

Motoren - Grundlagen bis Abgasnachbehandlungs- systeme

Teil 1

Prof. Dr. Ulrich Groß

Grundlagen Motoren

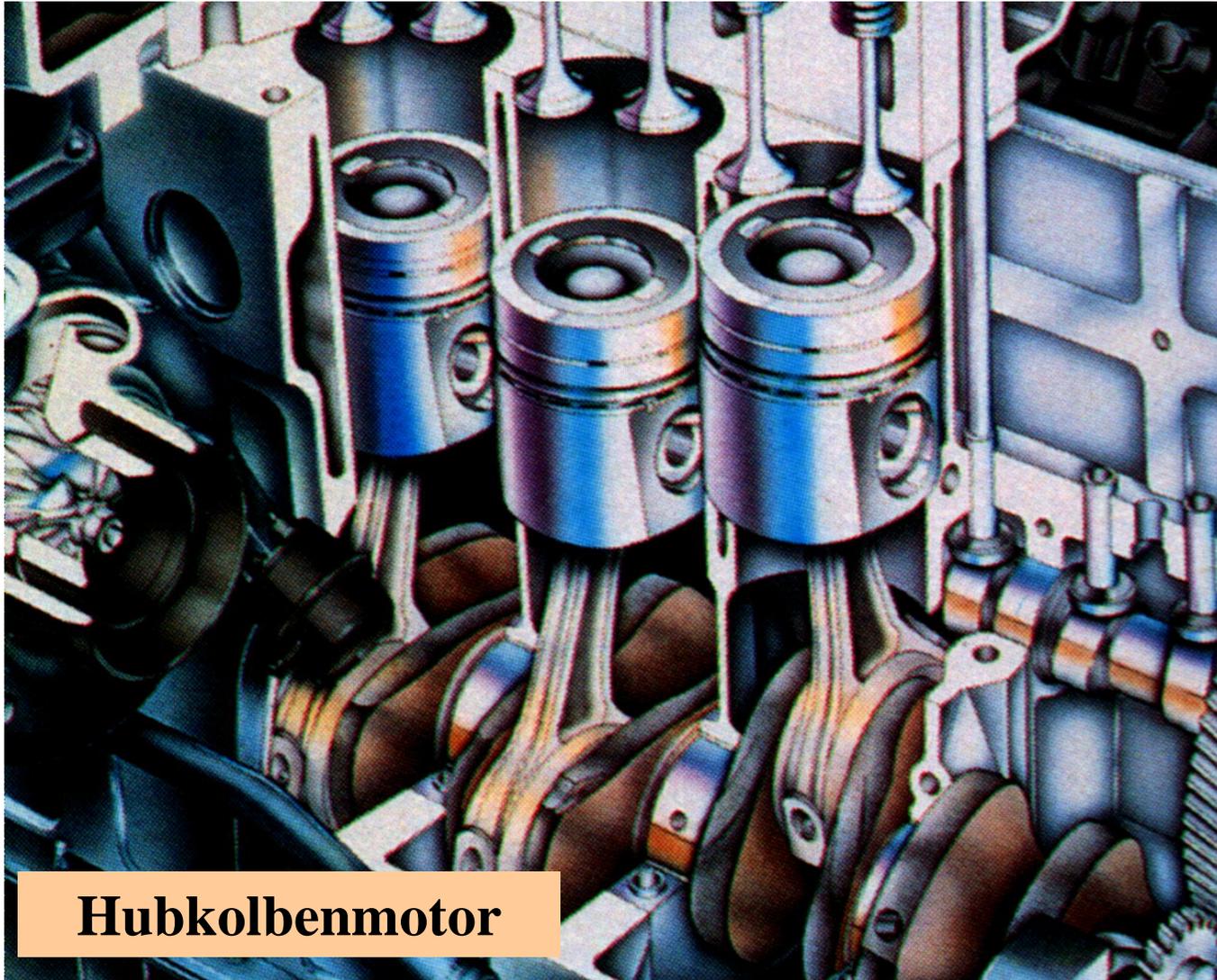
Gliederung

- » Grundaufbau und Arbeitsweise von Motoren
 - › Hubkolbenmotoren
 - › Motorenbauarten
 - › Grundfunktion, 4-Takt und (2-Takt)

Motoroptimierung

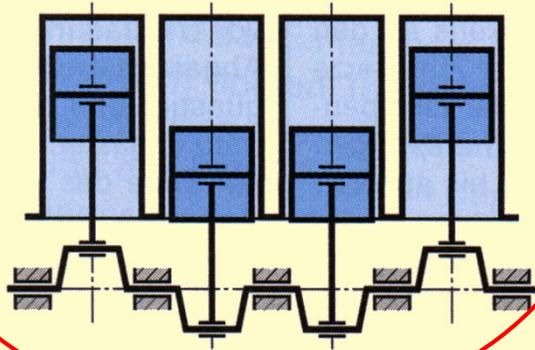
- » Einspritzanlagen
 - › Düsen
 - › Innermotorische Optimierung
 - › Turbolader
- » Abgaskontrolle
 - › Rahmenbedingungen
 - › Motoranpassung und Aggregate zur Abgasnachbehandlung
- » Luftfilter
- » Kühlung

