



Kfz – Mechanik

Notizen

Jan Unger

Version: 28. Juni 2022

Quelle

Marc Limburg

Zusammenfassung

»Es gibt Abenteuer, die man sich besser erspart. Eine Deutschlandtour mit einem Elektroauto gehört dazu.«

– Dohmen, Frank, Hage, Simon

(Chaos an der Tanke, in Der Spiegel 26/26.6.2020)

Bücher:

- Motormanagement Sensoren, Schneehage [8].
- Techn. Mathe, Bell u. a. [3].
- Formelsammlung, Bell, Elbl und Schüler [1].
- Tabellenbuch, Bell, Elbl und Schüler [2].
- Prüfungsfragen (VOGEL), Schlüter und Deussen [6].
- Fachkunde Kfz-Technik, Brand u. a. [4].

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen Verbrennungsmotor	1
1.1	Motorbauformen	1
1.2	Hubraum - Brennraum - Verdichtungsraum	1
1.3	Arbeitsweise	1
1.4	Ansaugen	1
1.4.1	Luftdruck	2
1.4.2	Absolutdruck	2
1.4.3	Relativer Druck	2
1.4.4	Zusammensetzung der Luft (Prüfung)	2
1.5	Verdichten	2
1.5.1	Hoch verdichtete Motoren	2
1.5.2	Verdichtungsverhältnis	3
1.5.3	Wärme	3
1.5.4	Wärmeabführung	3
1.5.5	Verdichten z. B. 10:1	3
1.5.6	Verdichtungsendtemperatur	3
1.5.7	Entzündungstemperatur Diesel	3
1.5.8	Zündverzug	4
1.5.9	Thermodynamischer Kreisprozess (keine Prüfung)	4
1.5.10	Grad Celsius	4
1.5.11	Aggregatzustand	4
1.5.12	Kelvin	5
1.6	Arbeiten	5
1.6.1	Verbrennungstemperatur	5
1.6.2	Kolbenmaterial	5
1.6.3	Thermische Belastung Kolben	5
1.6.4	Kolbenfläche berechnen	6
1.6.5	Kolbenwärme abführen	6
1.6.6	Kolbenkippen Ursache	6
1.7	Ausstoßen	6
1.7.1	Abgastemperatur	6
1.7.2	Wirkungsgrad (Effizienz)	7
1.7.3	Wie bewegt sich die Kurbelwelle?	7
1.7.4	Hydrodynamischer Schmierkeil	7
1.8	Kurbelgehäusearten	8
1.9	Zylinderkopfdichtung	8
1.10	Lösung - Grundlagen Verbrennungsmotor	9

2	Motorsteuerung	13
2.1	Was ist ein Untengesteuerter Motor?	13
2.1.1	Untengesteuerter Motor	13
2.1.2	Obengesteuerter Motor	13
2.2	Anordnung der Nockenwelle (Steuerungsbauarten)	13
2.2.1	sv-Motor	14
2.2.2	ohv-Motor	14
2.2.3	ohc-Motor	14
2.2.4	dohc-Motor	14
2.2.5	cih-Motor	14
2.3	Arten von Nockenwellenantriebe	14
2.4	Nenne Zahnriemen Merkmale (trocken laufend)	15
2.5	Ölbadzahnriemen Eigenschaften (nass laufend)	15
2.6	Steuerkette Merkmale	15
2.7	Stirnradantrieb	16
2.8	Königswelle	16
2.9	Unterschied - Steuern und Regeln	16
2.9.1	Steuern	16
2.9.2	Regeln	16
2.10	Nockenwellen - Herstellungsmöglichkeiten	17
2.10.1	Gegossene Nockenwelle	17
2.10.2	Gebaute Nockenwelle	17
2.11	Nockenformen	17
2.11.1	spitzer Nocken (tagenden Nocken)	18
2.11.2	steiler Nocken (scharfer Nocken, Kreisbogen Nocken)	18
2.11.3	unsymmetrischer Nocken	18
2.12	Arten von Ventilbetätigung	18
2.12.1	Rollenschlepphebel, Schlepphebel, Schwinghebel	19
2.12.2	Kipphebel	19
2.12.3	direkt	19
2.13	Welche Beanspruchung ist das Ventil ausgesetzt?	19
2.13.1	Mechanische Beanspruchung des Ventils	19
2.13.2	Chemische Beanspruchung	20
2.13.3	Thermische Belastung	20
2.14	Ventilspielausgleich	20
2.14.1	definiertes Ventilspiel	20
2.14.2	Hydraulischer Ventilspielausgleich	21
2.15	Drehzahlverhältnis zwischen Kurbelwelle zu Nockenwelle?	22
2.16	Was steuert die Motorsteuerung?	22
2.17	Dreiventiltechnik mit zwei Zündkerzen	22
2.17.1	Zusammenfassung	22
2.17.2	Warum sind das zwei Einlassventile und ein Auslassventil?	23
2.17.3	Zylinderspülung bei Ventilüberschneidung	23
2.17.4	Nachladeeffekt beim Ansaugen	24
2.17.5	Warum zwei Zündkerzen?	24
2.17.6	Innermotorisch entstehen geringere Schadstoffe	24

