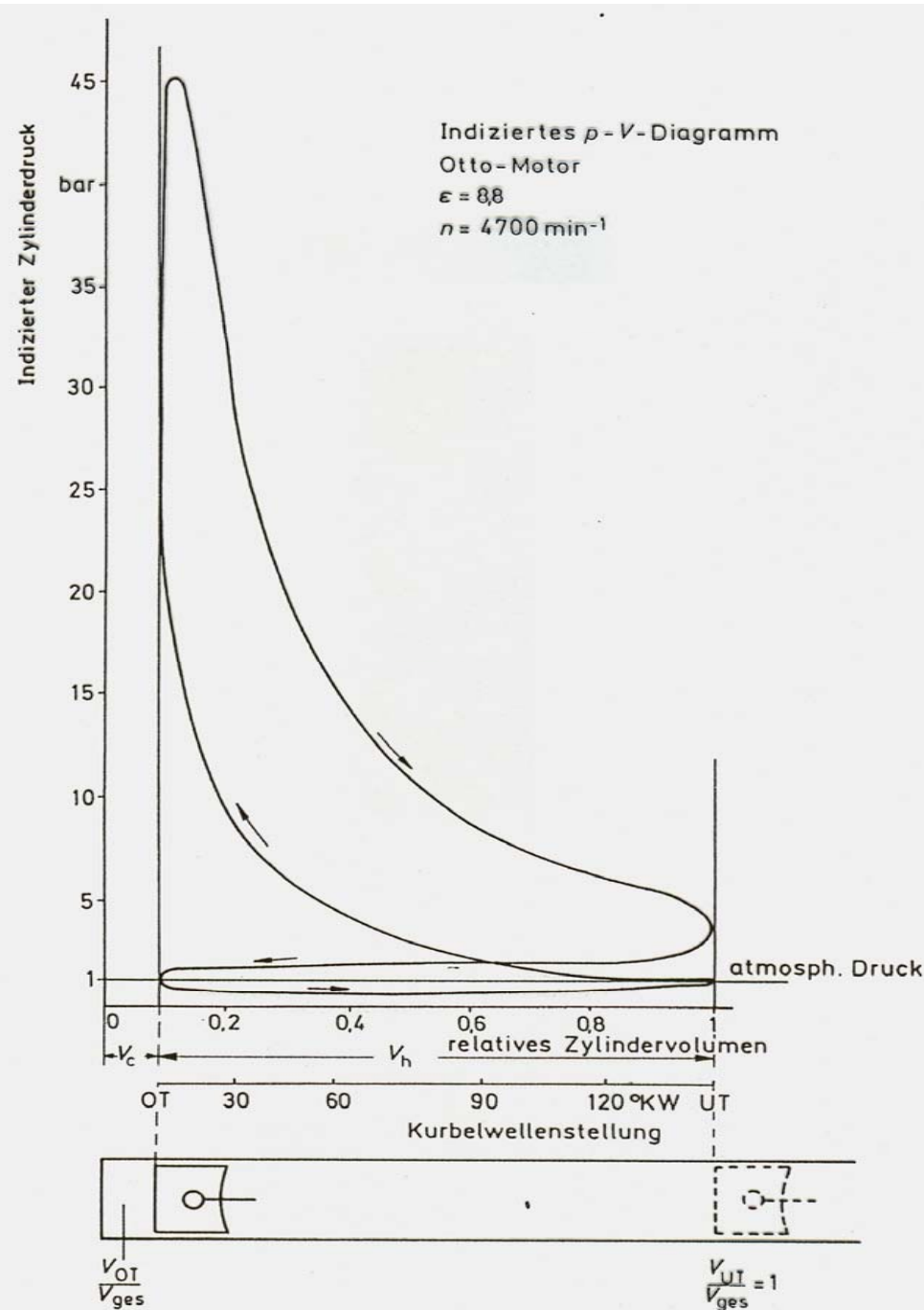
Elektronische Regelsysteme

Abgase u. Nachbehandlung

3. Triebwerk

Kurbeltrieb, Massenkräfte, Massenausgleich

4. Sondermaschinen

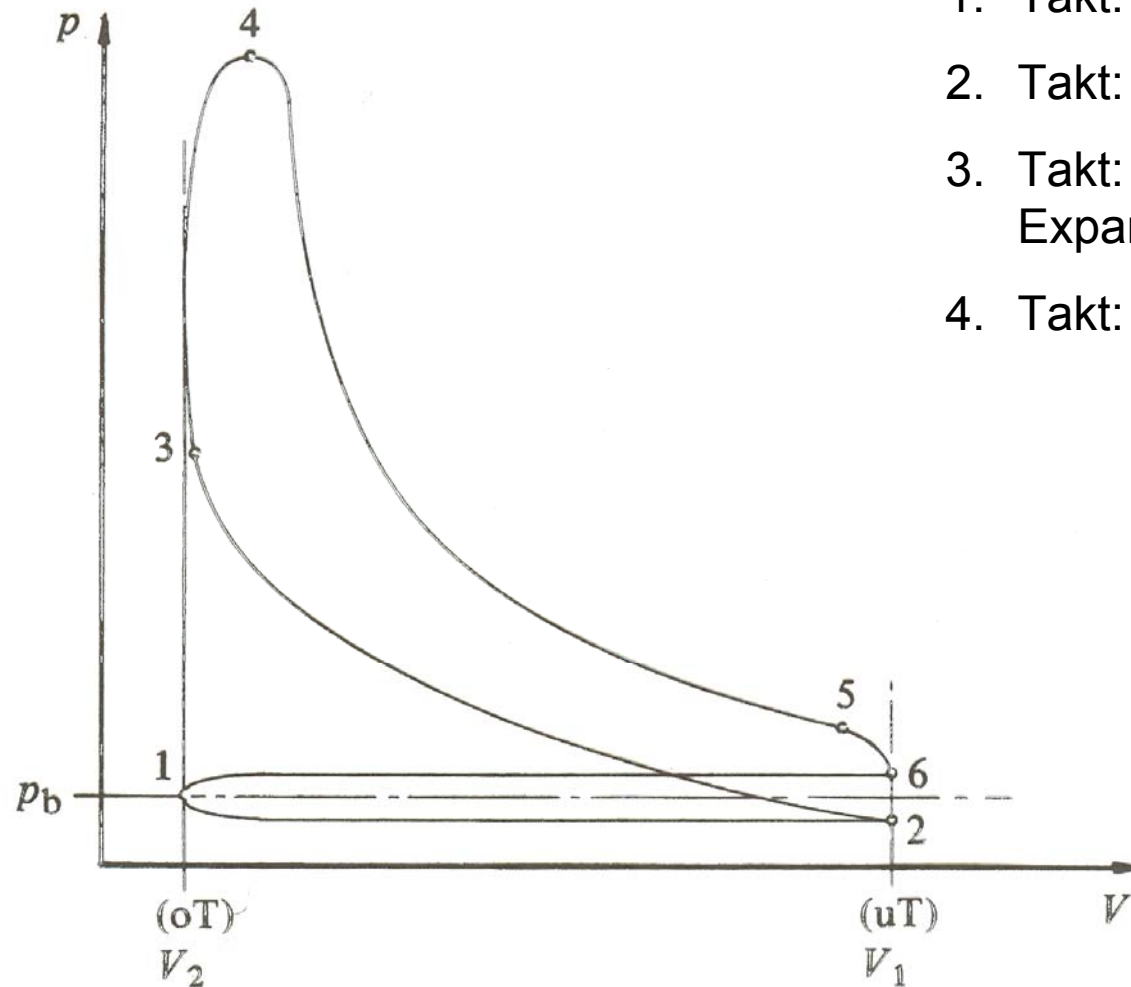


Quelle: Wagner / Fischer / Frommann

Indikatordiagramm eines Viertakt-Ottomotors

$$\epsilon = 8,8 \quad n = 4700 \text{ min}^{-1}$$

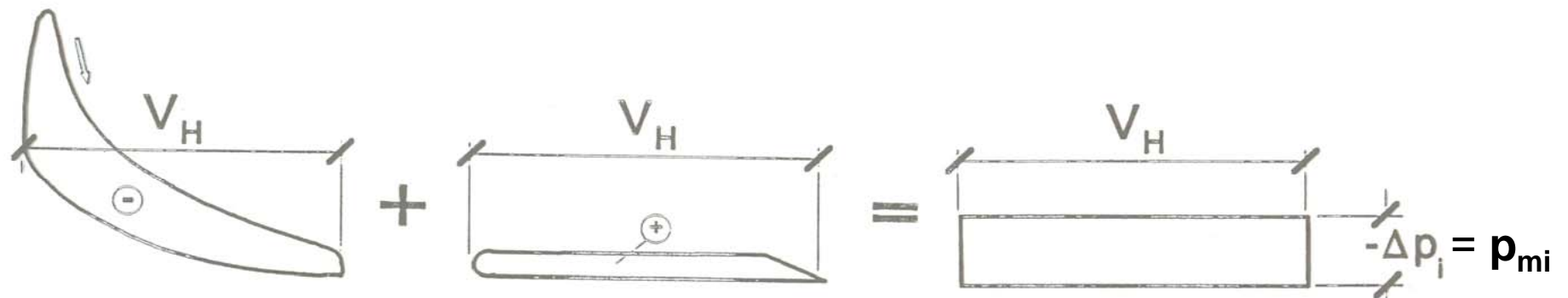
Das Indikatordiagramm des Viertakt-Dieselmotors

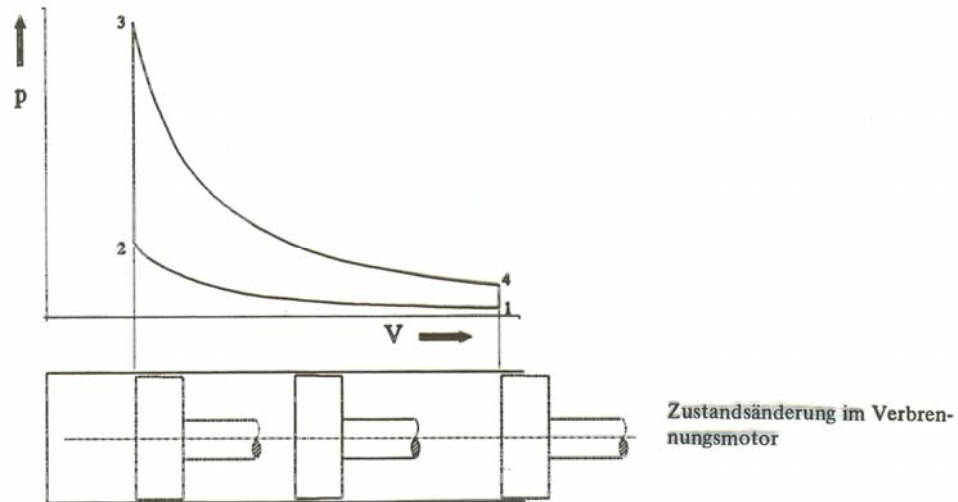


1. Takt: Ansaugen der Frischluft
2. Takt: Verdichten der Frischluft
3. Takt: Arbeiten (Verbrennen und Expansion)
4. Takt: Ausschieben des Restgases

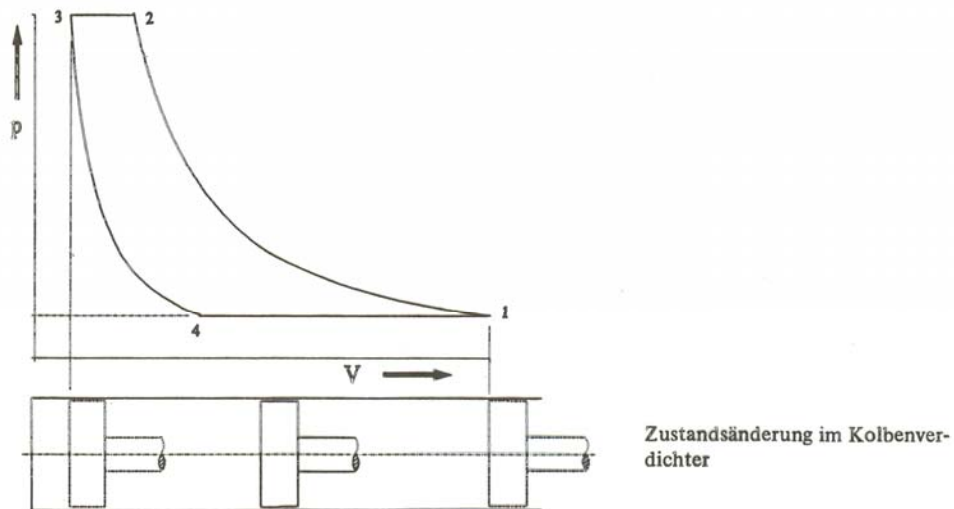
Mittlerer indizierte Innendruck

am Beispiel eines Viertaktmotors





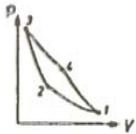

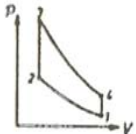
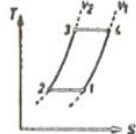
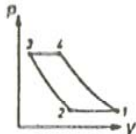
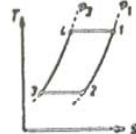
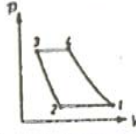

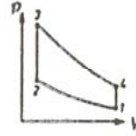
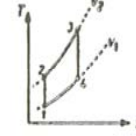
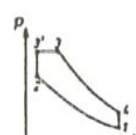
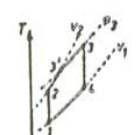
Zustandsänderungen im p-V-Diagramm



Quelle: Wagner / Fischer / Frommann

Thermodynamische Vergleichsprozesse

Einordnung der Verbrennungskraftmaschinen

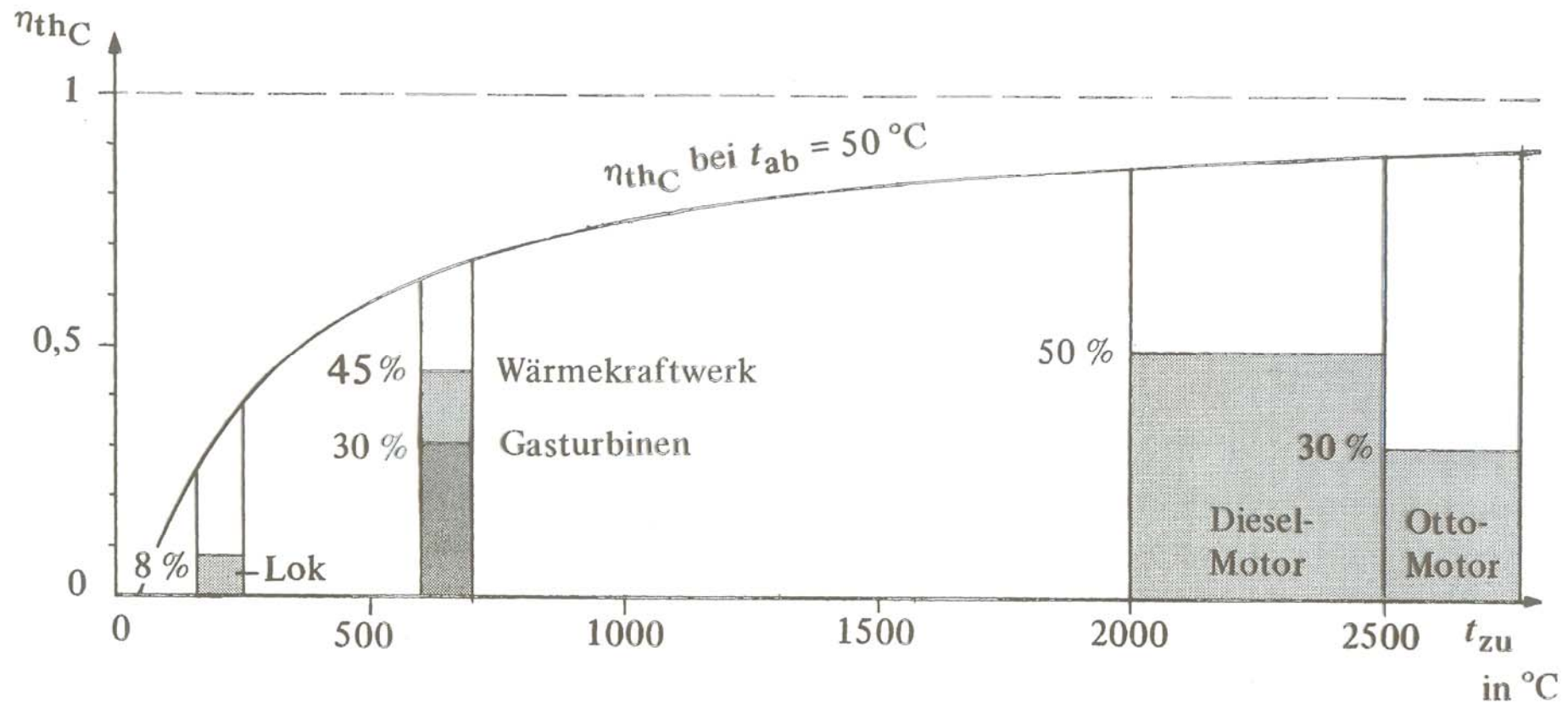
| Autor bzw. Erfinder | Idealer Vergleichs- prozeß | Zustands- änderung | p,V- Diagramm | T,s- Diagramm | Regenerat.- Bedingungen |
|---------------------------|----------------------------------|--|--|---|----------------------------|
| Carnot | Dampfmaschine | 2 Isothermen 2 Adiabaten |  |  | nein |
| Stirling | Heißluft-Kol- benmaschine | 2 Isothermen 2 Isochoren |  |  | ja |
| Ericson | Heißluft-Strö- mungsmaschine | 2 Isothermen 2 Isobaren |  |  | ja |
| Joule | Heißluft-Strö- mungsmaschine | 2 Adiabaten 2 Isobaren |  |  | ja, wenn $T_1 > T_3$ |
| Otto | Verbrennungs- motor | 2 Adiabaten 2 Isochoren |  |  | ja, wenn $T_4 > T_2$ |
| Seiliger | Diesel- motor | 2 Adiabaten 2 Isochoren 1 Isobaren |  |  | ja, wenn $T_4 > T_2$ |

Quelle: Groth

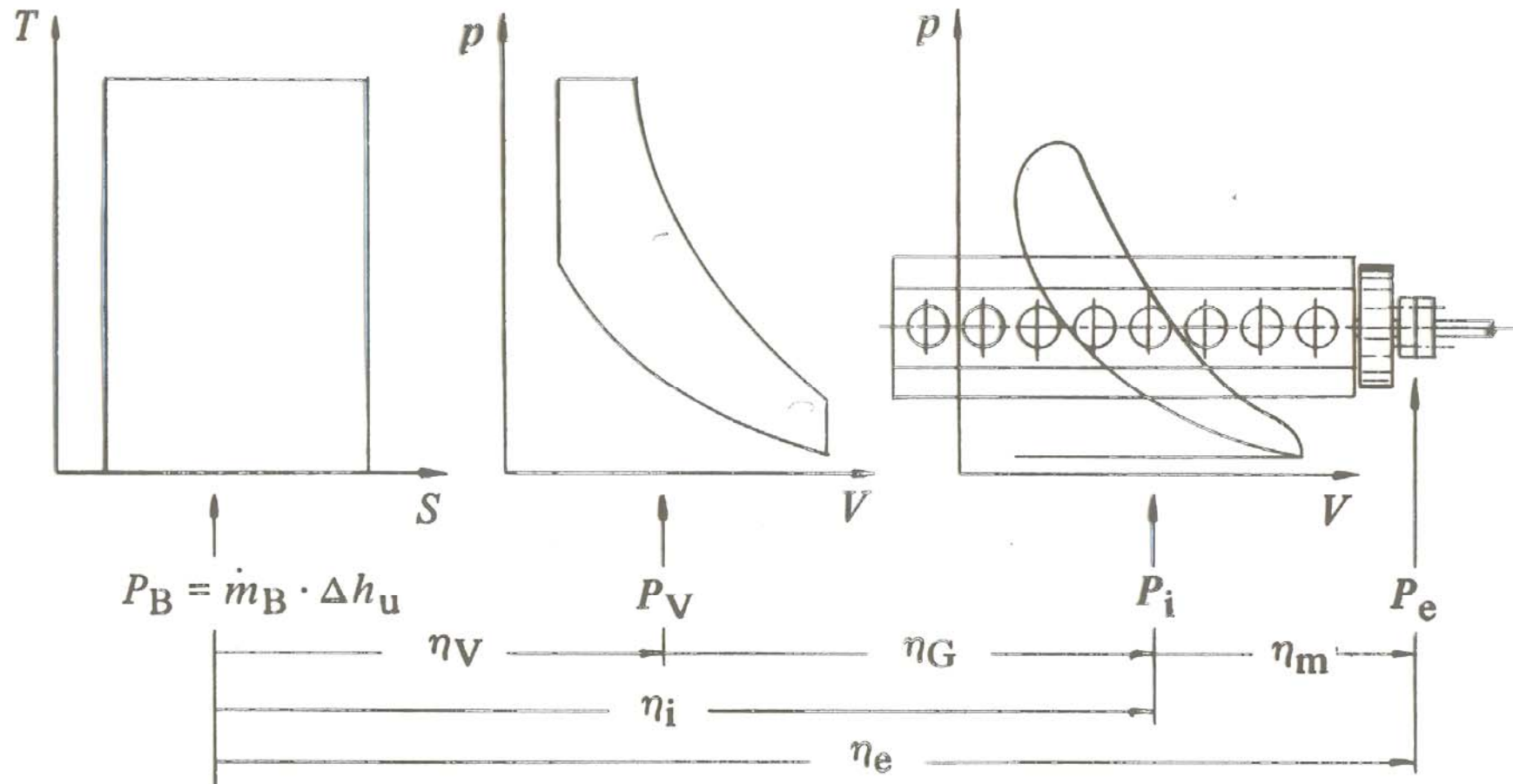
Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers

Wirkungsgrad des Carnot-Kreisprozesses

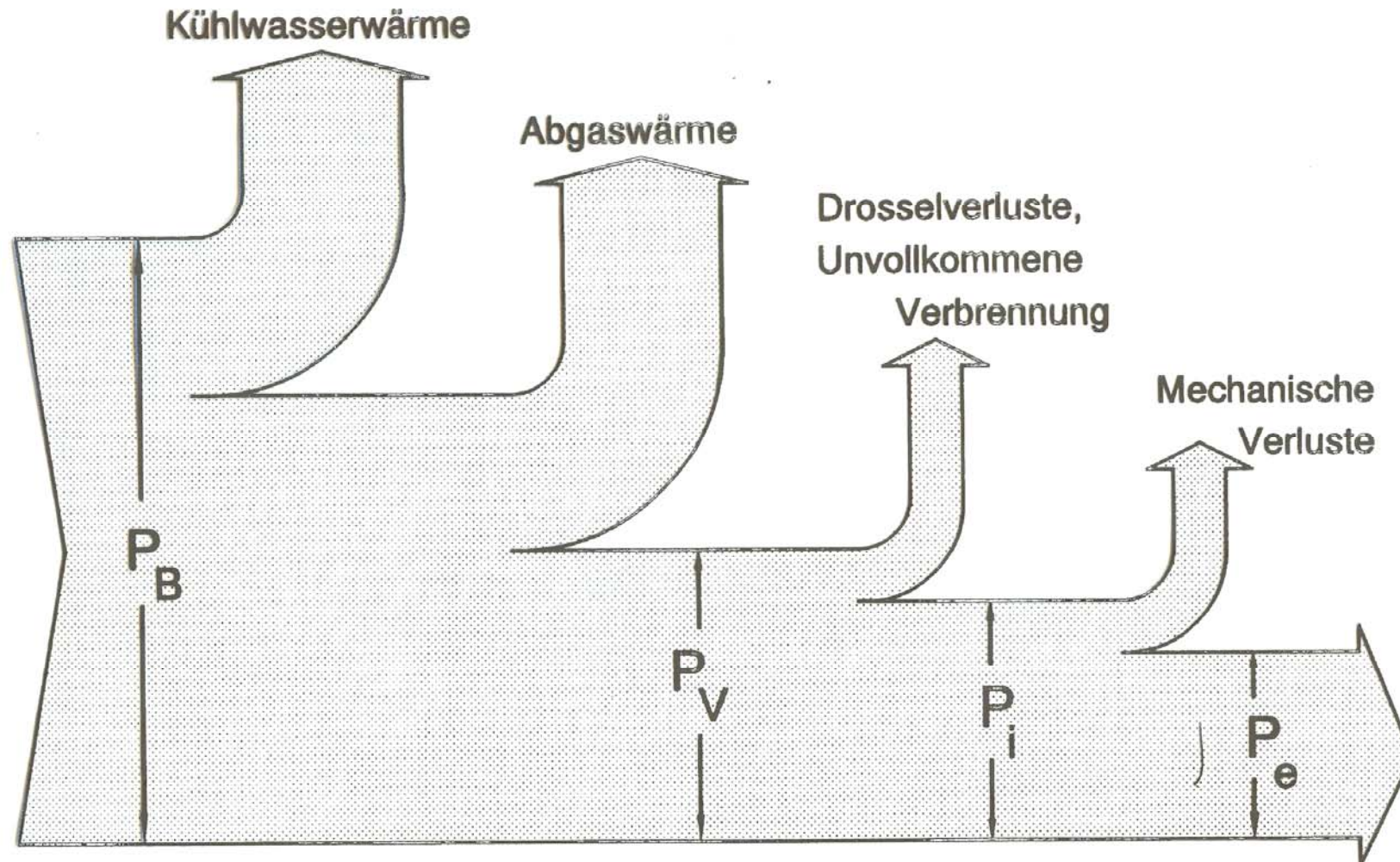
im Vergleich mit den errechneten Wirkungsgraden in wirklichen Maschinen



Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Wirkungsgraden bzw. Leistungen



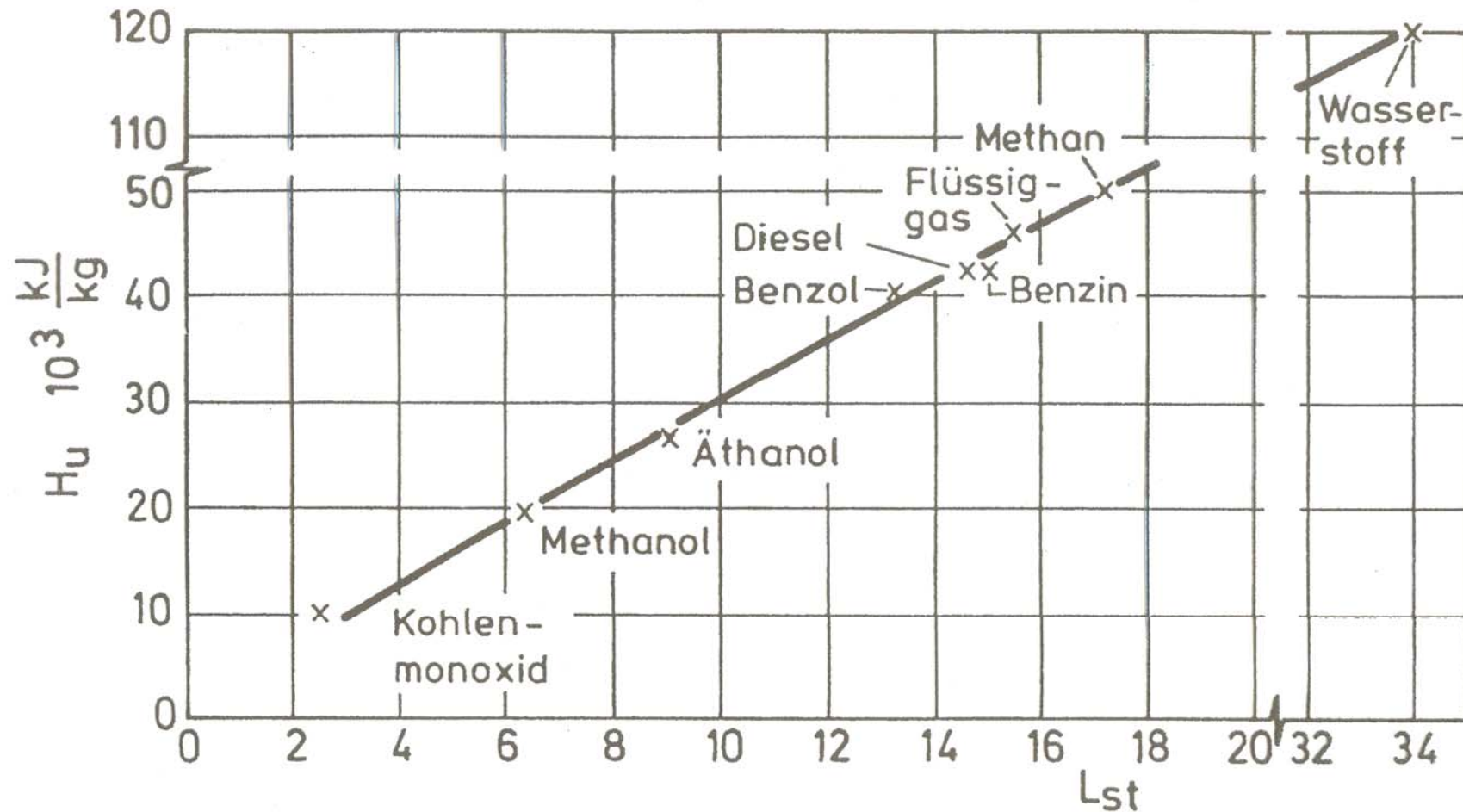
Energiestrombild eines Verbrennungsmotors (Sankey-Diagramm)



Quelle: Wagner / Fischer / Frommann

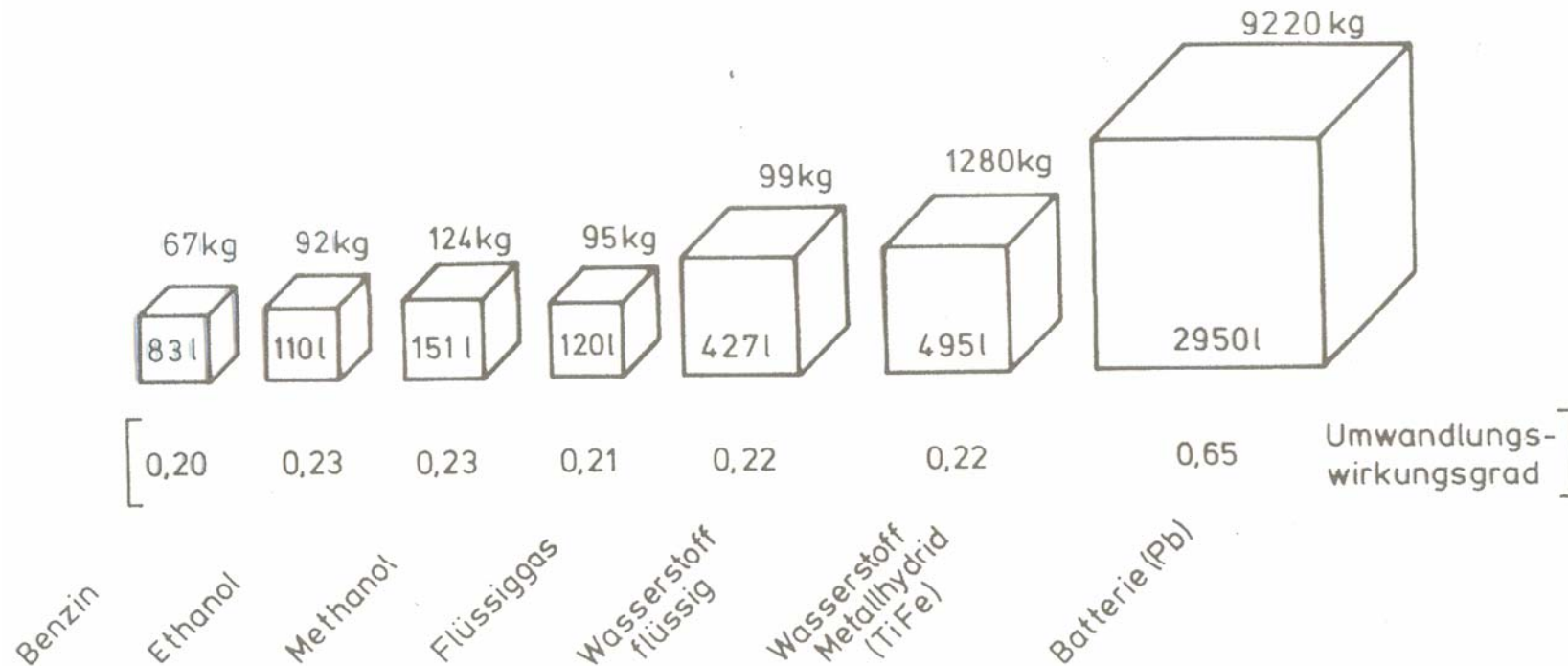
Unterer Heizwert

verschiedener Kraftstoffe



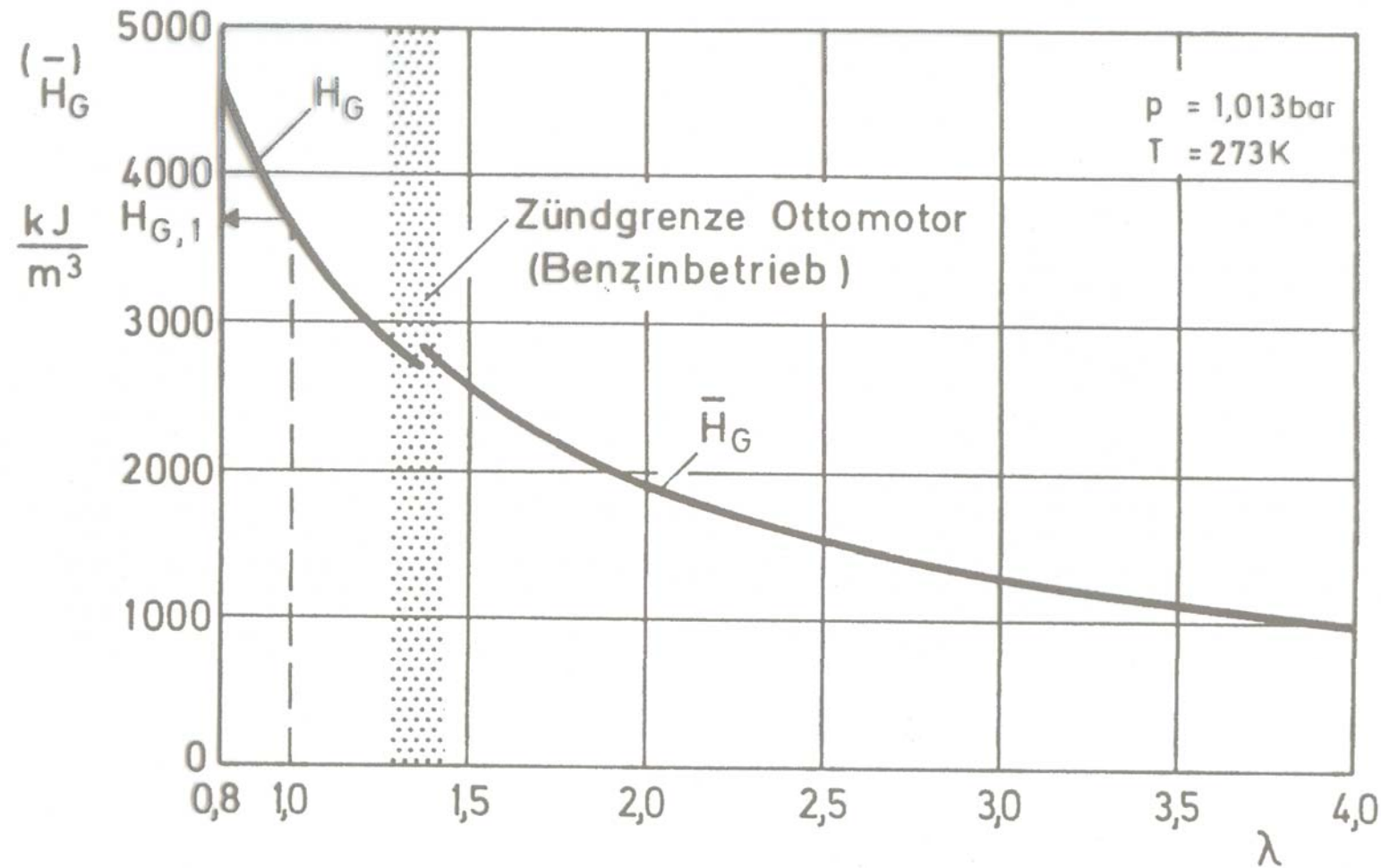
Größe von Speichersystemen

unter Berücksichtigung von „Tankvolumen und -masse“ entsprechend einem nutzbaren Energiegehalt von 75 l Benzin



Quelle: Pischinger

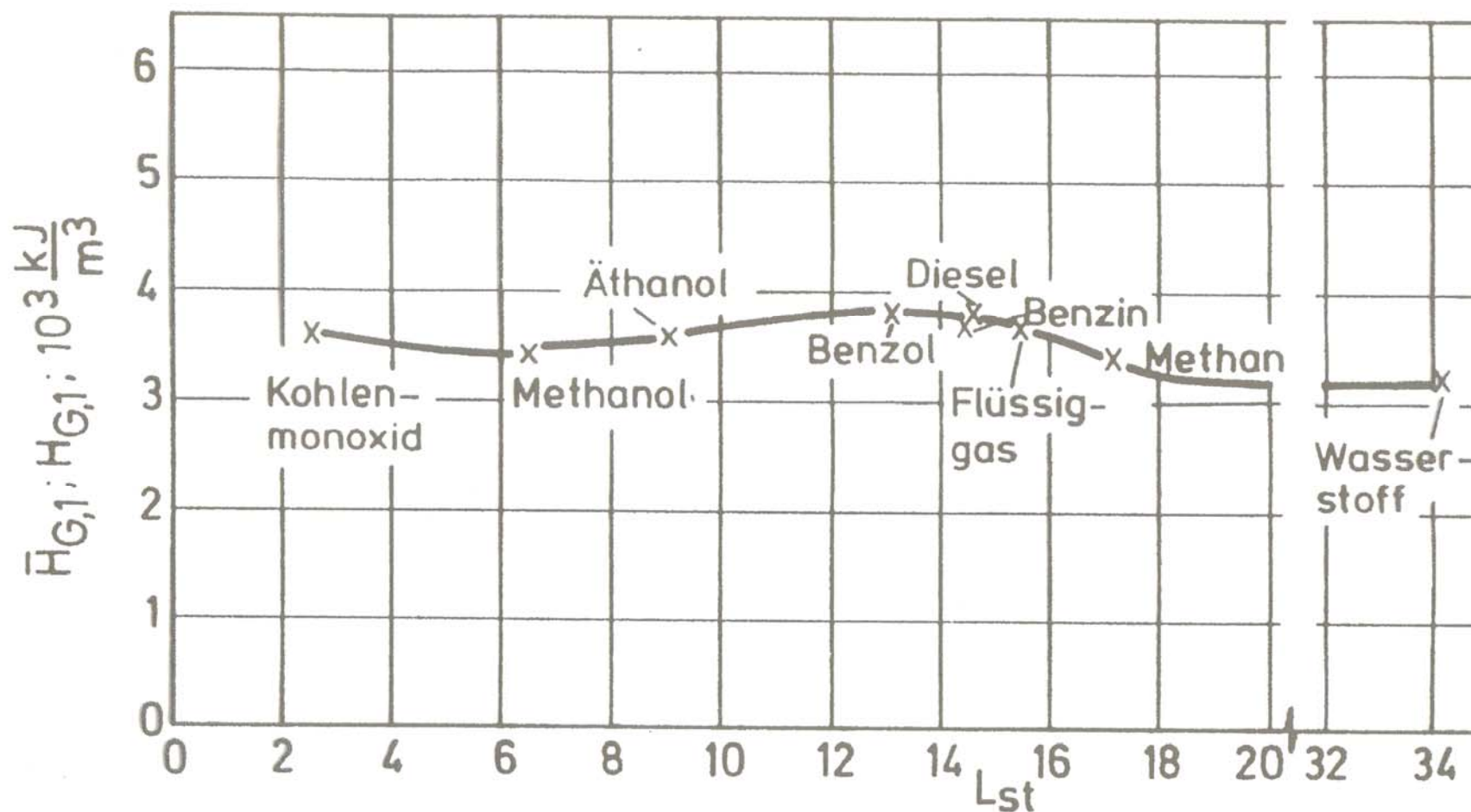
λ – Abhängigkeit des Gemischheizwertes



Quelle: Pischinger

Gemischheizwerte für verschiedene Kraftstoffe

(bezogen auf Normzustand: 1000 mbar, 0°C)



Quelle: Pischinger

| Bezeichnung und chem. Symbol | Schmelzpunkt [°C] | Siedepunkt [°C] | Dichte ρ [kg/dm ³] | H_u [kJ/kg] | L_{min} [m ³ /kg] | Q_m [kJ/m ³] |
|--|----------------------|--------------------|---|------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| n-Pentan C_5H_{12} | | 36 | 0,625 | 45500 | 11,85 | 3840 |
| n-Hexan C_6H_{14} | | 69 | 0,659 | 44700 | 11,79 | 3790 |
| n-Heptan C_7H_{16} | | 98,5 | 0,684 | 44400 | 11,75 | 3780 |
| n-Oktan C_8H_{18} | | 125,5 | 0,703 | 44600 | 11,71 | 3810 |
| iso-Oktan C_8H_{18} | | 99,5 | 0,692 | 44000 | 11,71 | 3760 |
| Benzin (Mittelwert) | | | 0,70- 0,75 | 43500 | 11,6 | 3750 |
| Benzin (Aral) | | | 0,783 | 43540 | 10,5 | 3850 |
| Benzol C_6H_6 | +5,5 | 80 | 0,879 | 40200 | 10,3 | 3900 |
| Methylalkohol CH_3OH (Methanol) | -94 | 64,5 | 0,792 | 19800 | | |
| Athylalkohol C_2H_5OH (Äthanol) | -112 | 78 | 0,789 | 27000 | | |
| n-Nonan C_9H_{20} | -53,3 | 150,5 | 0,718 | | | |
| n-Dekan $C_{10}H_{22}$ | -29,5 | 174 | 0,730 | | | |
| n-Undekan $C_{11}H_{24}$ (Hendekan) | -25,5 | 196 | 0,740 | | | |
| n-Dodekan $C_{12}H_{26}$ | -9,5 | 216 | 0,749 | | | |
| Gasöl (Mittelwert) | | | 0,84- 0,88 | 39800 41900 | 10,5- 10,8 | 3790 3880 |

Anmerkung: Alle Stoffwerte in [°C] bei 1,013 bar,
Dichte in [kg/dm³] bei 1,013 bar und 20°C.

Quelle: Groth

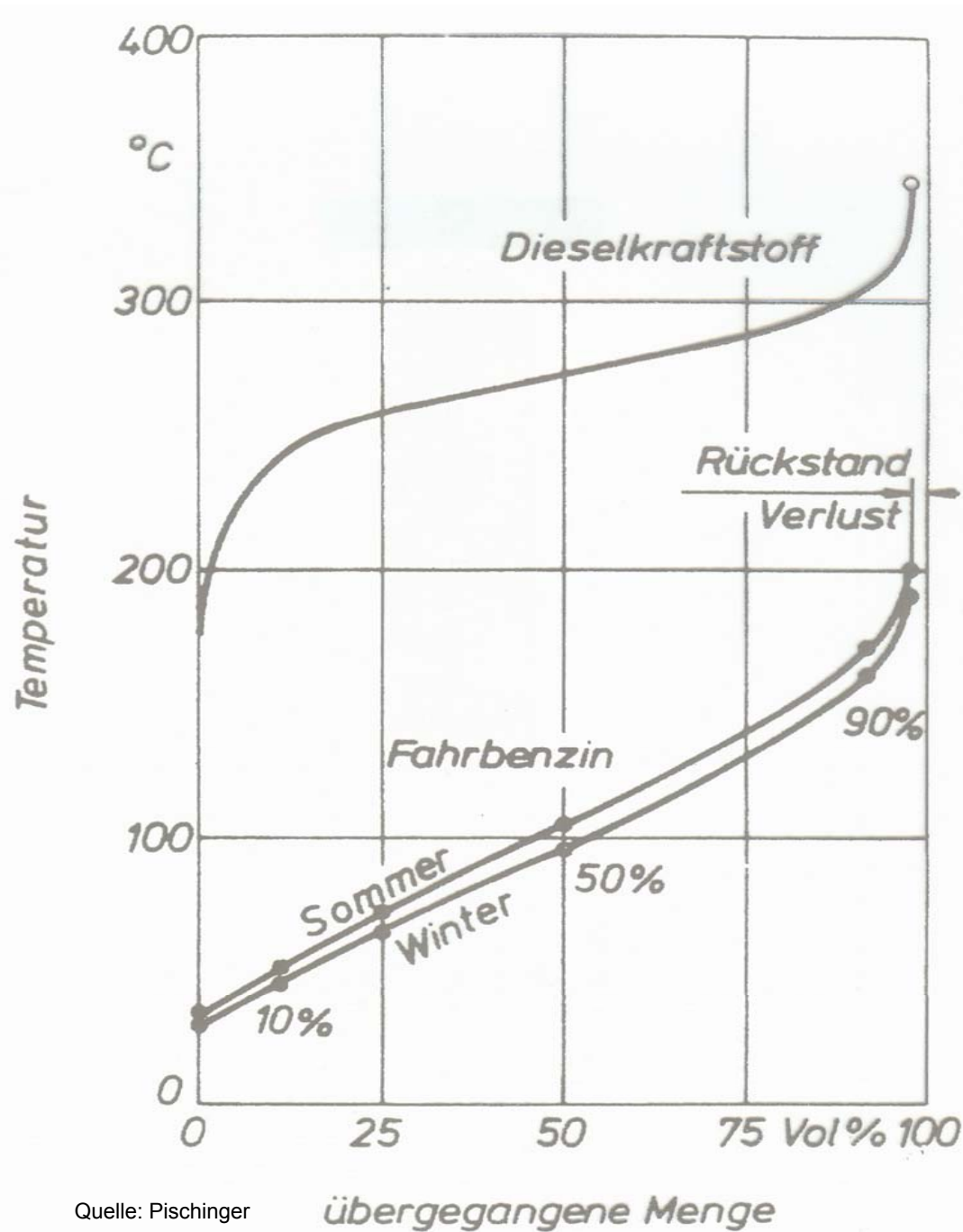
Die wichtigsten flüssigen Kraftstoffe

| Bezeichnung des Gases | Zusammensetzung in Vol % | | | | | | Dichte ρ [kg/m ³] | H_u [kJ/m ³] | L_{min} [m ³ /m ³] | Q_m [kJ/m ³] |
|---|--------------------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|--|-------------------------------|--|-------------------------------|
| | CO | H ₂ | CH ₄ | O ₂ | CO ₂ | N ₂ | | | | |
| Leuchtgas (Stadtgas) | 14 | 50 | 23 | 1,5 | 3 | 8,5 | 0,57 | 15500 17600 | 4,0-5,5 | 3100 2710 |
| Kokereigas (Koksofengas) | 7 | 55 | 33 | 2 | 1,5 | 1,5 | 0,46 | 18000 19300 | 4,3-4,65 | 3400 3420 |
| Sauggas (Generatorgas) | 20 | 19 | 1,5 | 1 | 8,5 | 50 | 1,11 | 5000 5400 | 1,0 | 2500 2700 |
| Gichtgas | 24 | 6 | - | - | 8 | 62 | 1,25 | 3600 4000 | 0,7-0,75 | 2120 2290 |
| Klär gas (Faulgas) | - | 3 | 60 | - | 32 | 5 | 1,11 | 22000 | 5,8 | 3240 |
| Erdgas | 0,5 | 1,5 | 98 | - | - | - | 0,72 | 35600 | 9,5-10,0 | 3390 3240 |
| Wasserstoff H ₂ | - | 100 | - | - | - | - | 0,09 | 10800 | 2,38 | 3200 |
| Kohlenmonoxid CO | 100 | - | - | - | - | - | 1,25 | 12600 | 2,38 | 2730 |
| Luft | - | - | - | 21 | - | 79 | 1,29 | - | - | - |
| Methan CH ₄ | - | - | 100 | - | - | - | 0,714 | 35800 | 9,5 | 3410 |
| Athan C ₂ H ₆ | - | - | - | - | - | - | 1,34 | 64400 | 16,7 | 3640 |
| Propan C ₃ H ₈ | - | - | - | - | - | - | 1,96 | 93600 | 23,8 | 3770 |
| n-Butan C ₄ H ₁₀ | - | - | - | - | - | - | 2,70 | 123600 | 31,0 | 3860 |
| iso-Butan C ₄ H ₁₀ | - | - | - | - | - | - | 2,67 | 121600 | 31,0 | 3800 |

Anmerkung: Zusammensetzung der ersten 6 (technischen) gasförmigen Brennstoffe gilt als Mittelwert, kann im allgemeinen um $\pm 5\%$ der Einzelwerte schwanken. Heizwerte gelten für diesen Bereich.

Quelle: Groth

Die wichtigsten gasförmigen Kraftstoffe

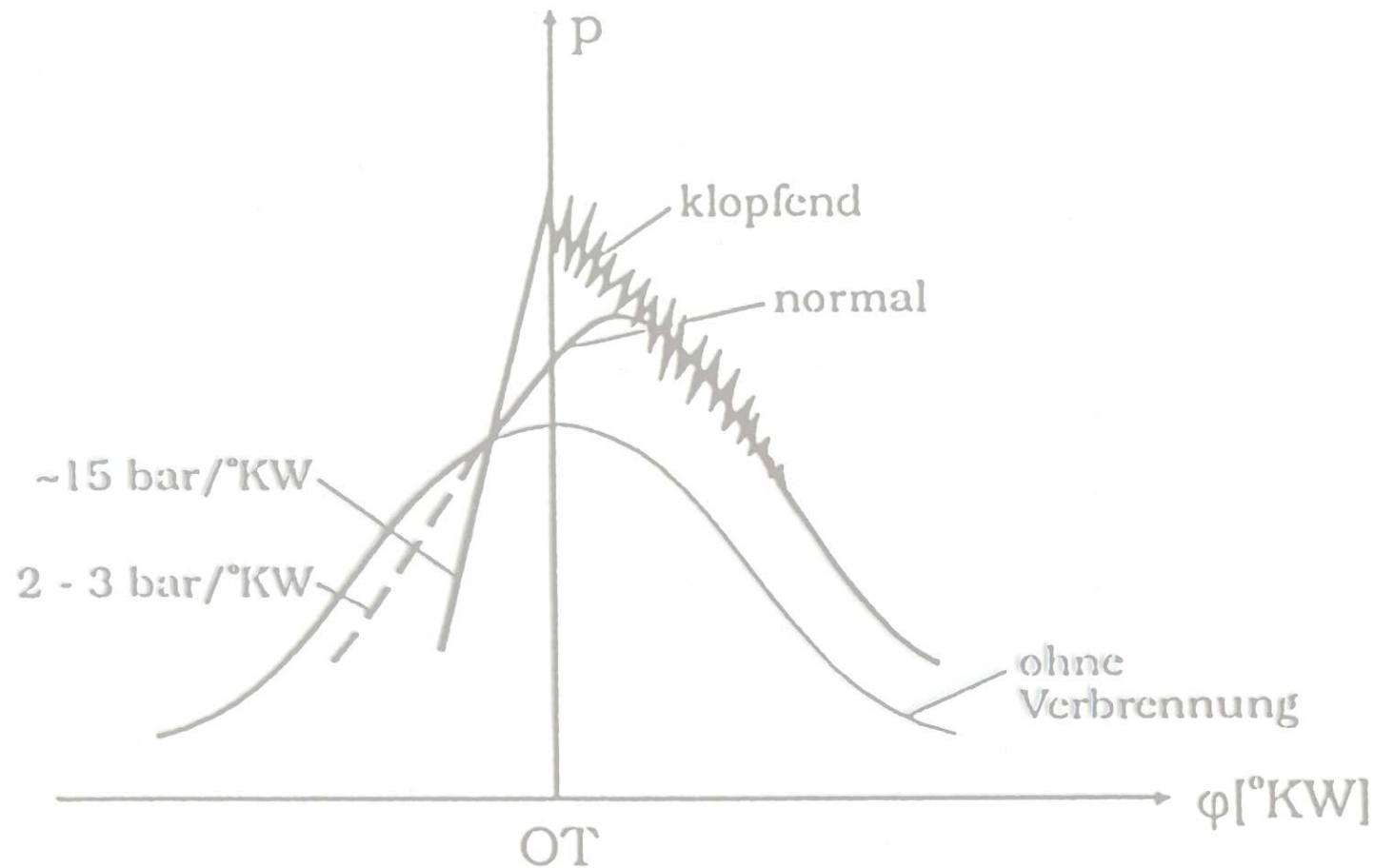


Quelle: Pischinger

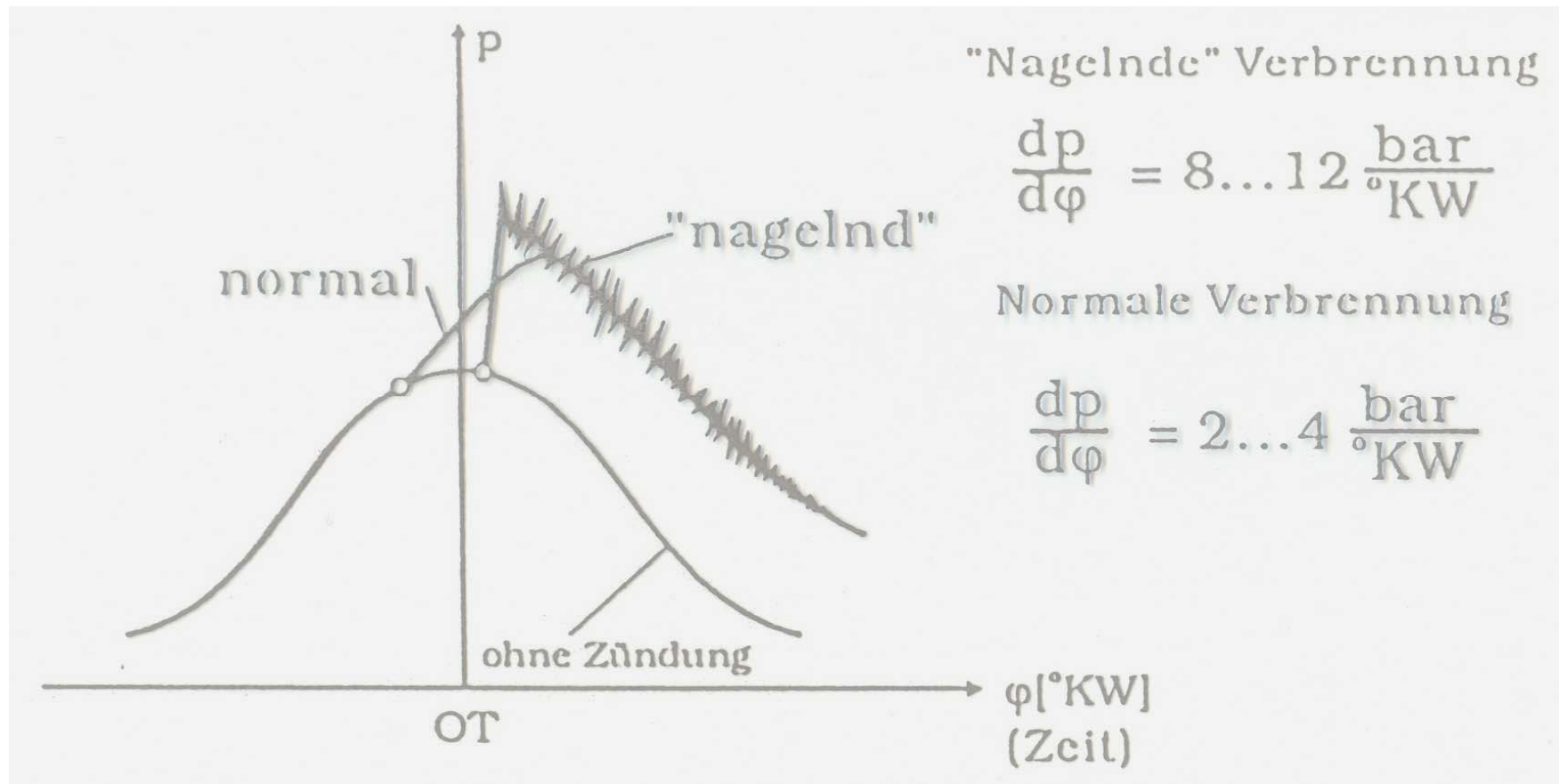
übergegangene Menge

Siedekurven

Druckverlauf bei normaler und „klopfender“ Verbrennung

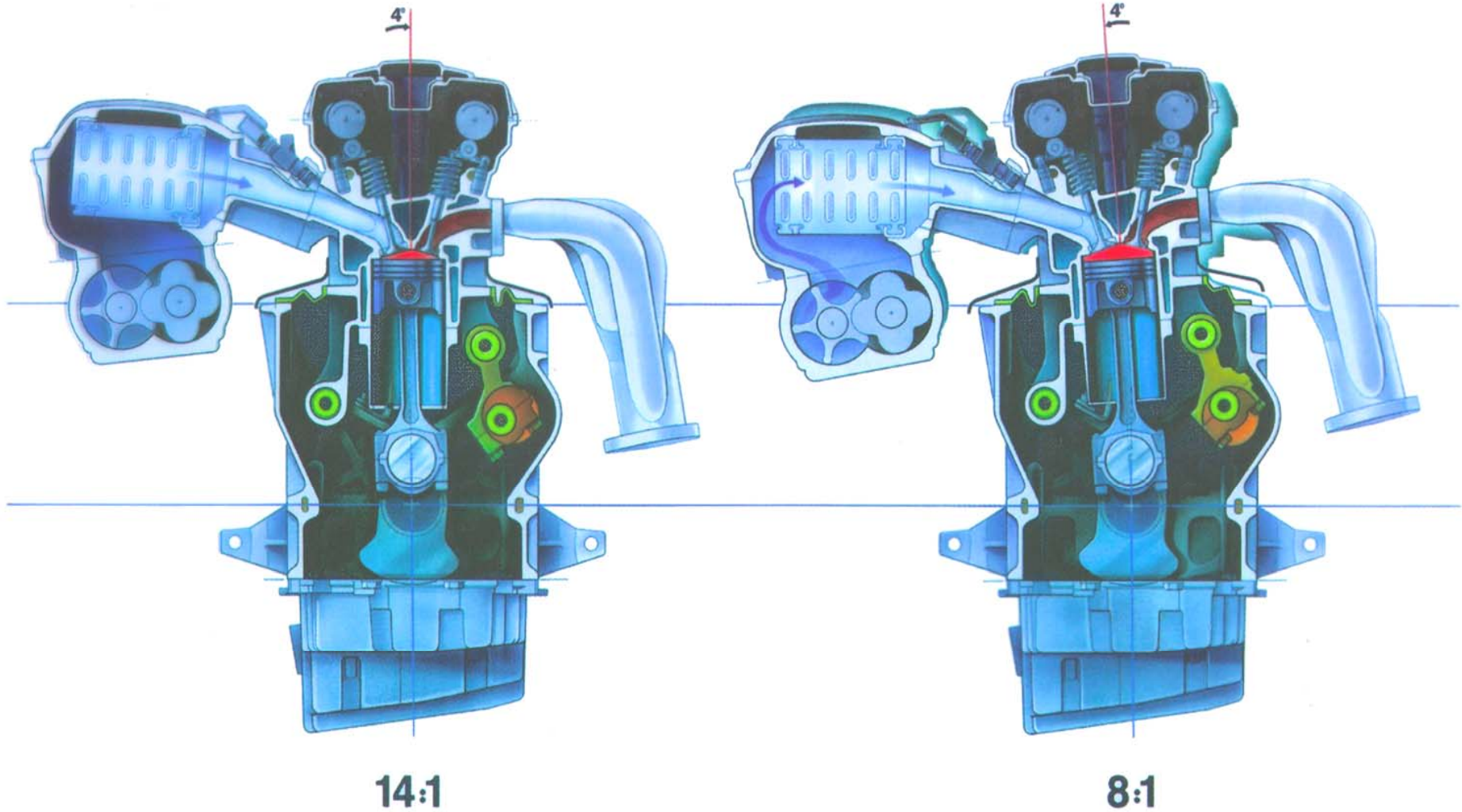


Druckverlauf im Zylinder beim „Nageln“ Dieselmotor



Variable Verdichtung

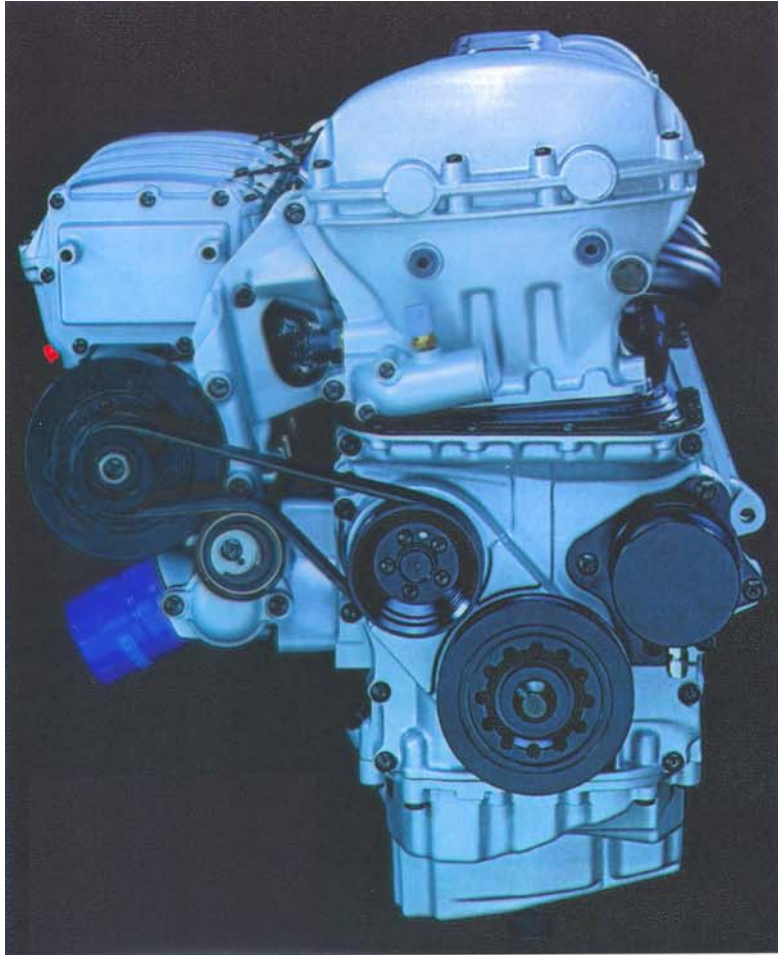
Saab Variable Compression SVC



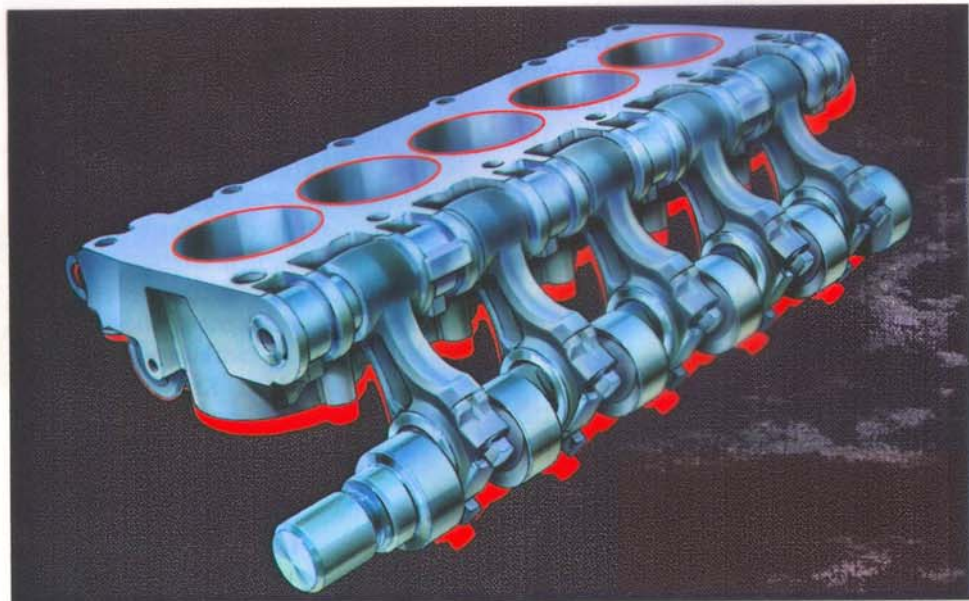
Quelle: Saab

Variable Verdichtung

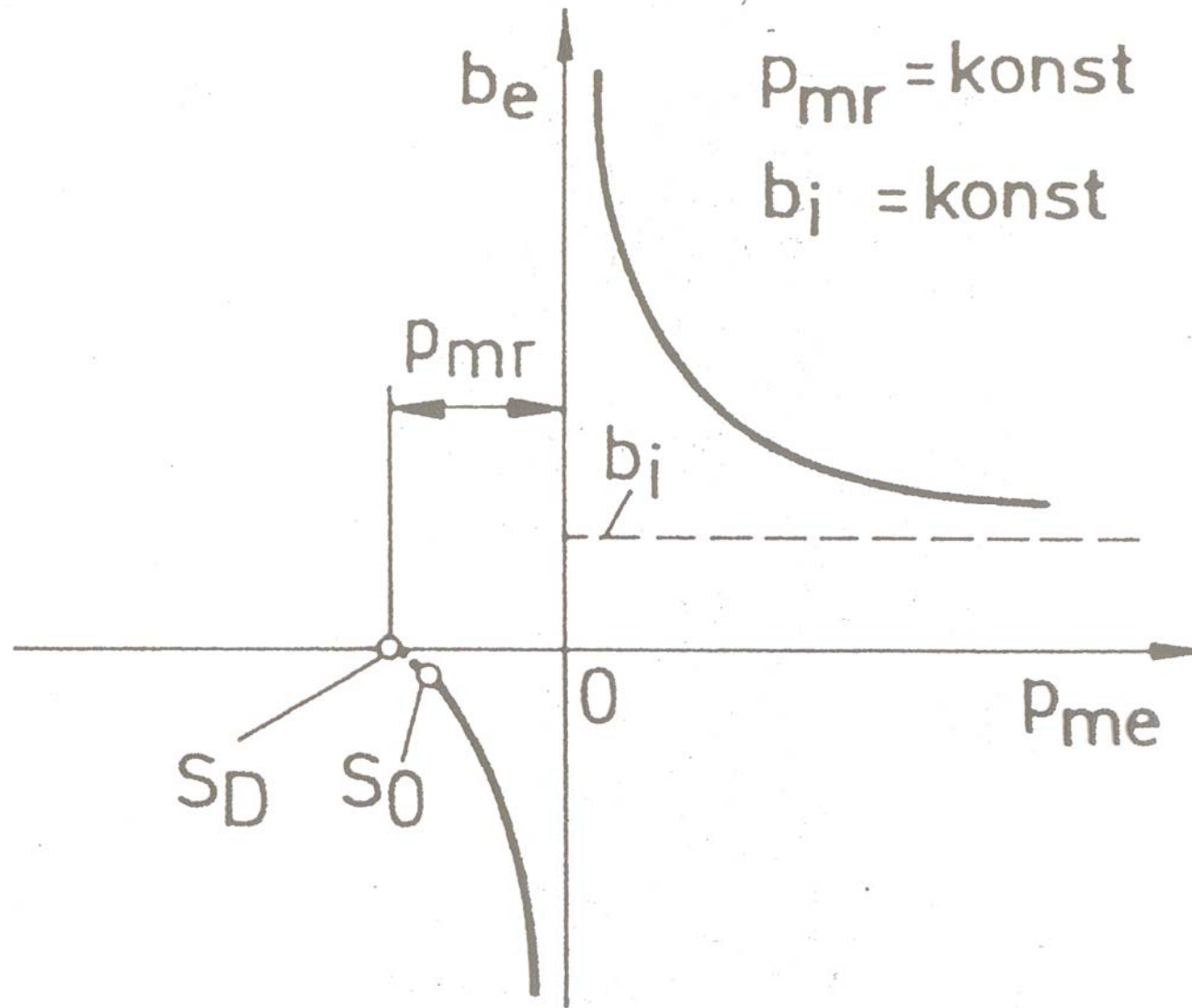
Saab Variable Compression SVC; Monohead und Kurbelgehäuse



Quelle: Saab

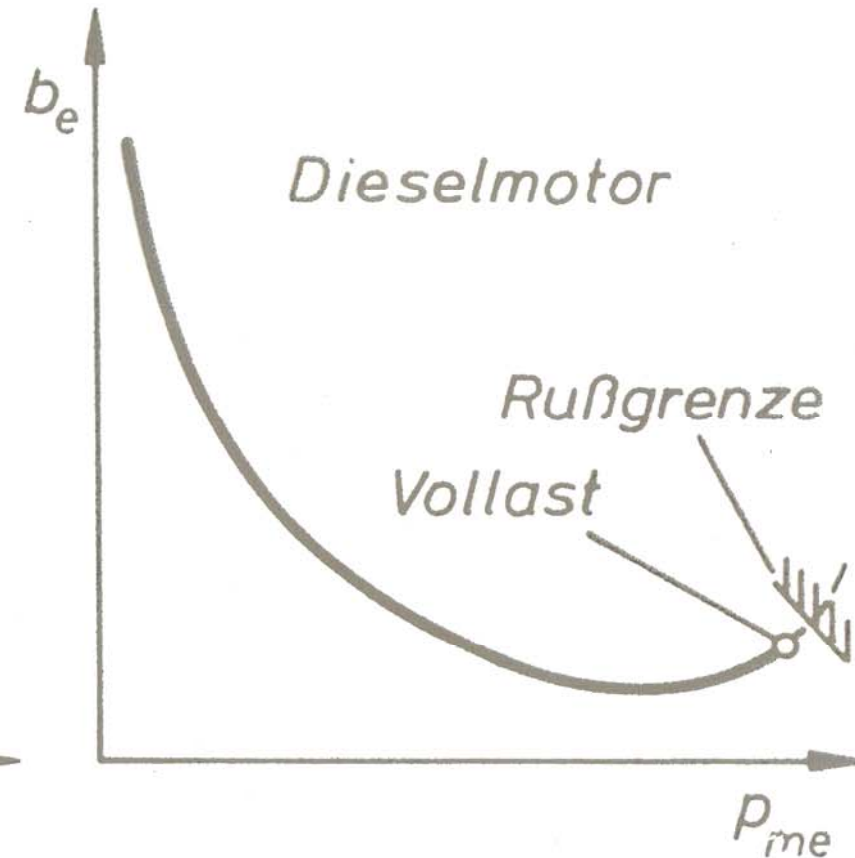
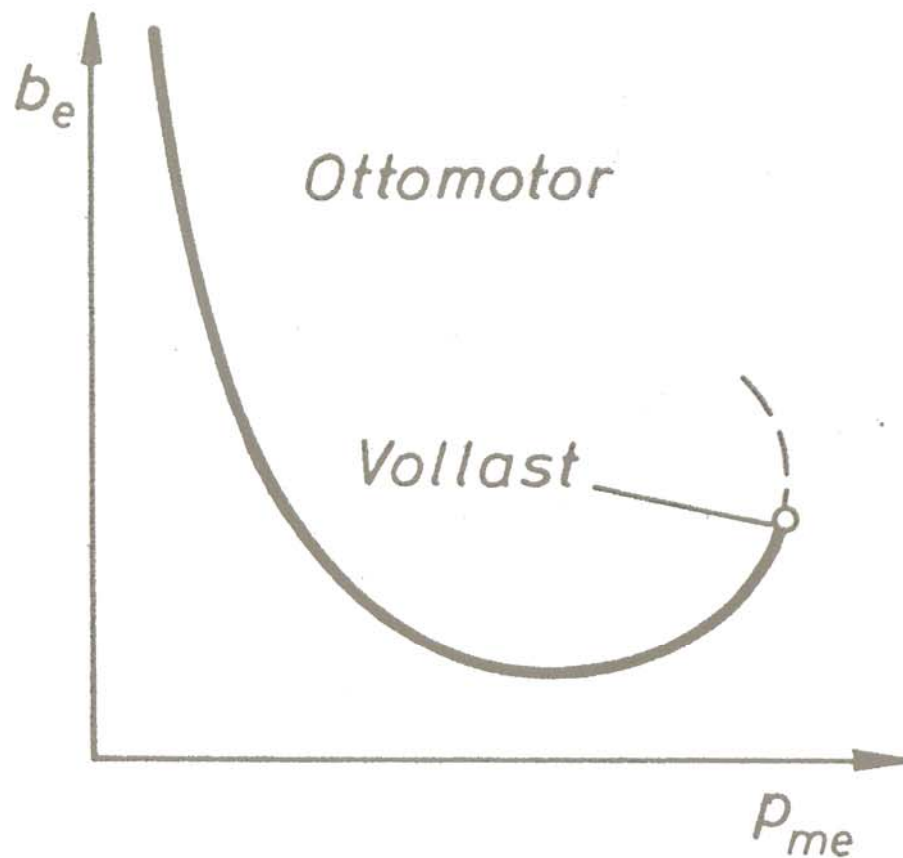


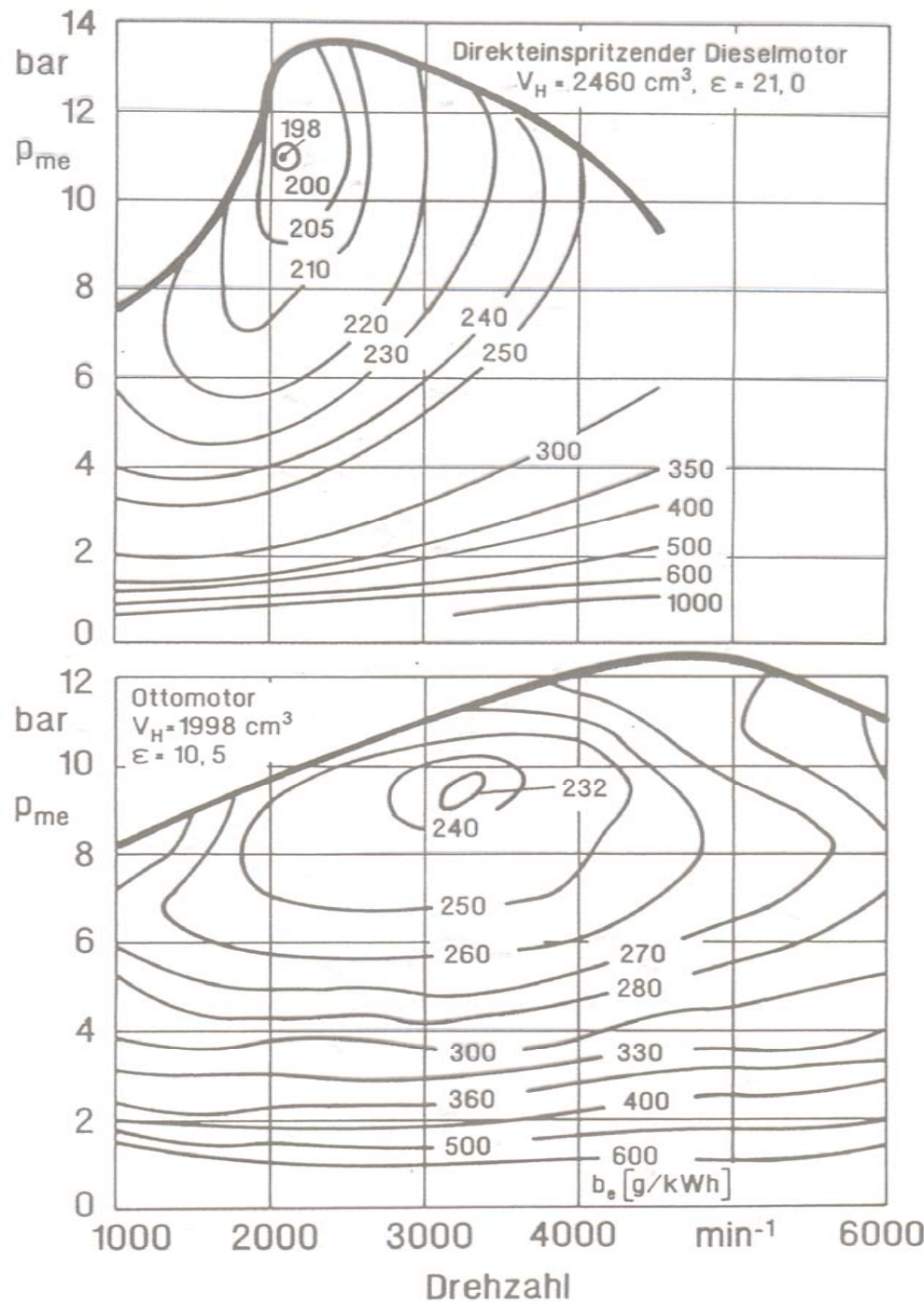
Theoretische spezifische Verbräuche



Quelle: Pischinger

Teillastverbrauchs-kurve für Otto- und Dieselmotor ($n = \text{konst.}$)





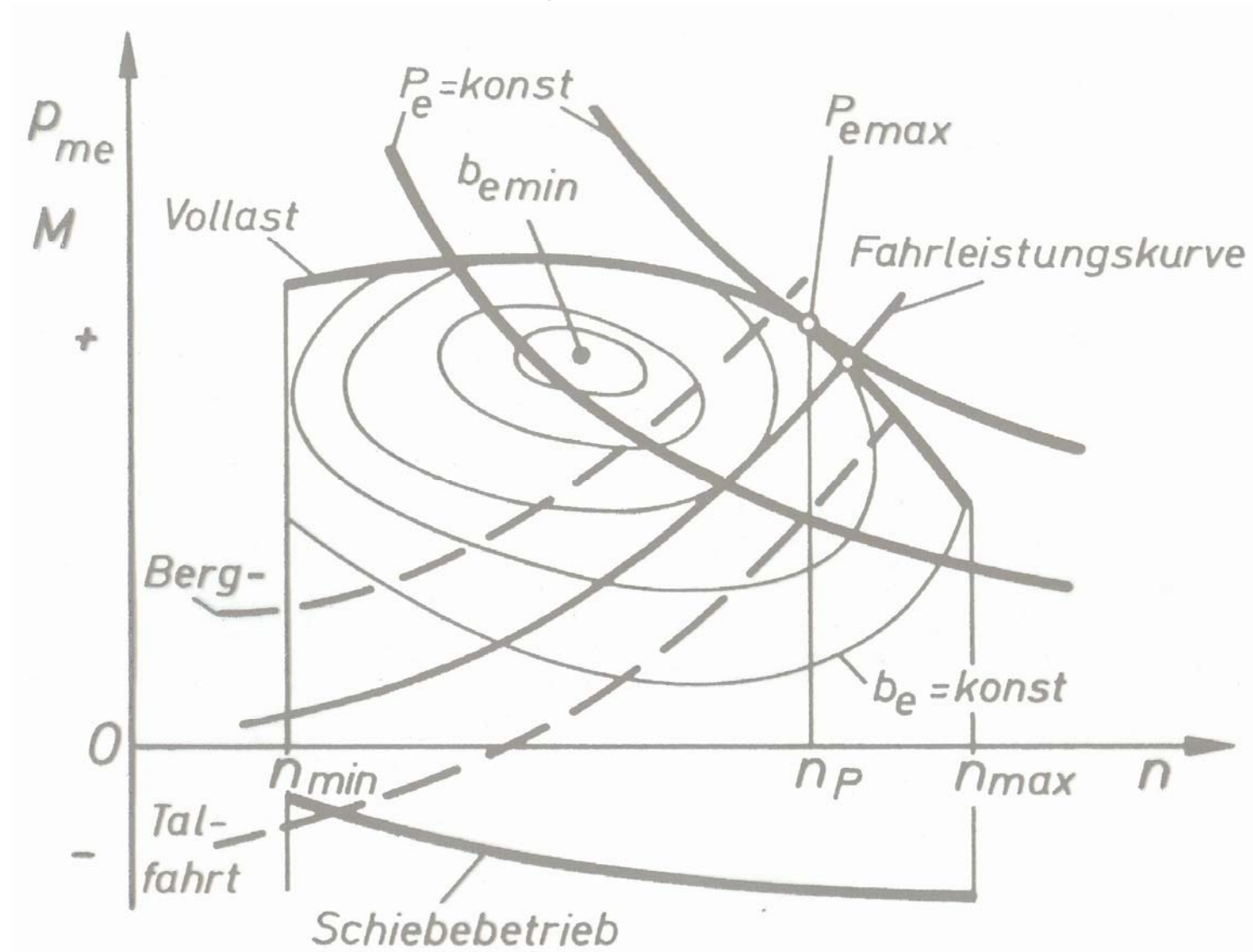
Quelle: Pischinger



Verbrauchskennfeld Otto-, Dieselmotor

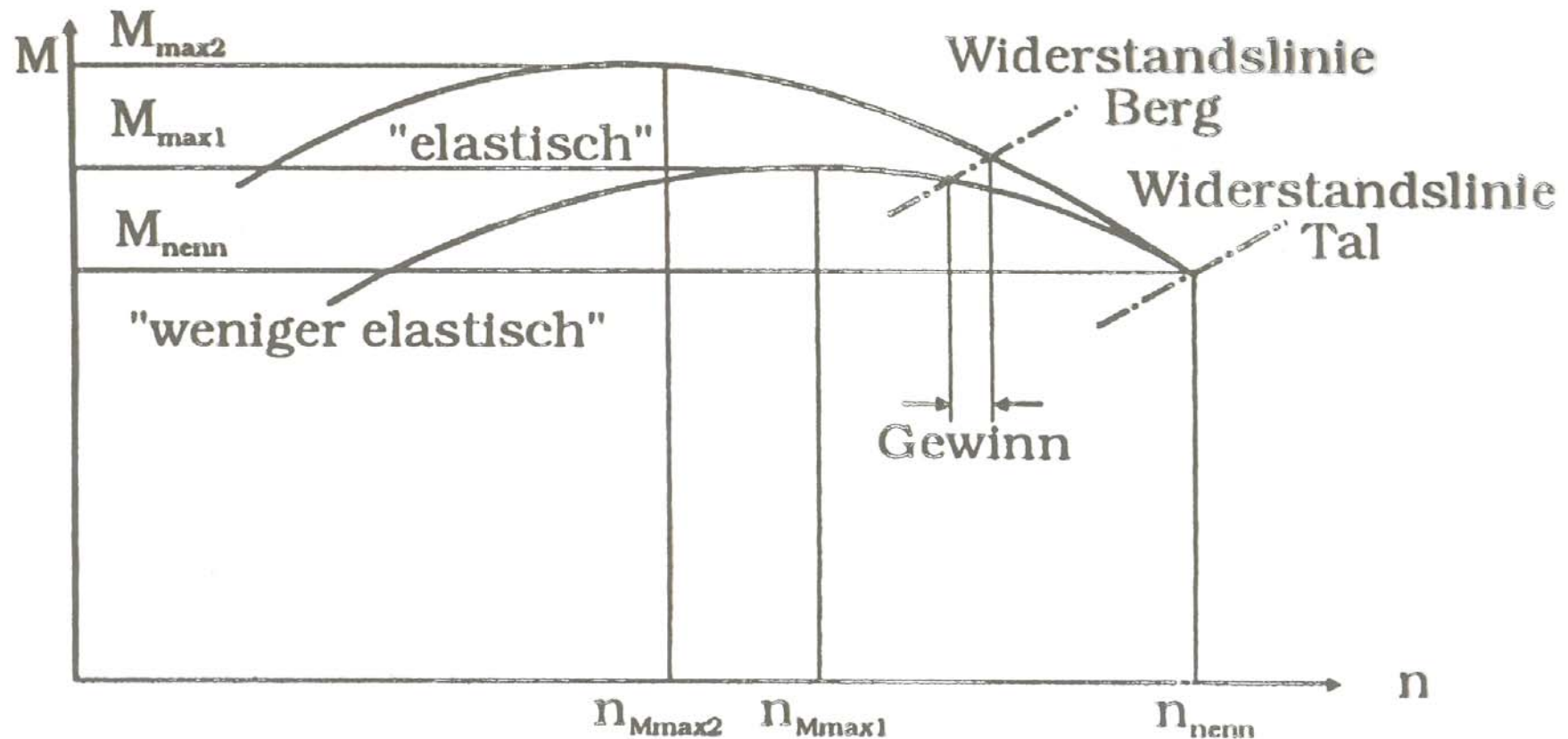
Motorkennfeld für Fahrzeugbetrieb

festе Gangstufe



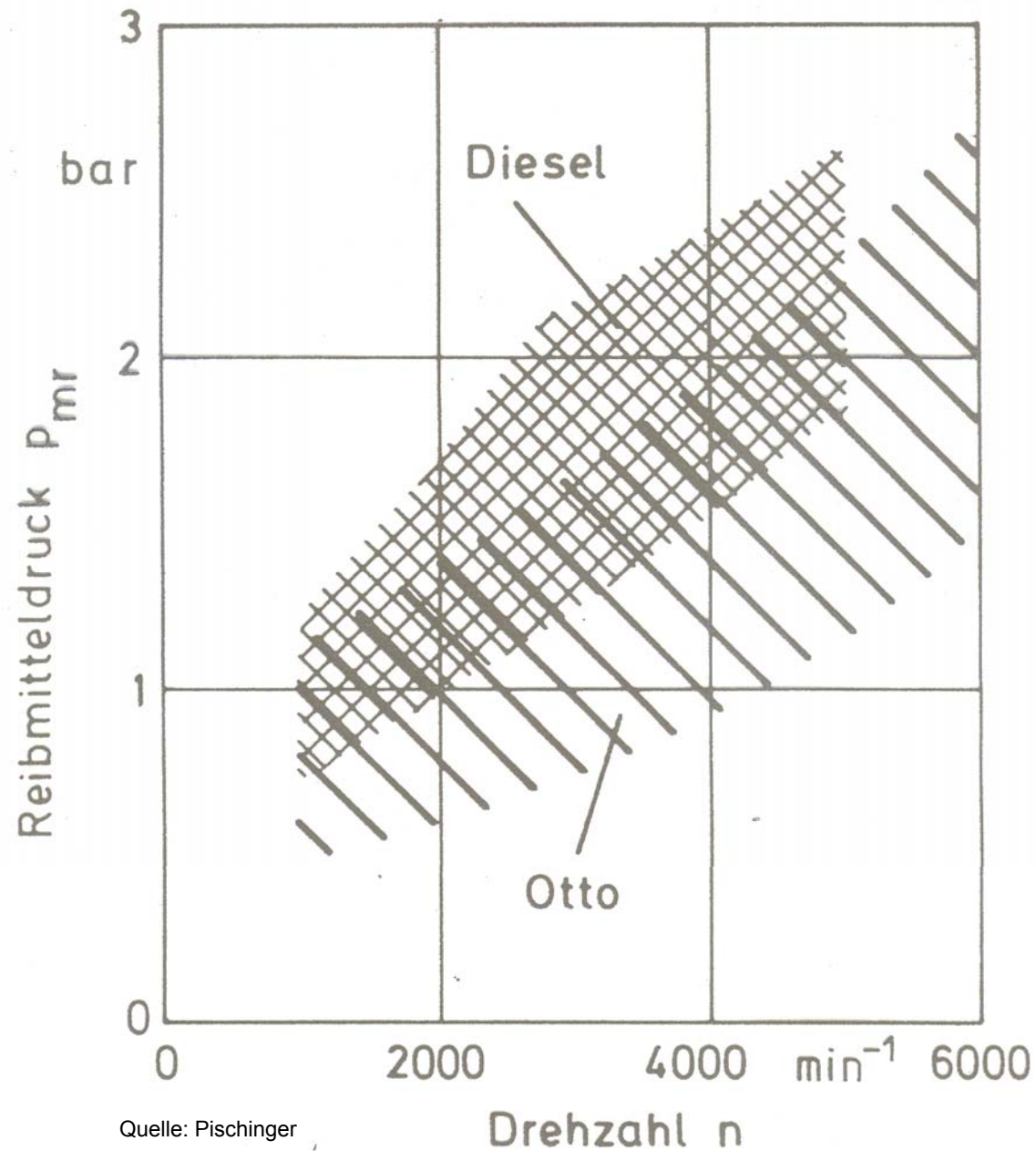
Quelle: Pischinger

Momentenkennlinie

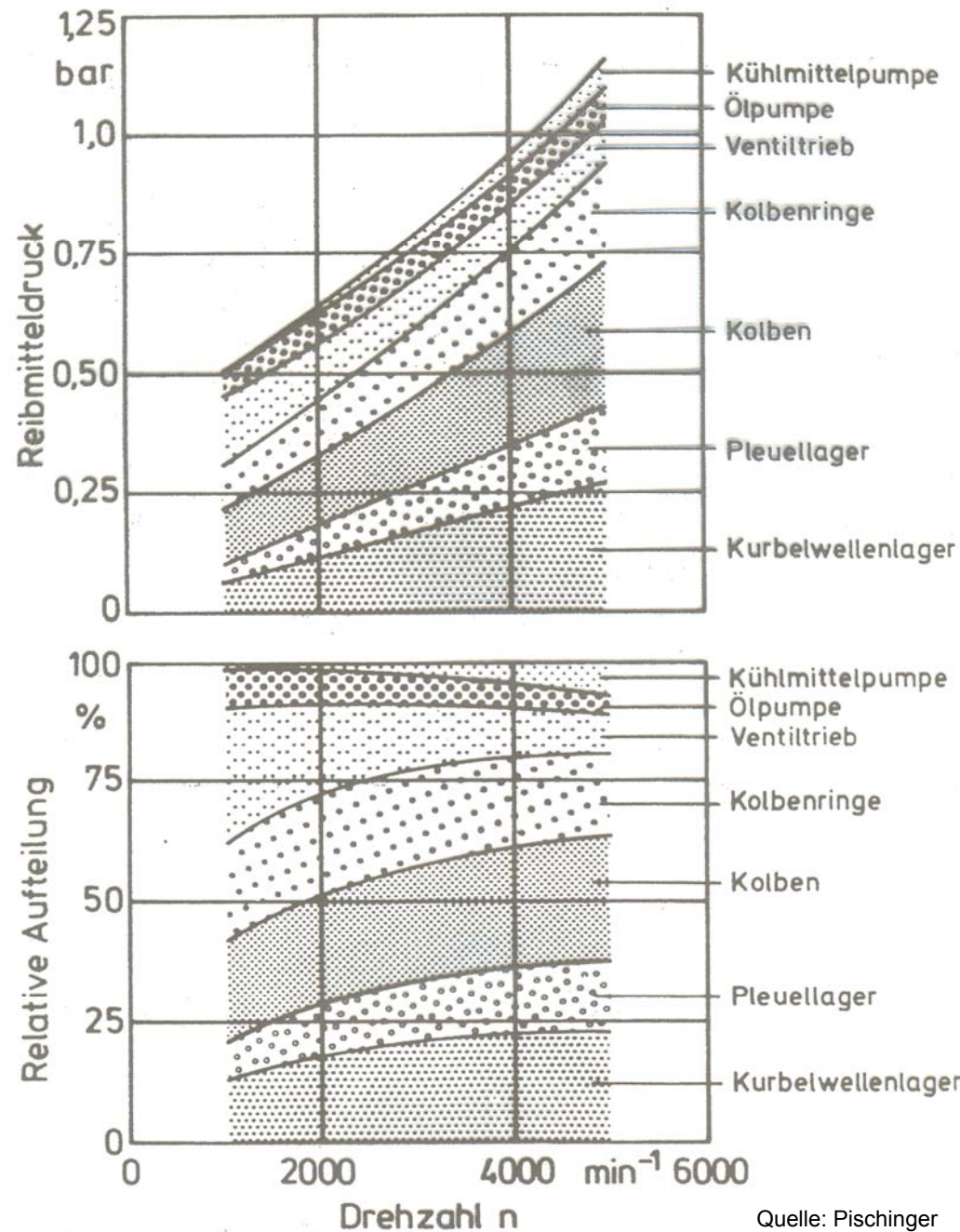


Momentenverlauf bei verschieden „elastischen“ Motoren

Quelle: Groth



Reibmitteldrücke
ausgeführter
PKW - Motoren

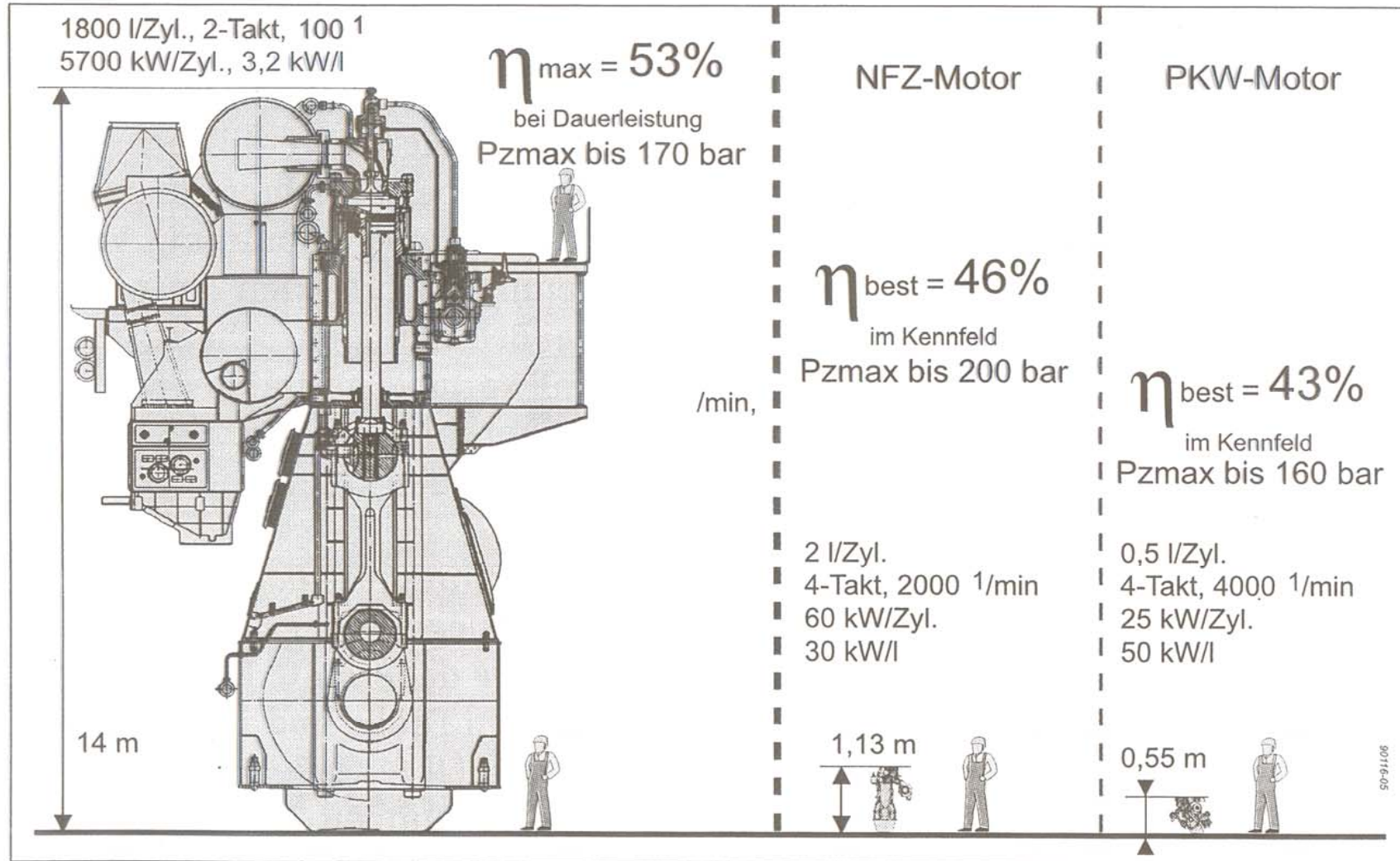


Aufteilung der mechanischen Verluste für einen PKW-Ottomotor

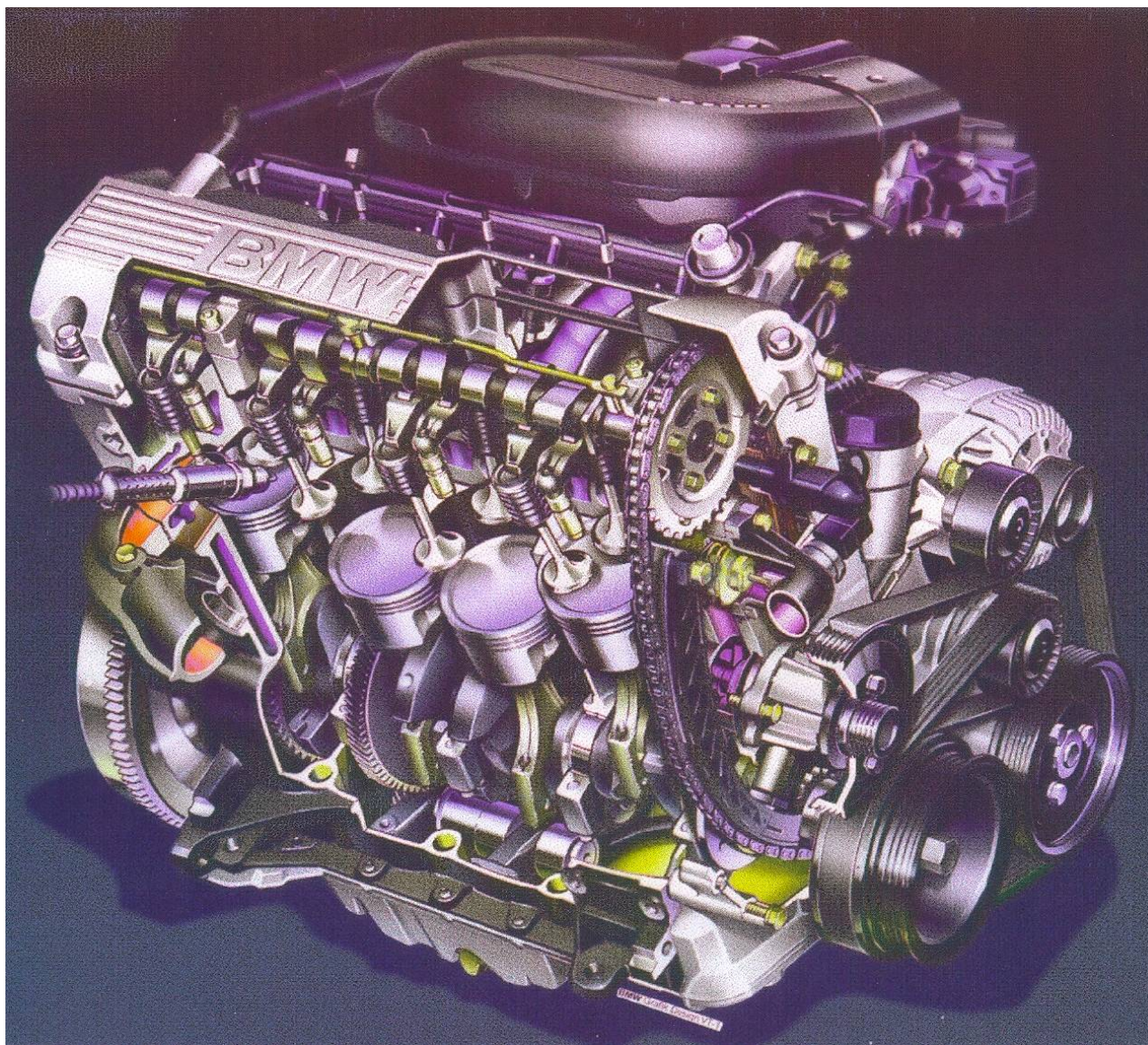
Gegenüberstellung Dieselmotoren

Schiffsmotoren

Fahrzeugmotoren



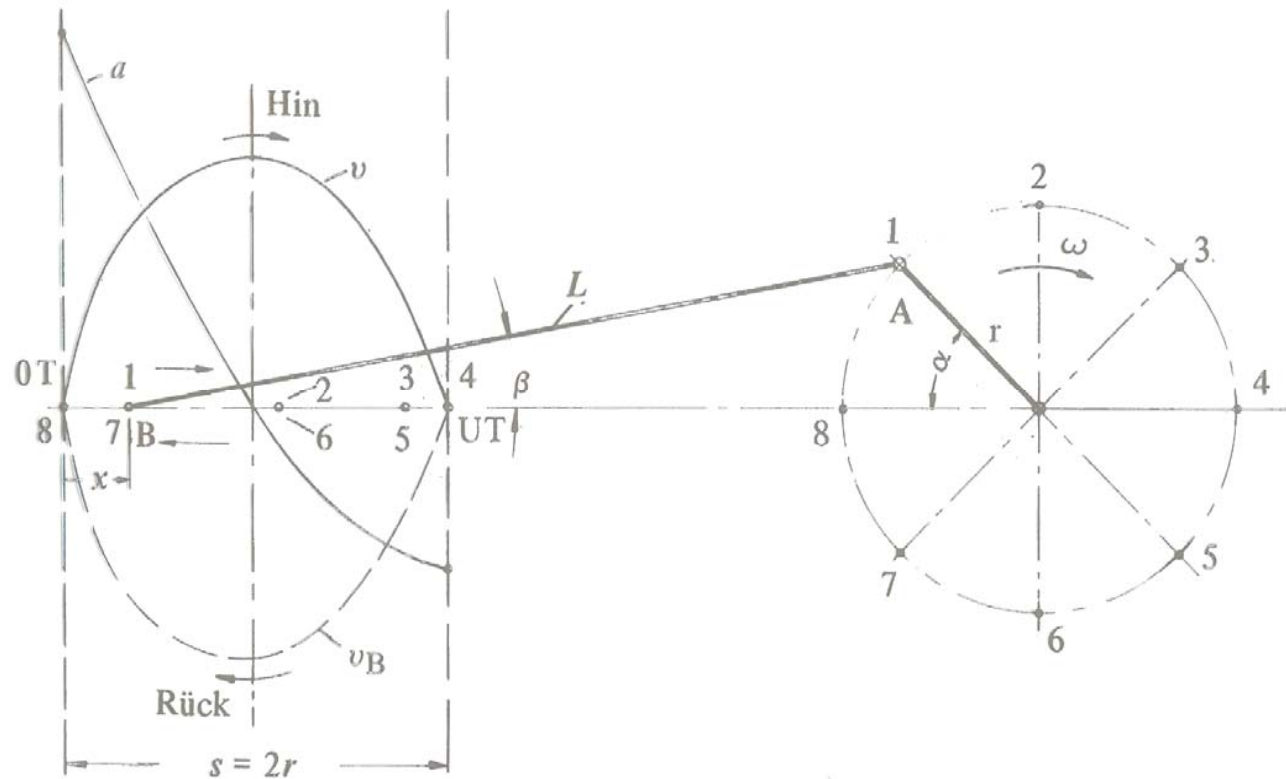
Massenkräfte im Triebwerk

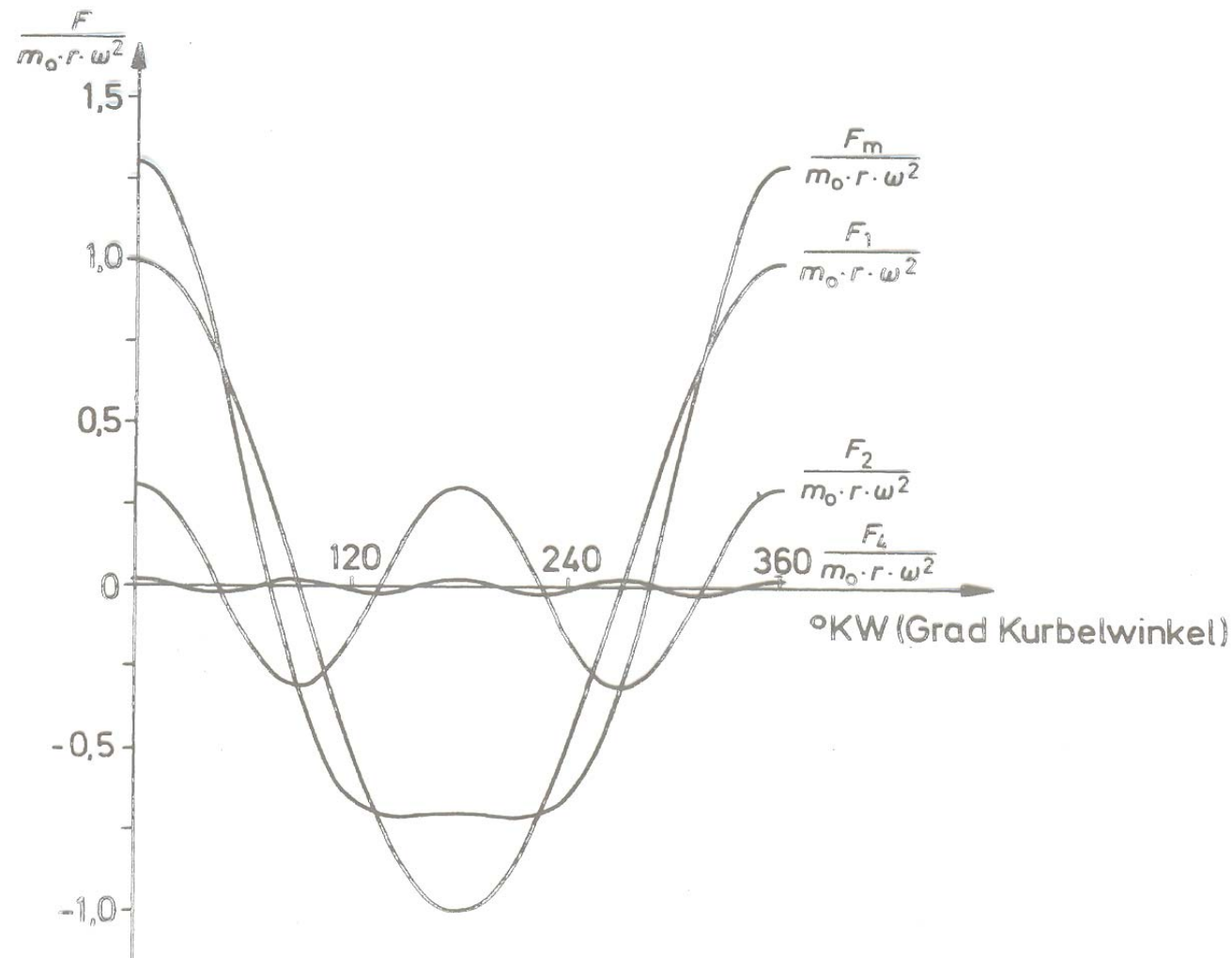


4-Zyl.
Ottomotor
M43B19

Geschwindigkeiten und Beschleunigungen des Kolbens

in Abhängigkeit vom Weg

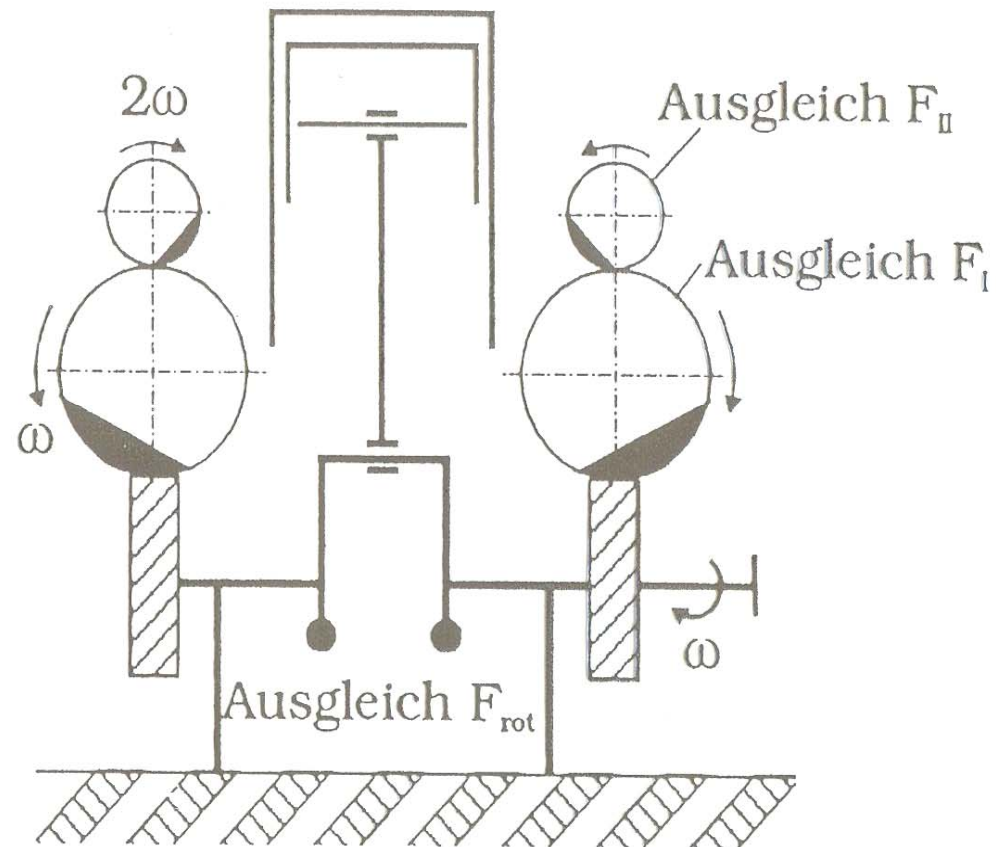
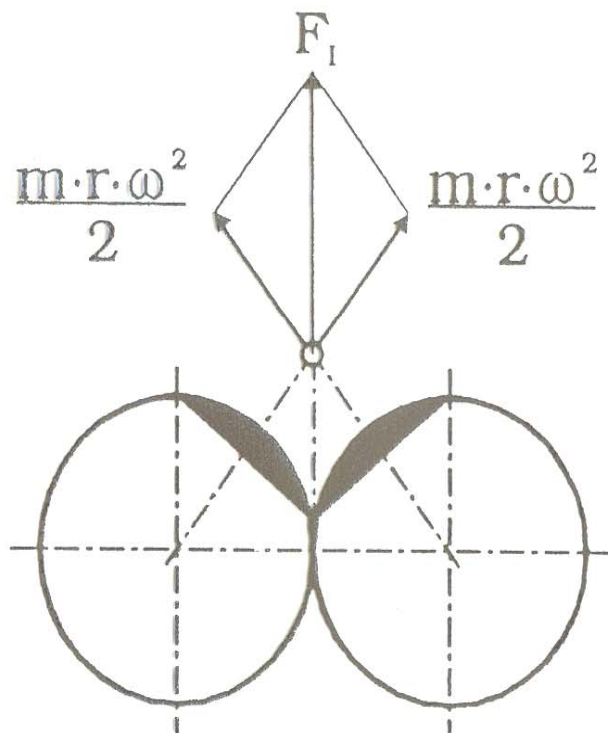