Hubkolbenmotor

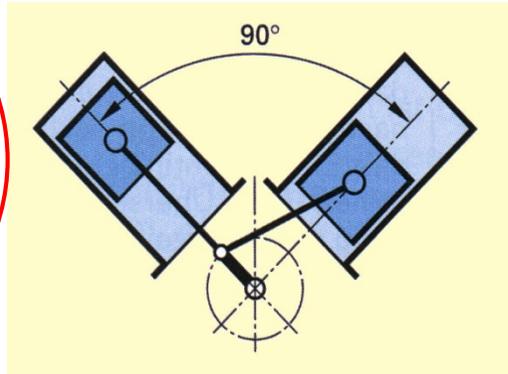


Bauformen des Hubkolbenmotors

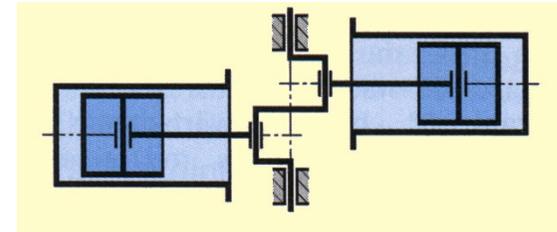
Reihenmotor



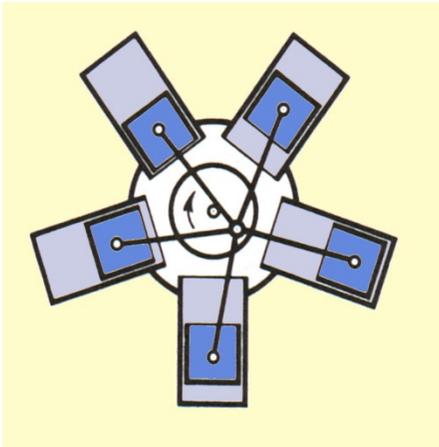
V-Motor



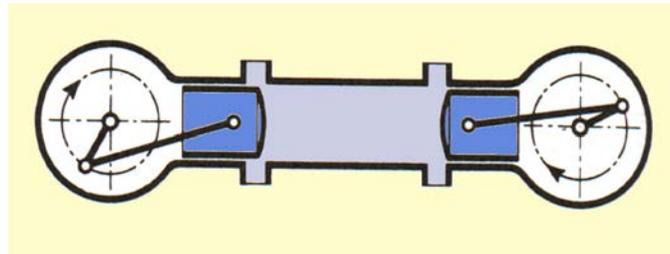
Boxermotor



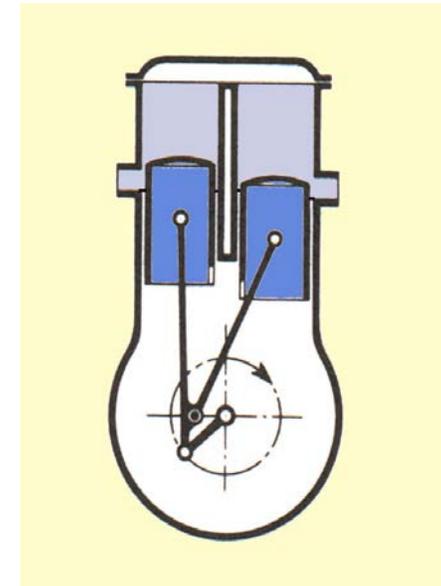
Sternmotor



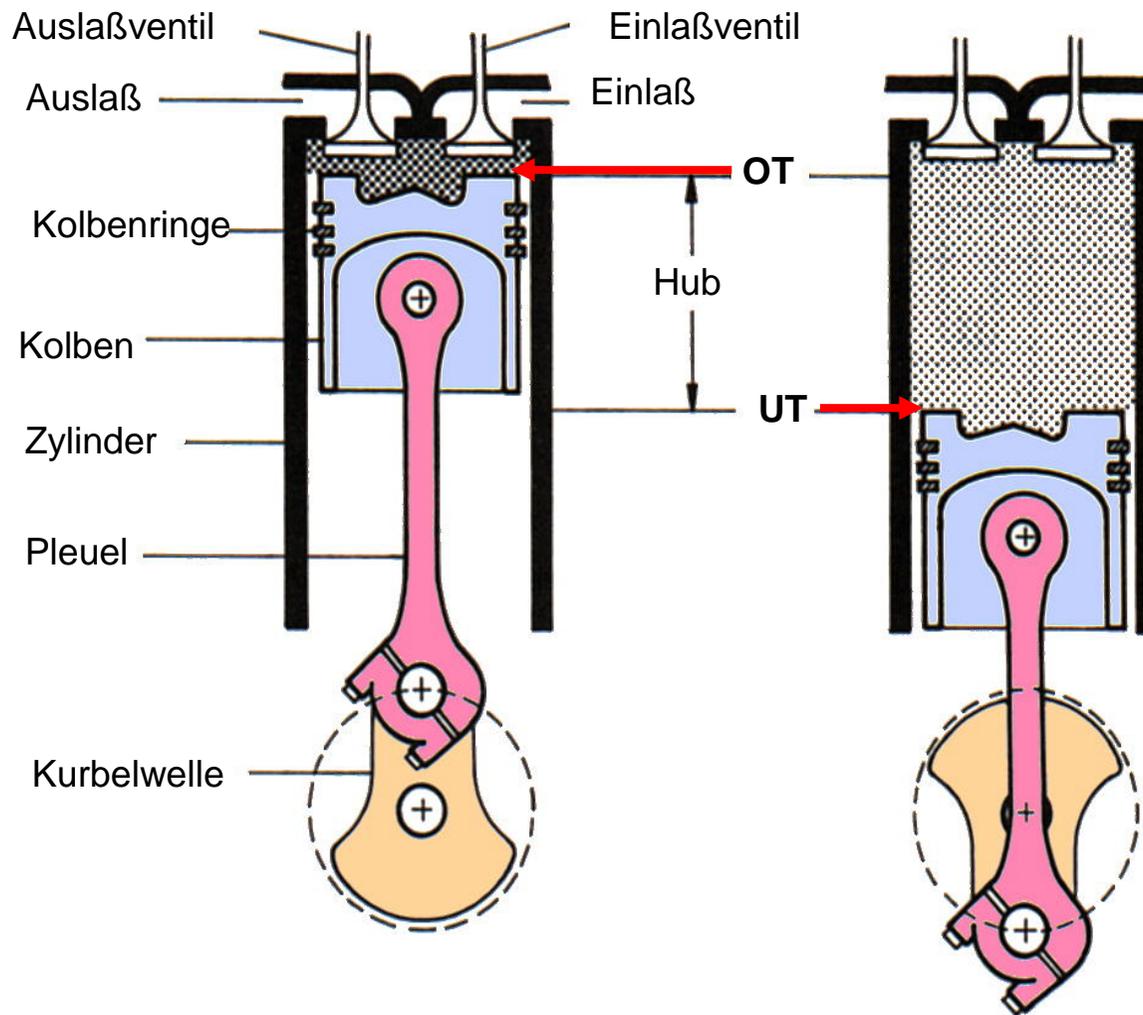
Gegenkolbenmotor



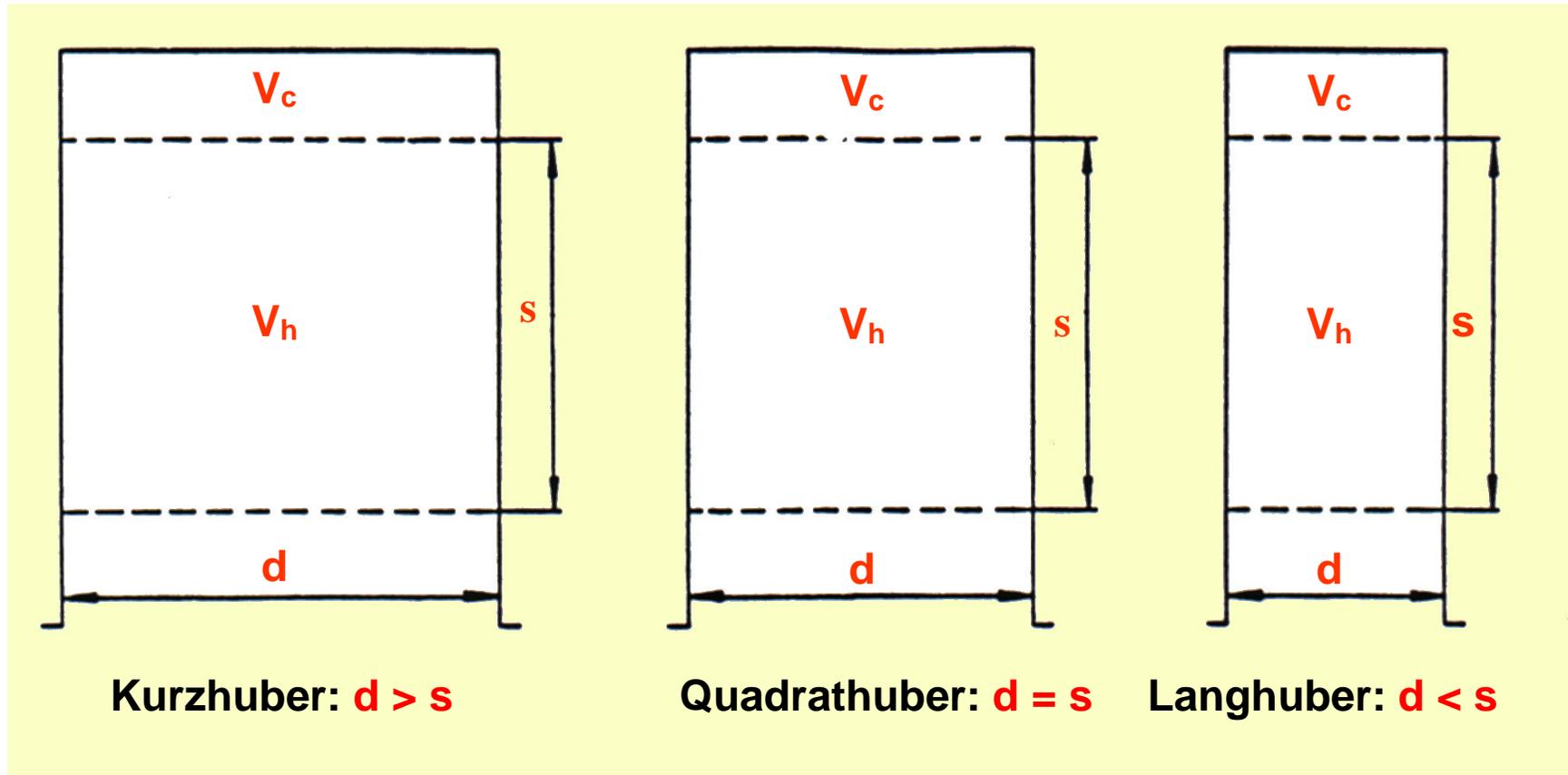
Doppelkolbenmotor



Bezeichnungen am Hubkolbenmotor



Bezeichnung der Motoren nach dem Hub-Bohrung-Verhältnis



V_c = Verdichtungsraum

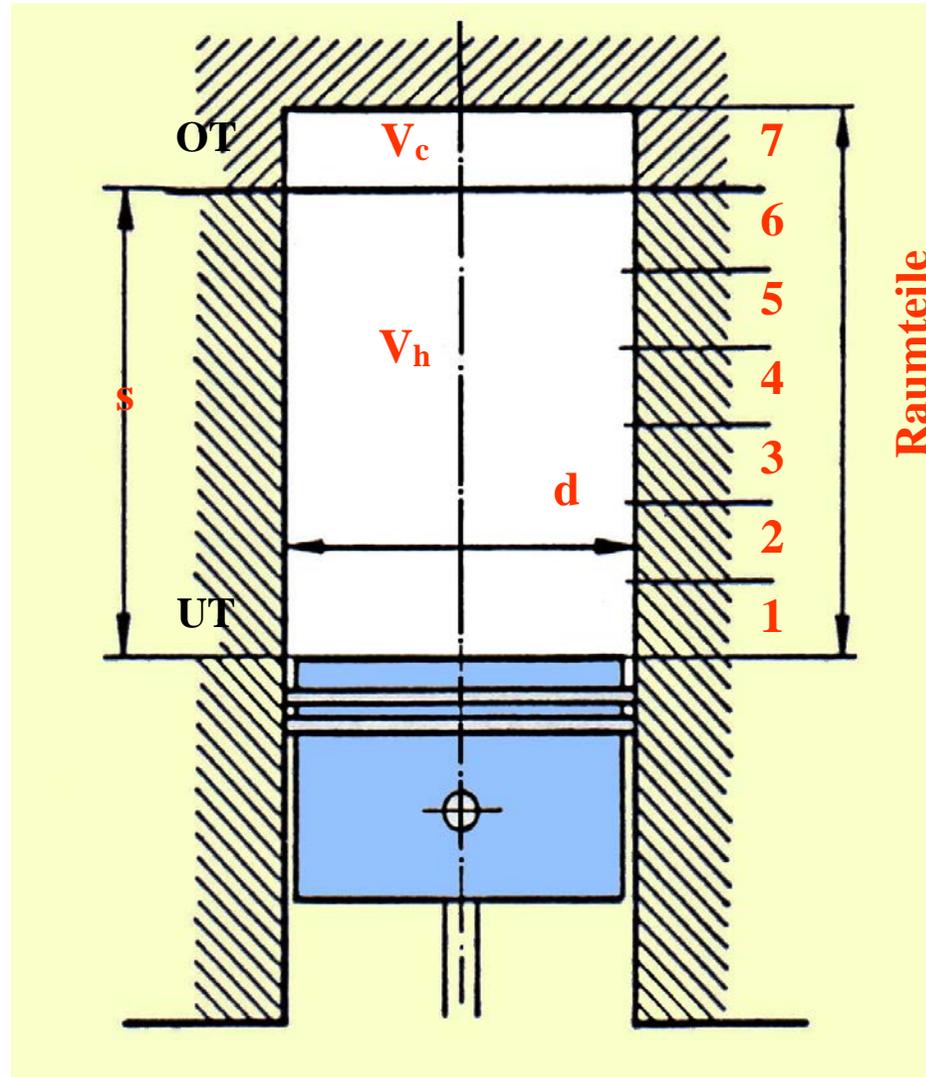
V_h = Hubraum

s = Zylinderhub

d = Zylinderdurchmesser

Verdichtungsverhältnis

Verdichtungs-
verhältnis ε

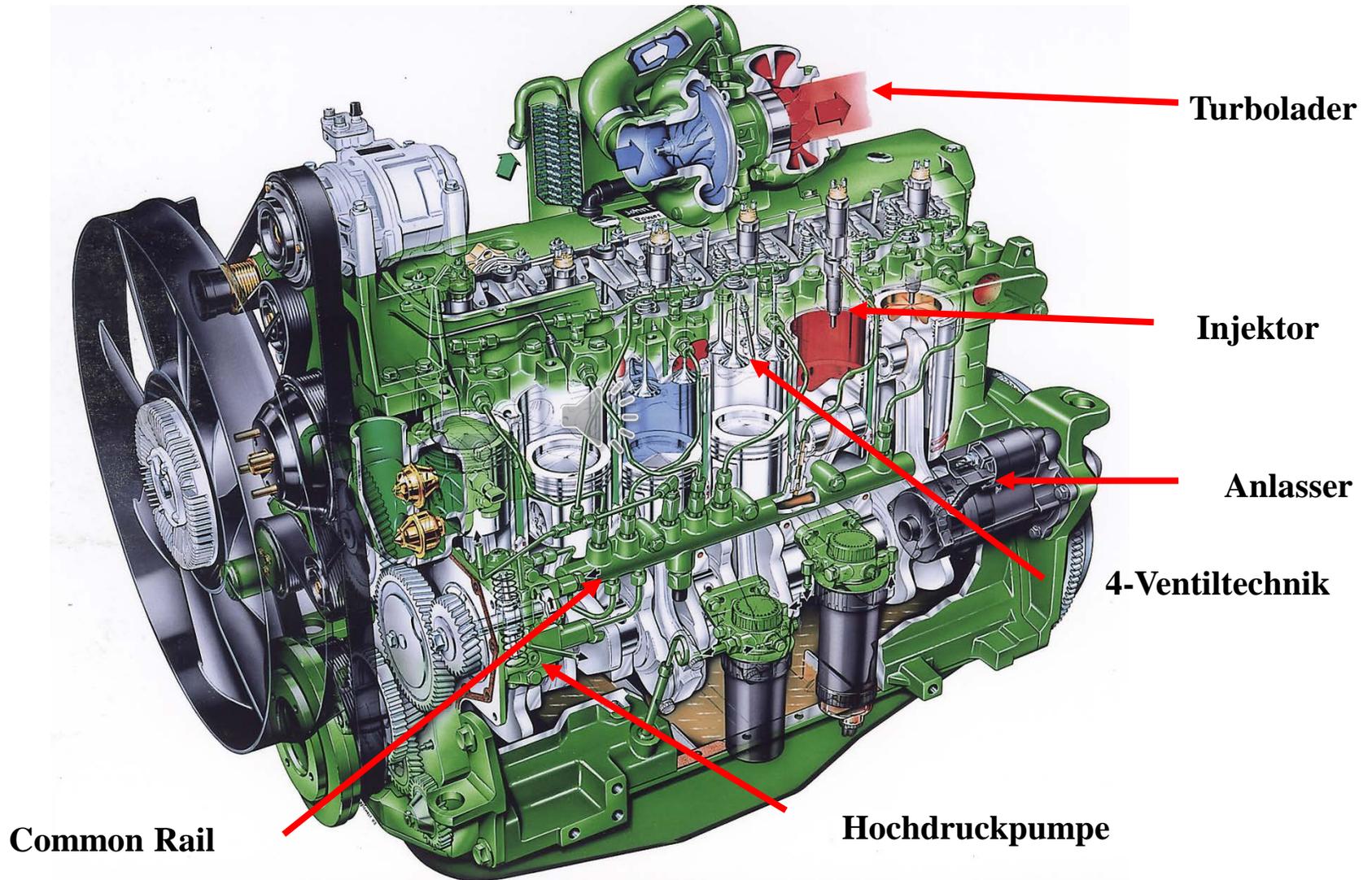