2.17.7	Wann entsteht NOx?	24
2.17.8	Zusammenhang zwischen HC und CO vs. NOx	25
2.17.9	Schadstoffe	25
2.17.10	Was ist AGR?	25
2.17.11	Wie entsteht Ruß?	26
2.17.12	Was fördert die Klopfneigung?	26
2.17.13	Ein Auslassventil - ein Abgasrohr	26
2.18	Lösung - Motorsteuerung	27
3	Füllungsoptimierung I	31
3.1	Downsizing (Prüfung)	31
3.2	LSPI - Low Speed-Pre-Ignition	31
3.3	Vorteile von Downsizing Motoren	32
3.4	Mehrventiltechnik	32
3.5	Nockenwellenverstellung - variable Steuerzeiten	33
3.5.1	VarioCam - Verstellbarer Kettenspanner (Audi, VW)	34
3.5.2	Vanos - Variable Nockenwellensteuerung (BMW)	34
3.5.3	Flügelzellenversteller (Mercedes)	35
3.6	Variabler Ventiltrieb	35
3.6.1	Stufenweise variabler Ventiltrieb	35
3.6.1.1	VTEC - Variable Valve Timing and Lift Electronic Control (Honda)	36
3.6.1.2	VarioCam Plus (Porsche)	36
3.6.1.3	Valvelift (Audi, + Zylinderabschaltung)	37
3.6.2	Stufenlos variabler Ventiltrieb	37
3.6.2.1	Valvetronic	38
3.6.2.2	Elektrohydraulischer Ventiltrieb (MultiAir)	38
3.6.2.3	Elektromagnetischer Ventiltrieb (noch nicht zur Serienreife geschafft)	39
3.7	Lösung - Füllungsoptimierung I	40
4	Füllungsoptimierung II	43
4.1	Wie beschreiben Sie die Dynamische Aufladung?	43
4.1.1	Schwingsaugrohr	43
4.1.2	Resonanzsaugrohr	44
4.1.3	Resonanz- und Schwingsaugrohr (keine Prüfung)	44
4.2	Fremdaufladung	45
4.2.1	Abgasturbolader	45
4.2.1.1	Turbolader mit Bypass für Ladedruckbegrenzung	45
4.2.1.2	VTG-Lader (Variable Turbinengeometrie, meist bei Dieselmotoren)	45
4.2.1.3	Registeraufladung (Stufenaufladung)	46
4.2.1.4	Doppelaufladung	47
4.2.1.5	Twin-Scroll-Lader	47
4.2.2	Mechanische Lader	47
4.2.2.1	Schraubenkompressor (Roots-Lader, Kompressor)	47

4.2.2.2	Comprex-Lader (keine Serienreife, keine Prüfung)	48
4.2.2.3	Kombi von Turbolader und Kompressor (VW bei den Twincharger-TSI-Motoren)	48
4.2.3	Elektrische Lader (eLader)	48
4.2.4	Warum muss ich die Ladeluft kühlen?	49
4.3	Lösung - Füllungsoptimierung II	50
5	Betriebs- und Hilfsstoffe	55
5.1	Was sind Betriebsstoffe?	55
5.2	Was sind Hilfsstoffe?	55
5.3	Scheibenwaschwasserszusatz	55
5.4	Woraus bestehen Kraftstoffe?	55
5.5	Wo kommen die Kraftstoffe her?	56
5.6	Warum ist ein Dieselmotor effizienter als ein Ottomotor?	57
5.7	Herstellung von Kraftstoffen	57
5.8	Ottokraftstoffe – leicht siedende Kraftstoffe	58
5.9	Bremsflüssigkeit	60
5.10	Kühlflüssigkeit	61
5.11	AdBlue	61
5.12	Ölverdünnung oder Ölvermehrung	62
5.13	Kältemittel	62
5.14	Biodiesel – Fatty Acid Methyl Esther (kurz: FAME)	63
5.15	Bioethanol (Ottomotoren)	64
5.16	Gasförmige Kraftstoffe (Motoren mit Fremdzündung)	65
5.17	Dieselskraftstoff – schwer siedende Kraftstoffe	65
5.18	Schmieröle	66
5.19	Getriebeöle	70
5.20	Schmierfette	71
5.21	Lösung - Betriebs- u. Hilfsstoffe	72
6	Klimaanlage	75
6.1	Aktive und Passive Sicherheit	75
6.2	Aufbau und Funktionsweise einer Klimaanlage	75
6.3	Kältemittelkreislauf	77
6.4	Klimaservice	77
7	Matheaufgaben	81
7.1	Druckberechnung am Pleuellager	81
7.2	Motorberechnung - siehe Datenblatt Audi S6	82
7.3	Druck - Volumen - Temperatur	84
7.4	Motor - Hubraum - Verdichtung	86
	Literaturverzeichnis	89

1 Grundlagen Verbrennungsmotor

1.1 Motorbauformen

- Reihenmotor, V-Motor, VR-Motor, Boxermotor
- Hubkolbenmotor, Kreiskolbenmotor

1.2 Hubraum - Brennraum - Verdichtungsraum

$$\text{Hubraum } V_h = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot s \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$\text{Gesamthubraum } V_H = V_h \cdot z$$

$$\text{Brennraum} = V_h + V_c$$

$$\text{Verdichtungsraum } V_c = \frac{V_h}{\epsilon - 1}$$

$$\text{Verdichtungsverhältnis } \epsilon = \frac{V_h + V_c}{V_c}$$

1.3 Arbeitsweise

- (1) Vier-Takt-Arbeitsverfahren (1 Arbeitsspiel = 2 Kurbelwellenumdrehungen = 4 Kolbenhübe)
- (2) Zwei-Takt-Arbeitsverfahren (1 Arbeitsspiel = 1 Kurbelwellenumdrehung = 2 Kolbenhübe)

1.4 Ansaugen

- Abwärtsgehen des Kolbens
- Volumenvergrößerung, Druckdifferenz (Zylinderdruck versus höhere Außendruck)
- Einströmen der Luft (Ansaugen der Luft)
- zündfähiges Kraftstoff-Luft-Gemisch innen/außen bilden (Zylinder, Ansaugrohr)
- Kraftstoff (Kohlenstoff – Wasserstoff - Verbindung)

1.4.1 Luftdruck

Luftdruck in Abhängigkeit der geodätischen Höhe

Luftdruck bezogen auf Meereshöhe ($1013 \text{ hPa} = 1013 \text{ mbar, ca. } 1 \text{ bar}$)

Erdanziehung ist von der Masse abhängig

Das Gewicht der Umgebungsluft drückt auf die Erdoberfläche und erzeugt einen Druck, Atmosphärendruck.