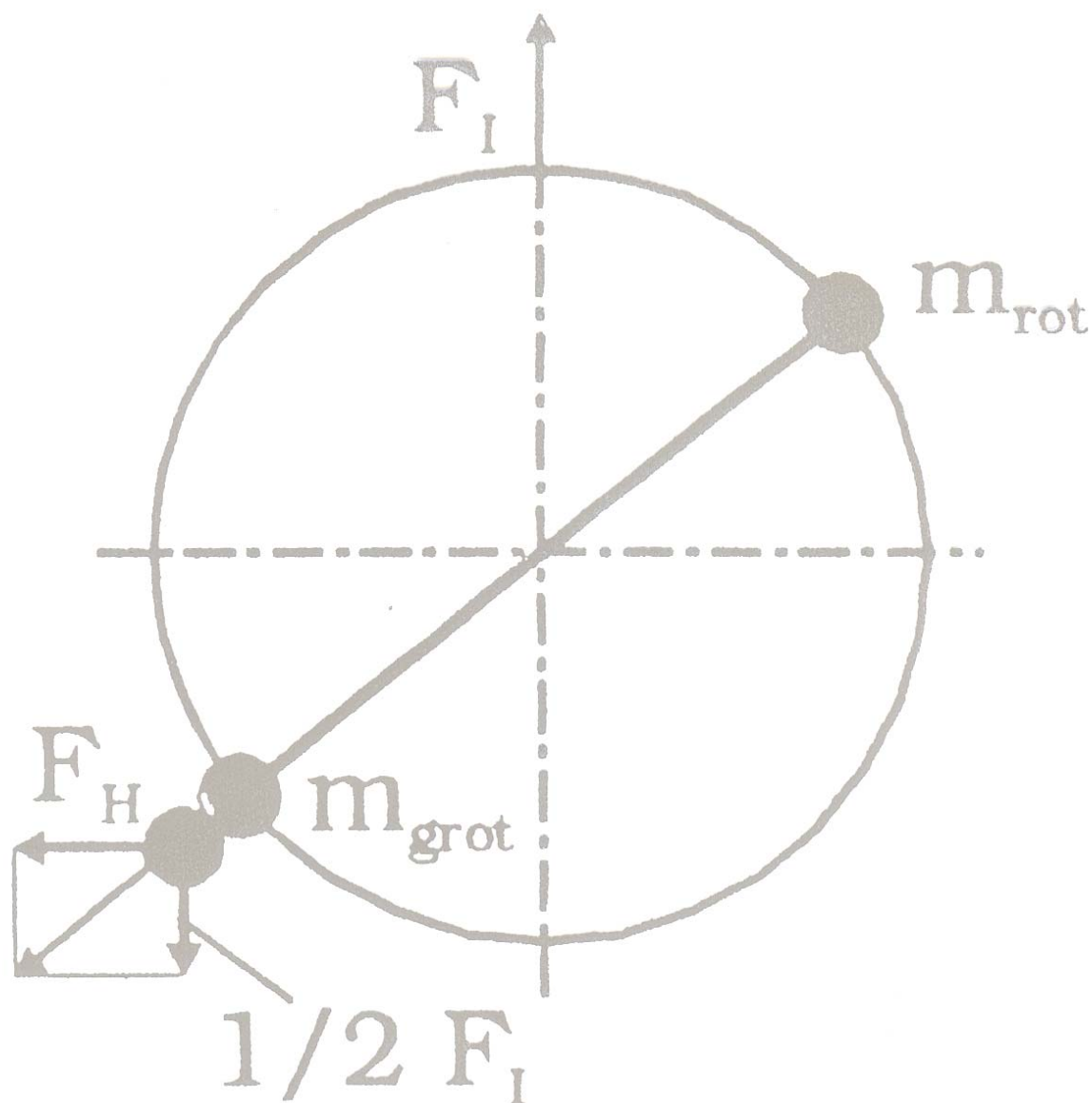


Verlauf der Massenkraft und ihre Einzelanteile 1., 2. und 4. Ordnung

über eine Umdrehung
für $\lambda = 0,25$

Vollständiger Ausgleich der Massenkräfte F_I und F_{II}





Teilausgleich der Massenkraft I.Ordnung

Verbleibende Massenkräfte 1. Ordnung bei unterschiedlicher Gegengewichtsgröße (Ausgleichsgrad)

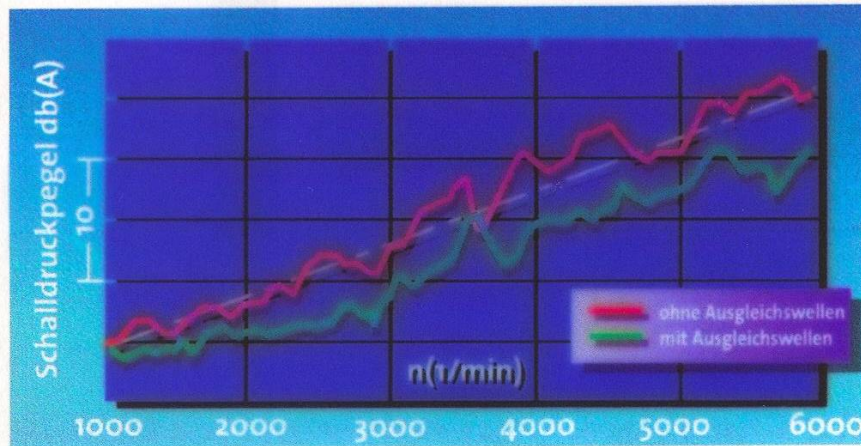
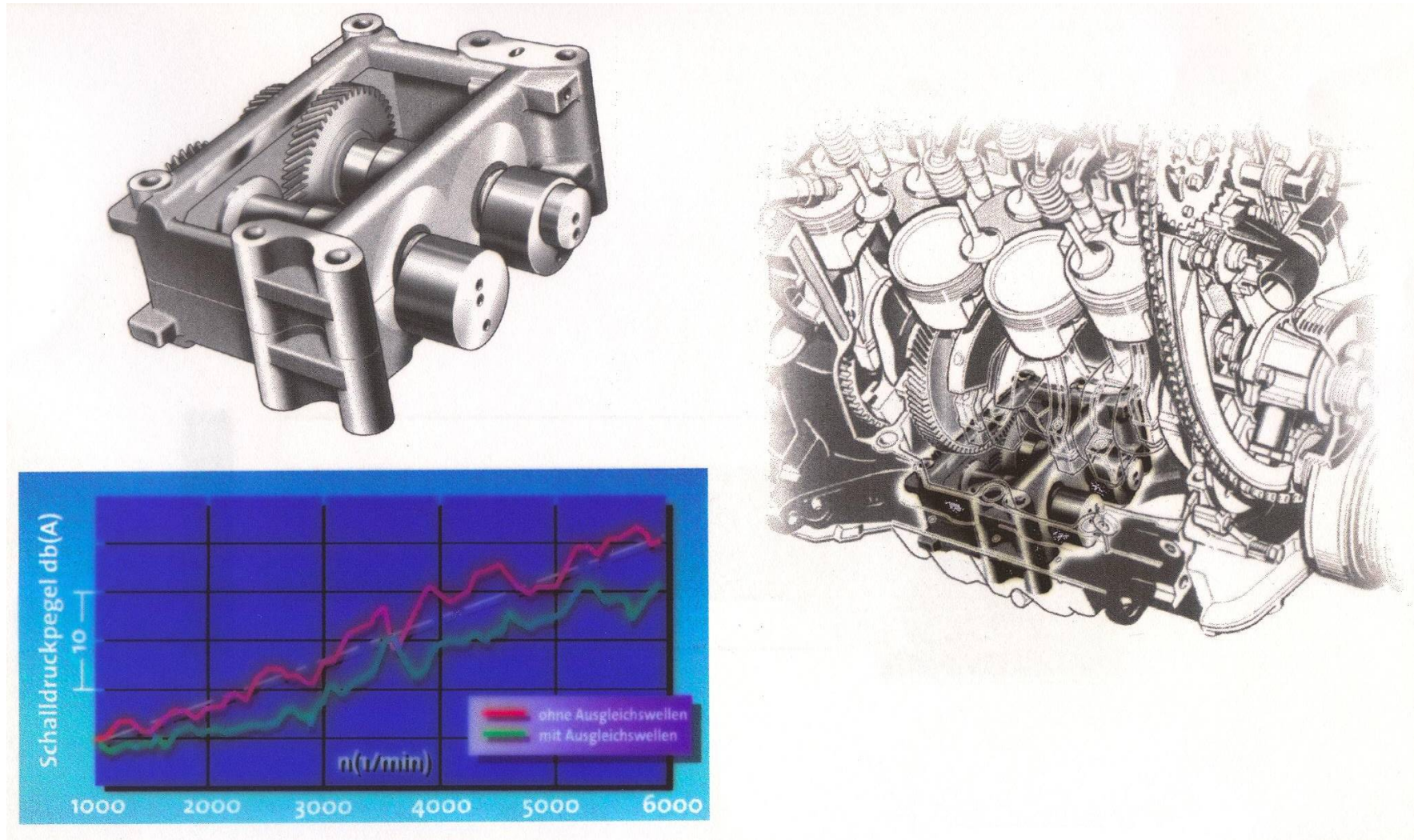
| | | | | |
|---|---------------|------------------------------|--|------------------------------|
| | | | | |
| | | | | |
| Ausgleichsgrad | | 0 % | 50 % | 100 % |
| Gegengewichts- größe | $m_G \hat{=}$ | m_r | $m_r + 0,5 m_0$ | $m_r + m_0$ |
| verbleibende Mas- senkraft (z) 1. Ordnung | $F_{1z} =$ | $m_0 \cdot r \cdot \omega^2$ | $0,5 \cdot m_0 \cdot r \cdot \omega^2$ | 0 |
| verbleibende Mas- senkraft (y) 1. Ordnung | $F_{1y} =$ | 0 | $0,5 \cdot m_0 \cdot r \cdot \omega^2$ | $m_0 \cdot r \cdot \omega^2$ |

Kurbelwelle mit Ausgleichswellengetriebe



Ausgleichswellenmodul

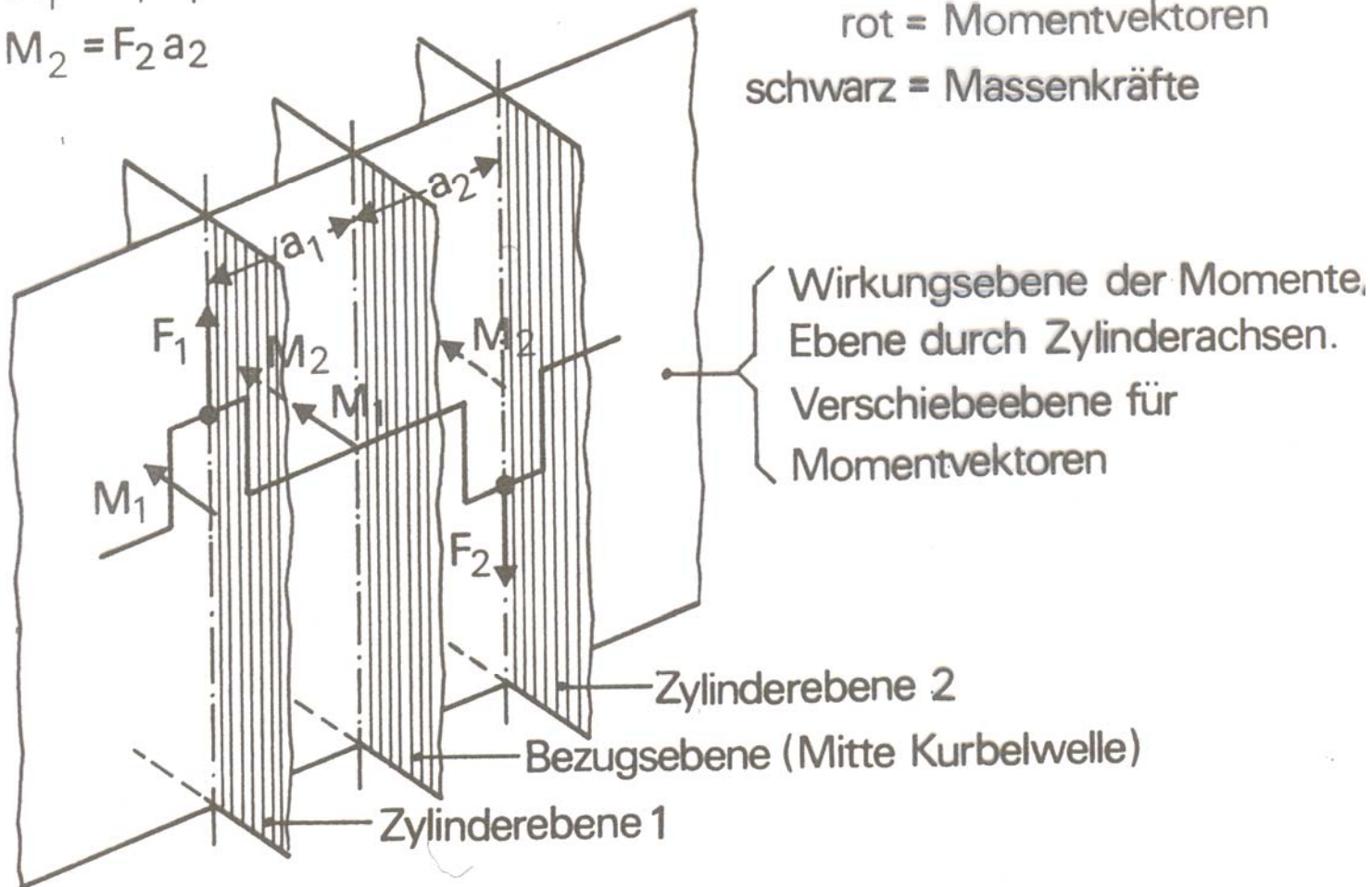
für den Vierzylinder-Ottomotor M43 / E46



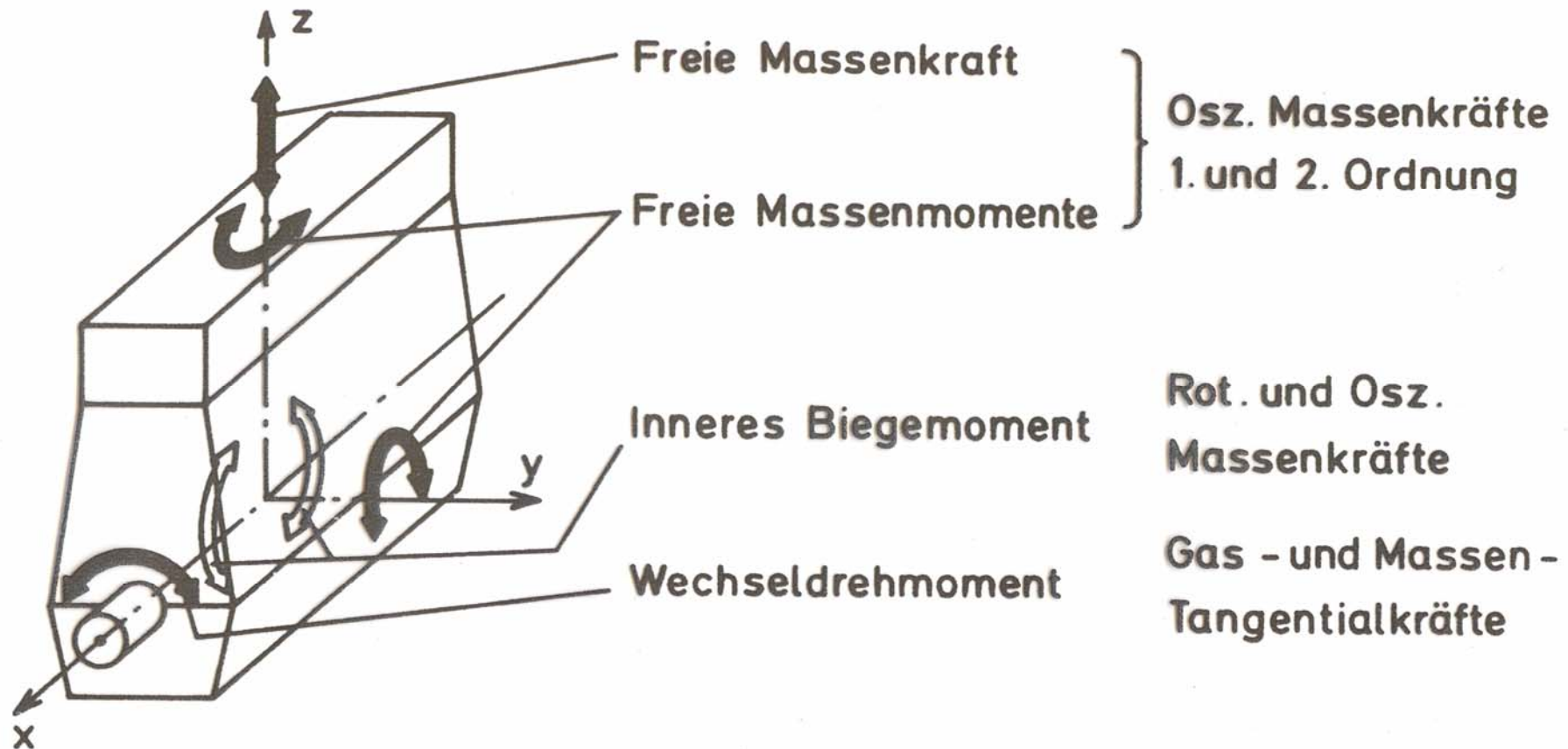
Massenmomente 2-Zylindermotor

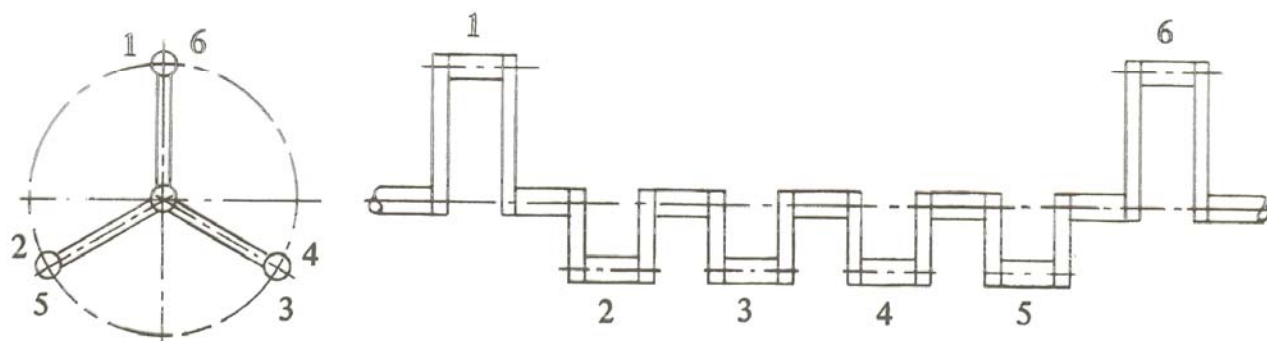
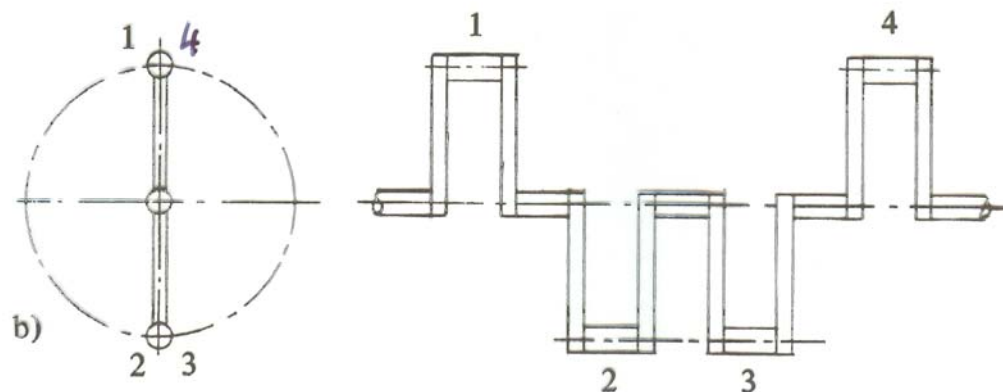
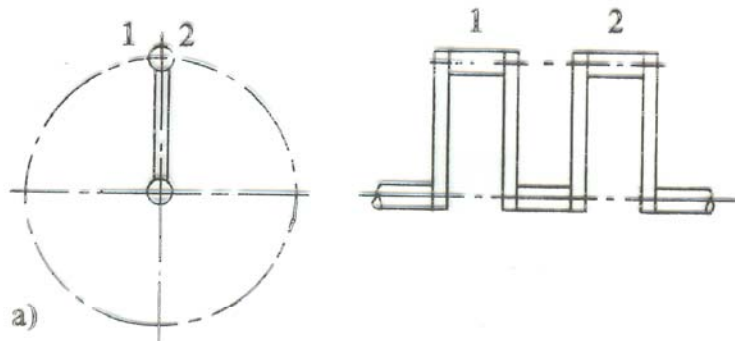
$$M_1 = F_1 a_1$$

$$M_2 = F_2 a_2$$



Kräfte und Momente am Mehrzylindermotor





Kurbelanordnung Viertaktmotoren

gerade Zylinderzahl

a) Zweizylinder





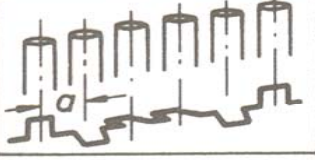

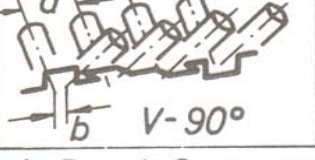
b) Vierzylinder

c) Sechszylinder

Quelle: Wagner / Fischer / Fromman

Verbrennungskraftmaschinen

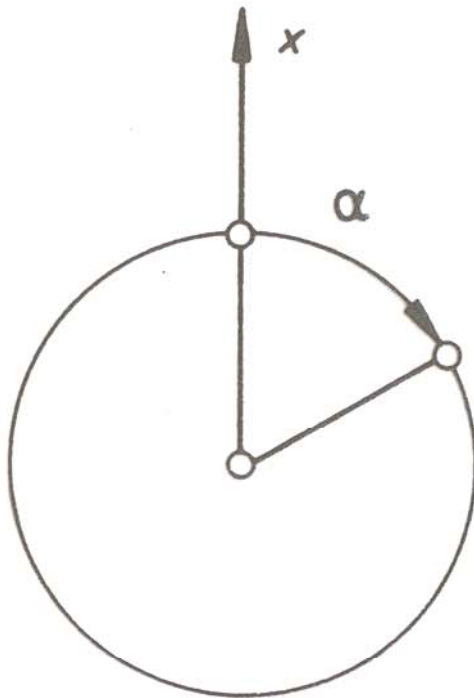
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers

| Anordnung | Freie Kräfte | | Freie Momente | |
|---|--------------|------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| | 1.Ordnung | 2.Ordnung | 1.Ordnung | 2.Ordnung |
|  | F_{01} | F_{02} | | |
|  | | $2 \cdot F_{02}$ | $F_{01} \cdot a$ | |
|  | | | $\sqrt{3} \cdot F_{01} \cdot a$ | $\sqrt{3} \cdot F_{02} \cdot a$ |
|  | | $4 \cdot F_{02}$ | | |
|  | | | | |
|  | | | | $2 \cdot F_{02} \cdot b$ |
|  | | | $\sqrt{10} \cdot F_{01} \cdot a$ * | |
| * Durch Gegengewichte voll ausgleichbar | | | | |

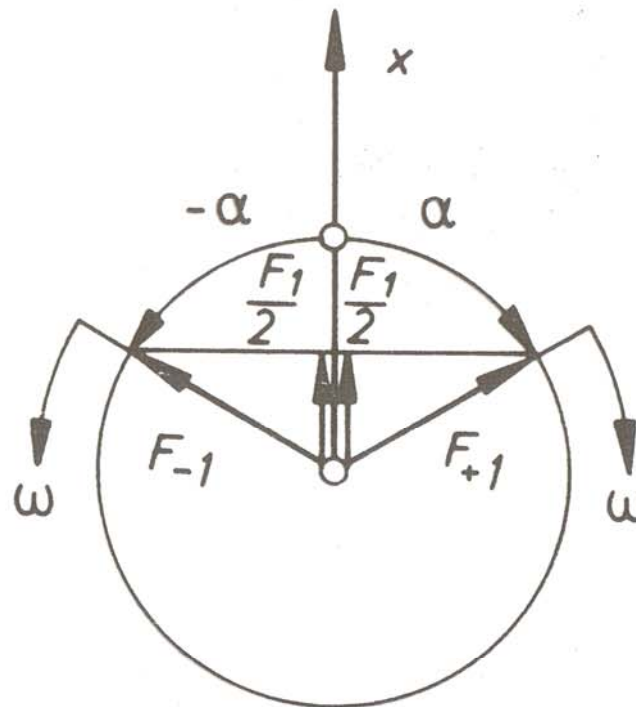
Massenkräfte und Massenmomente

verschiedener Motoren

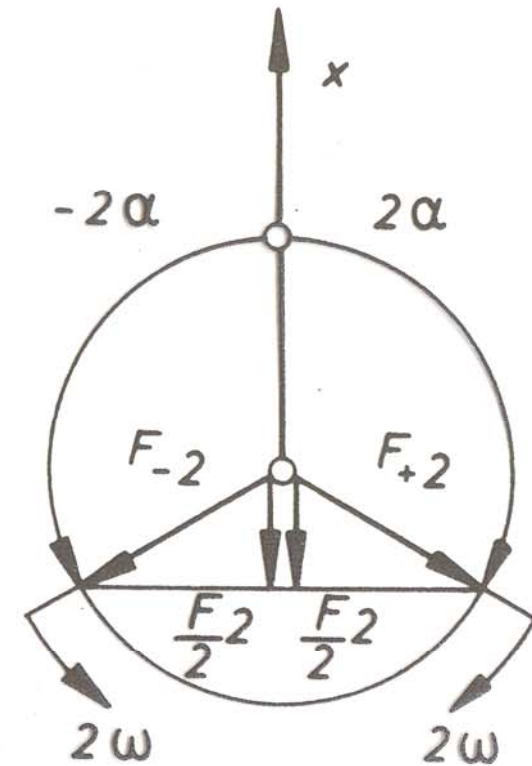
Vektordarstellung für Massenkräfte



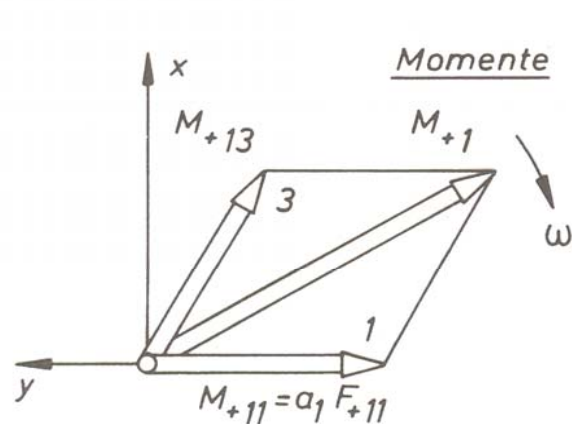
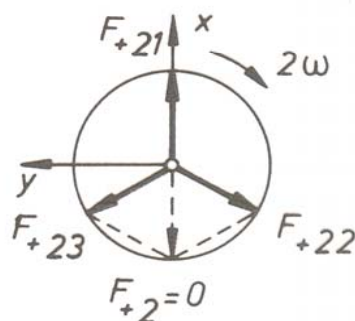
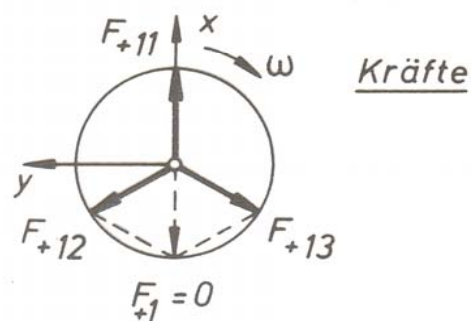
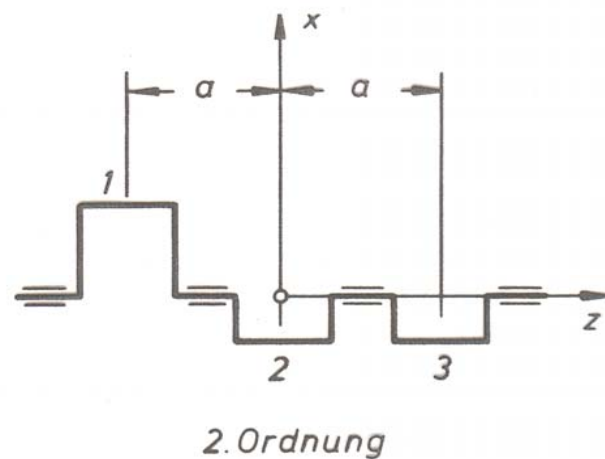
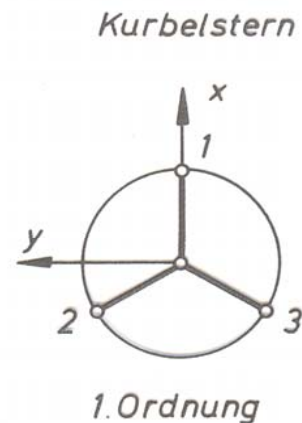
Kurbelstern



1. Ordnung

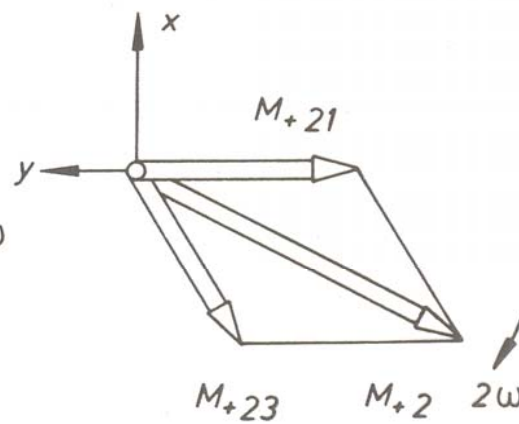


2. Ordnung



$$M_1 = 2M_{+1} = \sqrt{3} \cdot F_{01} \cdot a$$

(hin- und hergehend)

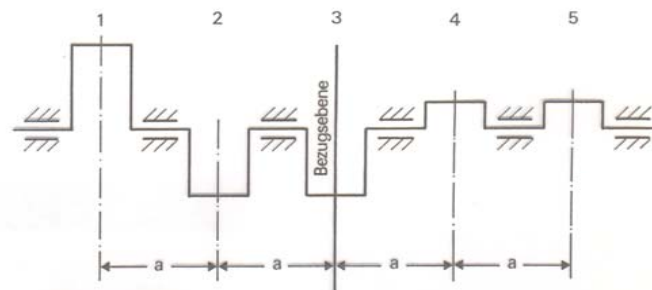
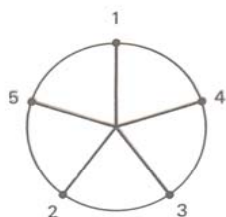


$$M_2 = 2M_{+2} = \sqrt{3} \cdot F_{02} \cdot a$$

(hin- und hergehend)

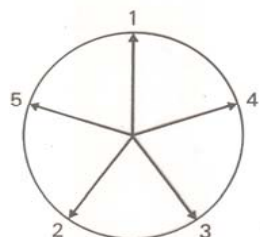
Massenkräfte und Massenmomente

beim 3-Zylinder-Reihenmotor

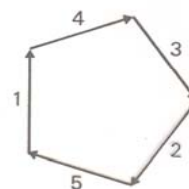


1. Rotierende Massenkräfte

$1 \text{ cm} \hat{=} 10\,000 \text{ N}$



Lageplan

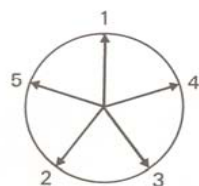


Kräfteplan

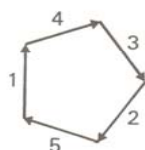
$$F_{rR} = 0$$

2. Massenkräfte 1. Ordnung

$1 \text{ cm} \hat{=} 10\,000 \text{ N}$



Lageplan

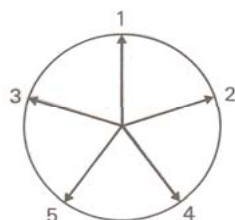


Kräfteplan

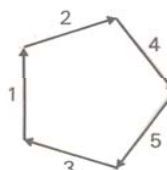
$$F_{I\max R} = 0$$

3. Massenkräfte 2. Ordnung

$1 \text{ cm} \hat{=} 2000 \text{ N}$



Lageplan



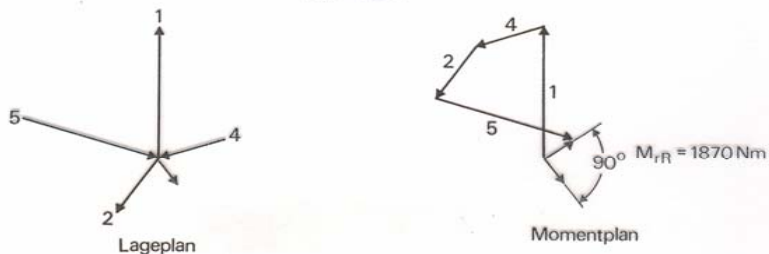
Kräfteplan

$$F_{II\max R} = 0$$

Massenkräfte und Massenmomente 5-Zyl. Motor

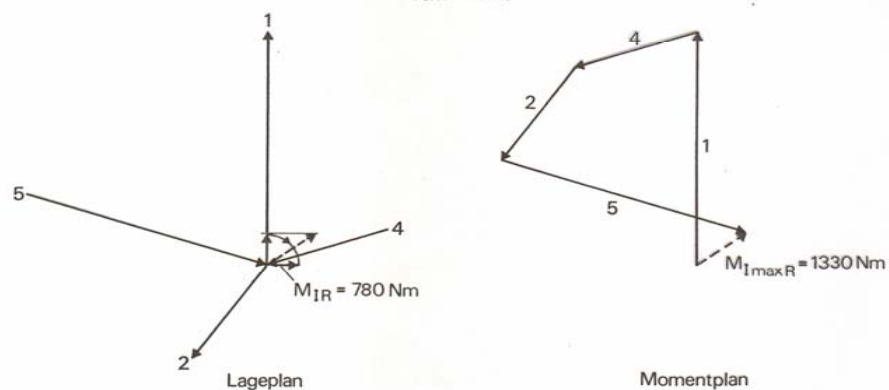
4. Rotierende Massenmomente

1 cm $\hat{=}$ 5000 Nm



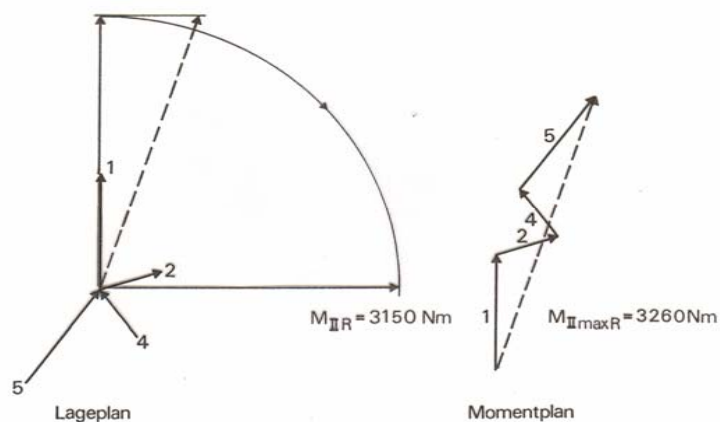
5. Massenmomente 1. Ordnung

1 cm $\hat{=}$ 2000 Nm

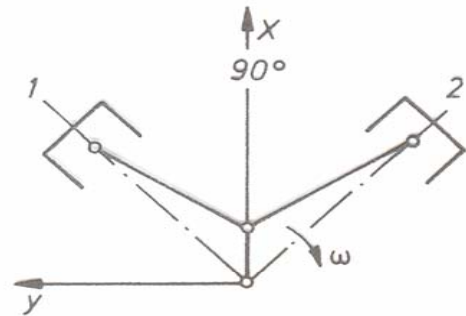


6. Massenmomente 2. Ordnung

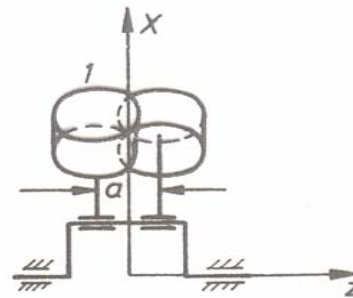
1 cm $\hat{=}$ 1000 Nm



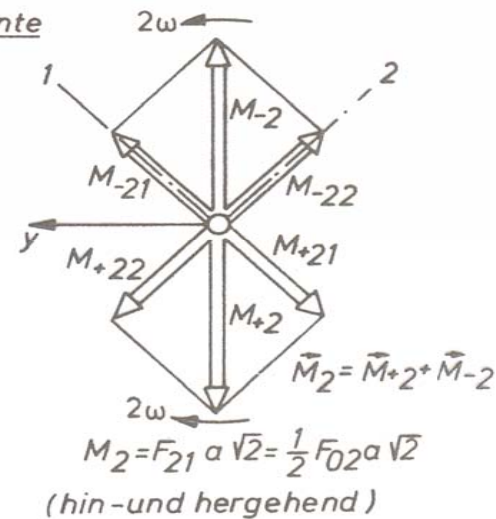
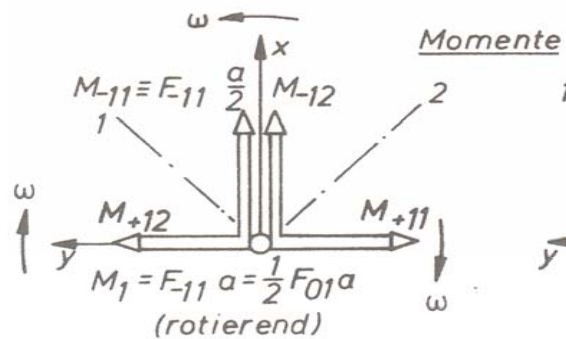
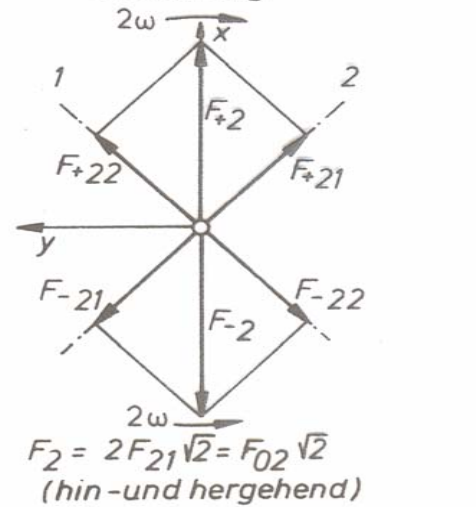
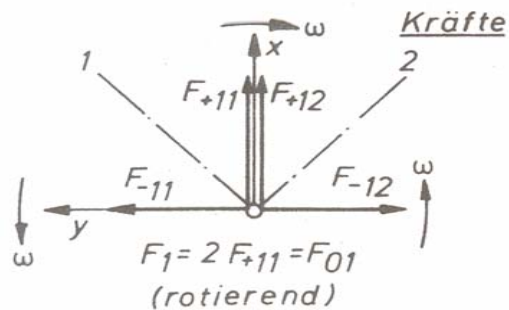
Massenmomente 5-Zyl. Motor



1. Ordnung



2. Ordnung

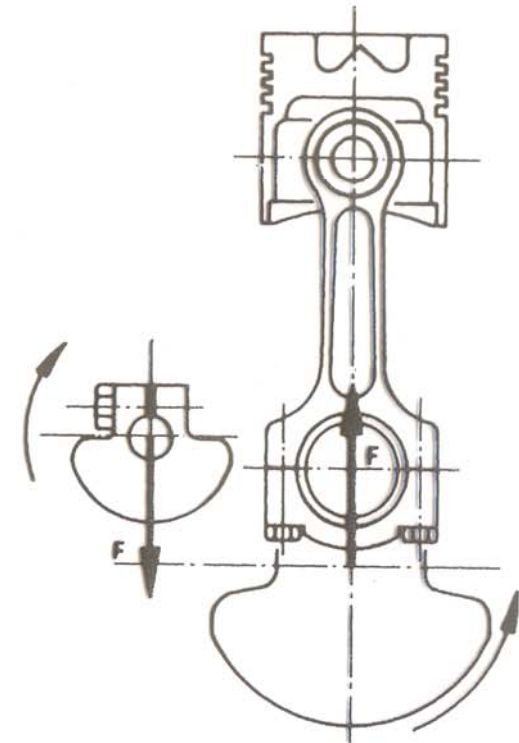
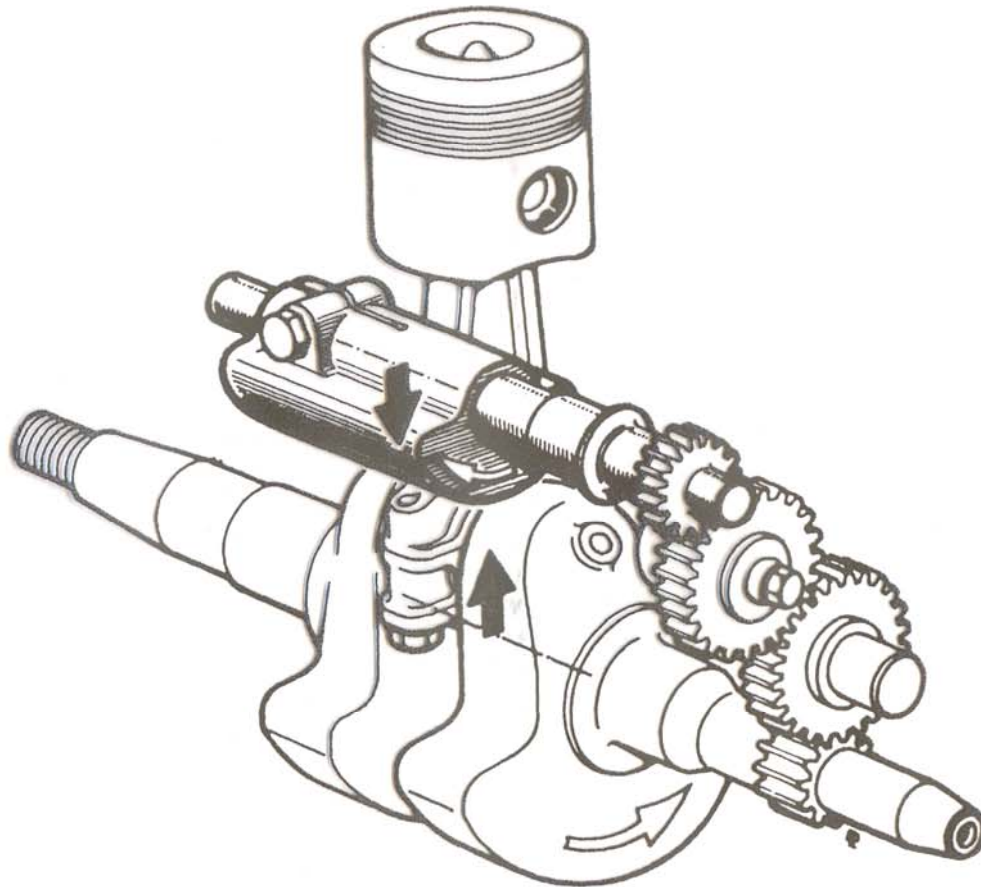


Massenkräfte und Massenmomente

beim 2-Zyl. 90°-V-Motor

Teilweiser Massenausgleich 1. Ordnung

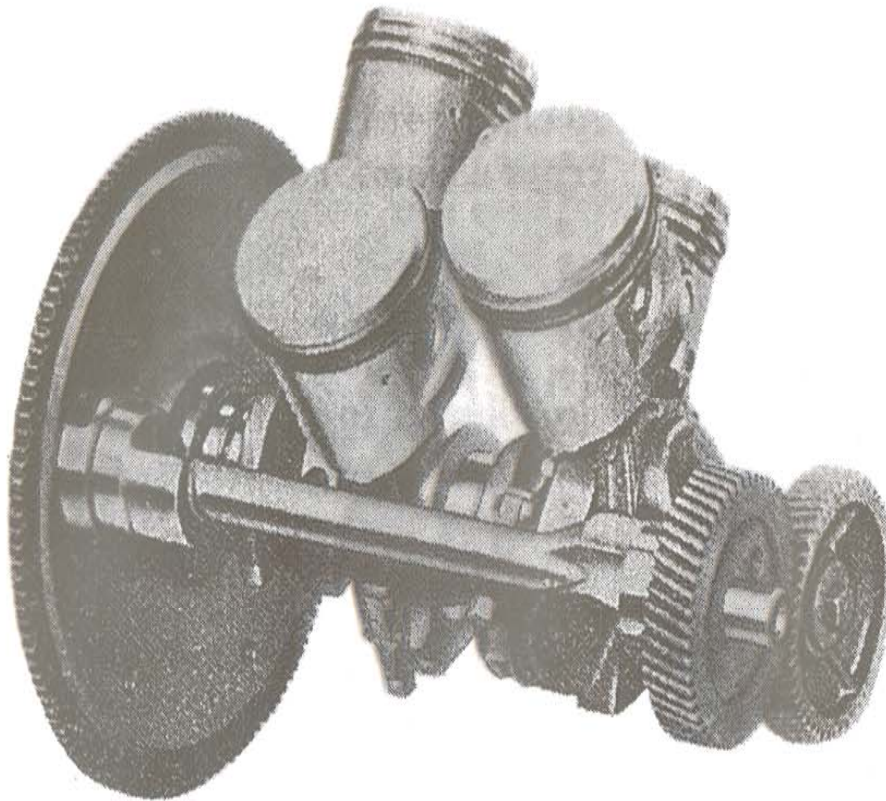
durch seitliche Ausgleichswelle



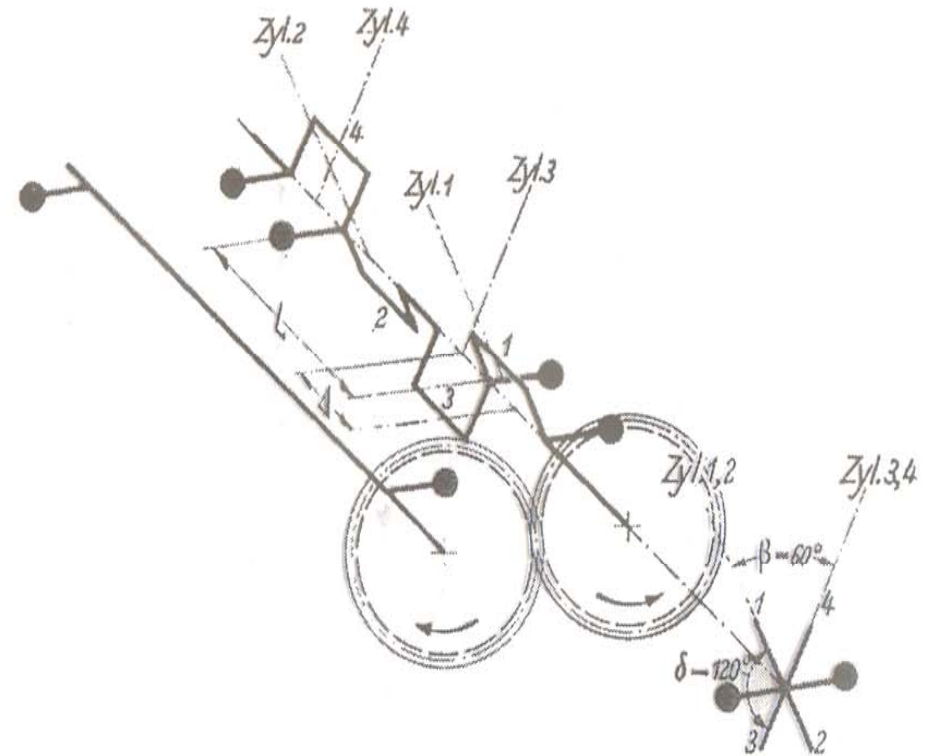
Quelle: Maass

Massenmomentenausgleich am 4-Zyl.-V-60°Motor

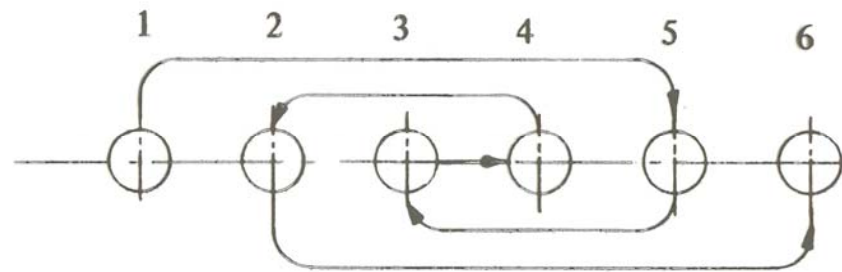
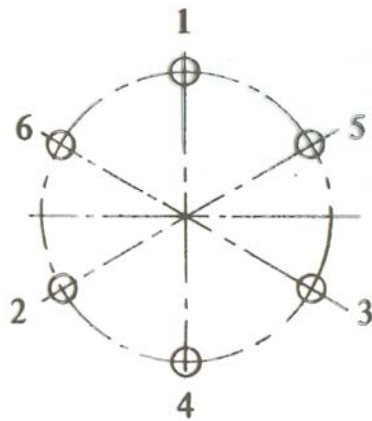
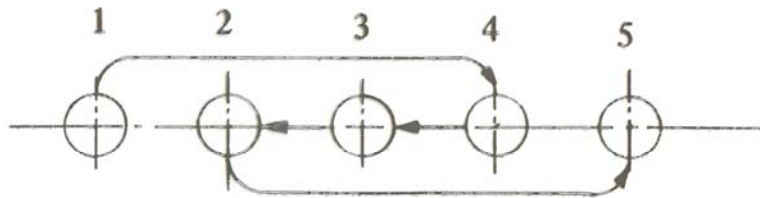
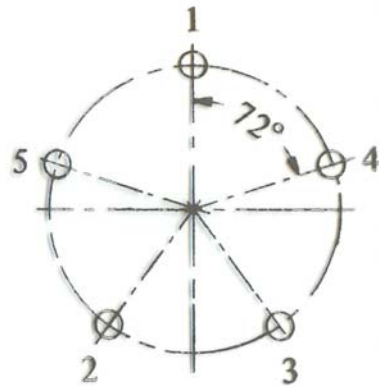
Gegenläufige Ausgleichswelle 1. Ordnung (Ford)

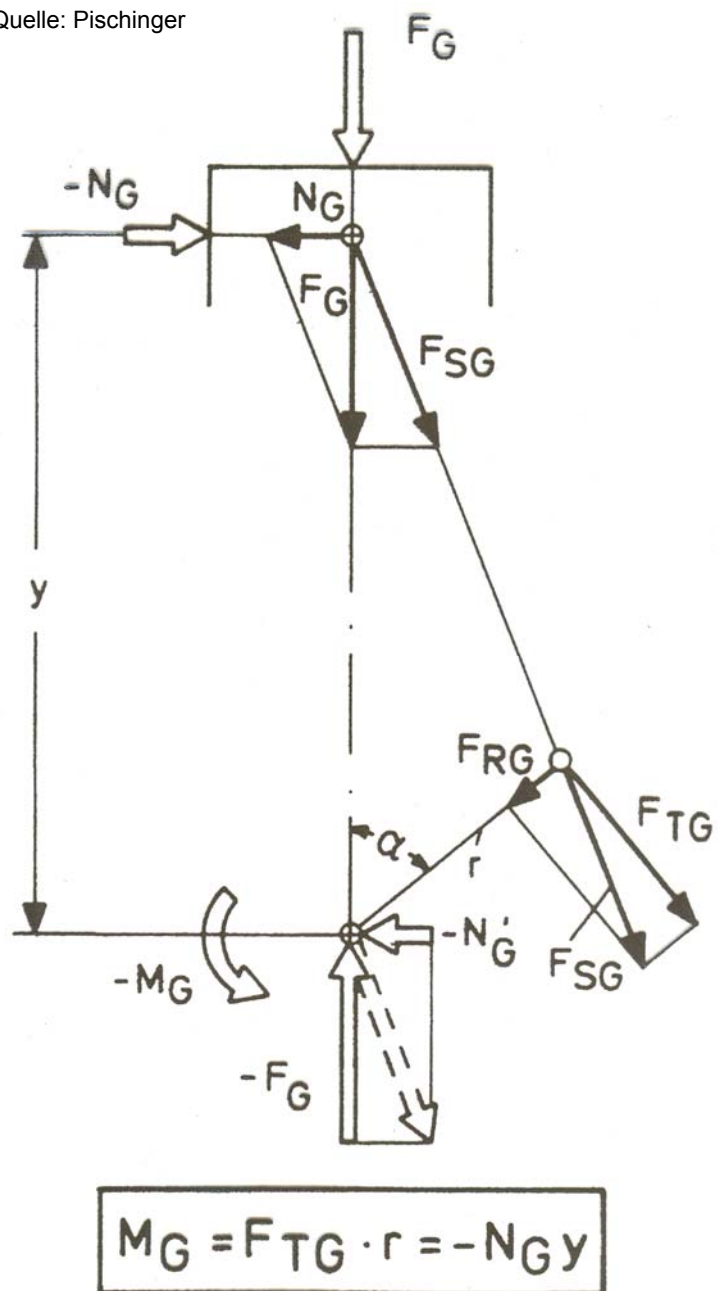


Quelle: Maass



Kurbelanordnung für bestmöglichen Momentenausgleich Fünfzylindermotor bzw. Zweitakt-Sechszylindermotor

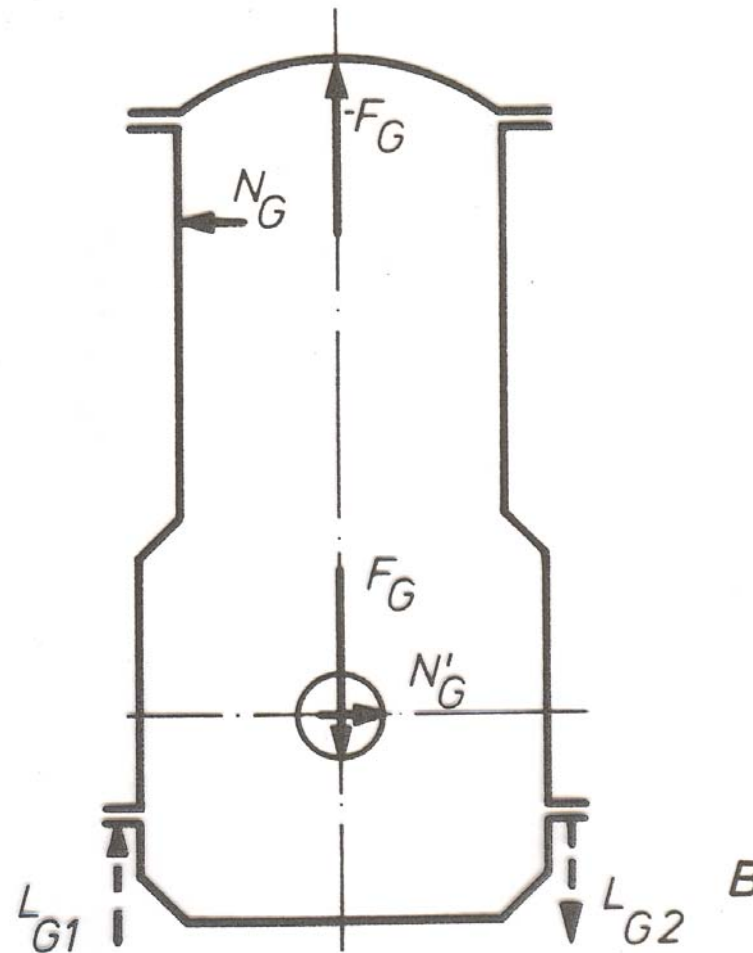
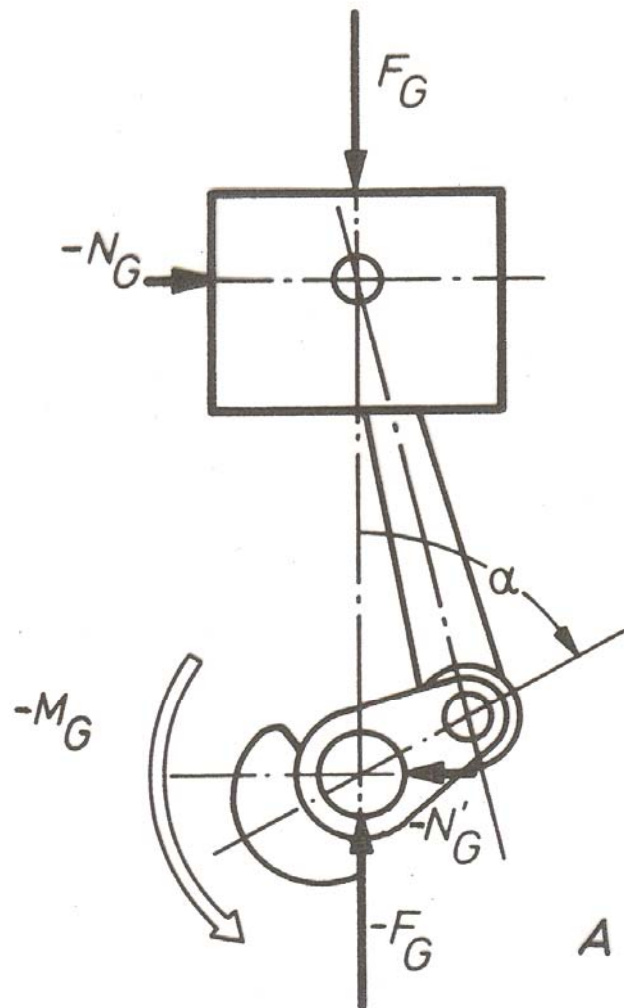




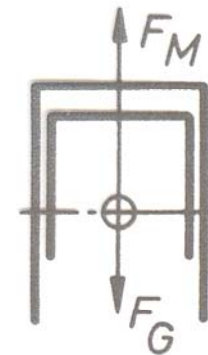
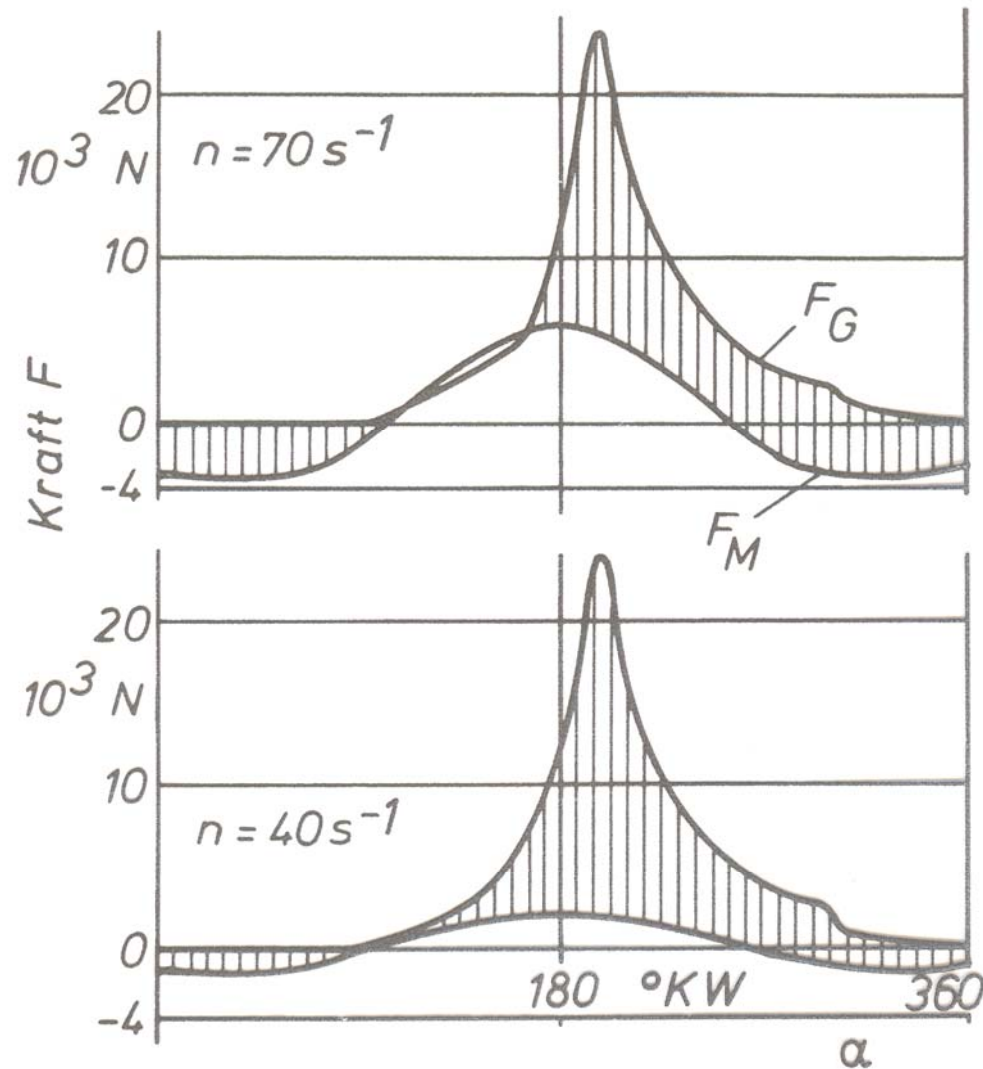
Wirkung der Gaskraft am Triebwerk

Kräfte und Momente durch Gasdruck

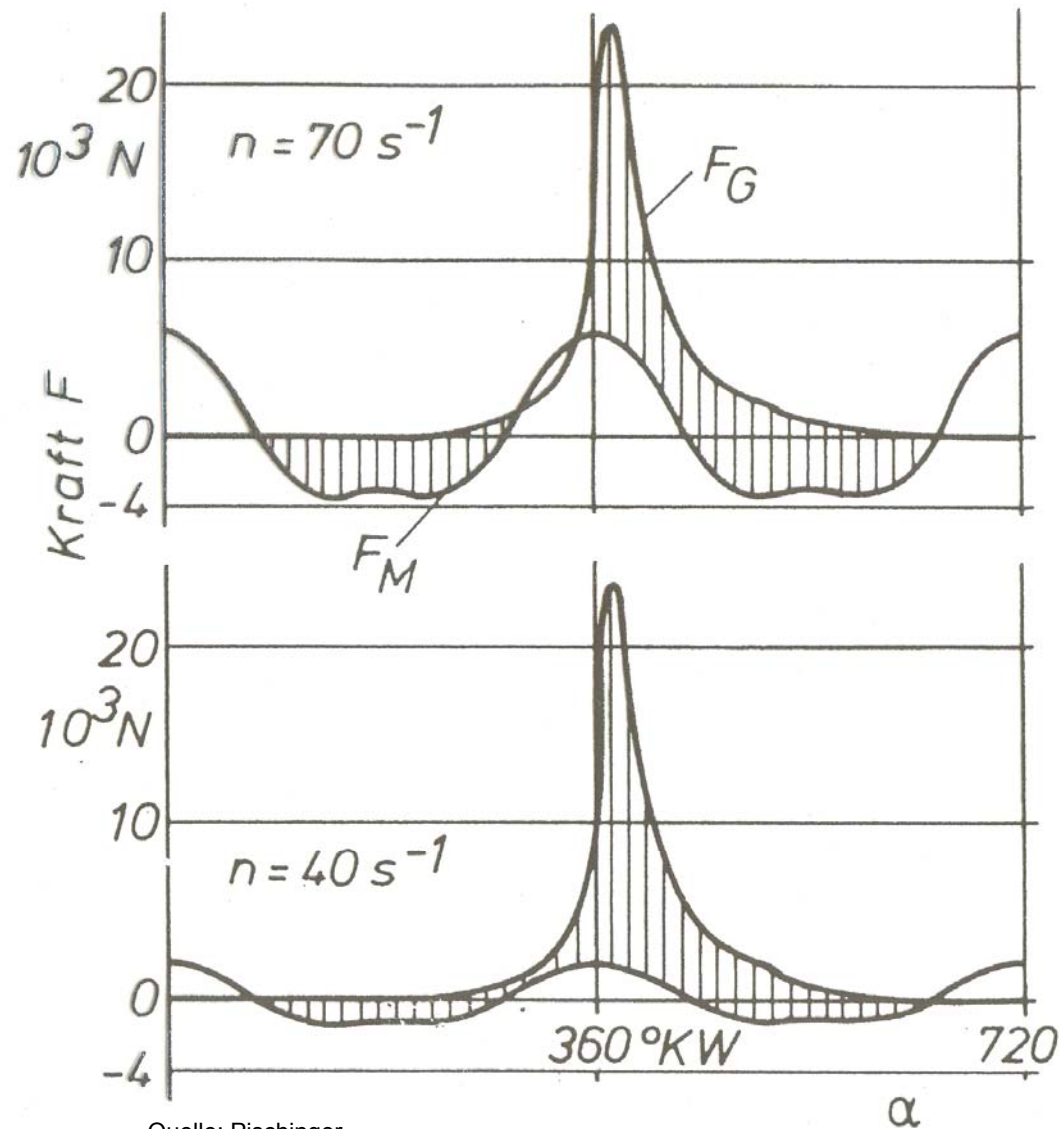
(A Triebwerk, B Gehäuse)



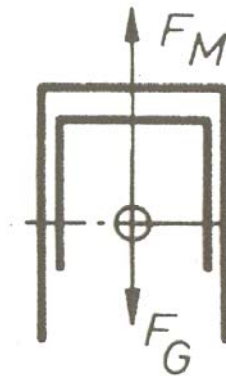
Gas- und Massenkraft am Kolben (2-Takt-Motor)



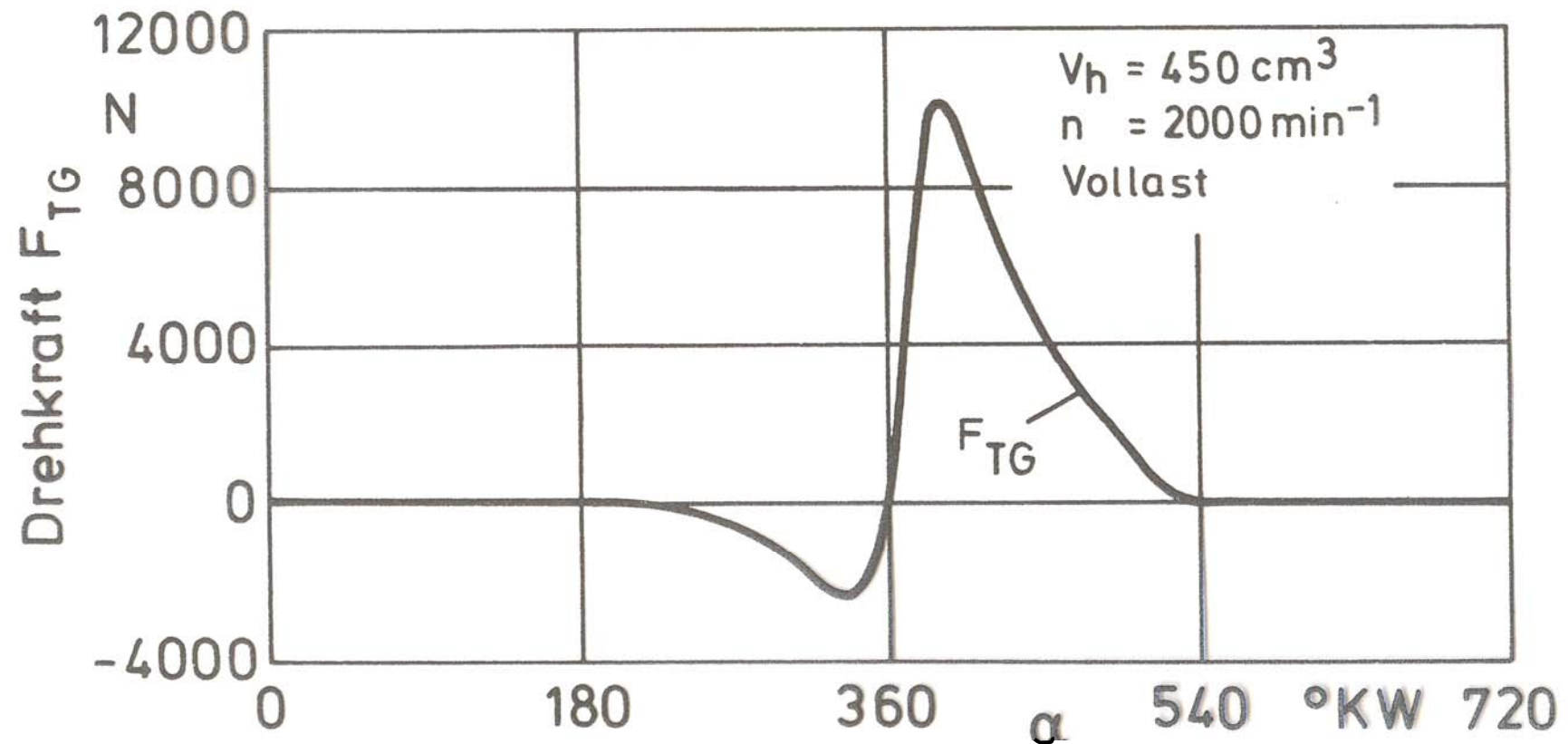
Gas- und Massenkraft am Kolben (4-Takt-Motor)



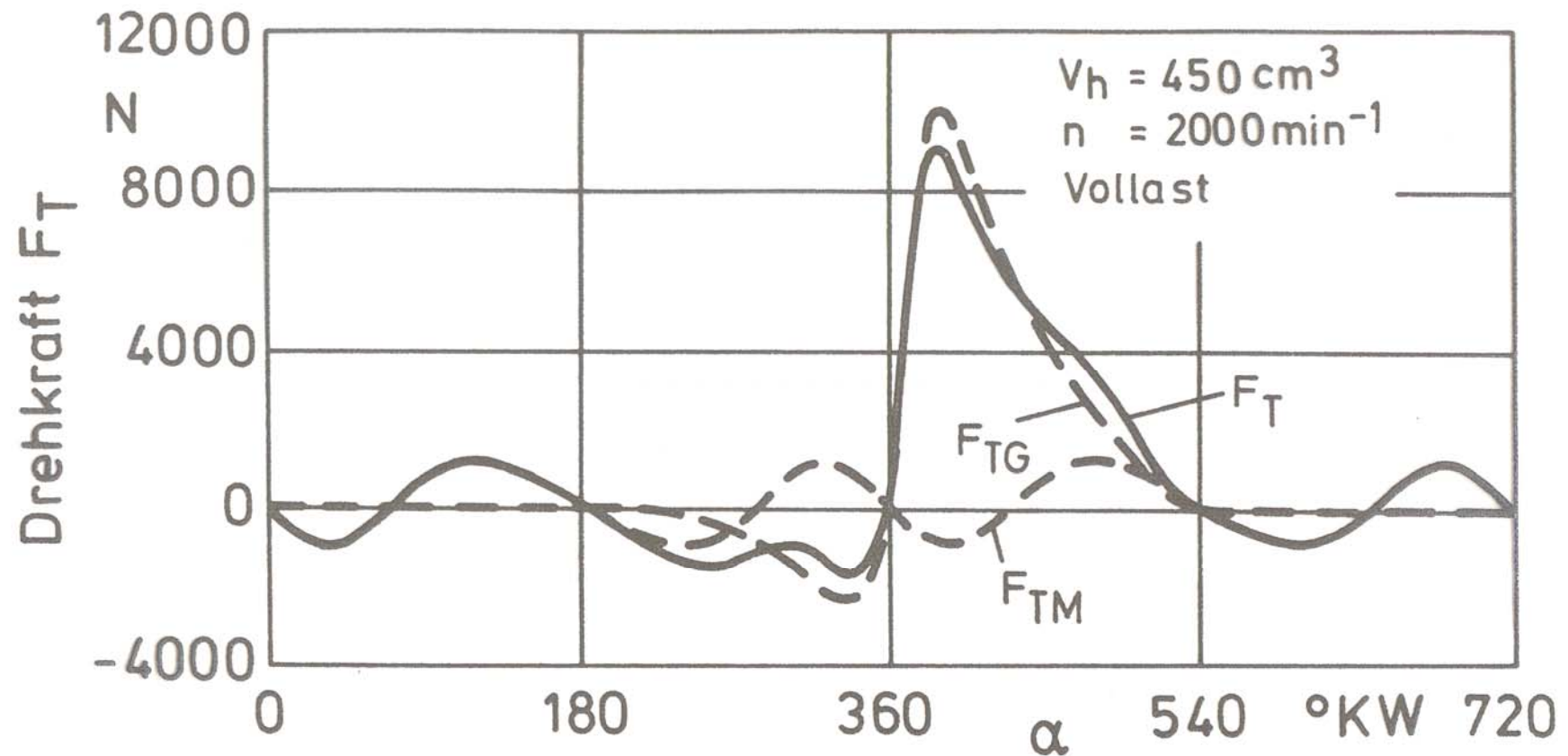
Quelle: Pischinger

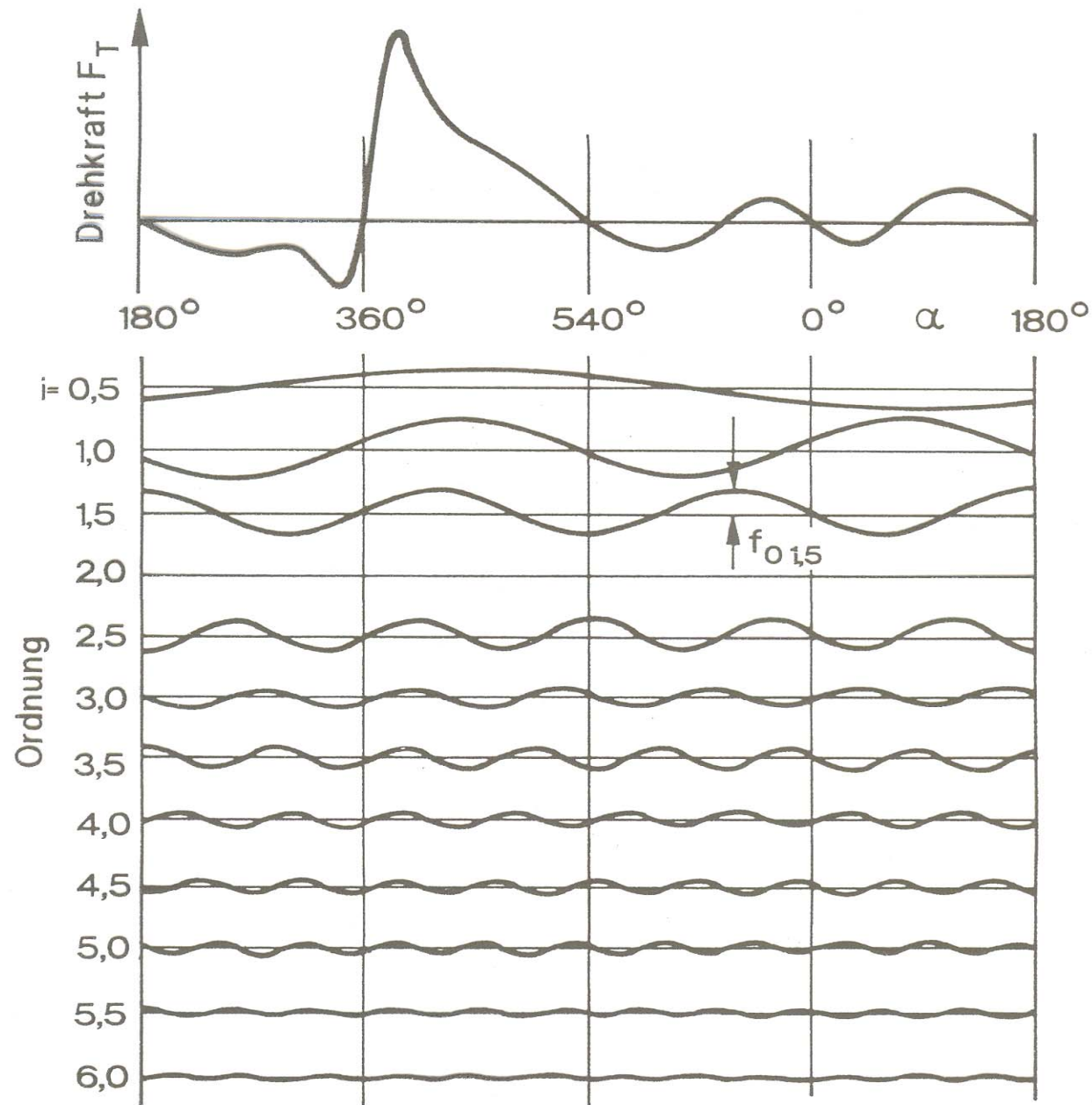


Gas – Drehkraftverlauf eines 4-Takt-Motors



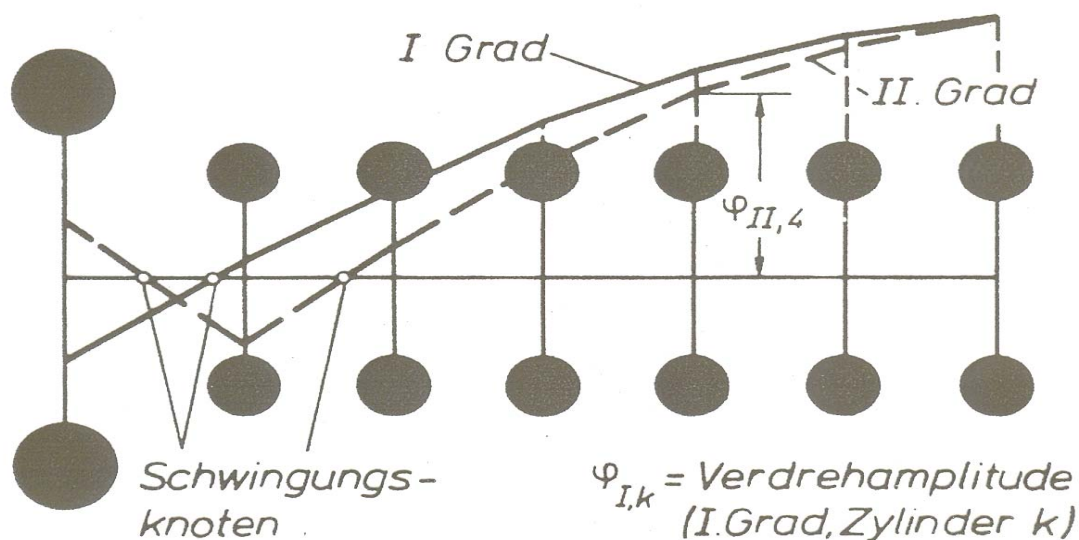
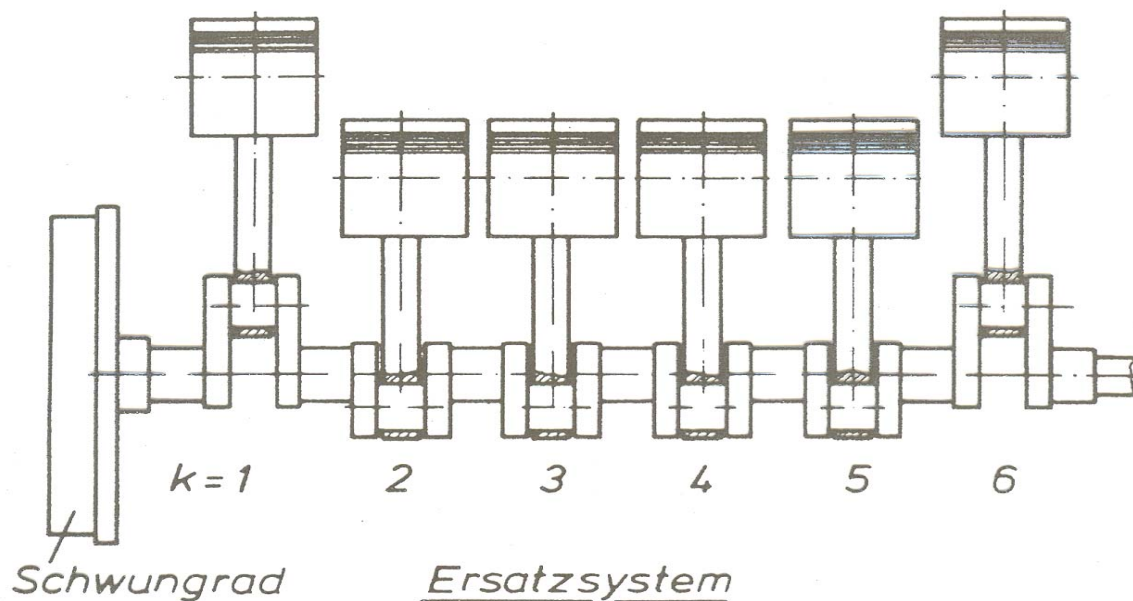
Drehkraftverlauf beim 4-Takt-Motor





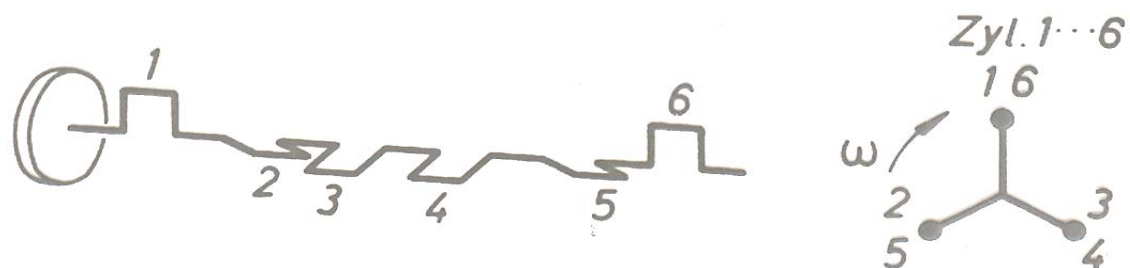
Drehkraft und Harmonische an der Kurbelkröpfung (4-Takt)

Realer Kurbeltrieb



Ersatzsystem Drehschwingung Kurbelwelle

Quelle: Pischinger

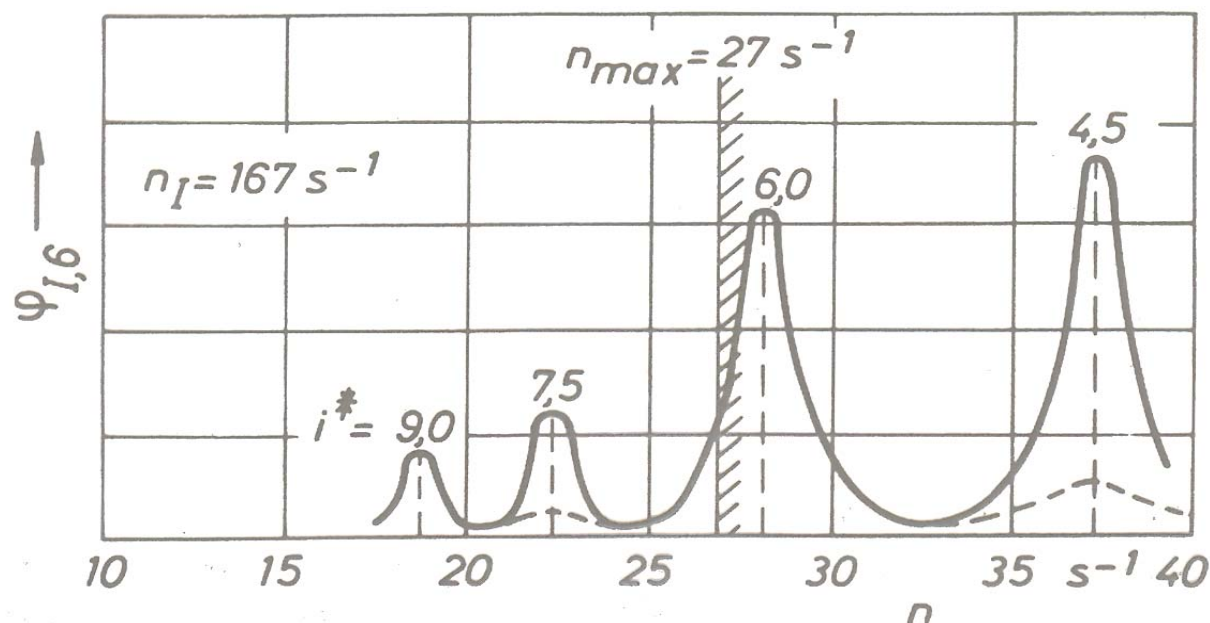
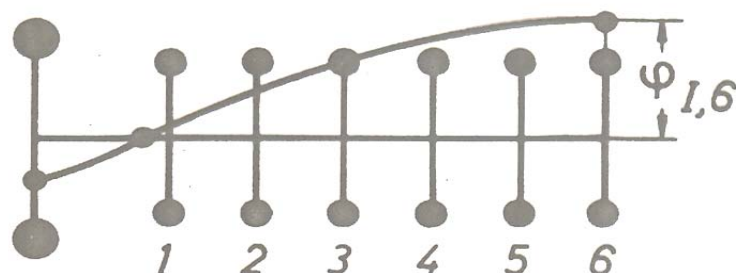


Zündfolge:

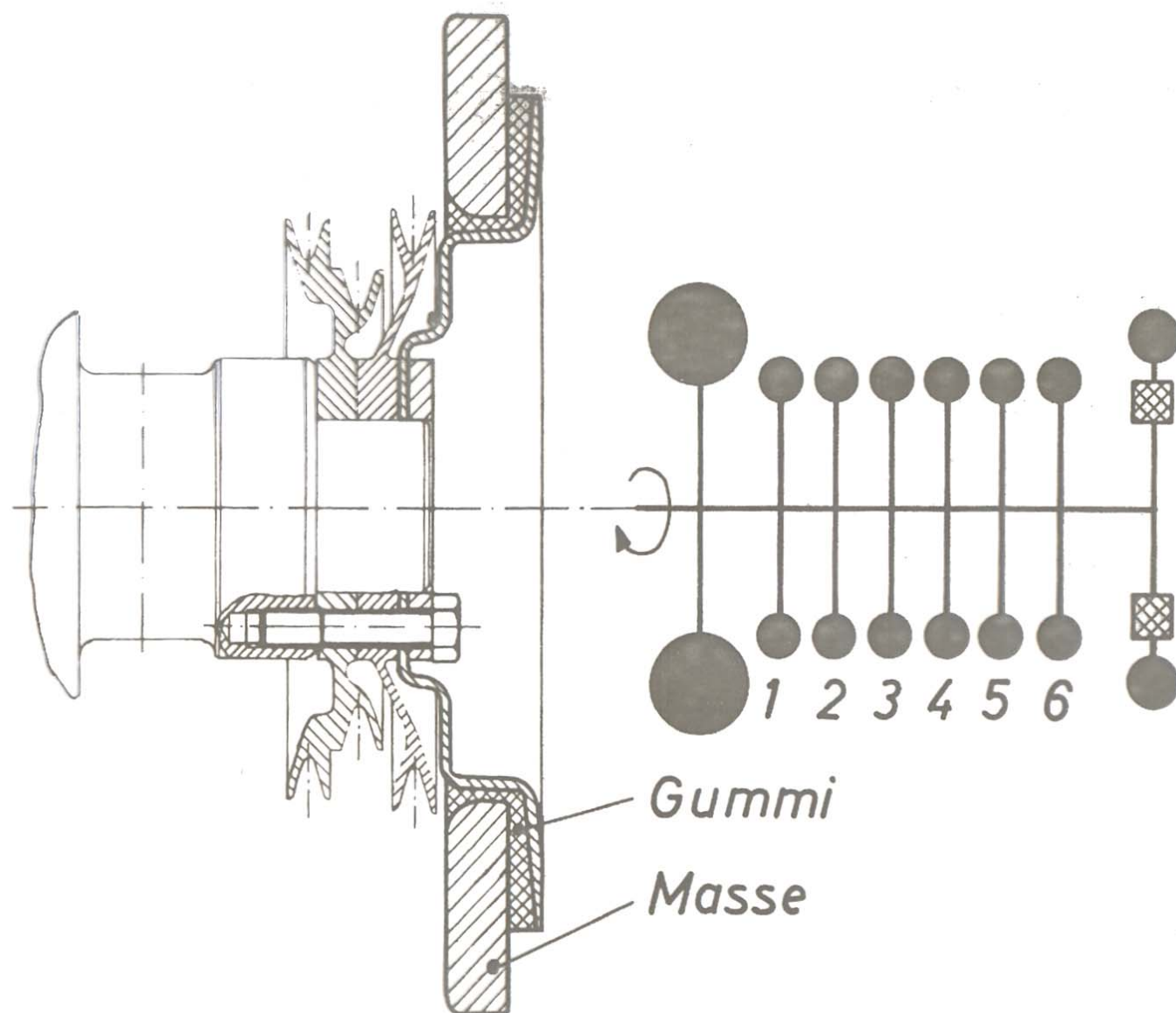
— 1-5-3-6-2-4

Zündfolge:

--- 1-2-4-6-5-3



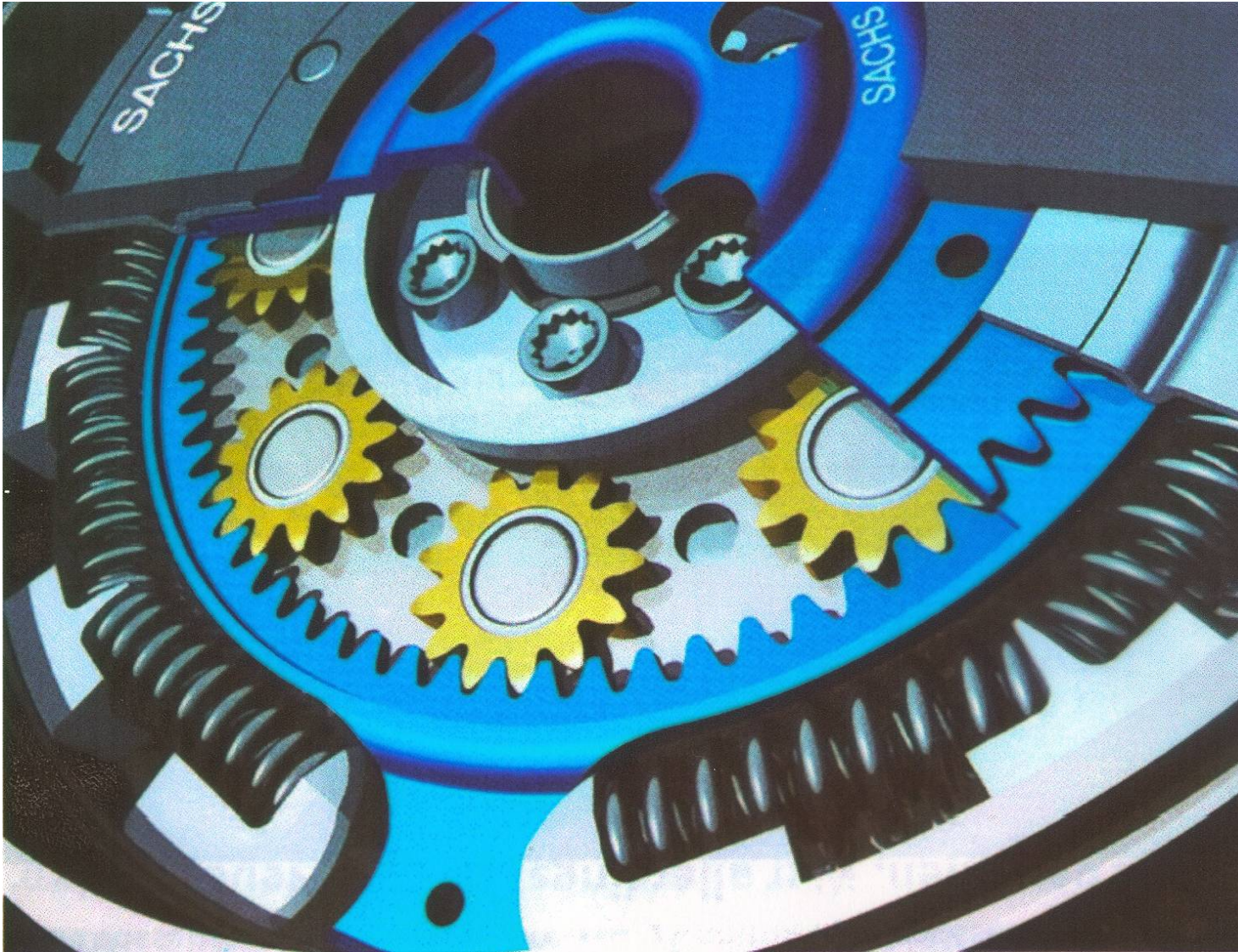
Drehschwingungen an der Kurbelwelle eines 6 - Zylindermotors

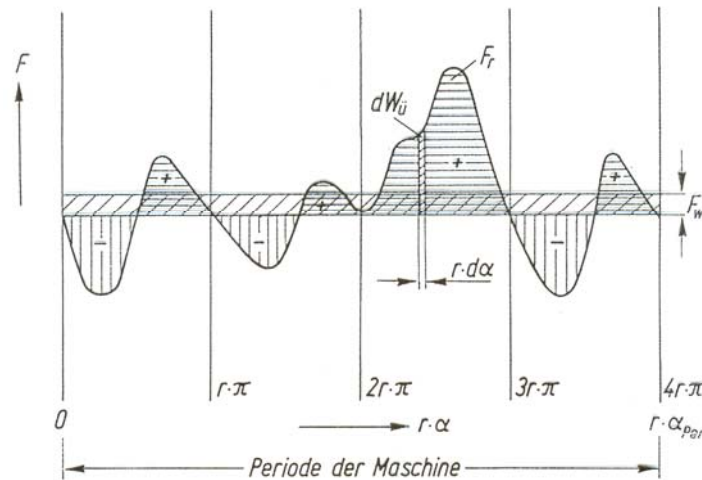


Gummi –
Drehschwingungs-
dämpfer

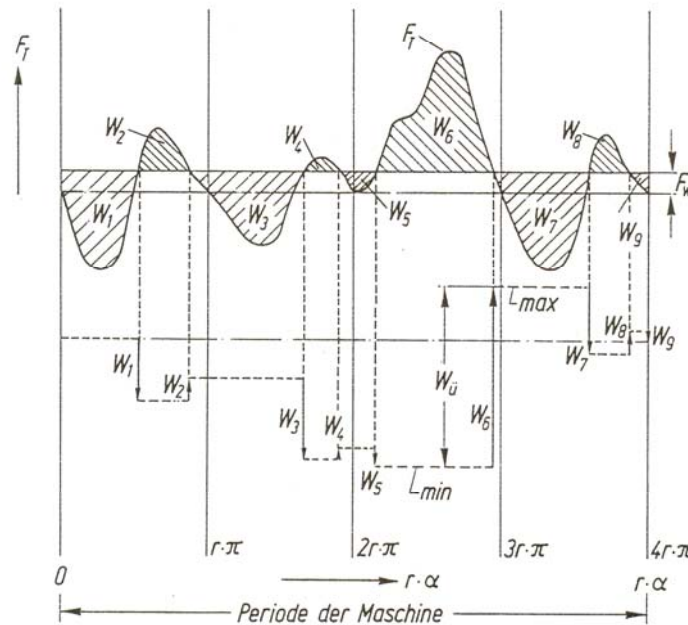
Zweimassenschwungrad mit integrierten Planetenradsatz

Mannesmann Sachs





Tangentialkraftdiagramm eines Einzylinder-Viertaktmotors über dem Kurbelkreis
 F_T Resultierende Tangentialkraft, F_W Widerstandskraft

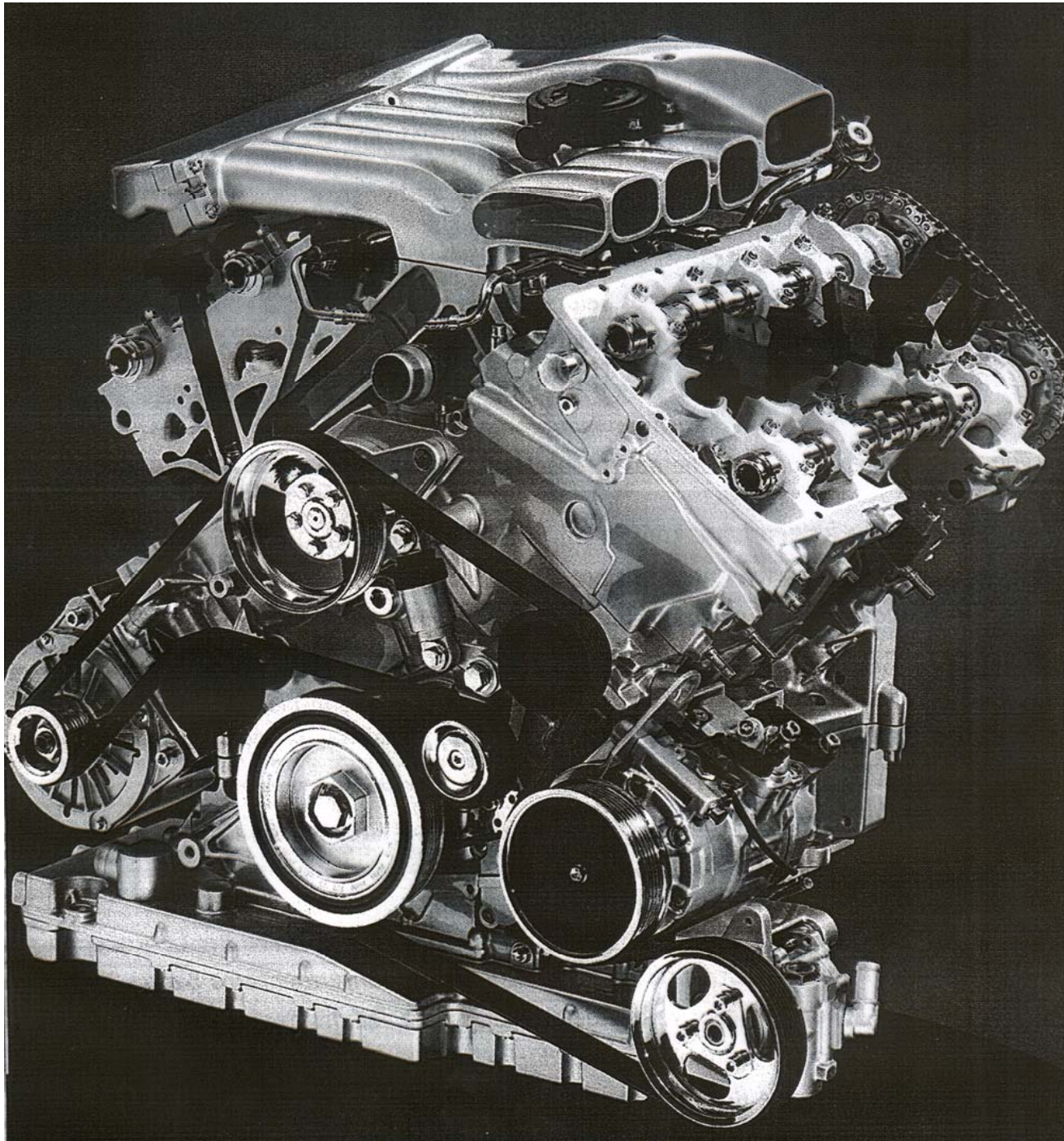


Ermittlung des Arbeitsüberschusses $W_{\ddot{u}}$ aus dem Tangentialkraftdiagramm am Beispiel eines Einzylinder-Viertaktmotors

Quelle: Kalide

Schwungrad- dimensionierung

Konstruktion von Motoren



Zylinderanordnungen

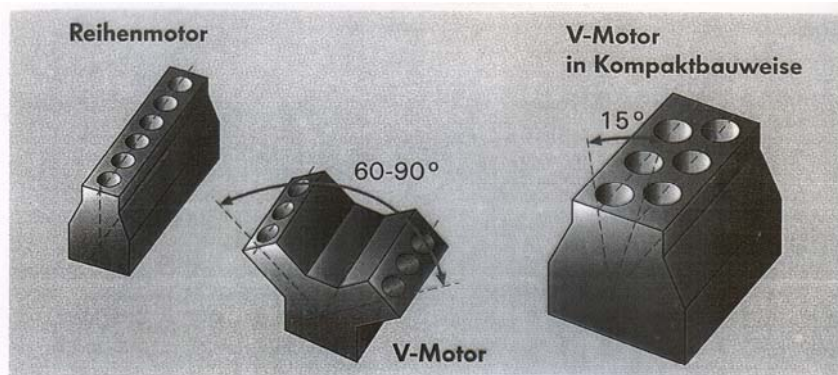


Bild 1: Bauformen Sechszylinder-Motoren

Figure 1: Design of the six cylinder engines

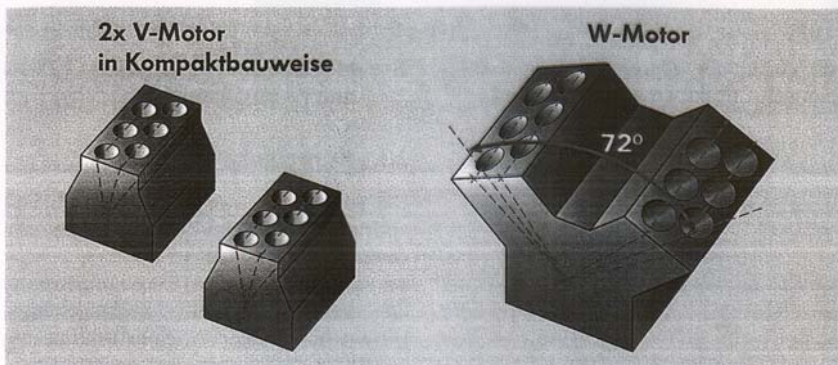


Bild 2: V6- und W12-Bauweise

Figure 2: V6 and W12 design

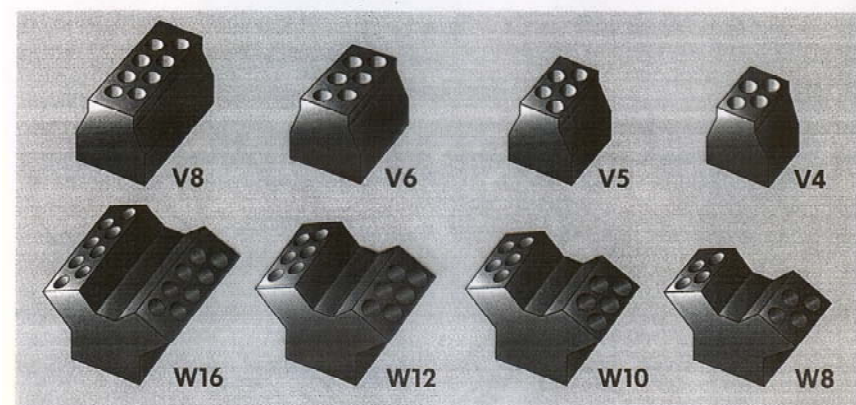
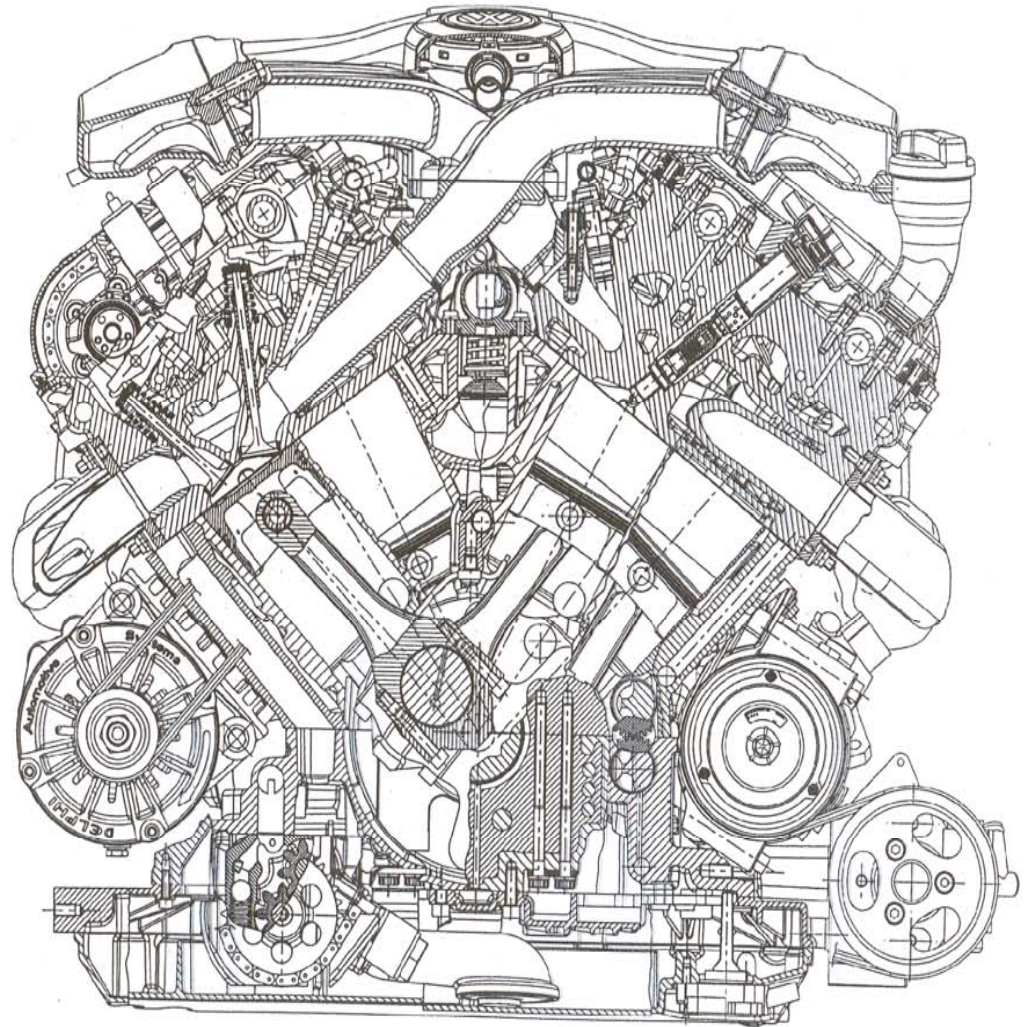
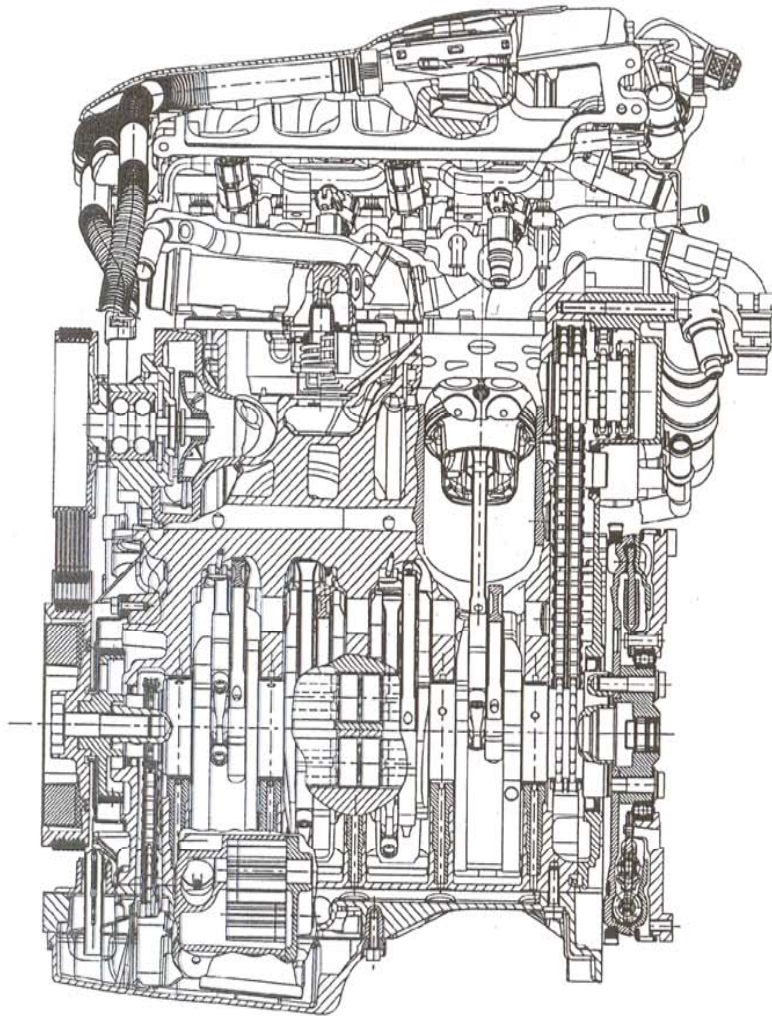


Bild 3: Die neue V/W-Motorenbaureihe

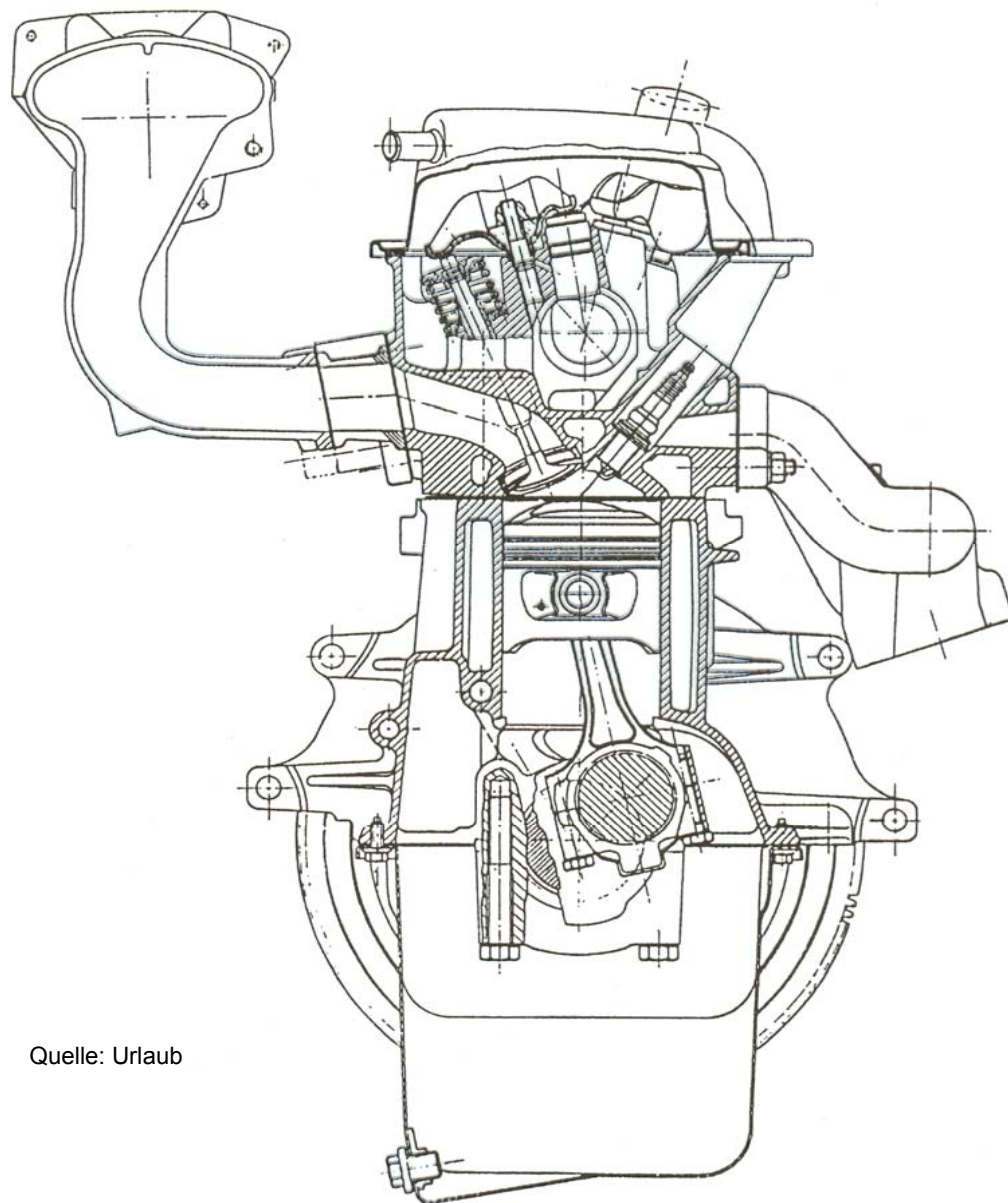
Figure 3: The new V / W engine series

Langs- und Querschnitt des W8-Motors



Quelle: MTZ

Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers



Quelle: Urlaub

Hauptabmessungen: $d = 80 \text{ mm}$, $s = 64,5 \text{ mm}$.

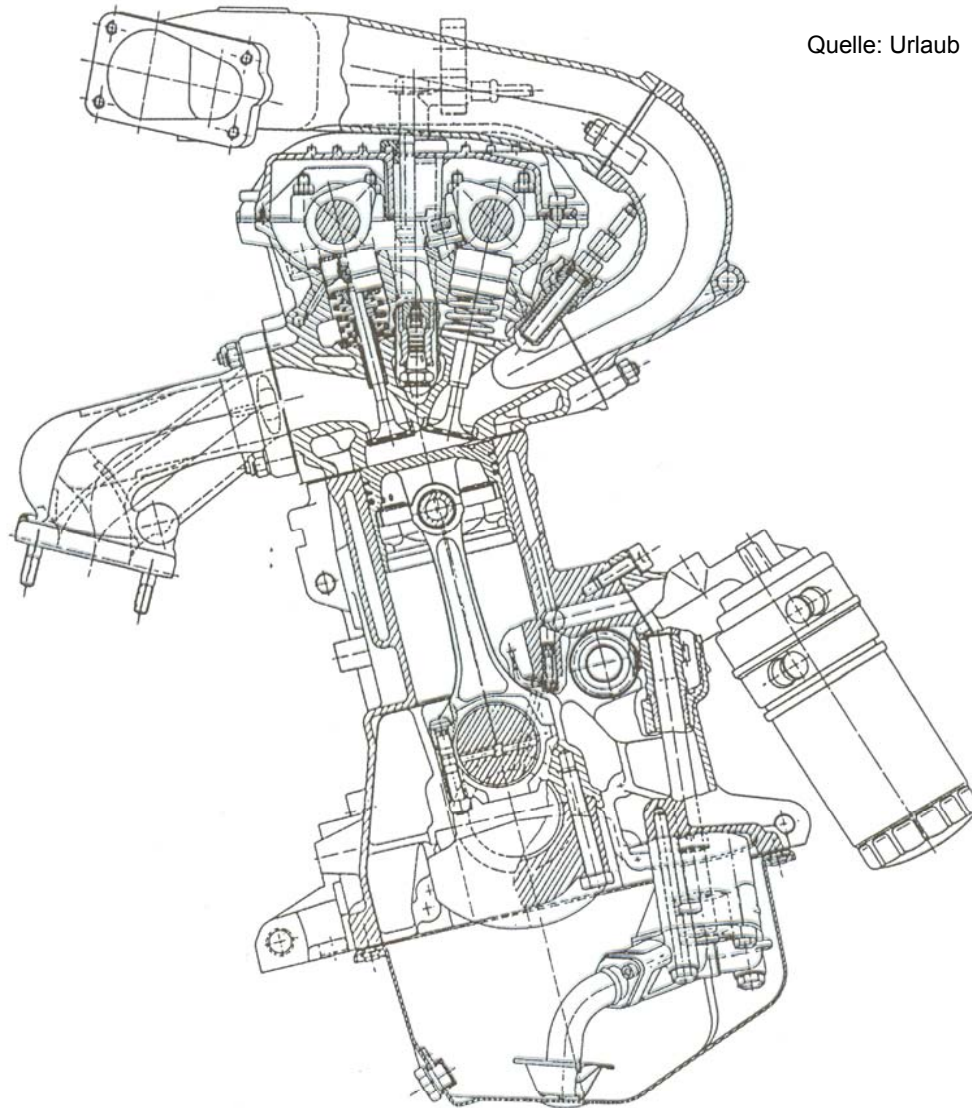
Leistung: $P_e = 51 \text{ kW}$ bei $n = 6000 \text{ 1/min}$ ($p_e = 7,86 \text{ bar}$, $P_e/V_{Hg} = 39,3 \text{ kW/l}$)

Die Gemischbildung erfolgt durch einen Vergaser.

Vierzylinder-Viertakt- PKW-Ottomotor Typ CVH, Ford-Werke AG, Köln-Deutz

Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers

Quelle: Urlaub



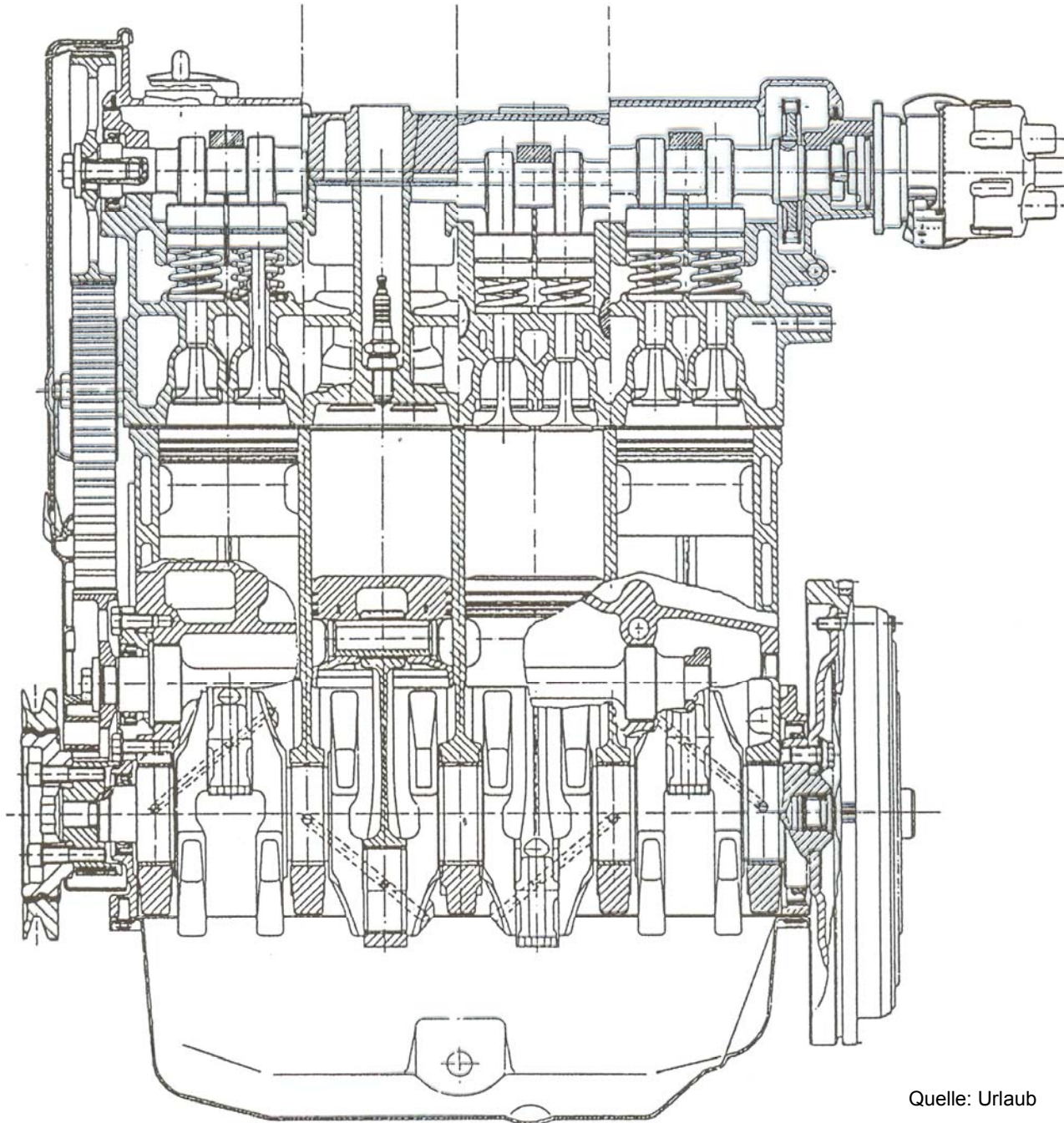
Vierzylinder-Viertakt- Pkw-Ottomotor

Volkswagen

Hauptabmessungen: $d = 81 \text{ mm}$, $s = 86,4 \text{ mm}$.

Leistung: $P_e = 102 \text{ kW}$ bei $n = 6100 \text{ 1/min}$ ($p_e = 11,27 \text{ bar}$, $P_e/V_{Hg} = 57,3 \text{ kW/l}$)

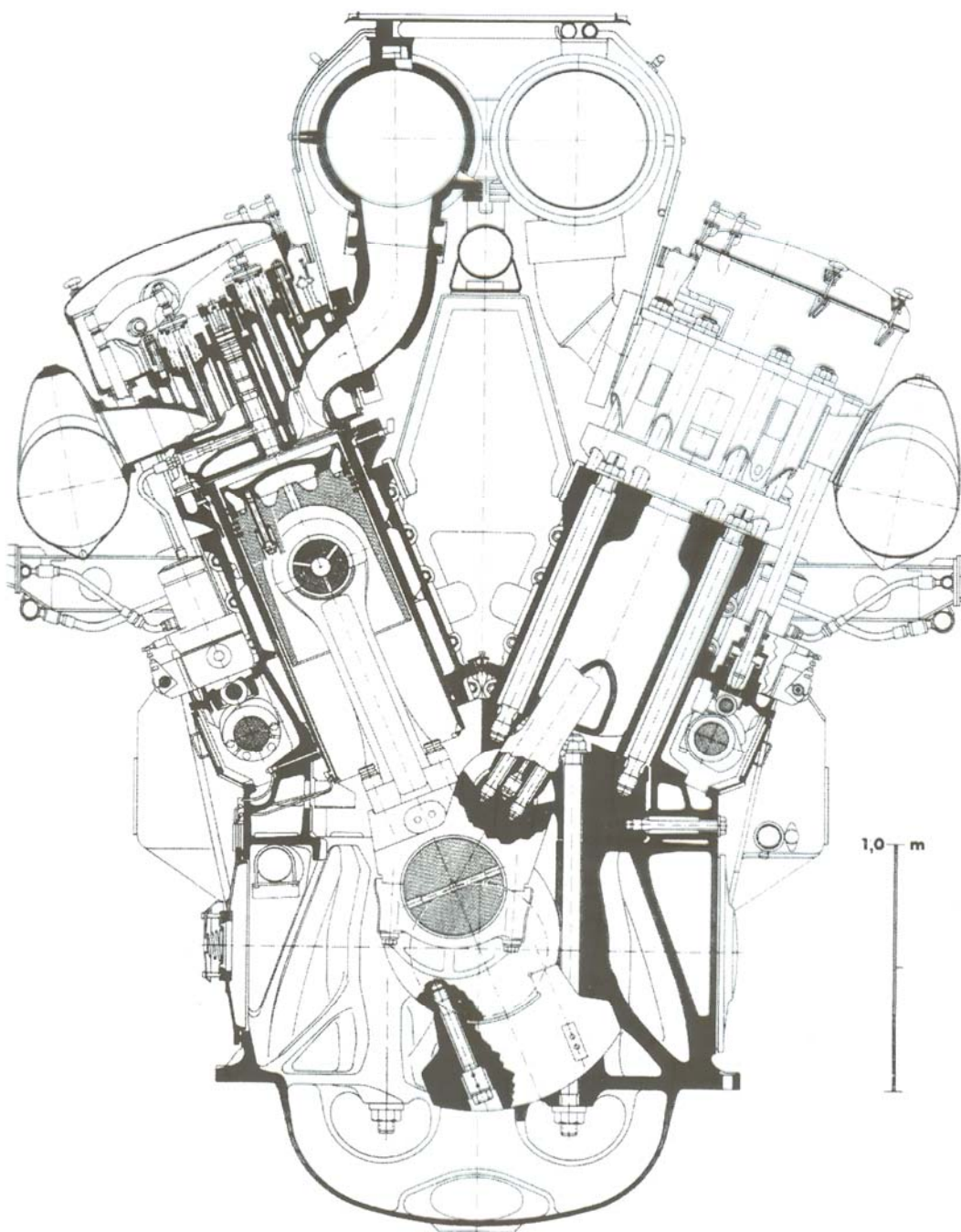
Die Gemischbildung erfolgt über eine Benzineinspritzung. Der Motor ist mit jeweils zwei Einlaß- und Auslaßventilen ausgerüstet (16-Ventil-Motor).



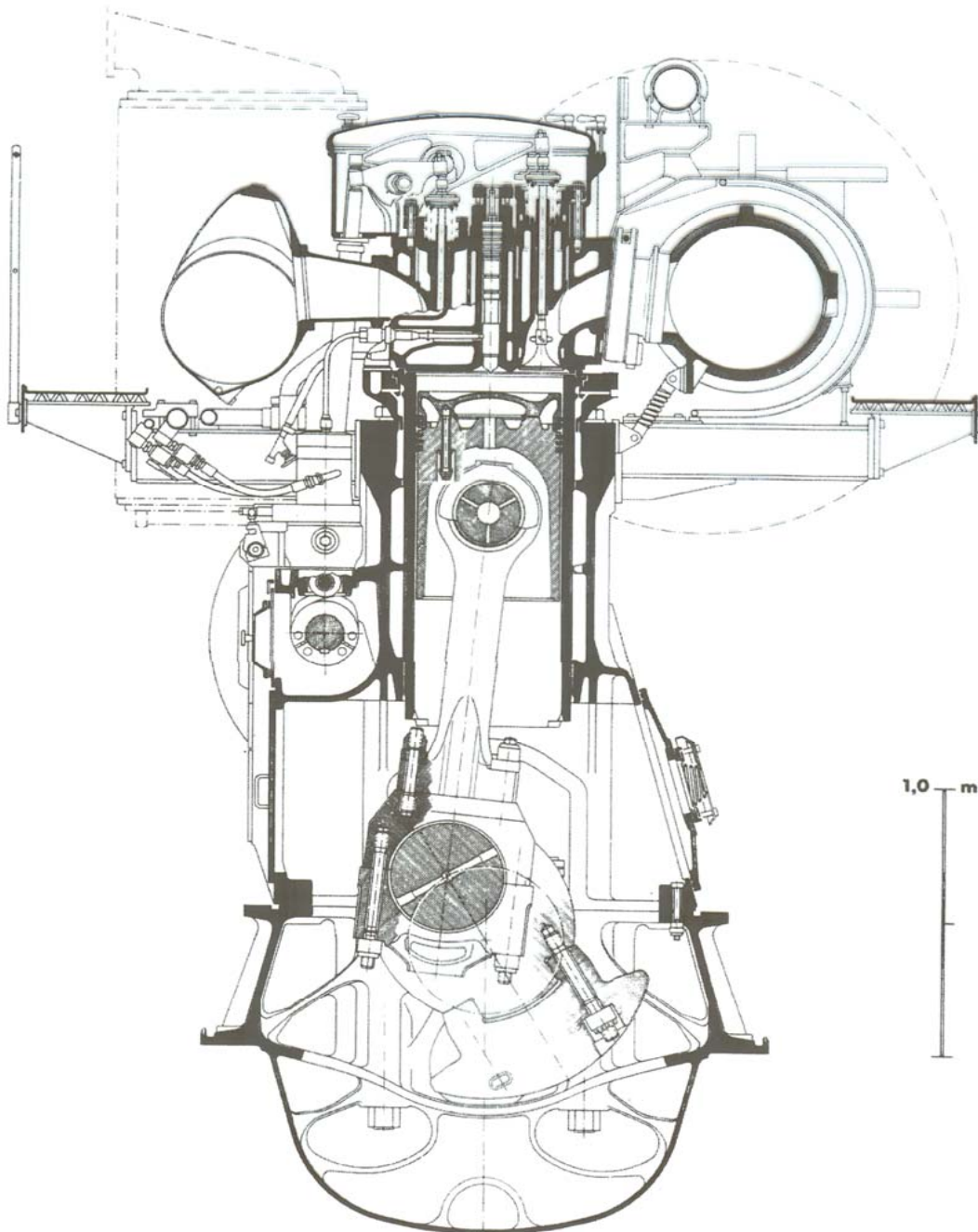
Längsschnitt des Motors VW

Quelle: Urlaub

Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers

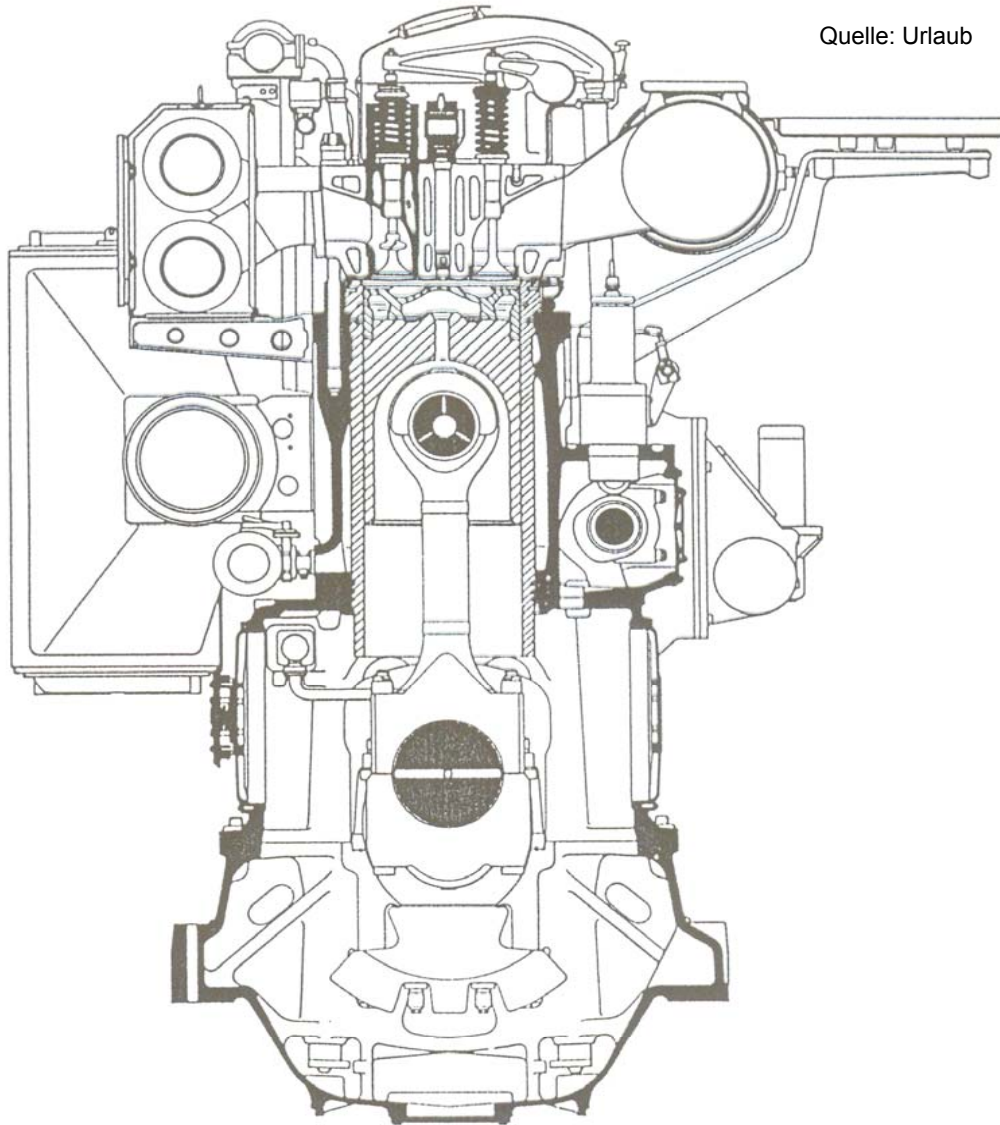


Schnitt durch einen
10...18-Zyl.-V-Motor



Schnitt durch einen
6...9-Zyl. Reihenmotor

Quelle: Wagner / Fischer / Fromman



Quelle: Urlaub



Viertakt-Schiffs- Dieselmotor

Typ M 601, der Krupp MaK
Maschinenbau GmbH, Kiel

Hauptabmessungen: $d = 580 \text{ mm}$, $s = 600 \text{ mm}$.

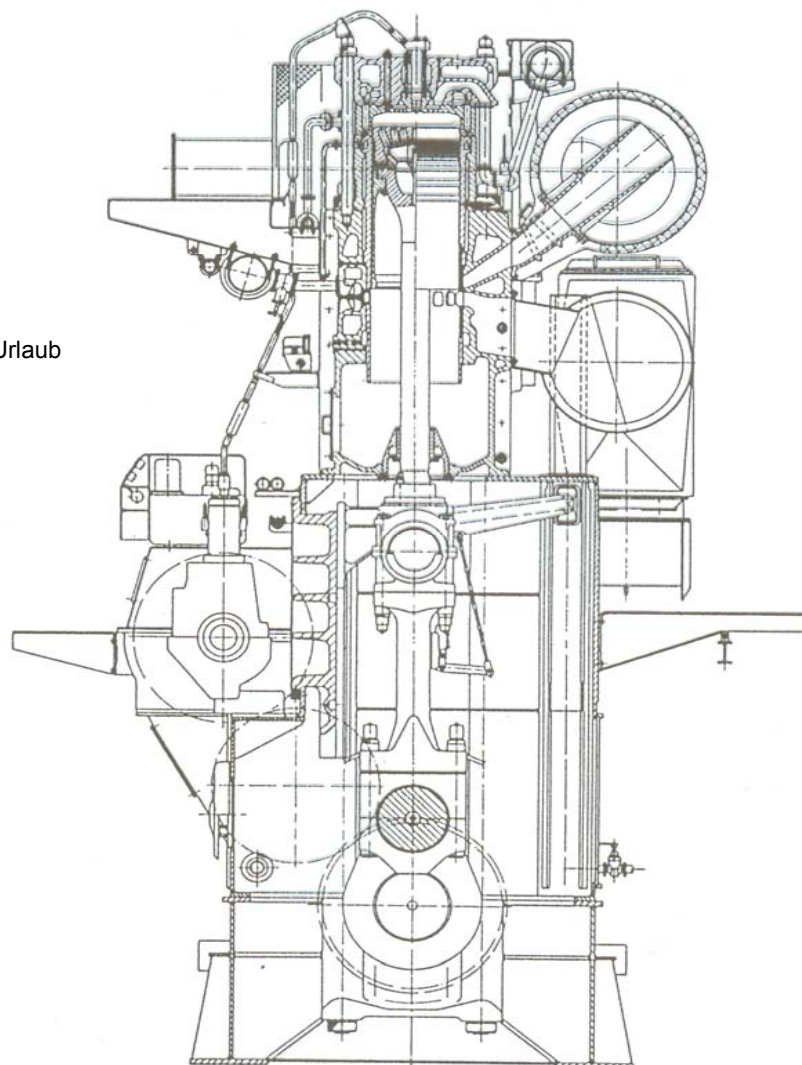
Leistung: $P_e = 1100 \text{ kW/Zyl.}$ bei $n = 425 \text{ 1/min}$ ($p_e = 19,59 \text{ bar}$, $P_e/V_{Hg} = 6,9 \text{ kW/l}$)

Der Direkteinspritzer ist abgasturboaufgeladen. Er wird als Sechs-, Acht- und Neunzylindermotor ausgeführt.

Verbrennungskraftmaschinen

Prof. Dr.-Ing. E. Reimers

Quelle: Urlaub



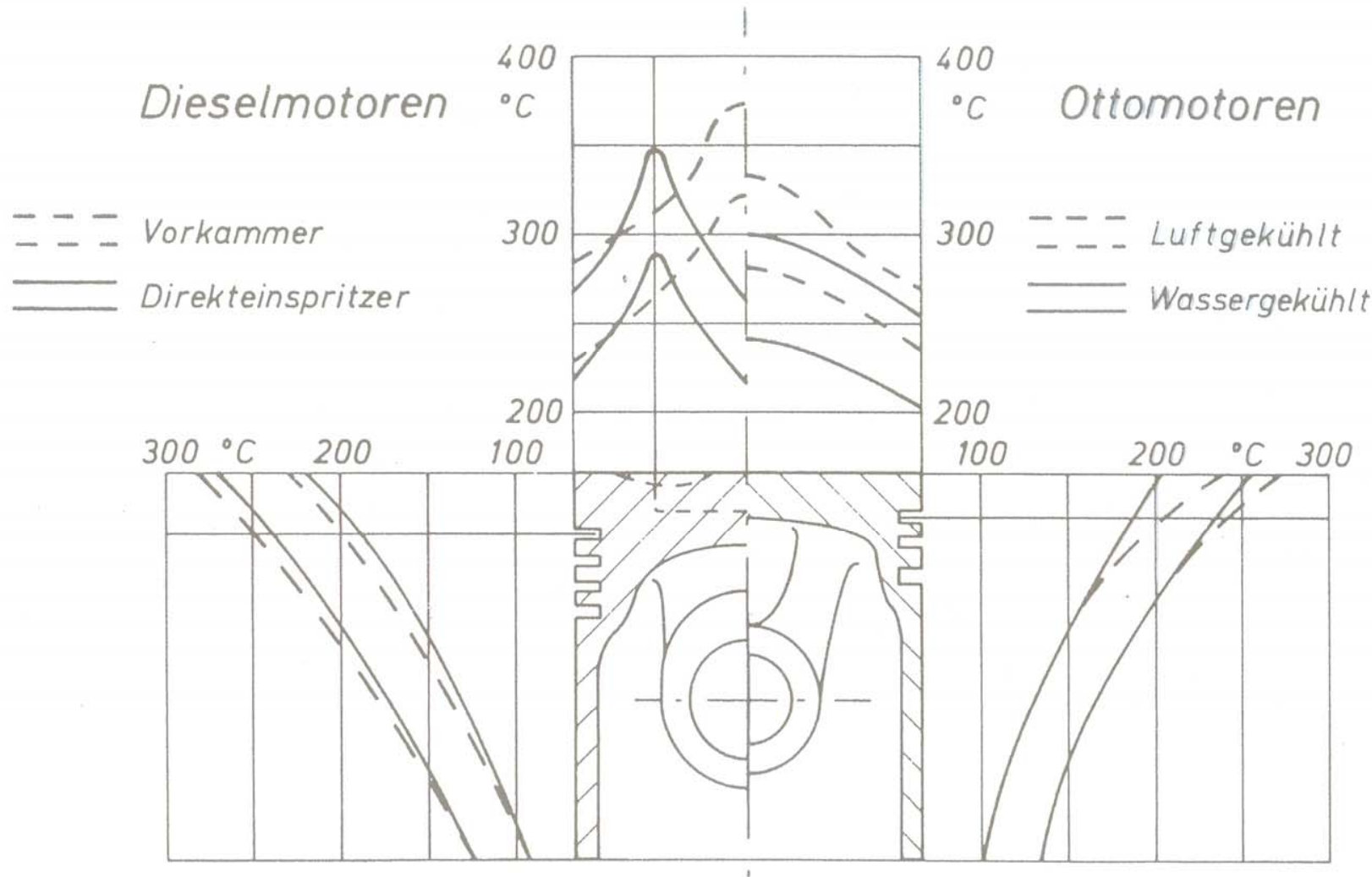
Hauptabmessungen: $d = 700 \text{ mm}$, $s = 1500 \text{ mm}$.
Leistung: $P_e = 1650 \text{ kW/Zyl.}$ bei $n = 120 \text{ l/min}$ ($p_e = 14,29 \text{ bar}$, $P_e/V_{H_2} = 2,9 \text{ kW/l}$)

Der Direkteinspritzer ist abgasturboaufgeladen.
(Dieser mit vier bis zehn Zylindern gebaute und noch mit der M. A. N.-Umkehrspülung arbeitende Motor wurde inzwischen ersetzt durch einen gleichstromgespülten Typ der MAN-B&W, Diesel A/S, Kopenhagen)

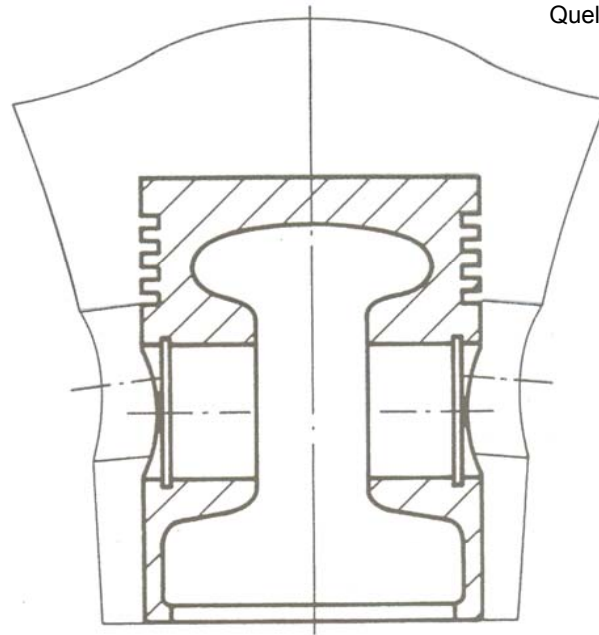
Zweitakt-Schiffs- Dieselmotor

Typ KSZ 70/150 C/CL
der Maschinenfabrik Augsburg-
Nürnberg AG

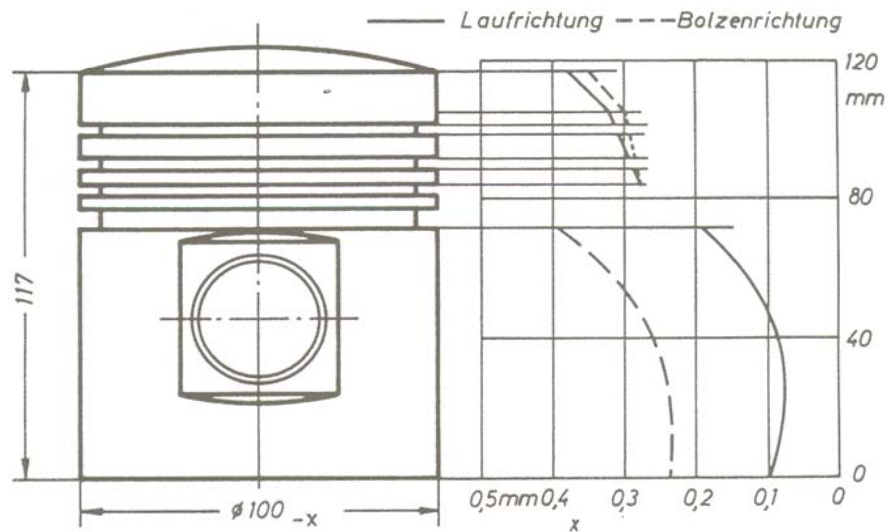
Temperaturen der Kolbenoberfläche



Quelle: Pischinger

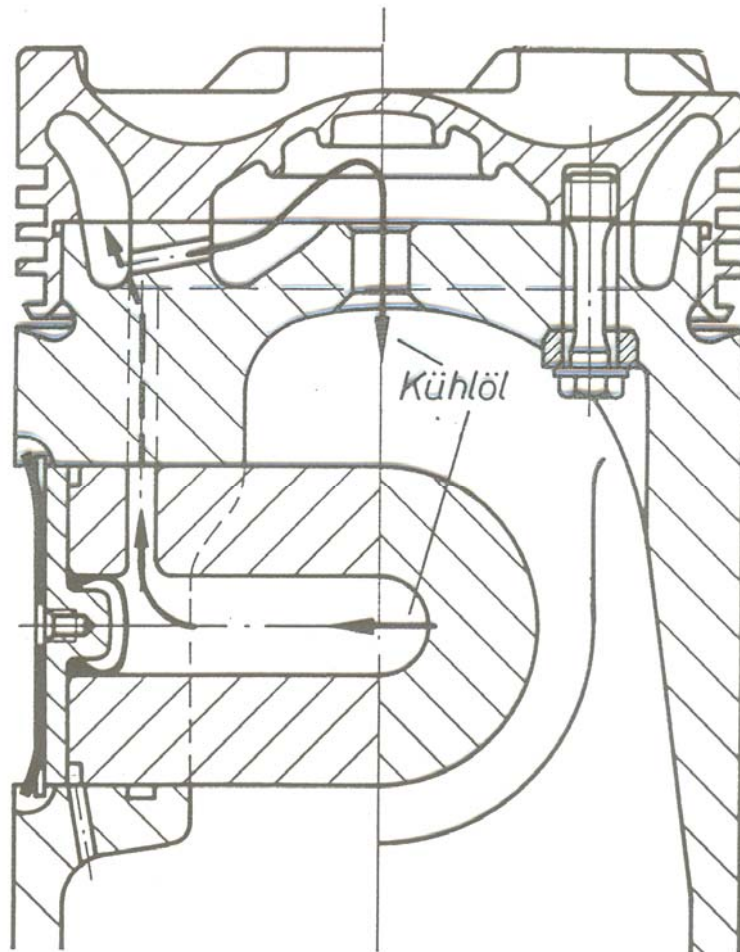


Deformation des Kolbens durch Erwärmung

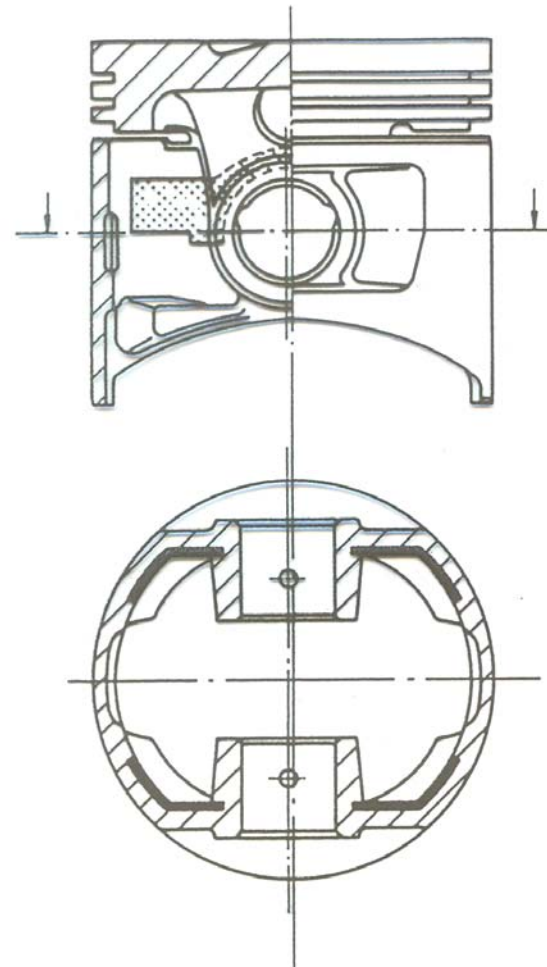


Schliffbild des Kolbens

Wärmedeformation und Formkorrektur des Kolbens

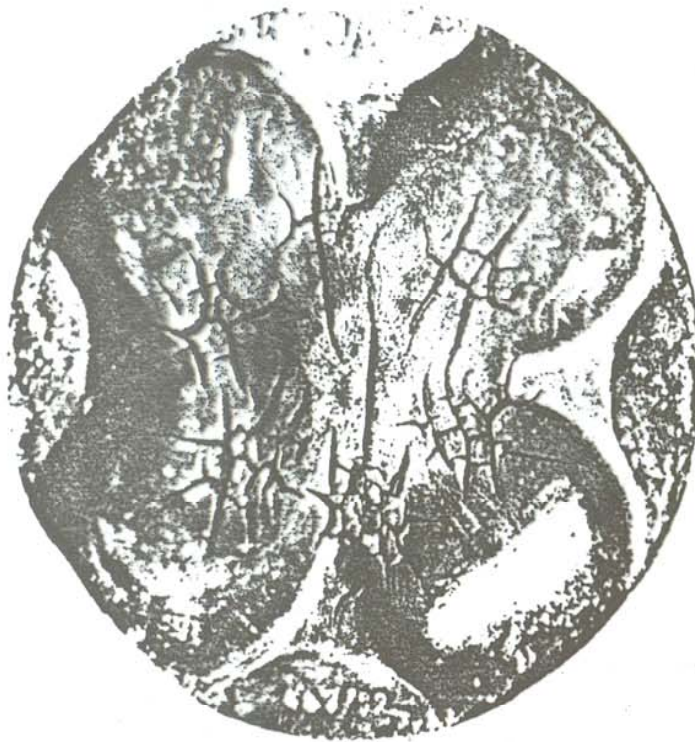


Zweiteiliger Kolben
(ölgekühlt), D=240 mm

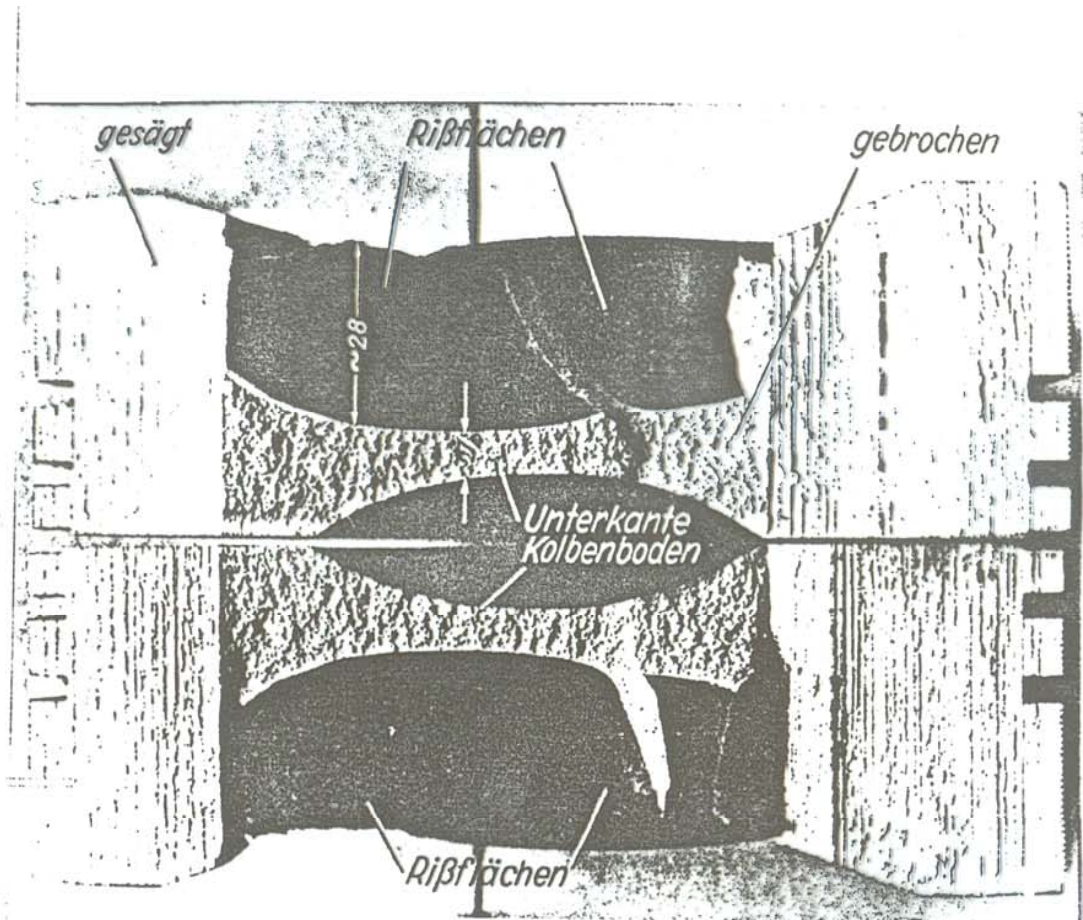


Bimetall-Regelkolben

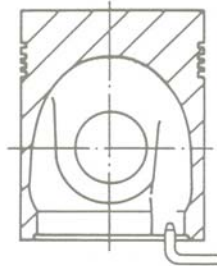
Temperaturspannungsrisse Kolben



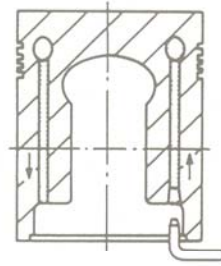
C 55



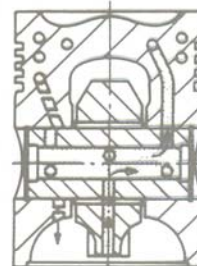
C 54



a) Anspritzung der
Kolbeninnenfläche

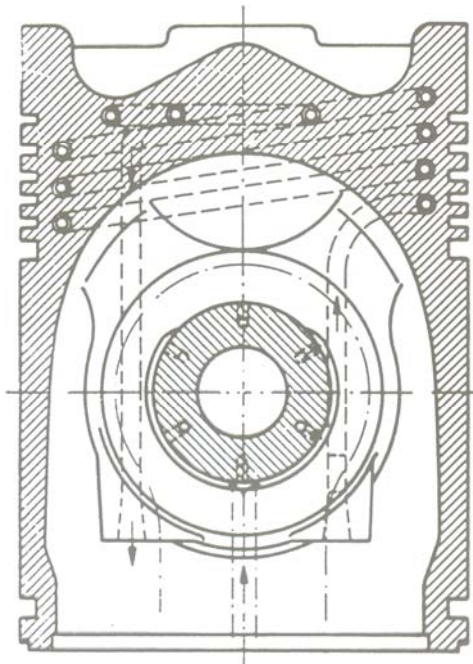


b) Einspritzkühlung
durch:
- gehäusefeste Düse
- Düse am Pleuellauge



c) Druckkühlung
durch:
- Pleuel und Bolzen
- Pleuel über Gleitschuh
- Posaune

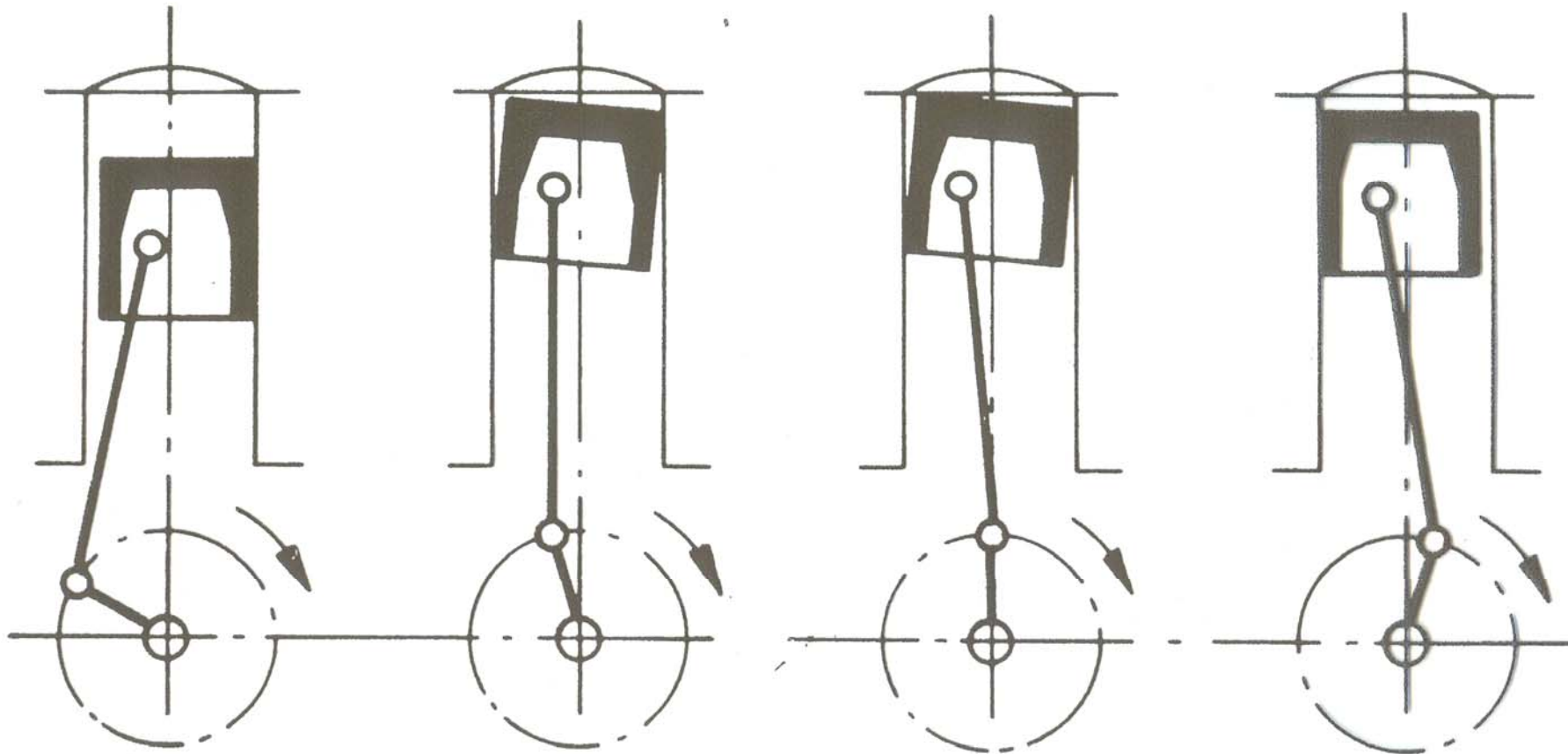
oben: Methoden der
Kolbenkühlung



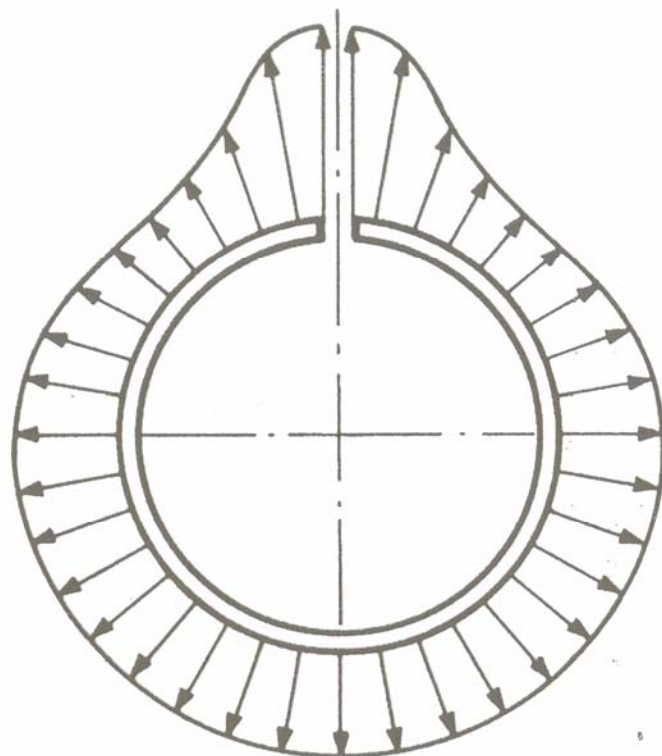
unten: Beispiel
eingegossener
Kolbenkühlkanal

Kolbendesachsierung

Kolbenbewegung bei versetzter Bolzenachse

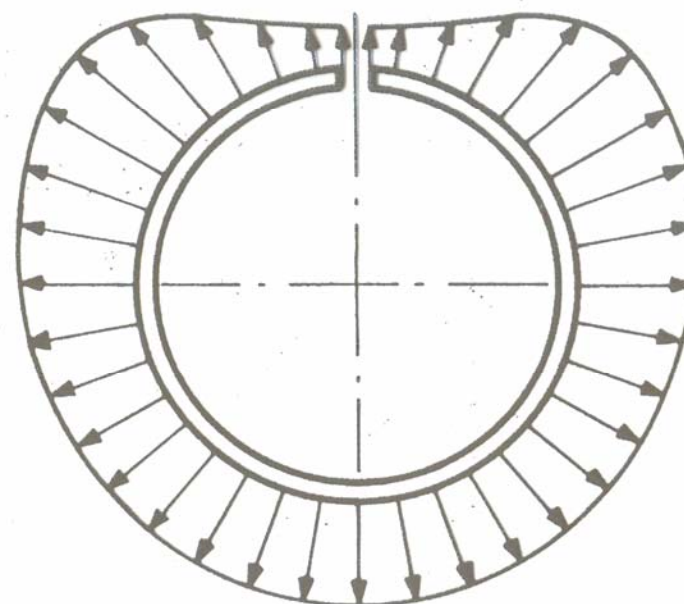


Quelle: Pischinger



A

A) Viertakt



B

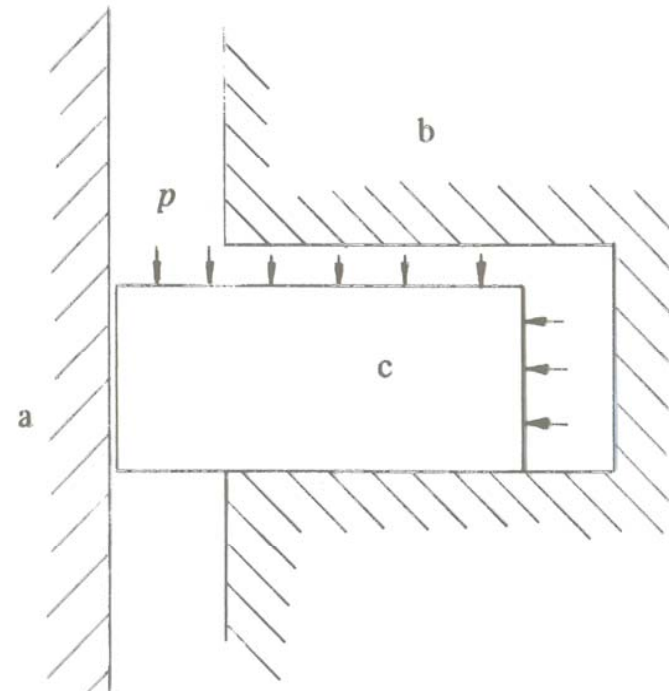
B) Zweitakt

Quelle: Pischinger

Radialdruckverteilung am Kolbenring

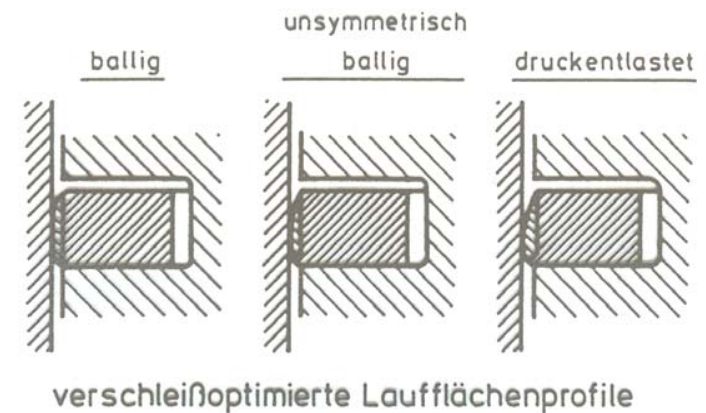
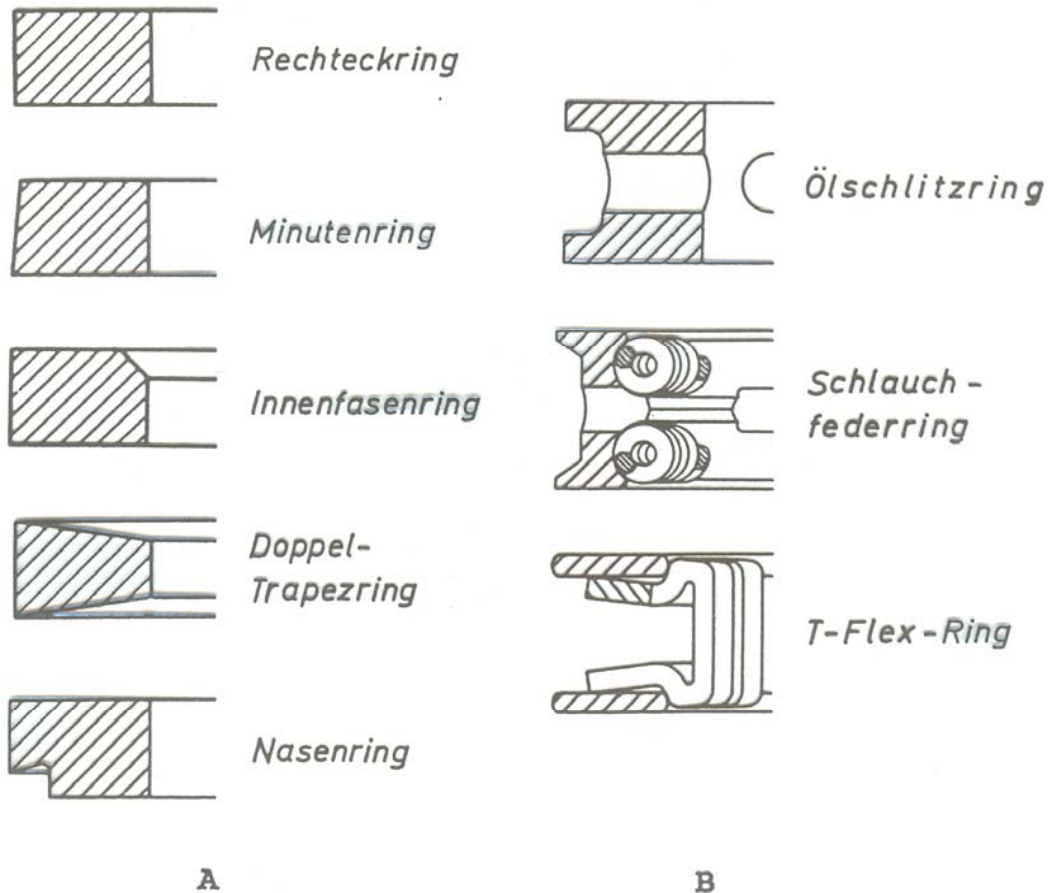
Dichtwirkung des Kolbenringes

- | | | | |
|---|---------------|---|-----------|
| a | Zylinderwand, | b | Kolben, |
| c | Kolbenring, | p | Gasdruck. |



Quelle: Wagner / Fischer / Frommann

Kolbenringausführungen

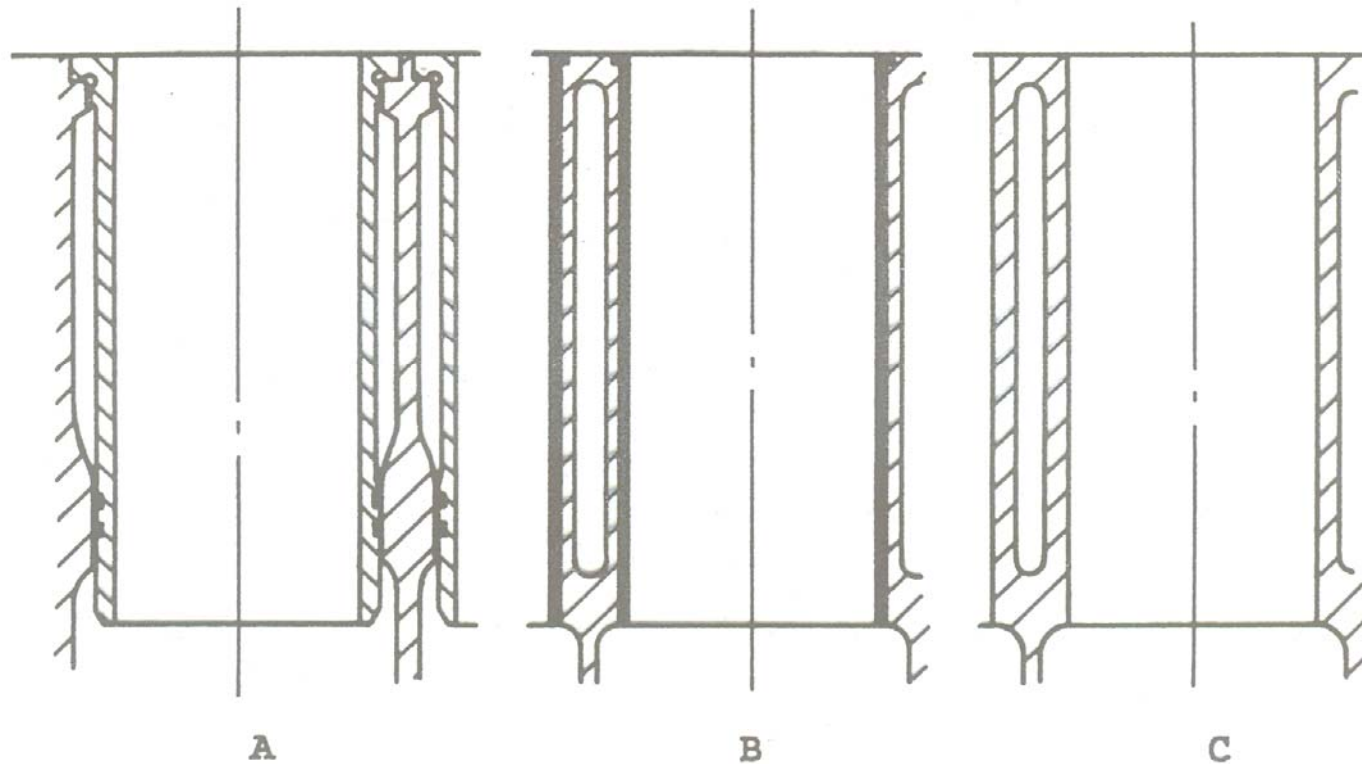


Ballig verchromte Kolbenringe

Kolbenringformen (Auswahl)

A) Kompressionsringe B) Ölabstreifringe

Zylinderblockkonstruktion

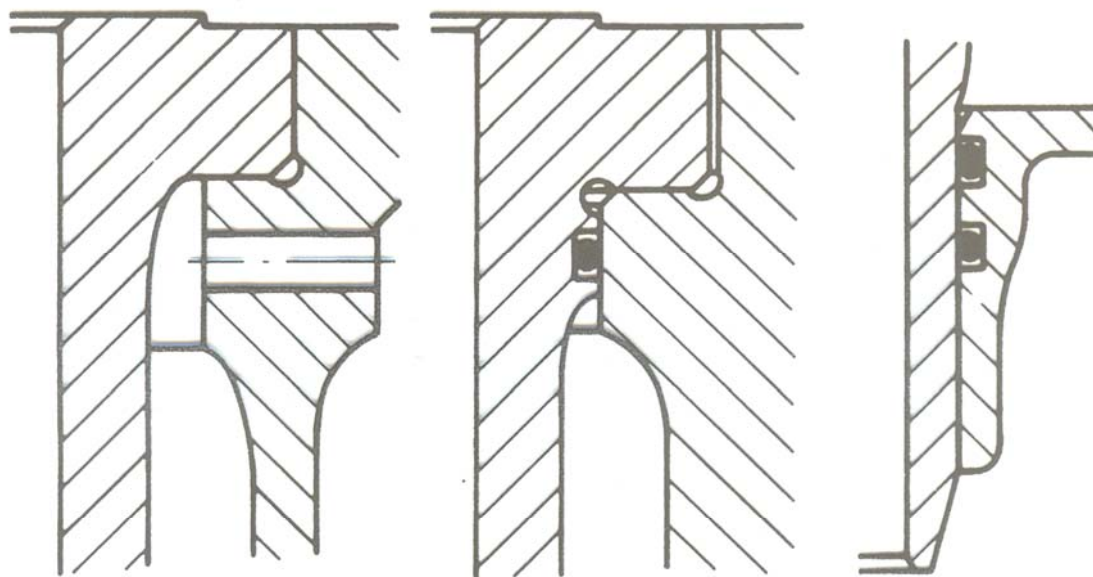


Grundformen wassergekühlter Zylinderrohre

A nasses Zylinderrohr

B trockenes Zylinderrohr

C integriertes Zylinderrohr



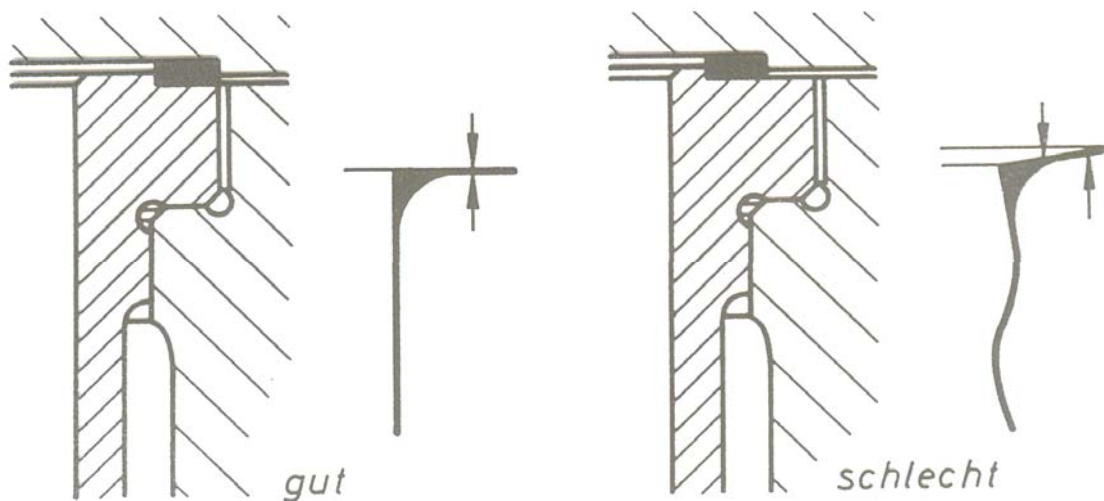
A

B

C

Nasse Zylinderrohre (Details)

Detail Zylinderbuchse Einspannung

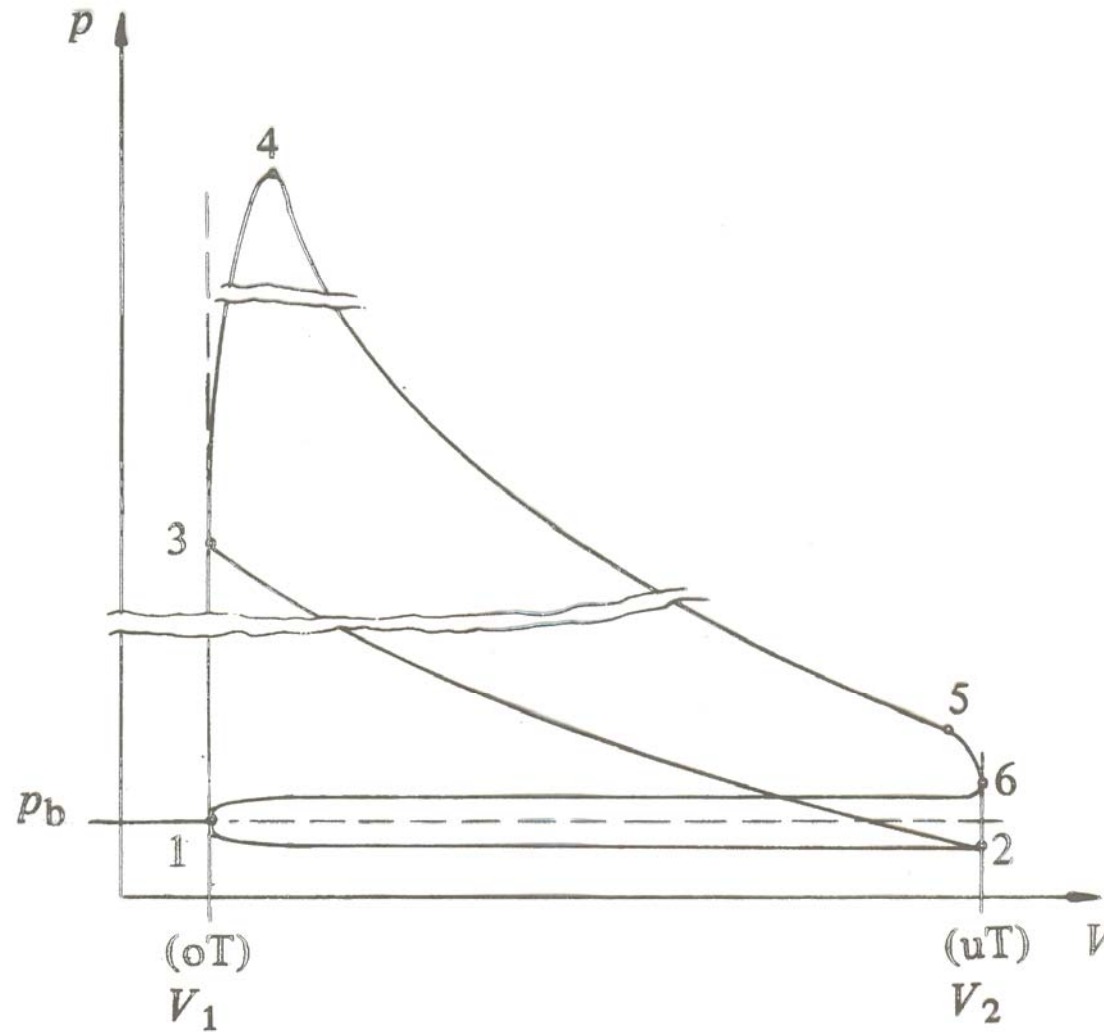


gut

schlecht

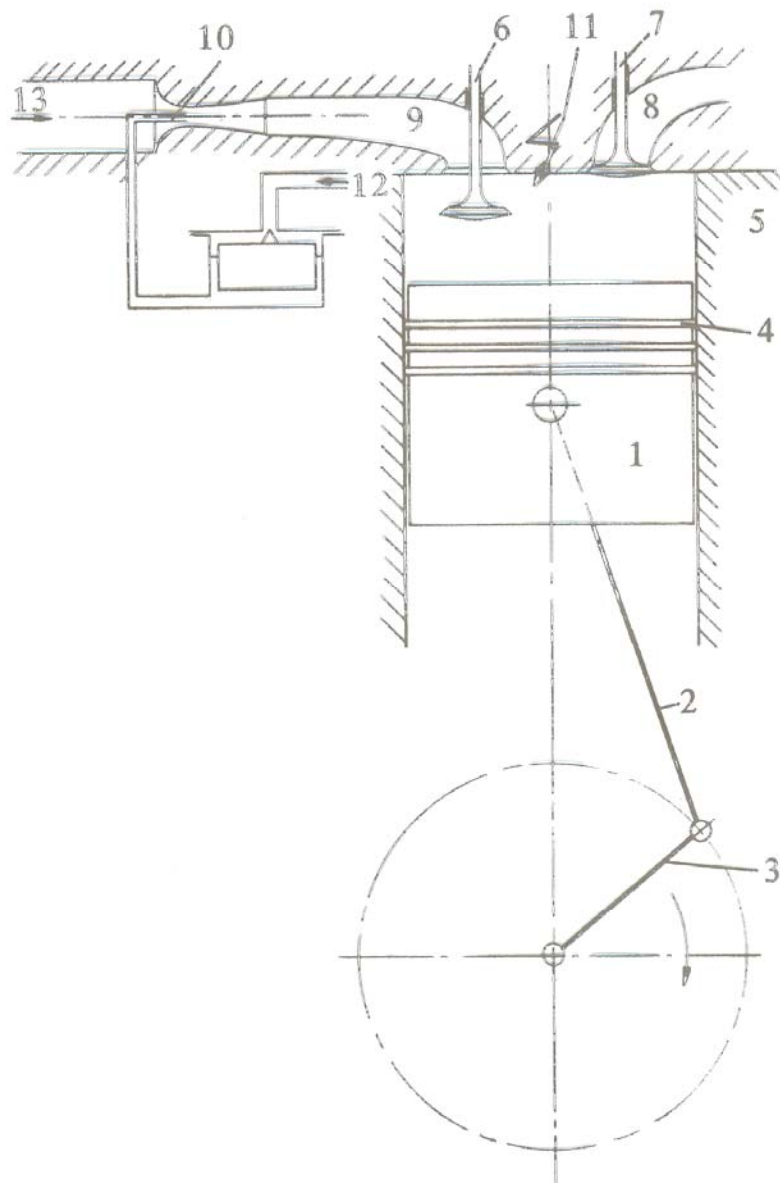
Ladungswechsel 4-Takt- Motor

Indikatordiagramm eines Viertakt-Ottomotors



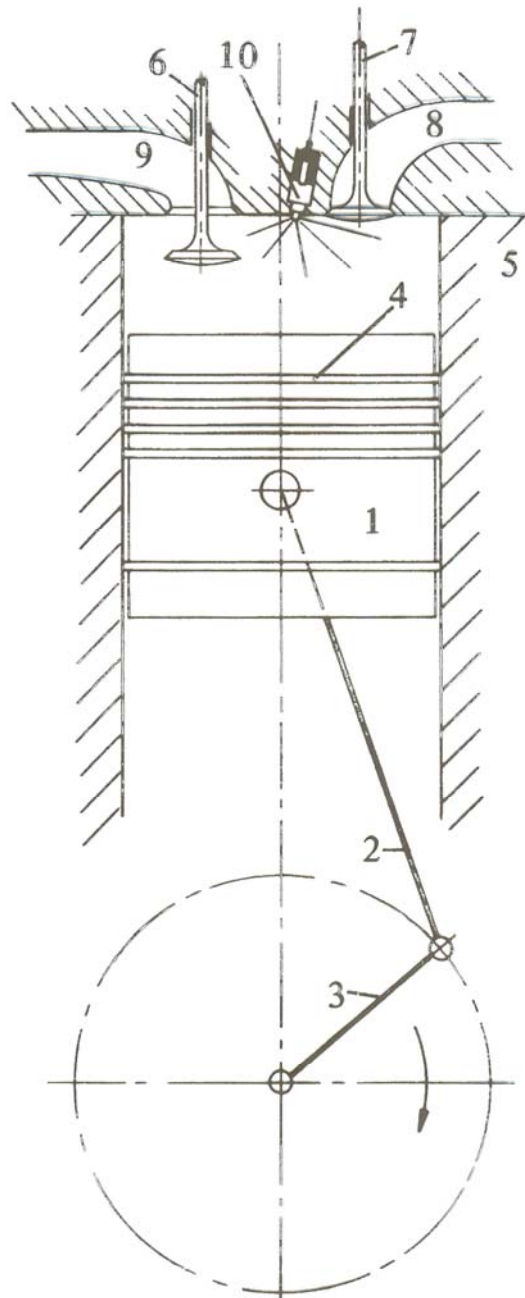
Quelle: Wagner / Fischer / Fromman

Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers



- 1 Kolben,
- 2 Pleuelstange,
- 3 Kurbelwelle,
- 4 Kolbenringe,
- 5 Zylinder,
- 6 Einlaßventil,
- 7 Auslaßventil,
- 8 Auslaßkanal,
- 9 Einlaßkanal,
- 10 Luftdüse,
- 11 Zündung,
- 12 Brennstoffstrom,
- 13 Luftstrom

Grundsätzlicher Aufbau des 4-Takt-Ottomotors



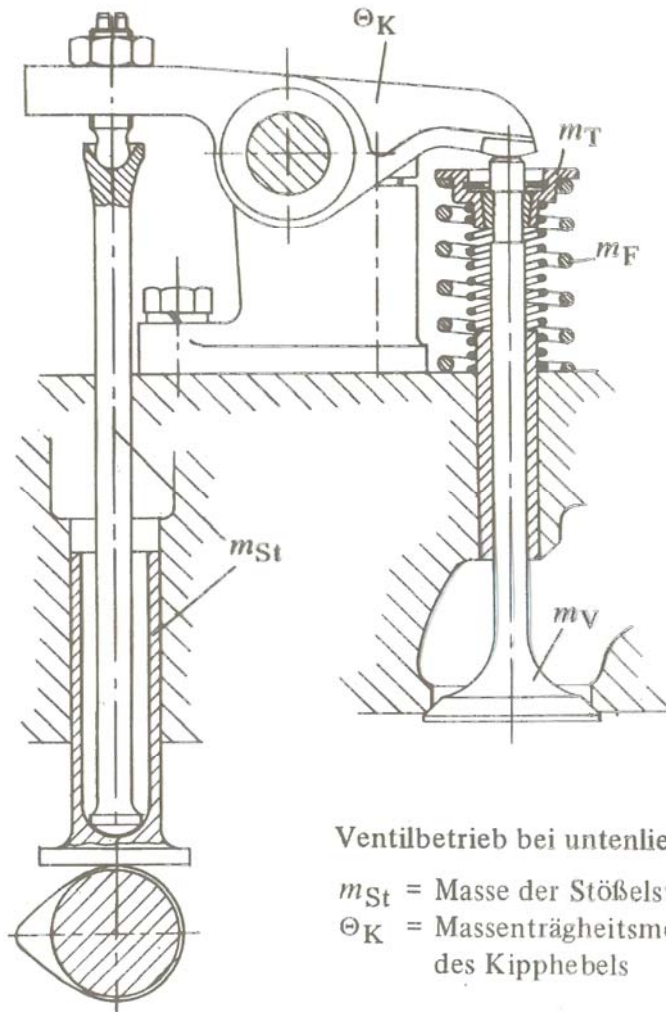
- 1 Kolben,
- 2 Pleuelstange,
- 3 Kurbelwelle,
- 4 Kolbenring,
- 5 Zylinderwand,
- 6 Einlaßventil,
- 7 Auslaßventil,
- 8 Auslaßkanal,
- 9 Einlaßkanal,
- 10 Einspritzdüse

Quelle: Wagner / Fischer / Fromman

Grundsätzlicher Aufbau des 4-Takt- Dieselmotors

Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers

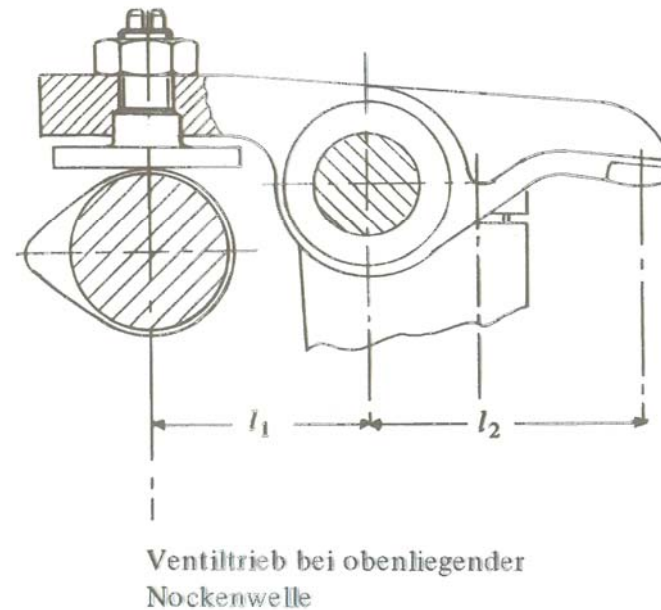
Ventieltrieb mit untenliegender bzw. obenliegender Nockenwelle