Der Zylinderraum besteht aus dem Hubraum V_h und dem Verdichtungsraum V_c . Das Verdichtungsverhältnis ε sagt aus, wie viel mal größer der Zylinderraum als der Verdichtungsraum ist, z. B. 7 mal, also $\varepsilon = 7 : 1$

$$\varepsilon = \frac{V_H + V_K}{V_K}$$

Je höher das Verdichtungsverhältnis, desto größer der Wirkungsgrad, die thermischen Verluste steigen aber gleichzeitig an

4V-CommonRail

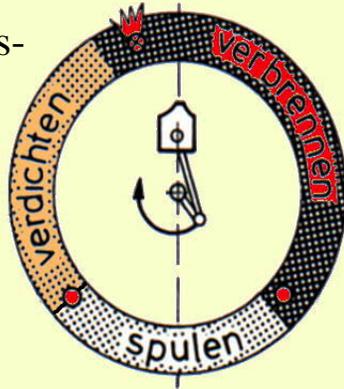


2-Takt-Motor

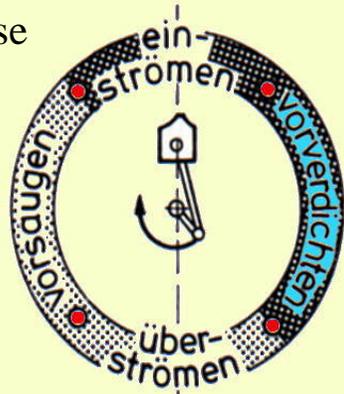
[Film](#)

2 -Takt-Motor

Verbrennungsraum



Kurbelgehäuse



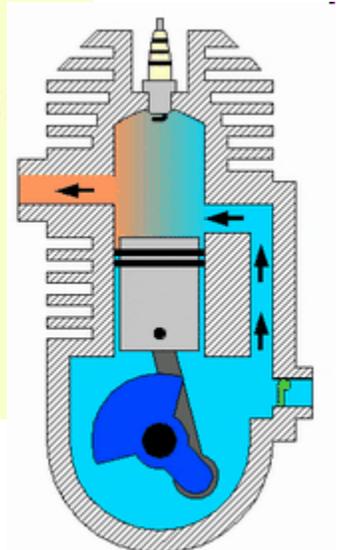
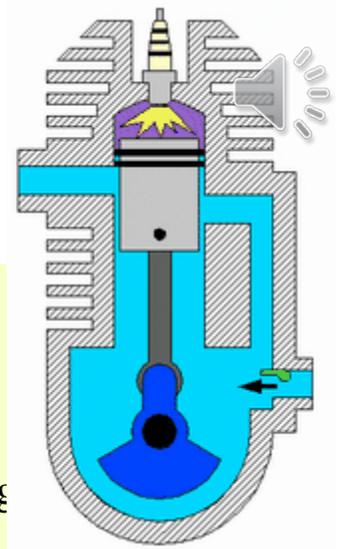
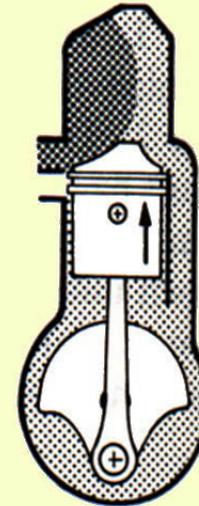
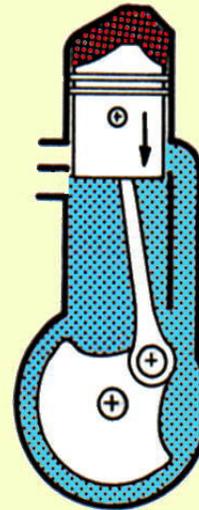
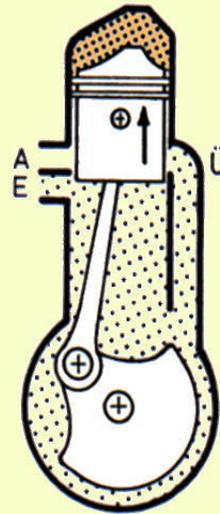
1. Takt