1.4.2 Absolutdruck

Druck gegenüber Null (Vakuum, luftleeren Raum)

1.4.3 Relativer Druck

Druck messen gegenüber Absolutdruck

1.4.4 Zusammensetzung der Luft (Prüfung)

- 78 % Stickstoff
- 21 % Sauerstoff
- 0,9 % Edelgase
- 0,1 % Partikel, Feinstaub (Zell Gängigkeit, Blutkreislauf, Erbgutveränderung > Mutation)
- 0,040 % CO_2

1.5 Verdichten

- Aufwärtsgehen des Kolbens
- Kraftstoff-Luft-Gemisch wird verdichtet

1.5.1 Hoch verdichtete Motoren

10 : 1

1.5.2 Verdichtungsverhältnis

- **Mazda Motor:** 14 : 1
- **Turbo Motor:** 7 – 8 : 1
- **Direkt:** 17 – 18 : 1
- **Indirekt** (Wirbel, Vorkammer): 21 – 36 : 1
 - Vorkammer > Kugel > Wärmeabgabe > höher Verdichten

1.5.3 Wärme

entsteht durch Reibung, Form von Energie, Bewegungsenergie kleiner Teilchen

1.5.4 Wärmeabführung

an der Oberfläche, Luft (Isolator)

1.5.5 Verdichten z. B. 10:1

10 l großes Volumen wird auf den zehnten Teil verkleinert, also 1 l

maximales Volumen zu minimales Volumen

Vgl. »Kapitel Rechenbeispiele / Motor - Hubraum - Verdichtung«

1.5.6 Verdichtungsendtemperatur

600 – 900°C (Diesel: Zündung wird eingeleitet)

1.5.7 Entzündungstemperatur Diesel

230 – 250°C

1.5.8 Zündverzug

Entflammungsphase : $\frac{1}{1000}s$

Ziel: Vollständige Verbrennung (feine Zerstäubung und hohe Temperaturen, das muss schnell gehen)

- (1) **Benzin** Beginn Zündfunken bis zur Verbrennung
- (2) **Diesel** Beginn des Einspritzens bis zur Verbrennung

1.5.9 Thermodynamischer Kreisprozess (keine Prüfung)

Wärmekraftmaschine: Verhältnis von Druck, Volumen und Temperatur beim Verdichten

Verhindert man die Ausdehnung, z. B. beim Verdichten, so verdoppelt sich der Druck.

Pro Grad der Erwärmung steigt der Druck um 273sten Teil seines Volumens im geschlossenen System

Erwärmt man das Gas um 273 K, so dehnt es sich auf das doppelte Volumen aus. Die Temperatur steigt und damit der Druck.

Grundlage: **1. Satz der Thermodynamik** »Die Energie bleibt in einem geschlossenen System konstant.«

Faktor 2 $\Rightarrow \frac{546}{273}$

Ziel: von 20°C \Rightarrow 600°C Verdichtungsendtemperatur

z. B. Verdichtung: (10 : 1) 1 bar \Rightarrow 20 bar Verdichtungsenddruck (10 bar \cdot 2 = 20 bar)

Vgl. »Kapitel Rechenbeispiele / Druck - Volumen - Temperatur«

Diesel Gleichdruckverbrennung **Benzin** Gleichraumverbrennung **Anwendung** Zylinderabschaltung, Studium

1.5.10 Grad Celsius

als Fixpunkte werden die Temperaturen vom Gefrier- (0°C) und Siedepunkt (100°C) des Wassers verwendet

1.5.11 Aggregatzustand

physikalischer Zustand eines Stoffs. Beispiel: fest, flüssig, gasförmig, plasma

1.5.12 Kelvin

absoluten Nullpunkt der Teilchen ($0K = -273^{\circ}C$)

$$0 K = -273,15^{\circ}C$$

$$273,15 K = 0^{\circ}C$$

$$373,15 K = 100^{\circ}C$$

Umrechnung

$$Kelvin = T_{Grad\ Celsius} + 273,15$$

$$Grad\ Celsius = T_{Kelvin} - 273,15$$

1.6 Arbeiten

- Verbrennung wird durch den Zündfunken eingeleitet
- Die Expansion der Gase treibt den Kolben nach UT
- Wärmeenergie wird in mechanische Energie umgewandelt

1.6.1 Verbrennungstemperatur

2000 – 2500°C

1.6.2 Kolbenmaterial

Aluminium-Silizium-Legierung

1.6.3 Thermische Belastung Kolben

Problem Kolbenbodentemperaturen

- (1) 390°C Diesel
- (2) 290°C Benzin
- (3) 421°C Stahlkolben

Kerbe = Sollbruchstelle

1.6.4 Kolbenfläche berechnen

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = [mm^2]$$

Vgl. »Kapitel Rechenbeispiele / Druckberechnung am Pleuellager«

1.6.5 Kolbenwärme abführen

- Kolbenboden
- 80 % über 1. Kolbenring, Kompressionsring, Minutenring, (trapezförmig)
- Zylinderwand

1.6.6 Kolbenkippen Ursache

- Druckverlagerung
- Desachsierung des Kolbens
- Wann liegt der Kolbendruck an?
- Wann Übergehen der Kolbengleitbahnen (deshalb die Desachsierung des Kolbens)
- Welche Kolbenbauform?
- ausreichend langes Kolbenhemd → Problem mehr Masse
- Masse einmal beschleunigt, wenn Kolben nach unten (möchte durch die Ölwanne in den Boden) oder Kolben nach oben (durch die Motorhaube in den Himmel) davon hält das Pleuel ab

1.7 Ausstoßen

- Abgase verlassen mit Überschallgeschwindigkeit den Zylinder

1.7.1 Abgastemperatur

600 – 900°C

1.7.2 Wirkungsgrad (Effizienz)

- 35 – 50 % Diesel
- 25 – 35 % Otto
- Rest Reibung und Wärme

1.7.3 Wie bewegt sich die Kurbelwelle?

Ungleichförmige Drehbewegung

Hubkolbenbewegung Reihenmotor (abhängig Zylinderanzahl, Zündreihenfolge)

Kompensieren: Kurbelwellenrad exzentrisch ausgeführt (unterschiedliche Hebellängen)

Beschleunigt (Zündungstakt)

- alle zwei NW Umdrehungen
- alle vier KW Umdrehungen

1.7.4 Hydrodynamischer Schmierkeil

- durch ungleichförmige Drehbewegung
- wird eine Volumenvergrößerung zwischen Kurbelwelle und Lagerung erreicht
- dadurch ein Einströmen des Lageröls in die Lagerstelle begünstigt
- Und wenn jetzt der Verbrennungsdruck durch die Verbrennung erzeugt auf die Kurbelwellenlagerstelle schneller erfolgt, als die Verdrängung des Öls aus der Lagerstelle heraus
- Aufschwimmen auf unserem Lager
- Wir bewegen uns auf dem hydrodynamischen Schmierkeil
- Ist in der Lage hohe Drücke auszuhalten

Wie kann es sein, dass ich mit einem Versorgungsdruck von 5 bar einen Öldruck in den Lagern der Kurbelwelle einen Spitzendruck bis 1000 bar kompensieren kann > Hydrodynamischer Schmierkeil