Ventilbetrieb bei untenliegender Nockenwelle

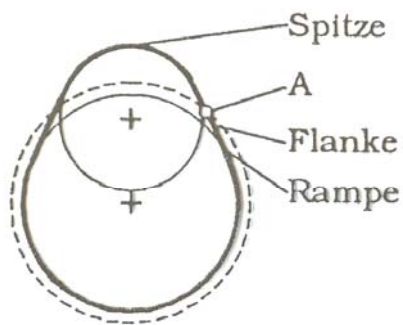
m_{St} = Masse der Stößelstange
 Θ_K = Massenträgheitsmoment
 des Kipphebels

m_T = Masse des Federtellers
 m_F = Masse der Feder
 m_V = Masse des Ventils



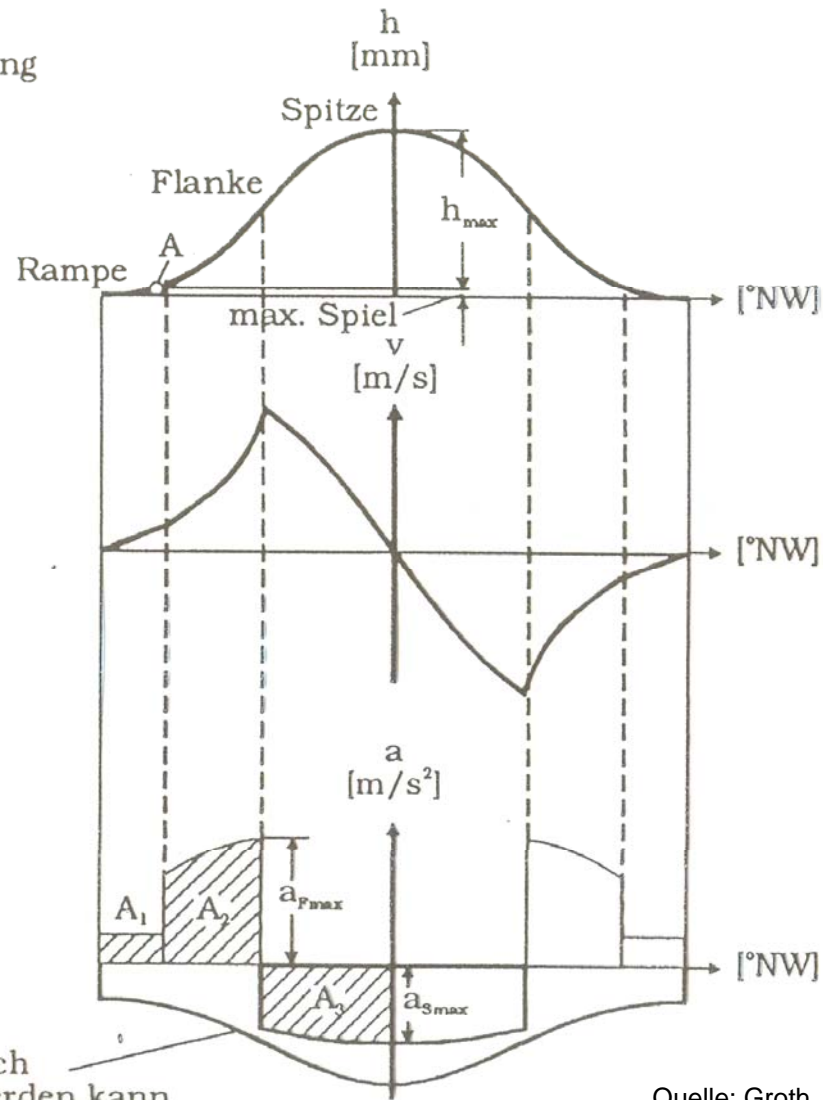
Ventiltrieb bei obenliegender Nockenwelle

A = Beginn der Ventilöffnung
bei kaltem Motor



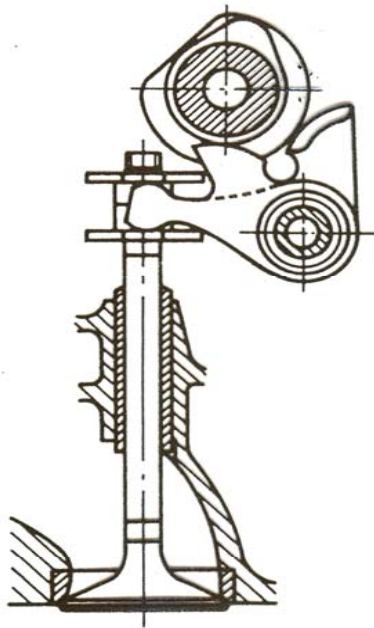
$$A_1 + A_2 = A_3$$

Beschleunigung, die durch
Ventilfeder ermöglicht werden kann



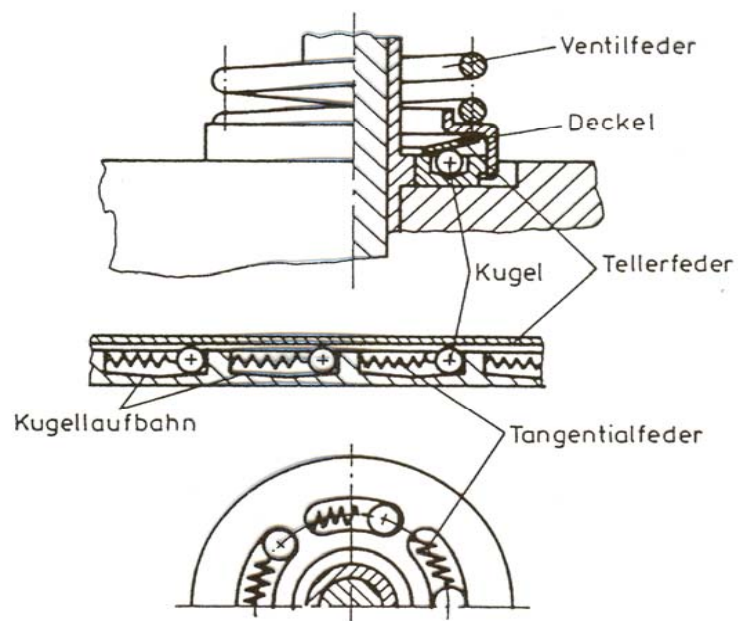
Ventilgeschwindigkeit und -beschleunigung

Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers



a)

Quelle: Pischinger

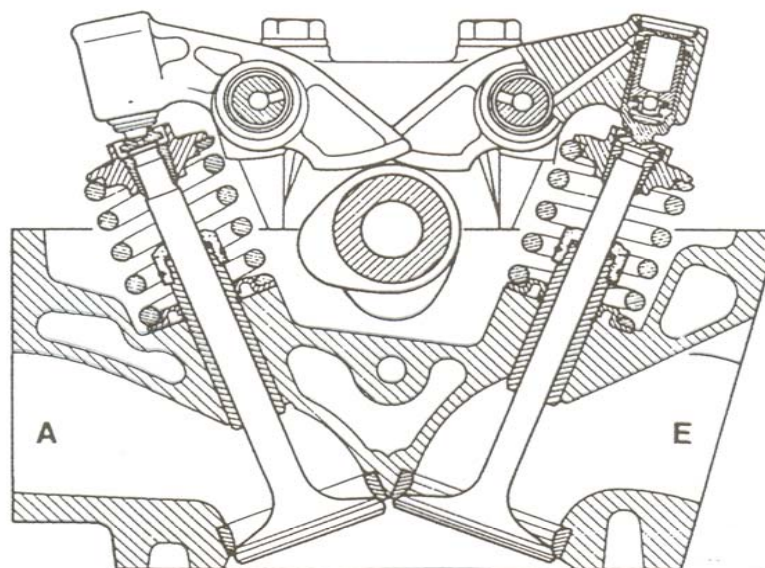


b)

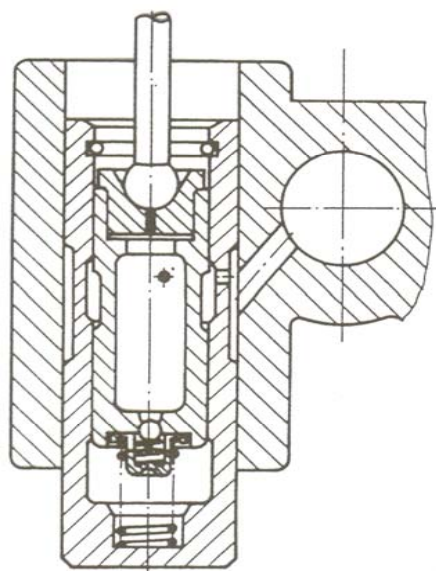
Quelle: Urlaub

Ventilzangssteuerung und Ventildrehvorrichtung (Rotocap)

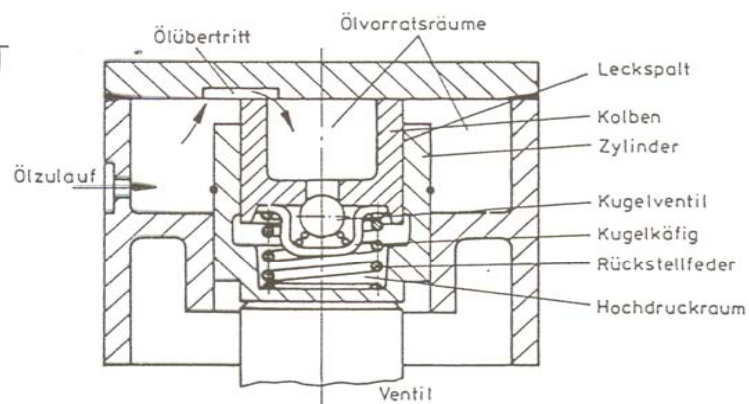
Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers



a)



b)



c)

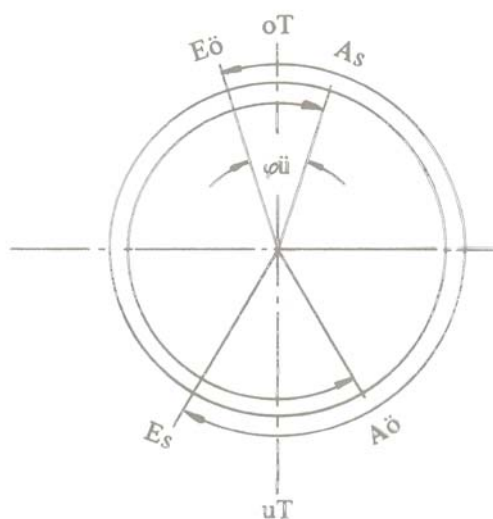
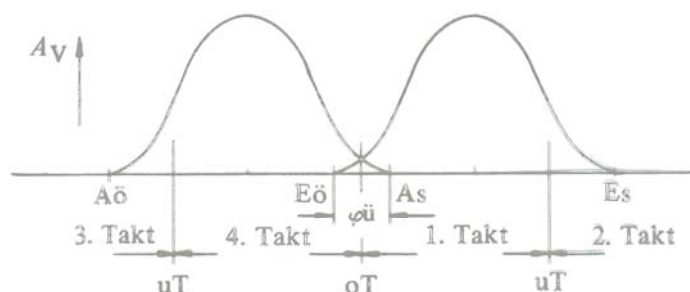
Quelle: Pischinger

Hydraulischer Ventilspielausgleich

Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers

Angaben in °KW (Grad Kurbelwinkel)

| | Eö in °KW vor oT | Es in °KW nach uT | Aö in °KW vor uT | As in °KW nach oT |
|----------------------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| Ottomotoren | 10 ... 20 | 35 ... 45 | 45 ... 55 | 5 ... 15 |
| Dieselmotoren, schnelllaufend | 15 ... 30 | 30 ... 50 | 30 ... 55 | 5 ... 30 |
| langsamlaufend | 5 ... 30 | 30 ... 50 | 30 ... 50 | 5 ... 30 |
| mit Abgasturbo- aufladung | 50 ... 80 | 30 ... 50 | 45 ... 70 | 50 ... 70 |



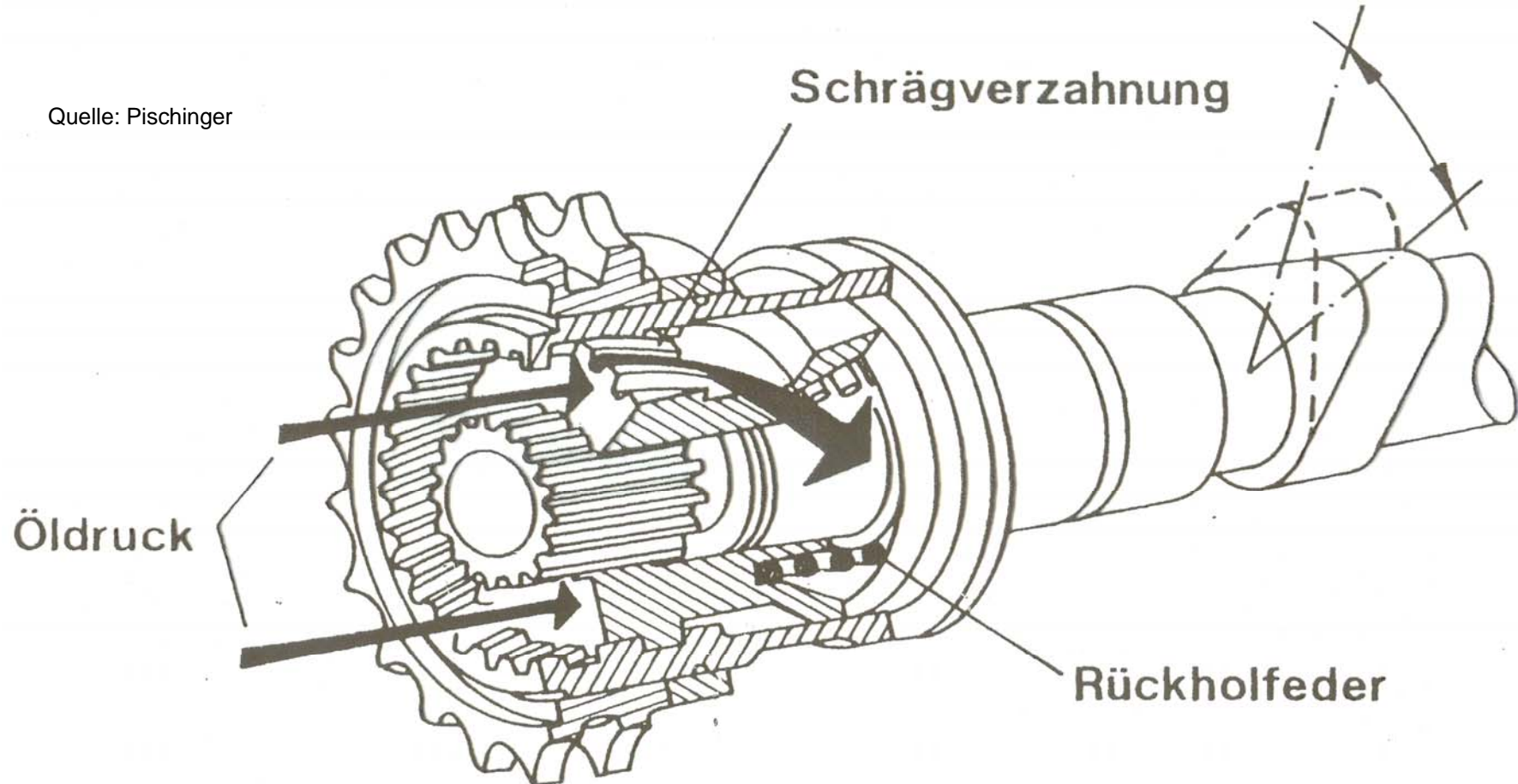
Ventilöffnungsquerschnitt als Funktion
des Kurbeldrehwinkels und
Steuerdiagramm

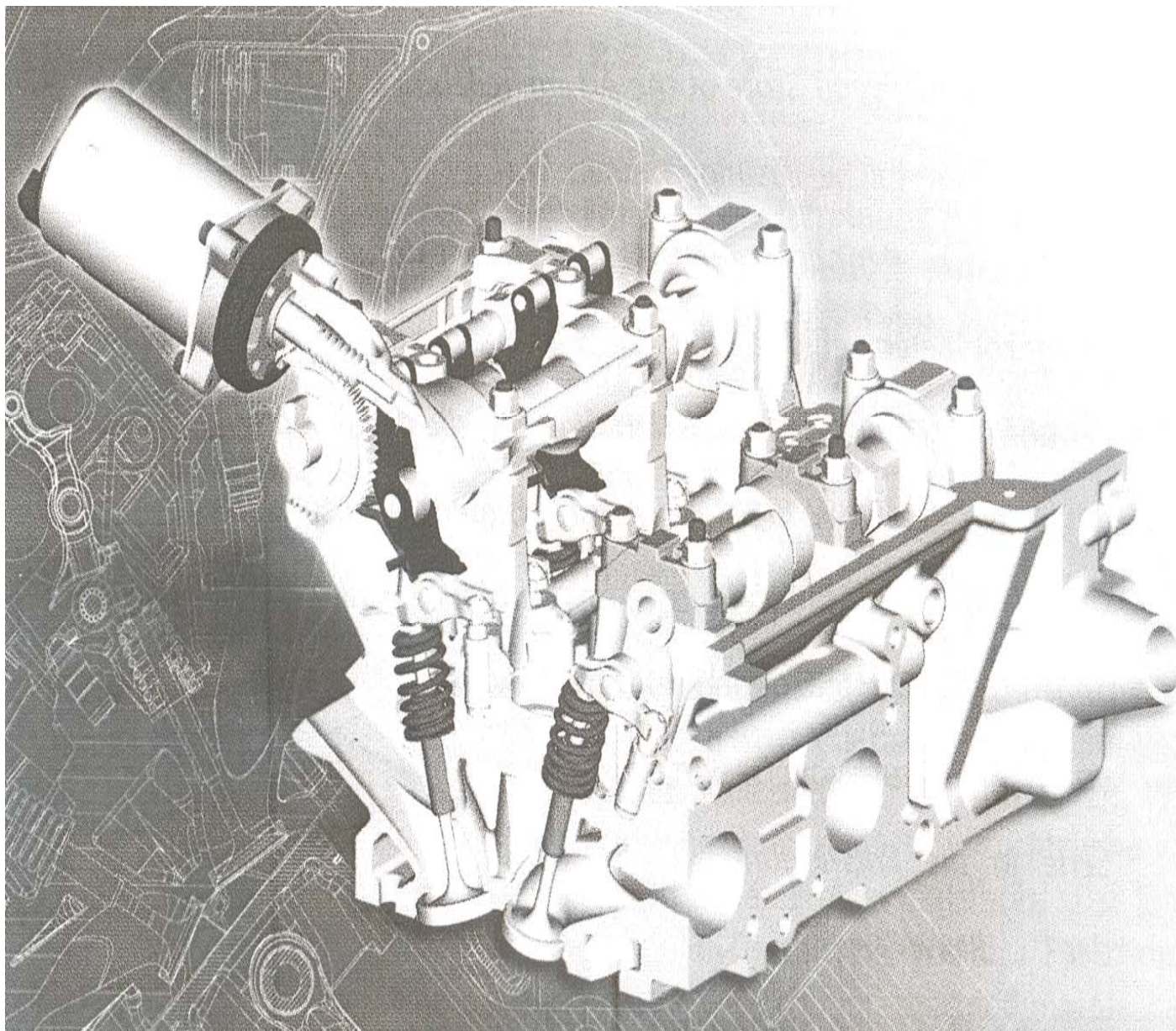
- A_V – Ventilöffnungsquerschnitt
- Eö – Einlaß öffnet
- Es – Einlaß schließt
- Aö – Auslaß öffnet
- As – Auslaß schließt
- oT – oberer Totpunkt
- uT – unterer Totpunkt
- $\varphi_{\ddot{u}}$ – Winkel der Ventilüberschneidung

Steuerzeitentabelle, Ventilöffnungsquerschnitts- und Steuerdiagramm

Nockenwellenversteller

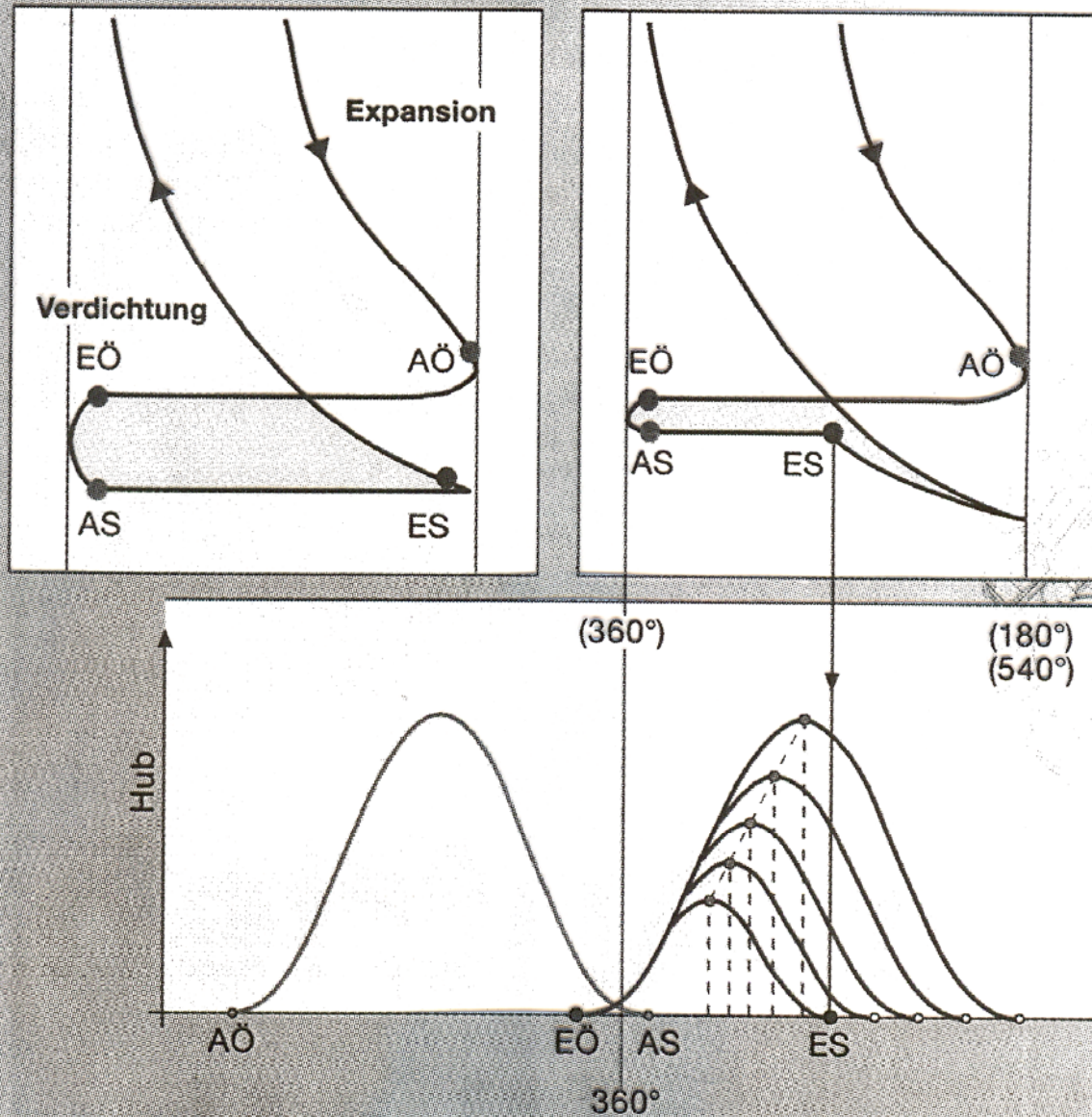
Quelle: Pischinger





Querschnitt des Valvetronic-Systems
BMW

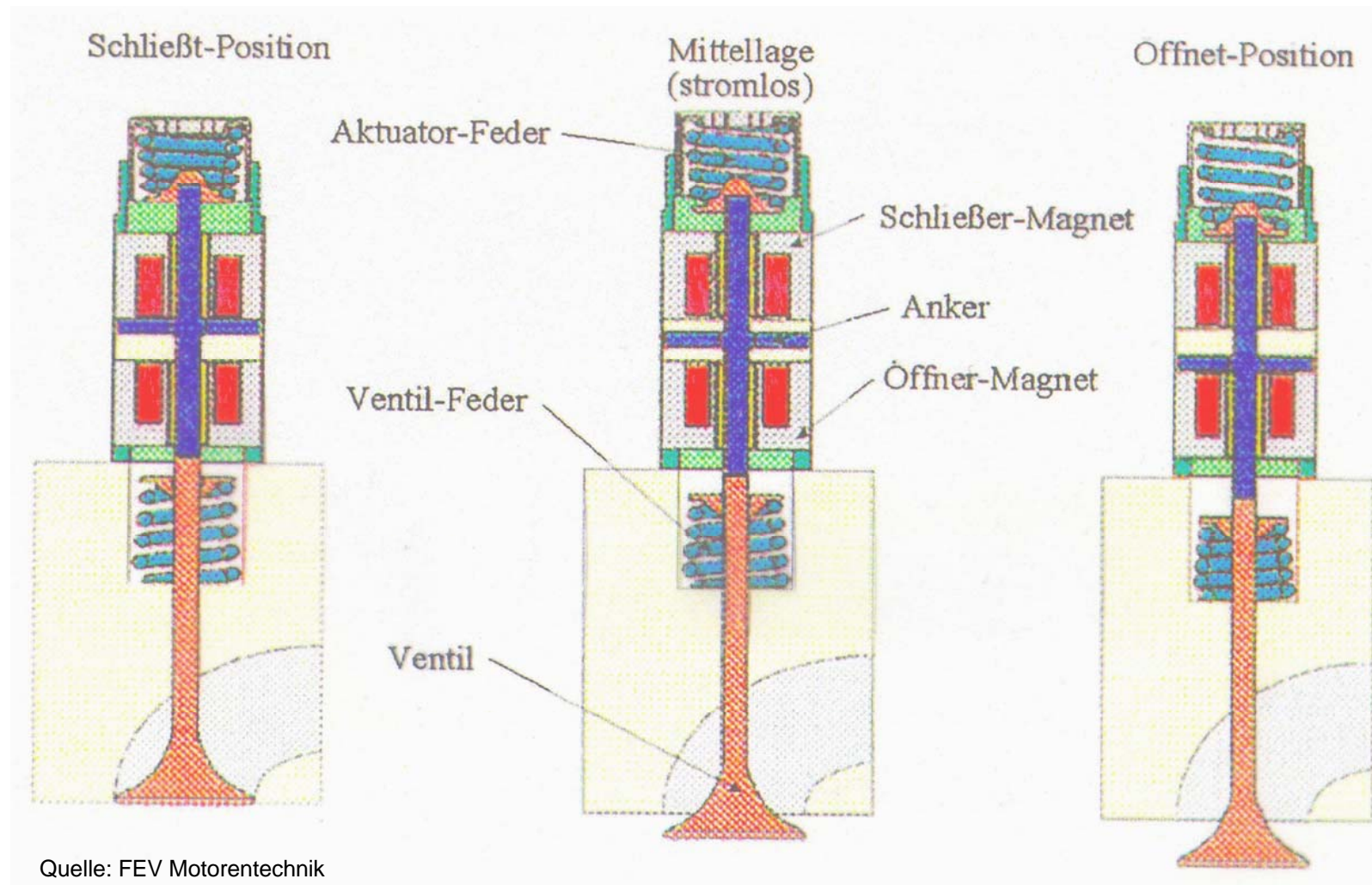
Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers



Prinzip "früher Einlassschluss"

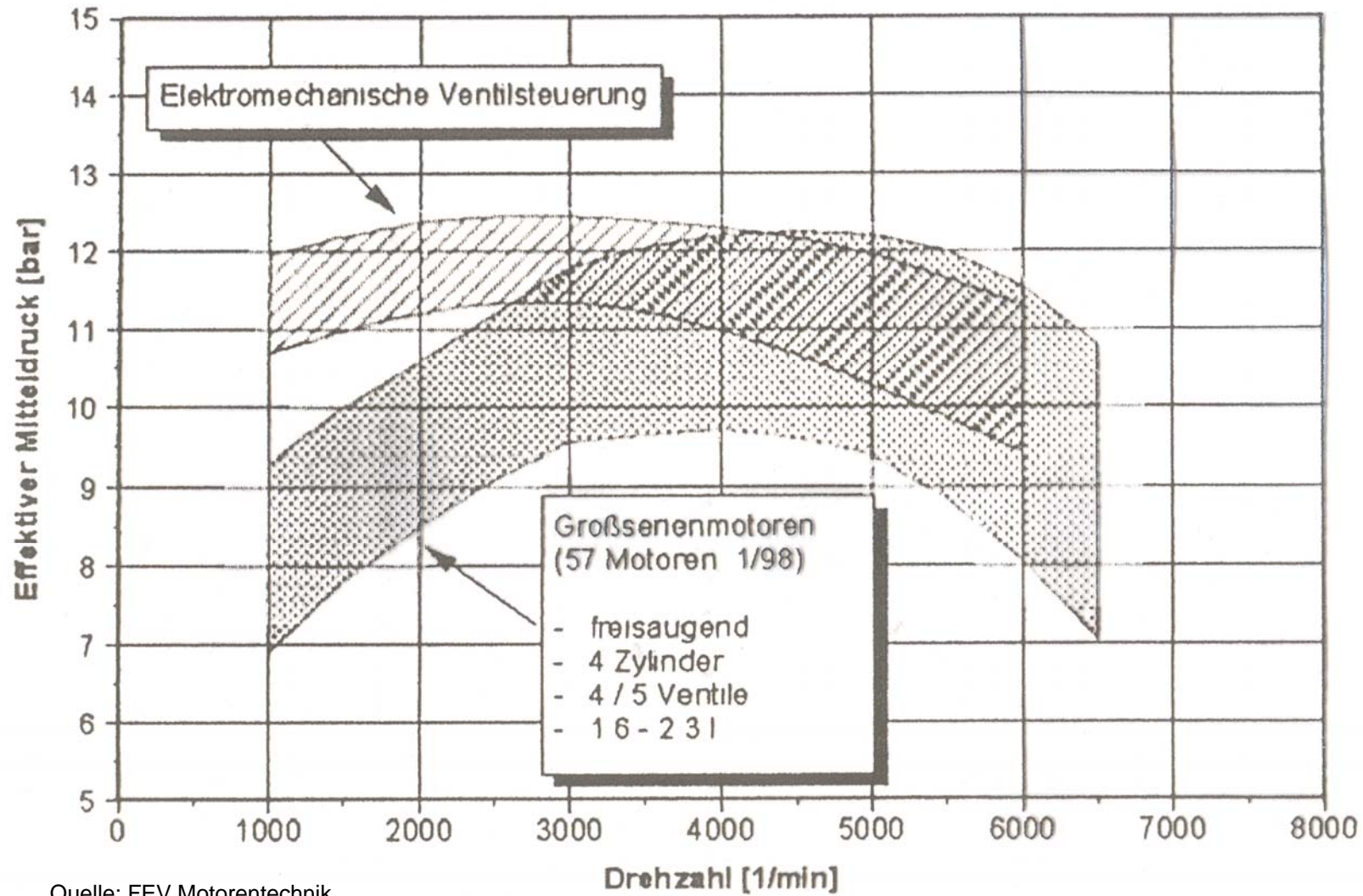
Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers

Prinzip: Elektromechanischer Ventiltrieb

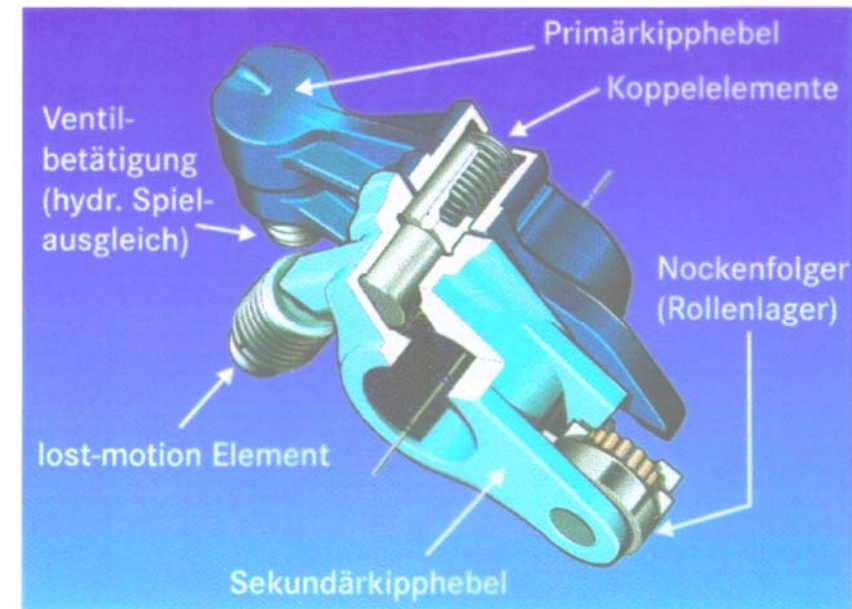


Quelle: FEV Motorentechnik

Vergleich der effektiven Mitteldrücke an der Vollast



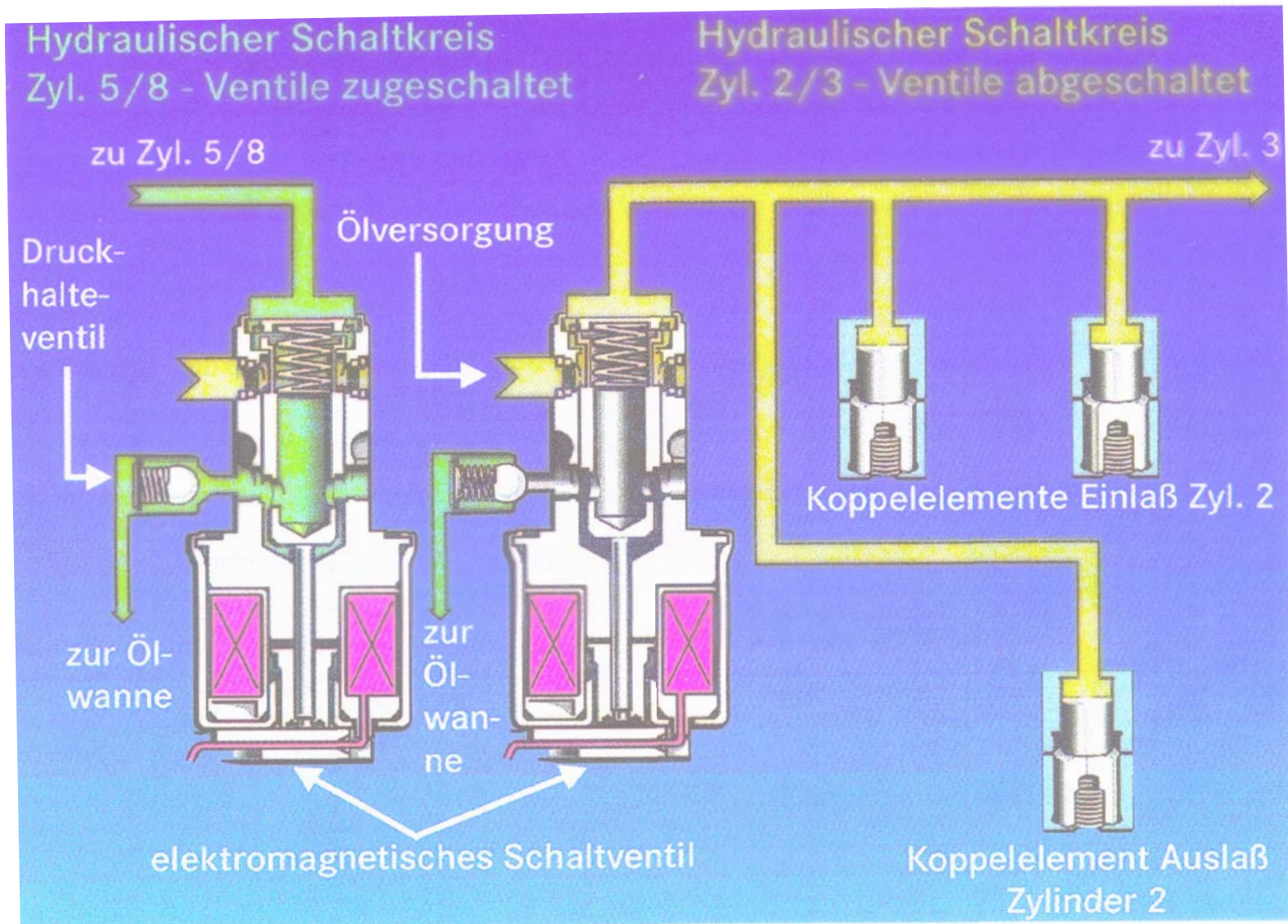
Quelle: FEV Motorentechnik



Quelle: Daimler-Benz

V8 Motor mit Zylinderabschaltung;
Ventiltrieb mit Koppelhebelsatz

Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers

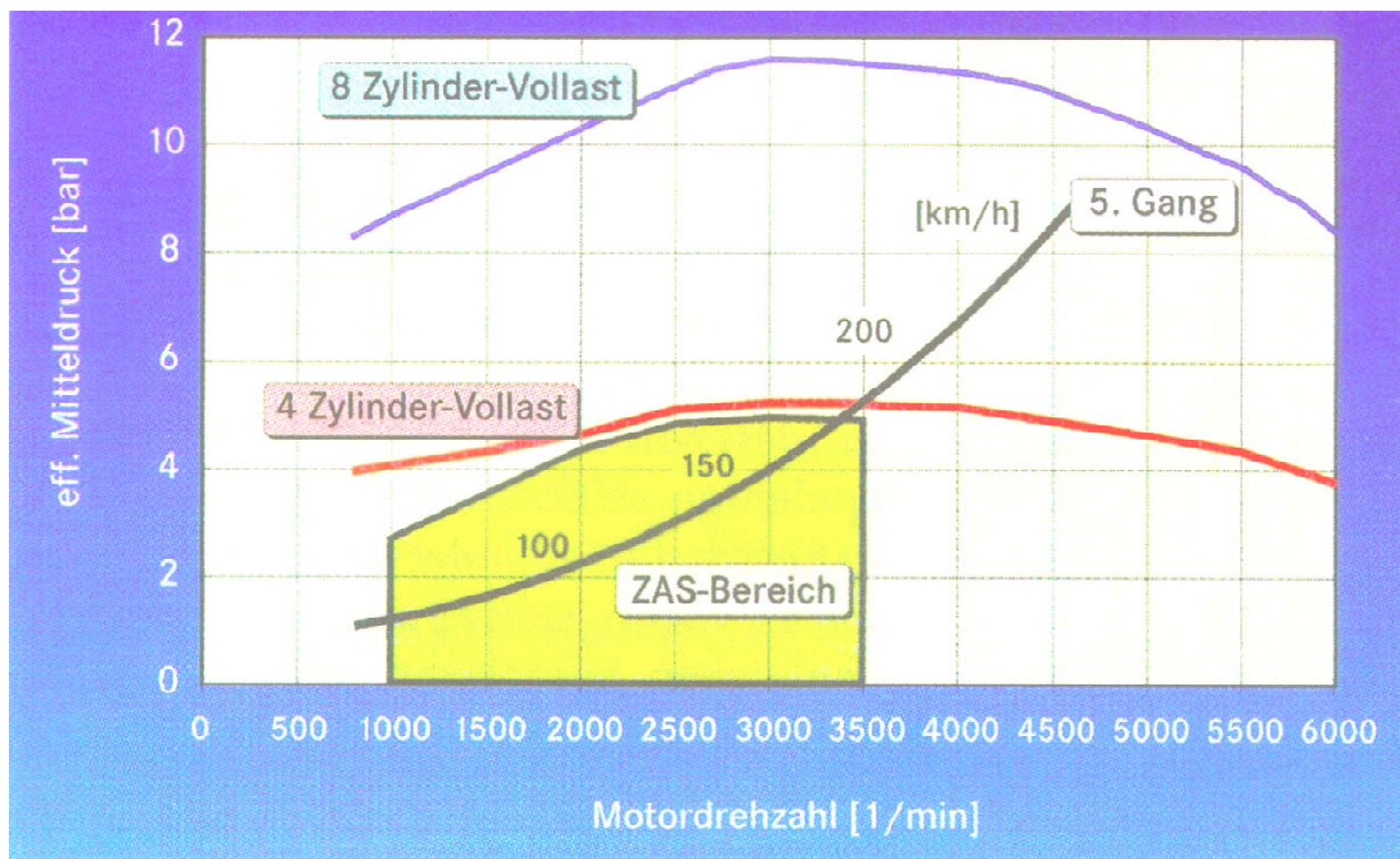


Zylinderabschaltsystem:

Schematischer Ölaufplan und Schaltventil

Verbrennungskraftmaschinen

Prof. Dr.-Ing. E. Reimers



Quelle: Daimler-Benz

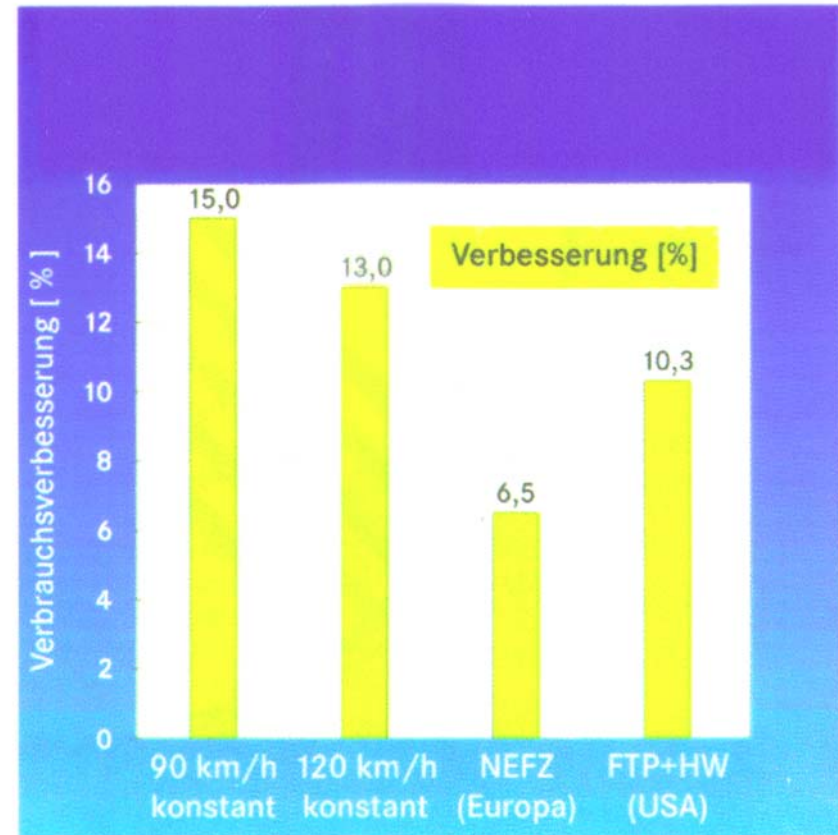
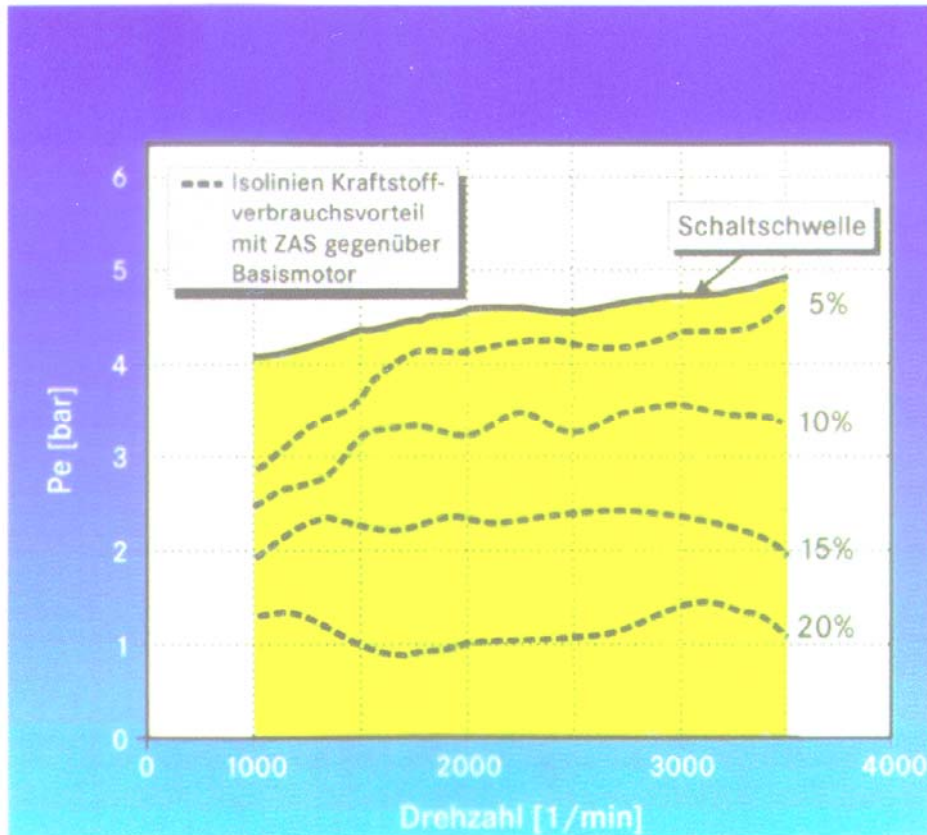
Betriebsbereich Zylinderabschaltung

Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers

Kraftstoffverbrauchssenkung durch ZAS

links: Teillast abhängig u

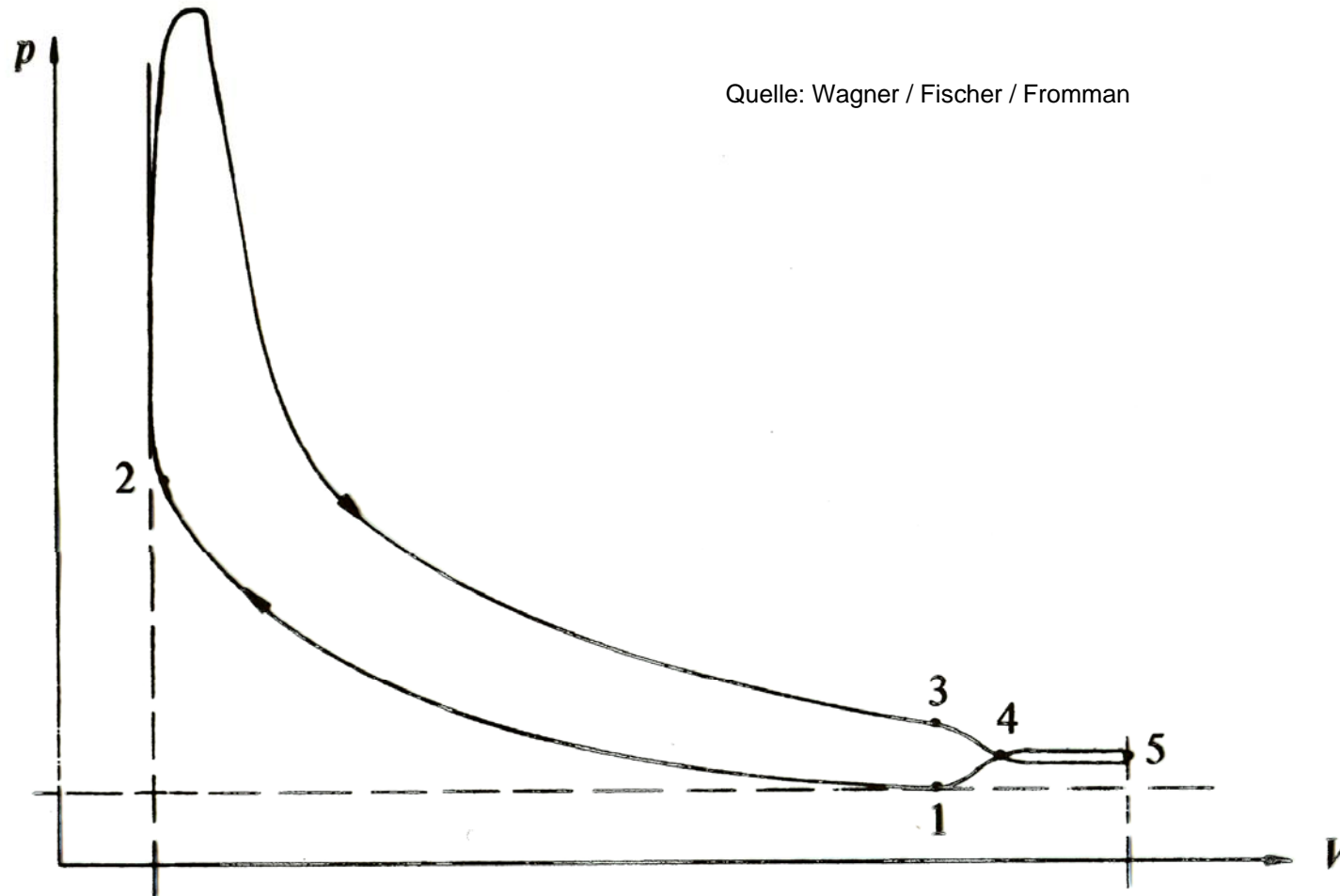
rechts: im Zyklus



Quelle: Daimler-Benz

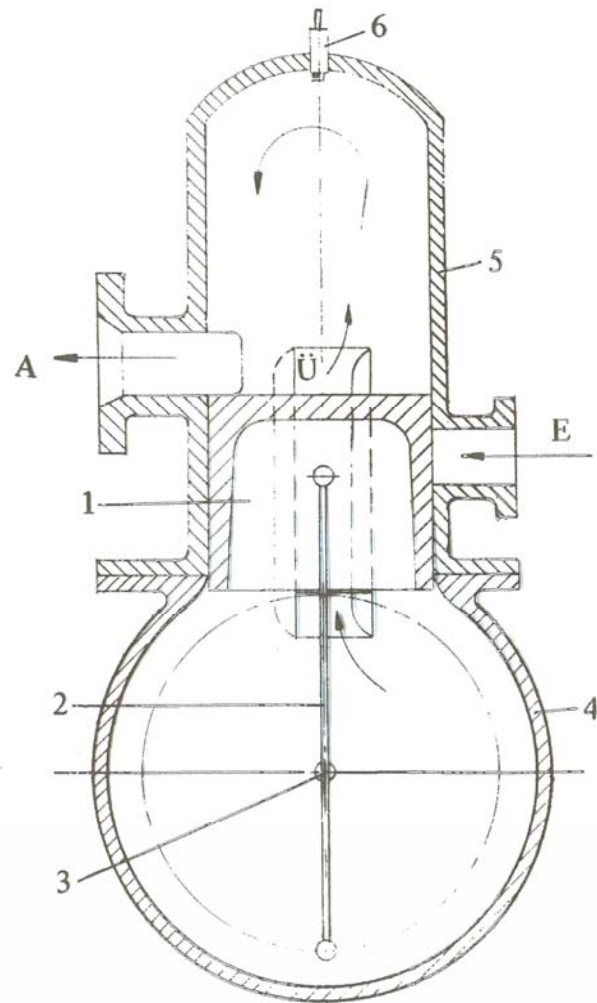
Ladungswechsel 2-Takt-Motor

Vereinfachtes Indikatordiagramm eines Zweitakt-Ottomotors mit Umkehrspülung



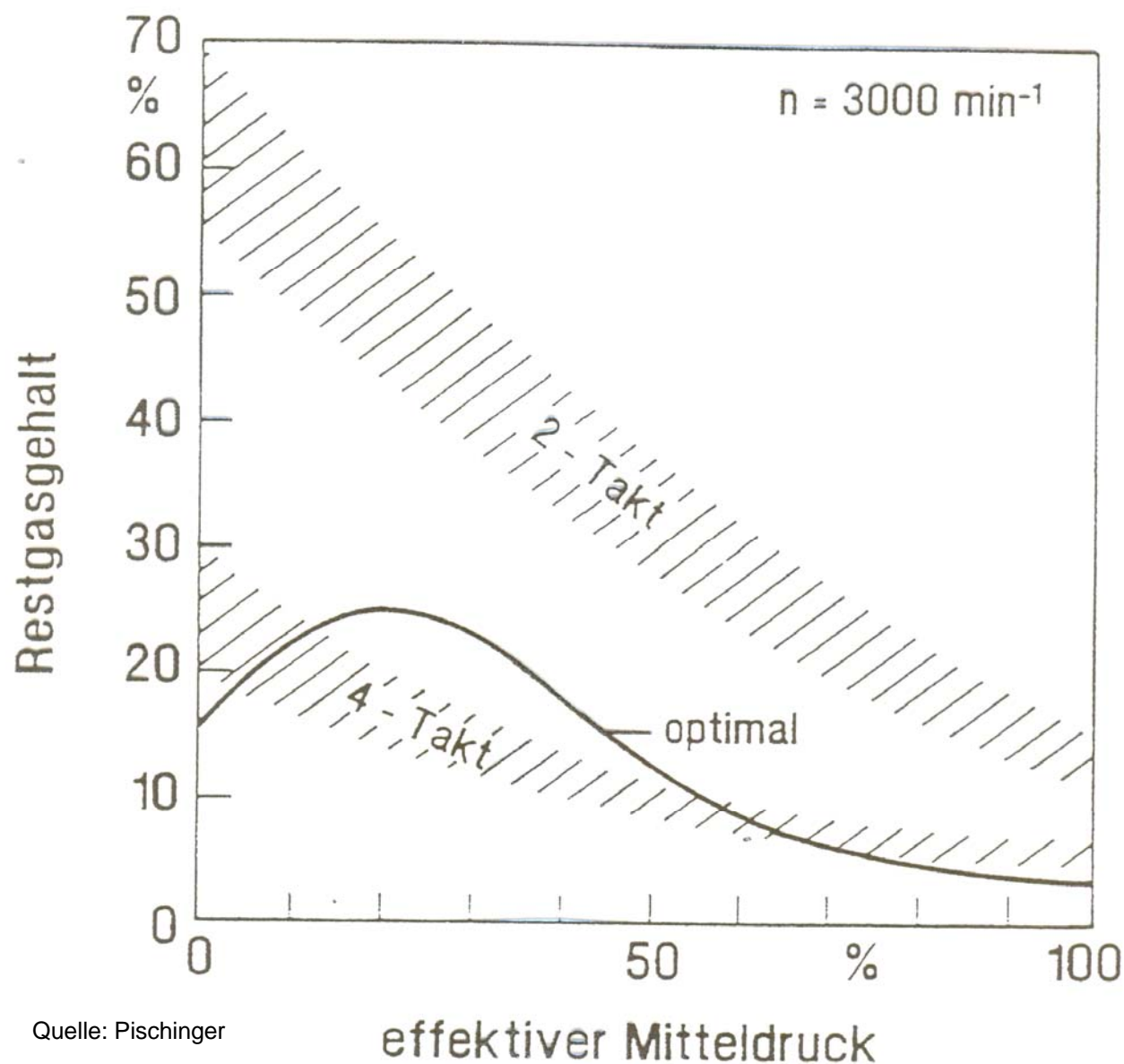
Prinzipieller Aufbau eines Zweitakt-Ottomotors

Quelle: Wagner / Fischer / Fromman



Prinzipieller Aufbau eines Zweitakt-Ottomotors

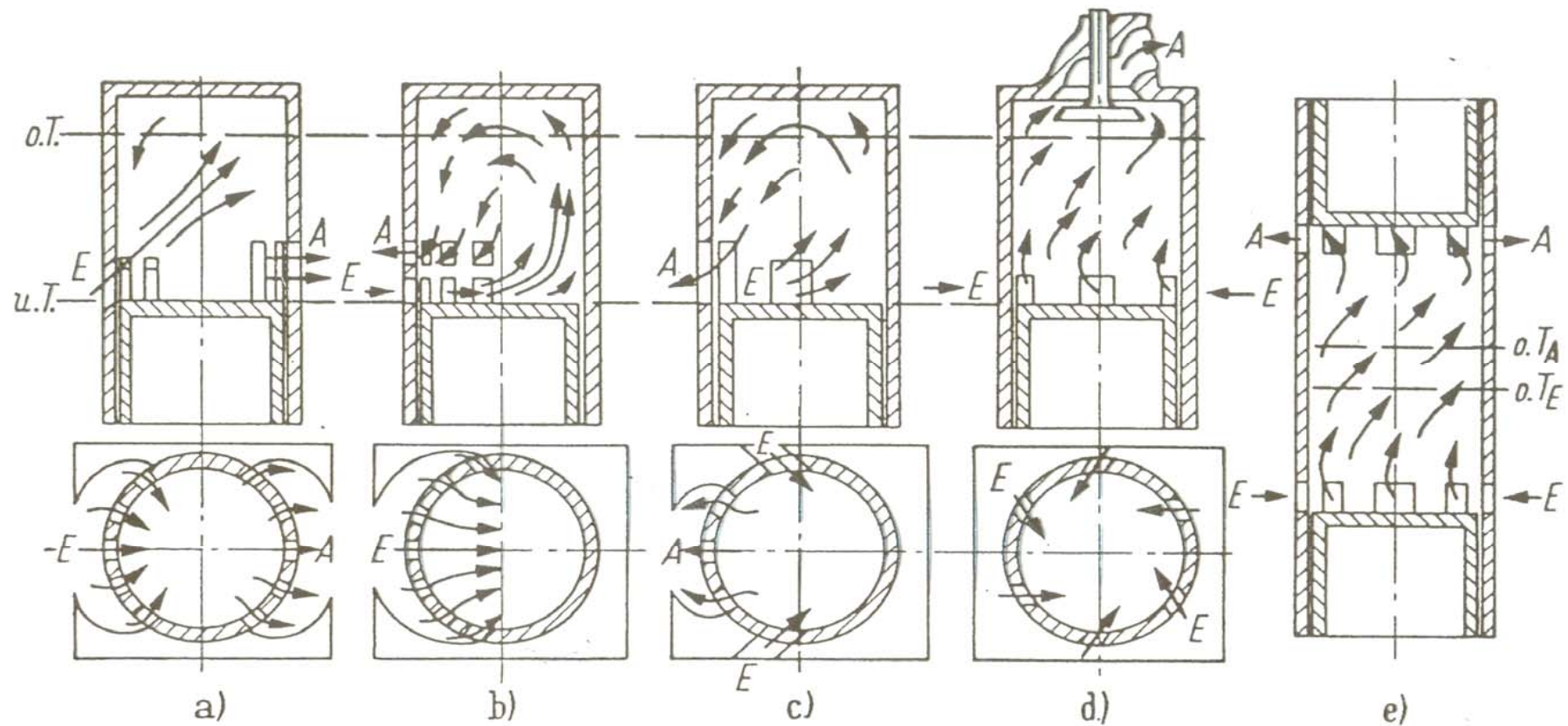
- 1 Kolben,
- 2 Pleuelstange,
- 3 Kurbelwelle,
- 4 Kurbelgehäusewandung,
- 5 Zylinderwandung
- 6 Zündkerze,
- E Einlaßkanal vom Vergaser,
- Ü Überströmkanal vom Kurbelgehäuse,
- A Auslaßkanal zum Auspuff



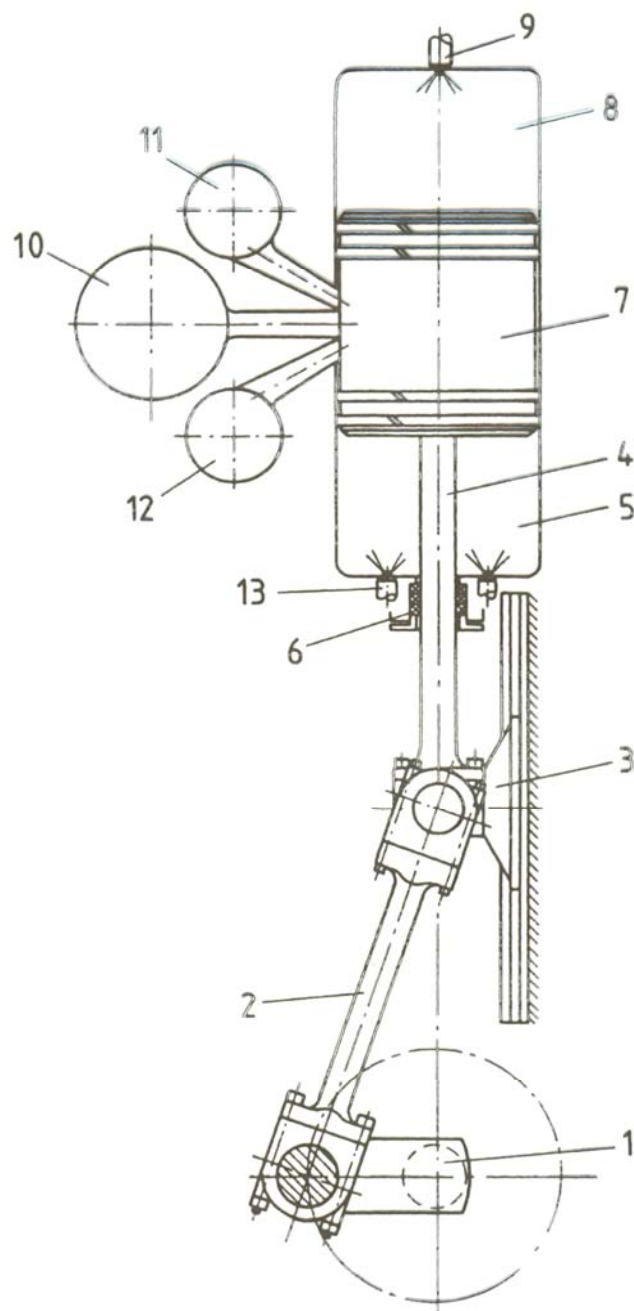
Quelle: Pischinger

Restgasgehalt über Last beim Ottomotor

Spülverfahren bei Zweitaktmotoren



a) Querspülung; b) Umkehrspülung nach MAN; c) Umkehrspülung nach SCHNÜRLE;
d) Gleichstromspülung mit Auslaßventil; e) Gleichstromspülung mit Auslaßkolben



Doppelwirkende Großmaschine
mit Umkehrspülung

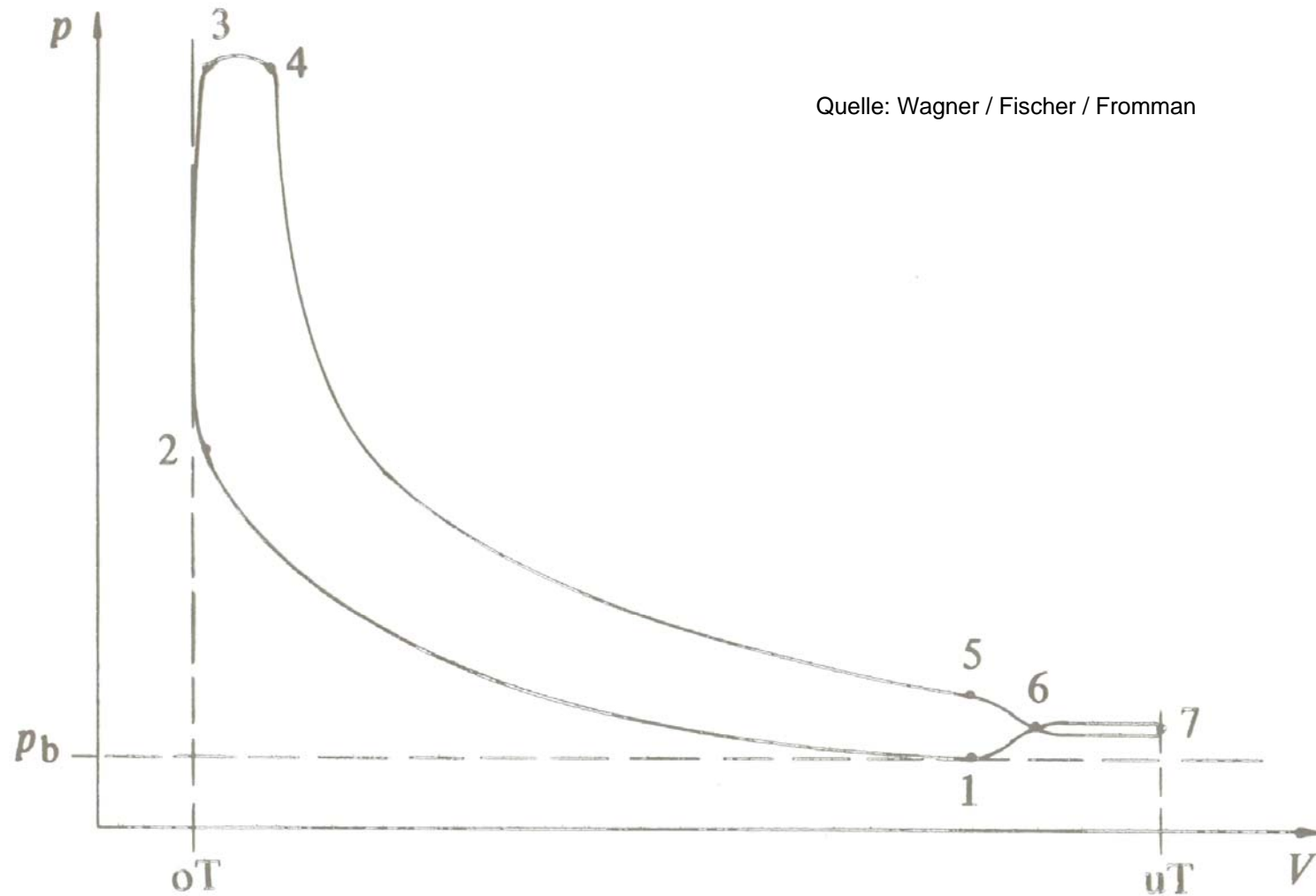
- 1 Kurbelwelle,
- 2 Pleuelstange,
- 3 Gleitschuh
- 4 Kolbenstange,
- 5 Unterer Zylinder,
- 6 Stopfbuchsendichtung,
- 7 Kolben,
- 8 Oberer Zylinder,
- 9 Obere Einspritzdüse,
- 10 Spülluftsammler,
- 11 Oberer Abgassammler,
- 12 Unterer Abgassammler
- 13 Untere Einspritzdüse

Quelle: Wagner / Fischer / Fromman

Doppeltwirkender Zweitakt- Großdieselmotor, mit Kreuzkopf

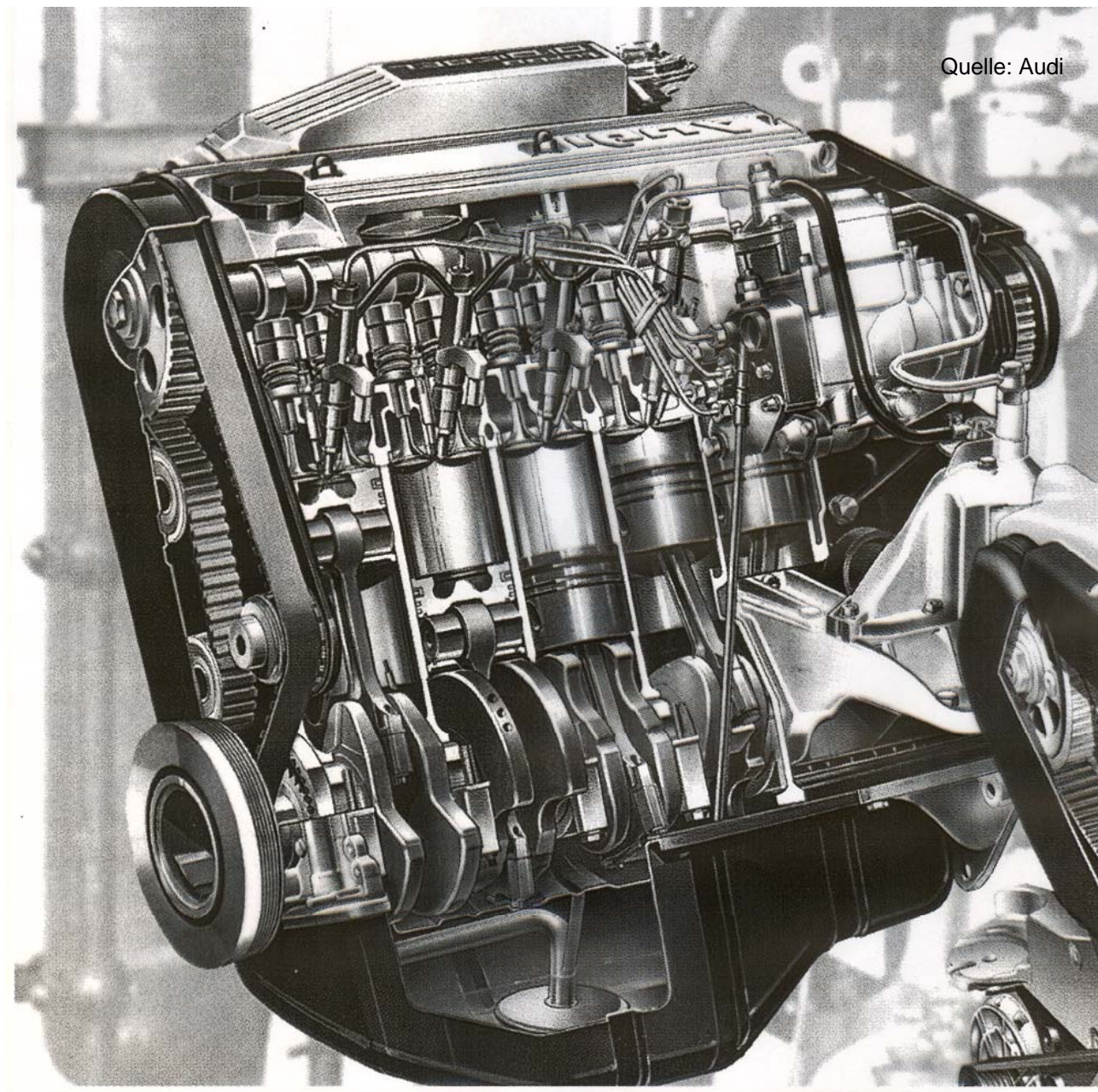
Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers

Indikatordiagramm eines Zweitakt-Dieselmotors



Gemischbildung Einspritzanlagen Dieselmotor

Quelle: Audi

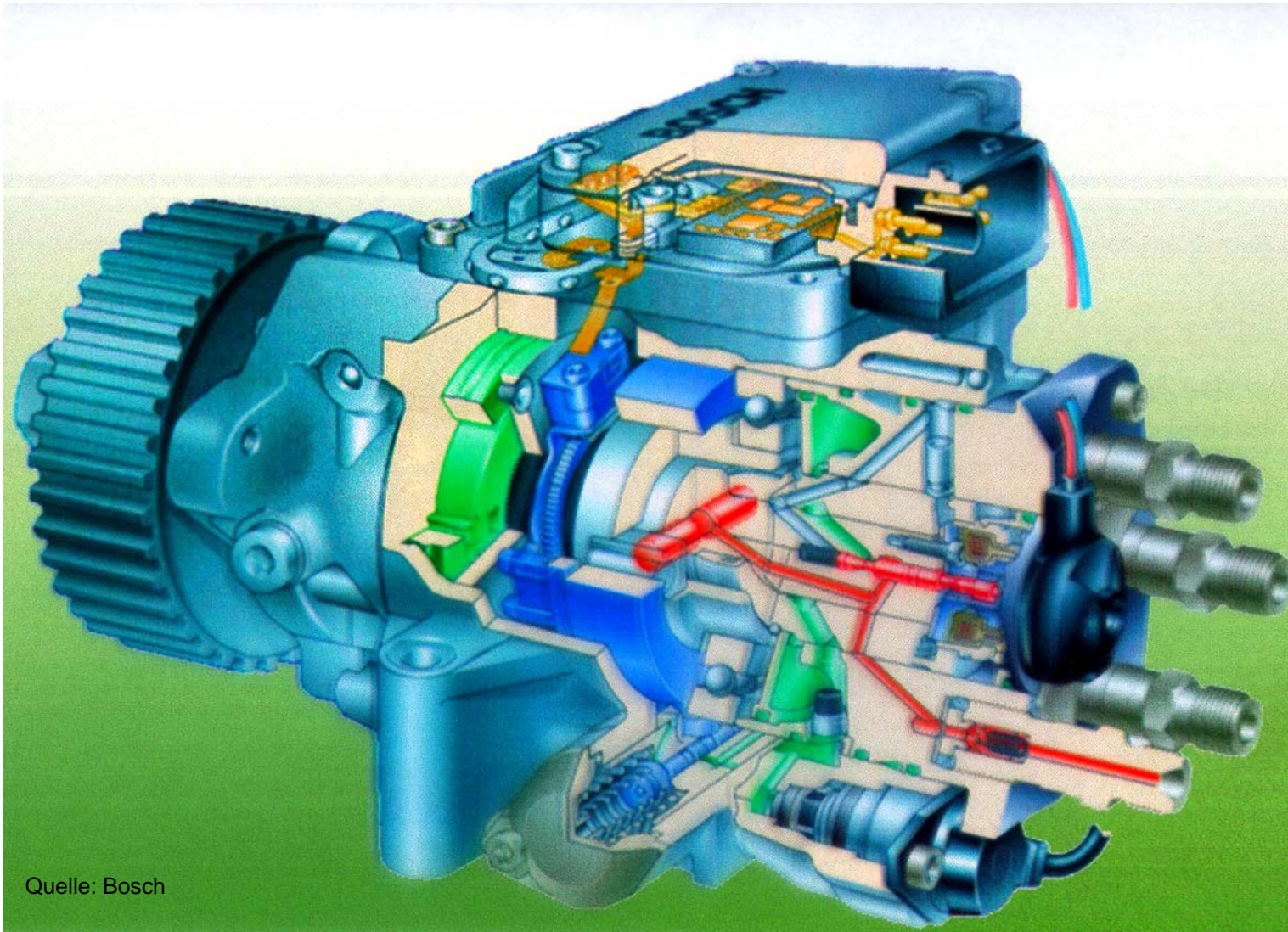


Audi 5-Zylinder Dieselmotor mit Verteiler- einspritzpumpe

Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers

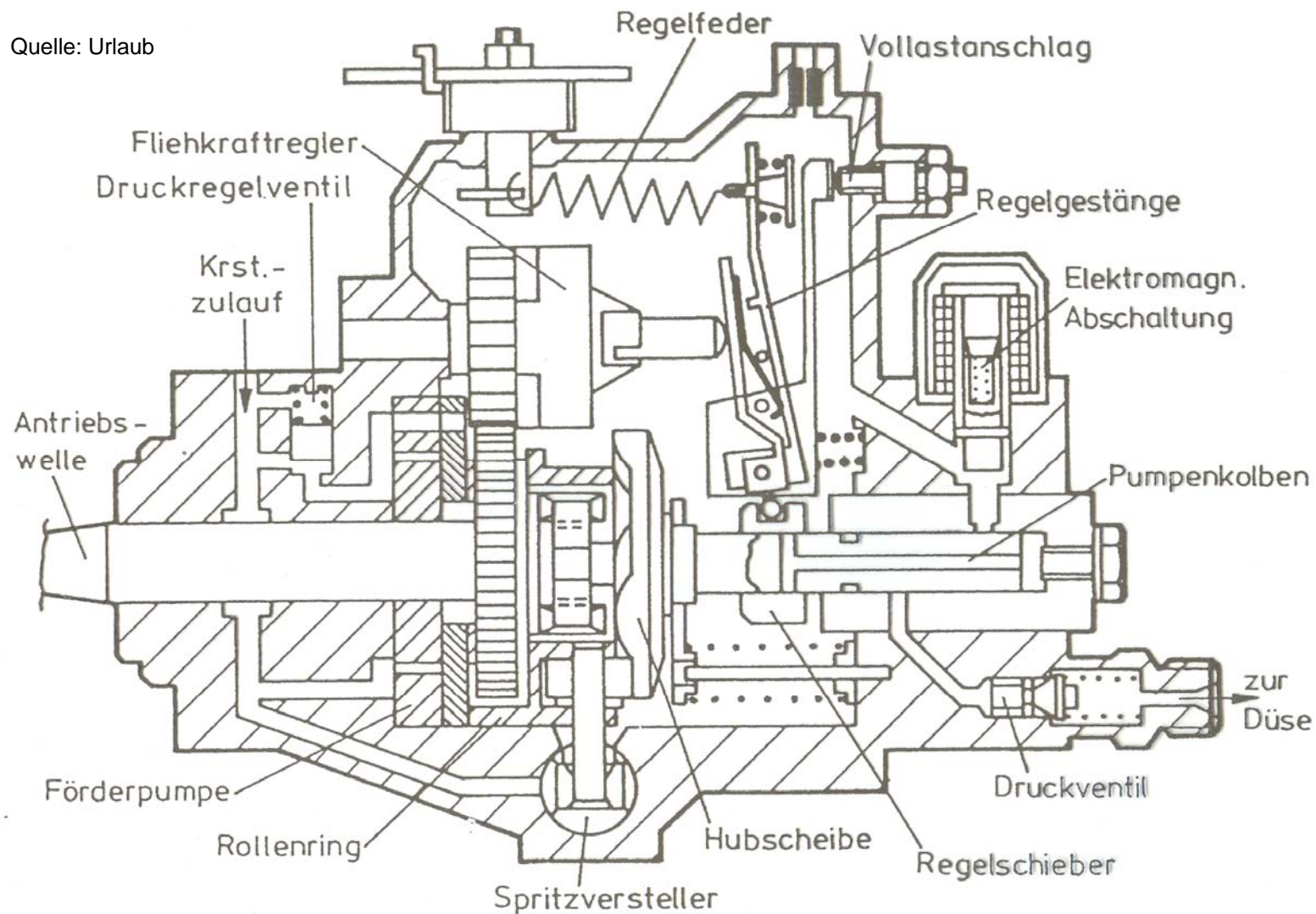
Radialkolbeneinspritzpumpe

bis 1500 bar, Mengenregelung über elektronisch gesteuerte Magnetventile



Quelle: Bosch

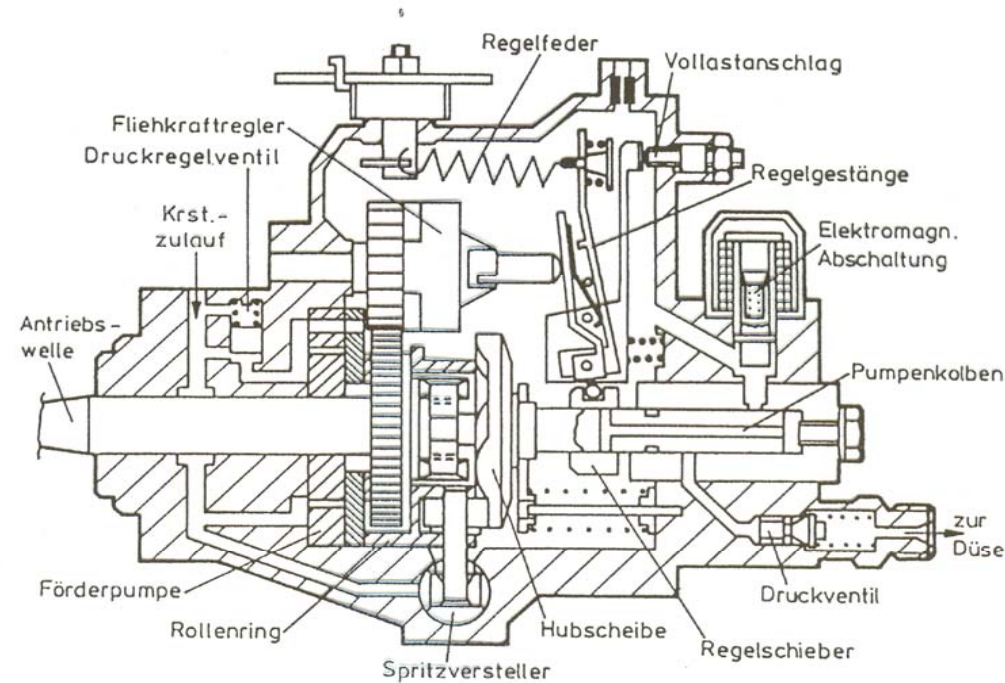
Quelle: Urlaub



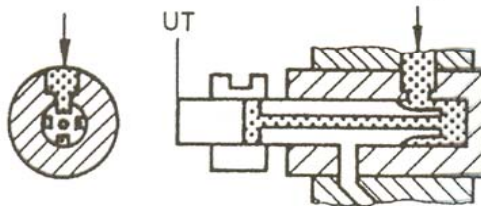
Bosch – Verteilereinspritzpumpe (axial)

Verbrennungskraftmaschinen

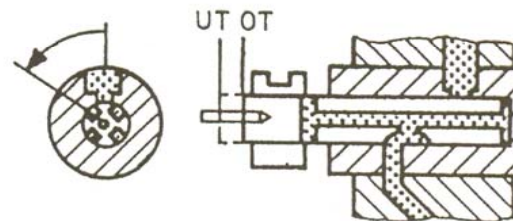
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers



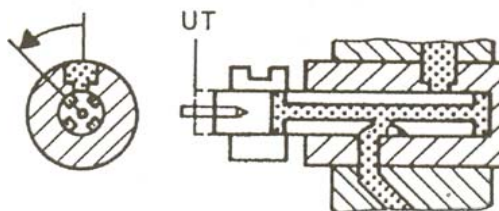
Phase "A"



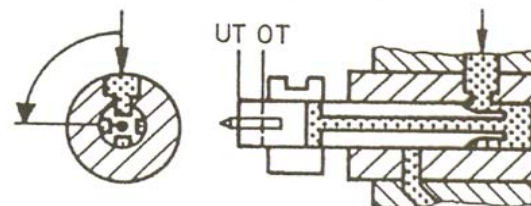
Phase "C"



Phase "B"

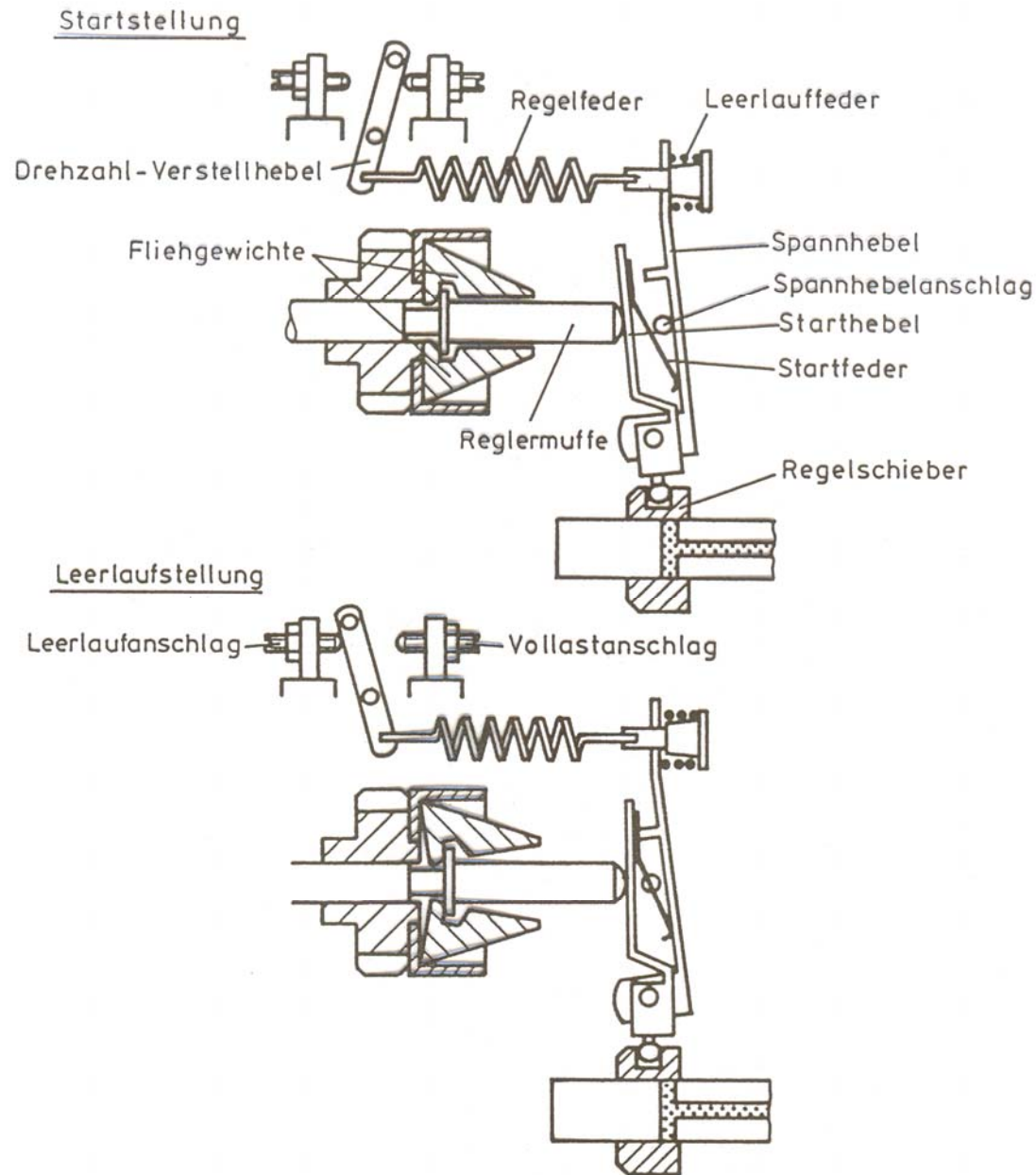


Phase "D"

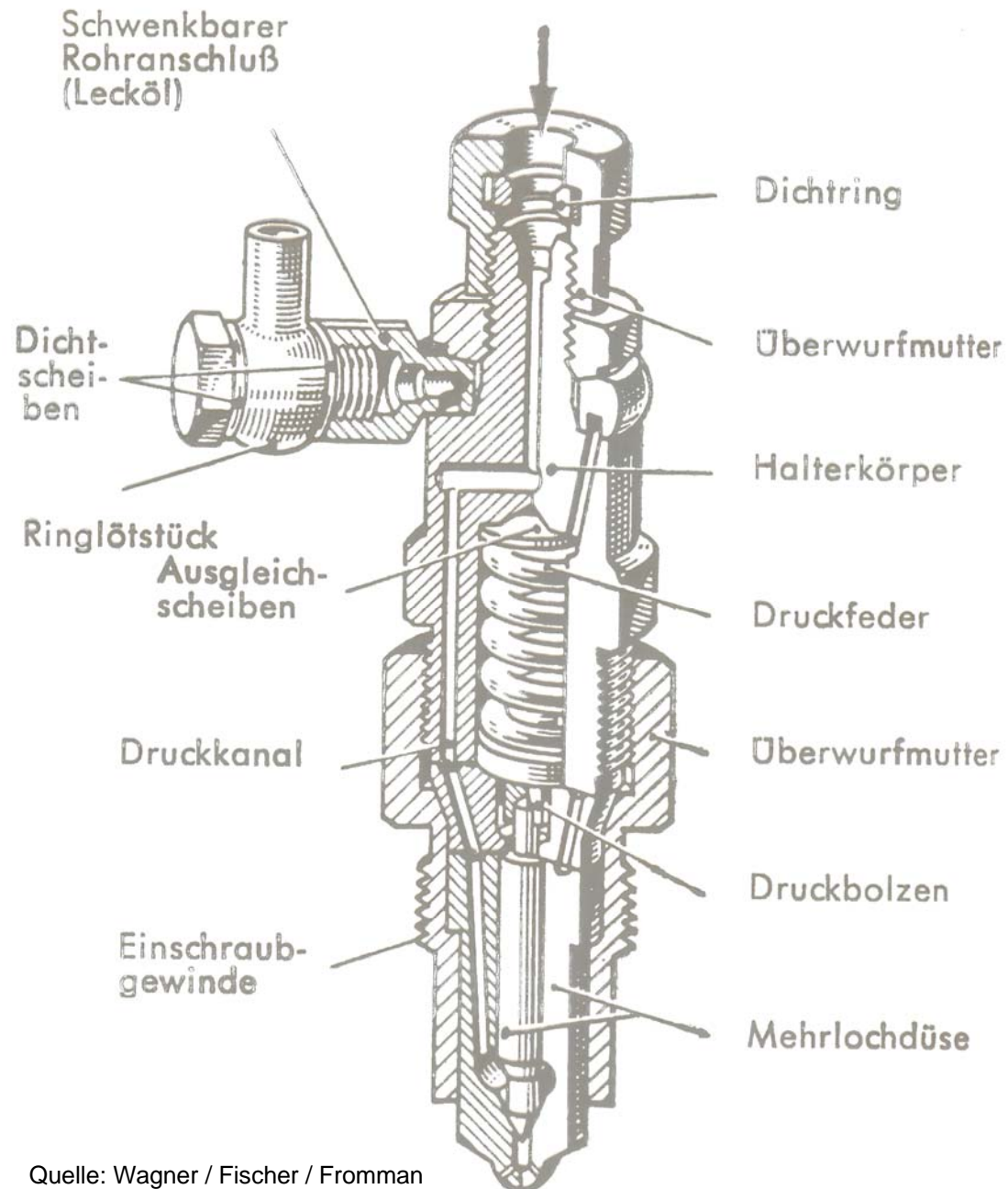


Hub- und Förderphasen des Verteilerkolbens

Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers



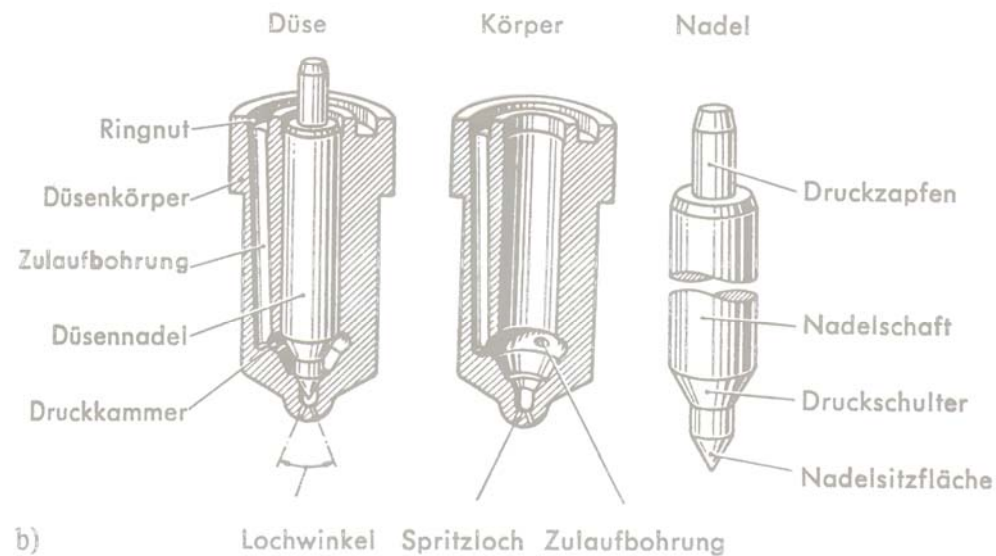
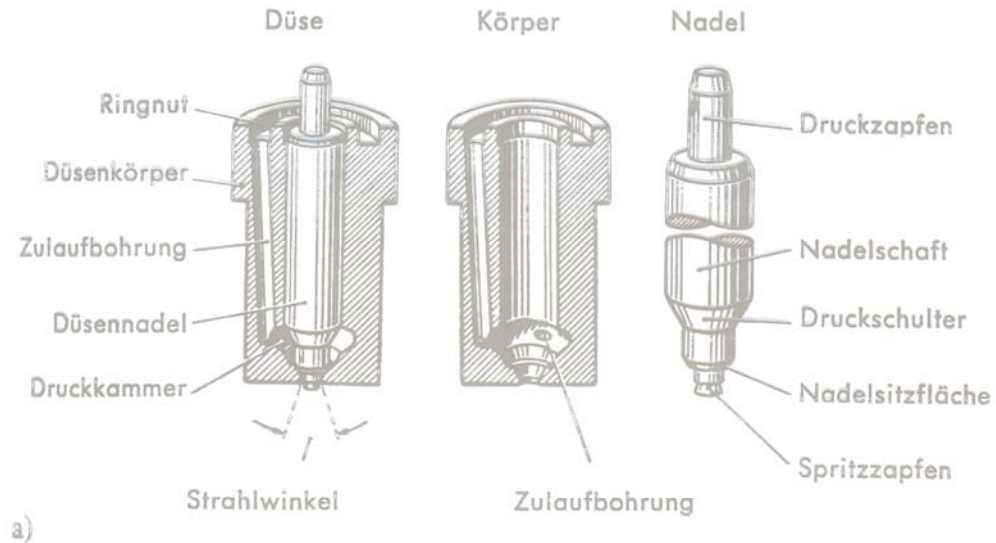
Wirkungsweise des Verteilerpumpen- Alldrehzahlreglers



Quelle: Wagner / Fischer / Fromman

Mehrlochdüse mit Düsenhalter

Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers

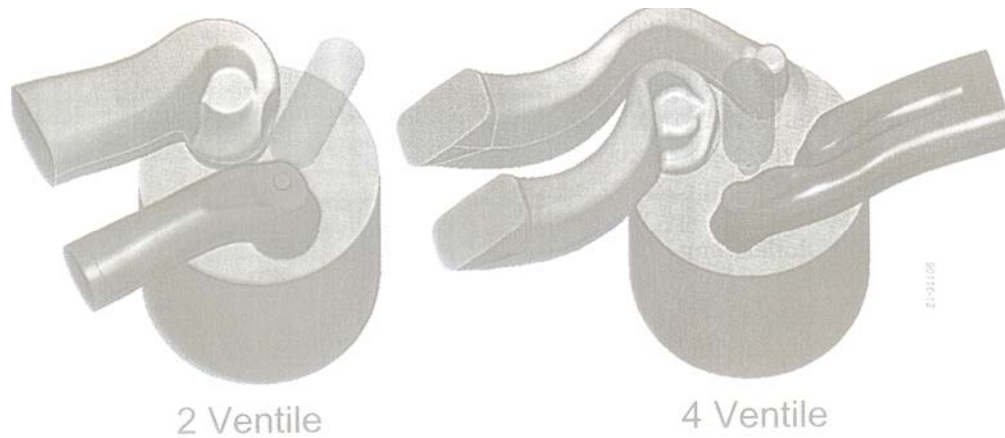


Quelle: Wagner / Fischer / Fromman

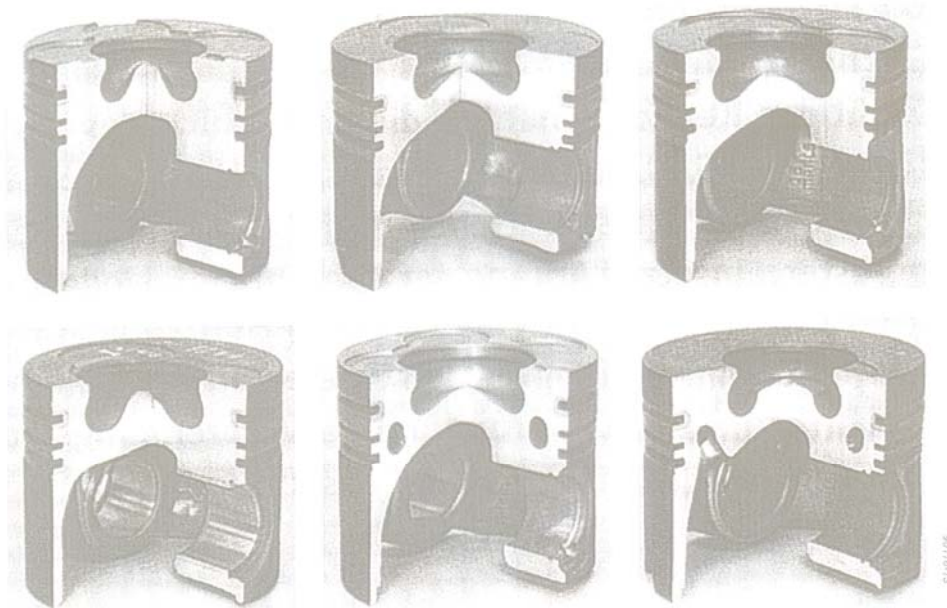
Zäpfedüse (a) und Lochdüse (b)

ohne Düsenhalter

Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers



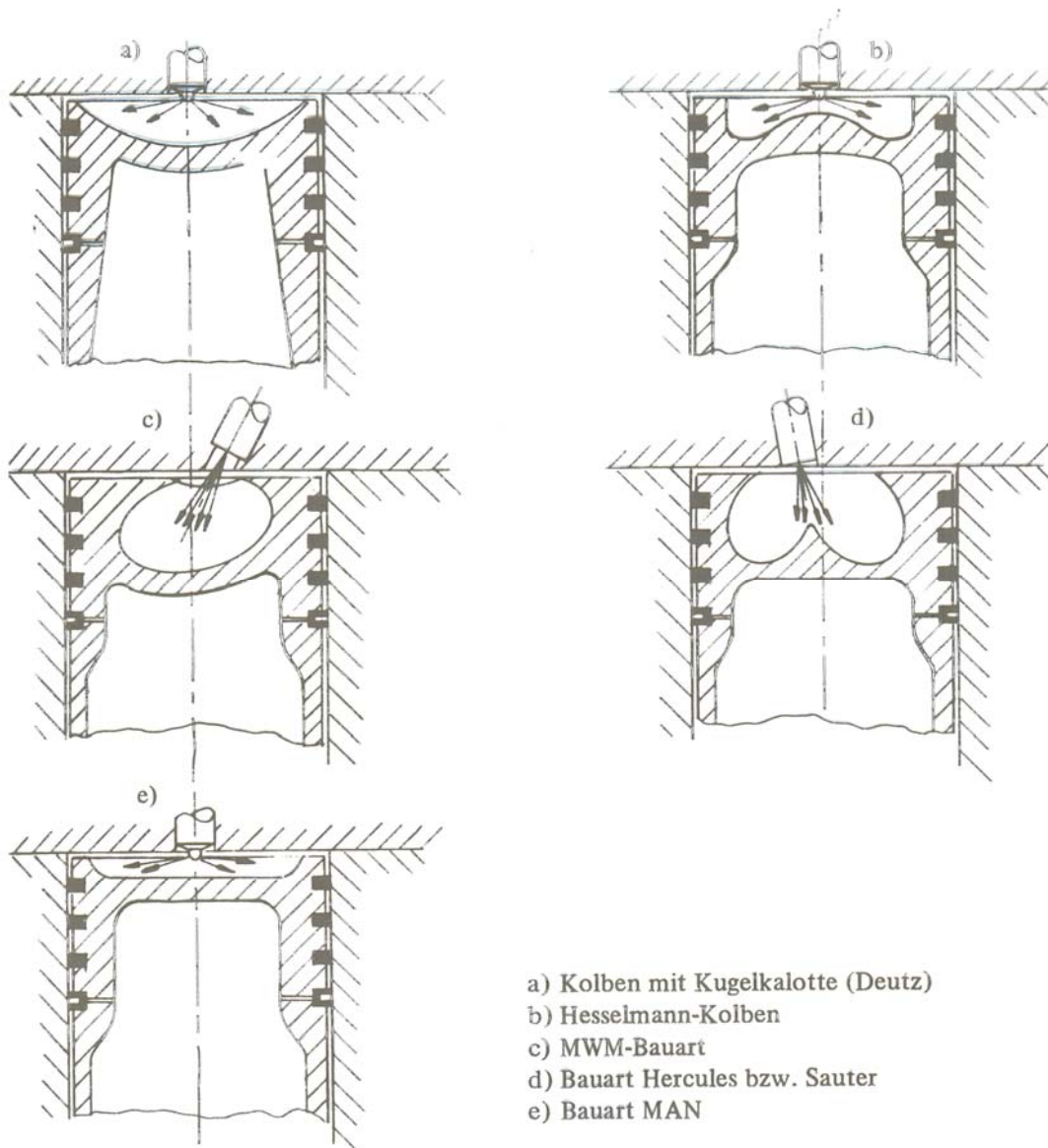
Drallertzeugung mit widerstandsarmen Einlasskanälen im Zylinderkopf moderner
TD-Dieselmotoren



: Die speziell geformte eingezogene Brennraummulde (Quelle: Mahle)