2. Takt

Verdichtungshub

Arbeitshub

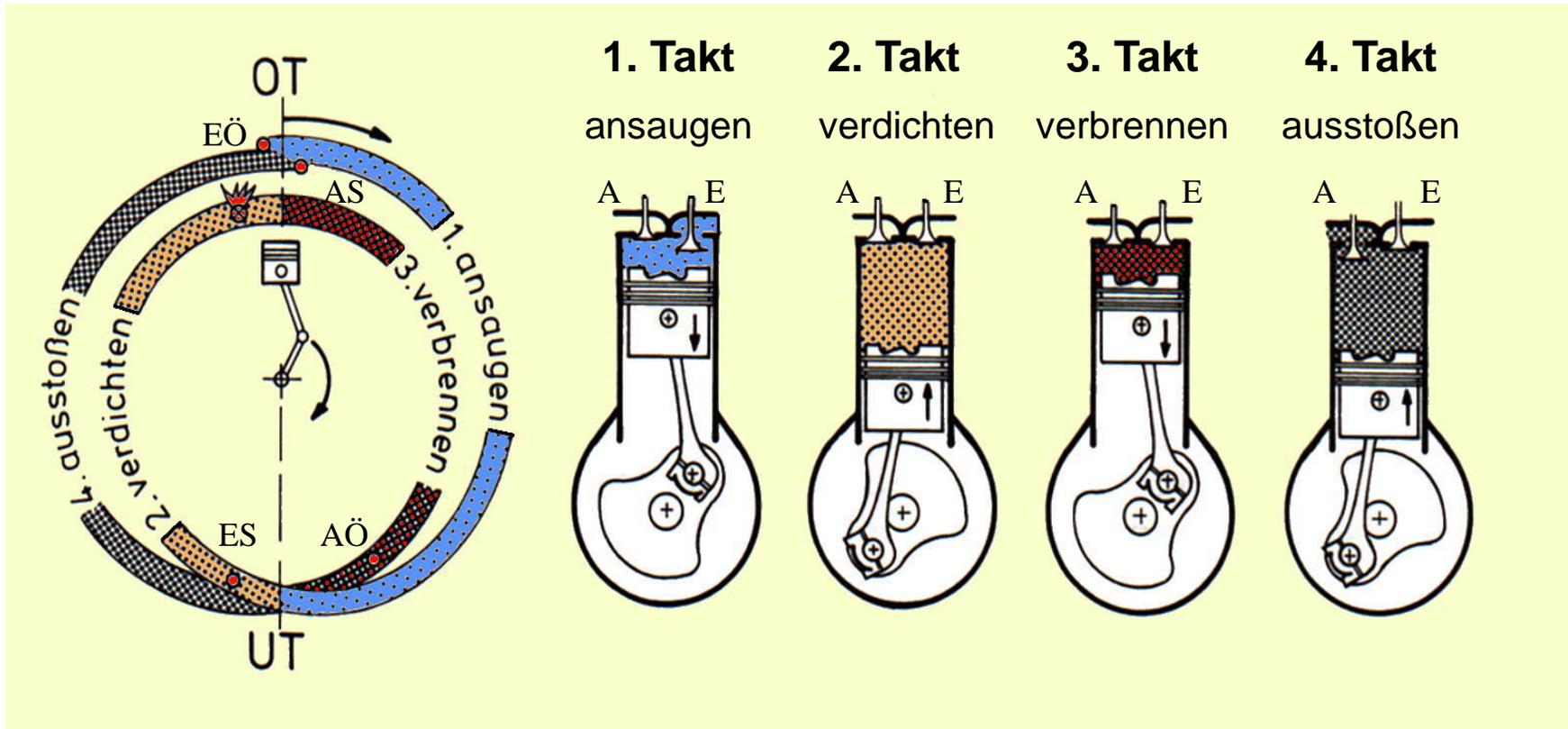
Ladung



4-Takt-Motor - Arbeitsprinzip

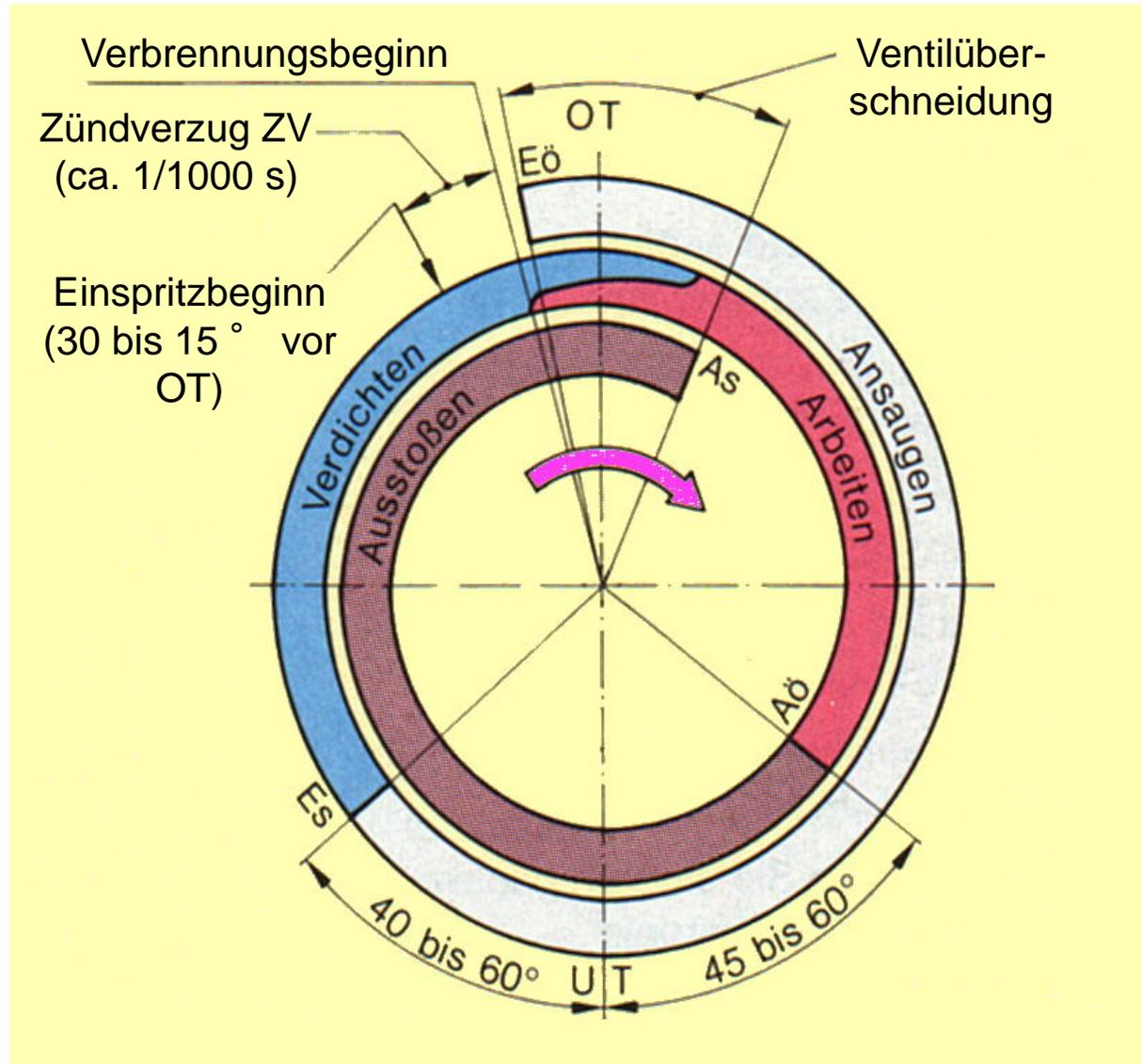
Film

4 -Takt-Motor



Zwei Umdrehungen der Kurbelwelle ein Arbeitsspiel

Arbeitstakte - 4-Takt



Dieselmotorkraftstoff - Eigenschaften

Film

Die Gemischbildung beim Dieselmotor muss innerhalb **kürzester Zeit** ablaufen. Hierzu ist je nach Verbrennungsverfahren ein **Luftwirbel** und eine **feinzerstäubende Einspritzdüse** notwendig. Nur dann ist eine **schnelle Verdampfung** des Kraftstoffes und eine **Vermischung mit der Ansaugluft** optimal möglich.

Wichtige Faktoren hierzu sind: a.) Luftverhältnis λ (Luftzahl) und b.) Zündwilligkeit des Kraftstoffes

zu a.) **Luftverhältnis λ** (Luftzahl)

Luftverhältnis λ = Sauerstoff geliefert / Sauerstoff verbrannt

Bsp.: **Luftverhältnis $\lambda = 1$** - verbrauchter Sauerstoff = gelieferter Sauerstoff

Bsp.: **Luftverhältnis $\lambda = 2$** - doppelt soviel Sauerstoff geliefert, als verbrannt

Definition:

Verhältnis der tatsächlich im Zylinder verfügbaren Luftmenge, zur Mindestluftmenge, die zur vollständigen Verbrennung notwendig ist.

Dieselmotor: $\lambda = 1,3 - 2$ bei Last, $\lambda = 5 - 10$ bei Leerlauf

Der Dieselmotor arbeitet generell mit Luftüberschuß, damit eine vollständige Verbrennung trotz der kurzen Zeit für die Gemischbildung möglich ist.



Eigenschaften Kraftstoff

zu b.) Zündwilligkeit des Kraftstoffes

Die Dieseldieselkraftstoffe bestehen aus einer Vielzahl einzelner Kohlenwasserstoffe, die etwa zwischen 180° - 360° C siedend.

Der Dieseldieselkraftstoff muß sich nach dem Einspritzen in die heiße komprimierte Luft im Brennraum nach möglichst kurzer Zeit (Zündverzug) von selbst entzünden. Ein Maß für die Zündwilligkeit liefert die **Cetanzahl (CZ)**. Je höher diese Zahl, umso leichter entzündet sich der Kraftstoff.

Charakteristik Dieselmotor: Innere Gemischbildung - Selbstzündung

Bsp.: Cetanzahl (CZ) 55

55 Vol. % Cetan (sehr zündwillig)

45 Vol. % Methylnaphtalin (sehr zündträge)

Dieseldiesel ist genauso zündwillig, wie eine Vergleichsmischung aus obigen Komponenten.

Winterdieseldiesel (CZ) 55

Sommerdieseldiesel (CZ) 45



Pfeil = Text in Notizen

Arbeitstakte Dieselmotor detailliert

1. Takt (ansaugen):

- Durch Abwärtsgehen des Kolbens (von OT nach UT) wird ungedrosselt reine, gefilterte Luft angesaugt.
- Einströmende Luft kühlt Kolben und Zylinder, wobei sie auf **70 bis 100 ° C** erwärmt wird.
- Ventilüberschneidung, Abgase werden restlos ausgestoßen.
- Aufladung unproblematisch, da durch die reine Luft keine Gefahr der Selbstentzündung besteht.

2. Takt (verdichten):

- Aus- und Einlaßventil geschlossen (EV schließt **35° bis 60° KW nach UT**)
- Verdichtungsverhältnis ε **15 bis 23 : 1**
- Verdichtungsendtemperatur **600 - 900° C**
- Verdichtungsenddruck **30 - 55 bar**
- Kurz vor Ende des Verdichtungstaktes wird durch das fein zerstäubte Einspritzen des Kraftstoffes (**20° bis 32° KW vor OT**, Einspritzdruck bis über **2000 bar**) in die heiße Luft die Verbrennung eingeleitet. Bevor die Selbstentzündung einsetzen kann, muss der eingespritzte Kraftstoff zuerst verdampfen und sich mit der Luft vermischen.
- **Zündverzug des Kraftstoffes 1/1000 s**
- Kalter Motor, schlechtere Verdampfung, längerer Zündverzug ➤ „**Nageln**“ des Dieselmotors

Arbeitstakte Dieselmotor detailliert

3. Takt (verbrennen):

- Alle Ventile sind geschlossen, der Kolben bewegt sich von OT nach UT.
- Verbrennung setzt sich bis ca. **60° KW** nach **OT** fort.
- Verbrennungstemperatur **2000°** bis **2500° C**.
- Verbrennungshöchstdruck **60 - 100 bar**. Dadurch wird die Arbeitsverrichtung des Kolbens erreicht ➤ Gewichtskraft auf den **Kolben K_F 100 000 N - ca. 10 t**.
- **Gleichraumverbrennung** ➤ Verbrennung bei OT (siehe p-V-Diagramm)
- **Gleichdruckverbrennung** ➤ Durch zeitlich gestreckten Einspritzvorgang **20°** bis **40° KW** wird erreicht, daß der Verbrennungsdruck und somit die Kolbenkraft nicht noch mehr ansteigt, sondern noch einige Grad KW nach OT auf gleichem Niveau gehalten wird.