Vgl. »Kapitel Rechenbeispiele / Druckberechnung am Pleuellager«

1.8 Kurbelgehäusearten

1. Closed-Deck-Ausführung
 - Dichtfläche bis auf Kühl- oder Ölkänaie geschlossen gegenüber Zylinderkopf
 - Niederdruckguss-Verfahren (AlSi-Legierung)
2. Open-Deck-Ausführung
 - Wassermantel um die Zylinderbohrungen offen gegenüber Zylinderkopf (geringe Steifigkeit, erfordert Metall-Zylinderkopfdichtung)
 - Druckgussverfahren

1.9 Zylinderkopfdichtung

Gasabdichtung bei allen Betriebszuständen

1. Metall-Weichstoff-Zylinderkopfdichtung
2. Metall-Zylinderkopfdichtung

1.10 Lösung - Grundlagen Verbrennungsmotor

Bemerkung, die in Klammern stehende Kommentare gehören nicht zur Beantwortung der Frage.

1) Ein Verbrennungsmotor benötigt zum Arbeiten ein Kraftstoff-Luft-Gemisch. Was ist Kraftstoff und was ist Luft?

Fachbuch (Brand u. a. [4] S. 29)

- (1) **Kraftstoffe** sind hauptsächlich Kohlen - Wasserstoff - Verbindungen (geringer Anteil Schwefel → Schmierung). Die Anzahl der Atome und deren Verbindungen bestimmen die Art des Kraftstoffes. Zur Verbesserung der Eigenschaften werden Ihnen Additive zugefügt.

(Flammpunkt; Benzin: ringförmiger Molekülaufbau, Oktanzahl → Zündunwillig, Klopf-festigkeit; Diesel: kettenförmiger Molekülaufbau, Cetanzahl → Zündwilligkeit)

- (2) **Luft** ist ein Gasgemisch aus

- 78 % Stickstoff
- 21 % Sauerstoff
- 0,9 % sonstige Gase (Edelgase)
- 0,1 % Schwebeteilchen (Partikel, Feinstaub, Sandstrahl verschleiß → Luftmassen-messer)
- (0,040 % CO₂)

2) Unterscheiden Sie Boxer-Motor und 180 Grad V-Motor

Boxer-Motor arbeiten die Kolben der gegenüberliegenden Zylinder aufeinander zu. Es befinden sich also beide zeitgleich im oberen oder unteren Totpunkt. Um dies zu ermöglichen, benötigt der Boxer-Motor einen Kurbelzapfen je Kolben.

(flache Bauweise, tiefer Schwerpunkt, Kurvenverhalten)

180° V-Motor arbeiten die Kolben der gegenüberliegenden Zylinder in gleicher Richtung. Wenn also der eine im oberen Totpunkt ist, ist der andere im unteren Totpunkt und umgekehrt. Beim 180° V-Motor können sich daher jeweils zwei Kolben ein Kurbelzapfen teilen.

3) Wie unterscheidet man Hubkolbenmotoren nach dem Arbeitsverfahren?

Arbeitsverfahren

- (1) Vier-Takt-Motor
- (2) Zwei-Takt-Motor

4) Was bezeichnet man als Hubraum?

Raum zwischen unteren und oberen Totpunkt eines Zylinders.

5) Erläutern Sie, welche Faktoren den Druck im Brennraum am Ende des Verdichtungstaktes beeinflussen

(1) **Druck** zu Beginn des Verdichtungstaktes

- bei Saugmotoren um den atmosphärischen Luftdruck
- bei Ladermotoren (externe Aufladung) Überdruck von bis zu 2,2 bar

(2) Als nächstes wäre die **Temperatur** der angesaugten Luft zu nennen.

(3) **Verdichtungsverhältnis**

- Verkleinerung des Raumes und damit verdichten des Gases
- Ausdehnung des Gases durch Erwärmung
 - pro Grad der Erwärmung $\frac{1}{273}$

(4) **Verluste**

- durch Wärmeentzug an der Brennraumoberfläche (Brennraumgestaltung)
- durch Brennraumundichtigkeiten
 - Kolbenringe, Ventile, Brennraumabdichtung, ...

6) Worin besteht der Unterschied zwischen Kurz-, Lang- und Quadrathuber?

Prüfung

Hub-Bohrung-Verhältnis

(1) **Kurzhuber** Hub < Zylinderbohrung

- (Formel 1 → sehr hohe Drehzahlen)

(2) **Langhuber** Hub > Zylinderbohrung

- (Schiff, Traktor, Lanz Bulldog → Drehmoment, Leistung, Länge des Kurbelzapfens, Hebelarm, höhere mittlere Kolbengeschwindigkeit, Massenträgheit, Drehzahlbegrenzung)

(3) **Quadrathuber** Hub = Zylinderbohrung

7) Worin unterscheiden sich Kipp- und Schlepphebel?

Fachbuch (Brand u. a. [4] S. 242)

- (1) **Kipphebel** ist in der Mitte gelagert und besitzt dadurch zwei Arme. Der eine Arm wird direkt vom Nocken über einen Stößel oder von der unten liegenden Nockenwelle über Stößel und Stößelstange betätigt. Der andere Kipphebelarm betätigt das Ventil.
- (2) **Schlepphebel oder Schwinghebel** besitzt nur einen Arm. Dieser ist an einem Ende gelagert und stützt sich mit dem anderen Ende auf das Ventil. Der Nocken wirkt von oben auf diesen Arm.

8) Was wird in einem Steuerdiagramm dargestellt?

Fachbuch (Brand u. a. [4] S. 195)

In einem **Steuerdiagramm** werden die Steuerzeiten eines Verbrennungsmotors in »Grad Kurbelwinkel« dargestellt.

9) Was wird als Ventilüberschneidung bezeichnet?

Ventilüberschneidung bezeichnet man den Drehwinkel, den die Kurbelwelle zwischen »EV öffnet vor OT« und »AV schließt nach OT« durchläuft.

10) Erläutern Sie die Begriffe Passlager, Minutenring und Trockensumpfschmierung

Fachbuch (Brand u. a. [4] S. 213)

- (1) **Passlager** bezeichnet man das/die Hauptlager, das die Kurbelwelle gegen axiales verschieben z. B. beim Auskuppeln sichert.