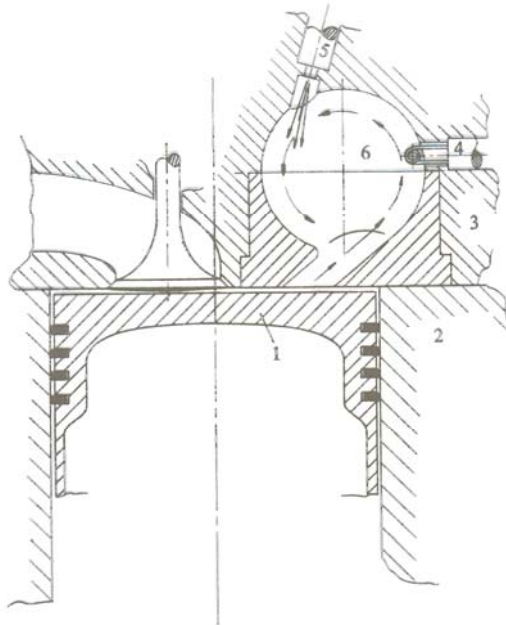
Brennraum- muldenformen

Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers

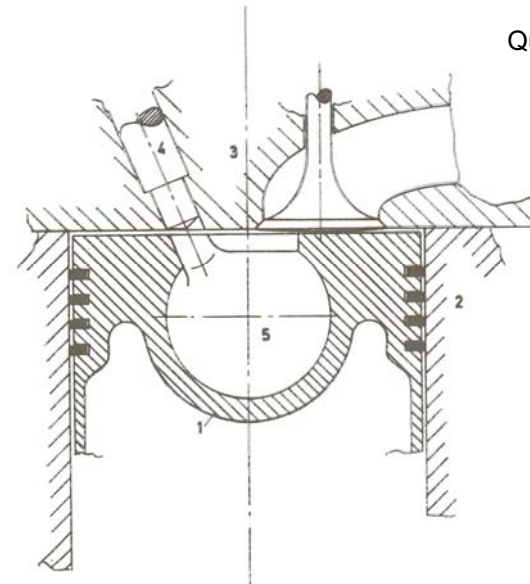


Brennraumformen für Viertaktdieselmotoren mit Direkteinspritzung

Brennverfahren Dieselmotor



Schnitt durch einen Wirbelkammermotor
1 Kolben,
2 Zylinderwand,
3 Zylinderdeckel,
4 Glühkerze,
5 Einspritzdüse,
6 Wirbelkammer (nach Ricardo)



Schnitt durch einen nach dem M-Verfahren arbeitenden Motor
1 Kolben,
2 Zylinderwand,
3 Zylinderdeckel,
4 Einspritzdüse,
5 Brennraum

Quelle: Wagner / Fischer / Fromman

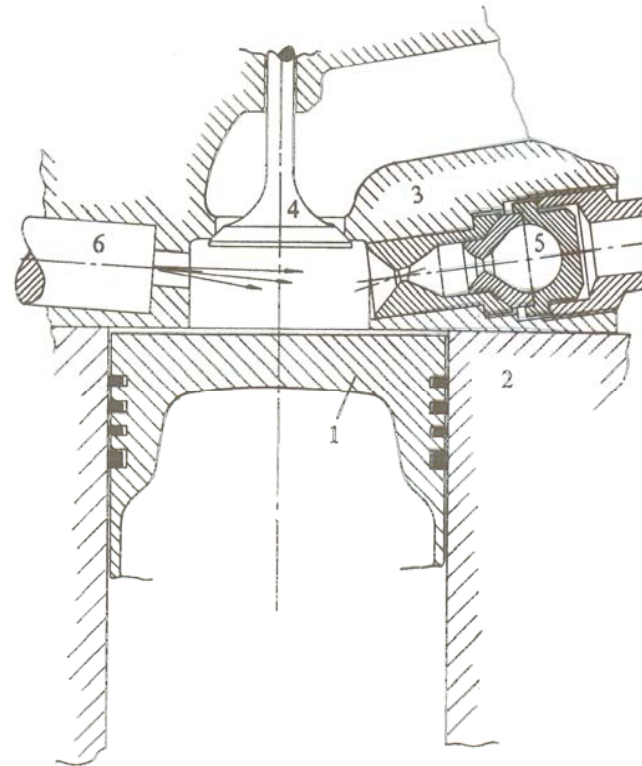
links: Wirbelkammermotor

rechts: Motor mit M-Verfahren

Brennverfahren Dieselmotor

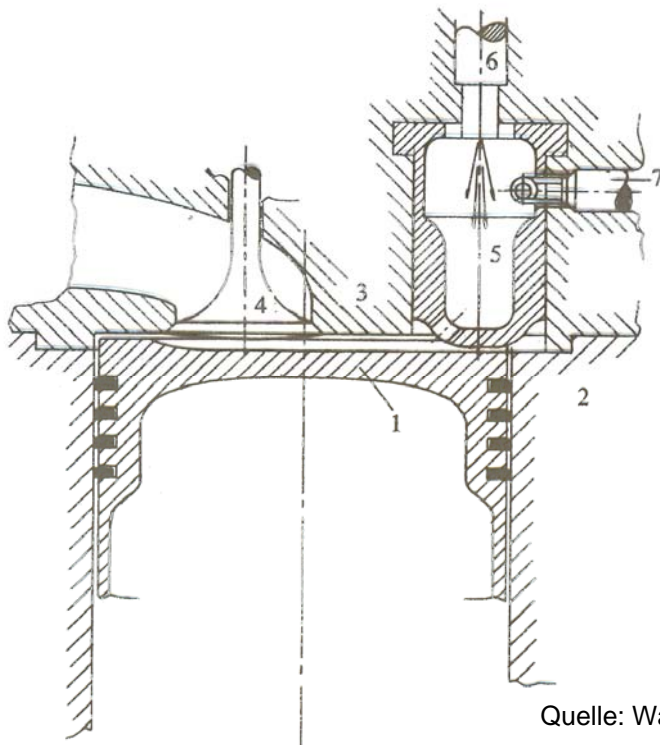
rechts: Luftspeichermotor

unten: Vorkammermotor



Schnitt durch einen Luftspeicher-
motor

- 1 Kolben,
- 2 Zylinderwand,
- 3 Zylinderdeckel,
- 4 Ventil,
- 5 Luftspeicher,
- 6 Einspritzdüse



Schnitt durch einen Vorkammermotor

- 1 Kolben,
- 2 Zylinderwand,
- 3 Zylinderdeckel,
- 4 Ventil,
- 5 Vorkammer,
- 6 Einspritzdüse,
- 7 Glühkerze

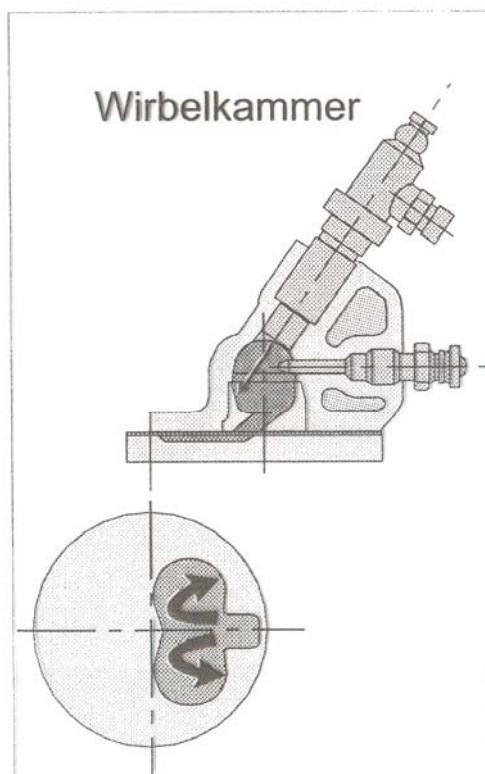
Quelle: Wagner / Fischer / Fromman

Verbrennungskraftmaschinen

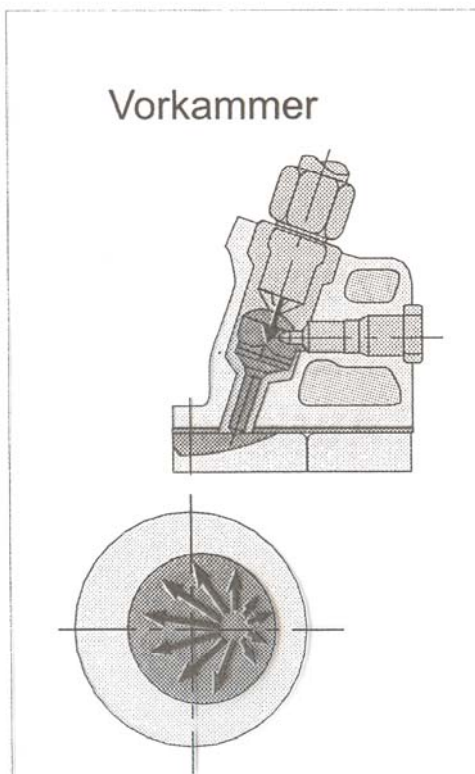
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers

Brennverfahren Dieselmotor

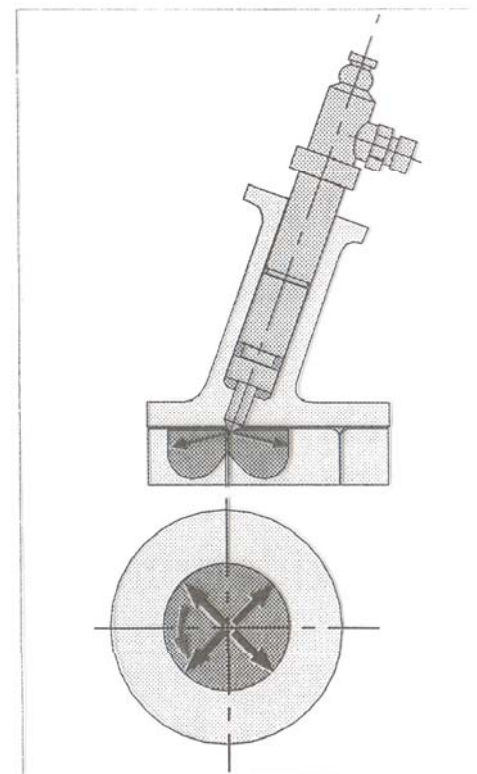
Nebenkammer-Brennverfahren



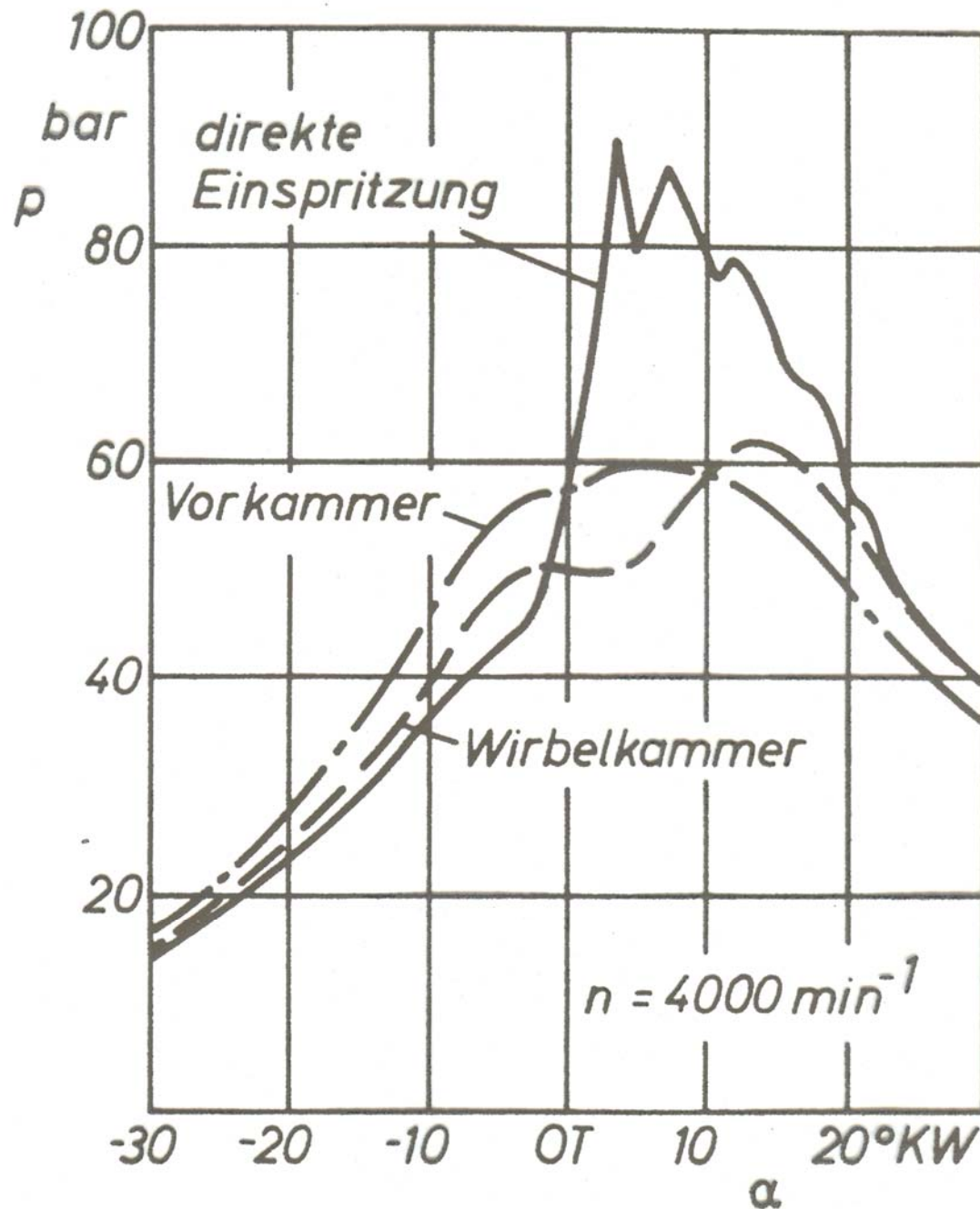
Vorkammer



Direkte Einspritzung



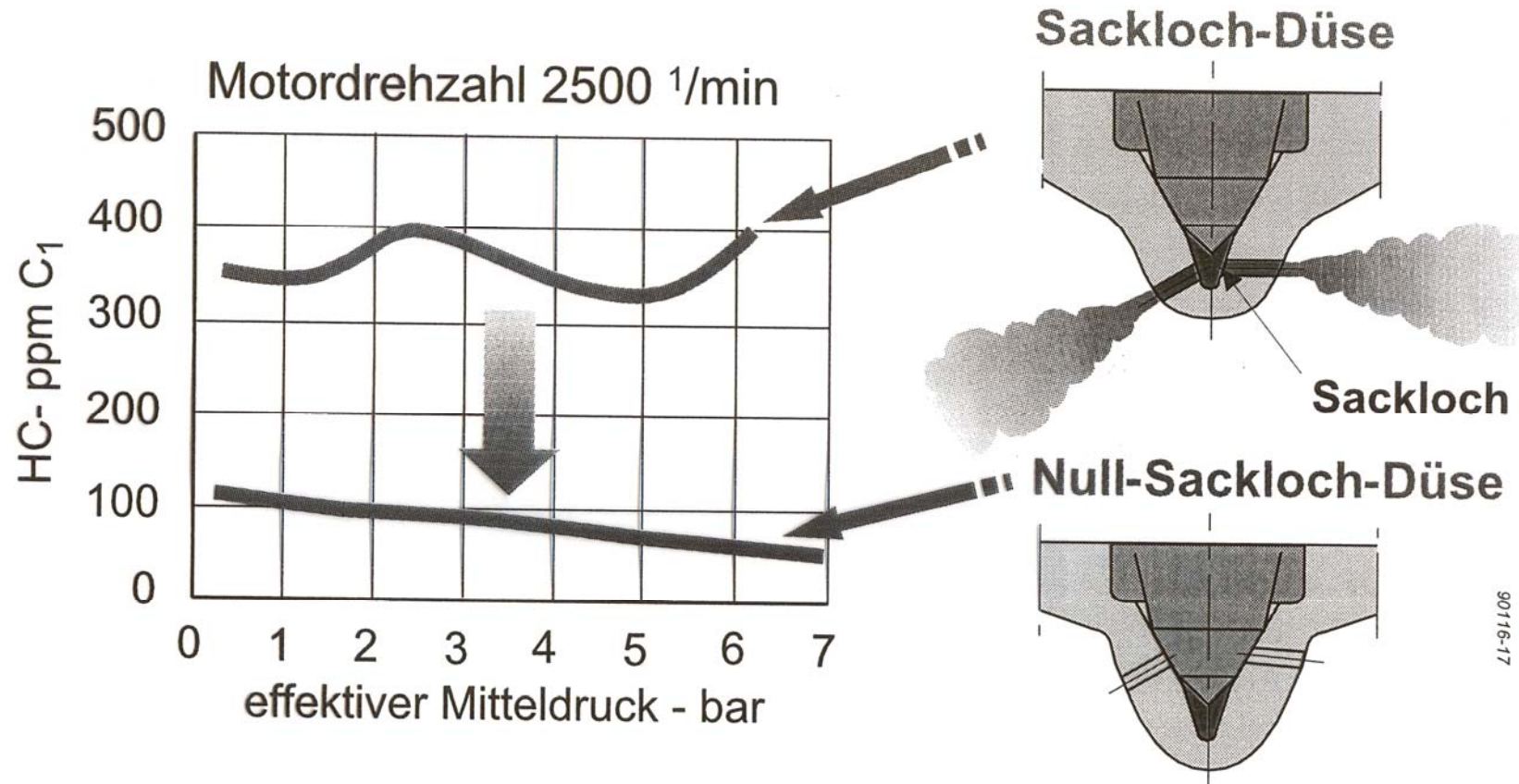
Verbrauchsvorteil der direkten Einspritzung > 15 %



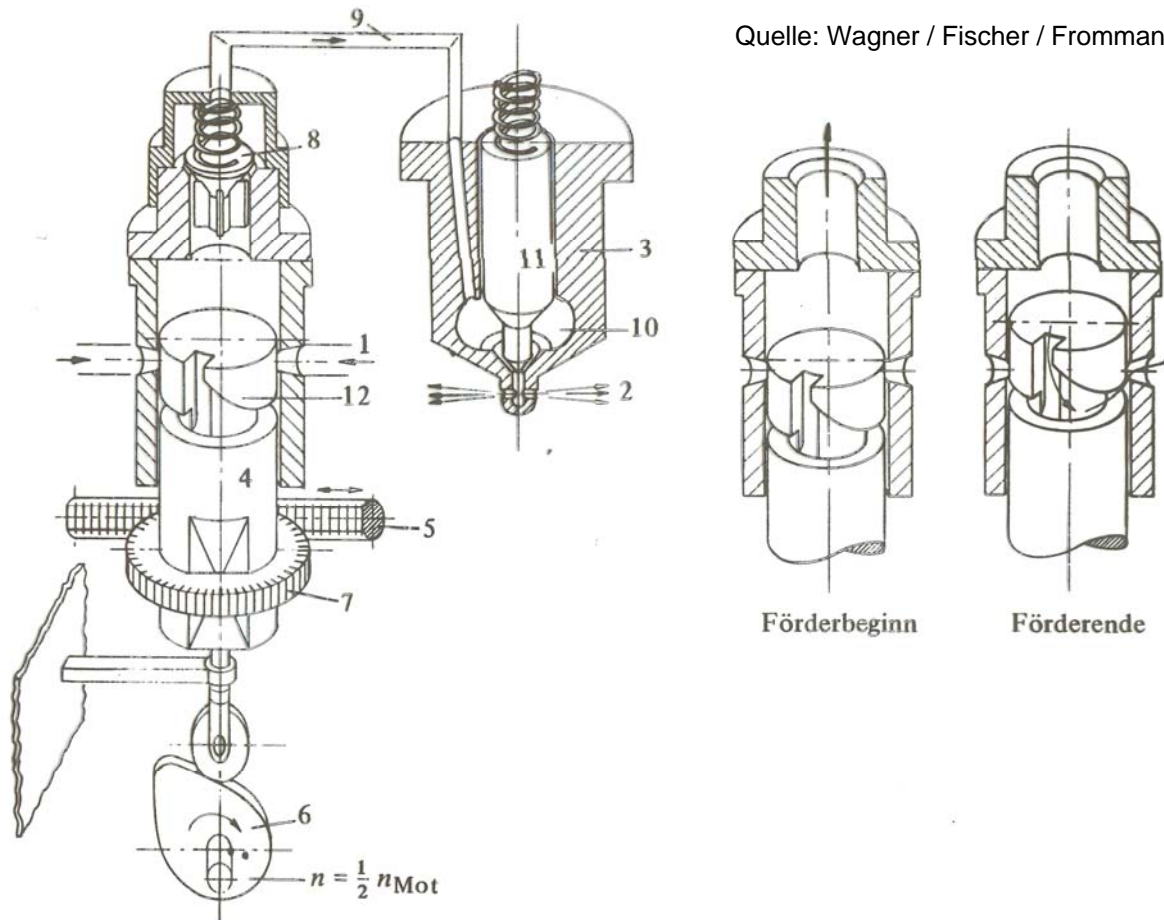
Zylinderdruckverlauf bei verschiedenen Brennverfahren

Einfluss der Null-Sacklochdüse auf HC Emissionen des DI-Dieselmotors

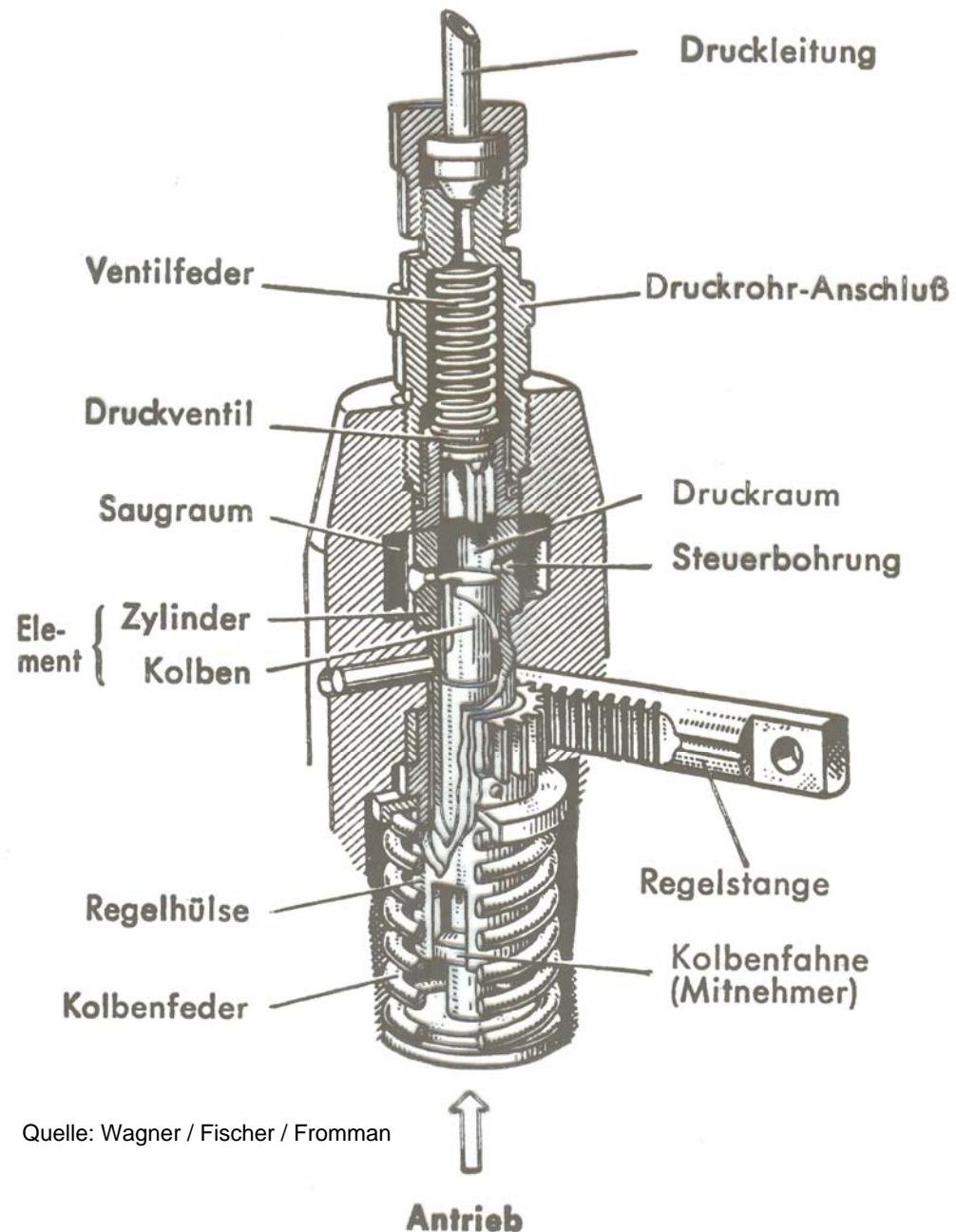
AVL DI-Leichtdiesel-Prototyp-Motor (1977)
4-Zylinder 2,1 Liter Saugbetrieb



Quelle: Wagner / Fischer / Fromman



Prinzipielle Darstellung des Einspritzsystems mit Mehrkolben- Einspritzpumpe



Quelle: Wagner / Fischer / Fromman

Pumpenelement einer Reiheneinspritz- pumpe

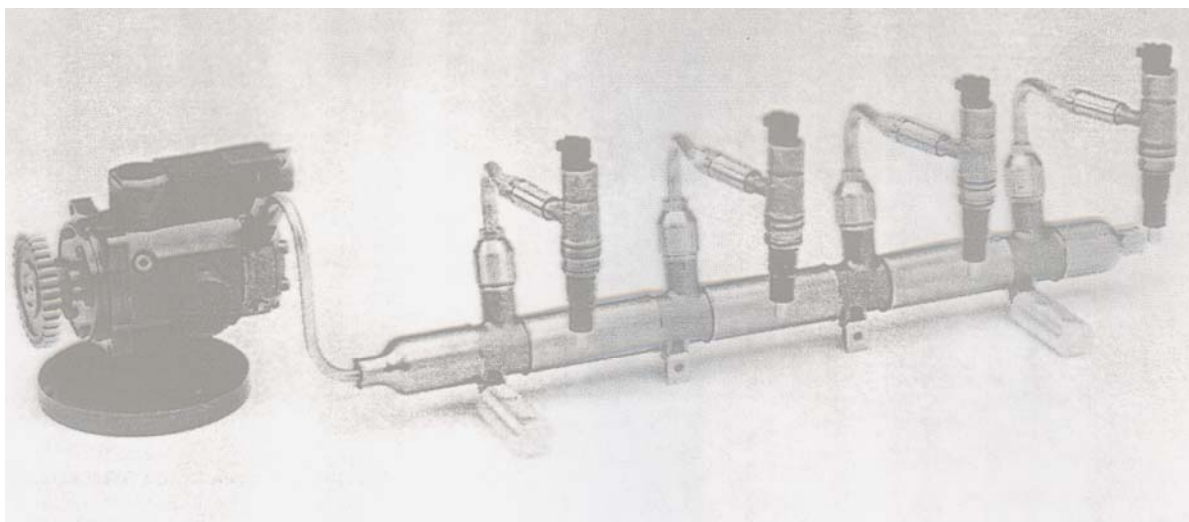
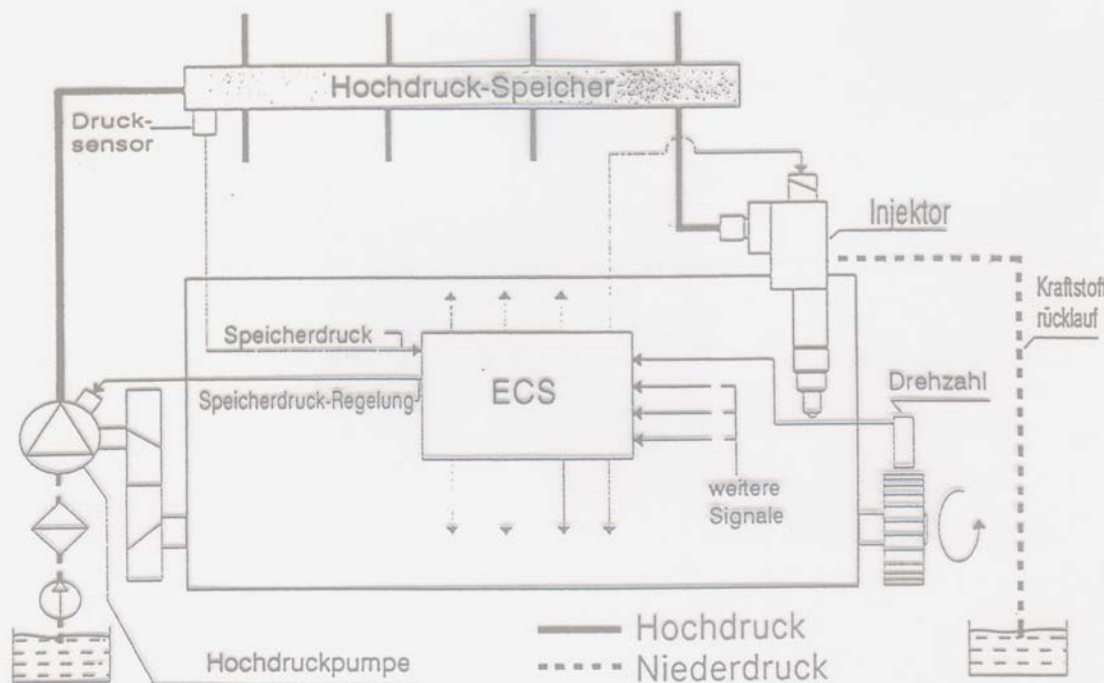
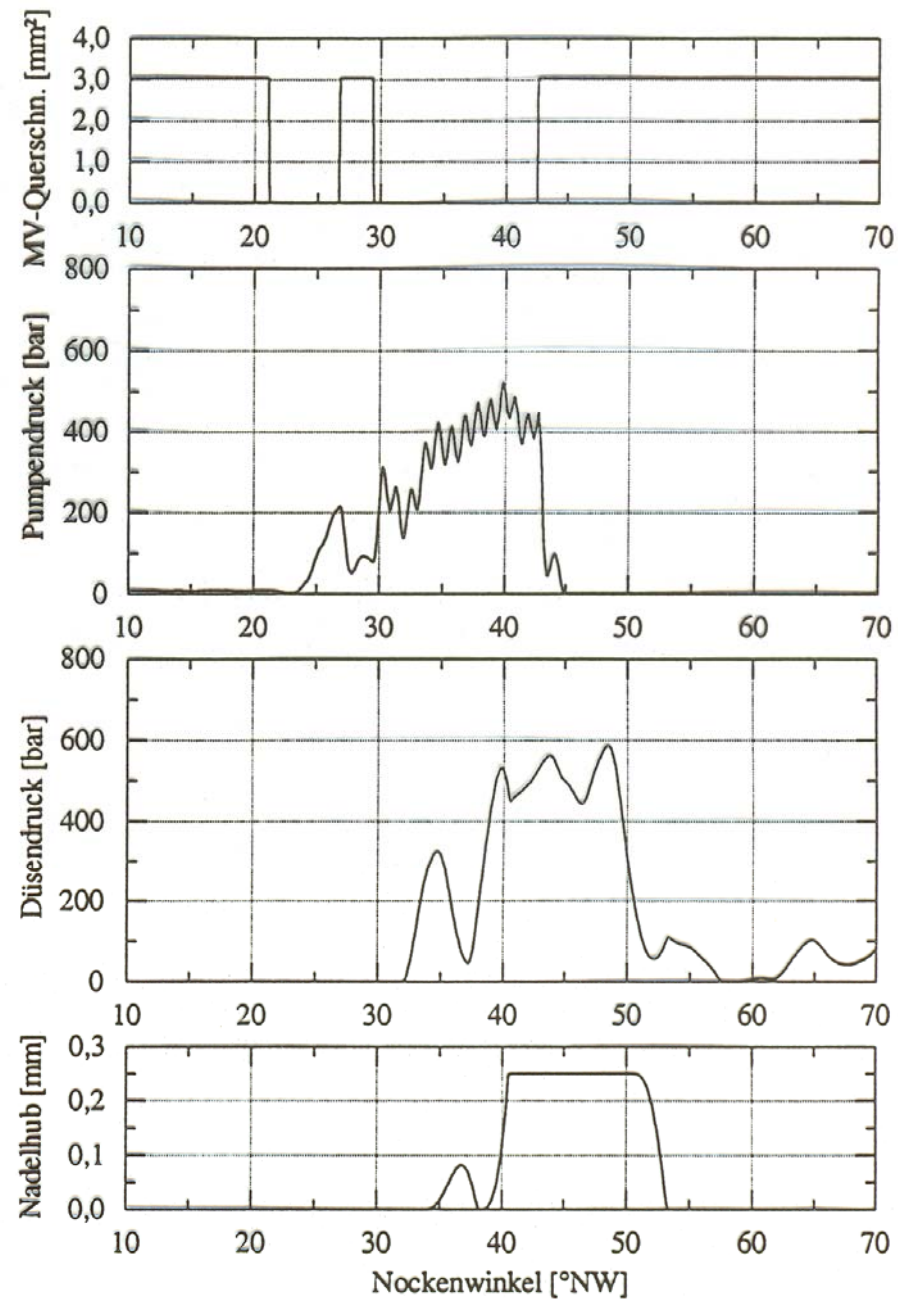


Bild 1: Das Common-Rail-Einspritzsystem der Baureihe 4000

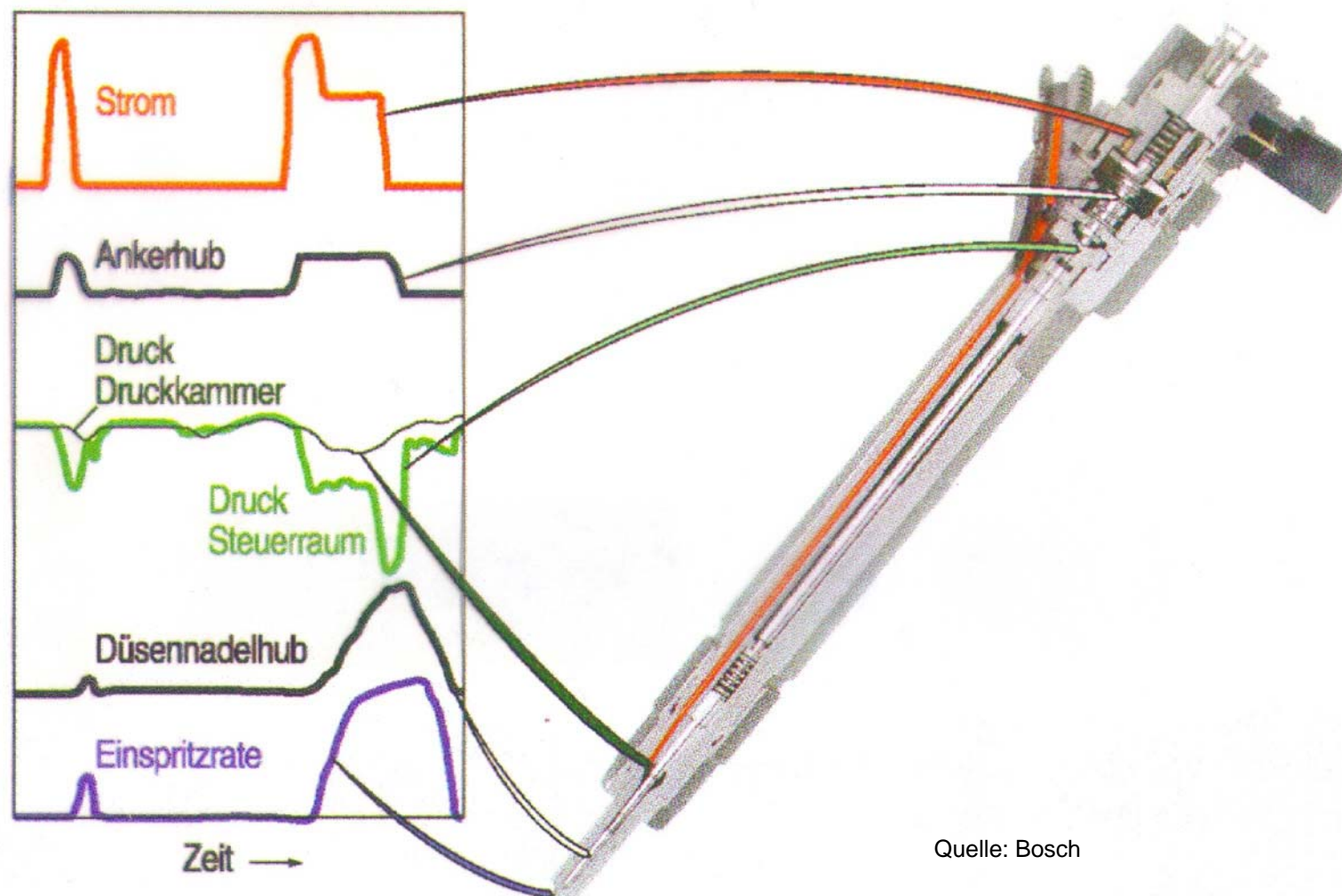


Schematische Darstellung des Common-Rail- Einspritzsystems

Baureihe 4000



Voreinspritzung

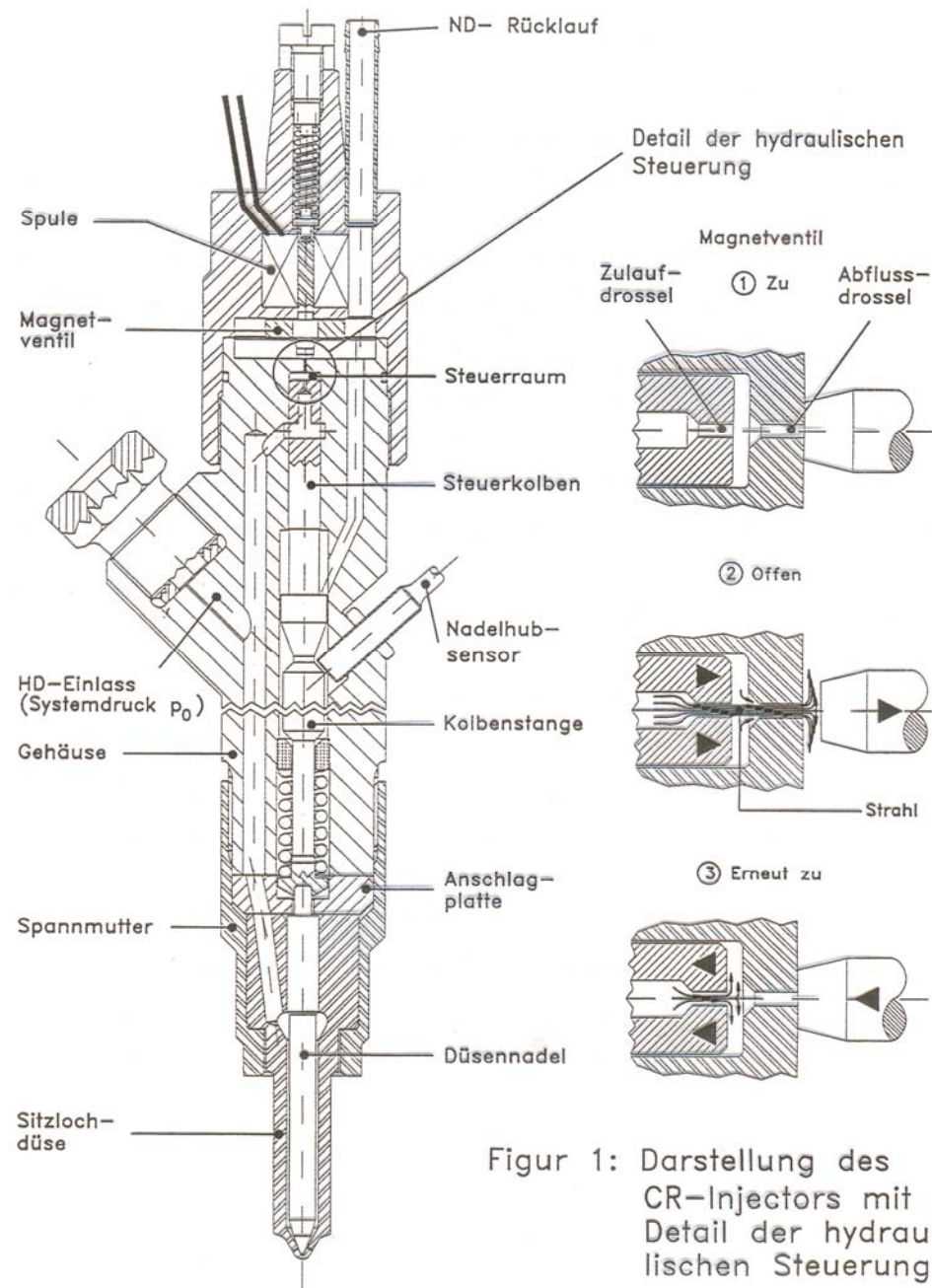


Common-Rail-Injektor

für PKW Motoren

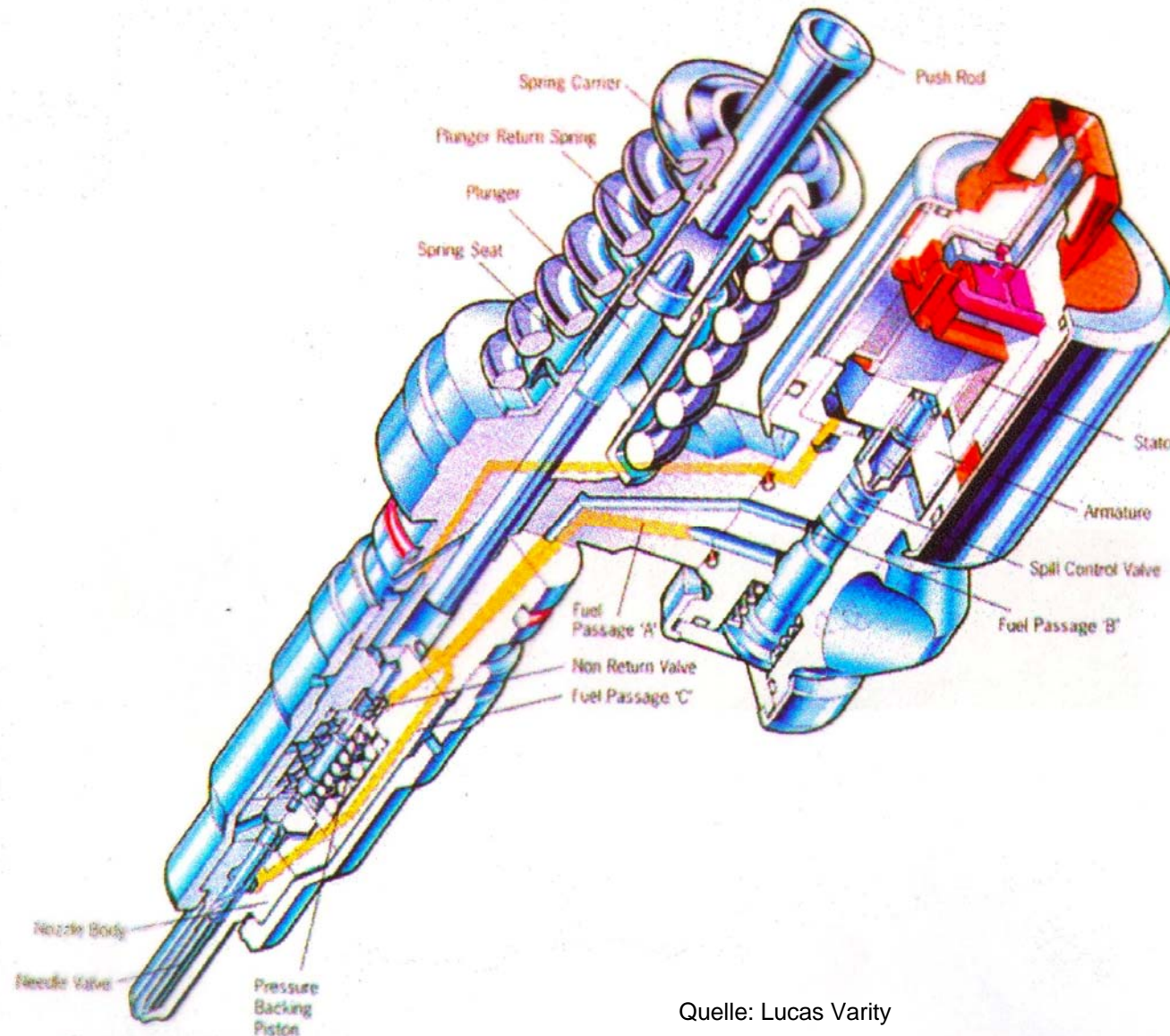
Verbrennungskraftmaschinen

Prof. Dr.-Ing. E. Reimers



Figur 1: Darstellung des CR-Injectors mit Detail der hydraulischen Steuerung

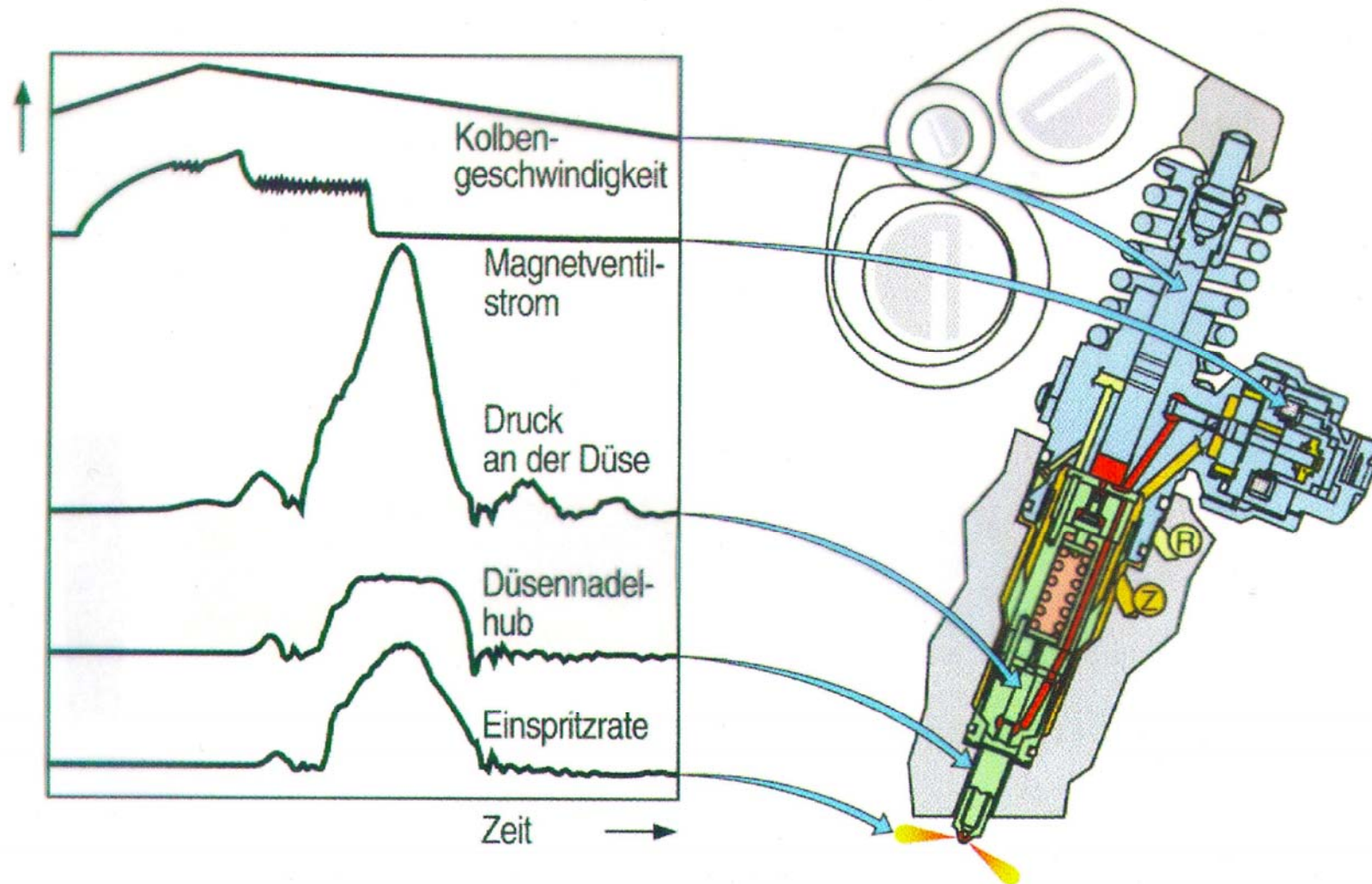
CR-Injector



Quelle: Lucas Varity

Pumpe-Düse- Einspritzsystem

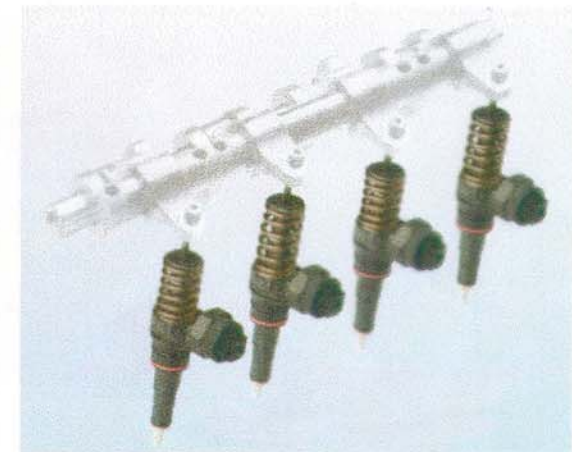
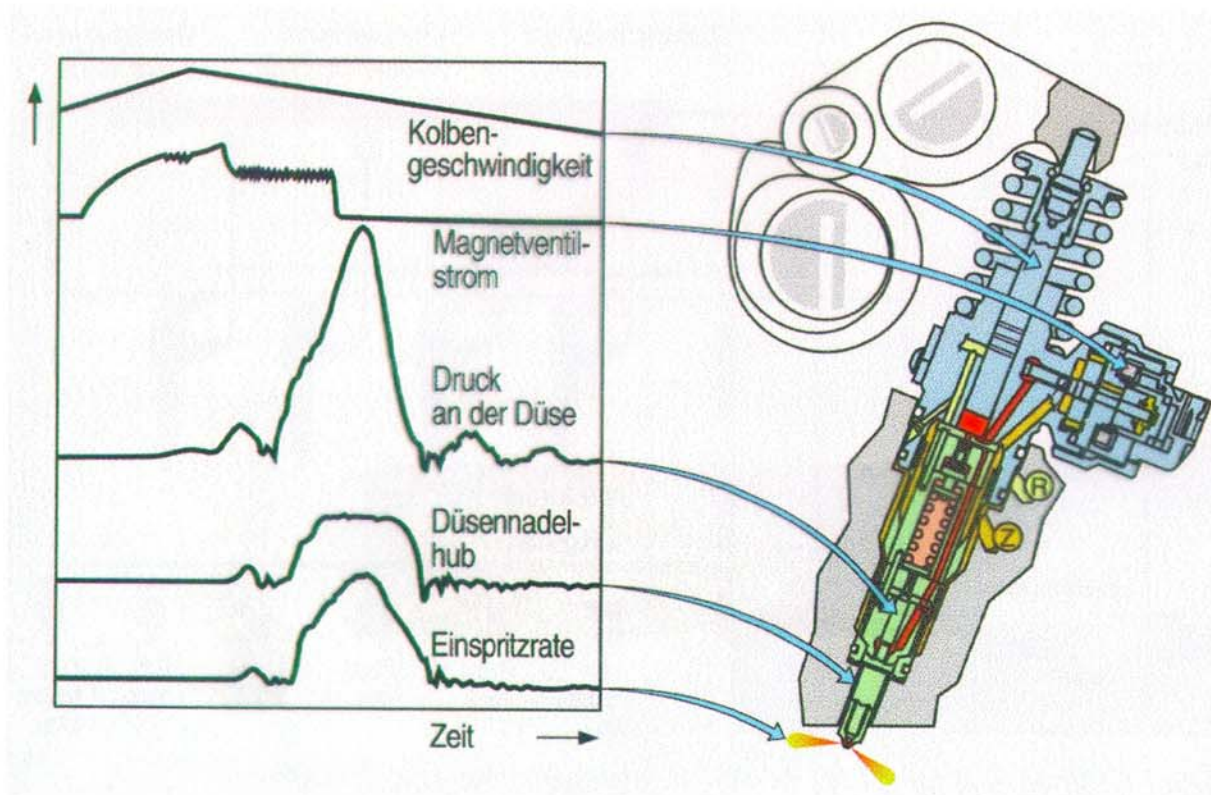
Funktionsprinzip Unit-Injector-System (UIS)



Quelle: Bosch

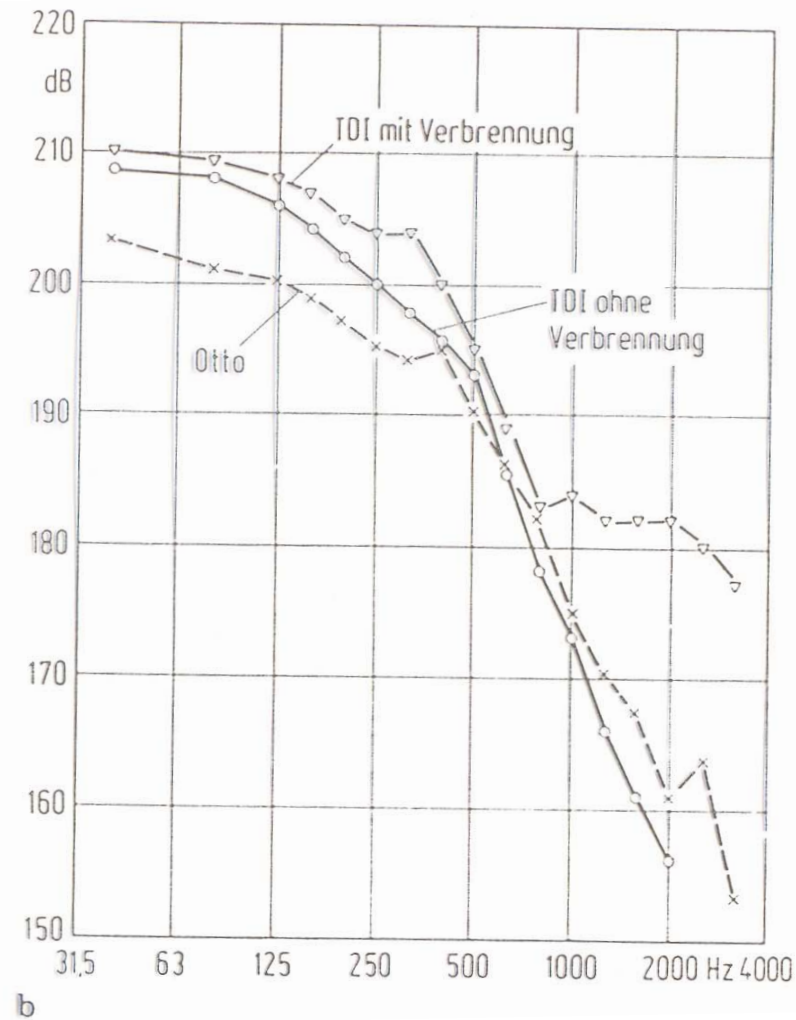
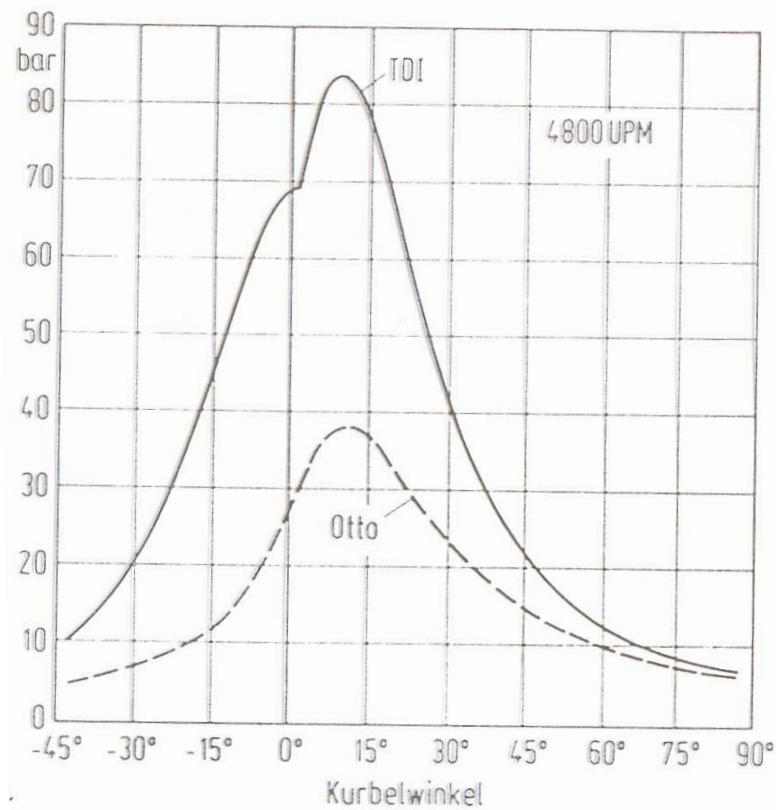
Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers

Funktionsprinzip Unit-Injektor-System (UIS)



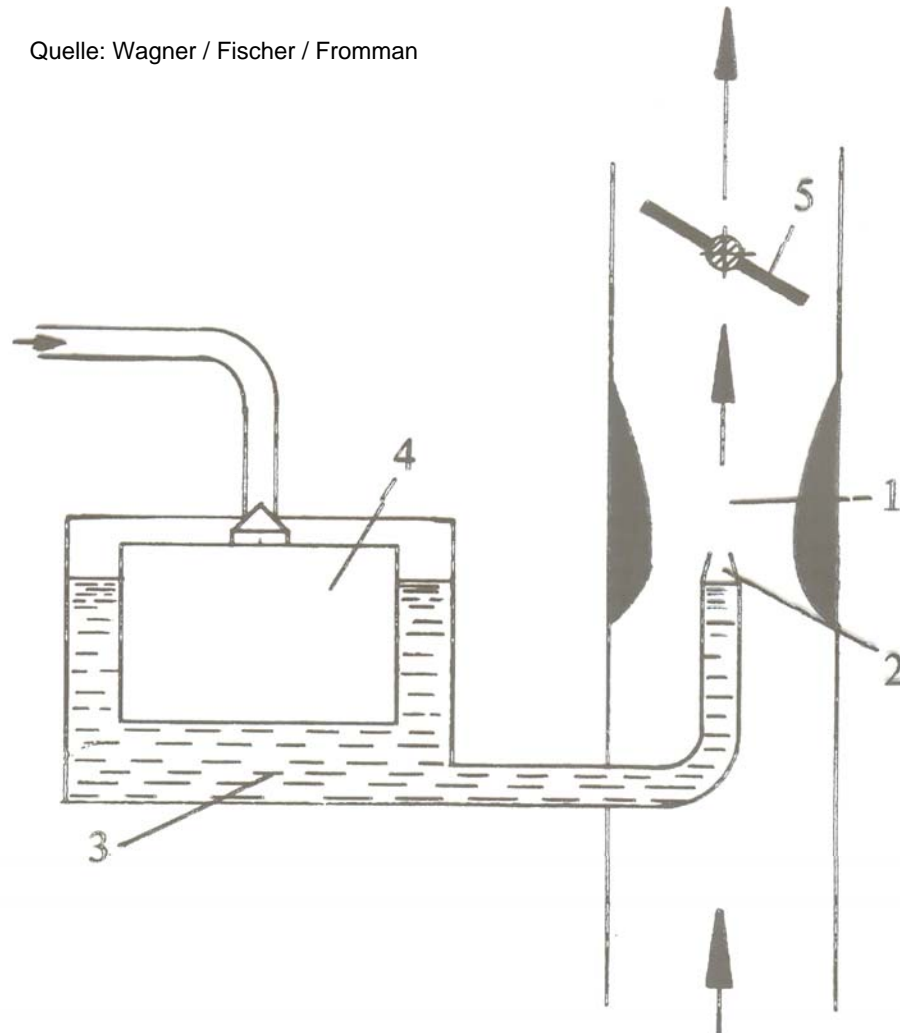
Quelle: Bosch

Brennraumdruck und auftretendes Motorgeräusch



Gemischbildung Ottomotor

Quelle: Wagner / Fischer / Fromman

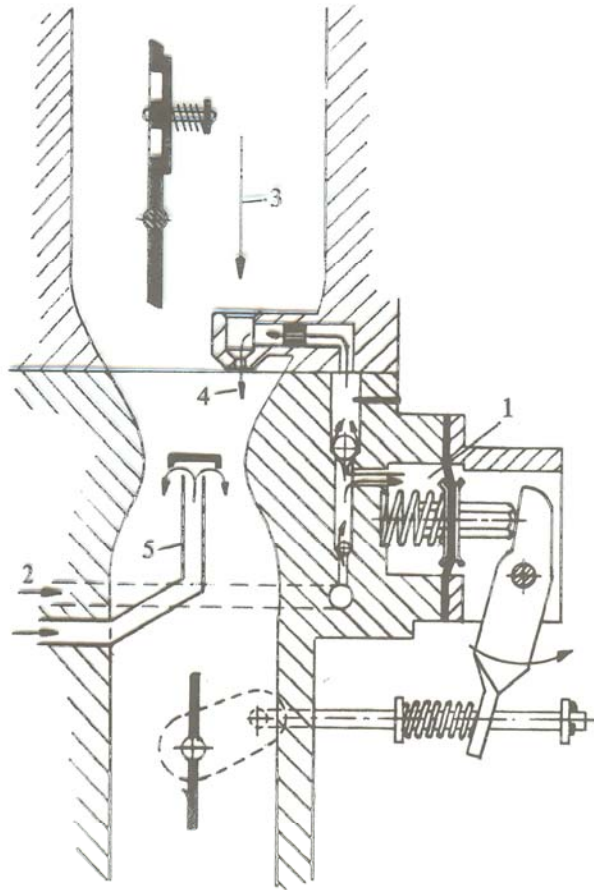


Vergaser

Prinzipielle Darstellung

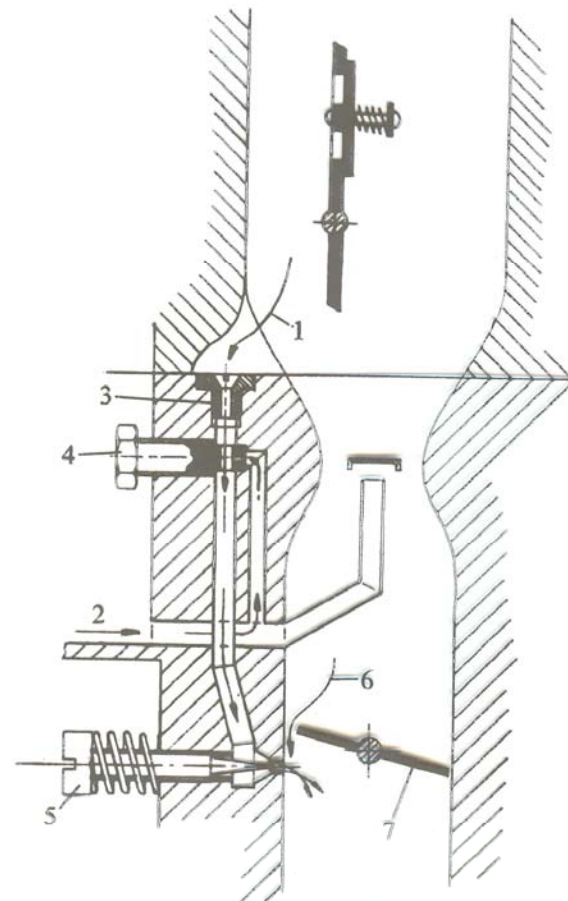
1 Saugrohr (Lufttrichter), 2 Brennstoffdüse,
3 Schwimmergehäuse, 4 Schwimmer,
5 Drosselklappe

Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers



1 Beschleunigungspumpe, 2 Brennstoffzufluß,
3 Hauptluft, 4 Brennstoff aus der Beschleuni-
gungspumpe, 5 Hauptdüse

Quelle: Wagner / Fischer / Fromman

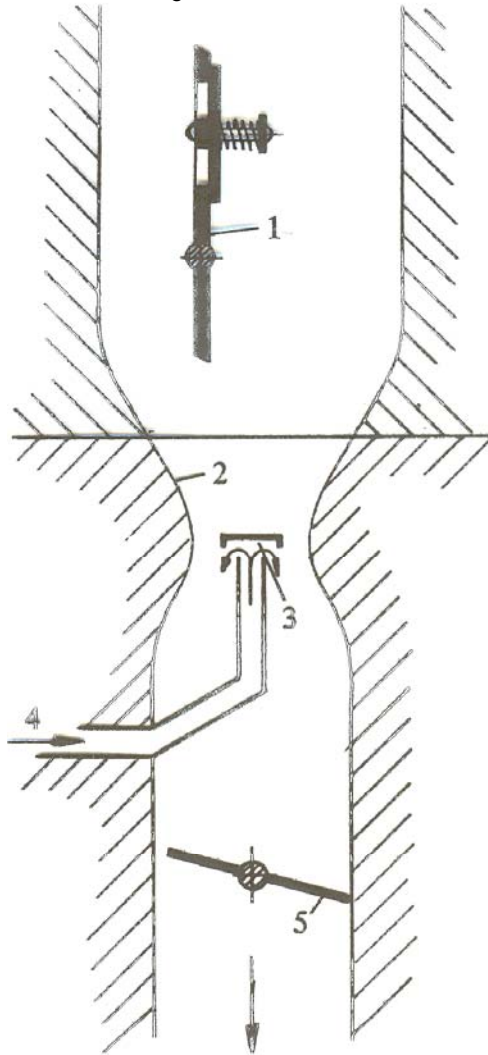


1 Leerlauf Luft, 2 Brennstoffstrom vom
Schwimmergehäuse, Leerlaufdüse,
4 Leerlaufdüse, 5 Leerlaufgemisch-
Regulierschraube, 6 Hauptluft, 7 Drosselklappe

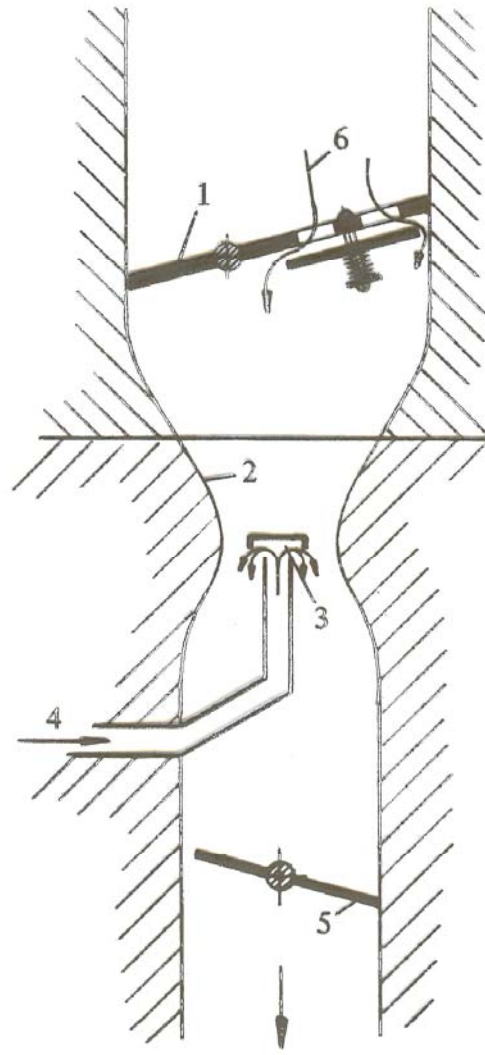
links: Vergaser mit Beschleunigungspumpe
rechts: Vergaser mit Leerlaufsystem

Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers

Quelle: Wagner / Fischer / Fromman

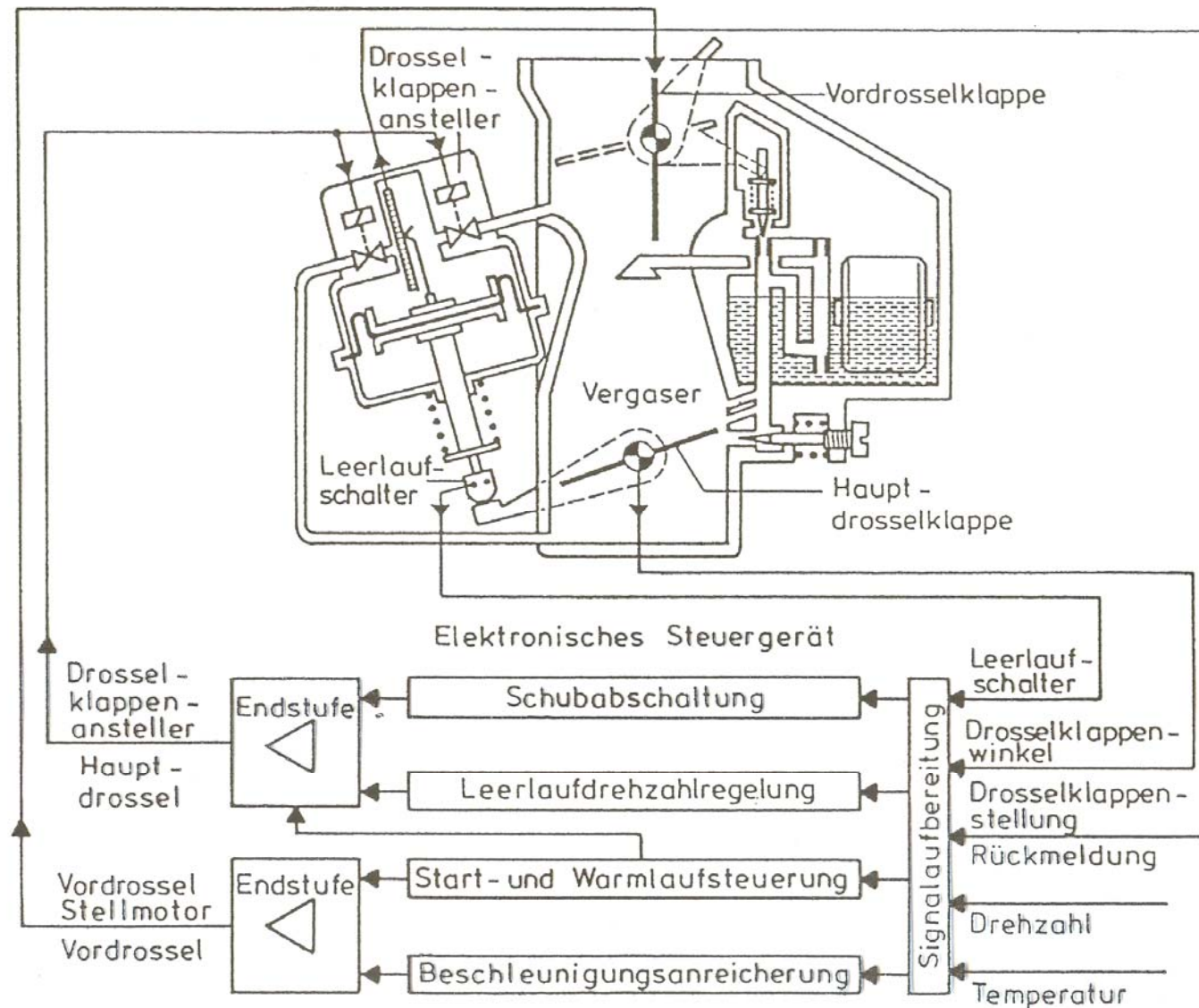


a) Starterklappe 1
in Ruhestellung



b) Starterklappe 1
in Startstellung

Funktion Starterklappe

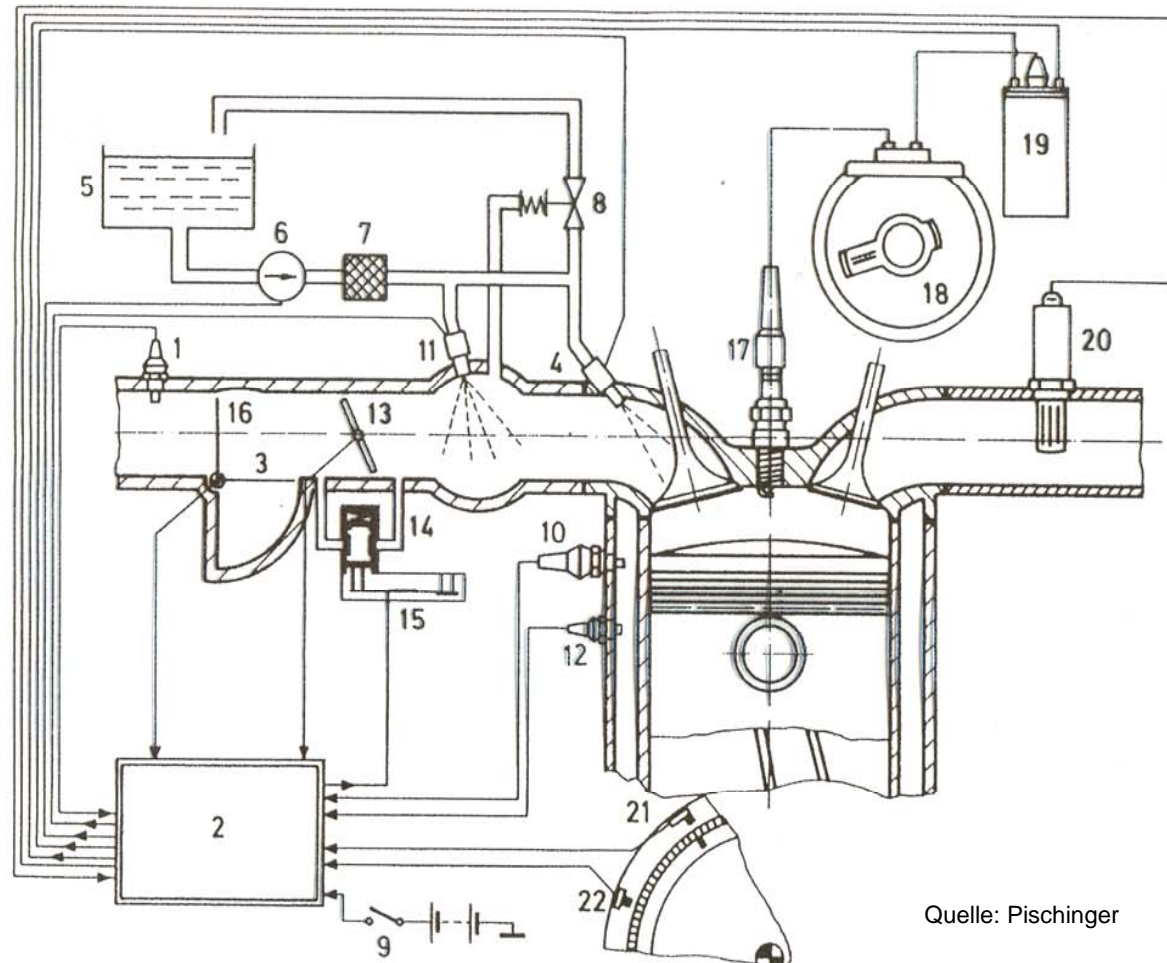


Vergaser mit elektronischer Steuerung

Quelle: Urlaub

Schematische Darstellung Einspritzanlage

Motronic Bosch



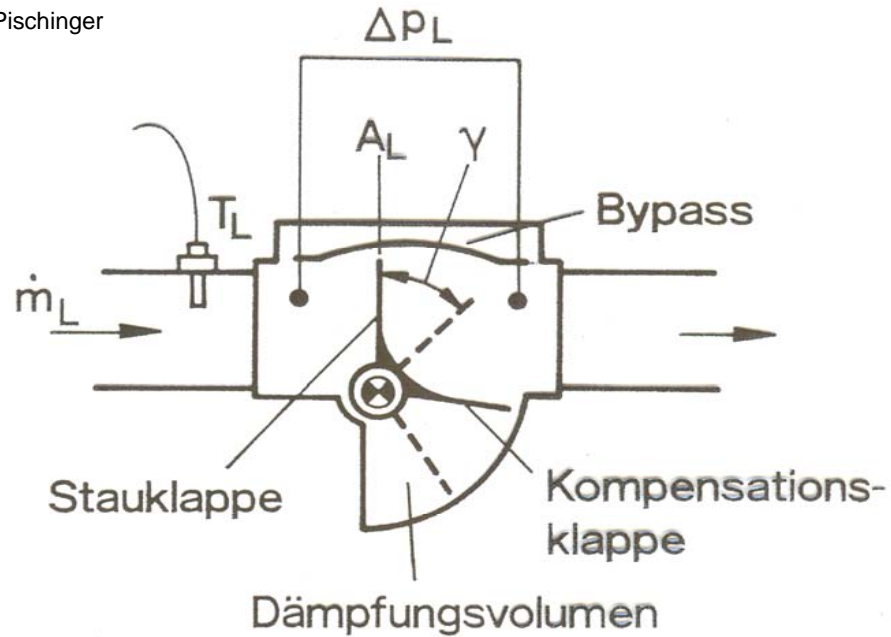
Quelle: Pischinger

Die wesentlichen Komponenten

- 1 Luft-Temperaturfühler
- 2 Steuergerät
- 3 Kompensationsklappe
- 4 Einspritzventil
- 5 Tank
- 6 Kraftstoffpumpe
- 7 Kraftstofffilter
- 8 Druckregler
- 9 Startschalter
- 10 Thermozeitschalter
- 11 Kaltstarteinspritzventil
- 12 Kühlwasser-Temperaturfühler
- 13 Drosselklappenschalter
- 14 Zusatzluftschieber
- 15 Bimetallfeder
- 16 Luftmengenmesser
- 17 Zündkerze
- 18 Verteiler und Verteilerfinger
- 19 Zündspule
- 20 Lambda-Sonde
- 21 Bezugsmarkengeber
- 22 Drehzahlgeber

Verbrennungskraftmaschinen

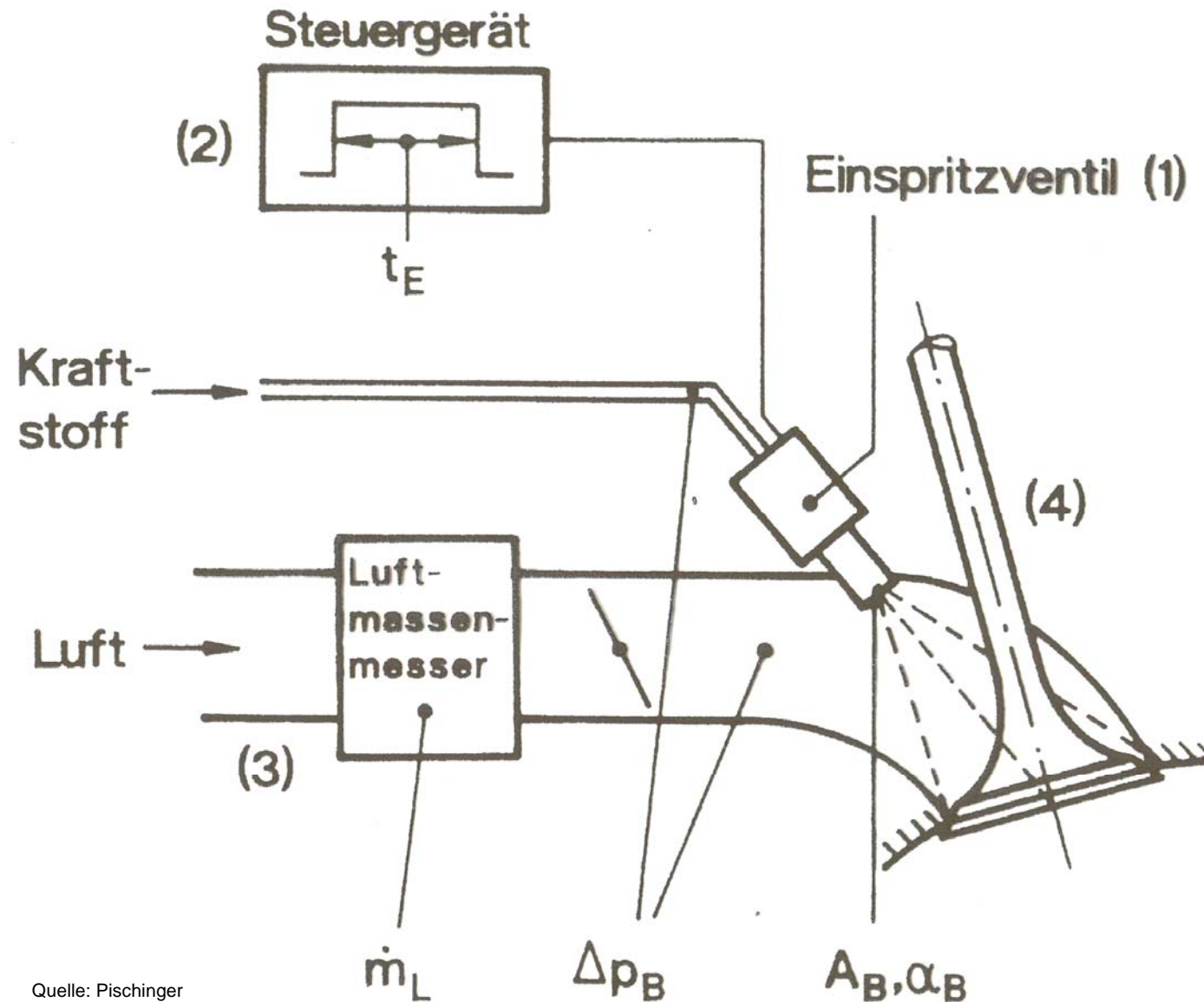
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers



Luftmengenmessung

$$\dot{m}_L = A_L \cdot \alpha_L \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{2 \Delta p_L} \cdot \sqrt{\rho_{L,u}}$$

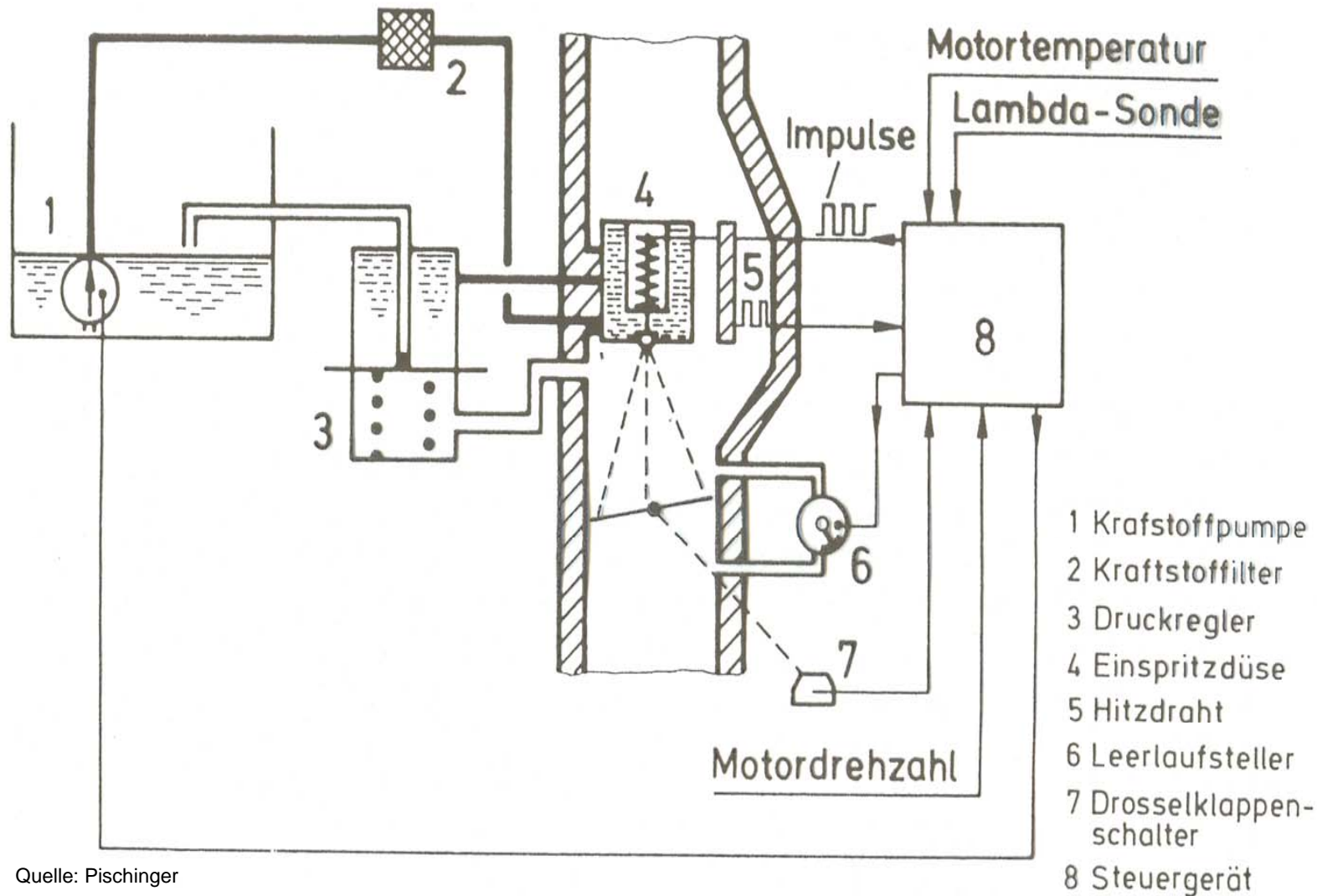
\downarrow \downarrow \downarrow \downarrow \downarrow
 Öffnungsquer- \downarrow Expansions- \downarrow Dichte
 schnitt $f(\gamma)$ zahl $f(\Delta p_L)$ $f(\vartheta, p)$
 \downarrow \downarrow \downarrow
 Luftmassen- Durchflußzahl Kräftegleich-
 strom $f(\gamma)$ gewicht an der Klappe
 $\Delta p_L \approx \text{konst.}$



Quelle: Pischinger

Prinzip der elektronischen Einspritzung

Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers

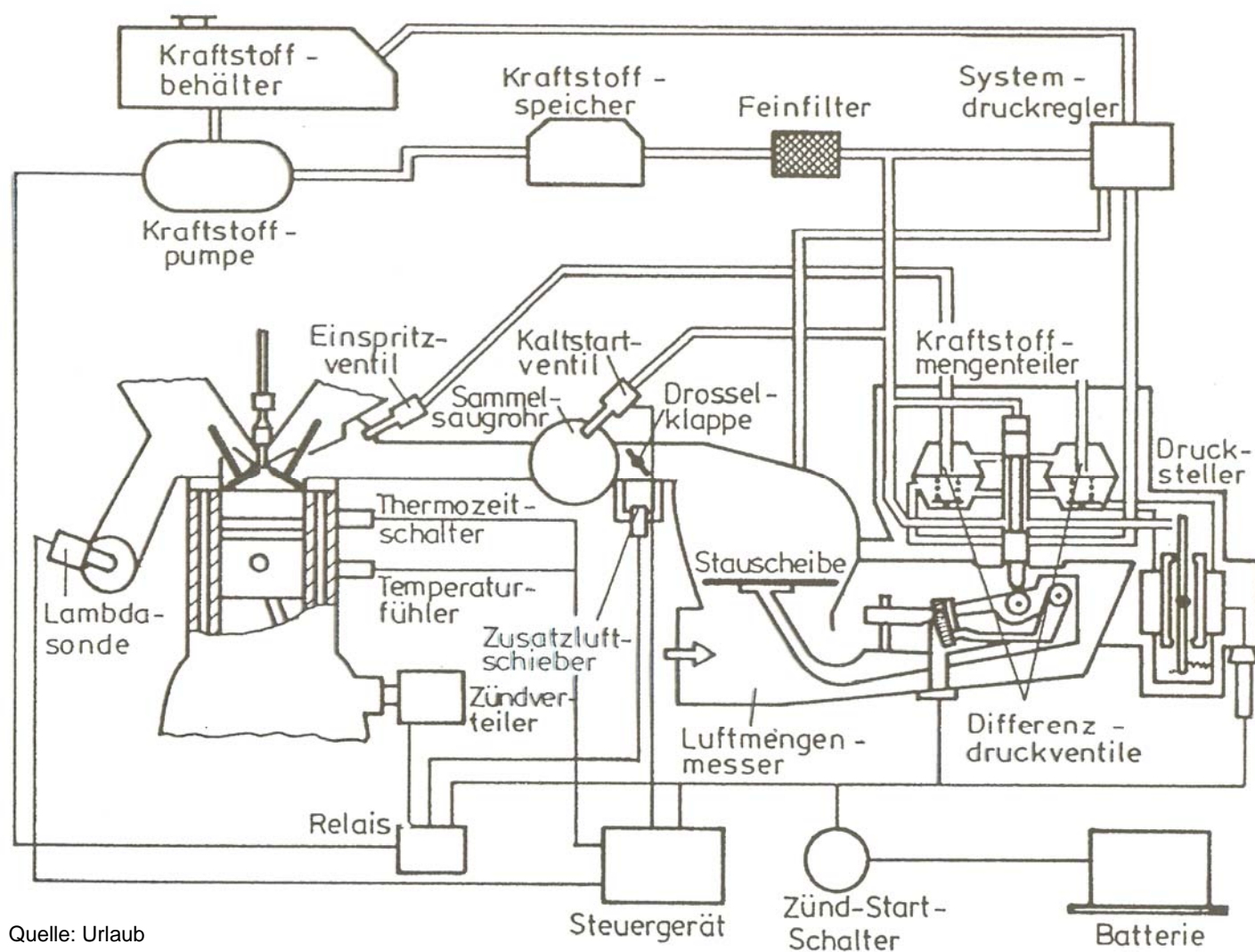


Quelle: Pischinger

Schematische Darstellung Einspritzanlage

Mono-Jetronic

Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers

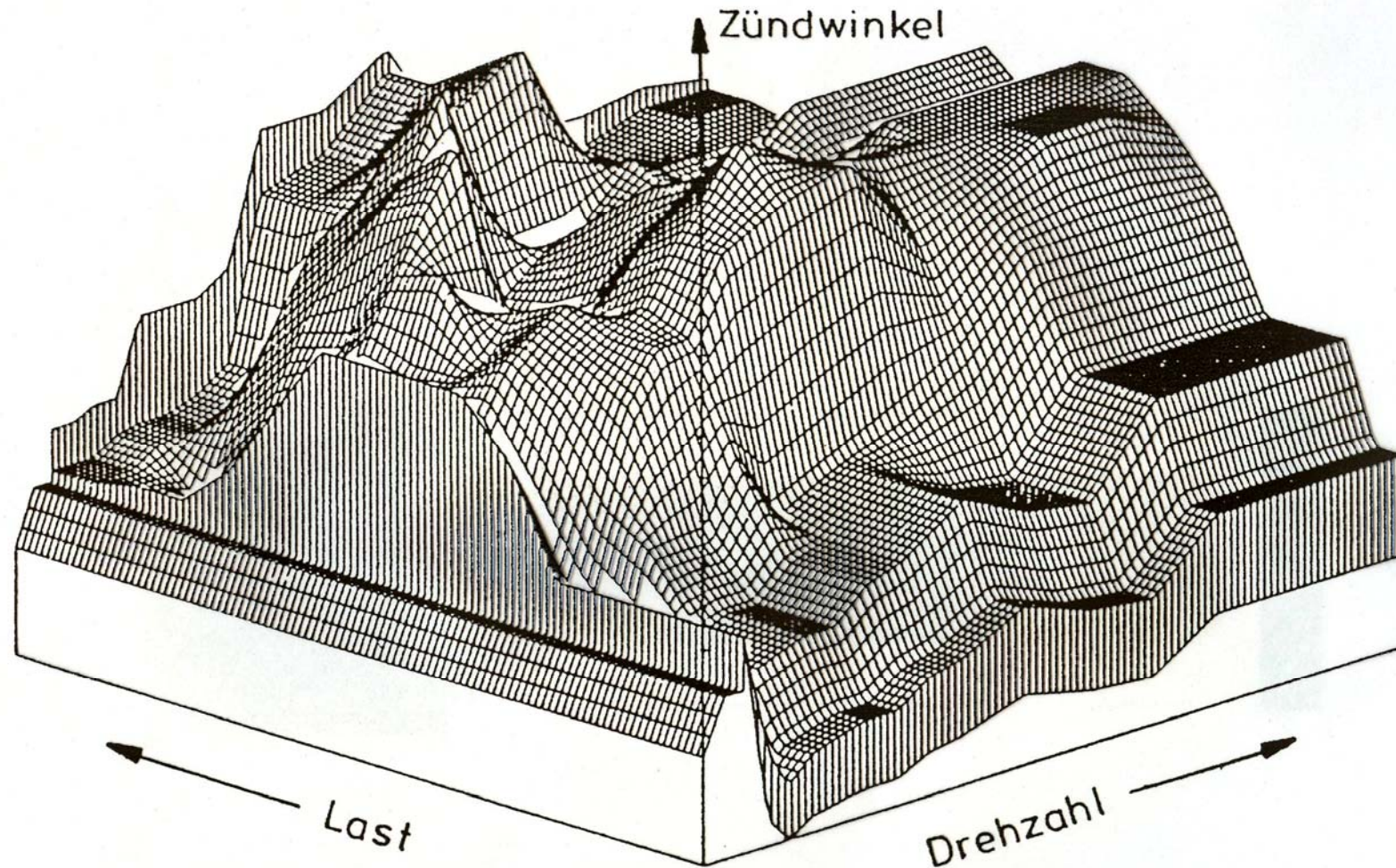


Quelle: Urlaub

Bosch-KE-Jetronic

Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers

Zündkennfeld bei elektronischer Zündverstellung



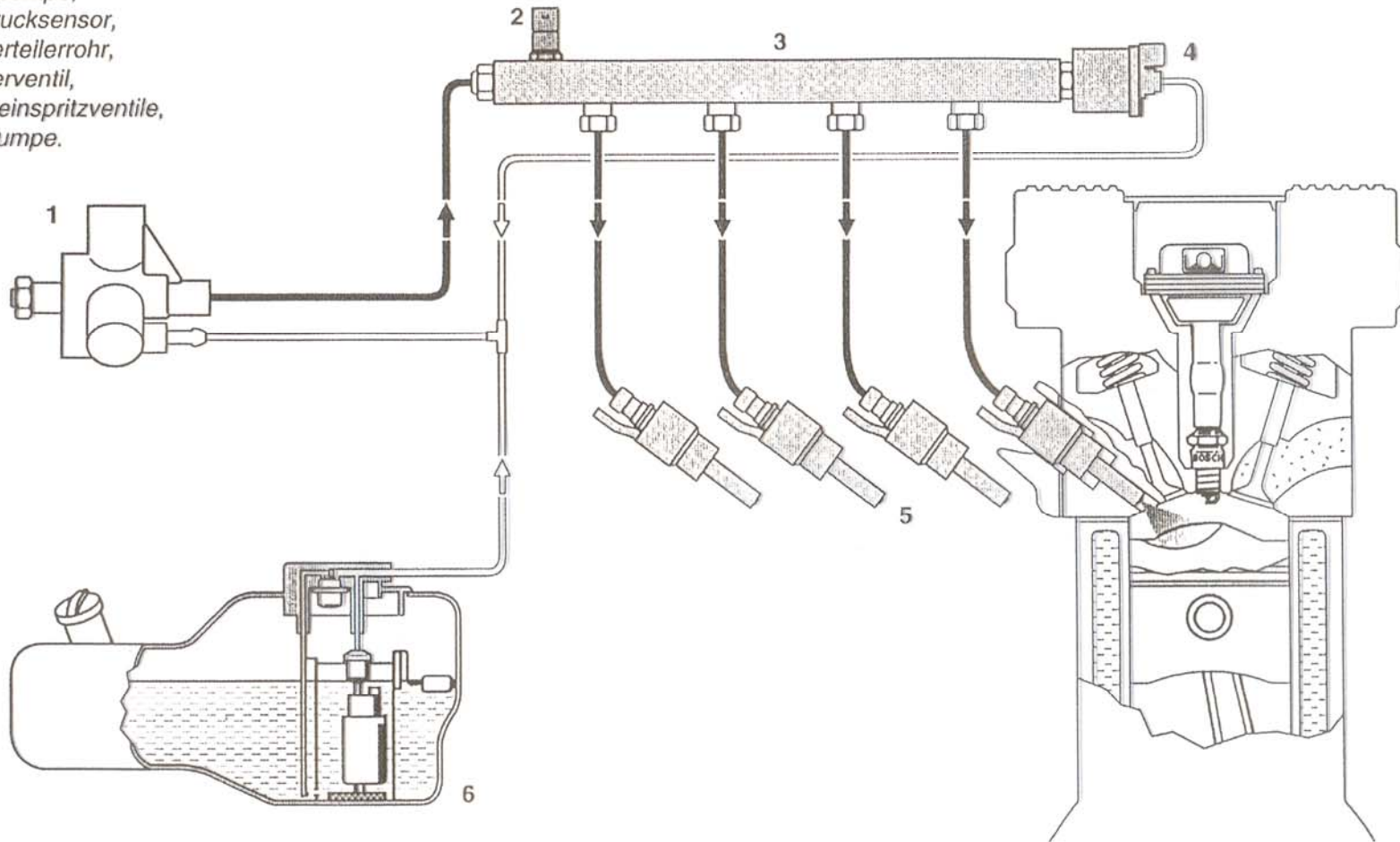
Quelle: Urlaub

Gemischbildung

Einspritzanlagen DI-Ottomotor

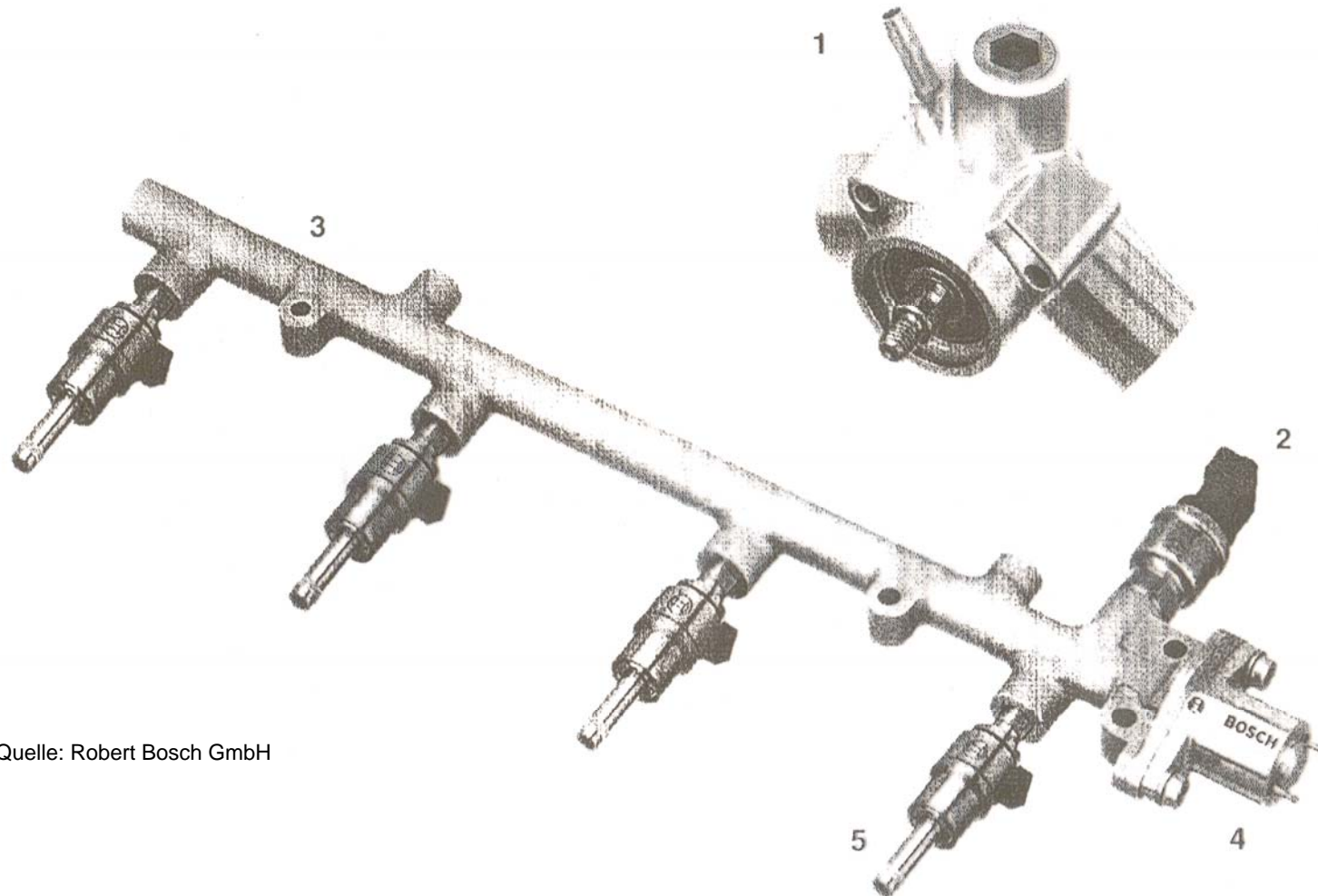
Kraftstoffkreislauf der Benzin-Direkteinspritzung

- 1 Hochdruckpumpe,
- 2 Kraftstoffdrucksensor,
- 3 Kraftstoffverteilerrohr,
- 4 Drucksteuerventil,
- 5 Hochdruckeinspritzventile,
- 6 Vorförderpumpe.