4. Takt (ausstoßen):

- Auslaßventil öffnet kurz vor UT.
- Abgase strömen unter einem **Überdruck** von **0,5 bis 1 bar** in die Auspuffanlage. Unterstützung durch die Aufwärtsbewegung des Kolbens.
- Abgastemperatur ca. **600° C** unter **Vollast**, ca. **250° C** bei **Teillast**.

Vor- und Nachteile der Arbeitsverfahren

2 Takt – 4 Takt

Vor- und Nachteile des 2-Takt-Verfahrens:

Vorteile:

- einfacher Aufbau
- billig
- geringes Leistungsgewicht
- große Hubraumleistung
- lageunabhängig

Nachteile:

- schlechter Füllungsgrad
- hoher Kraftstoffverbrauch
- schlechter Leerlauf
- laut, hochtourig
- verbranntes Öl in den Abgasen

Vor- und Nachteile des 4-Takt-Verfahrens:

Vorteile:

- geringer Kraftstoffverbrauch
- guter Füllungsgrad
- guter Leerlauf
- geringer Schadstoffgehalt
- guter Momentverlauf

Nachteile:

- aufwendige Konstruktion
- teuer
- höhere Ungleichförmigkeit
- hohe Reibung (Ventiltrieb)
- hohes Leistungsgewicht

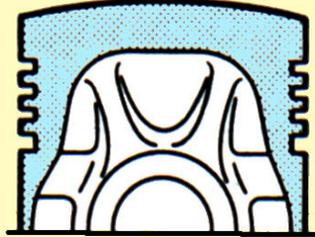
Aufgaben einer Kraftstoffanlage

Eine Kraftstoffanlage soll:

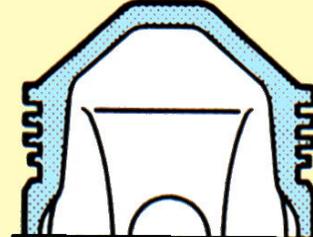
- 1.) Kraftstoff fördern vom Tank bis in den Zylinder und dabei den Kraftstoff so aufbereiten, dass er optimal verbrannt werden kann.
- 2.) Den Kraftstoff zum richtigen Zeitpunkt bereitstellen
- 3.) Je nach Leistungsbedarf die passende Menge Kraftstoff zuteilen

Kolbenbauformen

Zweitakt-Motor



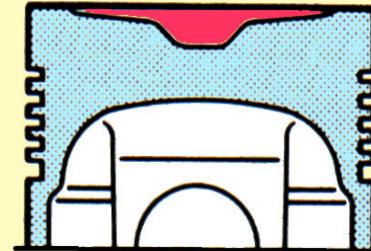
Zweitakt-Motor



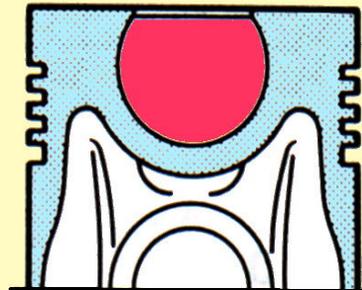
Zweitakt-Motor



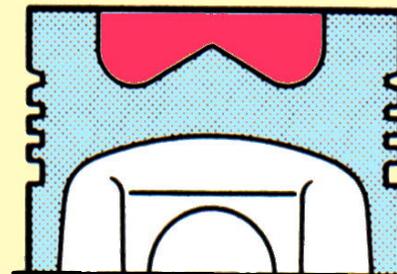
Vorkammer-Motor



Direkteinspritzer



Direkteinspritzer



M-Verfahren

Luftverbrauch/ Schadstoffe/ Umweltbelastung

Wie viel Luft benötigt ein Dieselmotor?

Annahme:

- » 2000 U/min
- » 4 l Hubraum bei 4 Zylinder = 1 l/ Zylinder
- » 2 Kurbelumdrehungen = ein volles Arbeitspiel = 1 x Ansaugen

Berechnung:

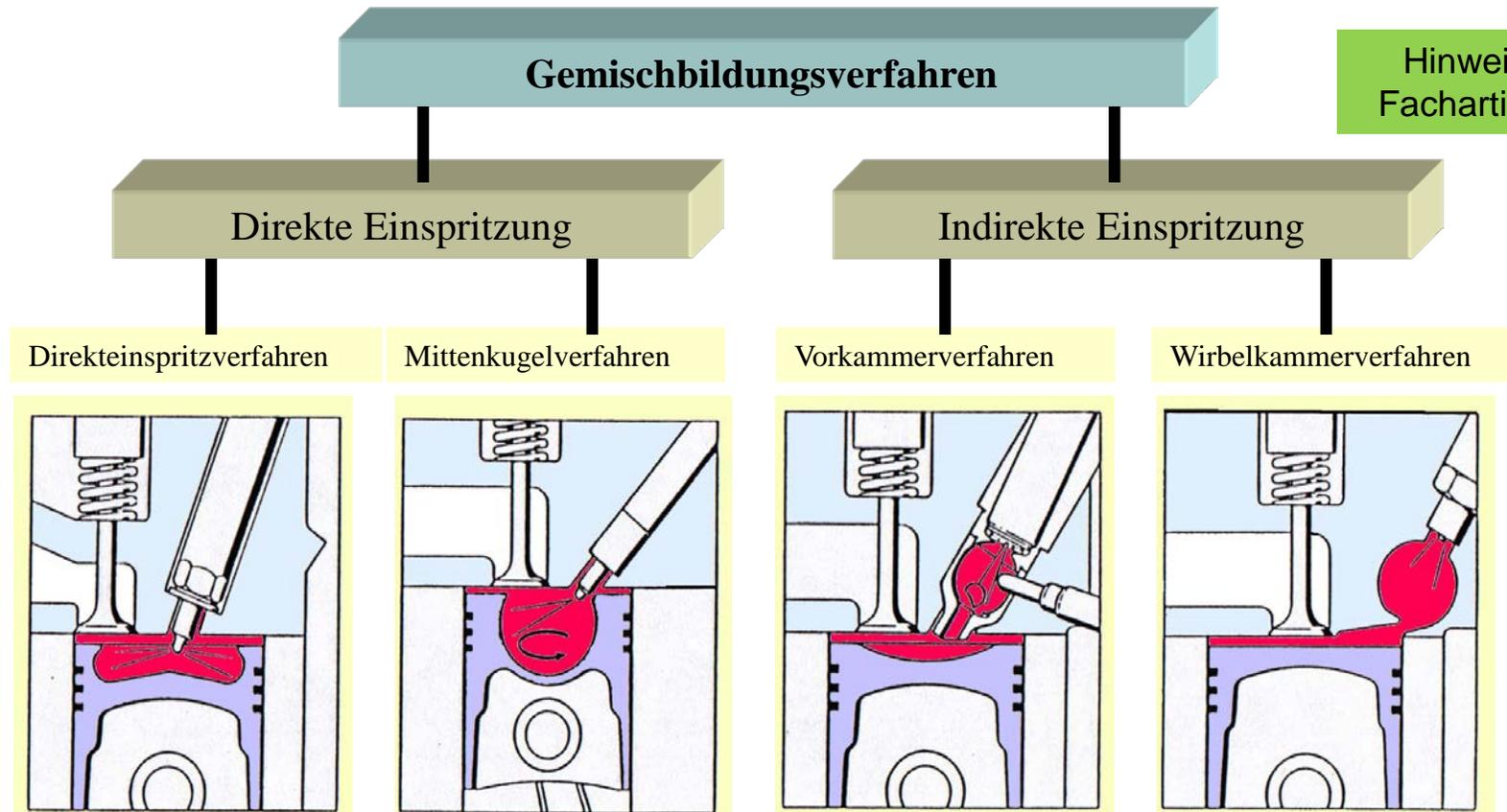
$$2000 \text{ U/min} / 2 \text{ Kurbelumdrehungen pro Spiel} \times 4 \text{ Zylinder} \\ = 4000 \text{ l/min}$$

$$\times \text{Faktor } 1,5 \text{ bis } 2 \text{ durch Turbolader} = 6000 - 8000 \text{ l/min}$$