(Gleitlager, Wälzlager, radial, axial)

- (2) **Minutenring** ist ein spezieller Kolbenring, der durch seine trapezförmige Form im Neuzustand eine sehr schmale Dichtkante zum Zylinder hat. Wodurch er sich in kürzester Zeit auf den Zylinder einschleift und Einfahrvorschriften entfallen können.

(Kompressionsring, Ölabstreifring)

- (3) **Trockensumpfschmierung** bezieht das Schmieröl nicht direkt aus der Ölwanne, sondern aus einem separaten Tank. Die Ölwanne enthält nur eine geringe Ölmenge, die durch eine Ölpumpe kontinuierlich in den Öltank abgeführt wird. Hierdurch wird ein Trockenlaufen durch große Fliehkräfte oder Schräglage entgegengewirkt.

(Zwei oder zweistufige Ölpumpen: Saugpumpe, Druckpumpe; Druckumlaufschmierung/Nasssumpf)

2 Motorsteuerung

2.1 Was ist ein Untengesteuerter Motor?

Anordnung der Ventile

Fachbuch (Brand u. a. [4] S. 242)

2.1.1 Untengesteuerter Motor

»stehende Ventile« (Ventilteller ist oben)

- Ungünstige Brennraumform, schlechter Wirkungsgrad
- z. B. Harley-Davidson, Rasenmähermotoren
- Flatheadmotor, sv-Motor

2.1.2 Obengesteuerter Motor

»hängende Ventile« (Ventilteller ist unten)

2.2 Anordnung der Nockenwelle (Steuerungsbauarten)

Fachbuch (Brand u. a. [4] S. 242)

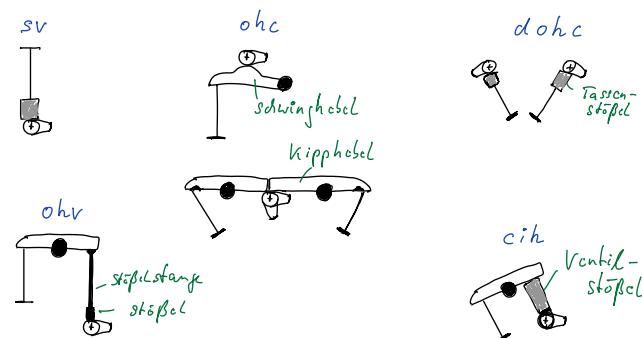


Abb. 2.1: Anordnung der Nockenwelle

2.2.1 sv-Motor

- »side valves« seitlich stehende Ventile
- untengesteuerter Motor
- unten liegende Nockenwelle

2.2.2 ohv-Motor

- »overhead valves« hängende Ventile
- obengesteuerter Motor
- unten liegende Nockenwelle

2.2.3 ohc-Motor

- »overhead camshaft«
- Nockenwelle über Zylinderkopf

2.2.4 dohc-Motor

- »double overhead camshaft«
- zwei Nockenwellen über Zylinderkopf

2.2.5 cih-Motor

- »camshaft in head«
- Nockenwelle im Zylinderkopf

2.3 Arten von Nockenwellenantriebe

Fachbuch (Brand u. a. [4] S. 247)

1. Steuerkette
2. Zahnriemen
3. Königswelle
4. Stirnräder
5. Schubstangenmotoren

2.4 Nenne Zahnriemen Merkmale (trocken laufend)

Fachbuch (Brand u. a. [4] S. 247)

- geringe Masse
- geräuscharmer Lauf
- begrenzte Standzeit, begrenzte Belastbarkeit
- Unterliegen einem Wartungsintervall
- braucht keine Schmierung
- kostengünstig in der Produktion
- Chemisch sensibel

2.5 Ölbadzahnriemen Eigenschaften (nass laufend)

- mit Öl geschmierter Lauf
- geringere Geräusentwicklung
- geringere Reibung (20 % weniger als Steuerkette)

Ziel:

- Kontaktflächen der beweglichen Teile reduzieren → Emissionen
- Thermomanagement: Betriebstemperatur lange halten (BMW)

2.6 Steuerkette Merkmale

1. Große Kräfte übertragen
2. eigentlich wartungsarm, aus praktischer Sicht leider problembehaftet
3. teuer in Konstruktion
4. Steuerkette gilt als lauter
5. größere Masse als ein Riemen

2.7 Stirnradantrieb

- Große Kräfte übertragen
- wartungsfrei
- schmale Bauform
- teuer in Konstruktion
- Dauerläufer (nicht problembehaftet)

2.8 Königswelle

- wartungsfrei
- leicht, weil hohl gebohrt, Hohlröhre
- kleine Kräfte übertragen
- teuer in Konstruktion und Herstellung

2.9 Unterschied - Steuern und Regeln

2.9.1 Steuern

Soll-Ist-Vergleich

- z. B. *Steuerriemen*: Markierung soll auf OT stehen, alles in Ordnung, wenn nicht, dann defekt.

2.9.2 Regeln

Soll-Ist-Vergleich mit der Option des Eingriffs

- z. B. *ABS Regelkreis*: SG erfasst Drehzahlssignal, Drehen alle Räder gleich schnell, alles okay. Dreht ein Rad schneller → aktiver Eingriff ins System.

2.10 Nockenwellen - Herstellungsmöglichkeiten

2.10.1 Gegossene Nockenwelle

- muss nachgearbeitet werden, Lagerstellen, partiell gehärtet
- biegsam, flexibles Bauteil (Gusseisen mit Lamellen- o. Kugelgrafit)
- *Vorteil* kostengünstig in der Herstellung, weniger problembehaftet

(Kaltverformen je härter ein Material, um zu spröder.)