Quelle: Robert Bosch GmbH

1 Hochdruckpumpe, 2 Kraftstoffdrucksensor, 3 Kraftstoffverteilerrohr, 4 Drucksteuerventil, 5 Hochdruckeinspritzventile.

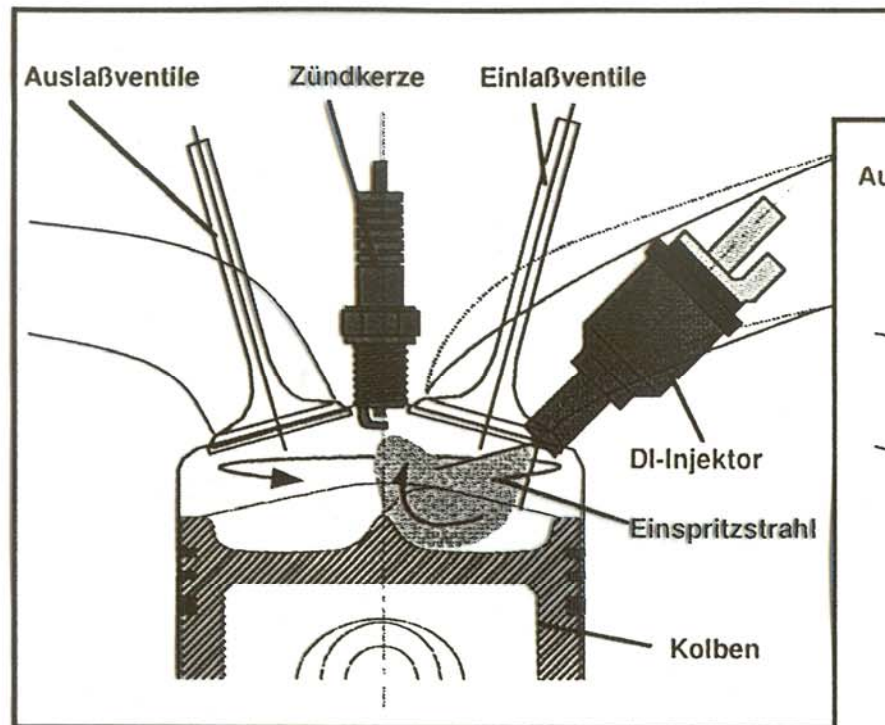


Quelle: Robert Bosch GmbH

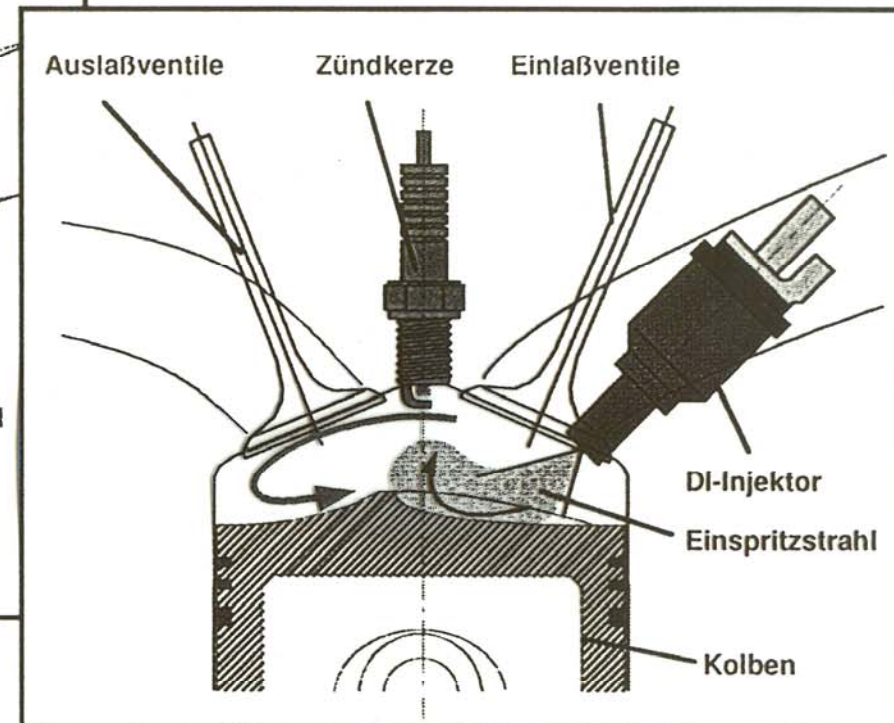
Systemkomponenten des Hochdruckteils der Benzin-Direkteinspritzung

Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers

Drall- bzw. Tumble-Konzept DI-Ottomotor

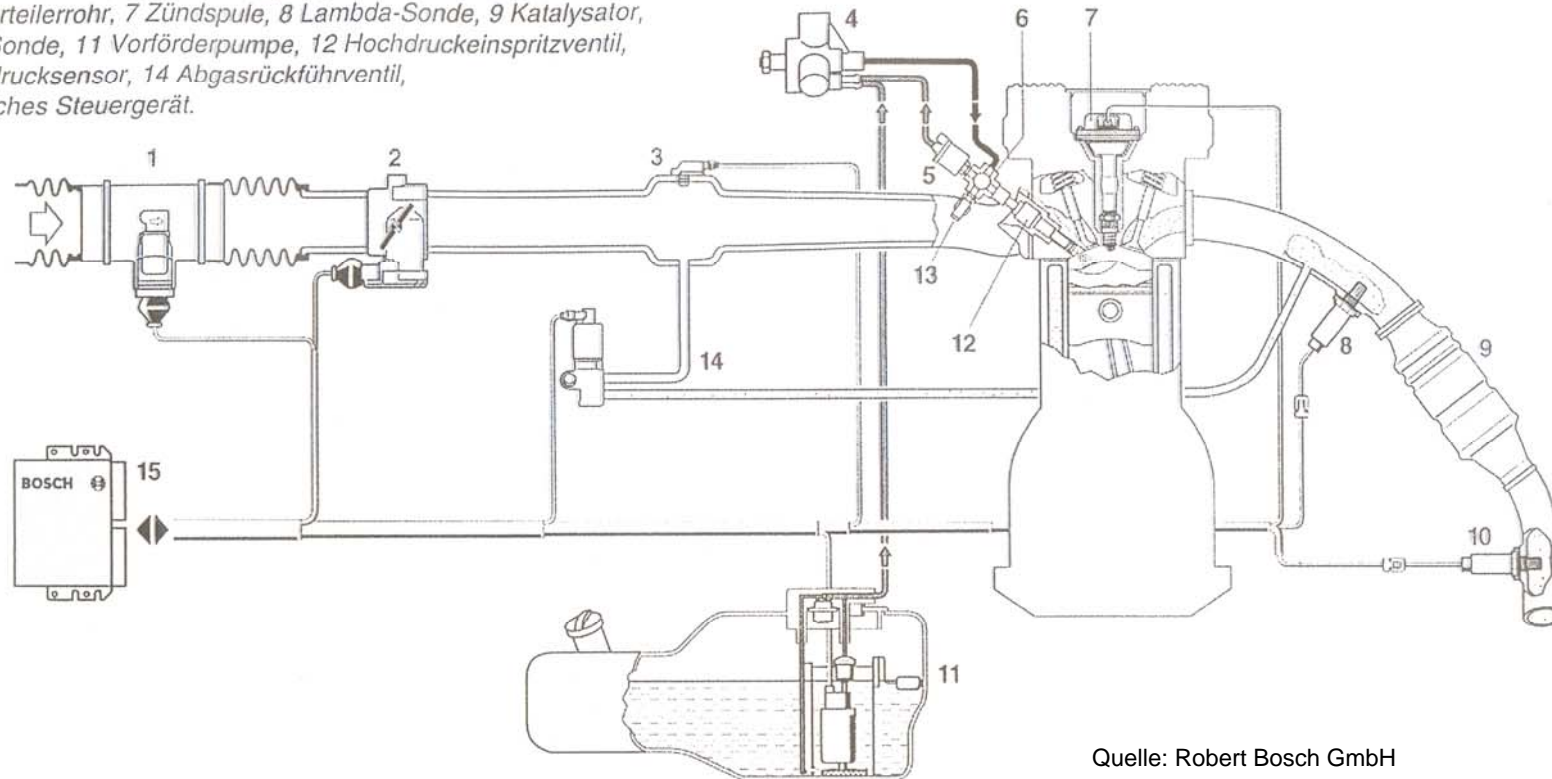


Drall-Konzept für 2 V und Mehrventiler mit engem Ventilwinkel.



Tumble-Konzept für Mehrventiler mit weitem Ventilwinkel.

- 1 Luftmassenmesser, 2 elektrisch betätigte Drosselvorrichtung,
3 Saugrohrdrucksensor, 4 Hochdruckpumpe, 5 Drucksteuerventil,
6 Kraftstoffverteilerrohr, 7 Zündspule, 8 Lambda-Sonde, 9 Katalysator,
10 Lambda-Sonde, 11 Vorförderpumpe, 12 Hochdruckeinspritzventil,
13 Kraftstoffdrucksensor, 14 Abgasrückführventil,
15 elektronisches Steuergerät.



Quelle: Robert Bosch GmbH

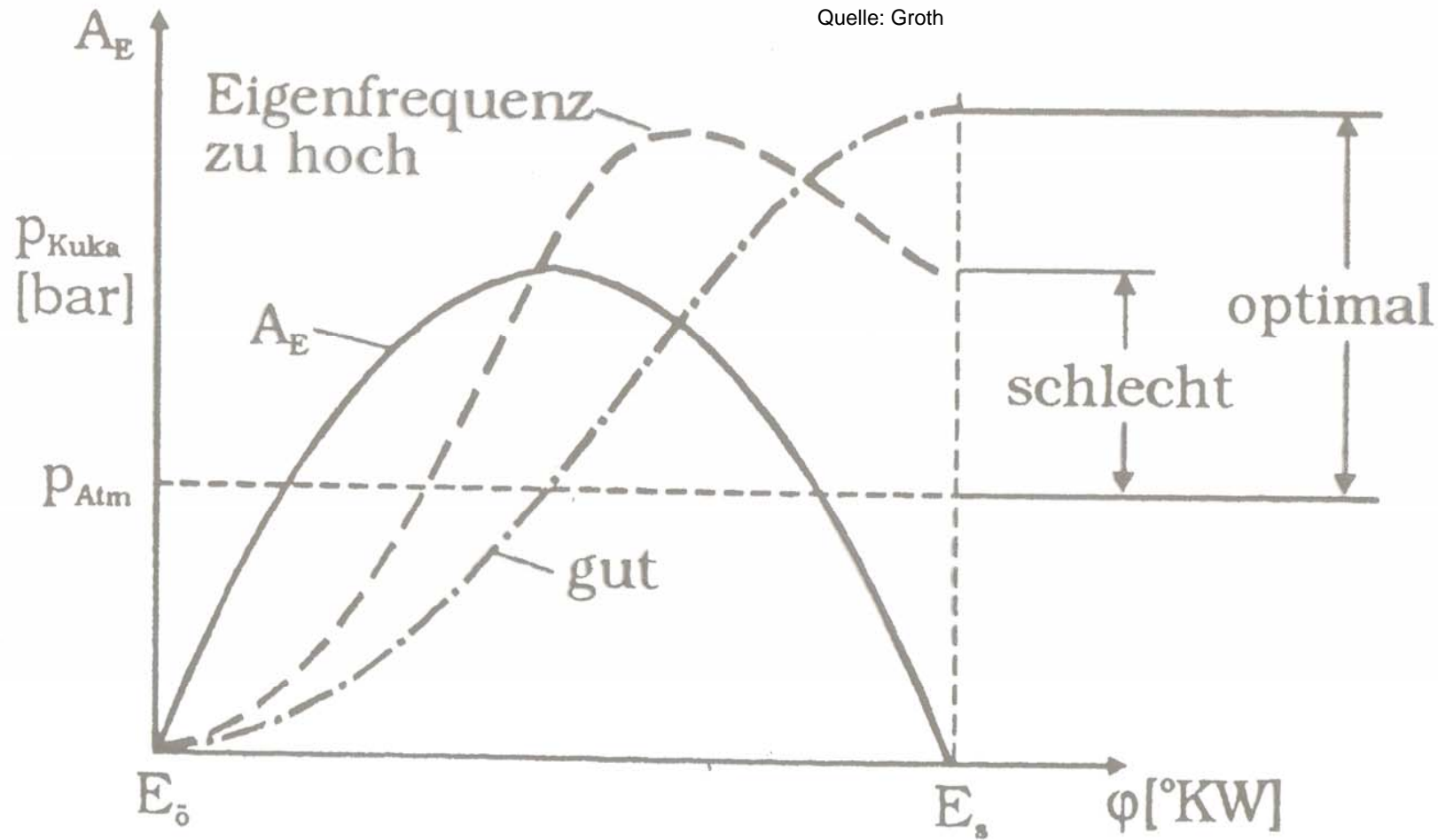
Motronic-System MED 7 für Benzin-Direkteinspritzung

Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers

Aufladung

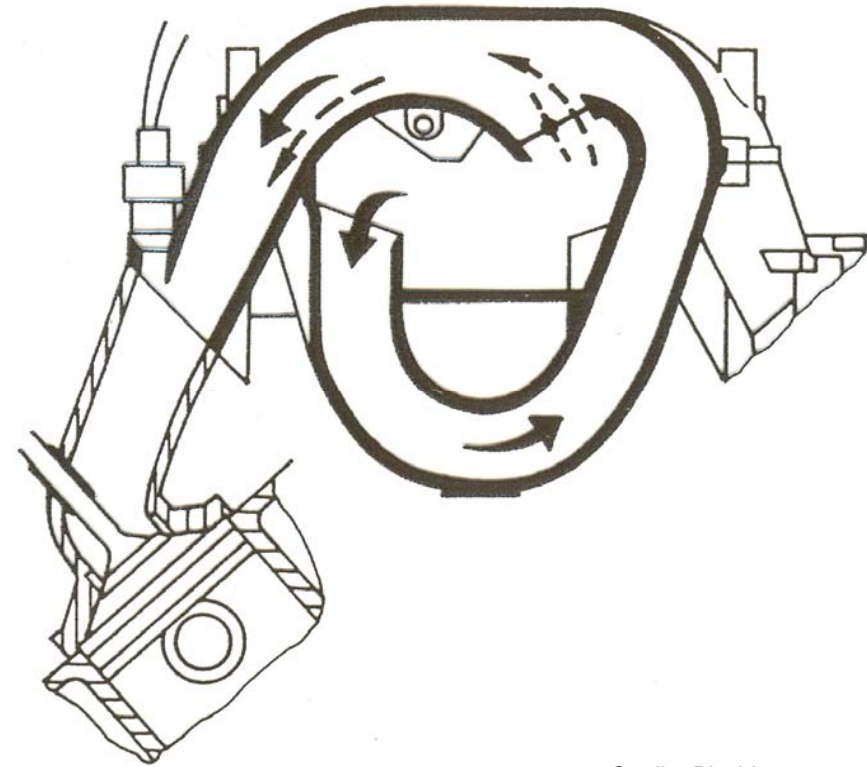
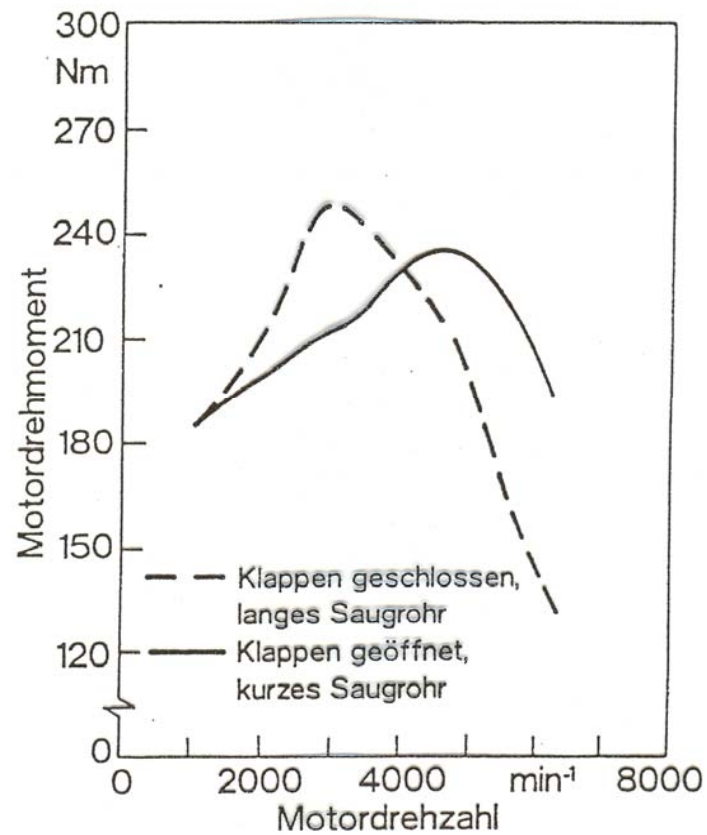
2-Takt- Ottomotor mit Kurbelkammerspülung

Abstimmung der Ansaugverhältnisse



Abstimmung der Ansaugleitungslänge

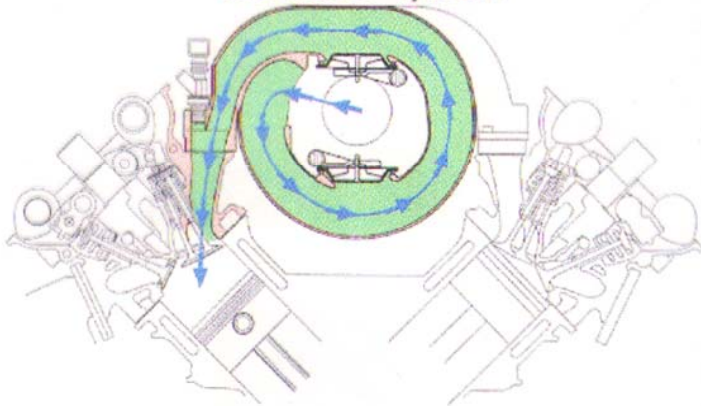
Prinzip: Audi V6



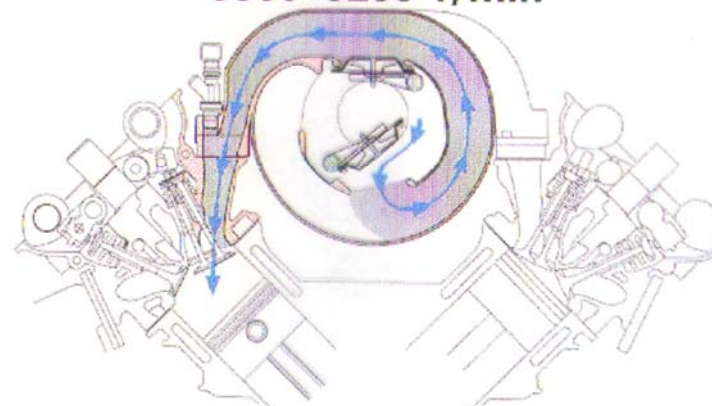
Quelle: Pischinger

Funktionsweise dreistufiges Schaltsaugrohr

**unterer Drehzahlbereich
bis 3360 1/min**

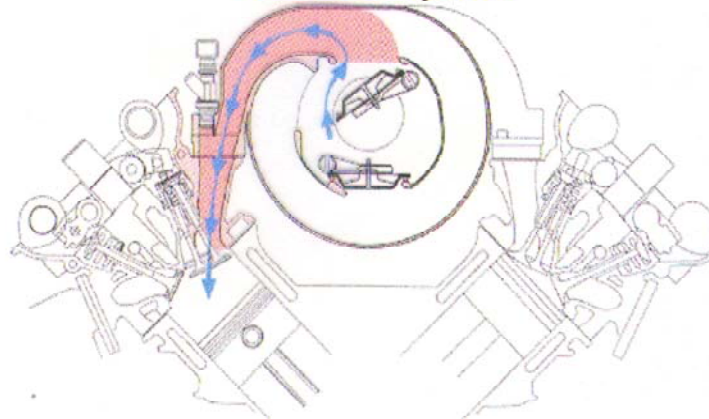


**mittlerer Drehzahlbereich
3360÷5200 1/min**

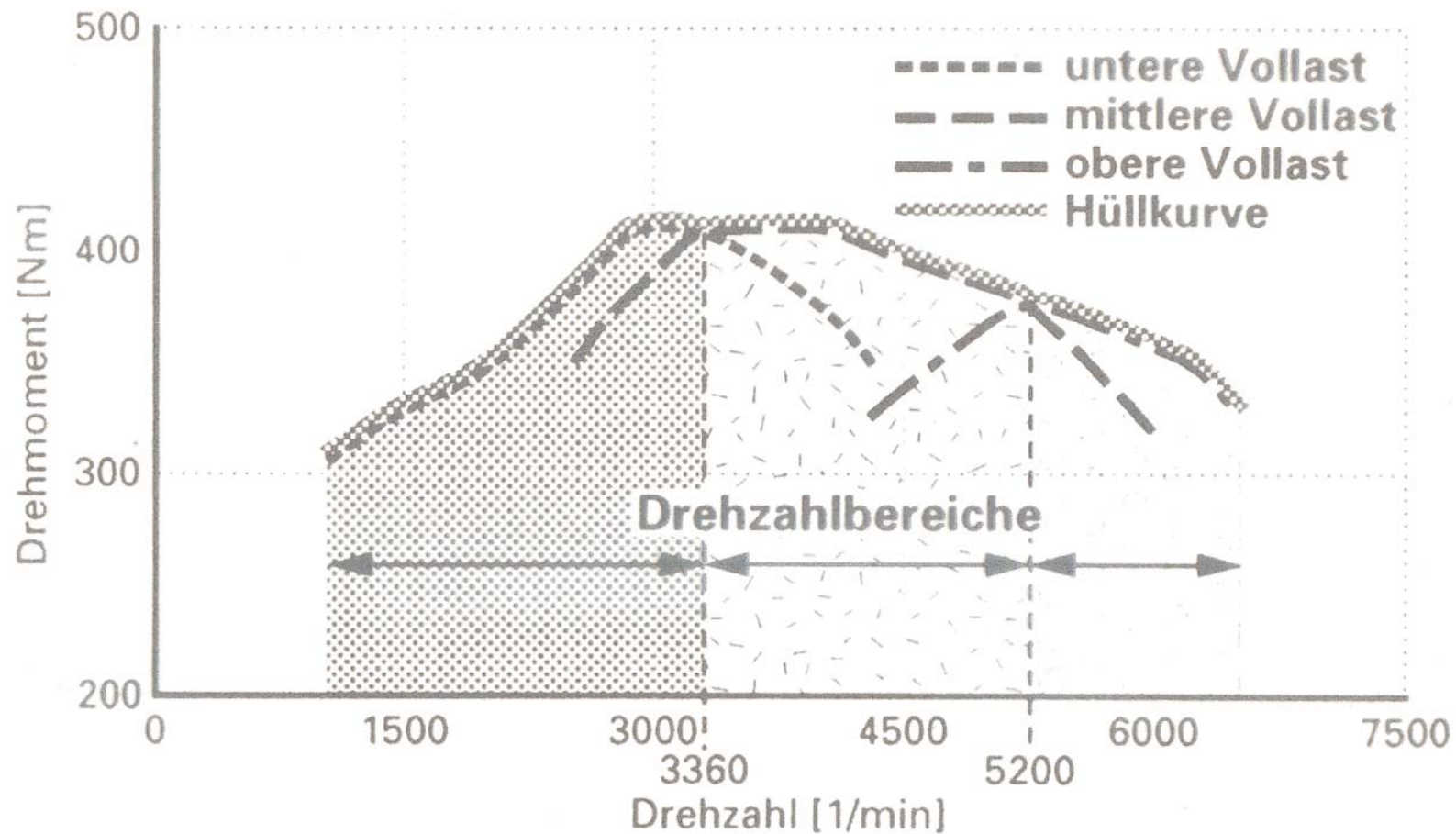


Quelle: Pierburg

**oberer Drehzahlbereich
ab 5200 1/min**

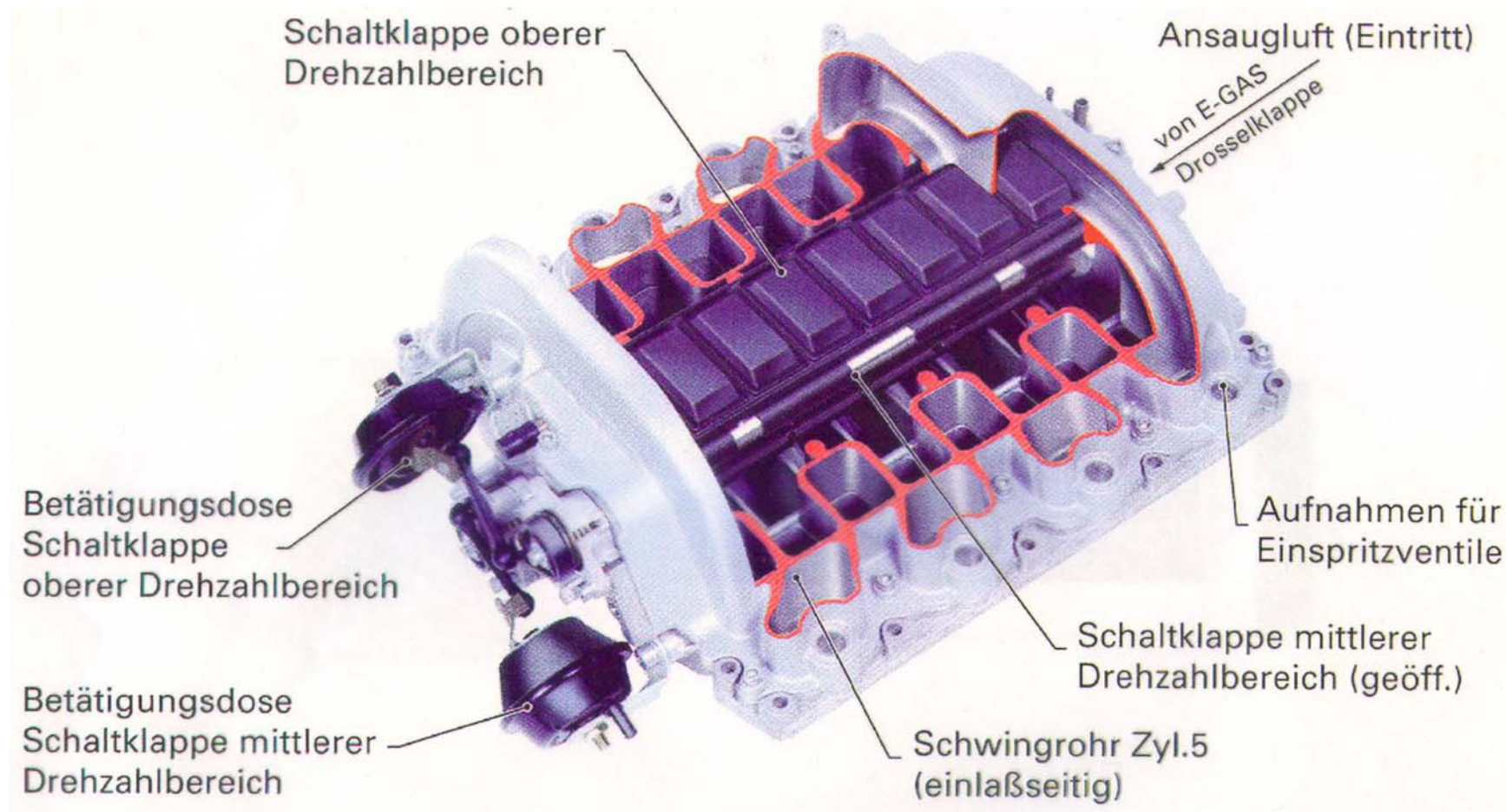


Drehmomentkennlinie 3-Stufen-Schaltsgaugrohr



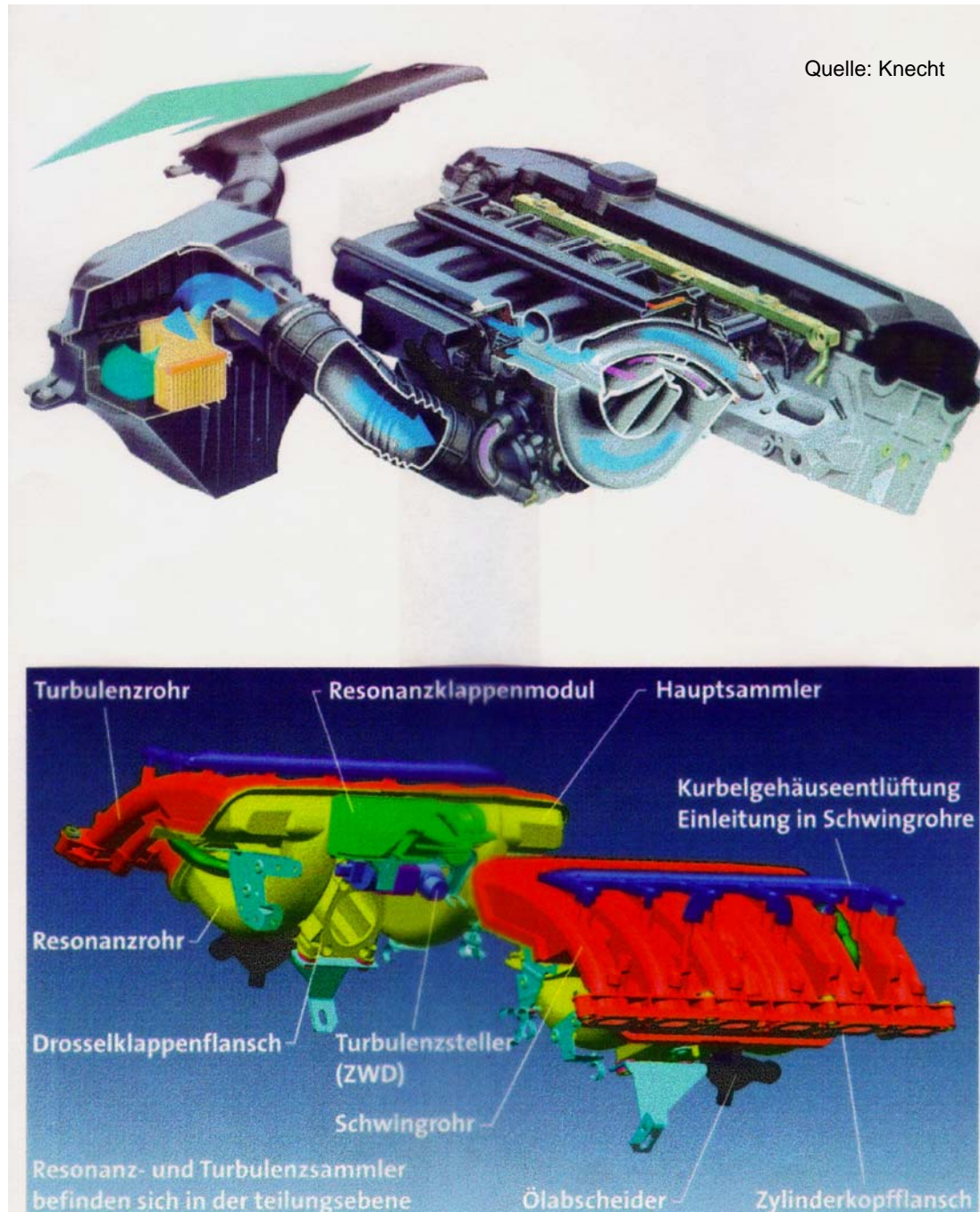
Quelle: Audi

Schaltbares Saugmodul



Quelle: Pierburg

Quelle: Knecht

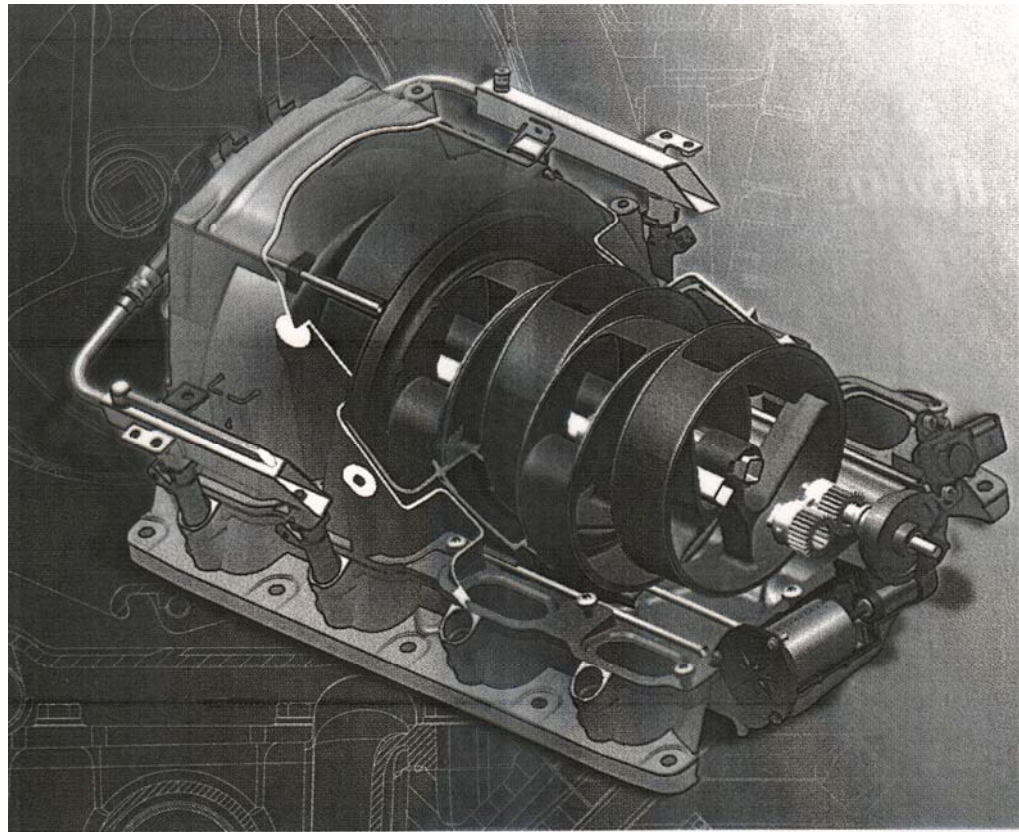


Ansaugsystem

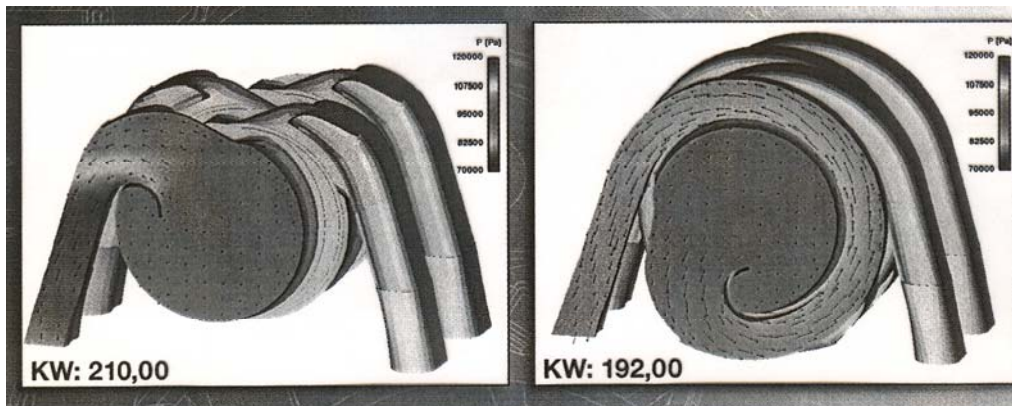
BMW – 6-Zyl.-Motor

Verbrennungskraftmaschinen

Prof. Dr.-Ing. E. Reimers



Schnittbild Sauganlage



Stömungsverlauf in der Sauganlage – Leistungsstellung (links) und

Vollvariable Sauganlage

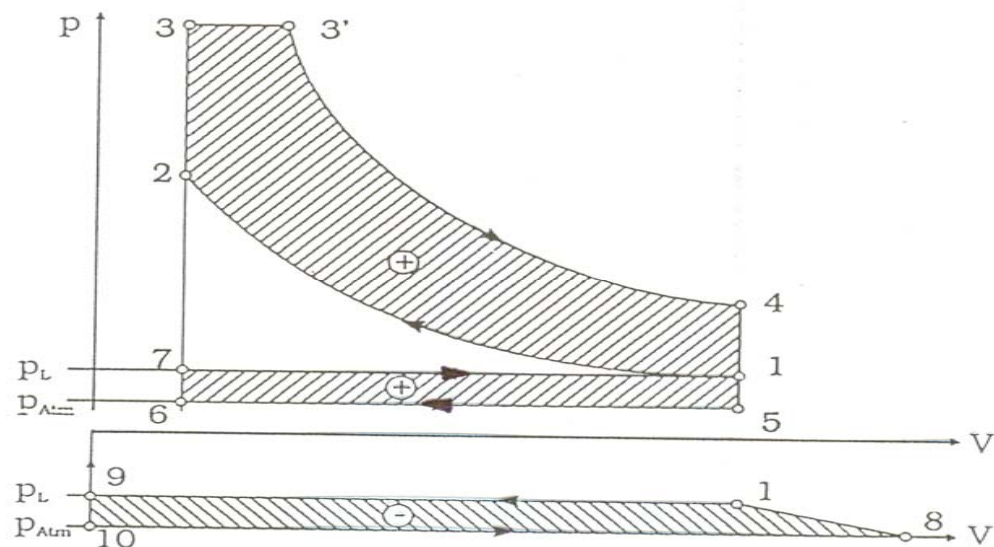
Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers

Das Luftdichteverhältnis in Abhängigkeit von der geodätischen Höhe



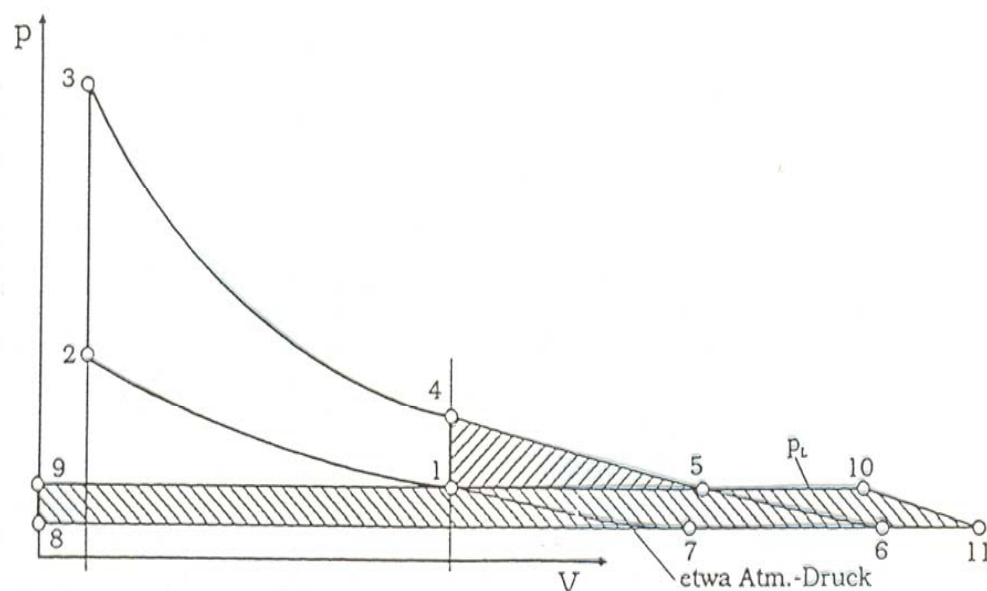
Quelle: Wagner / Fischer / Fromman

Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers

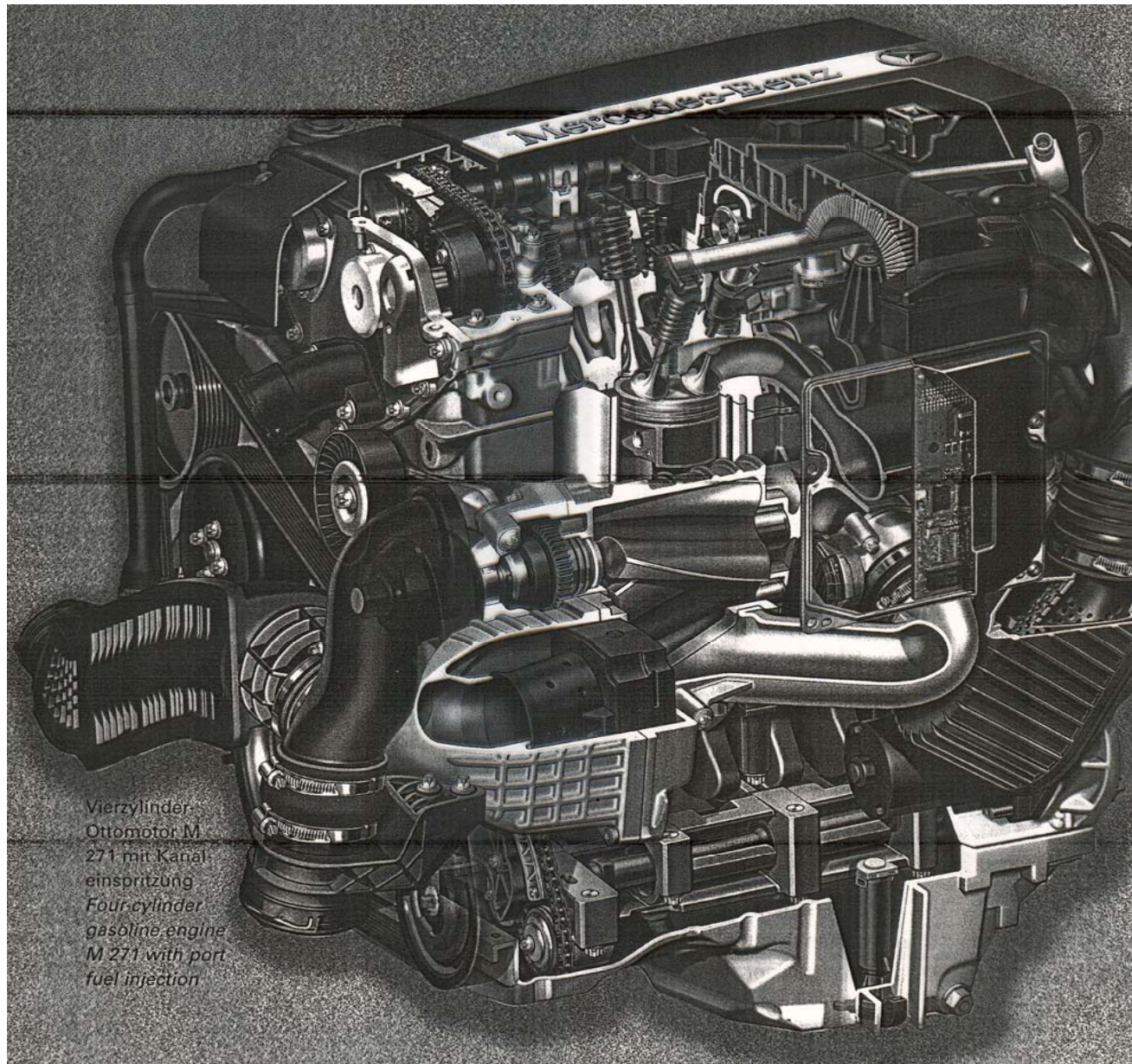


V – Diagramm des Ladernotors

Aufladung
pV-Diagramm



p , V – Diagramm eines Motors mit Abgasturbolader

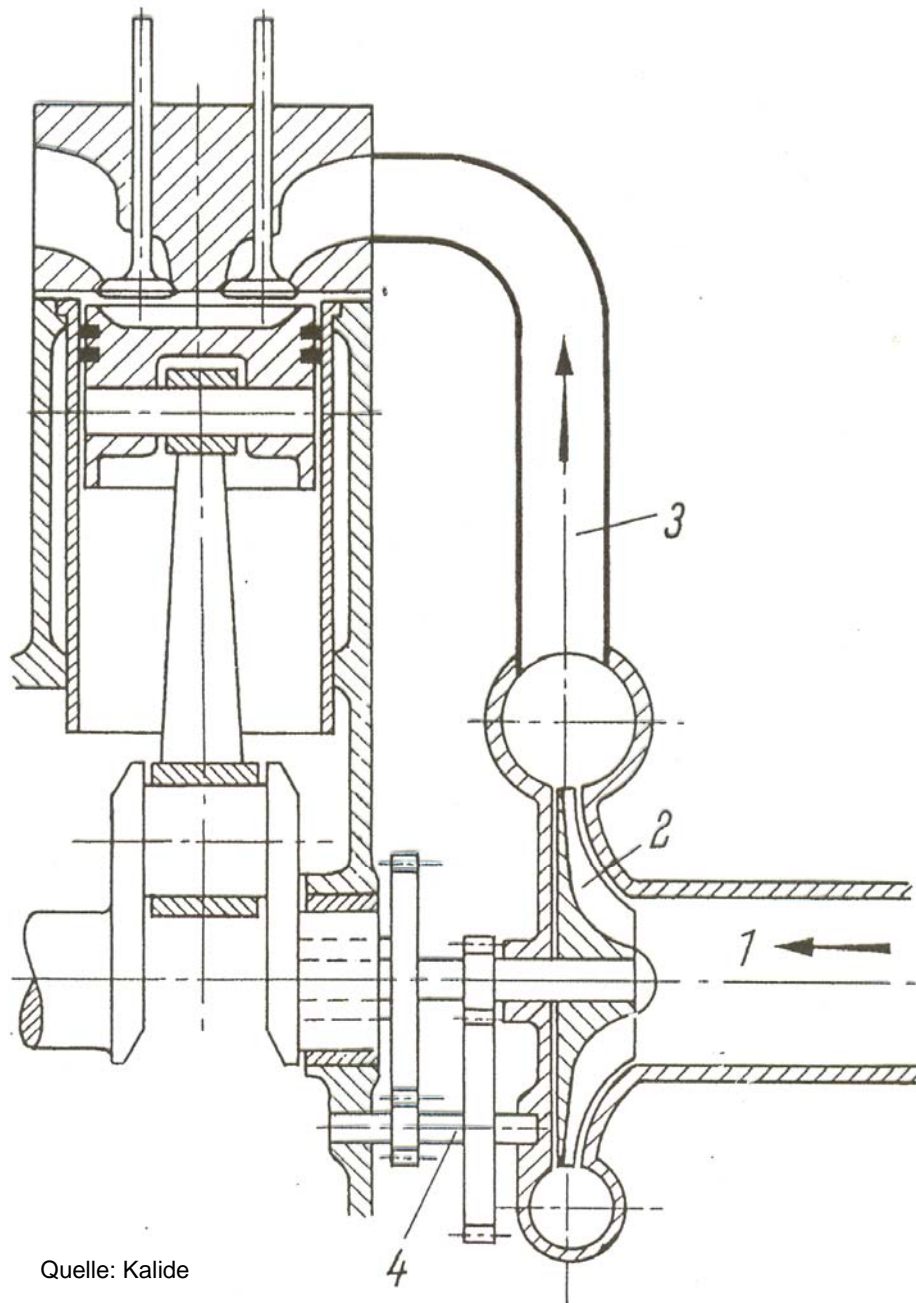


Vierzylinder-
Ottomotor M
271 mit Kanal-
einspritzung
Four-cylinder
gasoline engine
M 271 with port
fuel injection

4-Zyl.-Ottomotor mit Kompressor

Quelle: Mercedes-Benz

Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers

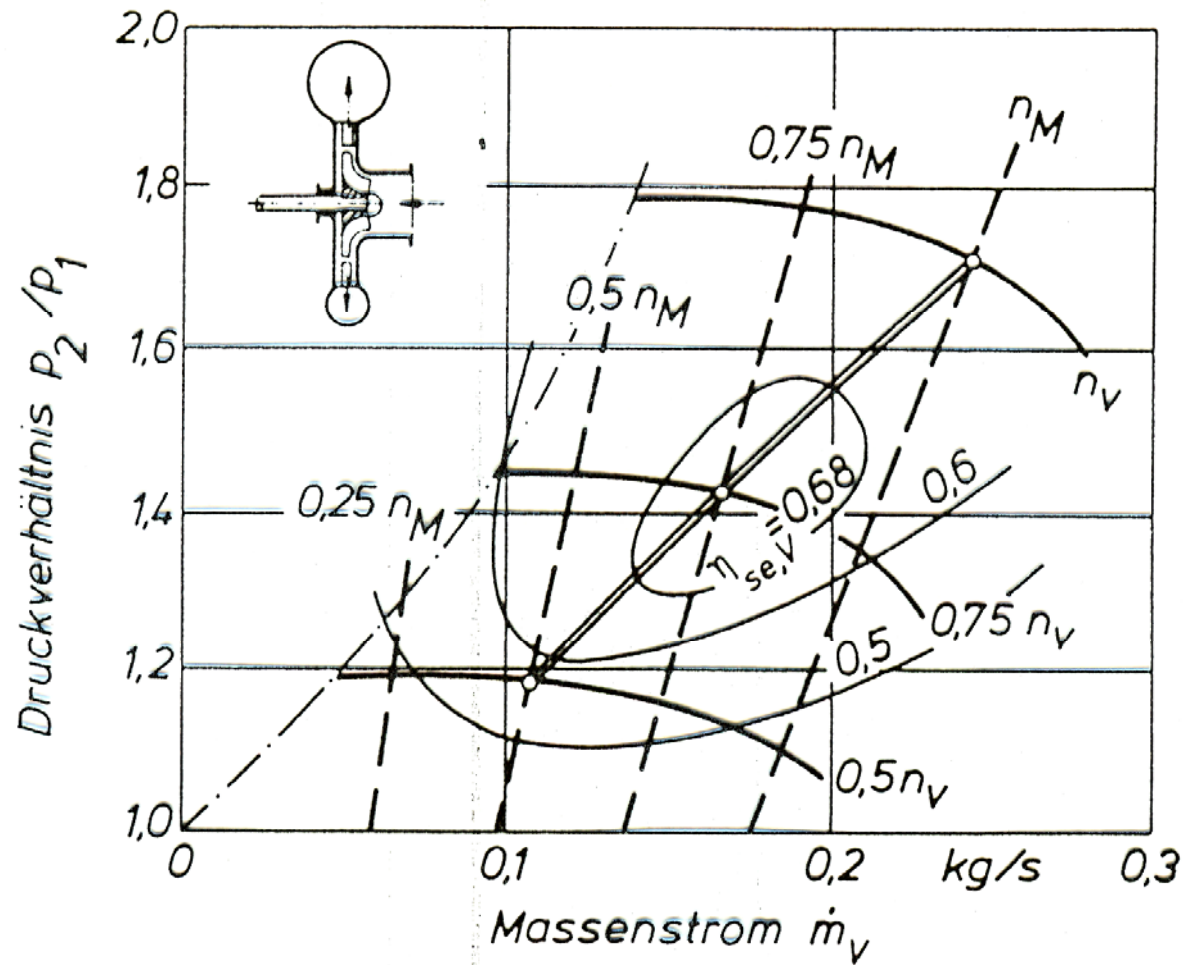


- 1 Lufteintritt
- 2 Lader (Radialverdichter)
- 3 Ladeluftleitung
- 4 Zahnradgetriebe

Antrieb des Laders von der Kurbelwelle

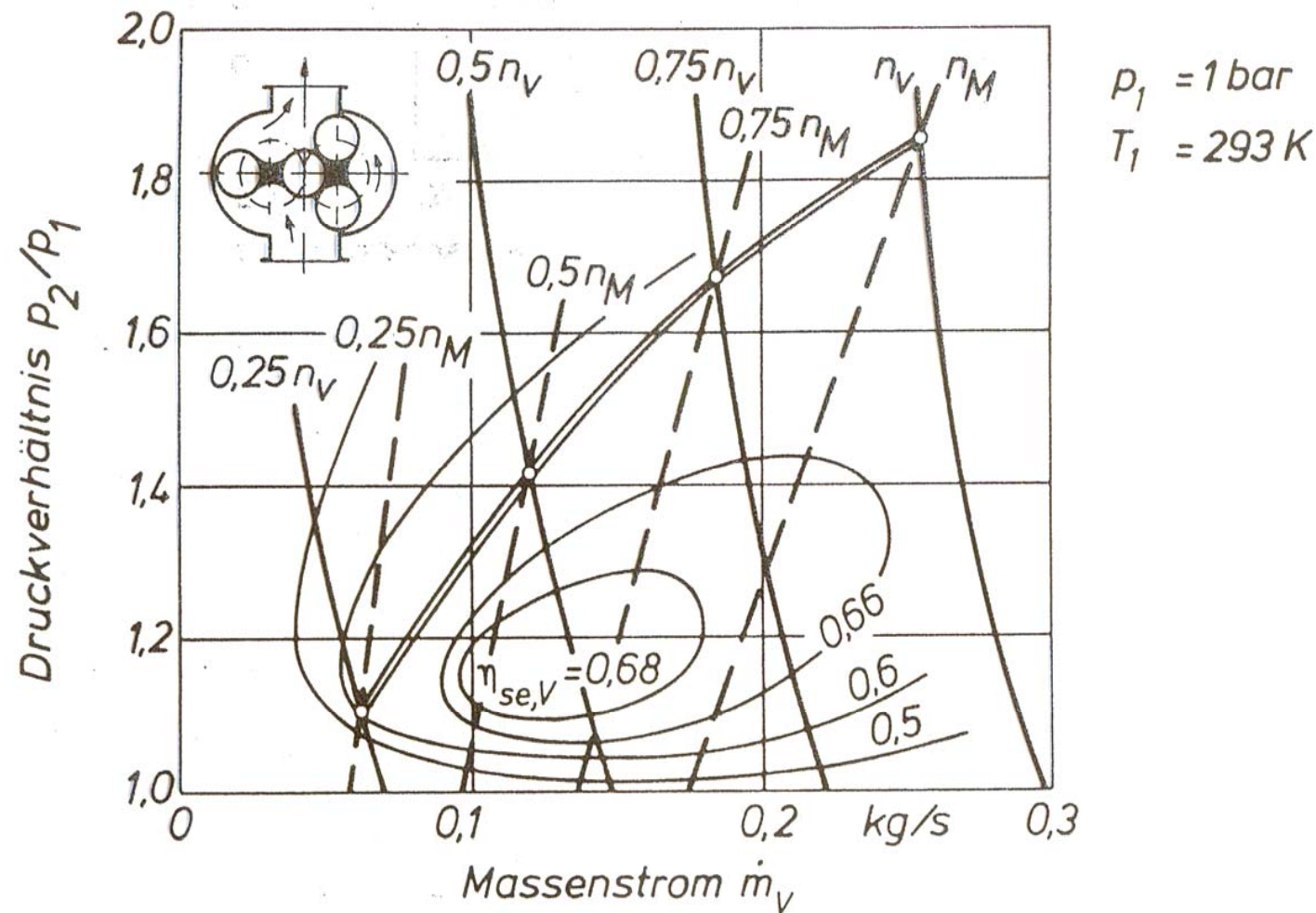
Quelle: Kalide

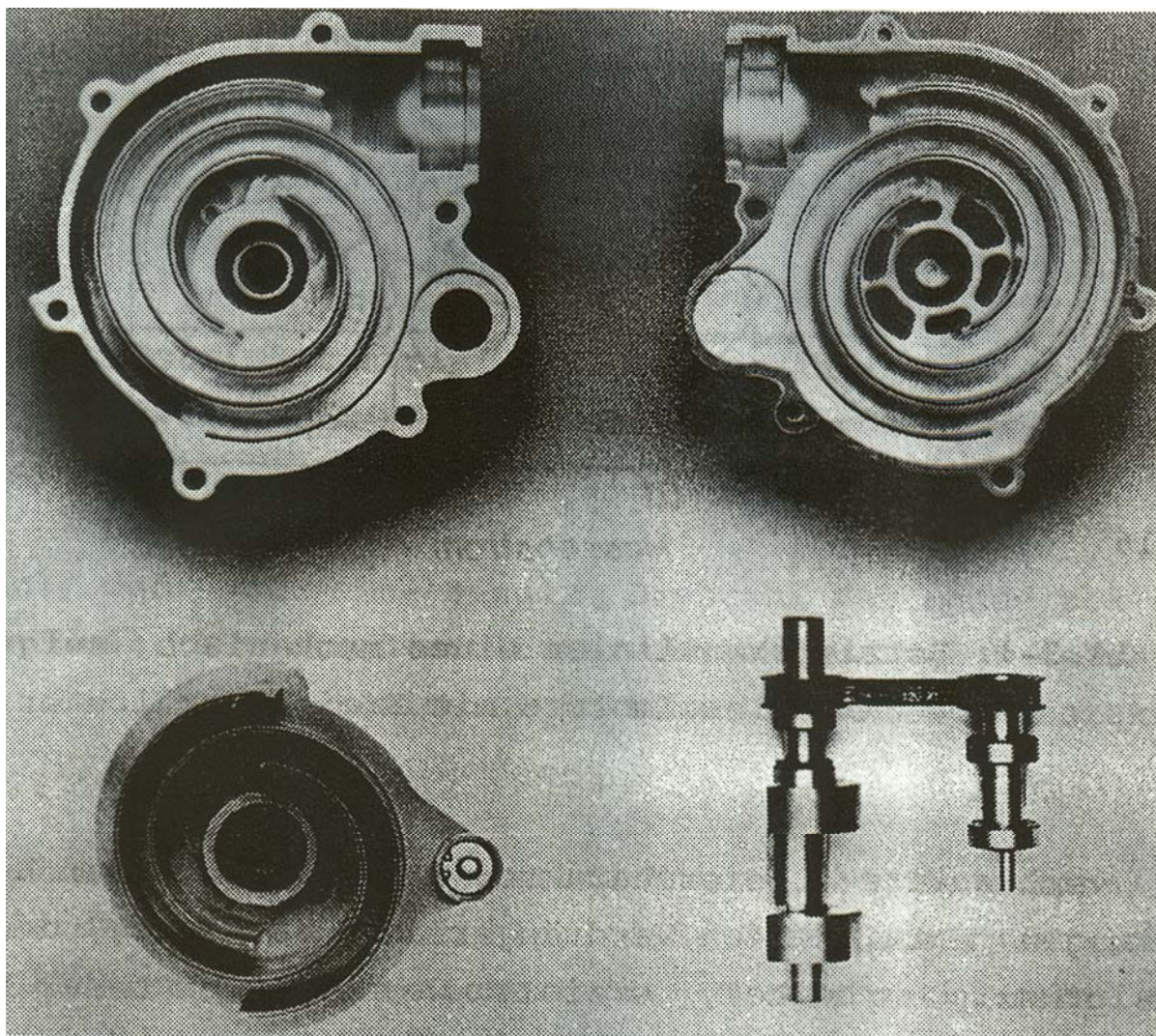
Betriebskennlinien eines mechanisch aufgeladenen 4-Takt-Dieselmotors mit Kreiselverdichter



$p_1 = 1 \text{ bar}$
 $T_1 = 293 \text{ K}$

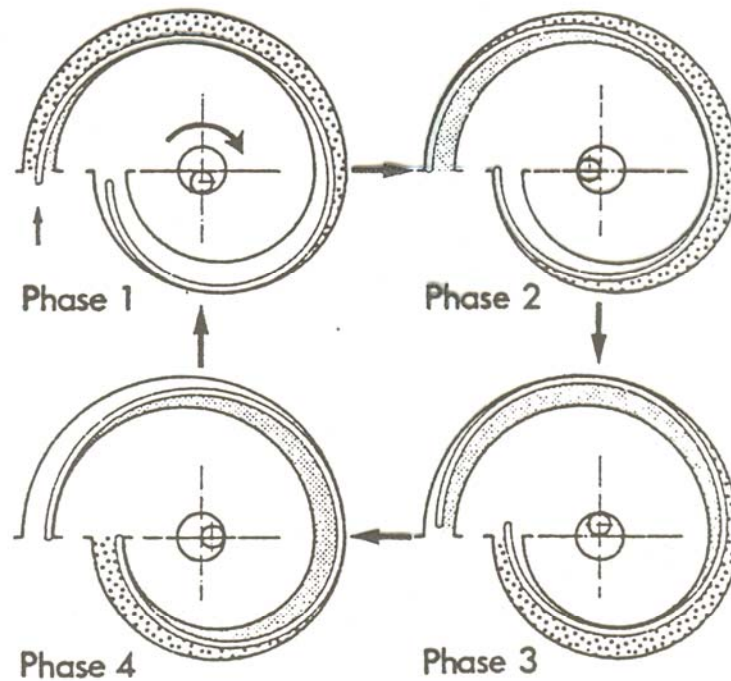
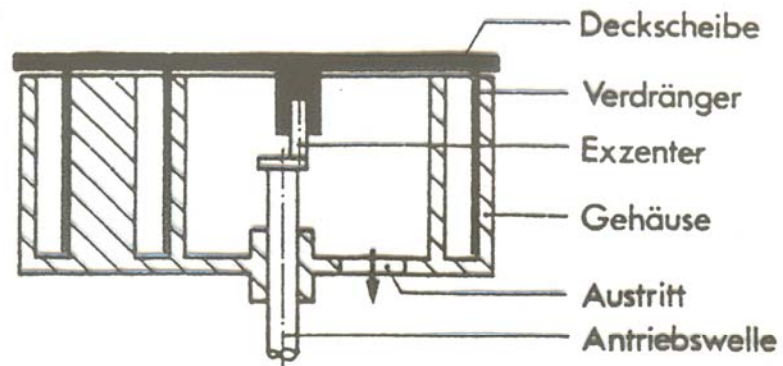
Betriebskennlinien eines mechanisch aufgeladenen 4-Takt-Dieselmotors mit Rootsverdichter





Komponenten des G-Laders

Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers

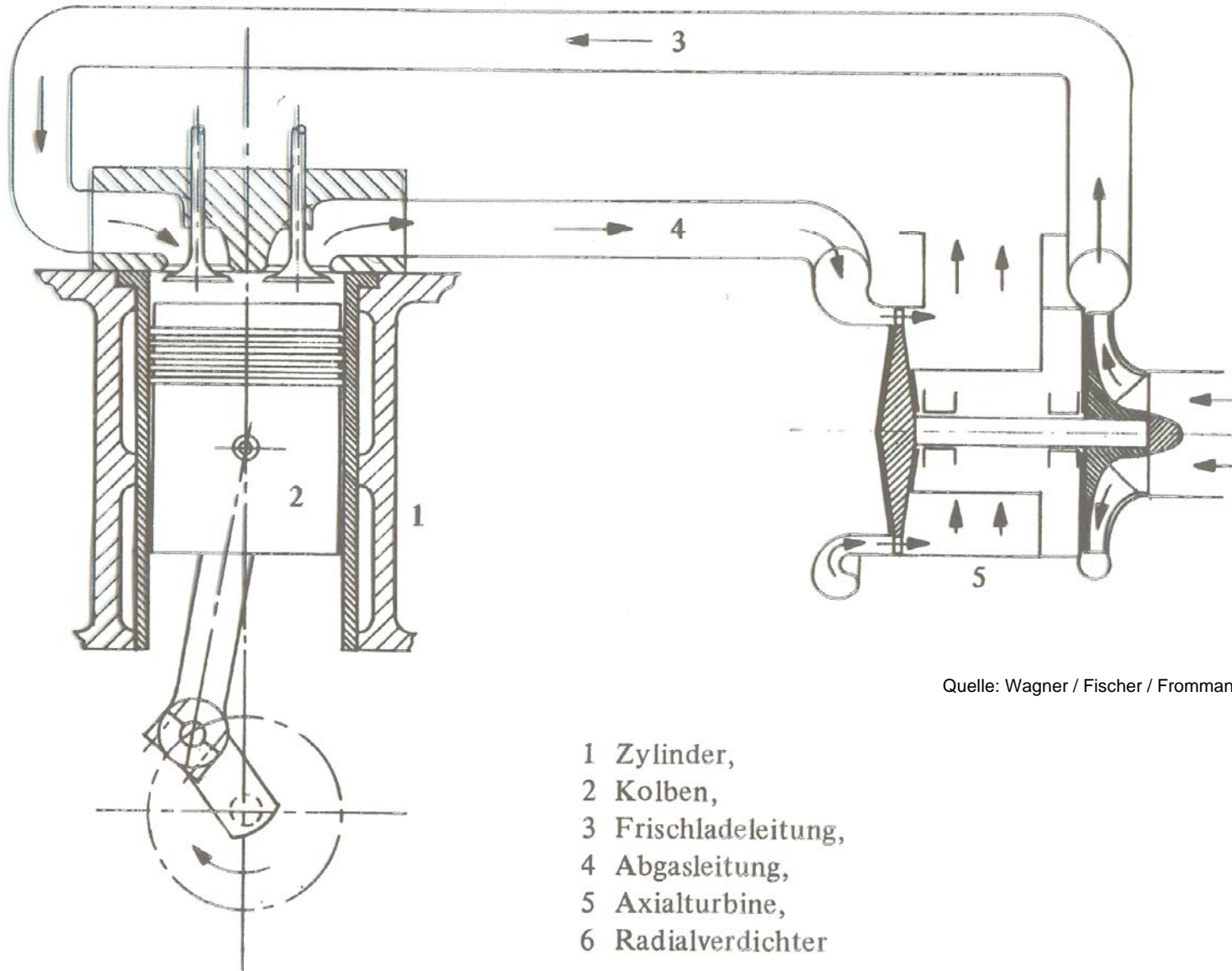


Arbeitsraum



Funktionsprinzip des G-Laders

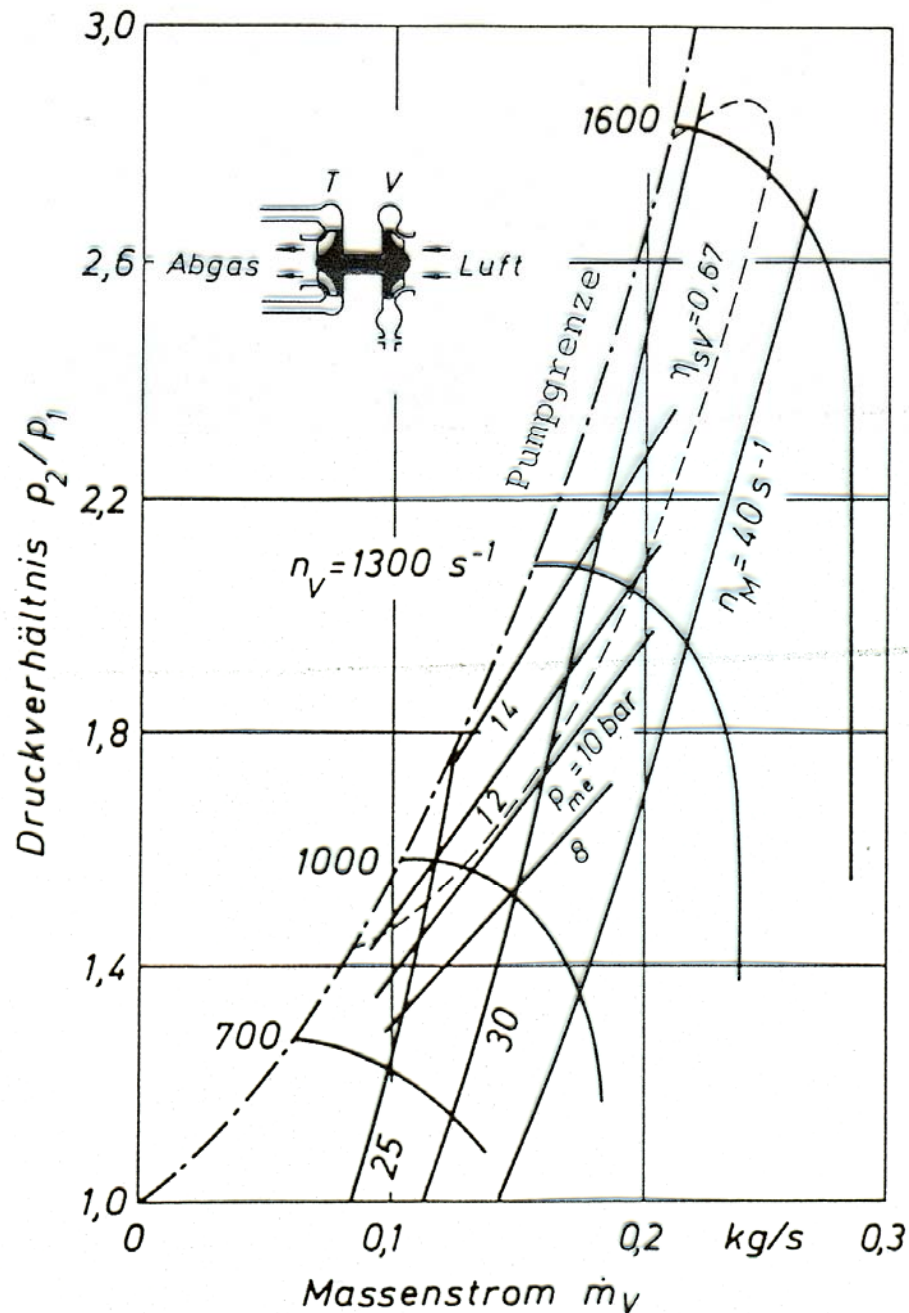
Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers



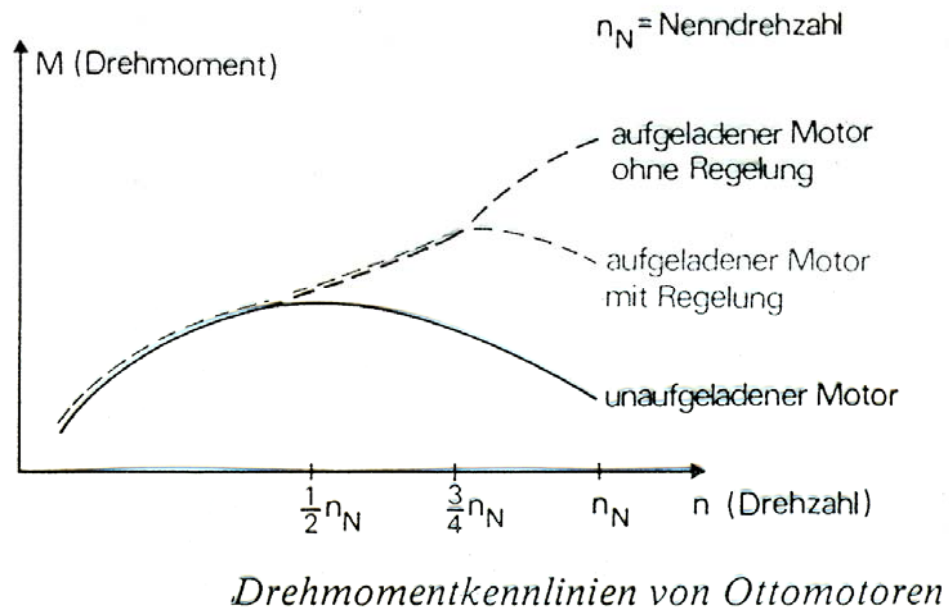
Quelle: Wagner / Fischer / Fromman

Schema einer Abgasturboaufladung

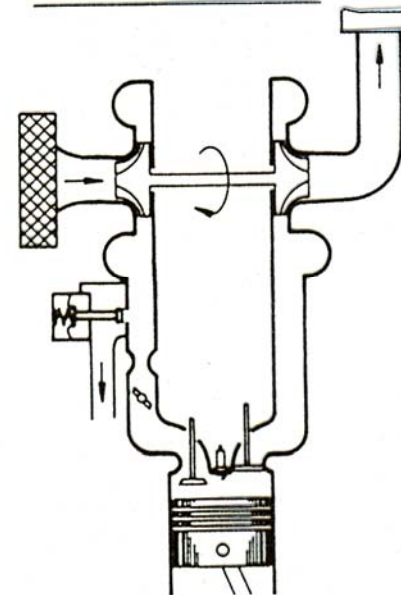
Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers



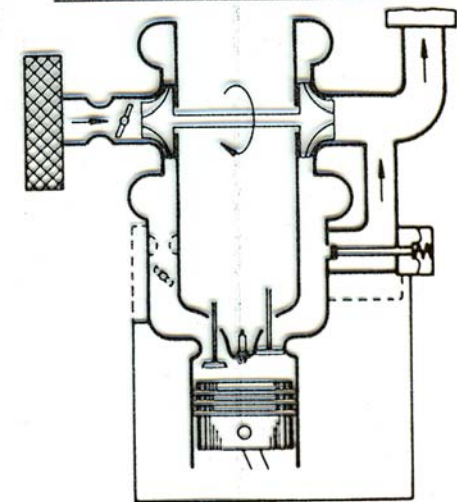
Betriebskennlinie
eines Dieselmotors mit
Abgastourbolader



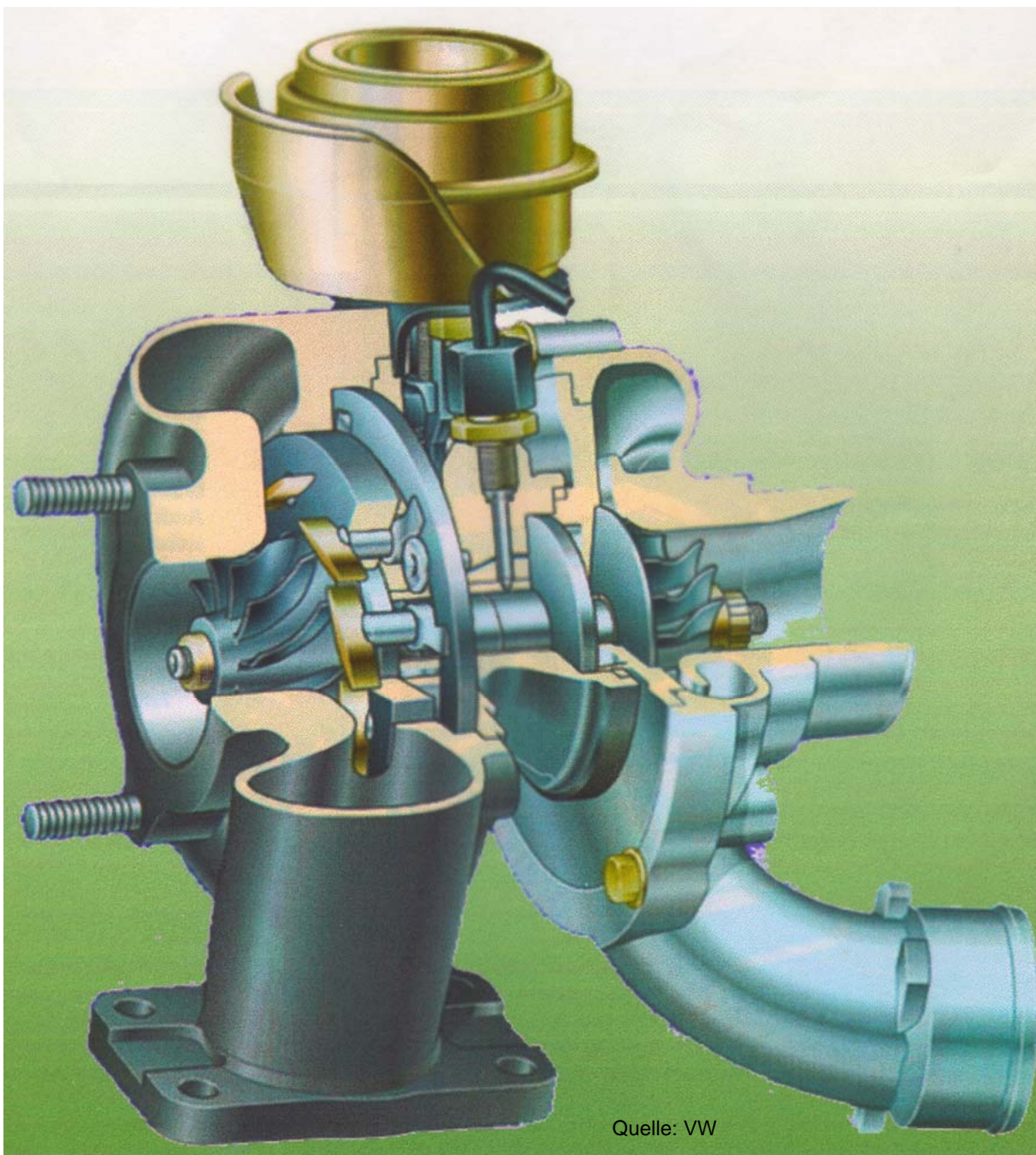
Luftabblasung



Abgasabblasung



Ladedruckregelung



Quelle: VW

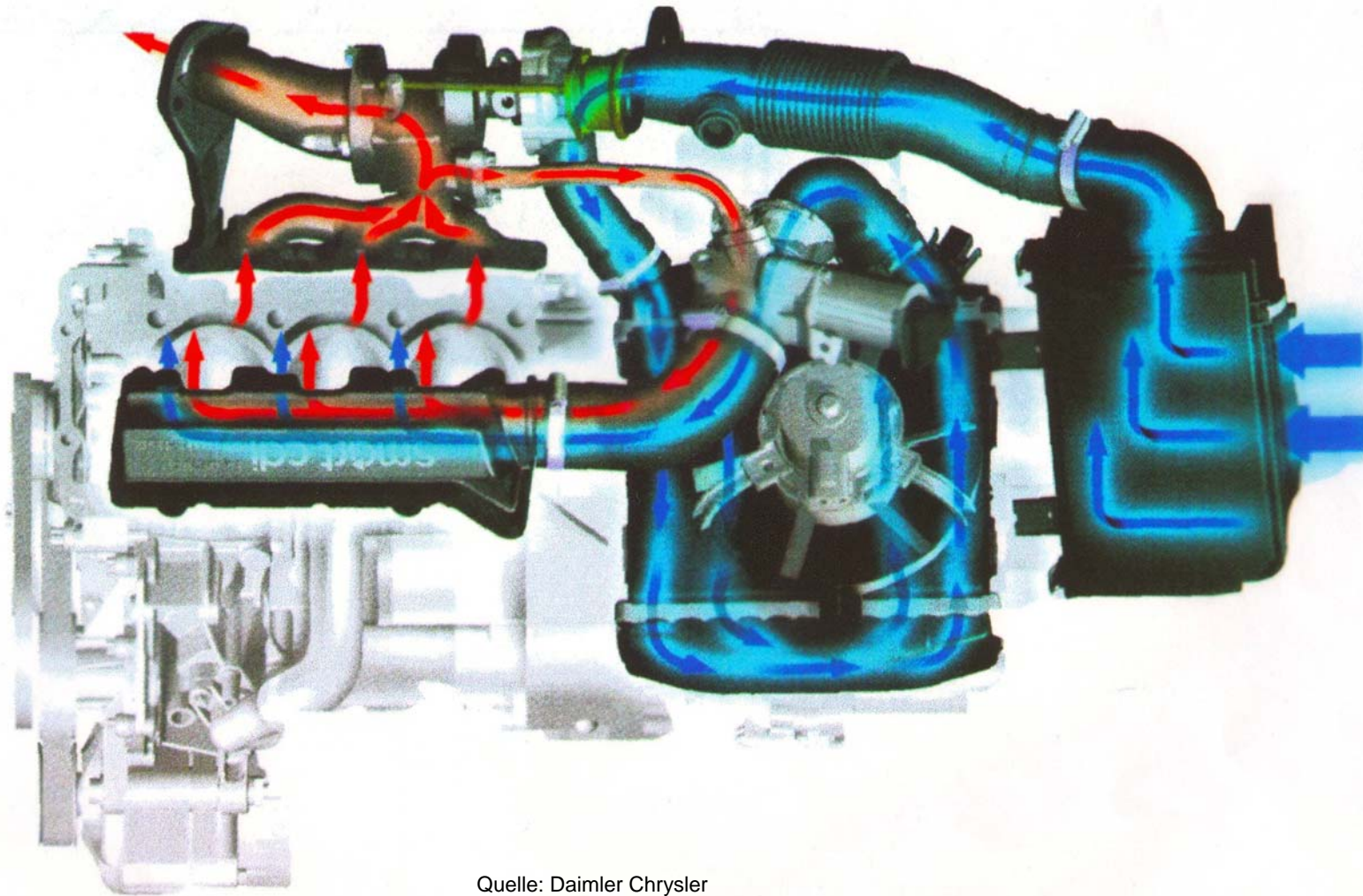
Turbolader mit variabler Turbinengeometrie

Leitschaufeln verstellbar

Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers

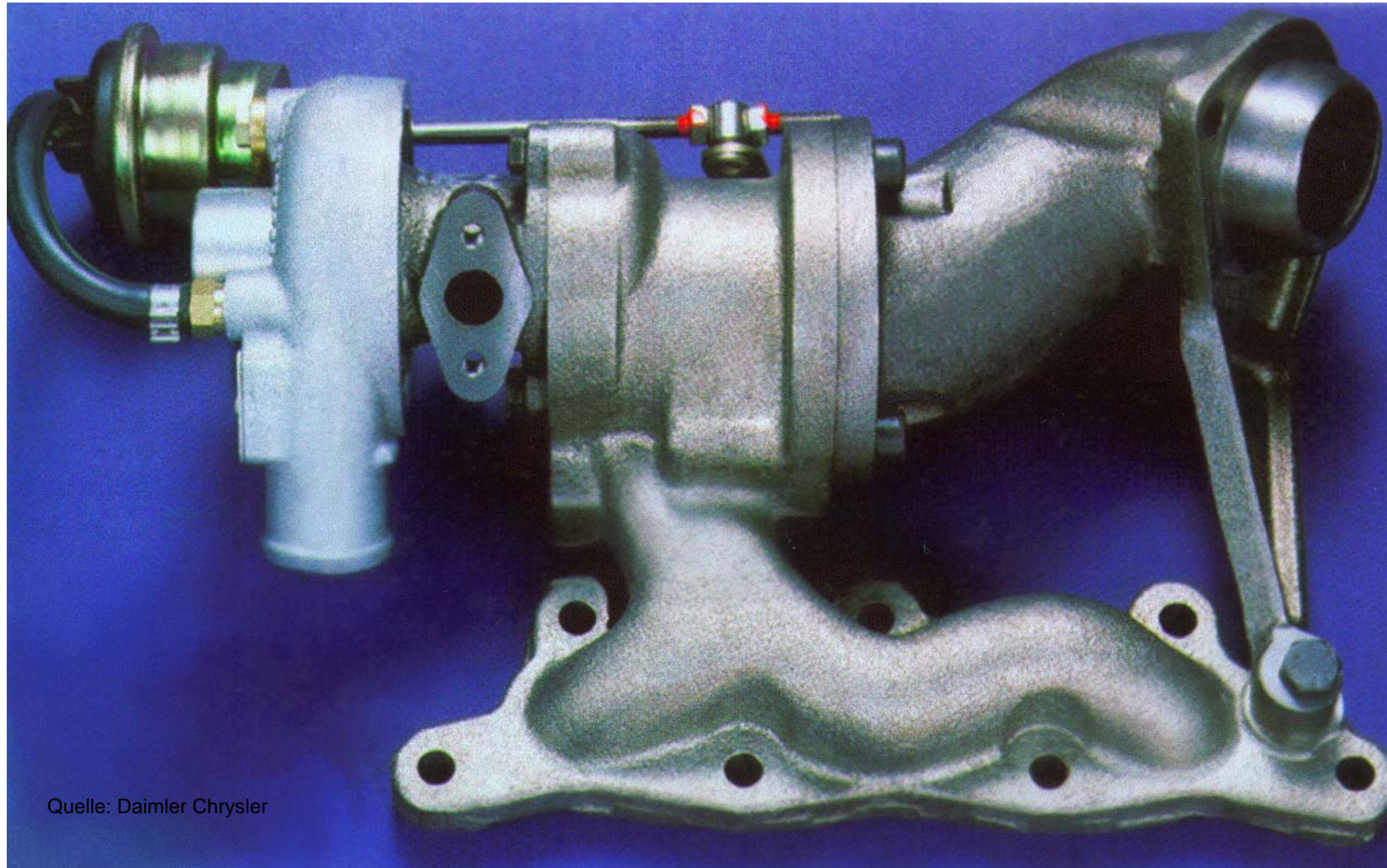
Luft- und Abgasrückführung

beim Smart - Dieselmotor

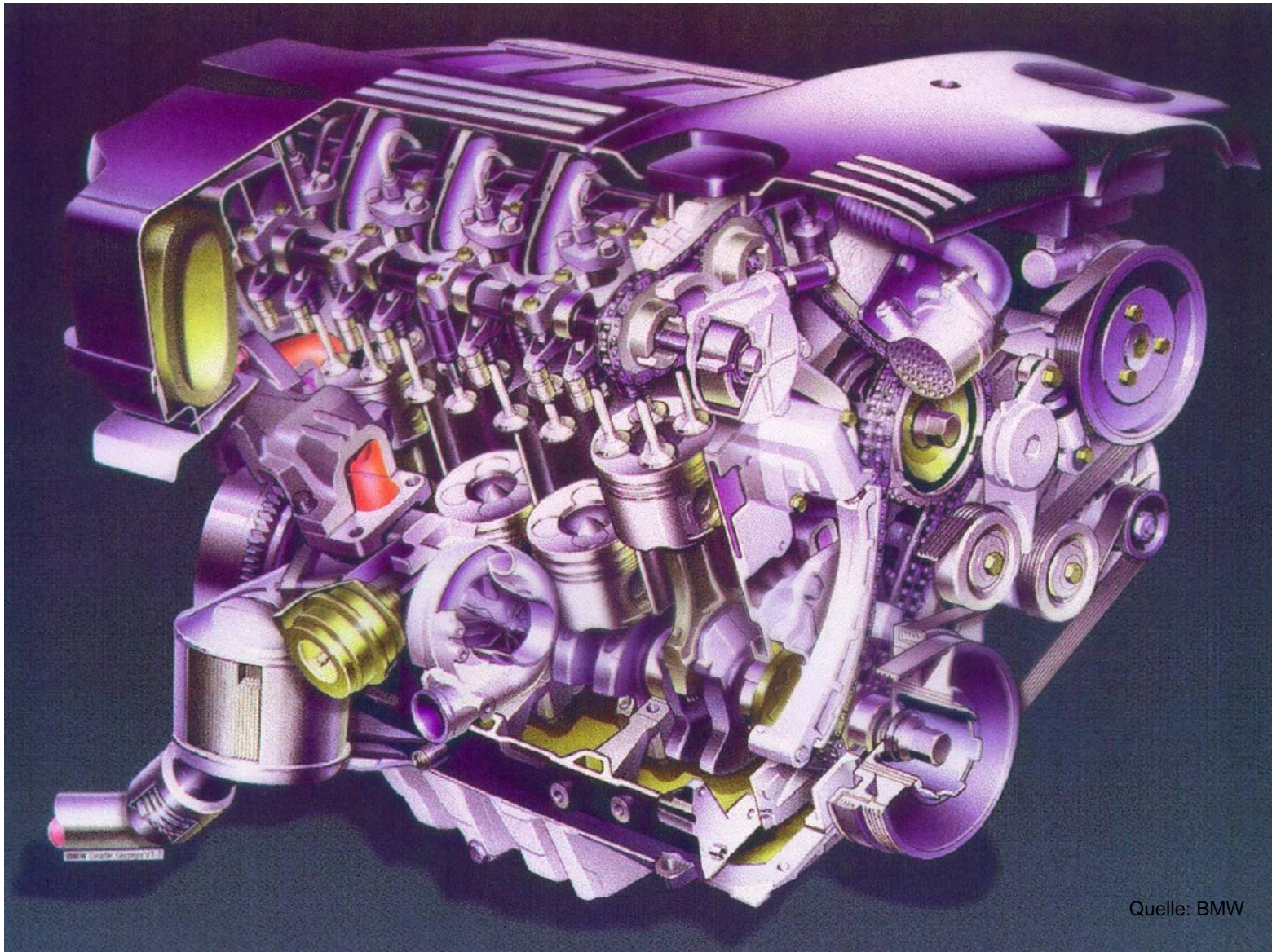


Quelle: Daimler Chrysler

Abgastourbolader mit integriertem Auspuffkrümmer



Quelle: Daimler Chrysler

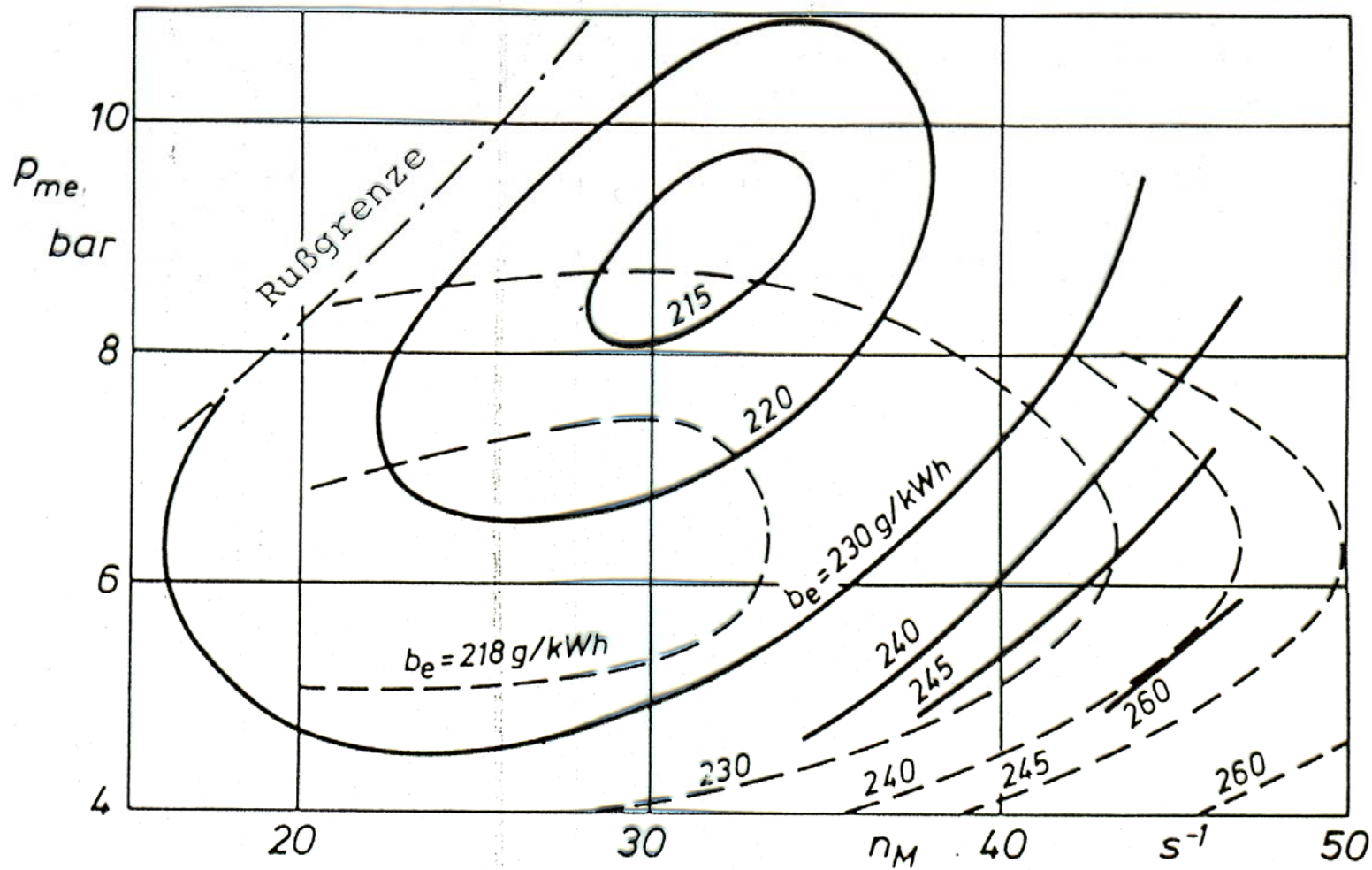


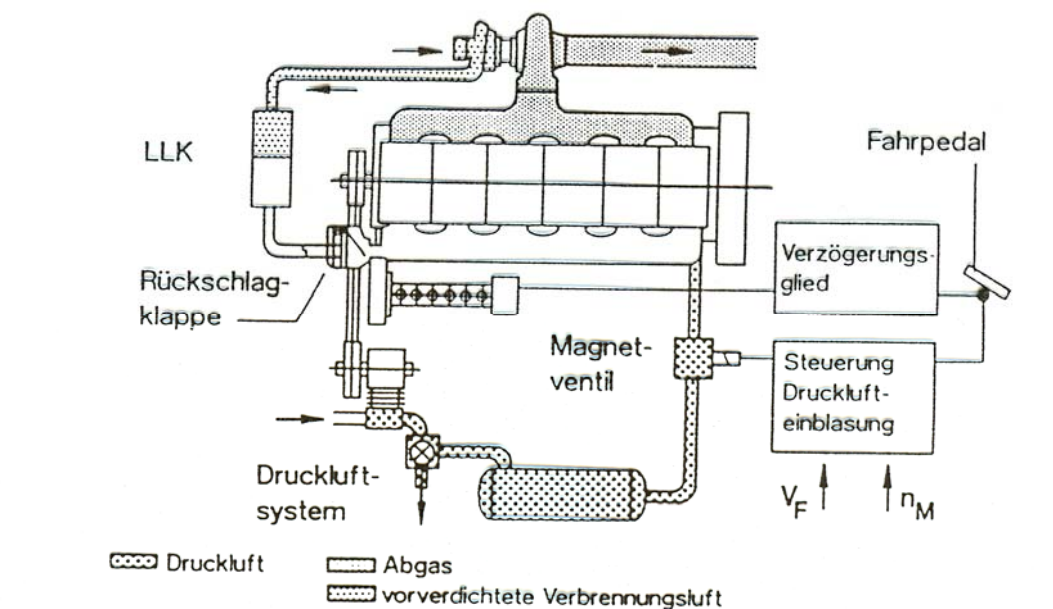
Quelle: BMW

Vierzylinder-Dieselmotor M 47

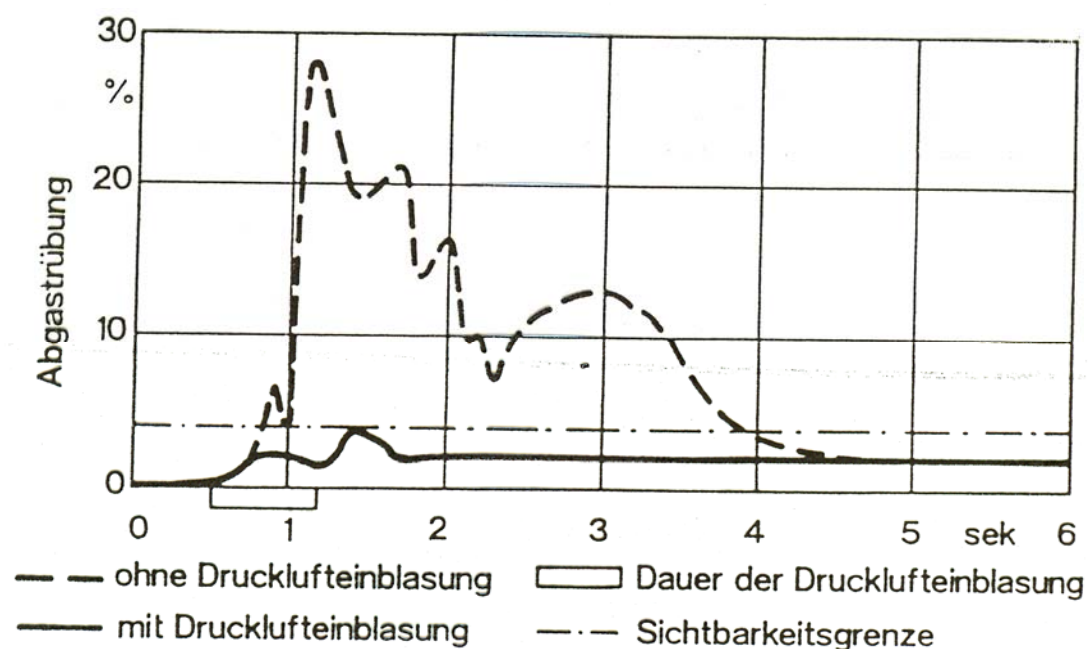
Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers

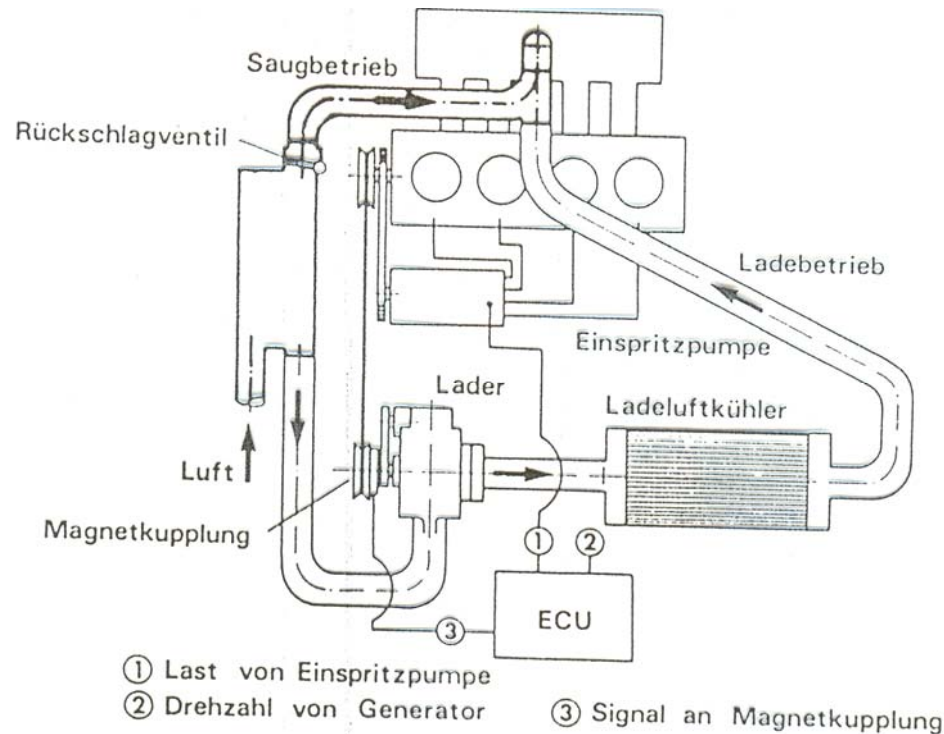
Verbrauchskennfeld (Saug- und Aufladeversion)