Luftzusammensetzung

- » 78% Stickstoff
- » 21% Sauerstoff
- » 1% Spurengase

Verbrennungs- und Gemischbildungsverfahren

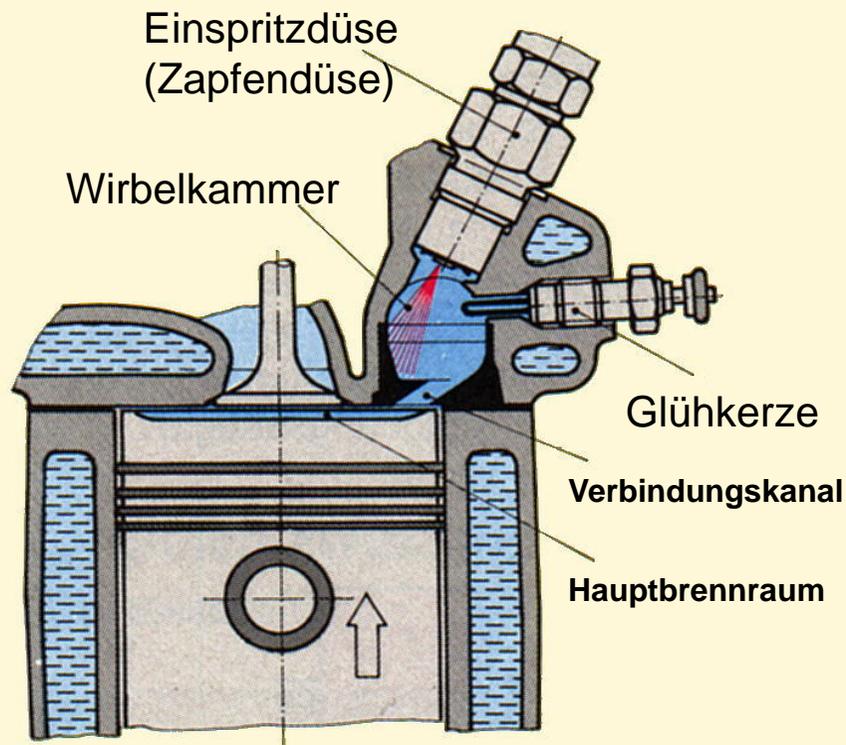


Wirbelkammer- Vorkammermotoren



Charakteristik

- Einfache Zapfendüse
- Düsenöffnungsdruck 100–120 bar
- Geringer Einspritzdruck (unter 500 bar)
- Weites Verdichtungsverhältnis
- Geringer Verdichtungsdruck
- Kraftstoffunempfindlich
- Starthilfe erforderlich
- Kraftstoffverbrauch hoch
- Abgase jenseits jeder heutigen Norm



Wirbelkammerverfahren

Bei diesem Verbrennungsverfahren wird die angesaugte Luft beim Verdichten in einen kleinen kugelförmigen Brennraum im Zylinderkopf gepresst. Bei kaltem Motor wird mittels einer Glühkerze dieser kleine Raum (die Wirbelkammer) vorgewärmt. Dies verhindert, dass die verdichtete Luft beim Starten zu schnell ihre Wärme an die Kammerwände abgibt und, damit der eingespritzte Kraftstoff an den kalten Wänden kondensiert. Nur durch das Vorwärmen (Vorglühen) der Wirbelkammer wird erreicht, dass bei kaltem Motor und ggf. niedrigen Außentemperaturen der Motor sicher startet. Nach dem Verdichten wird in die Wirbelkammer durch eine Zapfendüse mit nur einem Loch der Kraftstoff bei einem Druck von ca. 125 bar eingespritzt. Er vermischt sich mit der heißen Luft und entzündet sich an ihr. Durch die Verbrennung gibt es einen Druckanstieg. Dieser bewirkt, dass sich das Kraftstoff-Luftgemisch ausdehnt u. so sich der Druck durch den Schusskanal zum Kolben hin ausdehnen kann. Dadurch wird der Kolben nach unten getrieben.

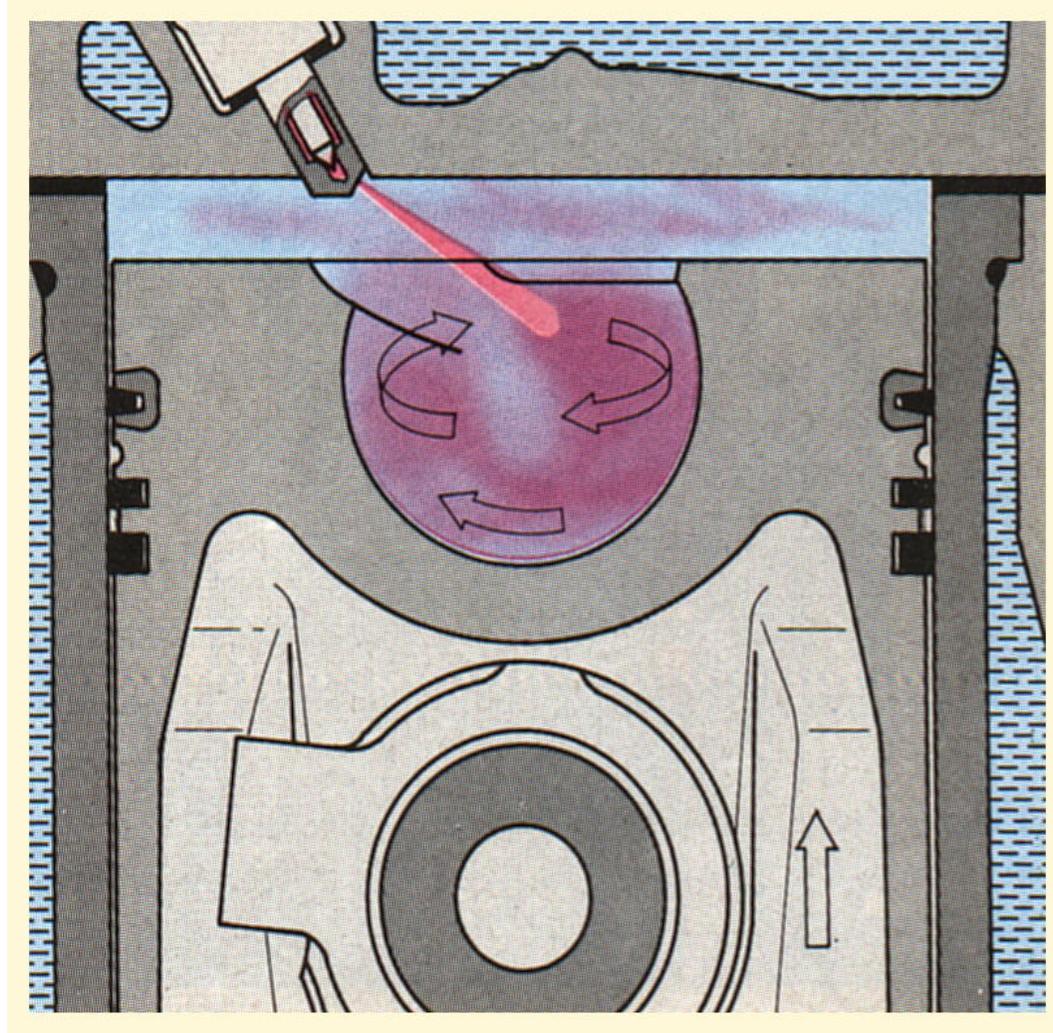
- 1.) Das System hat den Vorteil auch relativ schlechte Kraftstoffqualitäten verarbeiten zu können (lange Verdampfungszeiten durch die Wirbelkammer).
- 2.) Niedrige Verdichtungsdrücke und weichere Verbrennung sorgen für einen „leiseren Motor“ und geringere Belastung der Triebwerksteile (alles was sich im Motor dreht).
- 3.) Die Leistung ist durch Aufladung des Motors nur schwer steigerbar (Aufladung durch Abgasturbo-Lader und ähnliches, was zusätzlich Luft zum Zylinder bringt).

Vorkammer- Wirbelkammerverfahren

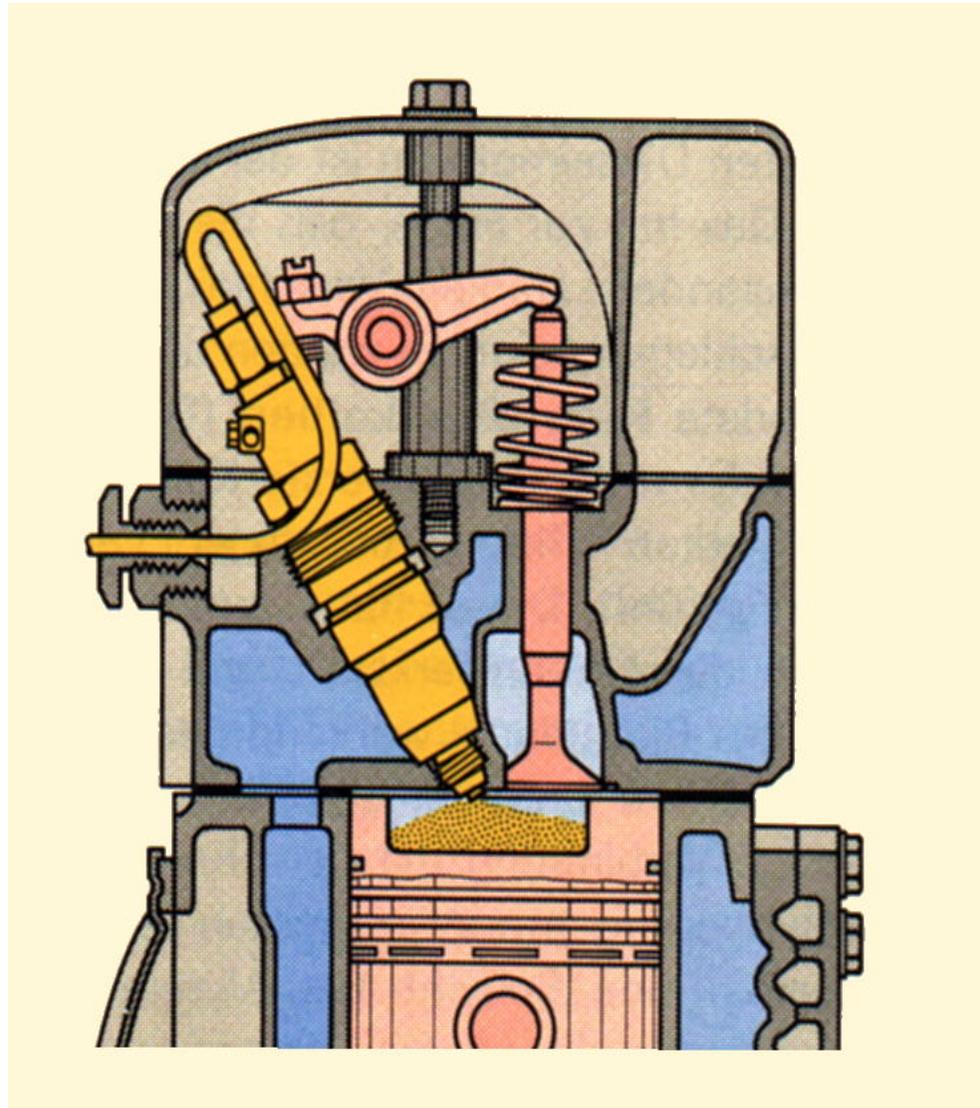
Ähnlich arbeitet auch das Vorkammerverfahren. Hierbei wird auch ein Teil der verdichteten Luft in einen Raum im Zylinderkopf gepresst. In diesen Raum wird auch der Kraftstoff eingespritzt und so die Verbrennung eingeleitet. Durch den Druckanstieg wird nun das zum Teil verbrannte Gemisch durch Bohrungen am Ende der Vorkammer wieder in den Zylinder gedrückt, vermischt sich da mit der restlichen Verbrennungsluft und lässt so die Hauptverbrennung stattfinden.