2.10.2 Gebaute Nockenwelle

- zwei unterschiedliche Materialien,
- Nocken (aus Einsatz-, Vergütungs- o. Nitrierstahl) auf ein Stahlrohr geschrumpft
- *Problem* Nocken können sich verdrehen
- *Vorteil* Gewichtsreduzierung, Nocken ist belastbarer
- *Nachteil* Aufwand
- Material V4A (hohl gebohrt)

2.11 Nockenformen

Fachbuch (Brand u. a. [4] S. 246)

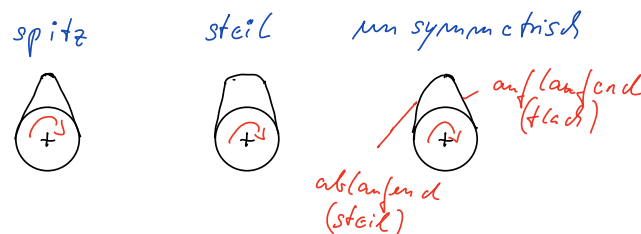


Abb. 2.2: Nockenformen

2.11.1 spitzer Nocken (tagenden Nocken)

- langsames Öffnen / Schließen der Ventile
- kurze Zeit voll geöffnet
- geringe Füllung
- stabiler Leerlauf
- weicher und komfortorientierte Drehzahlbereich
- nicht als hochdrehender, hochbelasteter Motor geeignet

2.11.2 steiler Nocken (scharfer Nocken, Kreisbogen Nocken)

- schnelles Öffnen / Schließen der Ventile
- bleibt längere Zeit voll geöffnet
- hoher Füllungsgrad, bei hohen Drehzahlen
- im Leerlauf teilweise unrunder Lauf, da »inneres AGR« entstehen kann (große Ventilüberschneidung → Abgase in Ansaugtrakt) Abhilfe: Leerlaufdrehzahl erhöhen (750 → 950 U/min.)
- Leistungsmotoren, hohe Drehzahlen

2.11.3 unsymmetrischer Nocken

- *flach* langsameres öffnen der Ventile
- *steil* schnelles schließen der Ventile
- längeres offen halten der Ventile
- vereinigt beide Varianten

(Ziel bei hohen Drehzahlen: Ventile schnell öffnen (Nocken) / schließen (Ventilfeder) → gute Füllung, hohen Wirkungsgrad erreichen.)

2.12 Arten von Ventilbetätigung

Fachbuch (Brand u. a. [4] S. 247, 242)

2.13 Welche Beanspruchung ist das Ventil ausgesetzt?

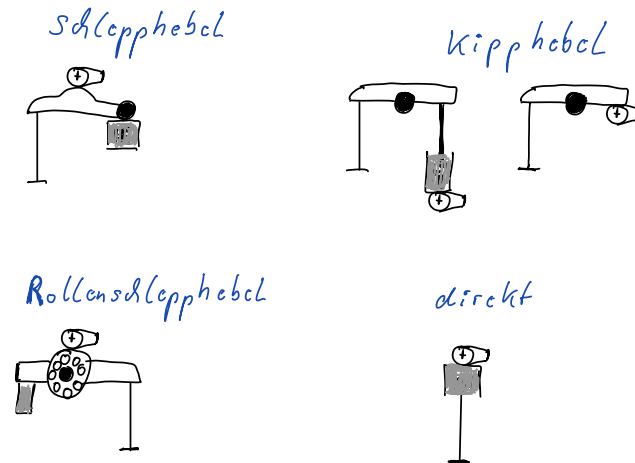


Abb. 2.3: Arten von Ventilbetätigung

2.12.1 Rollenschlepphebel, Schlepphebel, Schwinghebel

- einarmige Hebel
- geringe Reibung zwischen Nocken und Schlepphebel durch Nockenrolle (nadelgelagert)

2.12.2 Kipphebel

zweiarmige Hebel

2.12.3 direkt

Nockenwelle - Hydrostößel - Ventil

2.13 Welche Beanspruchung ist das Ventil ausgesetzt?

2.13.1 Mechanische Beanspruchung des Ventils

- Ziehen (Ventilfeder, schließen, Ventilsitz)
- Druck (Nocken, öffnen)
- Torsion (verdrehen)
- Biegen

2.13.2 Chemische Beanspruchung

Schwefel im Kraftstoff → Korrosion

2.13.3 Thermische Belastung

Auslassventil bis 900°C

2.14 Ventilspielausgleich

Wofür? Temperaturänderung (Motor Kaltstart, temperaturbedingte Längenänderung des Ventils ausgleichen)

Zu kleines Ventilspiel (Nachteile)

- Ventil öffnet früher und schließt später
- Ventil ist länger auf
- kann dadurch nicht genügend Wärme abgeben über Ventilsitz
- Ventilteller wird immer weiter einer höheren thermischen Belastung unterzogen und dadurch erhöhter Verschleiß
- Am Ende ist das Ventil einer Hochtemperaturkorrosion unterworfen (Verbranntes Ventil)

zu großes Ventilspiel (Nachteile)

- Ventil öffnet zu spät, geht nicht ganz auf und schließt zu früh
- Ventil ist kürzer auf
- Klappergeräusche und erhöhter Verschleiß, *Warum?* durch großes Ventilspiel, liegt nicht am Nockengrundkreis auf (Nocken schlägt auf Ventil)
- Hieraus können folgen: schlechte Zylinderfüllung und die maximale erreichbare Leistung sinkt

2.14.1 definiertes Ventilspiel

Wartung notwendig

2.14.2 Hydraulischer Ventilspielausgleich

ablaufender Nocken (ohne Belastung)

- Entspannung des Systems
- Spielausgleichsfeder drückt Druckbolzen nach oben bis Stößel am Nocken anliegt
- Kugelventil öffnet sich, Raumvergrößerung im Arbeitsraum (Unterdruck)
- Durch den Systemdruck strömt frisches Öl von außen ein und der Arbeitsraum wird befüllt

auflaufender Nocken (mit Belastung)

- Kugelventil schließt sich, es baut sich Druck im System auf
- durch die Inkompressibilität von Flüssigkeiten → starre Verbindung
- Nocken wird auf den Stößel auflaufen können, ohne Spiel zu haben und das Ventil betätigen
- Warum Ringspalt? (Wärmeausdehnung des Öls ausgleichen)
- dadurch wird »Öl« durch den kleinen Ringspalt gepresst (definierte Ölmenge)

Bemerkung Wärmeeintrag: »Je wärmer das Öl, umso dünnflüssiger.« Erfordert die *richtige Öl-Viskosität* (Zähflüssigkeit, Temperaturabhängig, Fließverhalten), sind an diese Ringspalte angepasst.

falsche Öl-Viskosität ein Klappern oder Aufpumpen der Hydrostößel → darf nicht sein sonst Thermische Überlast, Hochtemperaturkorrosion → verbrannte Ventile

Fachbuch (Brand u. a. [4] S. 245)