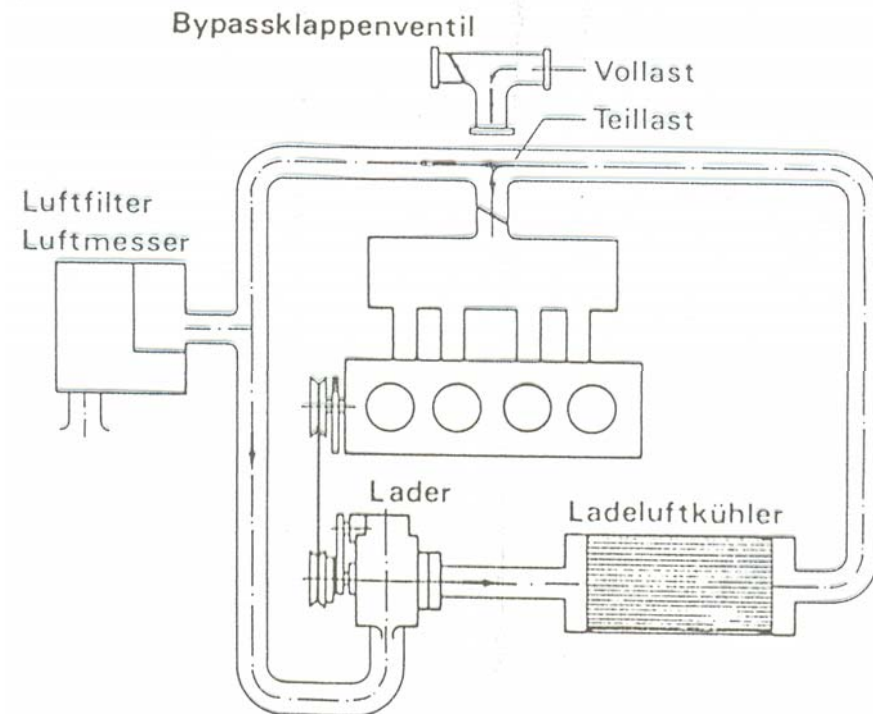


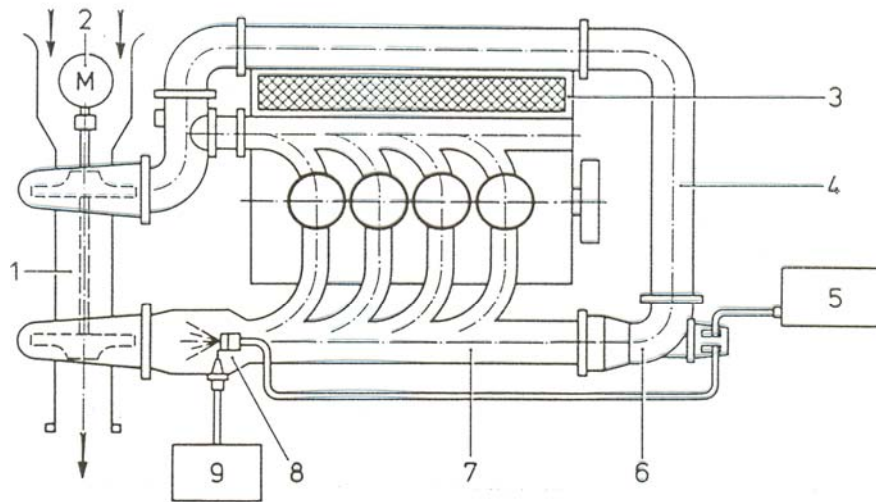
Dieselmotor mit Lufteinblasesystem





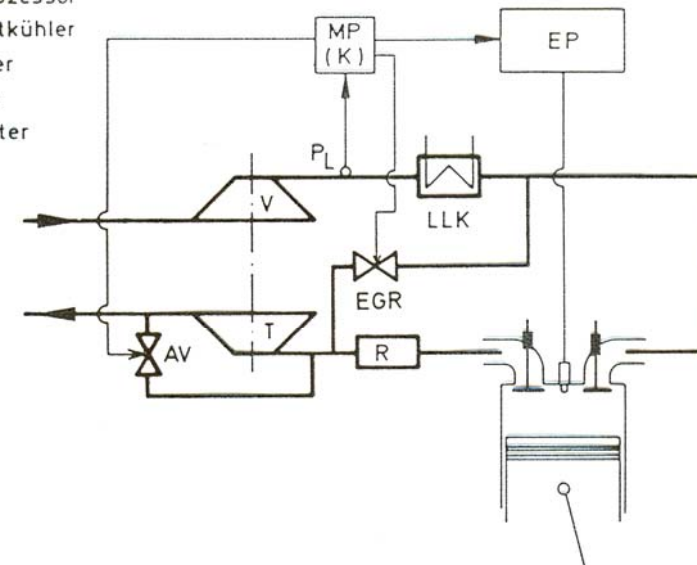
Laststeuerung beim
mechanisch aufgeladenen
Ottomotor (unten);
und beim Dieselmotor (oben)



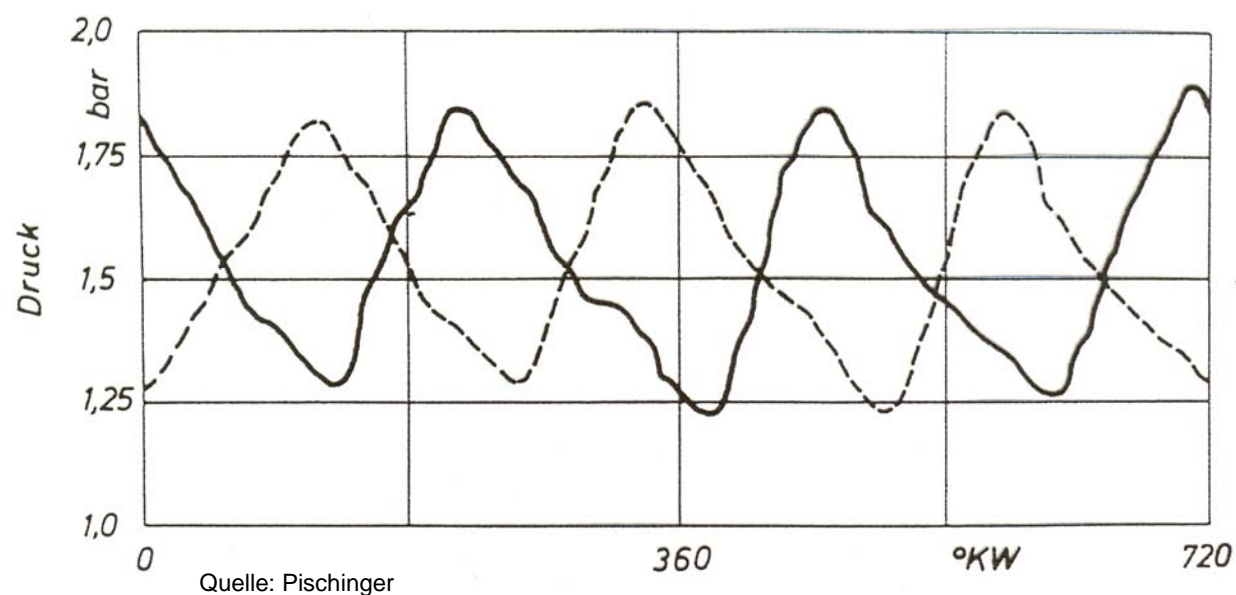
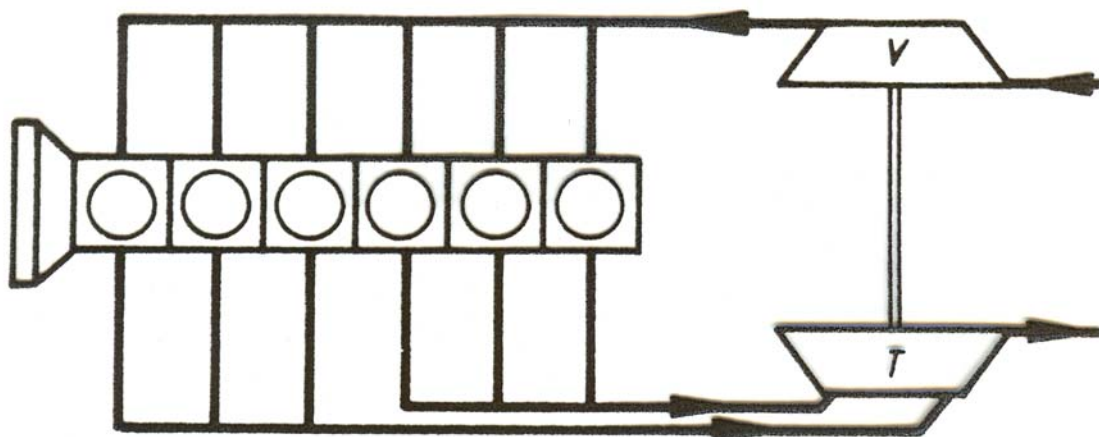


- 1 Abgasturbolader
- 2 Startmotor
- 3 Ladeluftkühler
- 4 Bypass-Leitung
- 5 Kraftstoffpumpe
- 6 Regler
- 7 Mischzone Abgas/Zusatzluft
- 8 Brennkammer
- 9 Zündanlage + Flammenkontrolle

- AV : Abblaseventil
- EGR : Abgasrückführung
- EP : Einspritzpumpe
- K : Kennfeld
- MP : Mikroprozessor
- LLK : Ladeluftkühler
- R : Rußfilter
- T : Turbine
- V : Verdichter



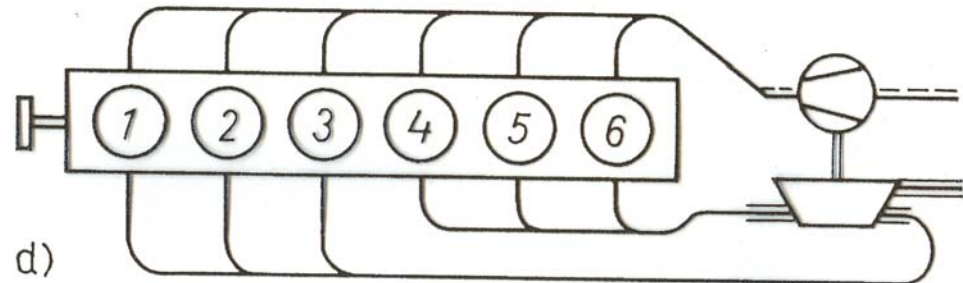
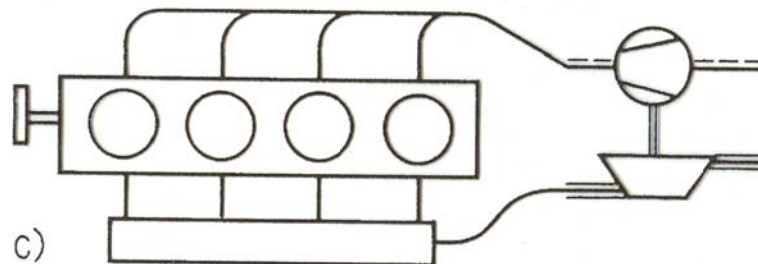
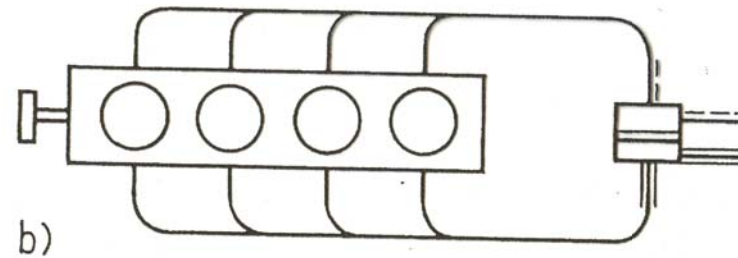
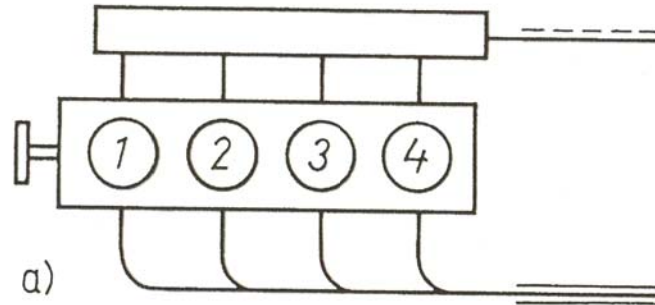
Schema der Hyperbar-Aufladung und Abgasrückführung



Stoßaufladung nach Büchi

Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers

Arten der Aufladung



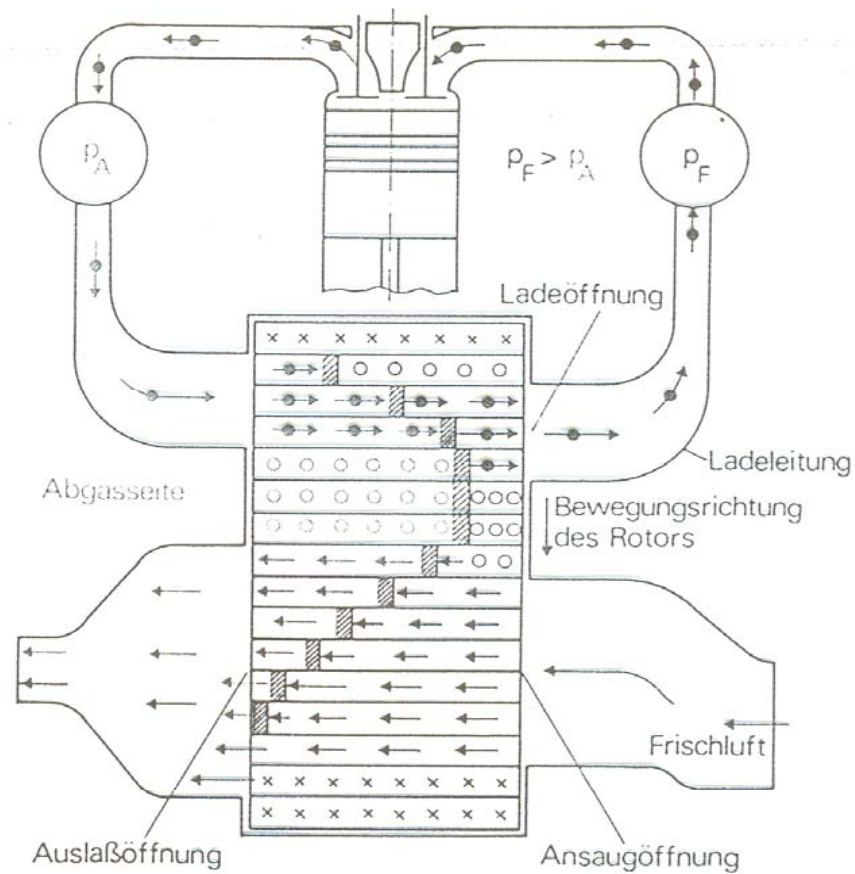
a) und b) ohne Lader

a) Schwingrohraufladung, b) Druckrohraufladung, c) und d) mit Abgasturbine, c) Stau- und d) Stoßaufladung mit der Zündfolge 1-4-2-6-3-5 oder 1-5-3-6-2-4

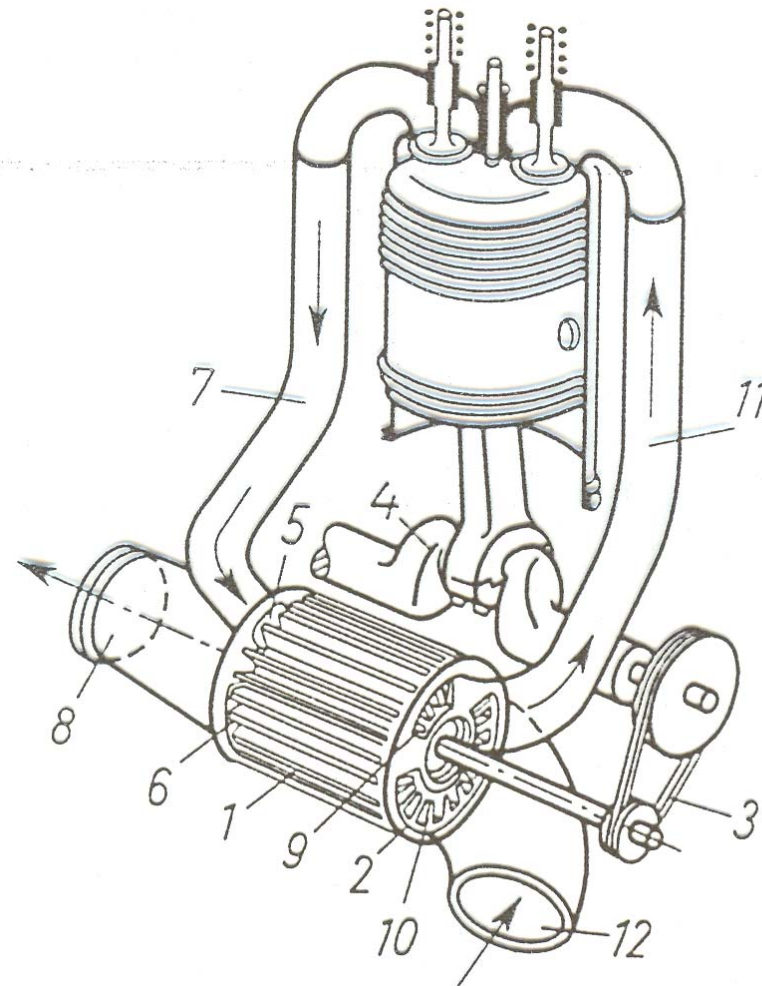
Quelle: Küttner

Comprex-Aufladung

schematisch

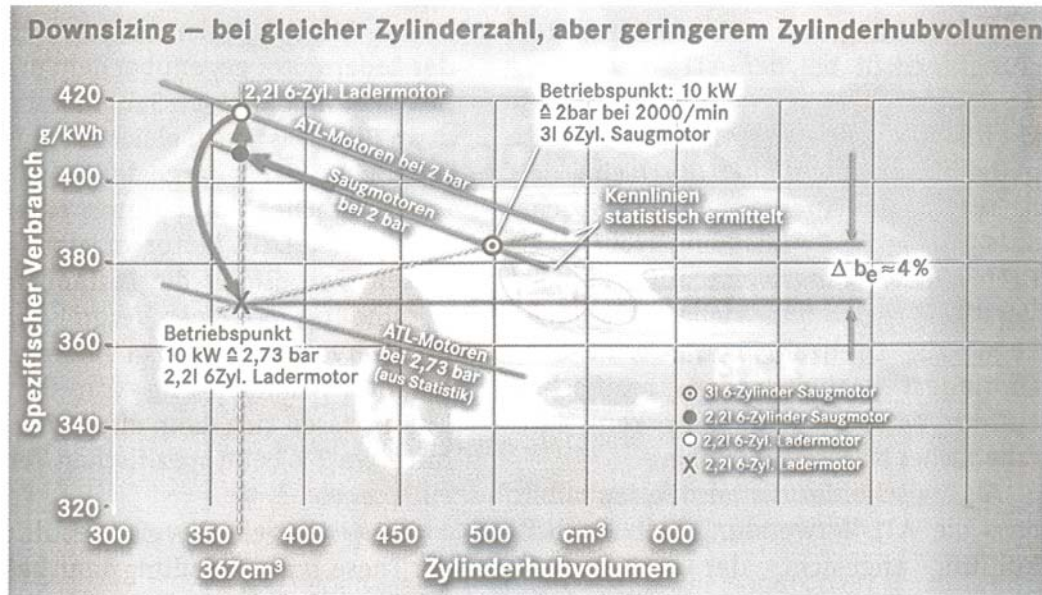


- Mischzone
- $\times \times \times$ Frischluft in Ruhe
- $\circ \circ \circ$ Frischluft in Ruhe, komprimiert
- \longrightarrow Frischluft in Bewegung
- $\bullet \bullet \bullet$ Frischluft in Bewegung, komprimiert
- $\circ \circ \circ$ Abgas in Ruhe, teilweise entspannt

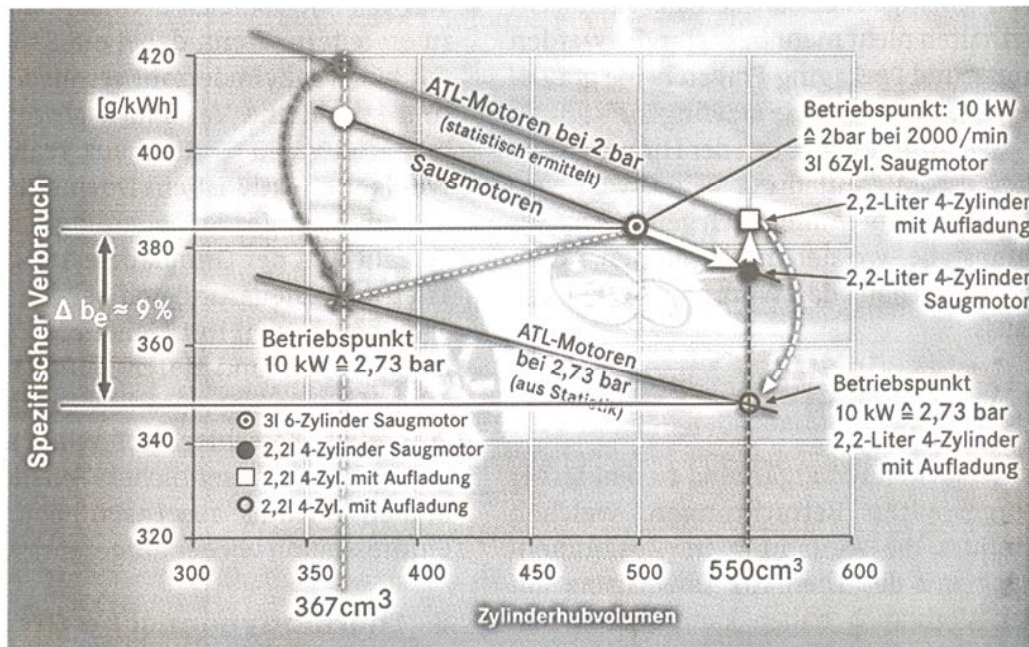


Verbrennungskraftmaschinen

Prof. Dr.-Ing. E. Reimers



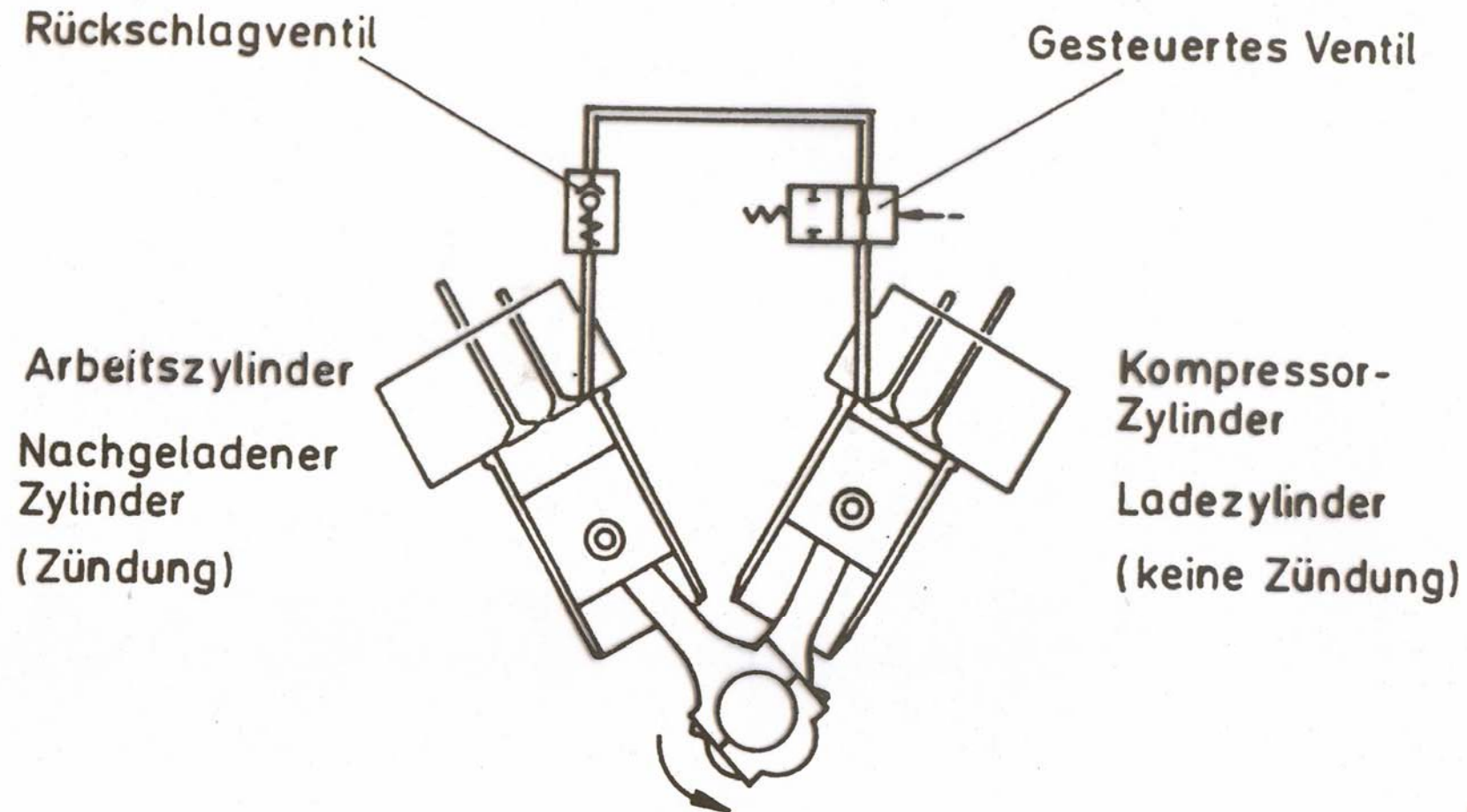
Downsizing: Einfluss der Aufladung auf den spezifischen Verbrauch

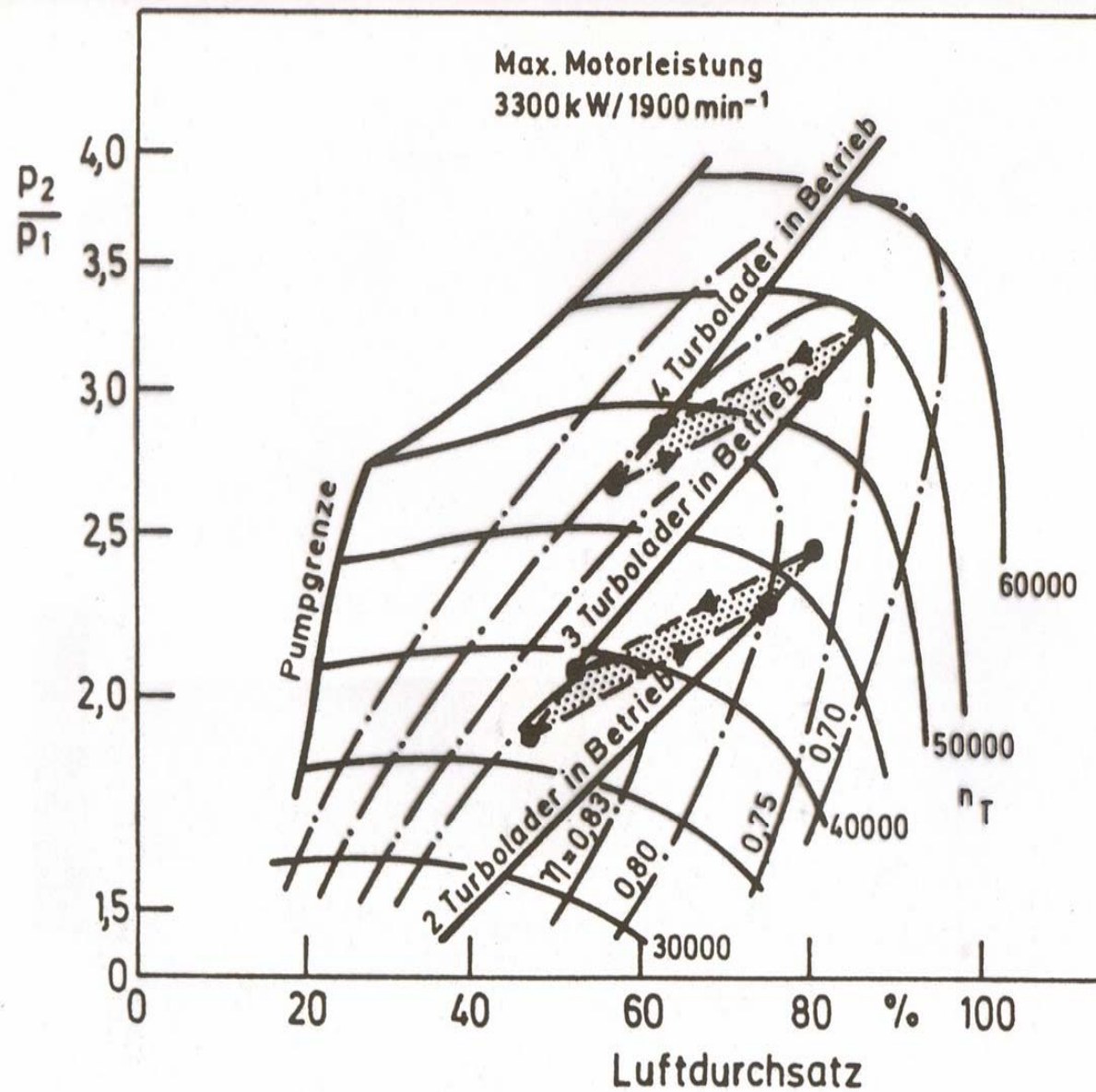


Downsizing bei verringerter Zylinderzahl, aber größerem Zylinderhubvolumen

Downsizing Zylinderzahl

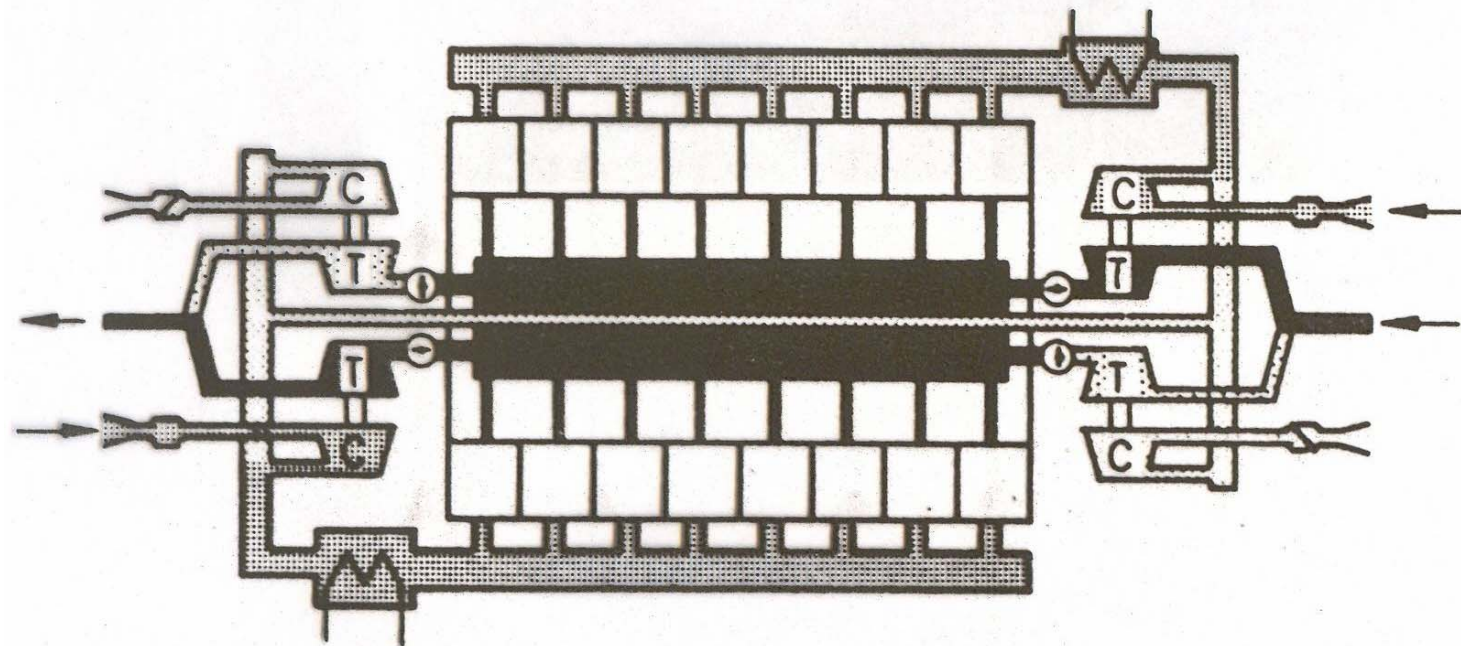
Nachladeverfahren





Verdichterkennfeld für Registeraufladung

Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers



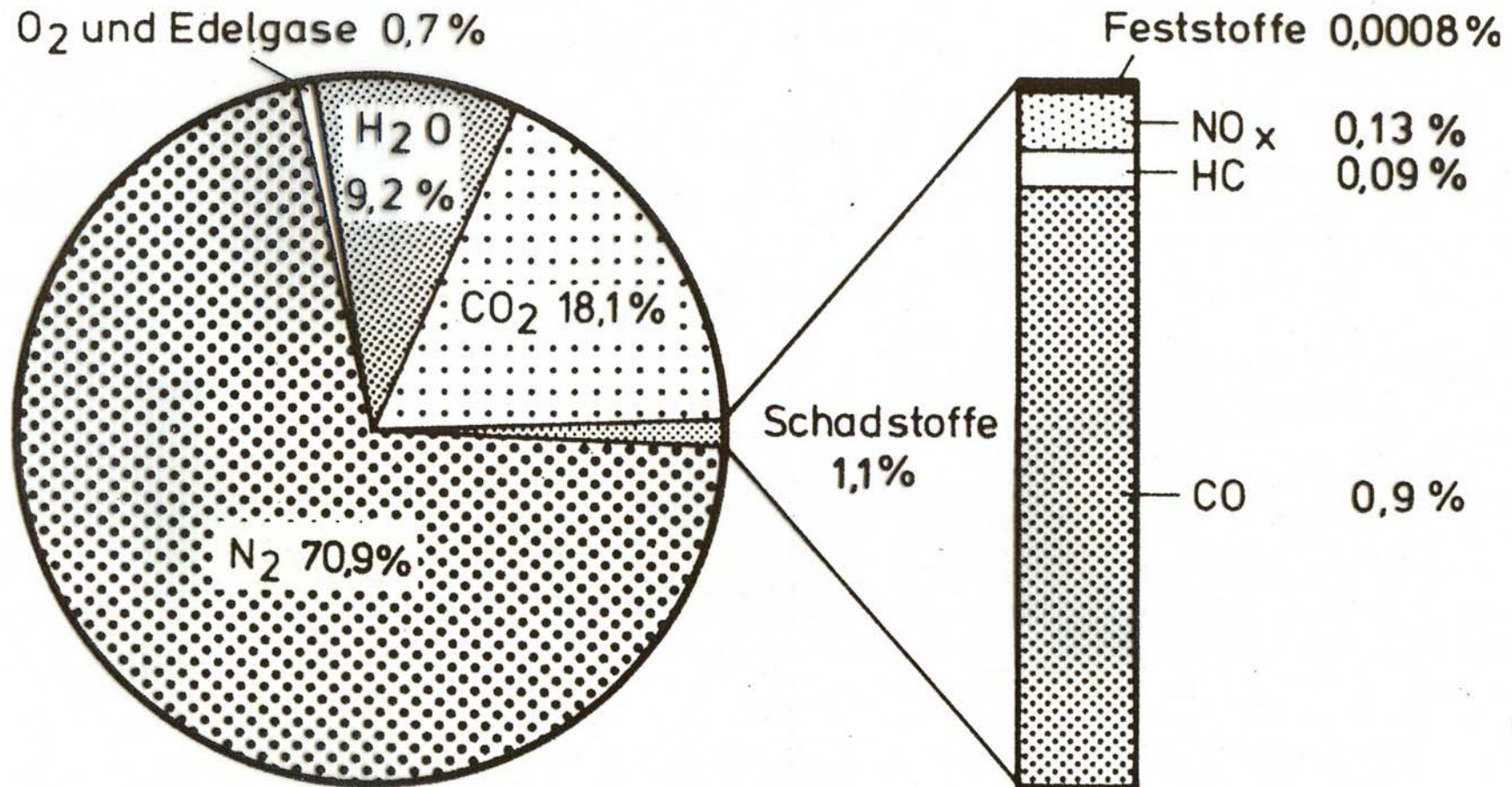
- | | |
|--------------------------|----------------------------|
| ■ Abgas (strömend) | ⊖⊕ Abgasklappe (gesteuert) |
| ▨ Abgas (nicht strömend) | ⌞ Rückschlagklappe |
| ▩ Luft (strömend) | T... Turbine |
| □ Luft (nicht strömend) | C... Lader |

Schema der einstufigen Registeraufladung

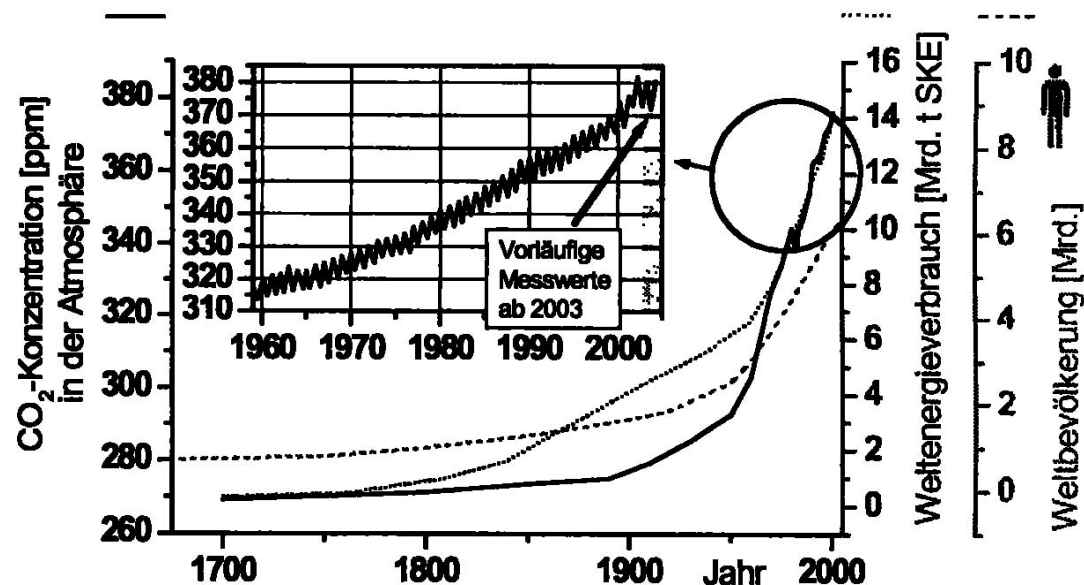
Abgase

Zusammensetzung des Abgases von Ottomotoren

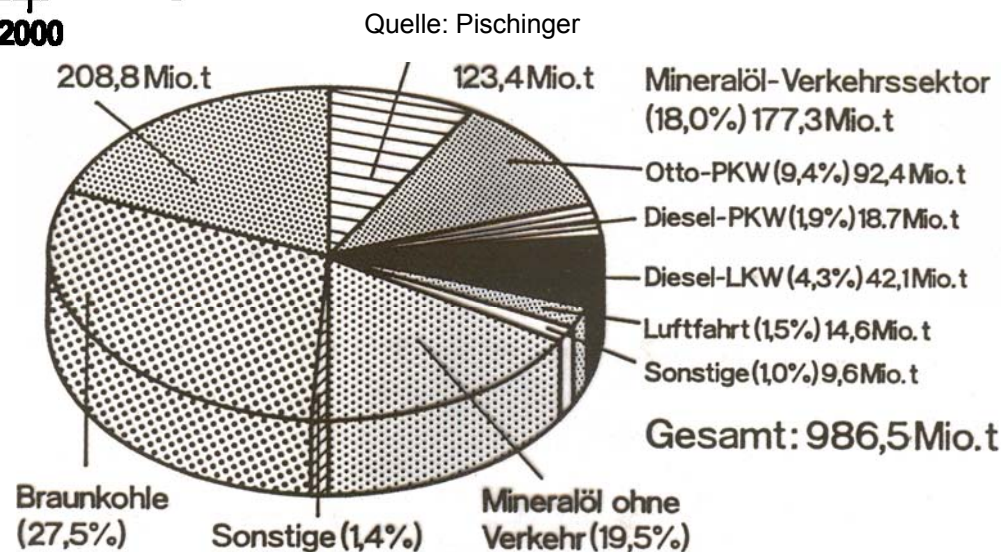
Europa-Test (Massen-Anteile)



Quelle: Pischinger



CO₂ Zunahme in der Atmosphäre

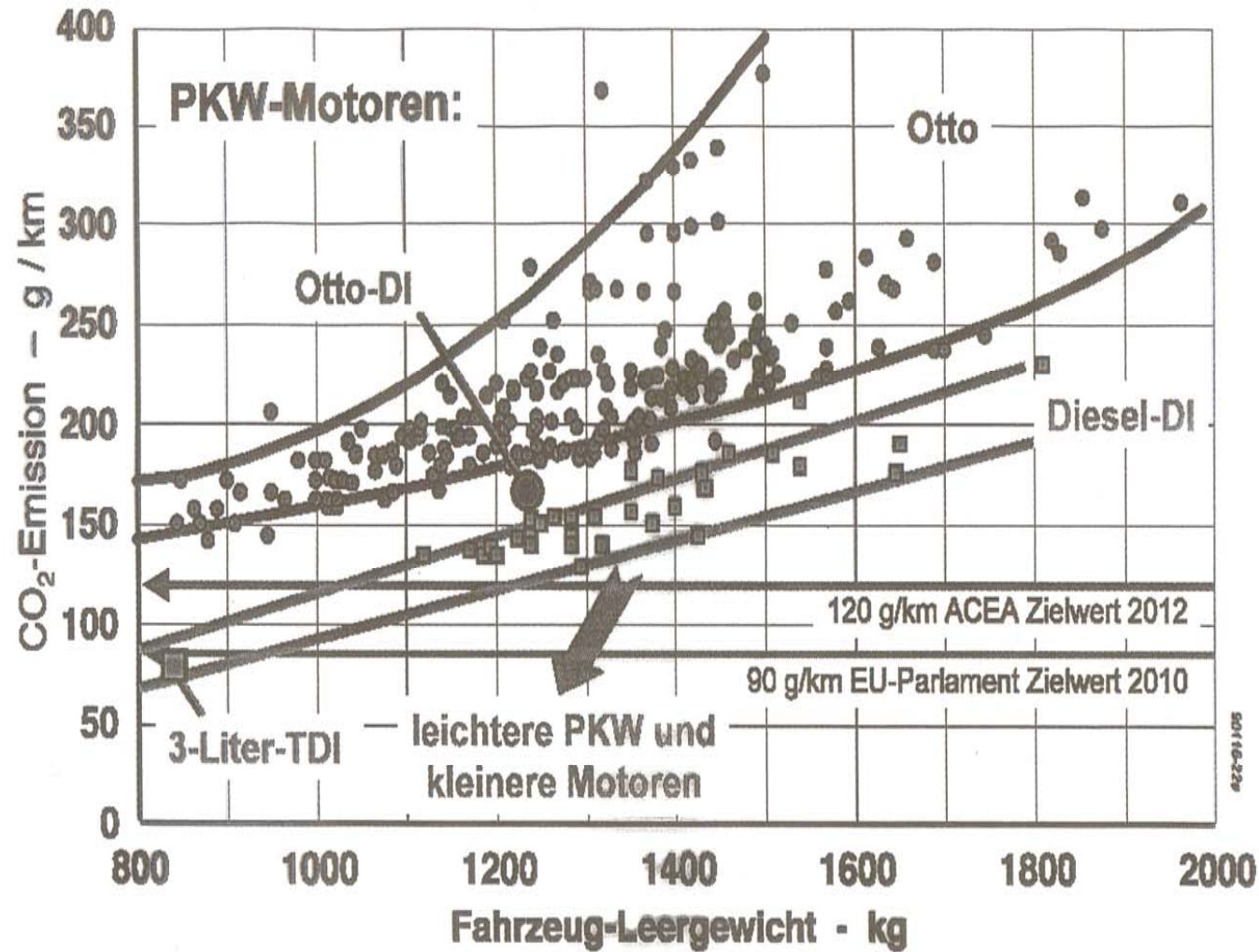


CO₂ Verursacher in der BRD

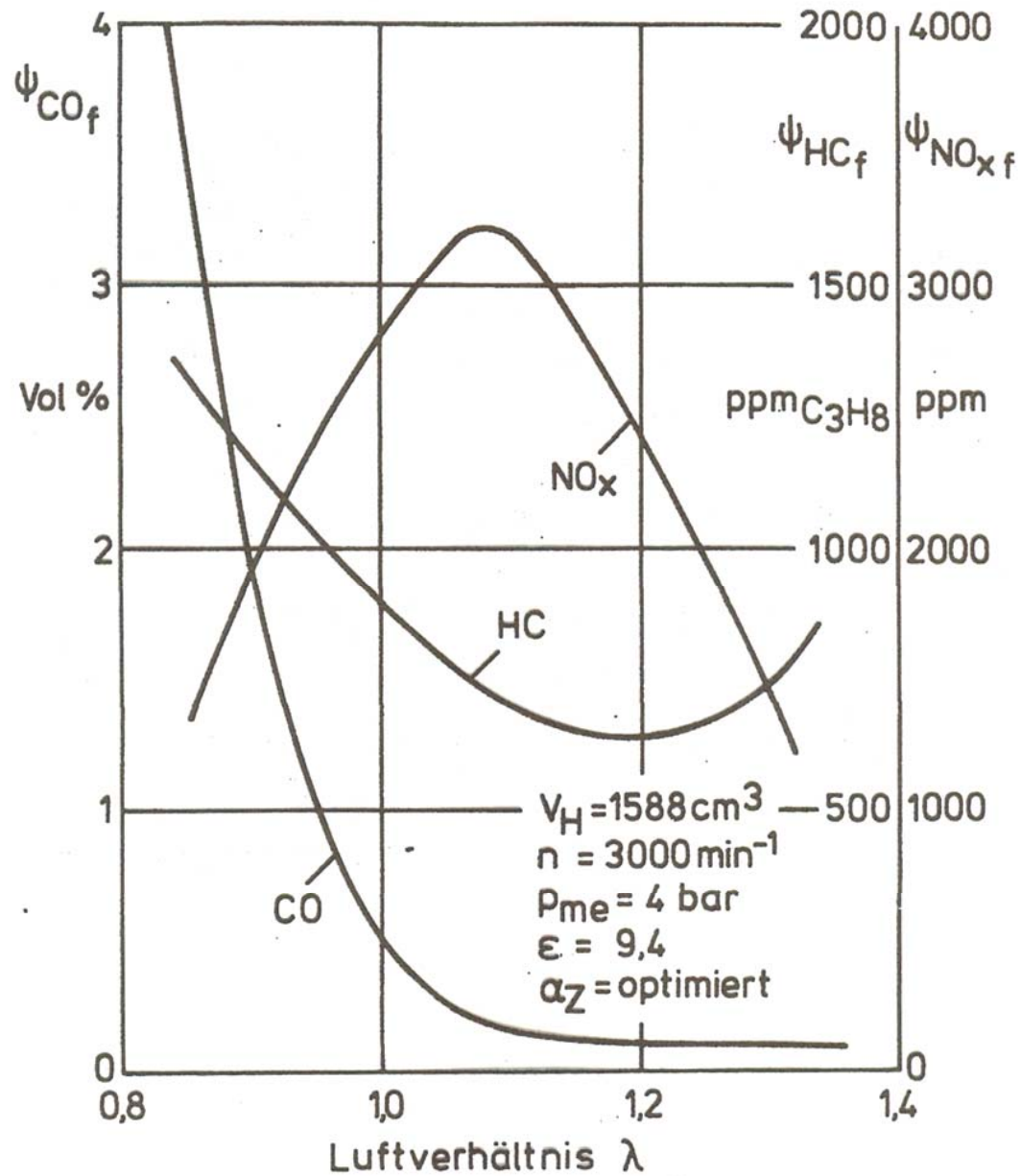
Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers

CO₂ - Emission über dem Fahrzeuggewicht im MVEG-Test,

1997 bis 1999 PKW mit Handschaltgetriebe in der BRD



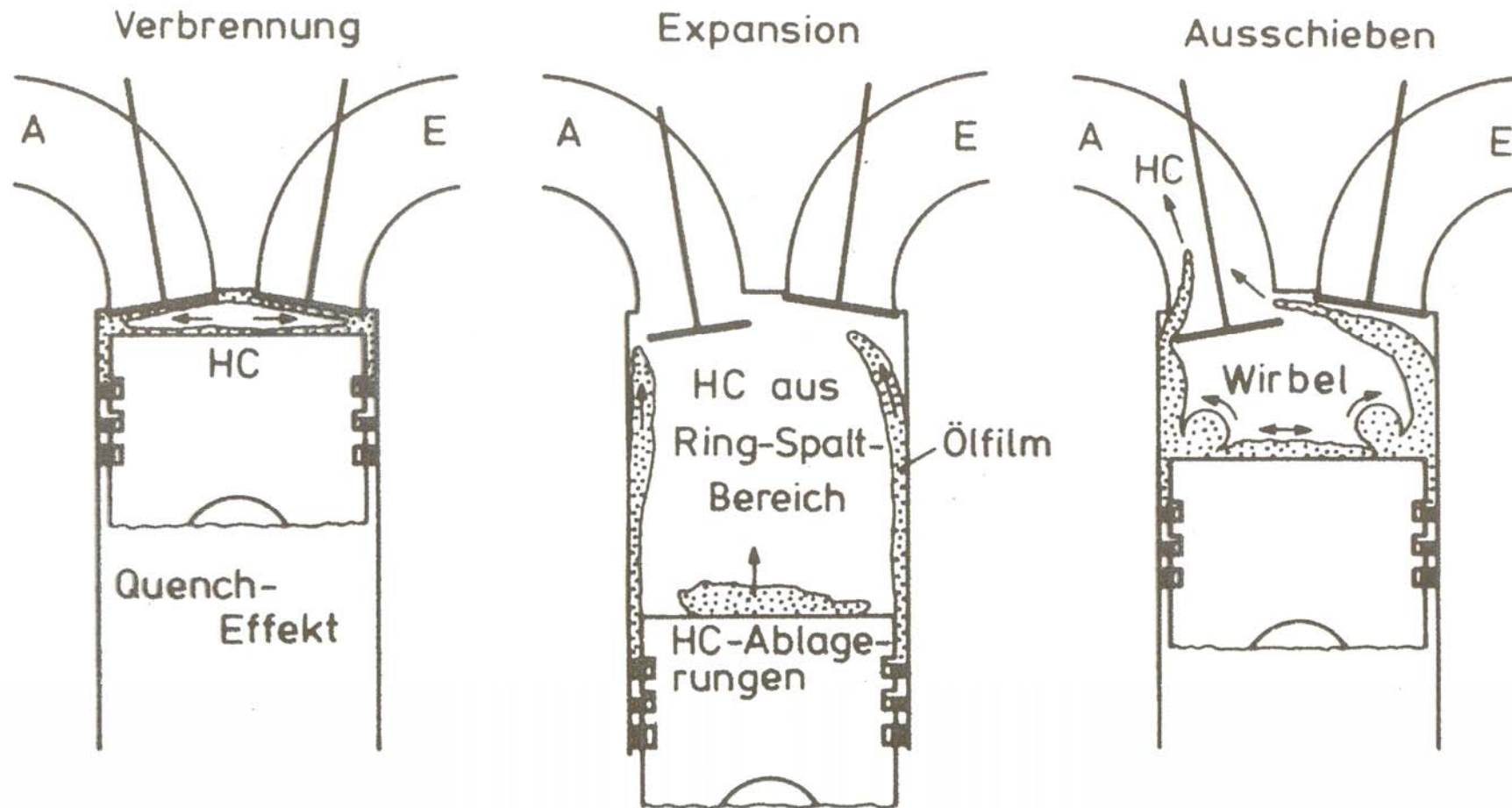
Quelle: Pischinger



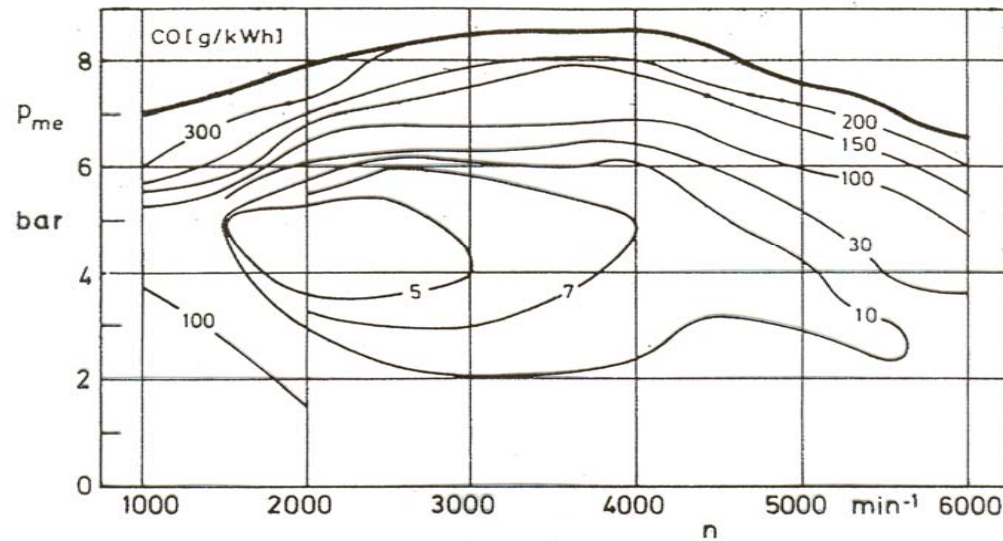
Quelle: Pischinger

Schadstoffe Ottomotor

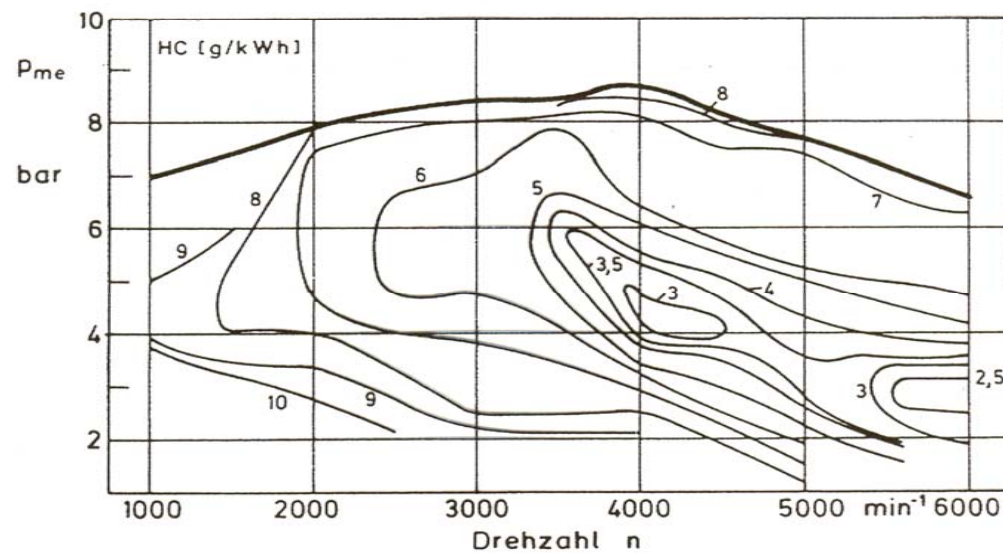
HC-Zonen im Brennraum



Quelle: Pischinger



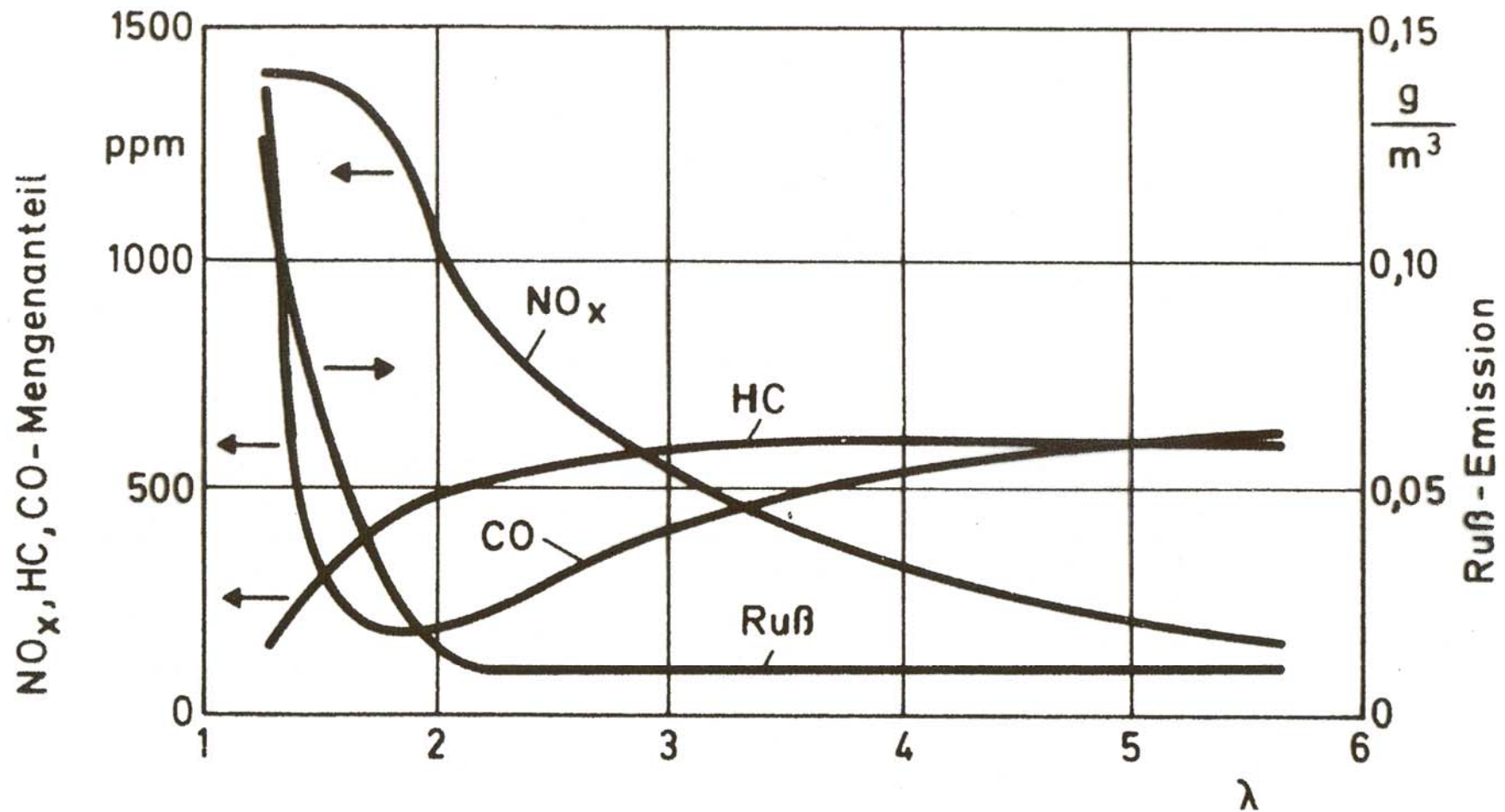
Quelle: Pischinger



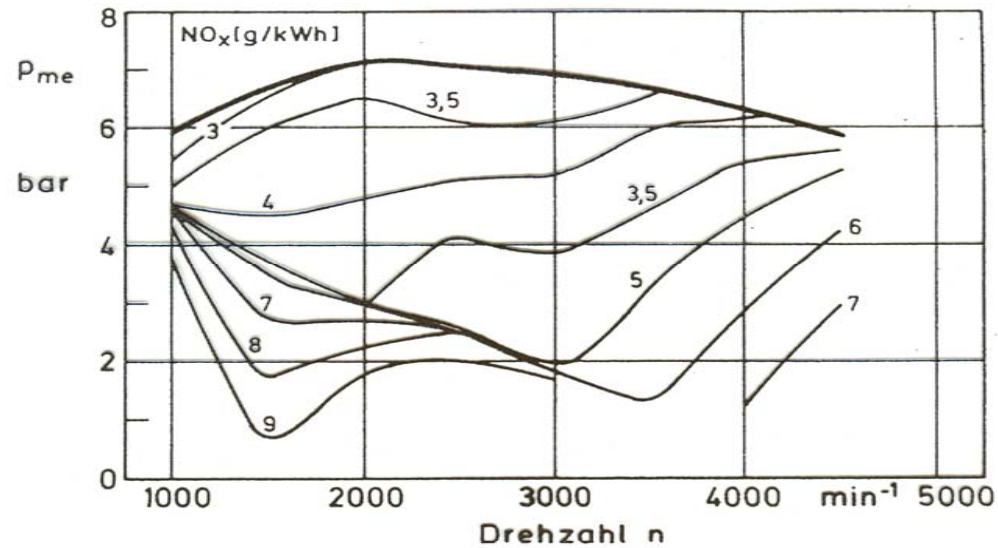
CO-, HC- Kennfeld 1,4 l Ottomotor

Schadstoffanteile in Abhängigkeit von λ

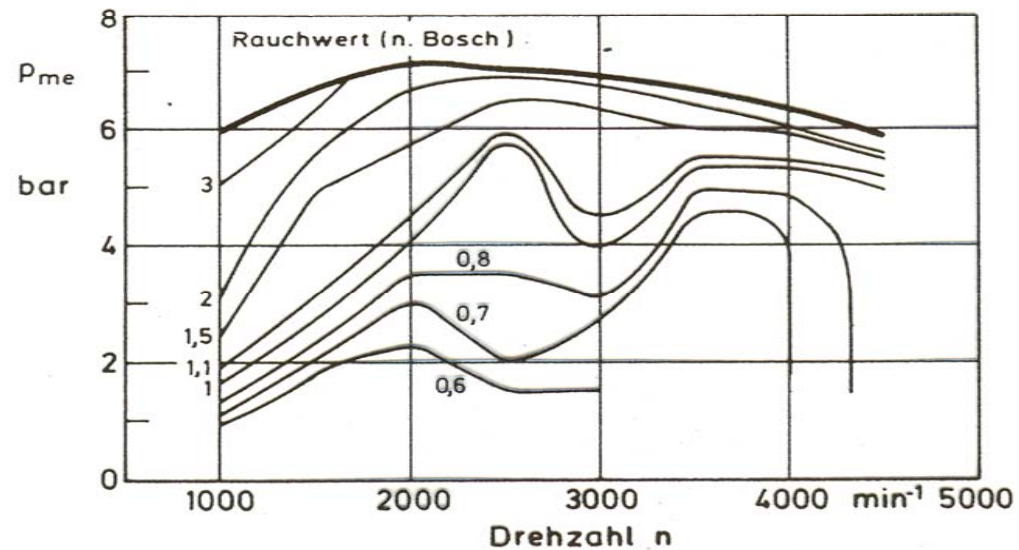
Dieselmotor



Quelle: Pischinger



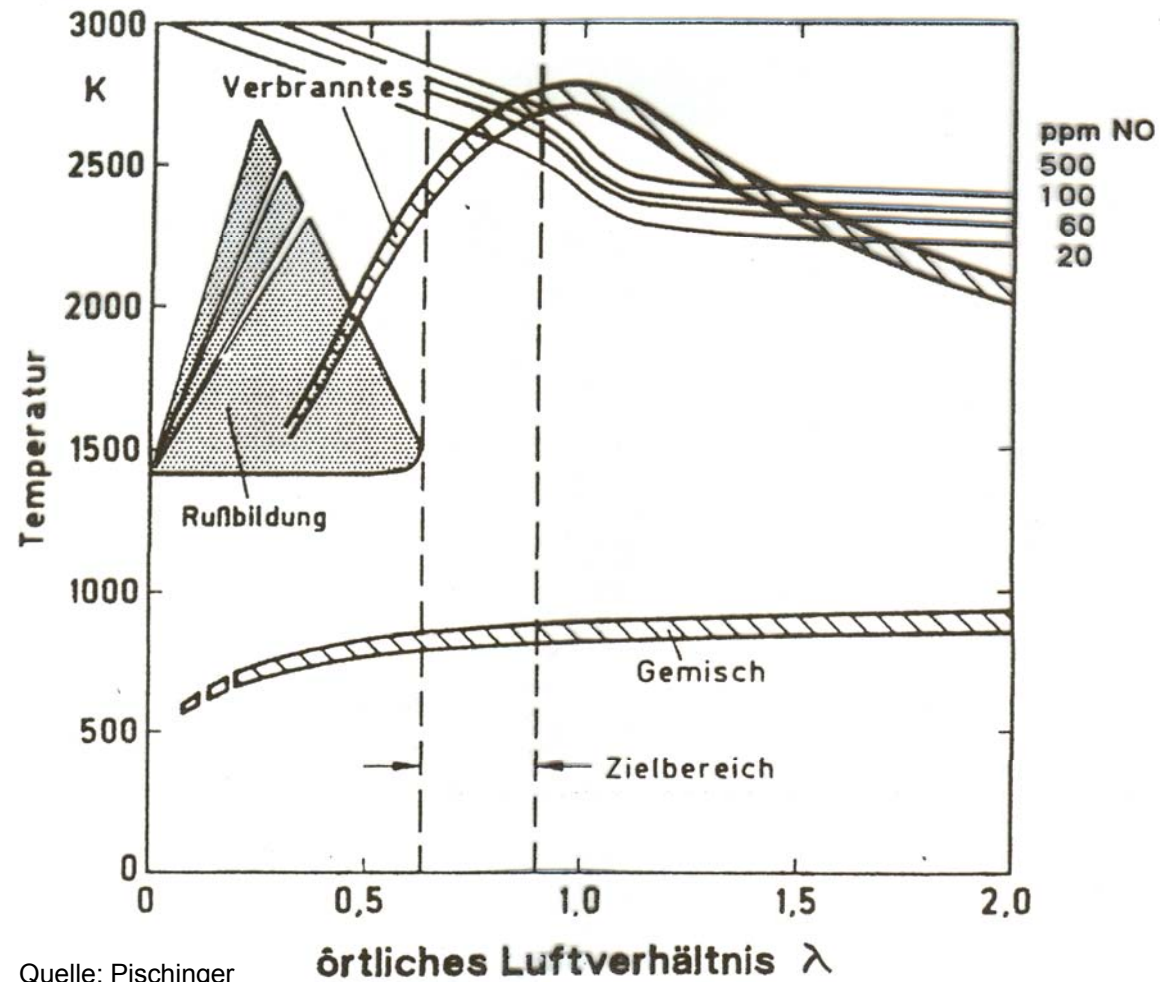
Quelle: Pischinger



NOX-, Ruß- Kennfeld

eines 1,9 l Dieselmotors

Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers

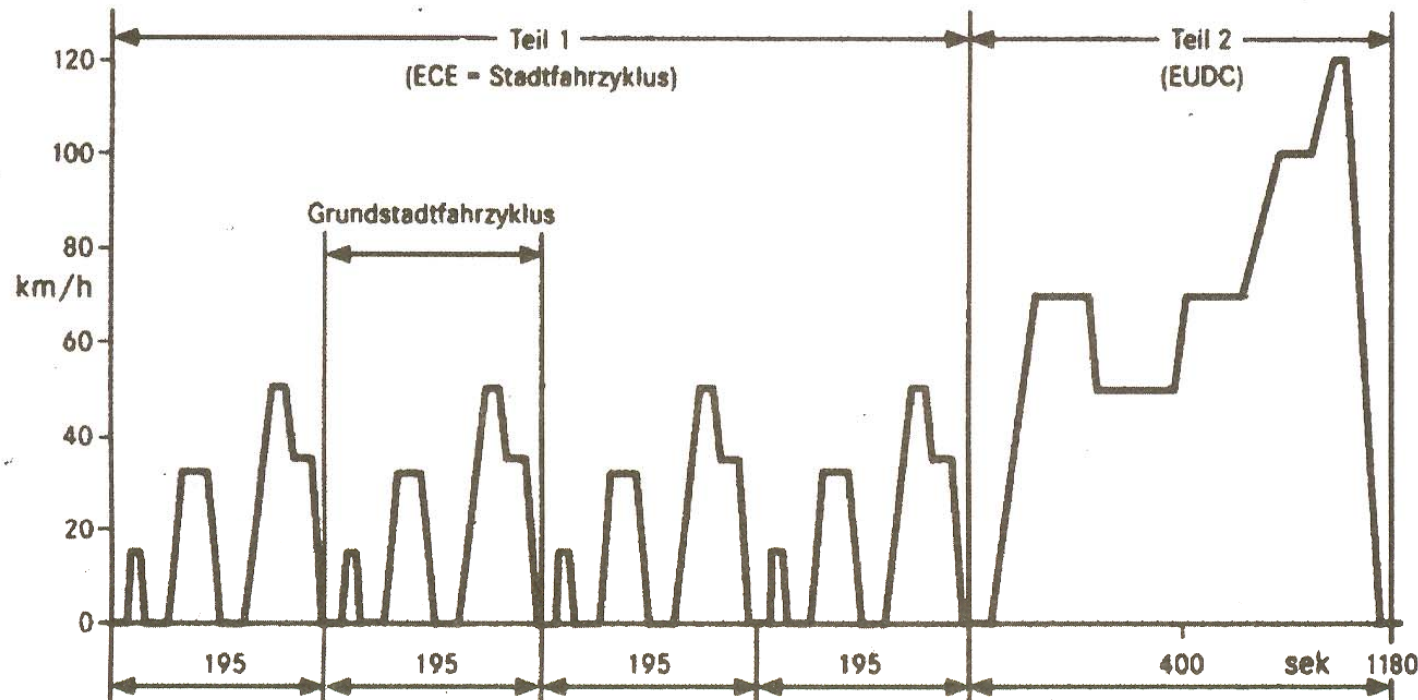


Quelle: Pischinger

Rußbildung

dieselmotorische Verbrennung

Europa-Test-Zyklus (Verbrauchstest)

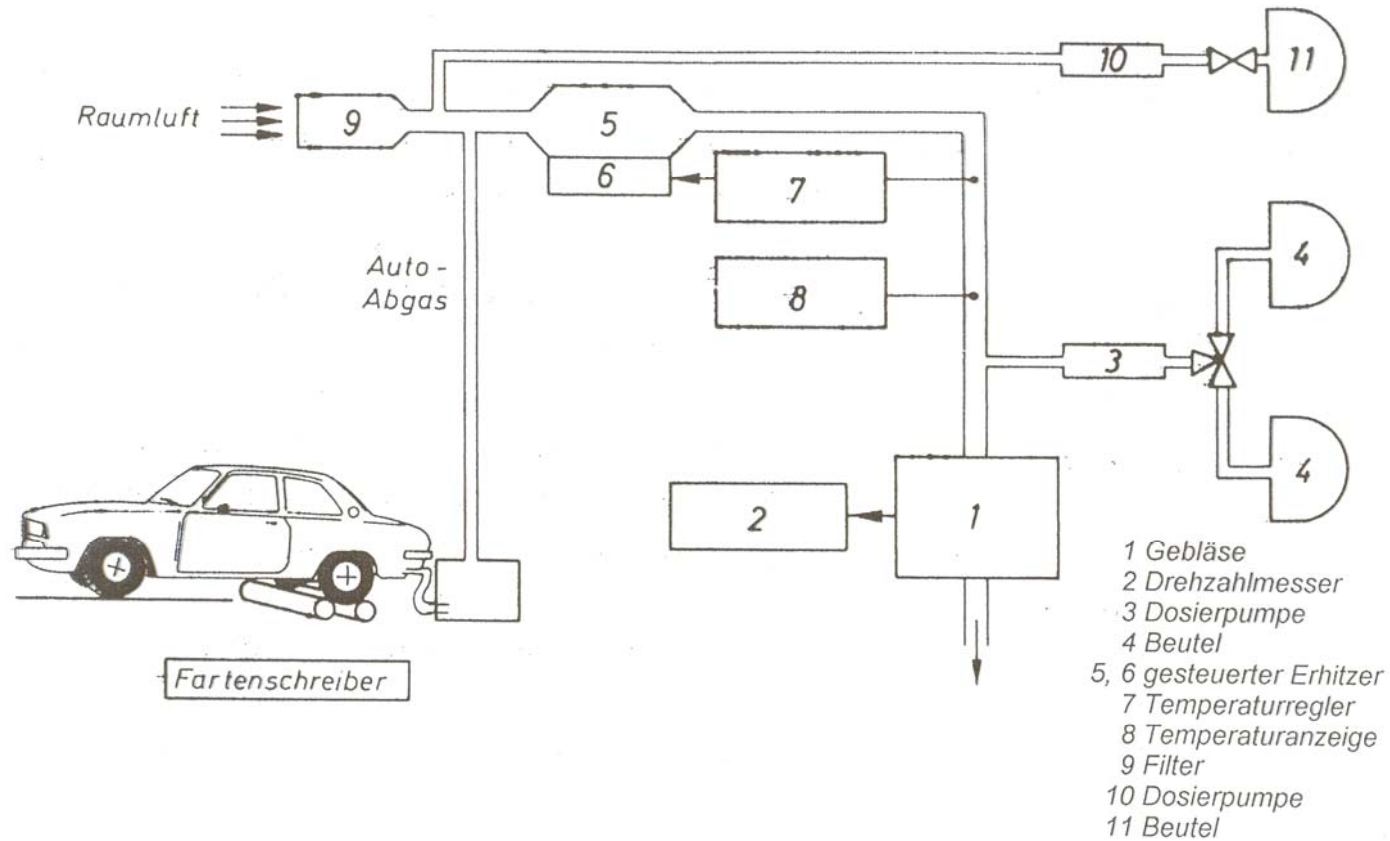


| | | |
|--------------------------------------|----------|------|
| Testdauer: | 1 180 | s |
| Teststrecke (gesamt): | ca. 11 | km |
| Mittlere Fahrgeschwindigkeit: | ca. 33,6 | km/h |
| Maximale Fahrgeschwindigkeit: | 120 | km/h |
| Beginn der Probenahme mit Motorstart | | |

Quelle: Pischinger

CVS-Messanlage

zur Ermittlung der Massenemissionen in Autoabgasen

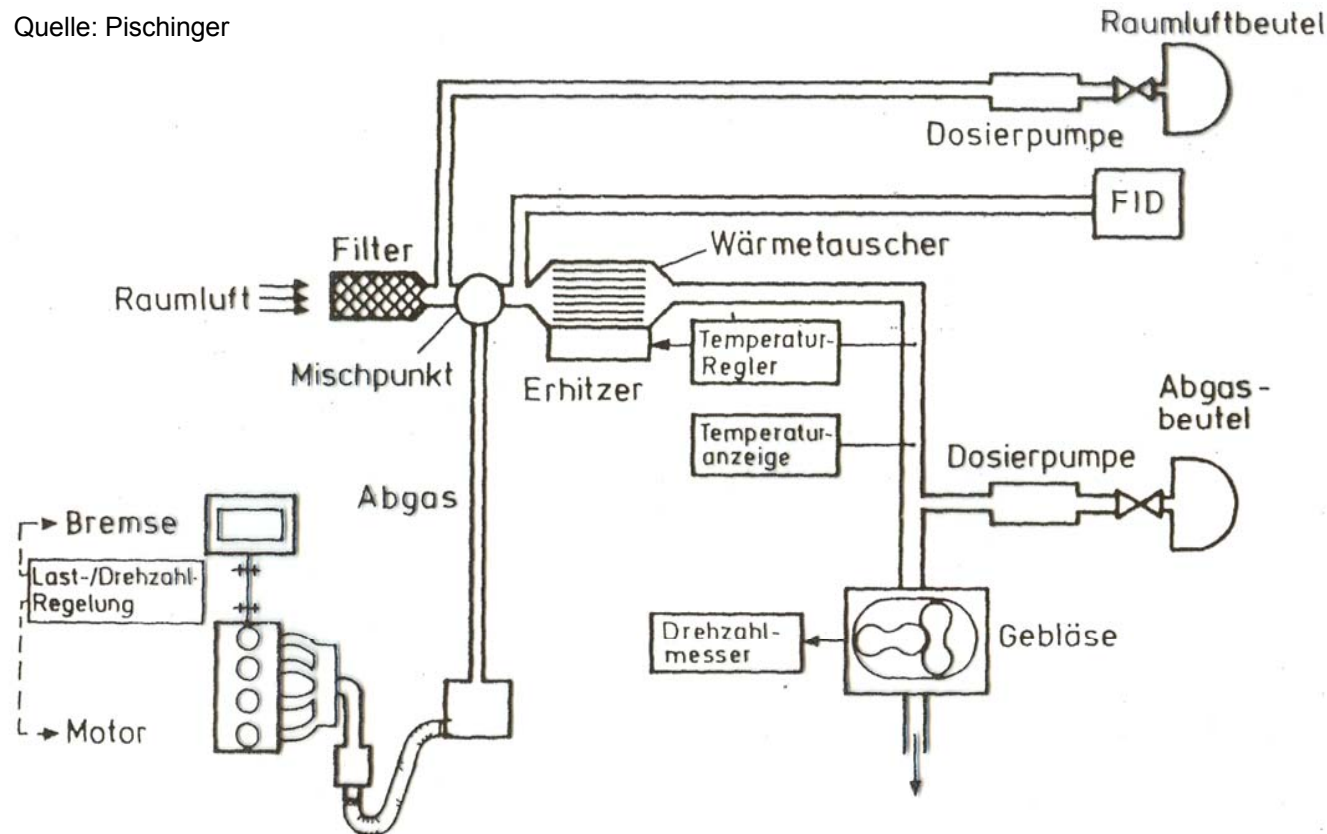


Quelle: Pischinger

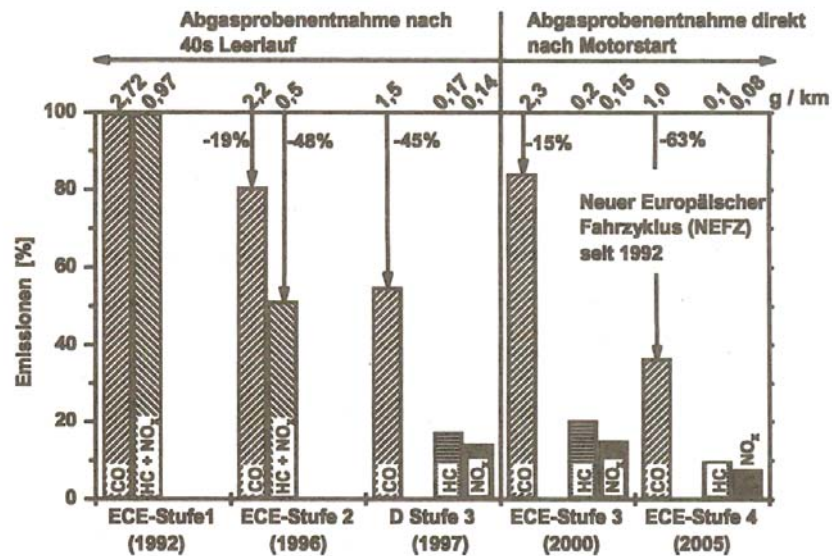
Transienten-Test-Messanlage

zur Ermittlung der Massenemissionen von Heavy-Duty-Dieselmotoren

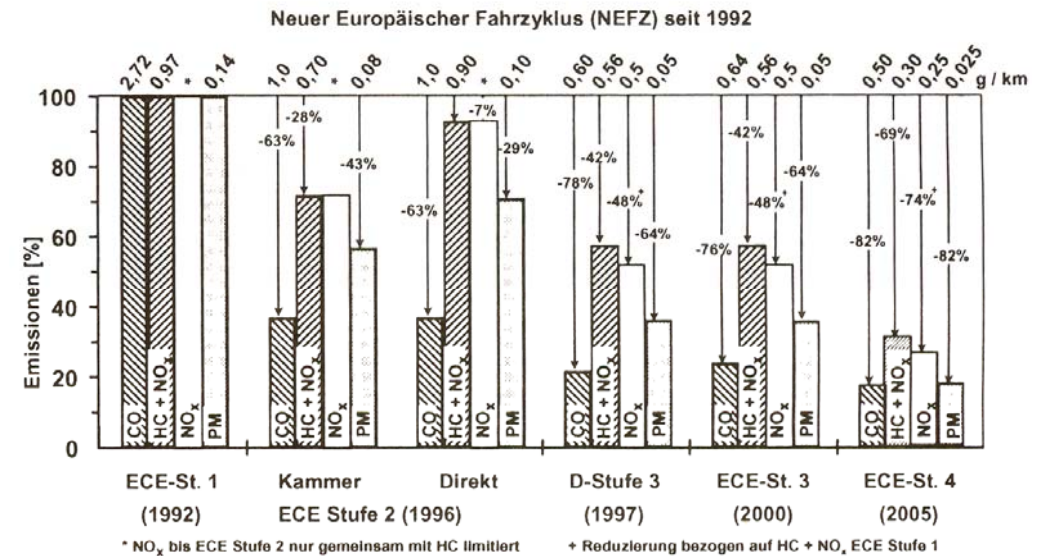
Quelle: Pischinger



ECE-Grenzwerte im Vergleich



PKW-Ottomotoren



PKW-Dieselmotoren

Quelle: Pischinger

Stationäre Testzyklen

| Stufe | Einführung | Zyklus | CO [g/kWh] | HC [g/kWh] | NO _x [g/kWh] | Partikel [g/kWh] | Ruß [m ⁻¹] |
|----------|------------------------|----------|---------------|---------------|----------------------------|---------------------|---------------------------|
| EURO I | 1992, <85 kW | ECE-R 49 | 4,5 | 1,1 | 8,0 | 0,612 | |
| | 1992, >85kW | ECE-R 49 | 4,5 | 1,1 | 8,0 | 0,36 | |
| EURO II | 10/1996 | ECE-R 49 | 4,0 | 1,1 | 7,0 | 0,25 | |
| | 10/1998 | ECE-R 49 | 4,0 | 1,1 | 7,0 | 0,15 | |
| EURO III | 10/1999 <i>nur EEV</i> | ESC&ELR | 1,5 | 0,25 | 2,0 | 0,02 | 0,15 |
| | 10/2000 | ESC&ELR | 2,1 | 0,66 | 5 | 0,10/0,13* | 0,8 |
| EURO IV | 10/2005 | ESC&ELR | 1,5 | 0,46 | 3,5 | 0,02 | 0,5 |
| EURO V | 10/2008 | ESC&ELR | 1,5 | 0,46 | 2,0 | 0,02 | 0,5 |

* Hubvolumen < 0.75 dm³ und Nenndrehzahl > 3000 1/min

EU-Grenzwerte für Nutzfahrzeugmotoren

Transiente Testzyklen

| Stufe | Einführung | Zyklus | CO [g/kWh] | NMHC [g/kWh] | CH ₄ * [g/kWh] | NO _x [g/kWh] | Partikel** [g/kWh] |
|----------|------------------------|--------|---------------|-----------------|------------------------------|----------------------------|-----------------------|
| EURO III | 10/1999 <i>nur EEV</i> | ETC | 3,0 | 0,4 | 0,65 | 2,0 | 0,02 |
| | 10/2000 | ETC | 5,45 | 0,78 | 1,6 | 5 | 0,16/0,21*** |
| EURO IV | 10/2005 | ETC | 4,0 | 0,55 | 1,1 | 3,5 | 0,03 |
| EURO V | 10/2008 | ETC | 4,0 | 0,55 | 1,1 | 2,0 | 0,03 |

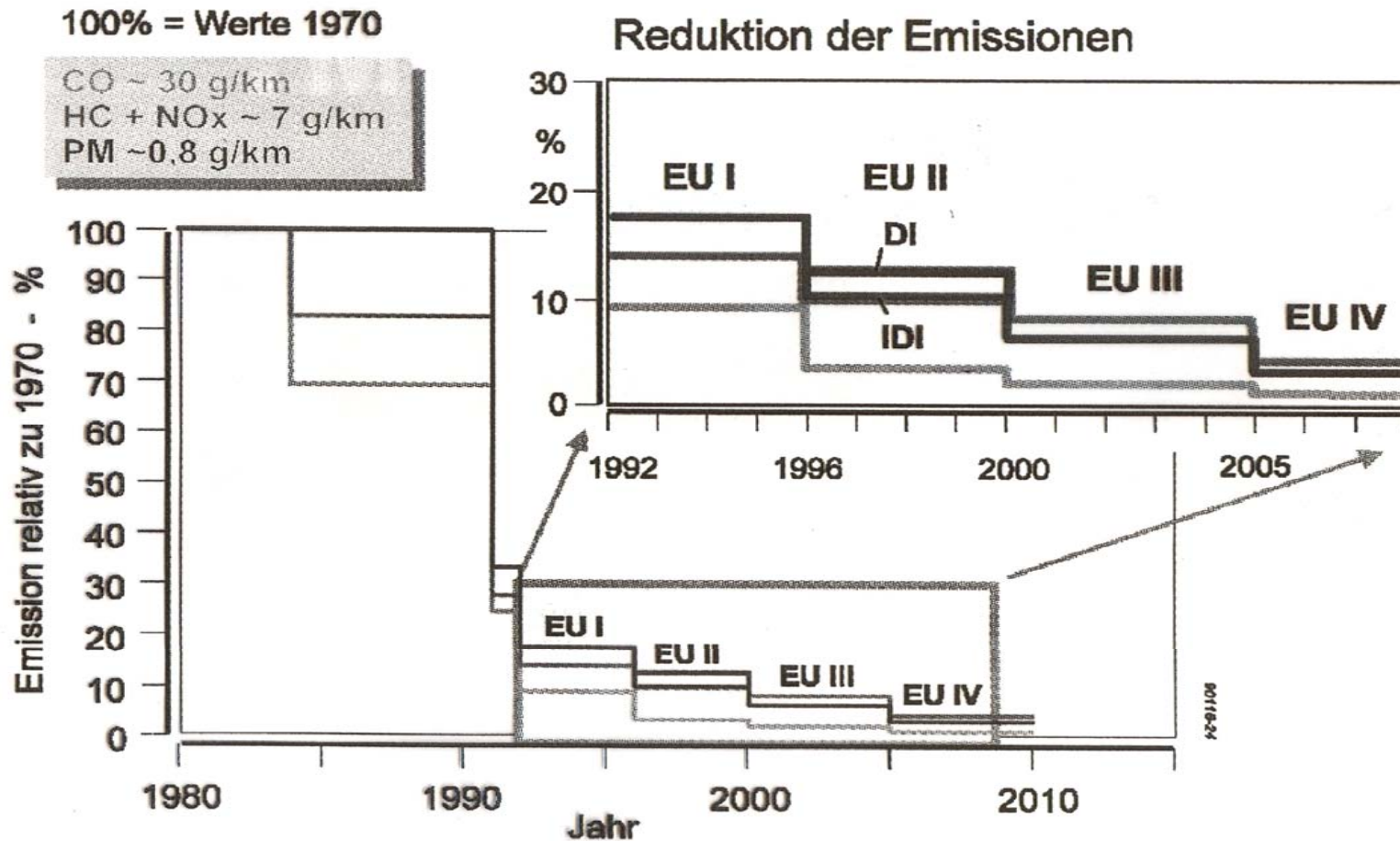
* Gasmotoren
 ** nicht für Ottomotoren (Stufen EURO III und EURO IV)
 *** Hubvolumen < 0.75 dm³ und Nenndrehzahl > 3000 1/min

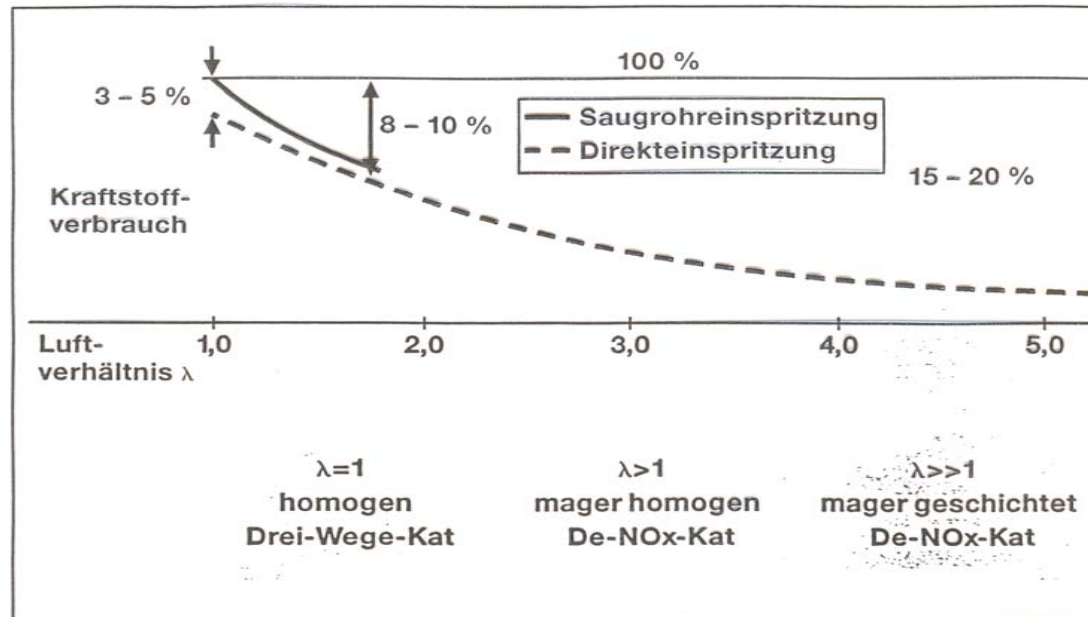
Quelle: Pischinger

Verbrennungskraftmaschinen
 Prof. Dr.-Ing. E. Reimers

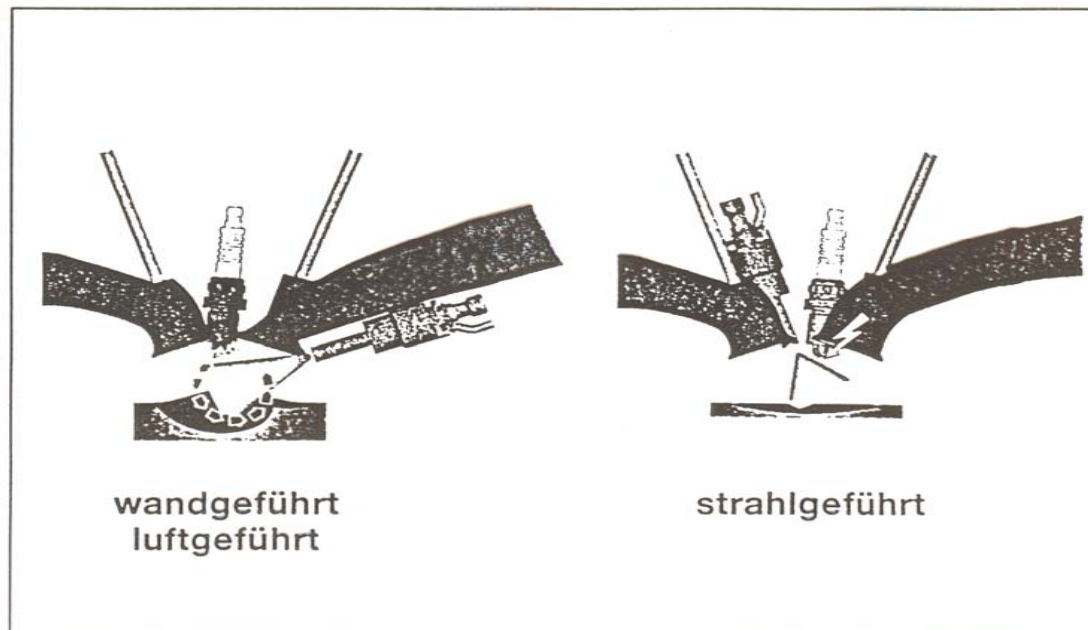
Europäische Abgasgesetzgebung

Diesel-PKW



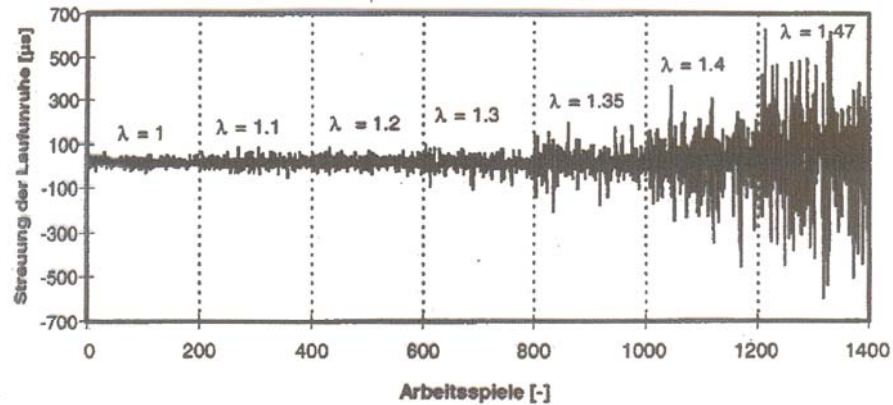


Verbrauchspotential DI-Ottomotor

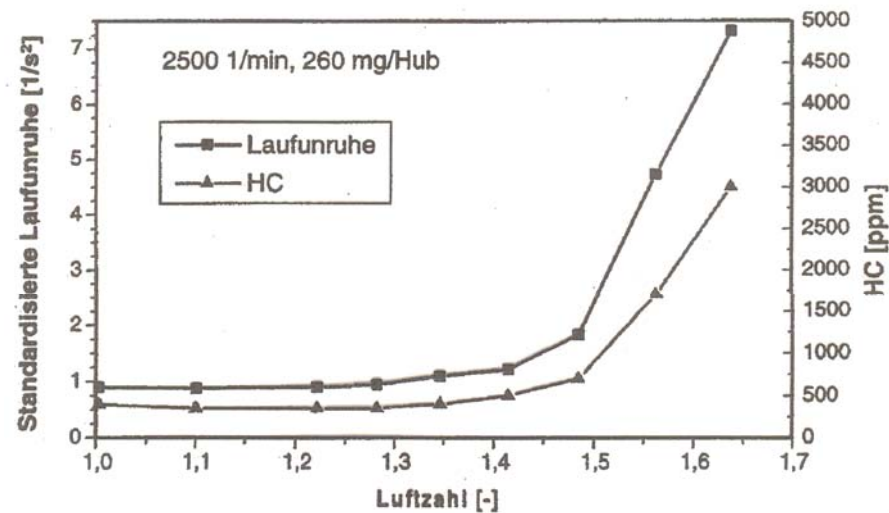


Brennverfahrens- konzepte DI-Ottomotor

Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers



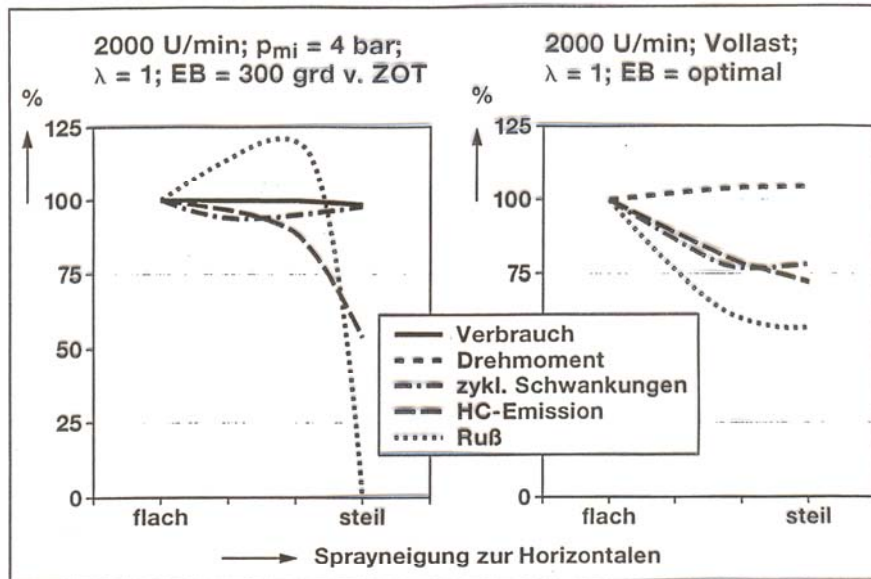
Streuung der Laufunruhe als Funktion der Luftzahl



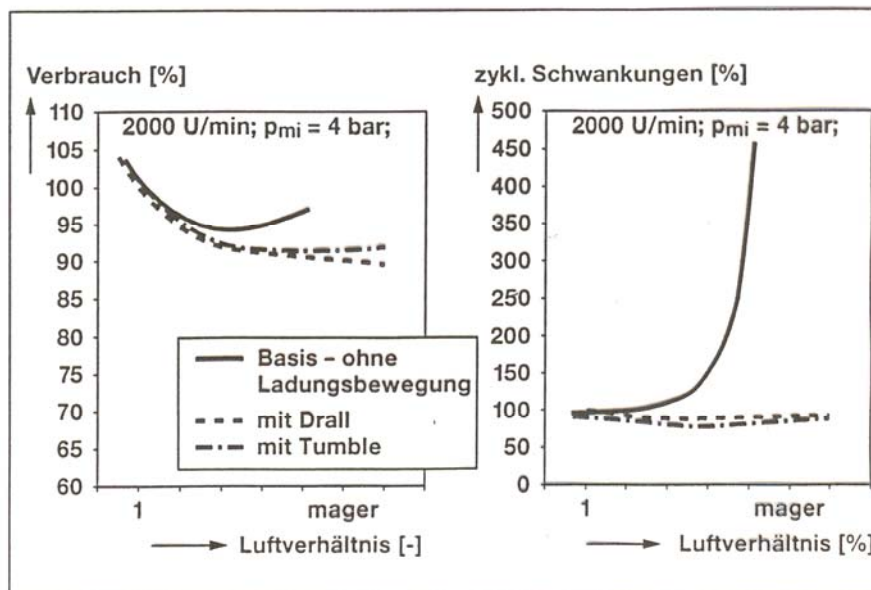
Standardisierte Laufunruhe und HC-Konzentration als Funktion der Luftzahl