Der Hauptunterschied zwischen Vor- und Wirbelkammer besteht darin, dass bei dem Vorkammerverfahren die Luft und der Kraftstoff durch Thermik und ein Prallblech miteinander vermischt werden und dass die Vorkammer zum Zylinder hin mehrere kleine Bohrungen hat, durch die das entzündete Gemisch in den Zylinder gelangt. Der Wirbelkammer Motor hingegen hat nur den großen Schusskanal und die verdichtete Luft wird durch die Bauform der Kammer und des Schusskanals schon in eine Drehbewegung versetzt (verwirbelt). Ansonsten gelten für den Wirbelkammer Motor die gleichen Punkte wie für den Vorkammer Motor.

Mittelkugelverfahren (MAN)



Direkteinspritzverfahren



Direkteinspritzung

Das heute gebräuchlichste Verfahren ist die Direkteinspritzung.

Es gibt hier keine Räume im Zylinderkopf mehr sondern die Einspritzdüse bringt den Kraftstoff direkt in den Verbrennungsraum.

Hierbei gibt es natürlich auch die verschiedensten Möglichkeiten die Luft zu verwirbeln und optimal mit dem Kraftstoff zu vermischen.

Zum einen werden die Kolbenböden (unten) mit verschiedensten Mulden versehen und zum anderen spritzt man den Kraftstoff nicht mehr durch nur ein Loch in den Zylinder, sondern über mehrere kleine Löcher. Weiter erhöht man auch den Einspritzdruck sowie den Verdichtungsdruck. Durch den höheren Einspritzdruck und mehrere kleine Löcher, erreicht man kleinere Kraftstofftröpfchen, also eine bessere Vermischung und Anbindung mit der Luft.

Durch die Erhöhung des Verdichtungsdruckes bekommt man auch eine höhere Verdichtungstemperatur (Zündtemperatur). Aufgrund dessen braucht man dann auch

keine Glühkerze mehr um den Motor zu starten. Allerdings funktioniert dies nur sicher bis zu einer bestimmten Lufttemperatur. Bei Minusgraden muss man die Ansaugluft insgesamt anwärmen. Dies geschieht im Ansaugkanal vor den Zylindern,

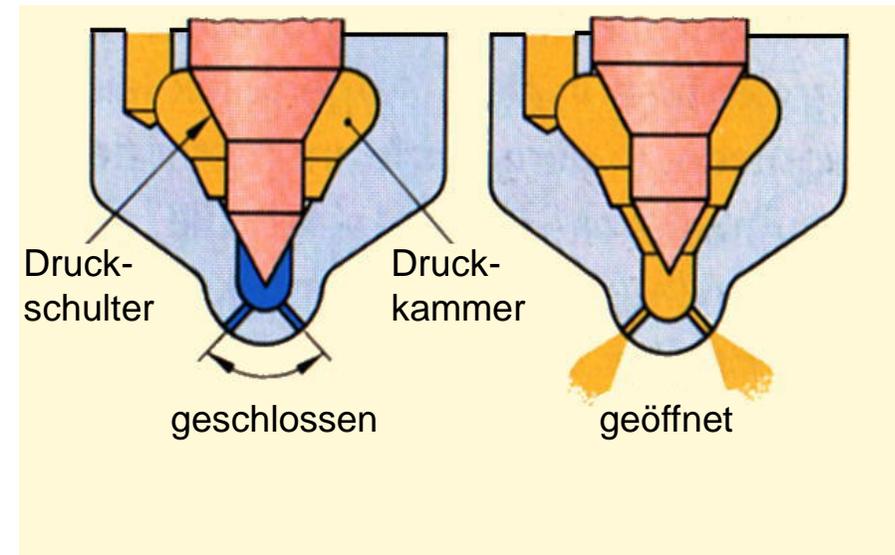
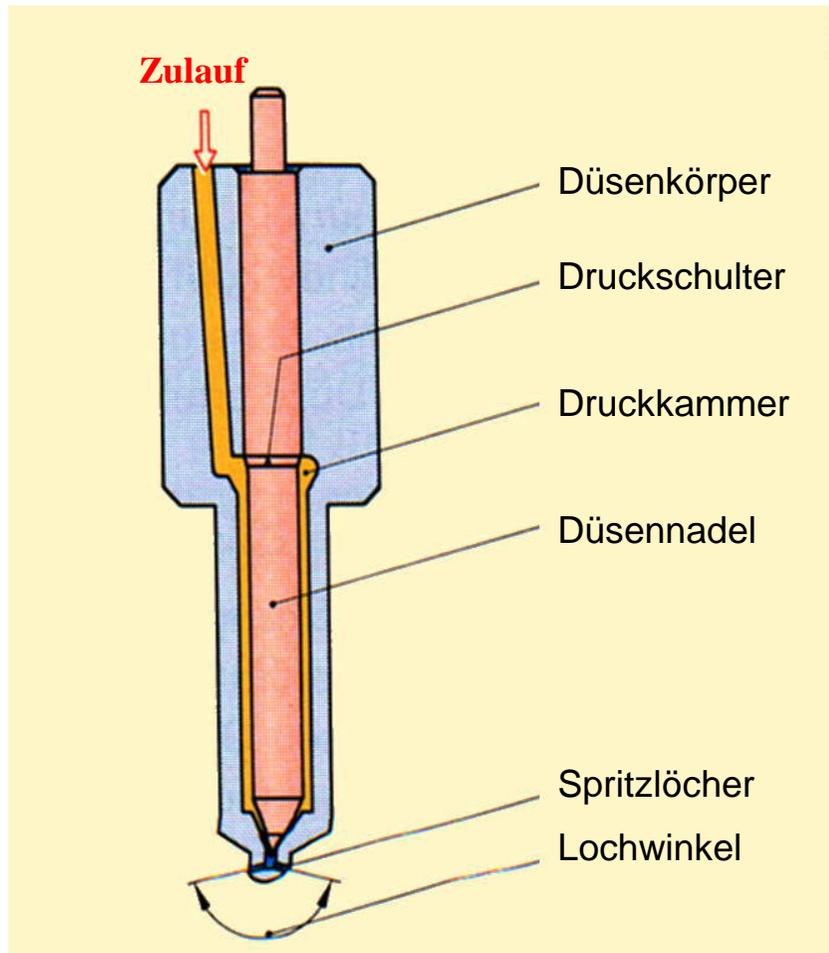
durch Flammkerzen, die Kraftstoff verbrennen, oder durch Heizspiralen.

Auf dem System Direkteinspritzer basieren auch die nachfolgend dargestellten Neuerungen.