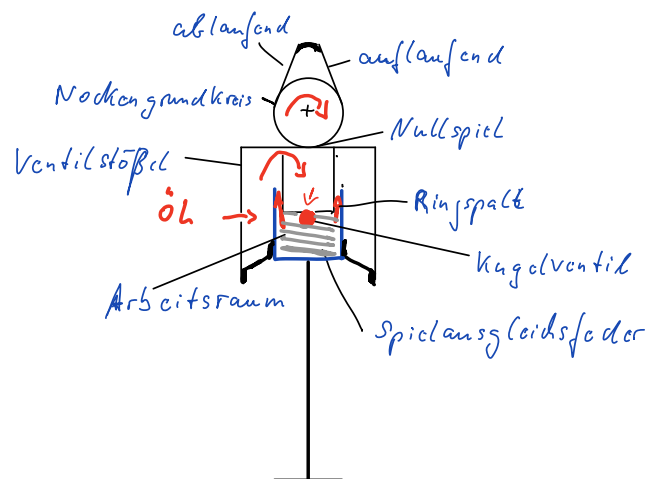


Abb. 2.4: Ventilspielausgleich

2.15 Drehzahlverhältnis zwischen Kurbelwelle zu Nockenwelle?

2:1

2.16 Was steuert die Motorsteuerung?

Den Zeitpunkt und die Dauer des Ansaugens der Frischgase und den Zeitpunkt und die Dauer des Ausstoßes der Abgase.

Öffnen und Schließen der Ventile.

Voraussetzung

1. Einspritzung des Kraftstoffs (Energieträger)
2. Eine Zündung, die diese Energie, gebunden im Kraftstoff, in chemische Energie, in Wärmeenergie umwandelt (Wärmekraftmaschine)

Druck wird über eine Fläche in Kraft und Drehmoment übertragen, an die Kurbelwelle übergeben, läuft durch das Getriebe - Achswellen - Reifen auf die Straße und wir haben Vortrieb.

2.17 Dreiventiltechnik mit zwei Zündkerzen

Fachbuch (Brand u. a. [4] S. 243)

Fachbuch (Respondeck [5] S. 142)

2.17.1 Zusammenfassung

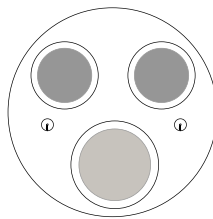


Abb. 2.5: Dreiventiltechnik

Wir haben bei **drei Ventilen** einen großen Ein- und Auslassquerschnitt.

Durch die Anordnung ist eine Unterbringung von **zwei Zündkerzen** möglich, sodass zwei Zündkerzen in der Nähe der Zylinderwand entstehen in deren Umgebung zwei

Flammfronten. Somit kann bereits niedergeschlagener Kraftstoff noch verdampfen und verbrannt werden.

Durch zwei Zündkerzen findet die Verbrennung schneller statt. Dadurch wird der maximale Kolbendruck früher erreicht und ein hohes Drehmoment erreicht. Wir nähern uns einer Gleichdruckverbrennung (Isobar).

Klopffneigung wird durch zwei Zündkerzen verringert. Da geringerer Wärmeeintrag in die noch nicht verbrannten Gase stattfindet.

Abgastemperatur ist niedriger, dadurch geringerer NO_x-Ausstoß trotz geringer HC und CO-Werte.

Dank nur **einem Abgasrohr** geringere Wärmeverluste. »light off point« des Katalysators wird schneller erreicht.

2.17.2 Warum sind das zwei Einlassventile und ein Auslassventil?

Vorteil

- kleine Massen
- zwei kleine Ventile → große Einlassquerschnitte
- höhere Drehzahlen
- gute Füllung und Zylinderspülung

Nachteil

- mehr Teile → größere Reibungsverluste
- Verschleiß und Ausfallwahrscheinlichkeiten

Ein großes Ventil hat eine Massenträgheit.

- Masse in Ruhelage (Ventil offen), Losbrechmoment → höchste Kraft, Masse in Bewegung (Federkraft: Ventil schließen)
- Ansaugventil möglichst lange offen lassen (Kolben und Ventil kommen sich sehr nahe)
- *Ziel*: bestimmte Drehzahl erreichen (Wie schnell kann dieser Wechsel vollzogen werden?)

2.17.3 Zylinderspülung bei Ventilüberschneidung

Mit dem Ausstoß der Abgase ziehen wir einen kleinen definierten Frischgasanteil mit, um den Zylinder zu spülen und möglichst wenig inertes Gas (AGR) zu gewährleisten.

2.17.4 Nachladeeffekt beim Ansaugen

Einlassventile werden erst nach Durchschreiten des unteren Totpunktes geschlossen. Frischgase strömen trotz aufwärtsgehendem Kolben in den Zylinder nach. Die Kinetische Energie der einströmenden Frischgase ist größer, als die Druckzunahme durch aufwärts gehenden Kolben.

2.17.5 Warum zwei Zündkerzen?

Zündkerze ist in der Nähe der Zylinderwand, zwei Flammenfronten entstehen.

1. Vollständige Verbrennung

- niedergeschlagener Kraftstoff verdampft (an Zylinderwandung und Feuersteg) und der Verbrennung zugeführt

2. schnellerer Verbrennungsablauf

- Schnelleres Erreichen des maximalen Verbrennungsdruckes. Die Temperatur kann schneller konstant gehalten bzw. in Druck umgewandelt und über die Fläche des Kolbens in Kraft und Drehmoment auf die Kurbelwelle übertragen werden.
- $\text{Drehmoment} = \text{Kraft (max. Kolbendruck)} \times \text{Hebelarm (90^\circ \text{ stehende Kurbelwellenzapfen} = \text{Hebelarm am größten})}$

2.17.6 Innermotorisch entstehen geringere Schadstoffe

1. **HC** geringer Ausstoß unverbrannter Kohlenwasserstoffe, durch weniger niedergeschlagener Kraftstoff
2. **CO** geringer, durch vollständige Verbrennung
3. **NO_x** ist reduziert, durch schnelleren Verbrennungsablauf → zwei Zündkerzen, Abgastemperatur ist niedriger

2.17.7 Wann entsteht NO_x?

Durch hoher Druck und hohe Temperatur.

2.17.8 Zusammenhang zwischen HC und CO vs. NOx

Es gibt zwei Zündgrenzen »fett« und »mager«.