Lafunruhe Ottomotor

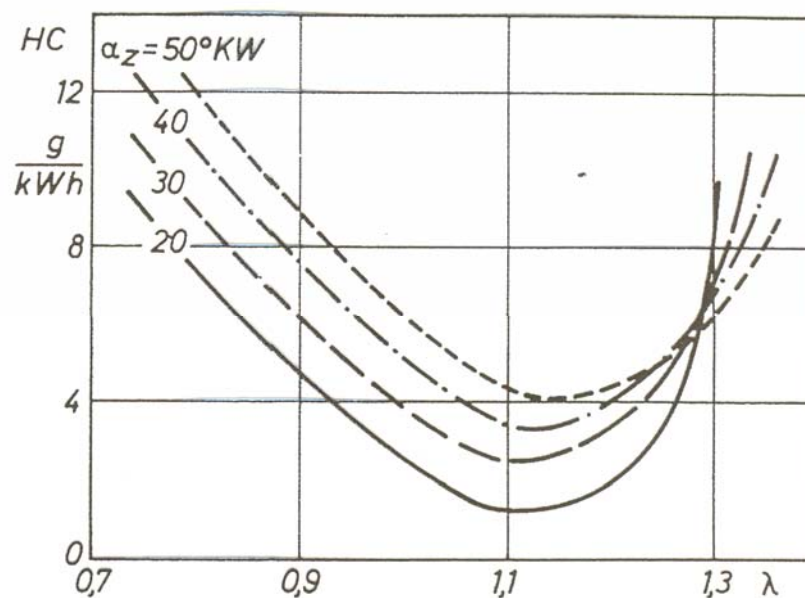
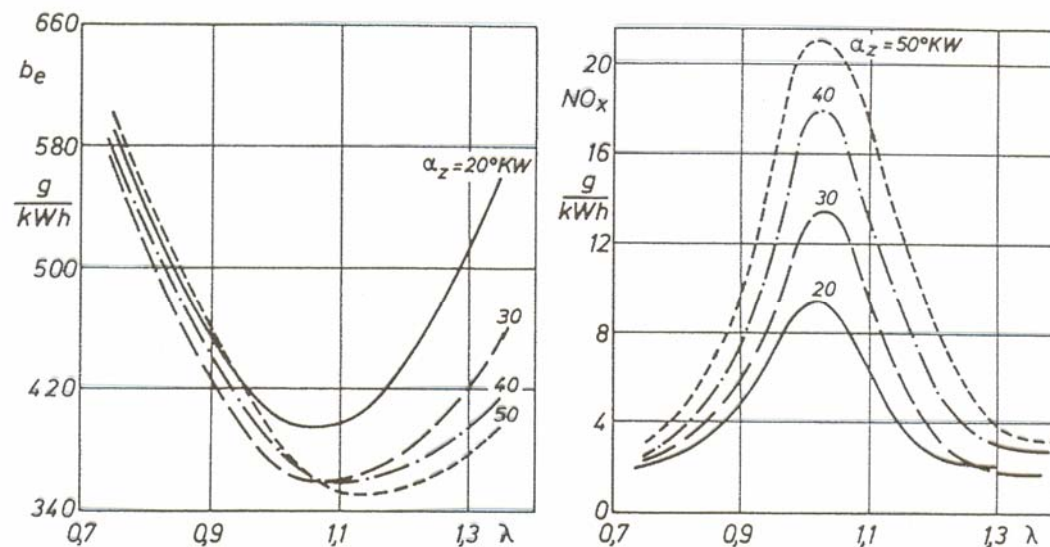
in Abhängigkeit von λ



Einfluß der Strahlneigung im Homogenbetrieb



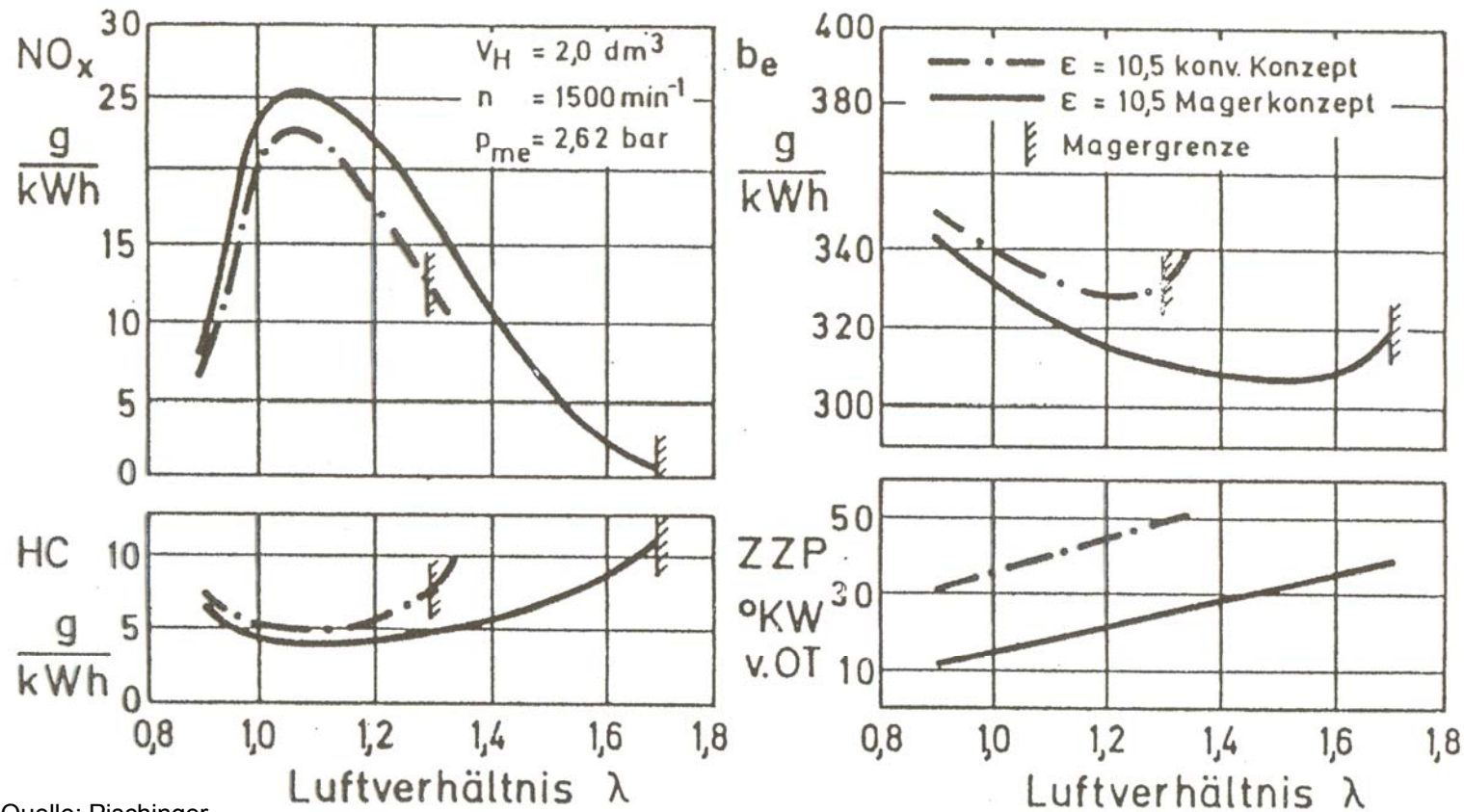
Einfluß von Ladungsbewegung im Homogenbetrieb



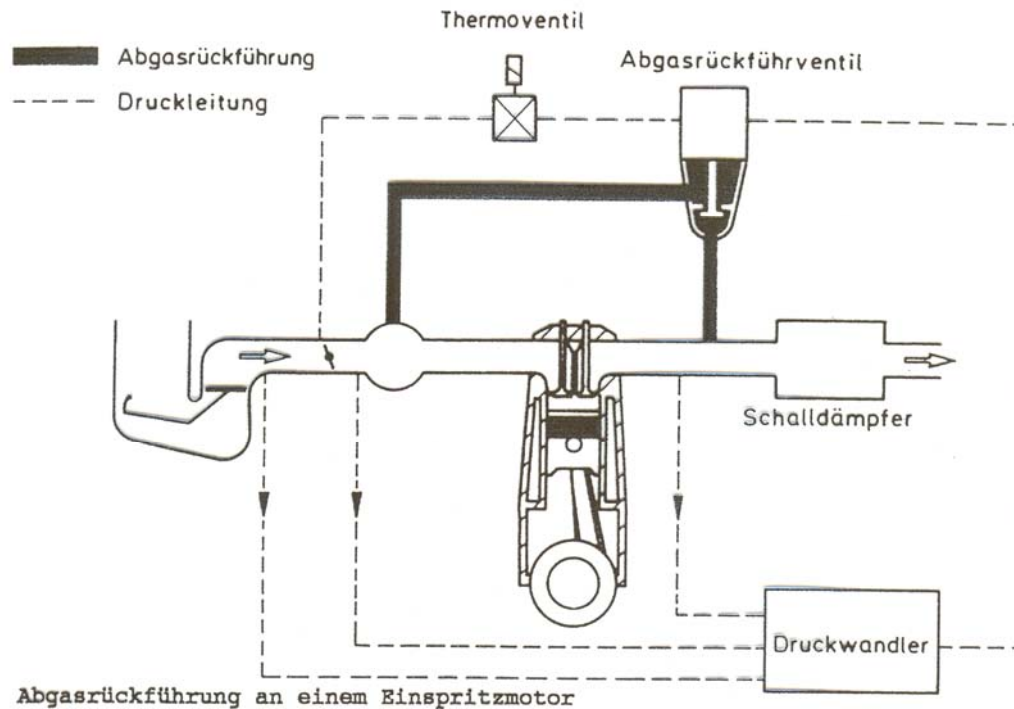
Quelle: Pischinger

Einfluß des
Zündzeitpunktes α
bei Teillast

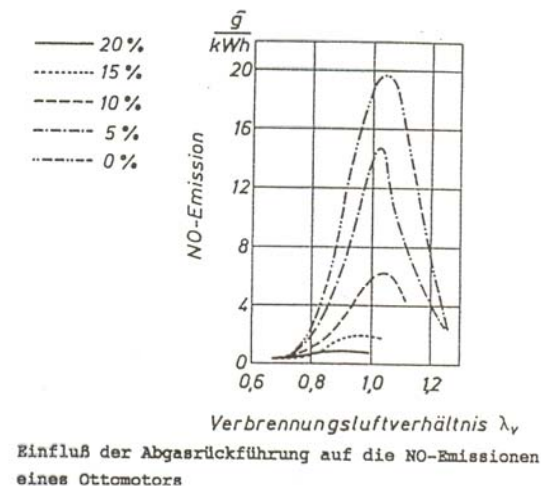
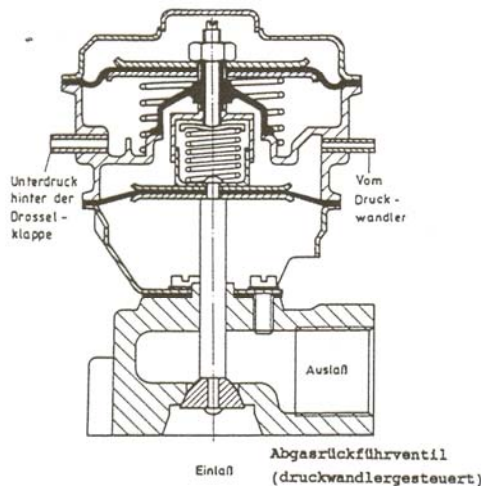
Vergleich: Konventioneller Motor und Motor mit Magerkonzept



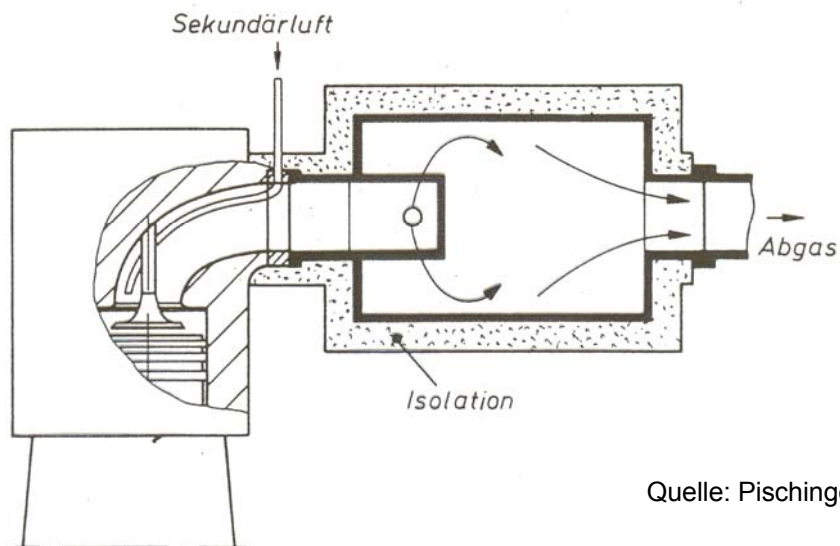
Quelle: Pischinger



Abgasrückführung

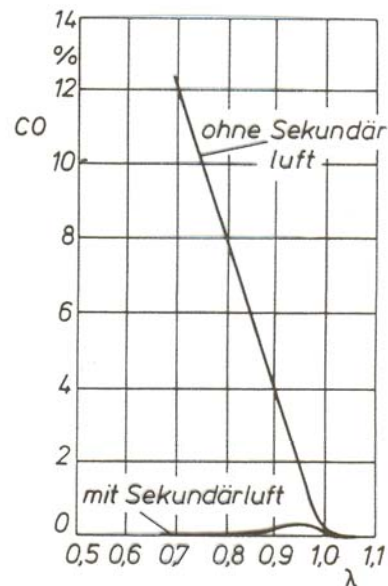
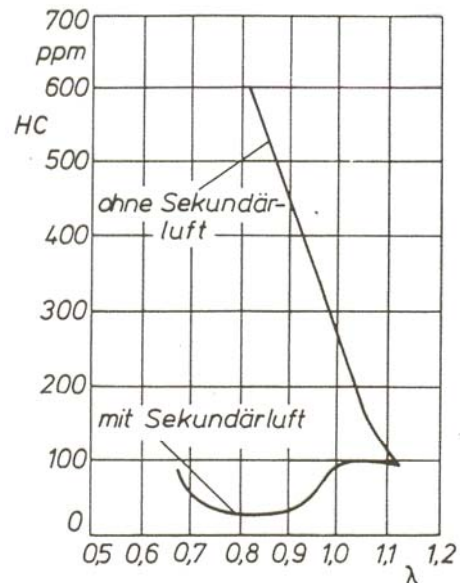


Quelle: Pischinger



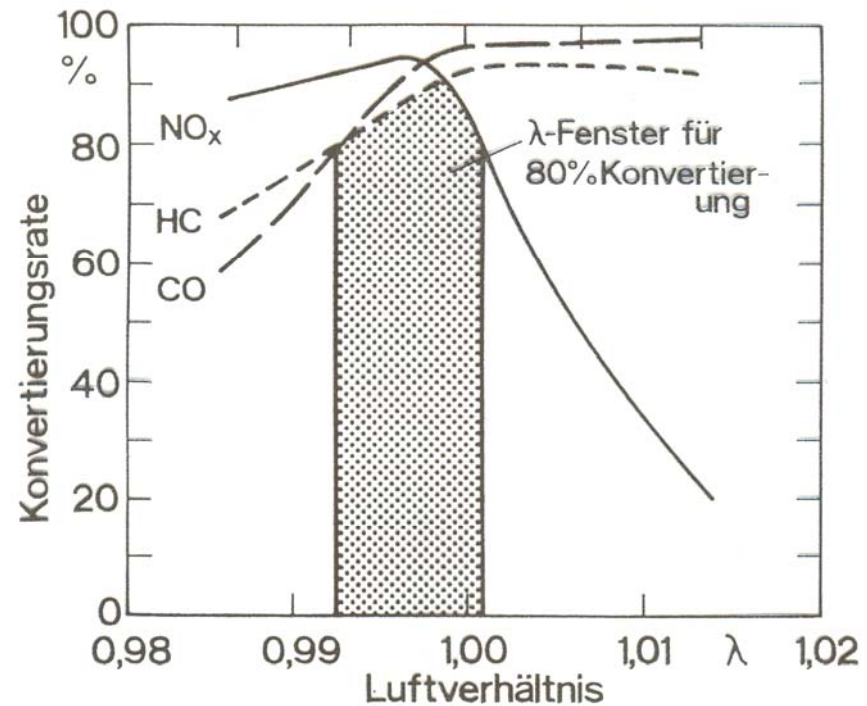
Quelle: Pischinger

Thermischer Reaktor (reicher Reaktor)



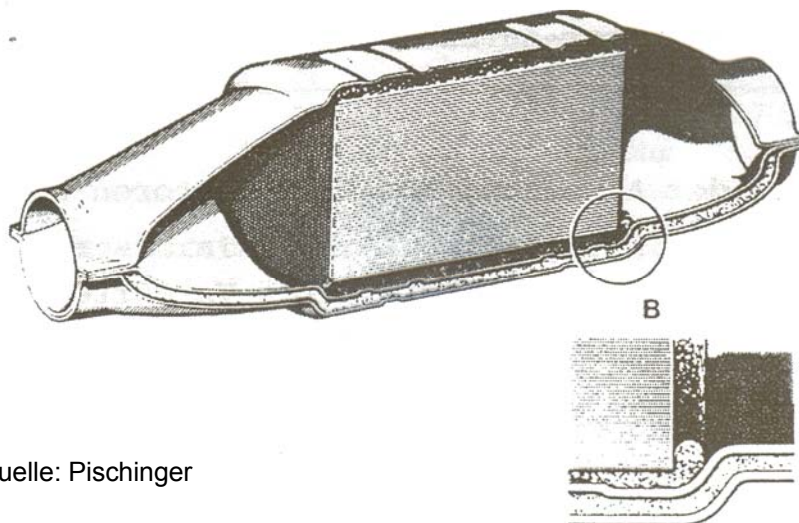
Thermische Nachverbrennung bei optimaler Sekundärluftzufuhr

Thermischer Reaktor

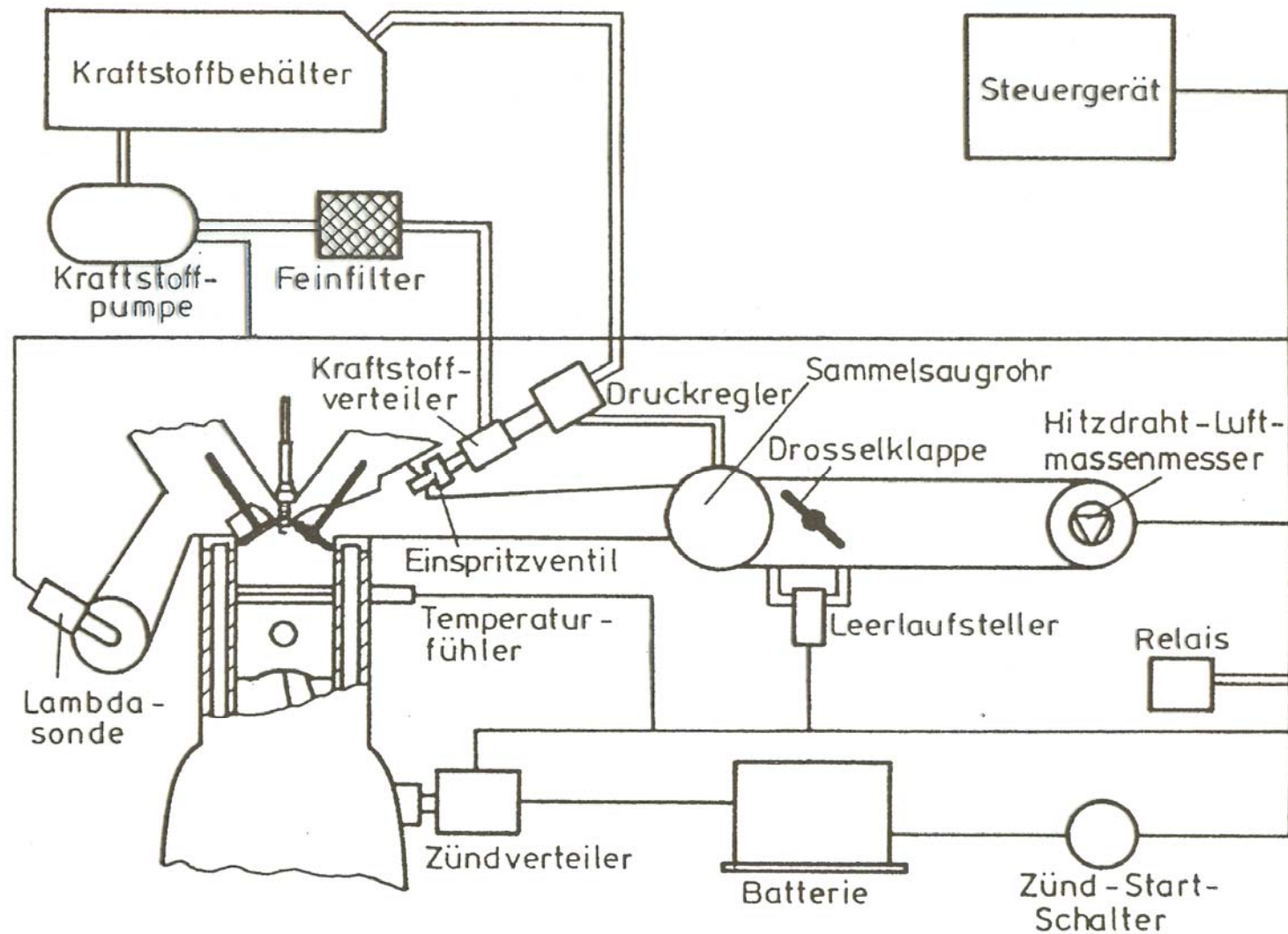


Konvertierungsrate eines 3-Wege-Katalysators

in Abhängigkeit von λ



Quelle: Pischinger

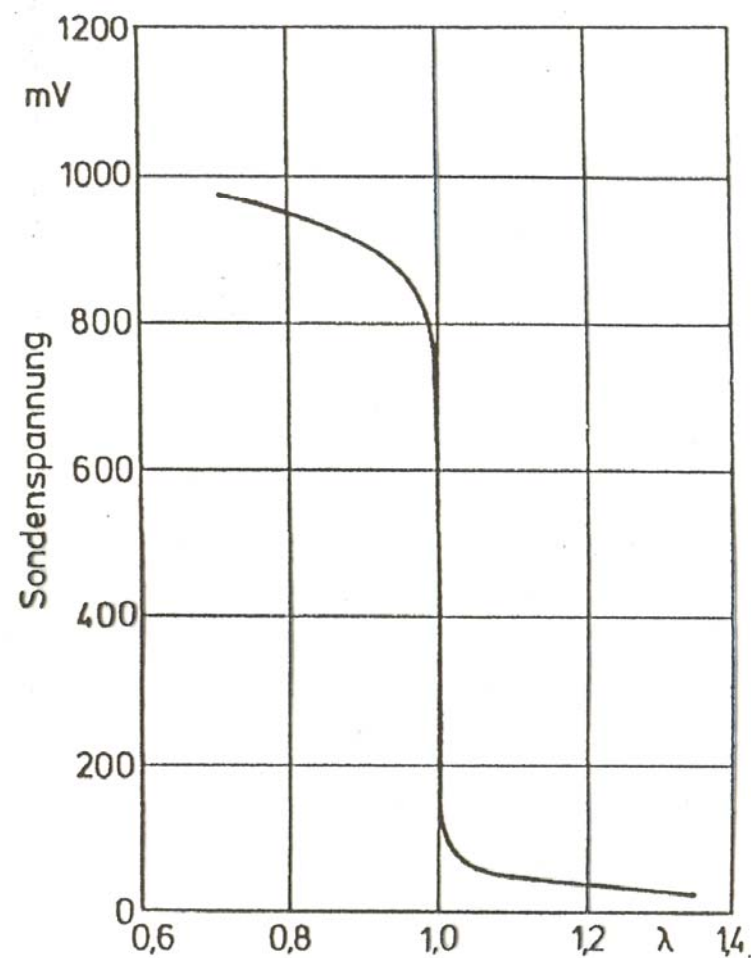
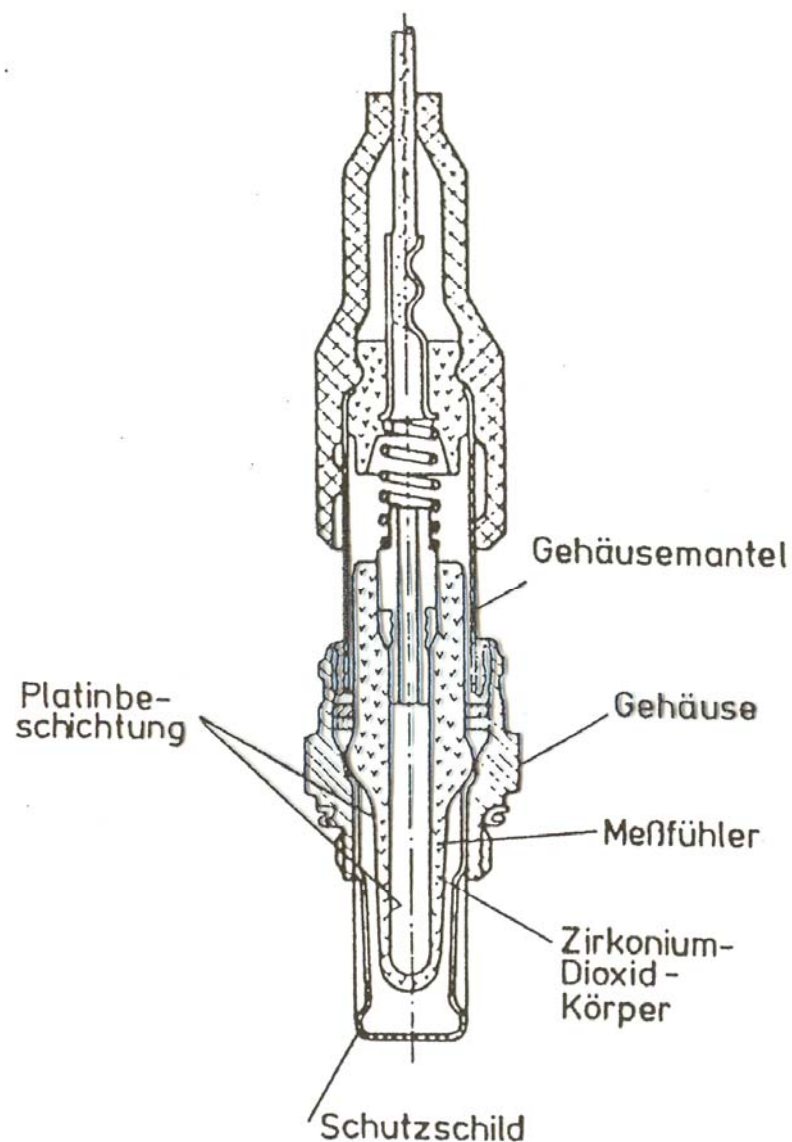


Einspritzanlage

Bosch-LH-Jetronic

Quelle: Urlaub

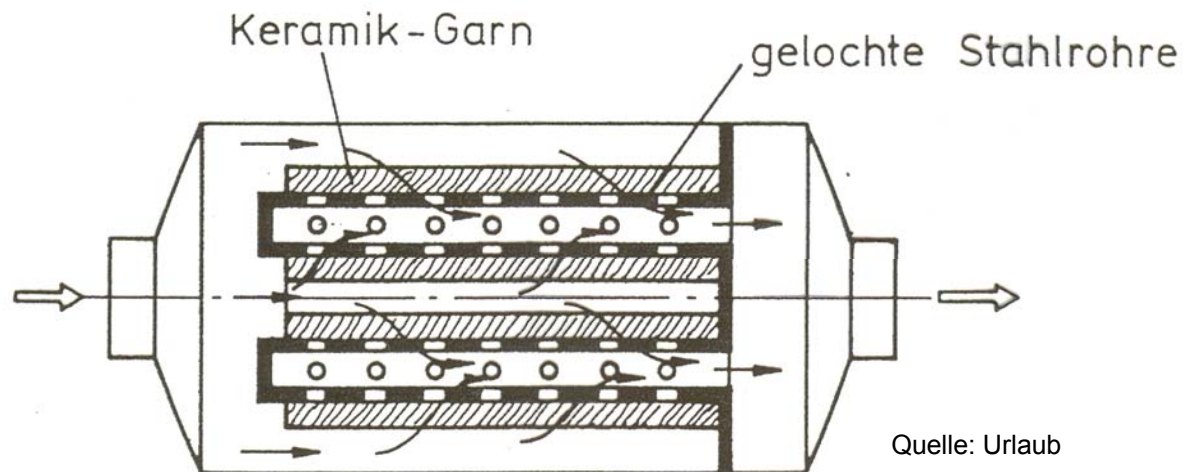
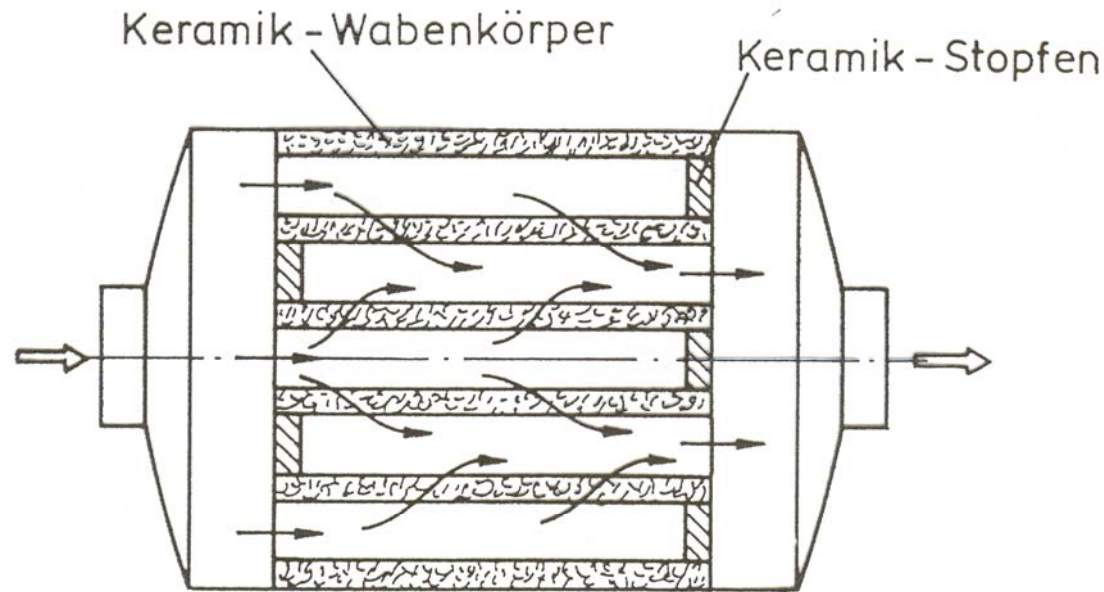
Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers



Quelle: Pischinger

λ -Sonde

Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers

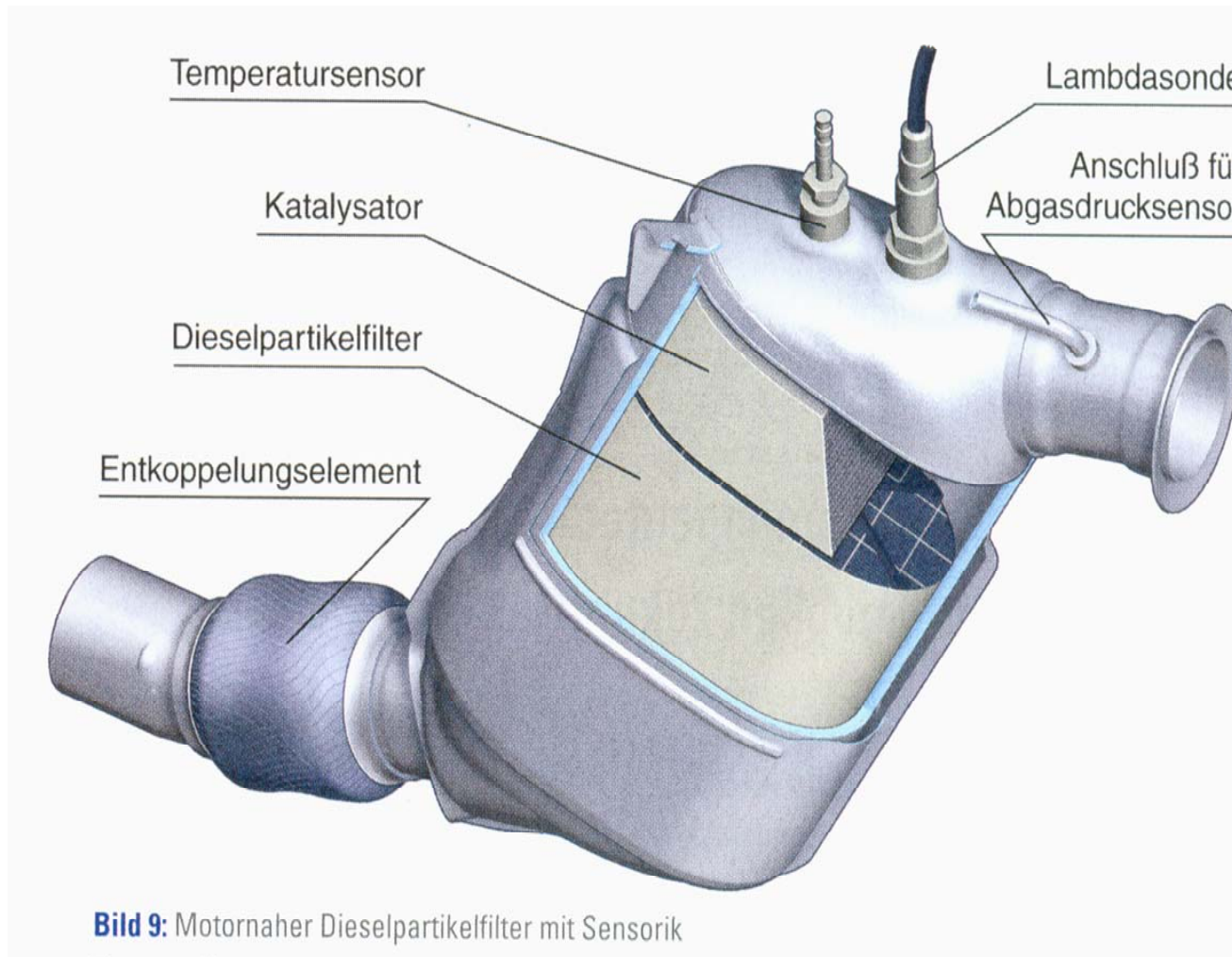


Quelle: Urlaub

Rußfilter

Prinzip Keramik-
und Keramikgarnfilter

Motornaher Oxi-Katalysator mit Rußpartikelfilter für Dieselmotor





Motornaher Oxidationskatalysator mit Rußpartikelfilter für Dieselmotor

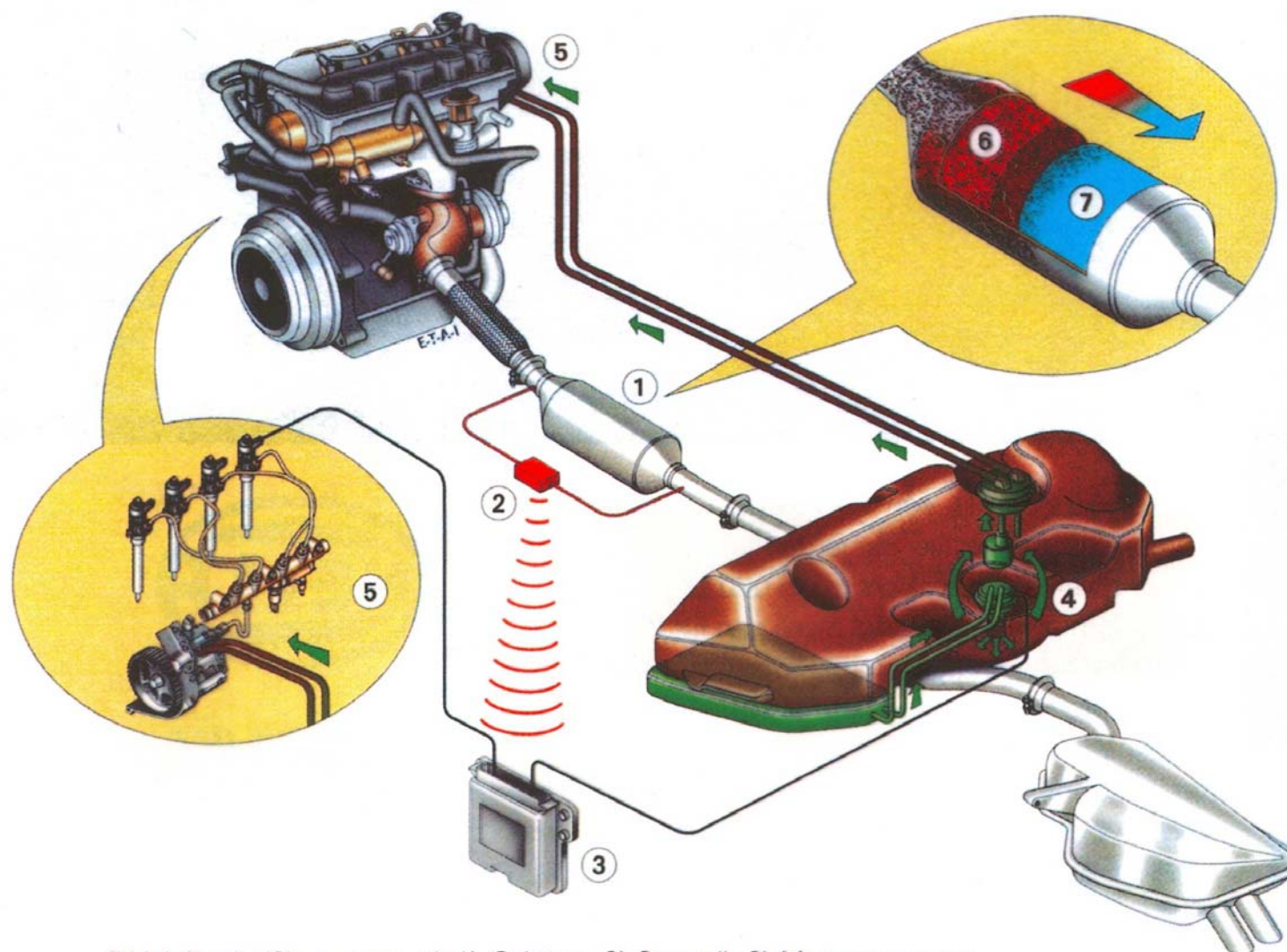
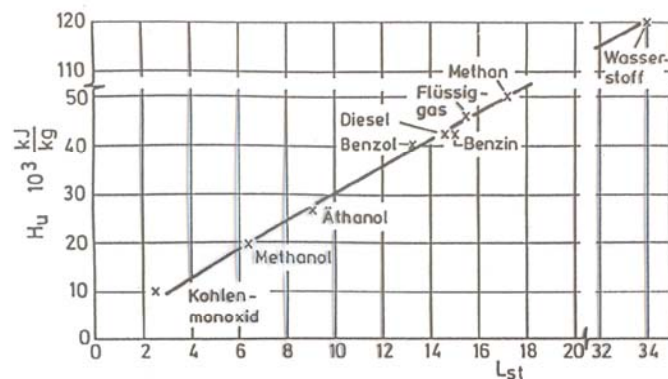


Bild 6: Partikelfiltersystem mit 1) Gehäuse, 2) Sensorik, 3) Motorsteuerung, 4) Additiv-Dosiereinrichtung, 5) Einspritzsystem, 6) Vorkatalysator, 7) Partikelfilter

Quelle: Peugeot / PSA

Partikelfiltersystem Peugeot 607 HDI

Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers



D4309/2

Bild 2.4-2: Unterer Heizwert verschiedener Kraftstoffe

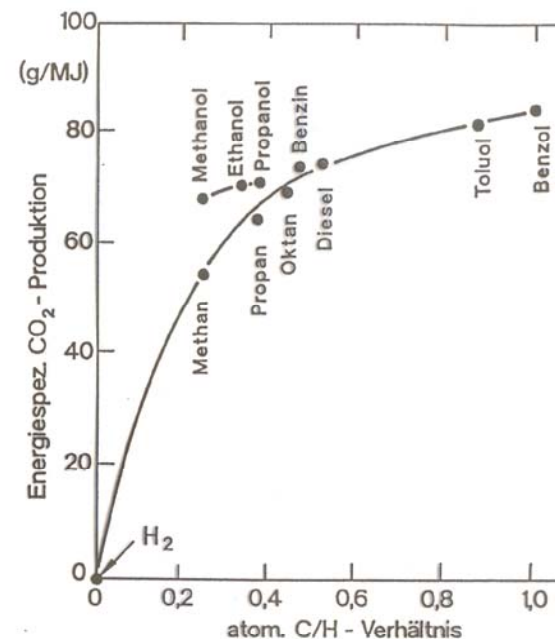
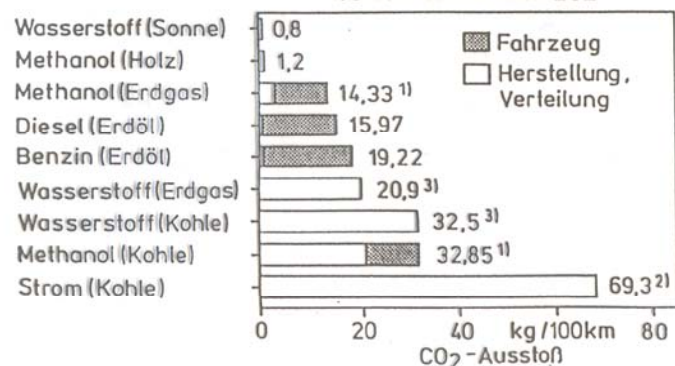


Bild 15.3-4: CO₂ - Trächtigkeit der Kraftstoffe

CO₂-Emission Mittelklasse-PKW
Herstellung, Verteilung, Nutzung
1/3-Mix-Werte nach ECE



1) Di-Motor
2) Na S-Batt.
3) flüssig

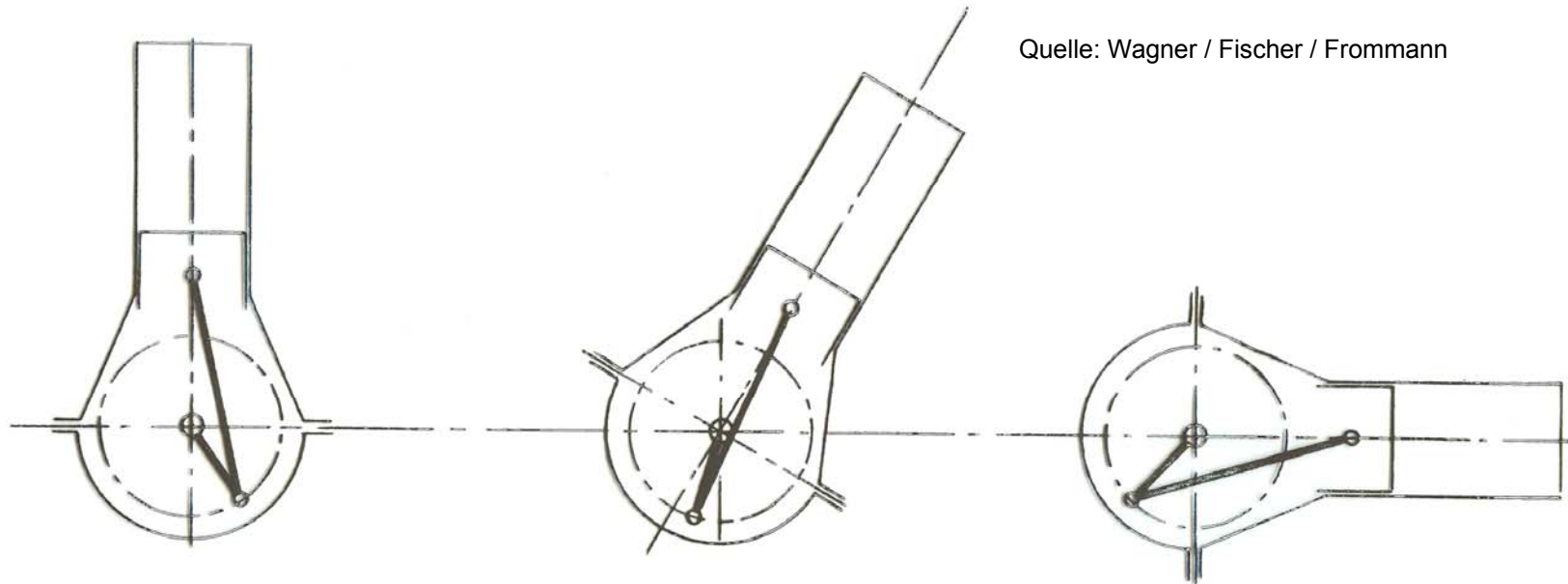
Vergleich unterschiedlicher Konzepte

CO₂ Bilanz Kraftstoffe

Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers

Sondermaschinen

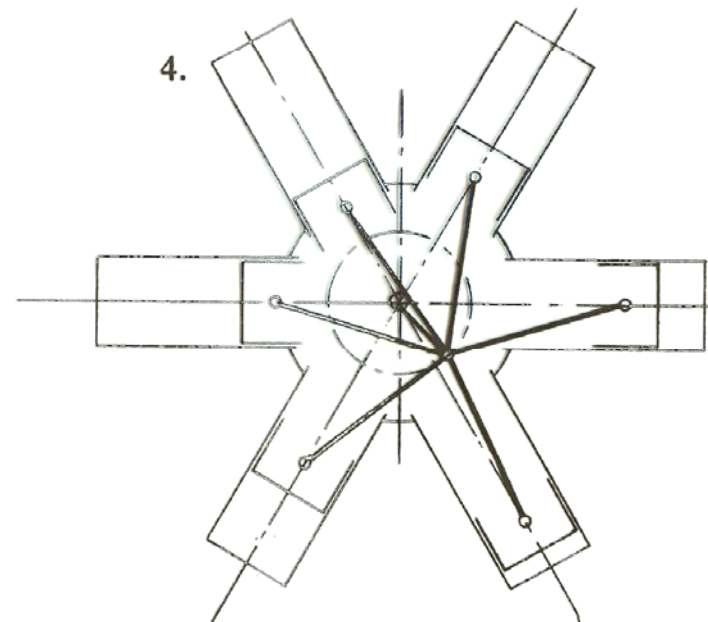
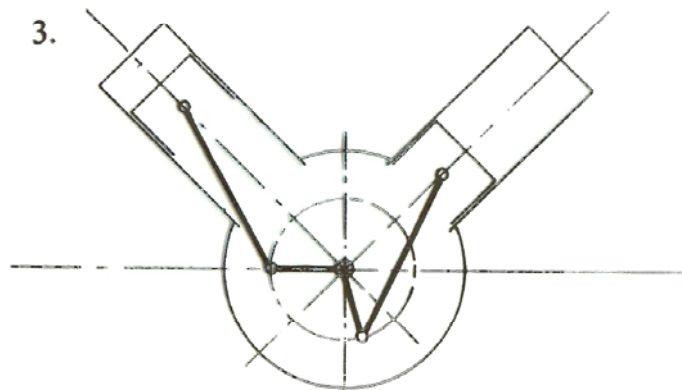
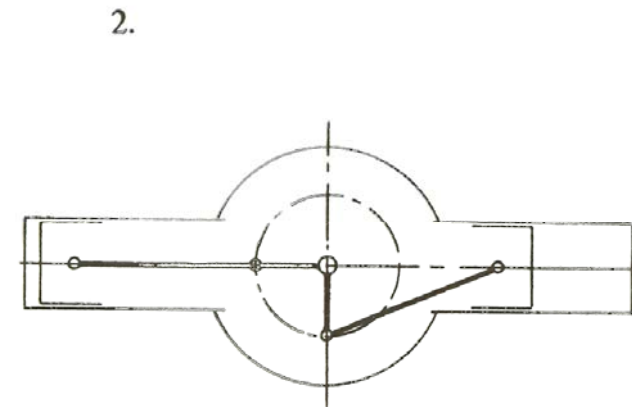
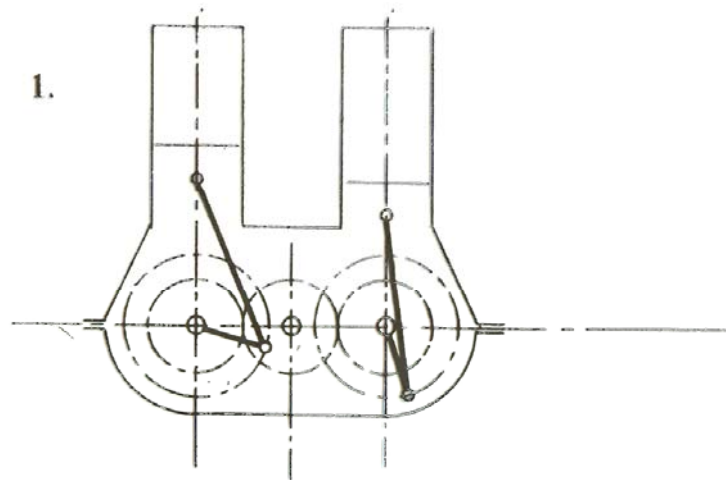
Quelle: Wagner / Fischer / Frommann



Lage der Zylinder von Motoren

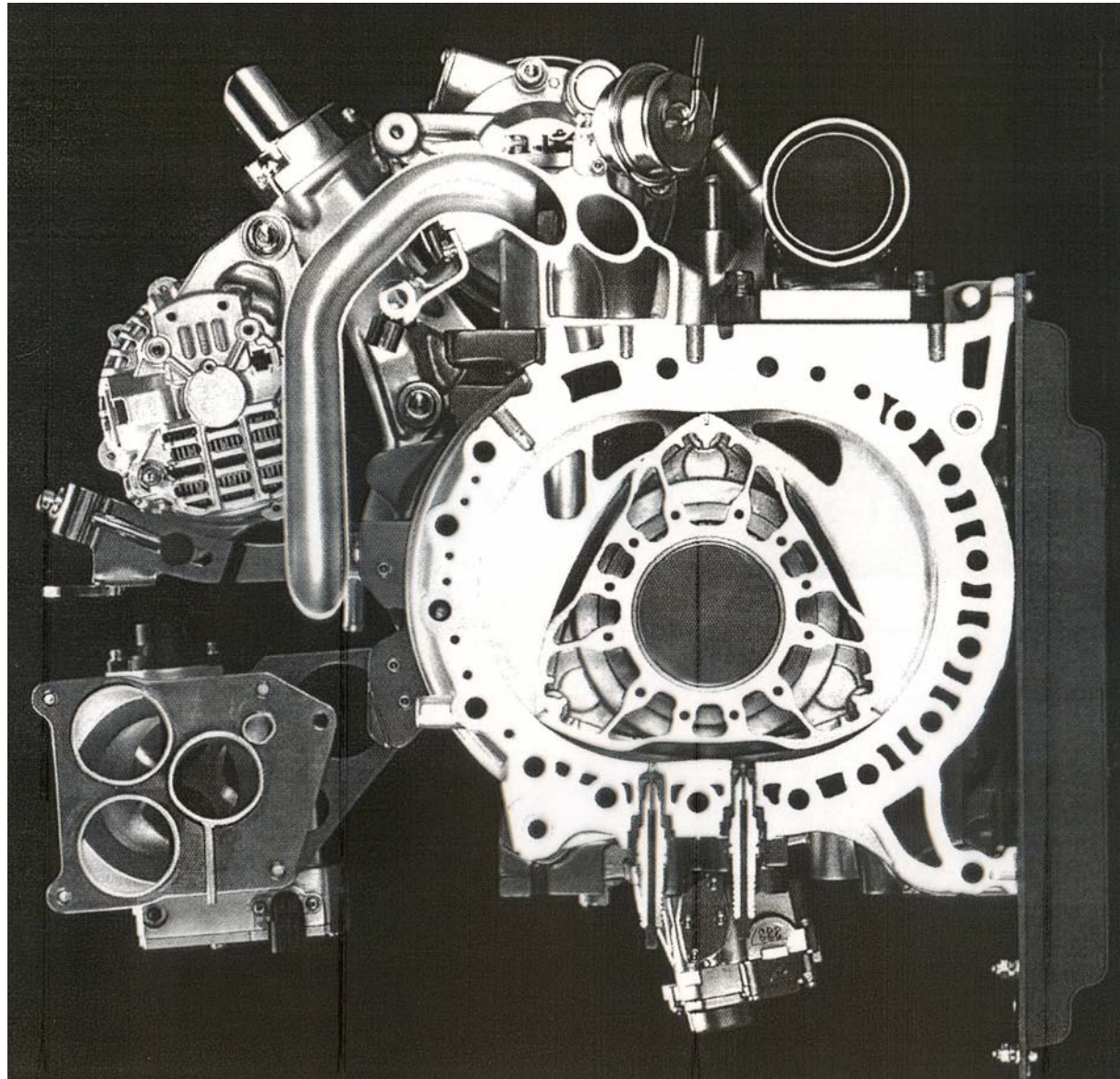
Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers

Quelle: Wagner / Fischer / Frommann



Anordnung der Zylinder

Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers

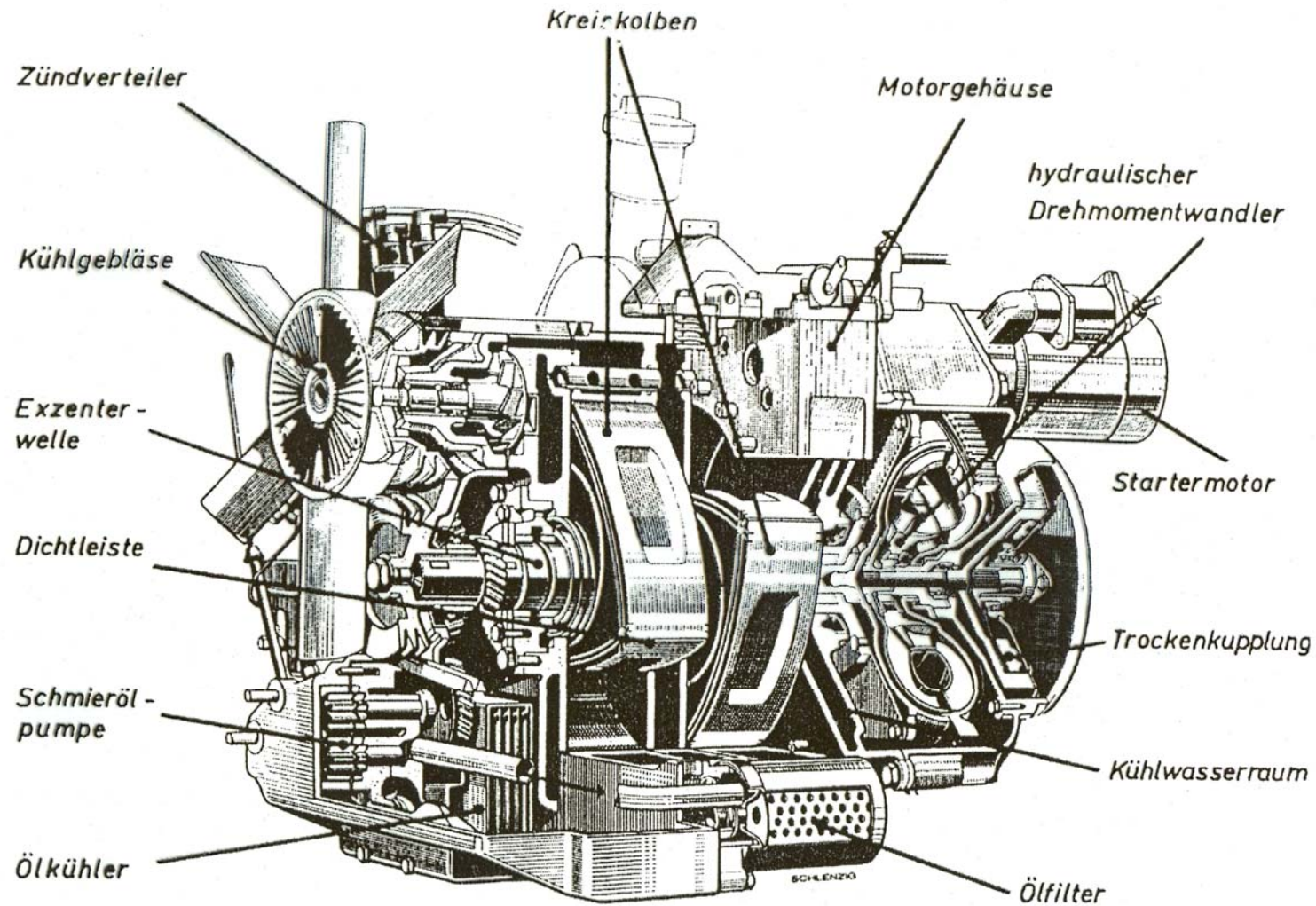


Kreiskolben- / Wankelmotor

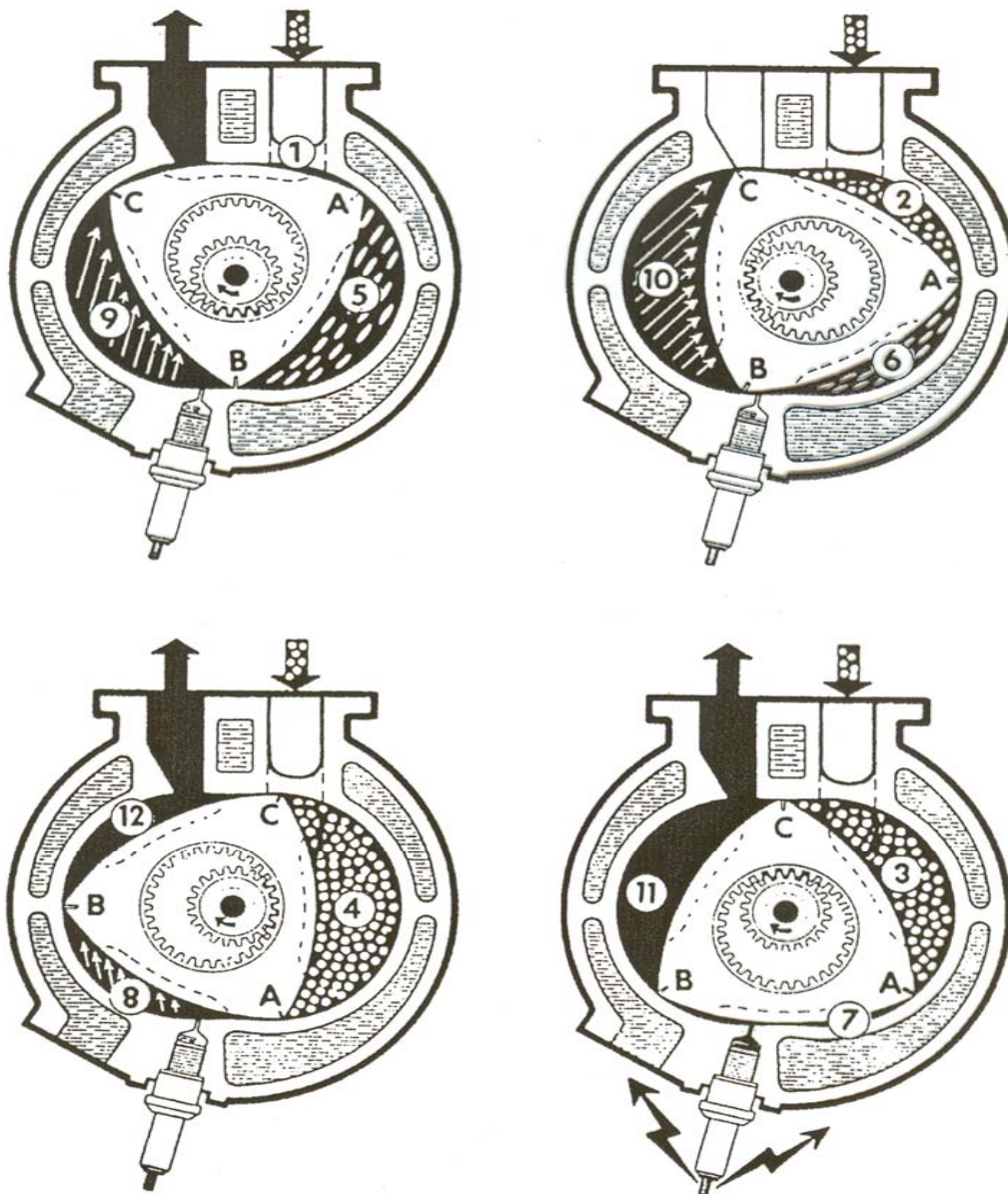
Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers

Wankelmotor (Kreiskolbenmotor)

für PKW-Antrieb

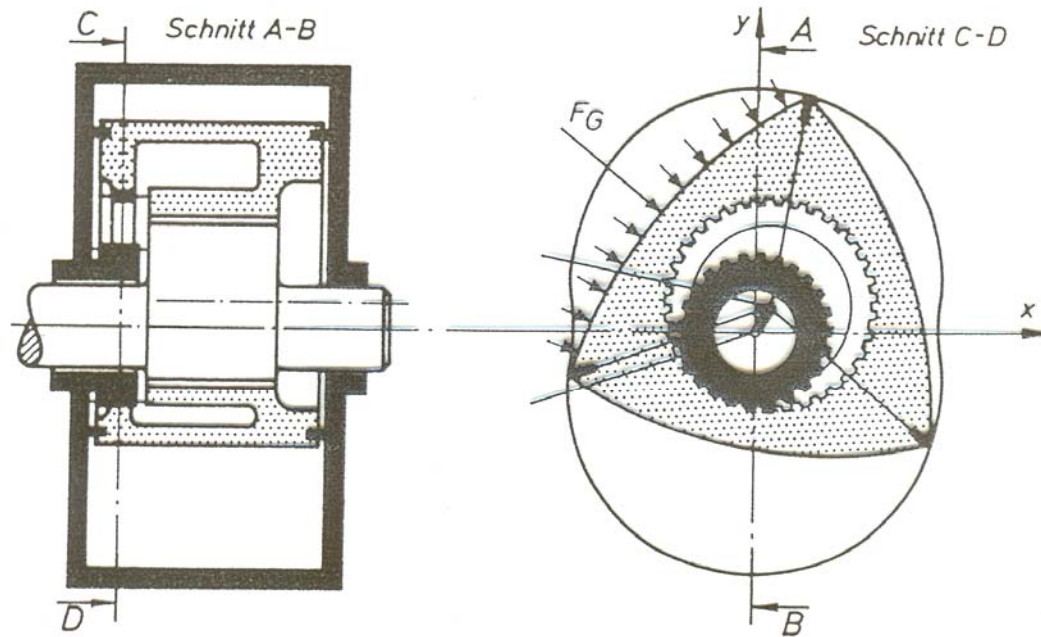


Quelle: Pischinger



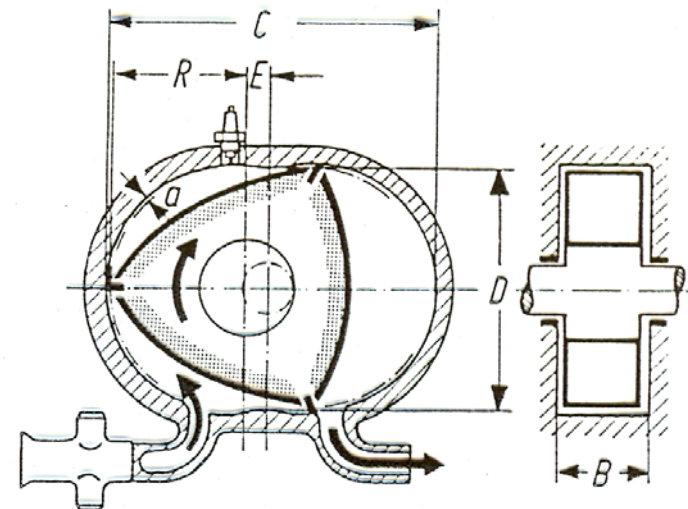
- 1– 4 Ansaugen
5– 7 Verdichten
8–10 Arbeiten
11–12 Ausschieben

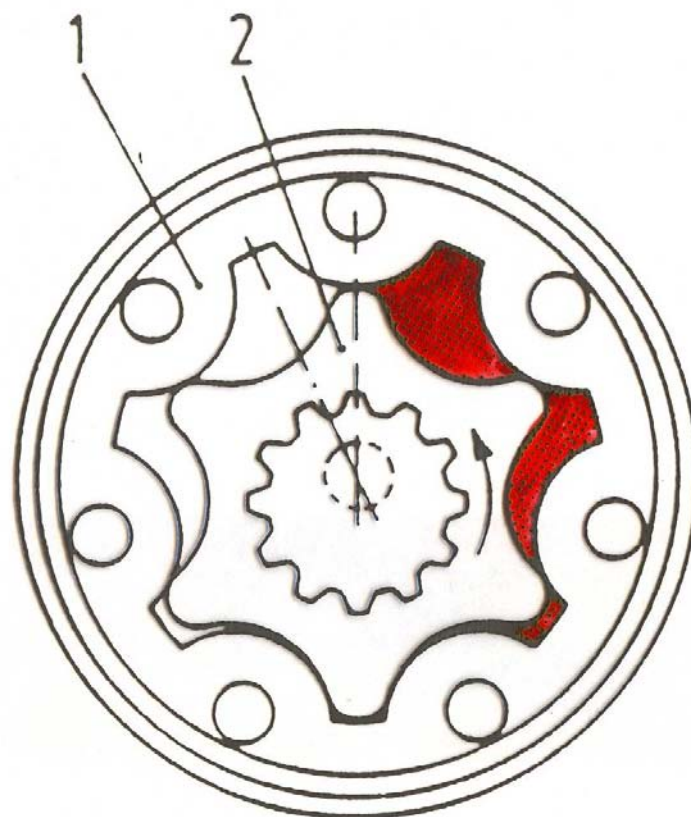
Wirkungsweise Wankelmotor



Wankel-Kreiskolbenmotor

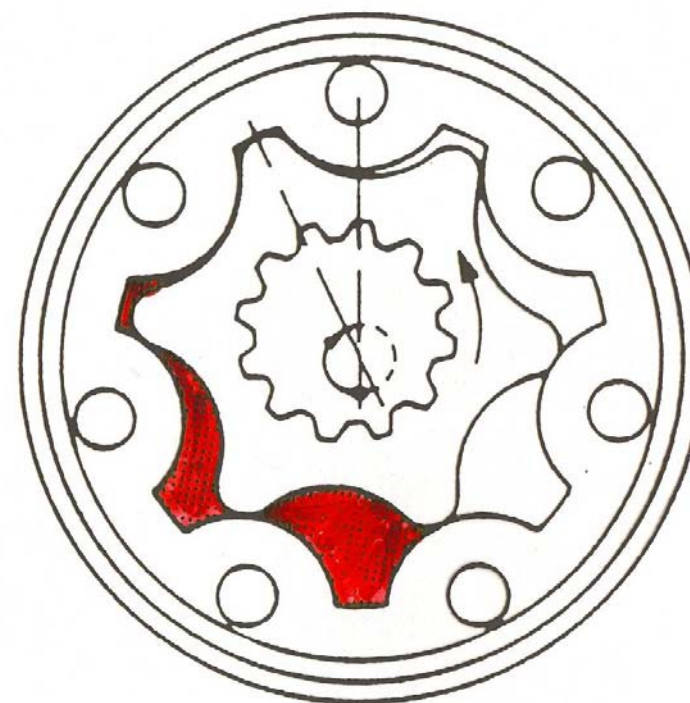
Wankelmotor





Zahnringmotor

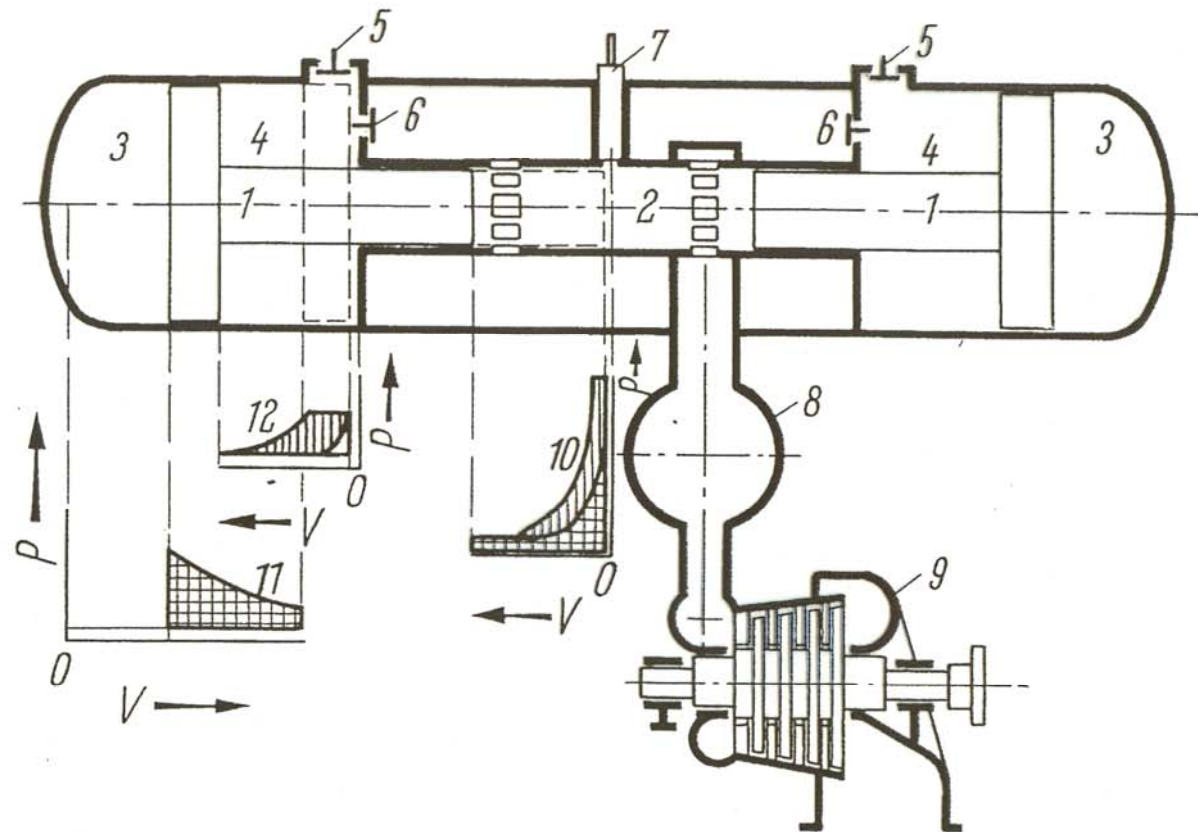
hydrostatisch



Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers

Schema des Freikolbenmotors

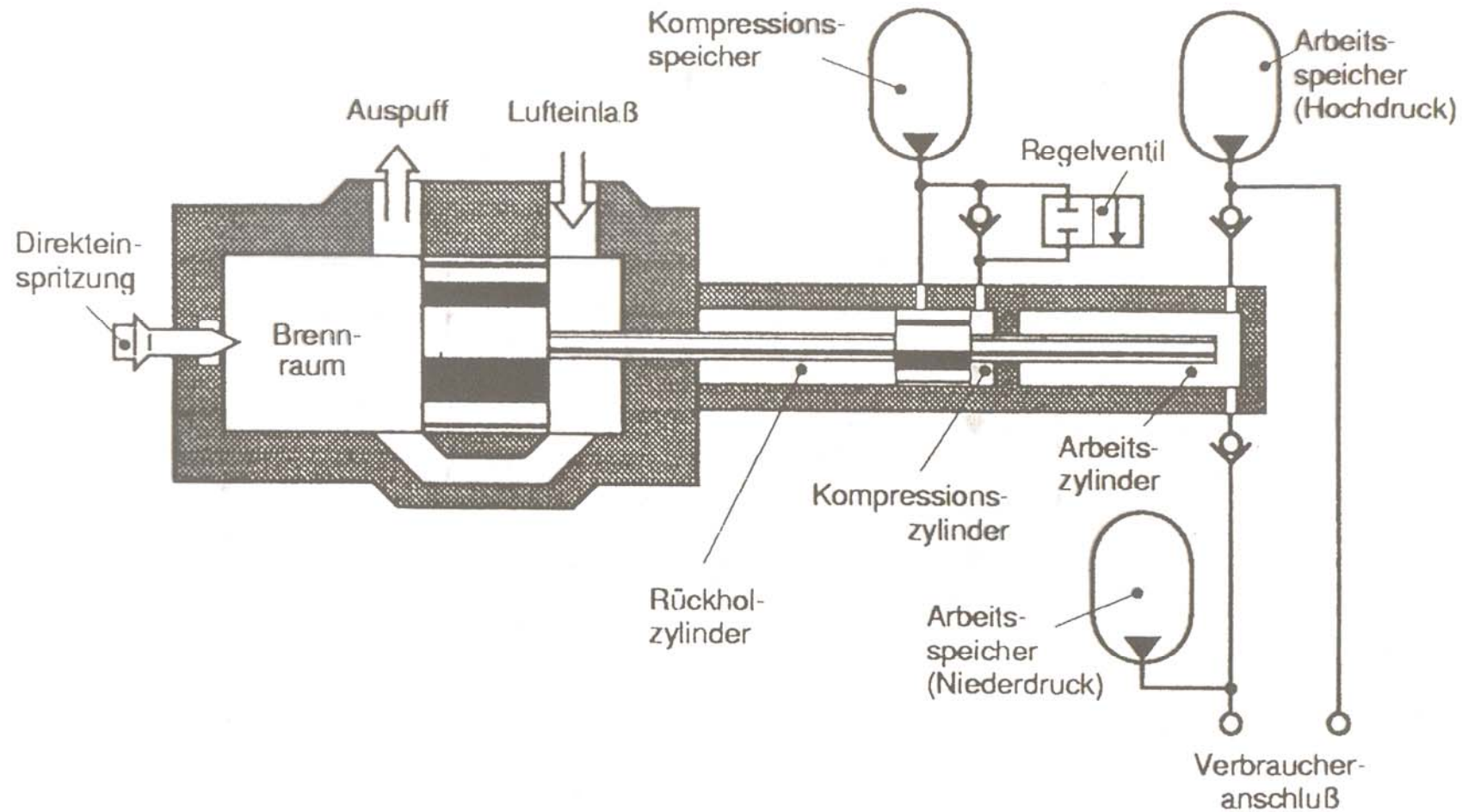
- 1 Kolben
- 2 Diesel-Brennraum
- 3 Luftpuffer
- 4 Aufladezylinder
- 5 Luft-Einlaßventile
- 6 Luft-Auslaßventile
- 7 Einspritzung
- 8 Abgas-Aufnehmer
- 9 Gasturbine
- 10 Diesel-Diagramm
- 11 Puffer-Diagramm
- 12 Lader-Diagramm



Quelle: Kalide

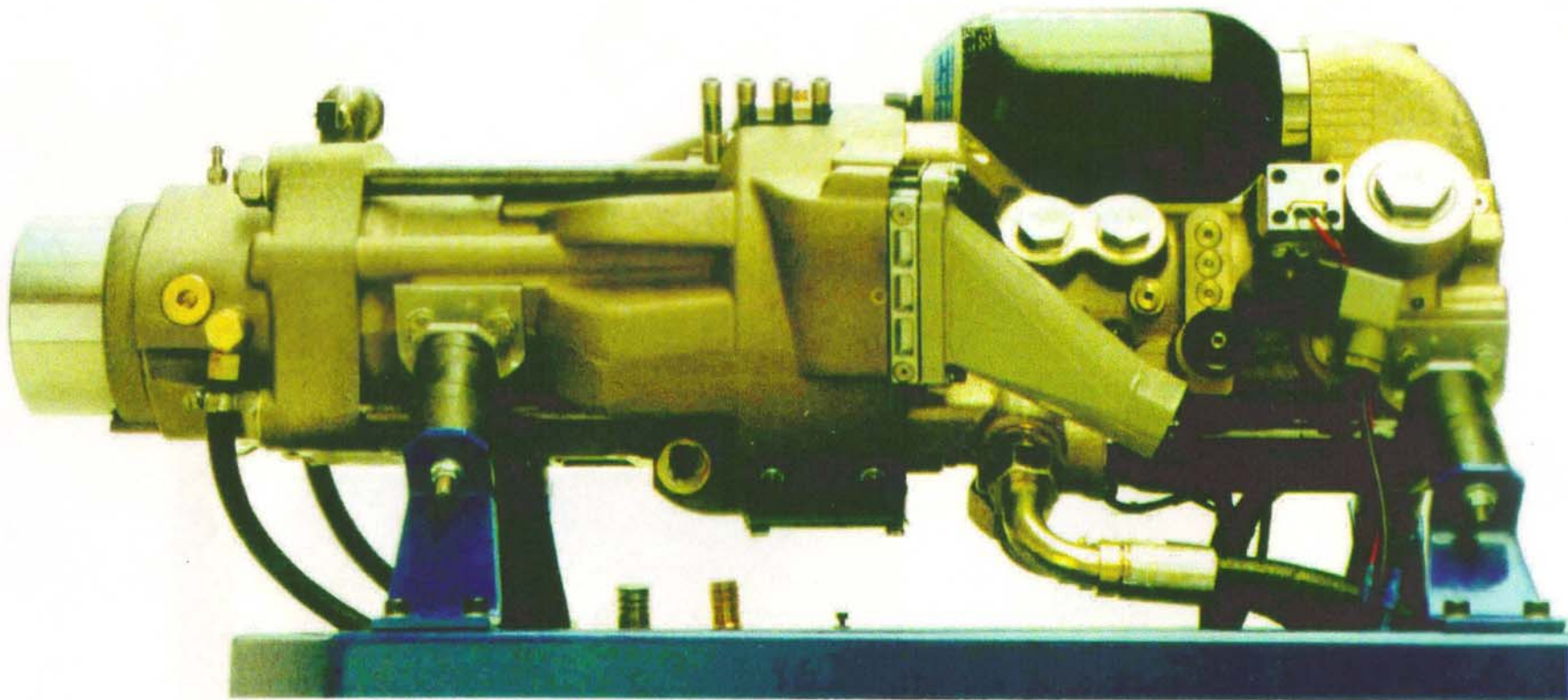
Funktionsprinzip Freikolbenmotor

Innas BV



Freikolbendieselmotor mit hydrostatischer Pumpe

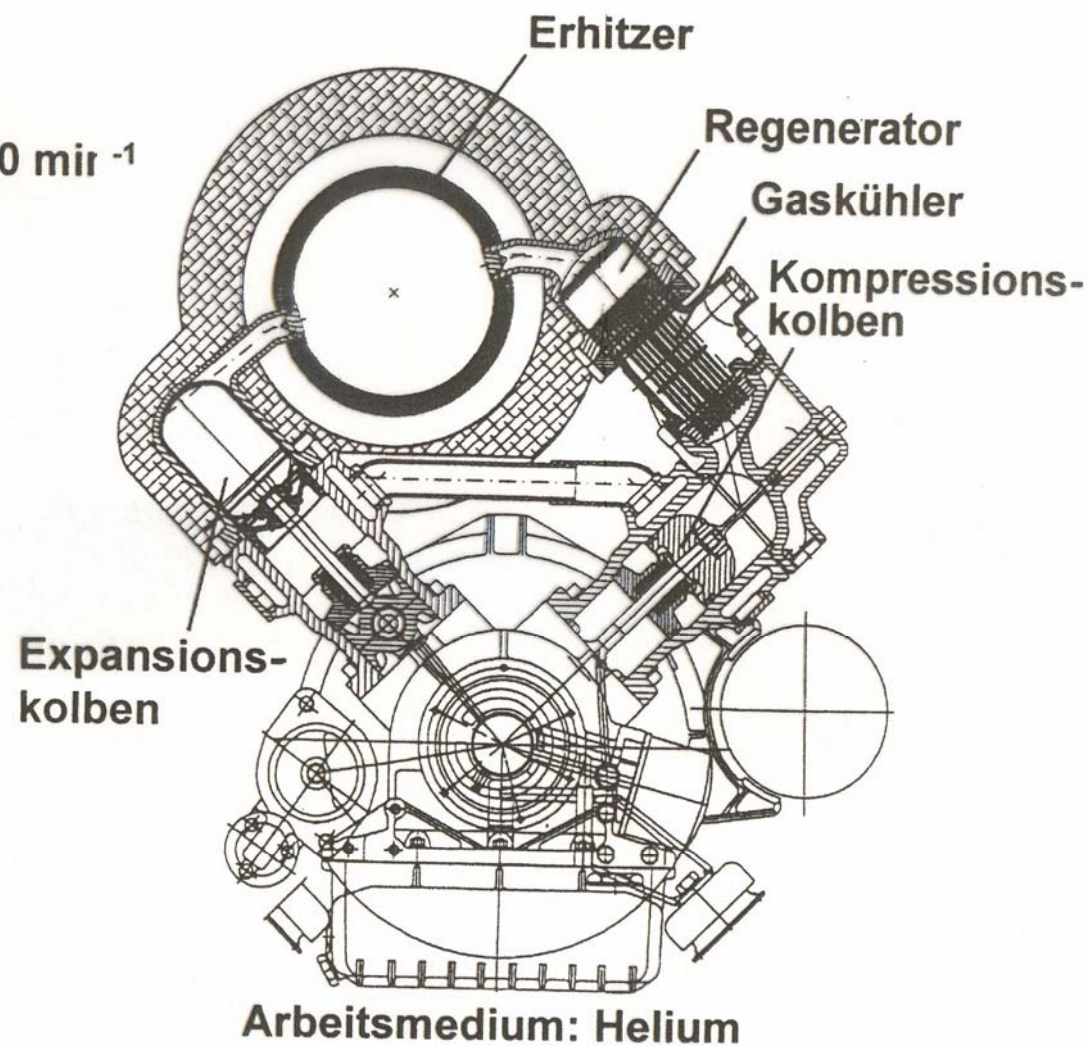
"Centaur" Fa. Innas



Quelle: Innas BV

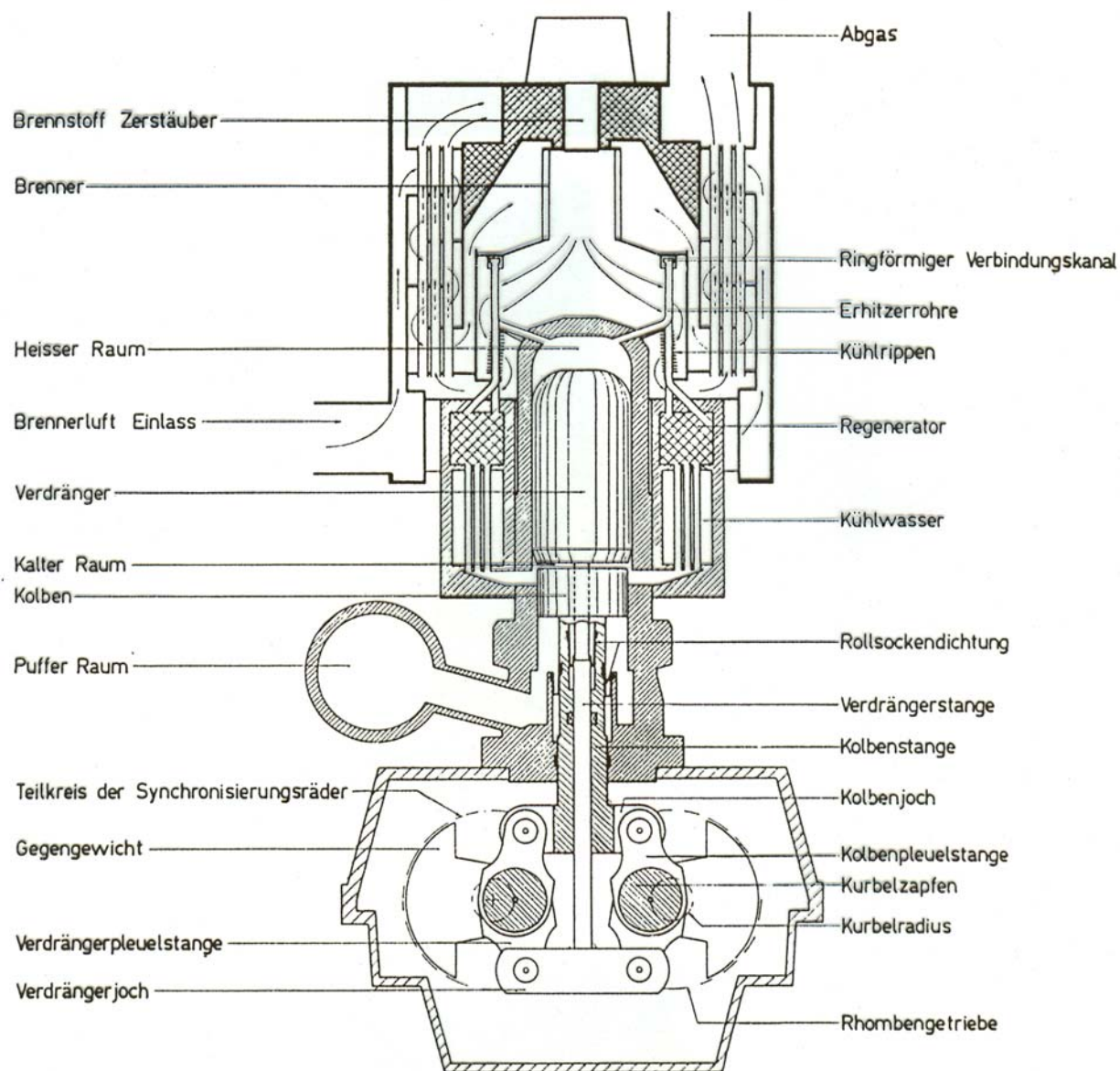
Verbrennungskraftmaschinen
Prof. Dr.-Ing. E. Reimers

$P_e = 10 \text{ kW}$
 $n_n = 1500 \dots 1800 \text{ min}^{-1}$
 $V_H = 160 \text{ cm}^3$
 2 Zylinder
 V - Bauteile



Stirling-Motor

Verbrennungskraftmaschinen
 Prof. Dr.-Ing. E. Reimers

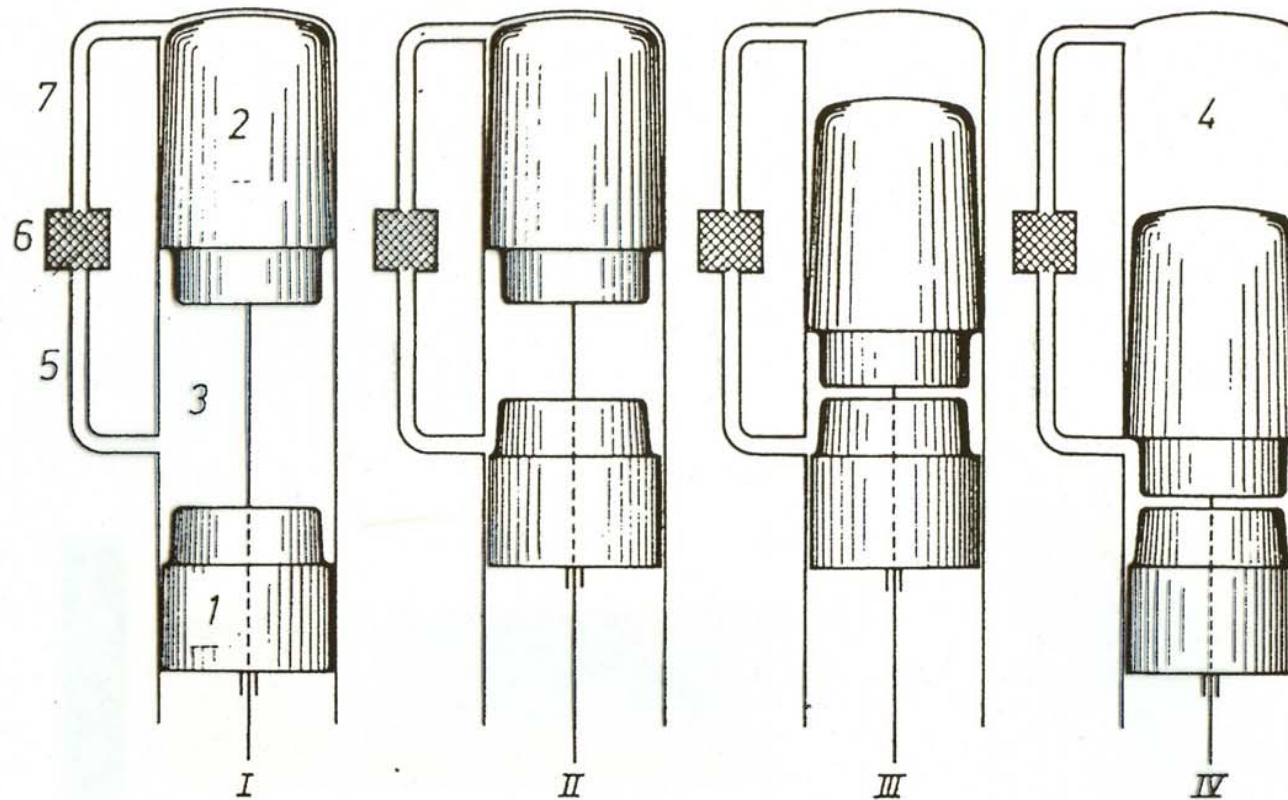


Quelle: Kalide

Stirling- Heißluftmotor mit Rhombengetriebe

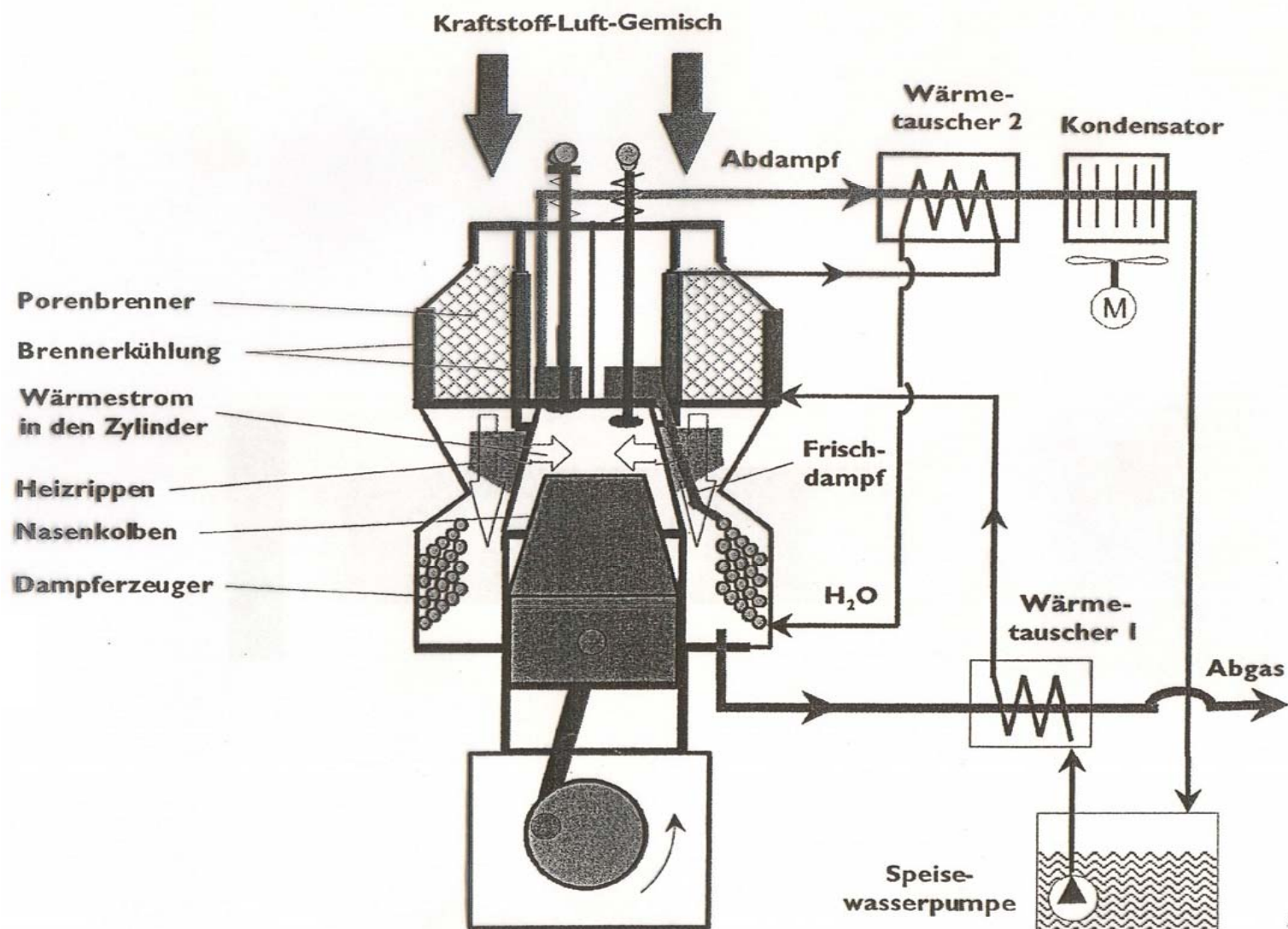
(Philips, Eindhoven)

Schema des Stirling-Kraftmaschinenprozesses



Quelle: Kalide

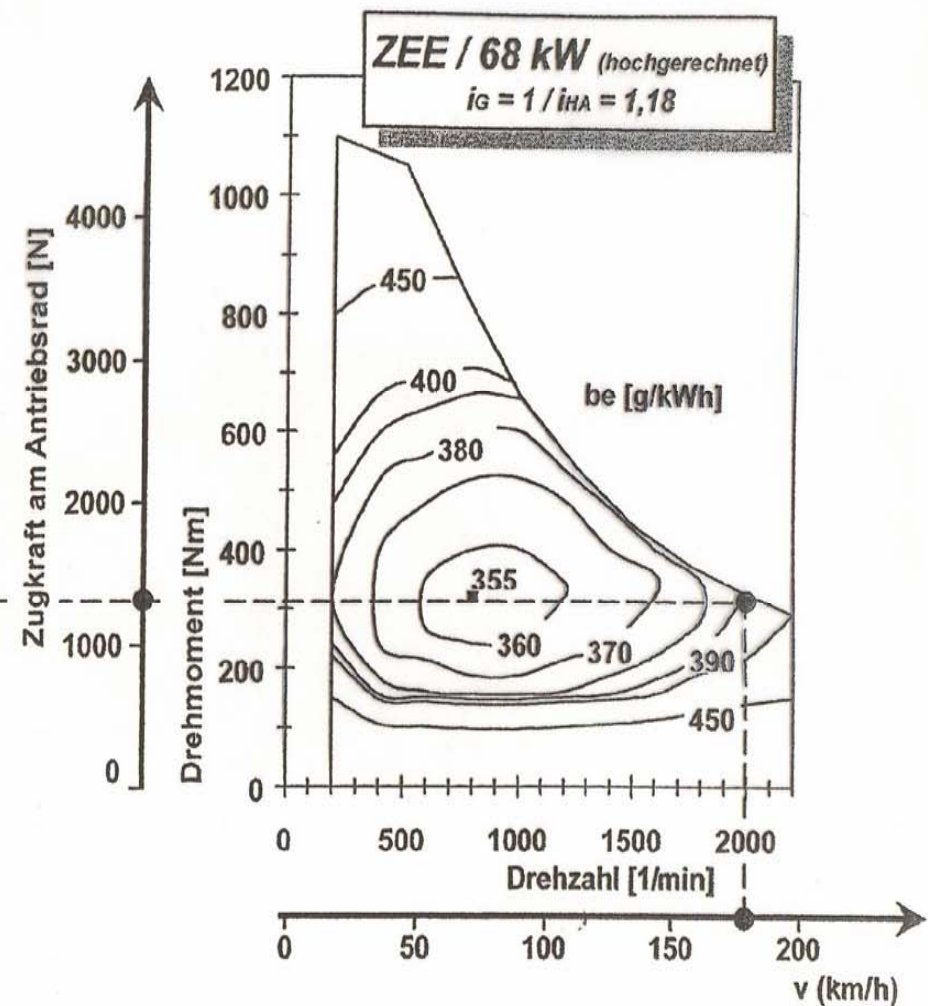
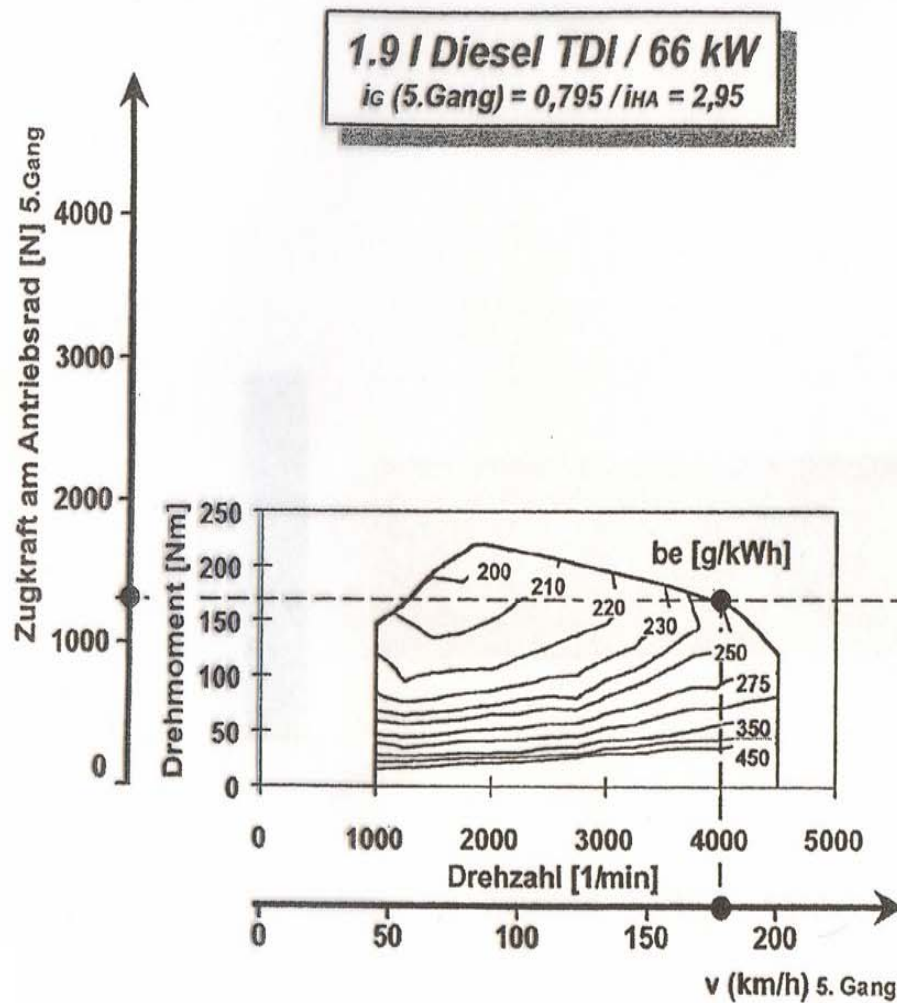
Vier Stadien der diskontinuierlichen Bewegung von Kolben und Verdränger
1 Kolben, 2 Verdränger, 3 kalter Raum, 4 heißer Raum, 5 Kühler, 6 Regenerator, 7 Erhitzer



Dampfmotor mit Porenbrenner

ZEE-Motor im Vergleich mit Dieselmotor

Spezifischer Kraftstoffverbrauch und Drehmomentverlauf



Dampfmotor (schematisch)