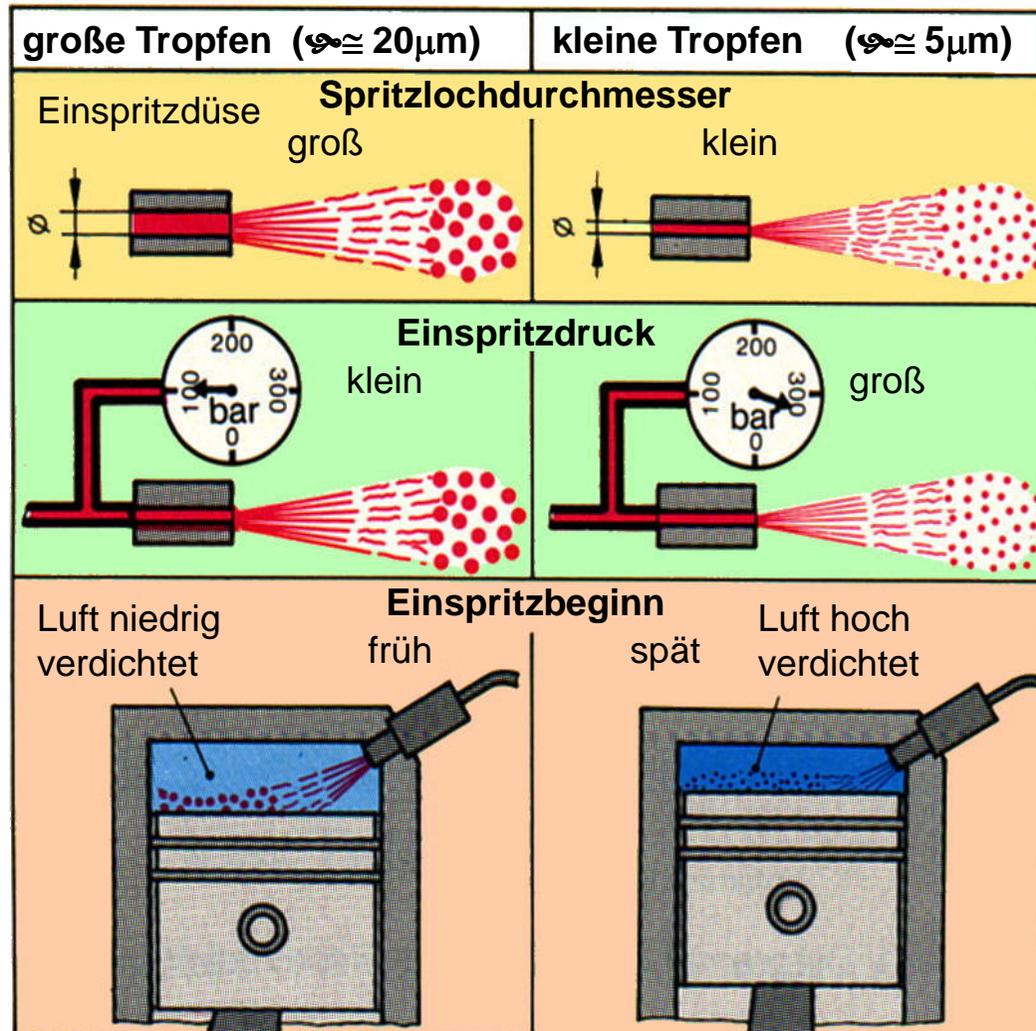


	Direkteinspritzverfahren	Mittenkugelfverfahren	Vorkammervverfahren	Wirbelkammervverfahren
Anwendung :	Traktoren, LKW, PKW	LKW	ältere Traktoren, ältere PKW	
Düsenöffnungsdruck :	200 bis 250 bar	ca. 175 bar		100 - 120 bar
Einspritzdüse :	Mehrlochdüse (bis 12 Bohrungen)			Zapfendüse
Kraftstoffeigenschaften :	kraftstoffempfindlich			kraftstoffunempfindlich
Verbrennungsablauf	schnell, hart, laut	langsamer, andauernd		langsam, leise
Beanspruchung (z. B.: Kurbeltrieb) :	hoch	geringer		gering
Spez. Kraftstoffver- brauch [g/kWh] :	gering			hoch
Nenn Drehzahl :	bis 2500 U/min.			bis 5000 U/min.
Verdichtungsverhältnis :	15 bis 18 : 1			bis 23 : 1
Starthilfe :	nicht unbedingt erforderlich			unbedingt erforderlich

Mehrlochdüse



Einflusskriterien Tropfengröße



Aktuelle Einspritzdüsen

Einspritzdüsen werden eingesetzt, um den Kraftstoff präzise zu zerstäuben und im Brennraum zu verteilen, sodass die Verbrennung optimal abläuft. Gleichzeitig dichtet die Düse das Kraftstoffsystem gegen den Brennraum zuverlässig ab.

Technische Merkmale

- » Das Führungsspiel beweglicher Teile liegt bei 0,002 mm.
- » Der Kraftstoff wird mit einem Druck von bis zu 2 000 bar in den Brennraum eingespritzt.

Die Einspritzmenge variiert zwischen 1 mm³ und 350 mm³ (diese Menge wird mit 2 000 km/h durch eine 0,25 mm² große Öffnung gedrückt).

Die Einspritzung erfolgt bedeutend schneller als ein Augenblinzeln.

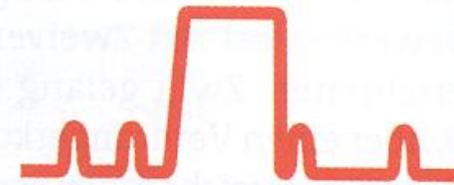


2 Pumpedüse und Common Rail

3. Generation Common Rail Piezo-Inline-Injektor

Kundennutzen

- Emissionsverbesserung 15 - 20 %
- Gewichtsreduzierung um 165 g
- höhere Düsenadelgeschwindigkeit:
1,3 m/s
- Genauere Zumessung von Kleinst-
mengen, kleinere Toleranzen



Mehrfacheinspritzung

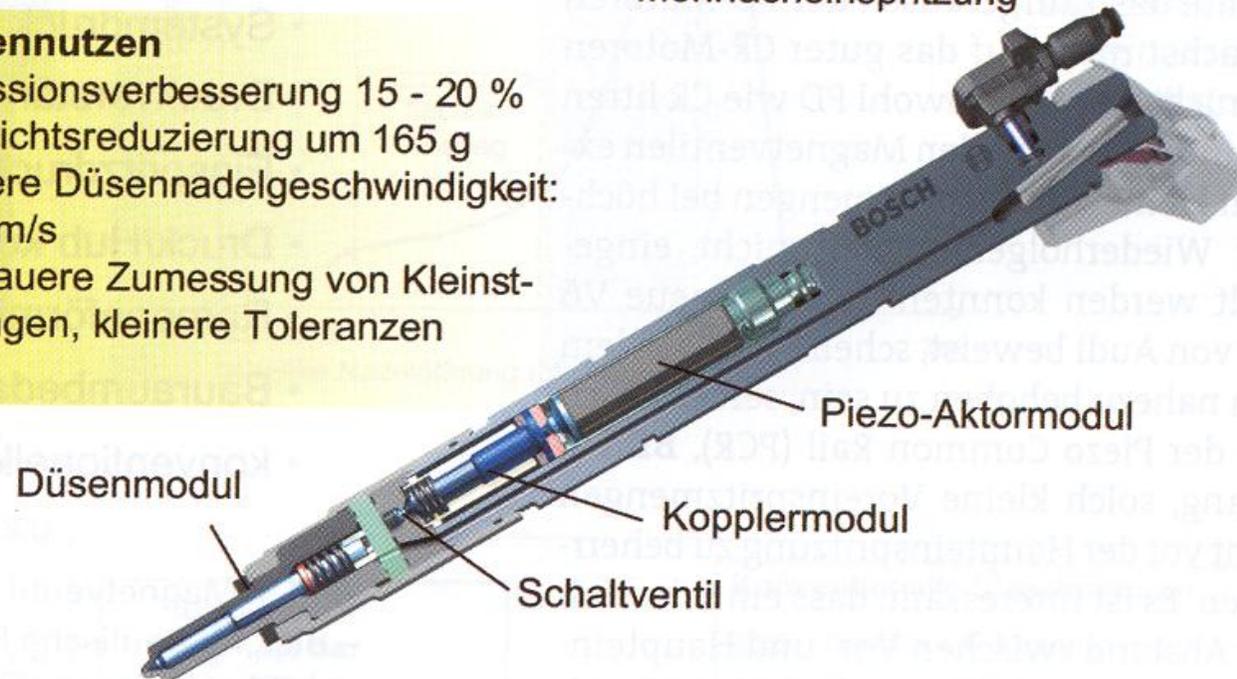
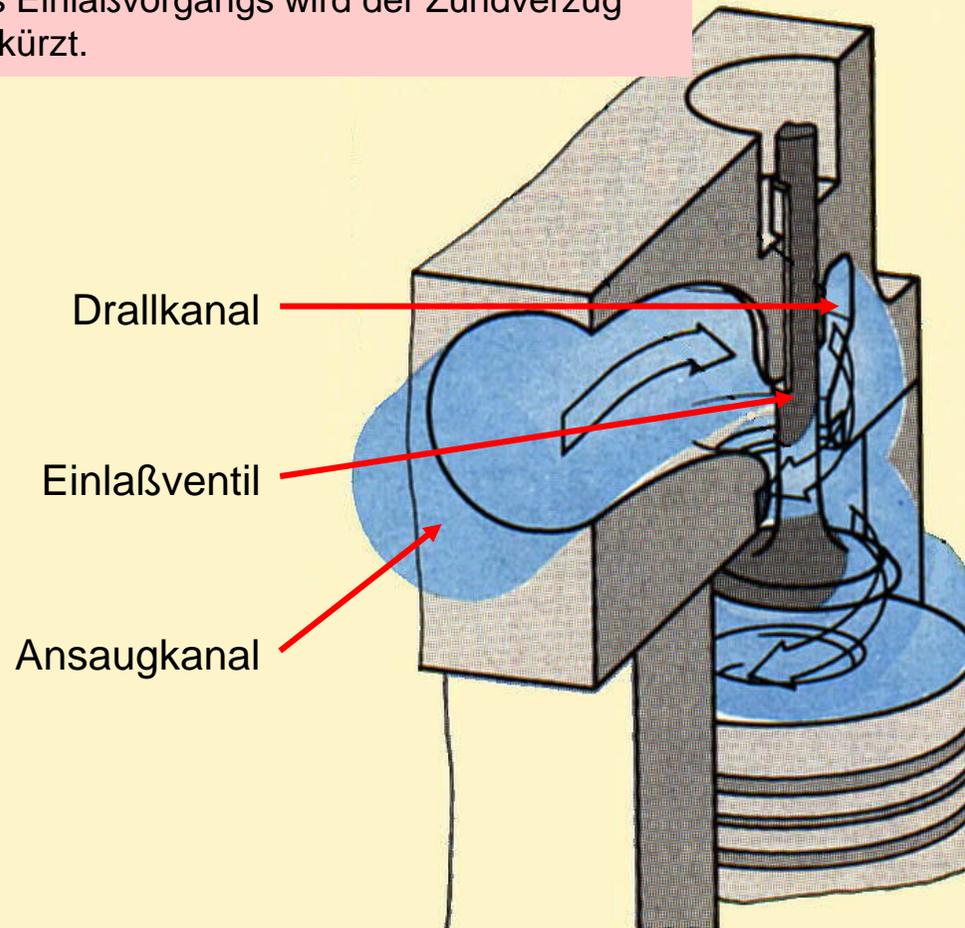


Bild 1: Dritte Generation der CR von Bosch mit Inline- Piezoaktor,
wie sie zunächst für den Audi V6 TDI geliefert wurde

Drallkanal zur Unterstützung der Luftverwirbelung

Durch eine hohe Luftgeschwindigkeit und eine intensive Luftverwirbelung während des Einlaßvorgangs wird der Zündverzug verkürzt.



Weitere Faktoren, die sich positiv auf die Gemischbildung auswirken:

- hoher Einspritzdruck
- Einspritzdüse mit hoher Lochzahl
- hohe Temperatur im Brennraum
- besondere Brennraumgestaltung