1. **HC und CO** entsteht durch unvollständige fette Verbrennung
 - Senken: durch Abmagern
 - Verbrennungsspitzentemperatur: geringer
2. **NOx** entsteht durch magere Verbrennung
 - Senken: durch an fetten
 - Verbrennungsspitzentemperatur: ansteigen

2.17.9 Schadstoffe

1. **HC** unverbrannte Kohlenwasserstoffe
 - Verdampft am Ende der Verbrennung und wird dem Abgas zugeführt
2. **CO** Kohlenmonoxid
 - schwerer als Luft (Grube), bindet Hämoglobin im Blut
 - keine vollständige Verbrennung
3. **NOx** Stickoxide

2.17.10 Was ist AGR?

Platzhalter Gas (inertes Gas) nimmt nicht an der Verbrennung teil, soll den Umgebungs-sauerstoff fernhalten

AGR-Rate ist am größten in Teillast (80 Km/h auf der Landstraße)

Ziel: Aus großen Motor → kleinen Motor machen, viel Abgas und geringe Menge Kraftstoff einspritzen

Problem »Luftmenge ist da und kein Kraftstoff Einspritzen« → magere Verbrennung → thermische Belastung und Anstieg NOx

Luftmassenmesser misst angesaugte Luftmasse und Sauerstoffgehalt → AGR-Rate → Kraftstoffmenge berechnen

Ziel: homogen - Magerbetrieb (über den kompletten Zylinder)

2.17.11 Wie entsteht Ruß?

Kraftstoff wird an heißen Luft eingespritzt, zündfähiges Kraftstoff-Luft-Gemisch bildet sich

einzelne Kraftstofftröpfchen

- fangen von außen an zu verdunsten, entzünden, Verbrennung ist zu kurz (nicht vollständig)
- innen: Verbrennung von Kohlenwasserstoff ohne Sauerstoff

2.17.12 Was fördert die Klopfneigung?

Unkontrollierte, unerwünschte Verbrennung (Glühzündung, klingende, klopfende Verbrennung)

entzündet sich selbst an etwas glühenden, z. B. Ölkohle, Masseelektrode (Zündkerze)

Wärme braucht Zeit zum Wirken.

1. **Wärmeeintrag gering:** geringe Klopfneigung, geringe thermische Belastung, schneller Verbrennungsablauf
2. **Wärmeeintrag hoch:** klopfende Verbrennung

2.17.13 Ein Auslassventil - ein Abgasrohr

Abgas verliert weniger Wärmeenergie.

1. ab ca. 450 °C »light off point« des Katalysators: min. 50 % der Abgase konvertiert in nicht Schadstoffen
2. ab ca. 650 °C altert der Katalysator exponentiell und thermische Belastung

Thermodynamik - warme Luft strömt schneller, weniger Rückstau.

Das unter Druck stehende Abgas verlässt den Zylinder mit Überschall (Auspuffgeräusch). **Schallgeschwindigkeit** ca. 343 m/s (z. B. Blitz → Donner, drei Sekunden zählen → ca. 1 km Entfernung)

2.18 Lösung - Motorsteuerung

1) Welche Aufgabe übernehmen die Ventile eines Verbrennungsmotors?

Ermöglicht den Gaswechsel und dichten den Verbrennungsraum gegenüber dem Saugrohr und Abgasanlage ab.

2) Warum haben Einlassventile meist einen größeren Ventiltellerdurchmesser als Auslassventile?

Einlassventile haben oftmals einen größeren Ventiltellerdurchmesser, da das einströmende Frischgas nur durch Unterdruck im Zylinder angesaugt wird, während das im Zylinder befindliche Altgas noch unter Restdruck aus der Verbrennung steht und den Zylinder somit auch über einen kleinen Querschnitt zuverlässig verlässt.

3) Wie hoch ist die thermische Belastung von Ein- und Auslassventilen?

Einlassventile bis ca. 500°C Auslassventile bis ca. 900°C (fehlende Frischgaskühlung)

4) Welche Aufgabe hat die Ventildrehvorrichtung?

Die Ventildrehvorrichtung hat die Aufgabe, die Ventile bei laufendem Motor kontinuierlich zu drehen.

Dies verhindert:

1. ungleichmäßige Erwärmung der Ventilteller
2. Undichtigkeiten durch Verzug (nicht sauberes Anliegen)
3. Störungen bei Wärmeabgabe
4. Hochtemperaturkorrosion an den heißesten Stellen (das Ventil verbrennt)
5. Abblättern der Verbrennungsrückstände (stetiges Einschleifen der Ventile)

Bauformen

1. Rotocap
2. Rotomat

5) Beschreiben Sie Aufbau und Wirkungsweise eines Hohlventils. (inkl. Temperaturangaben!)

Hohlventile sind im Schaft, teilweise auch im Teller hohl. Dieser Hohlraum ist zu ca. 60 – 70 % mit metallischem Natrium gefüllt, bei ca. 98°C schmilzt das Natrium und bewegt sich hervorgerufen durch die Ventilbewegung im Ventil auf und ab. Bei jeder Bewegung nimmt es am Ventilteller Wärme auf und gibt diese am Ventilschaft ab. Der Abkühleffekt am Ventilteller liegt bei ca. 80 – 150°C. Durch die hohlgeborte Form des Ventils verringert sich seine Masse. Kann auch als Einlassventil verwendet werden.

6) Warum besteht zwischen dem Sitzwinkel des Ventilsitzringes im Zylinderkopf und dem am Ventil oftmals eine Differenz von ca. 1°?

Durch die Sitzwinkeldifferenz ist die Dichtfläche schmal. Bei Inbetriebnahme des Motors arbeiten sich Ventilteller und Sitzring schnell aufeinander ein. Dadurch entfällt das Ventileinschleifen.

(Flächenpressung, Minutenring)

7) Welche Auswirkungen hat ein zu großes/zu kleines Ventilspiel?

Zu kleines Ventilspiel (Nachteile)

- Ventil öffnet früher und schließt später
- Ventil ist länger auf
- kann dadurch nicht genügend Wärme abgeben über Ventilsitz
- Ventilteller wird immer weiter einer höheren thermischen Belastung unterzogen und dadurch erhöhter Verschleiß
- Am Ende ist das Ventil einer Hochtemperaturkorrosion unterworfen (Verbranntes Ventil)

zu großes Ventilspiel (Nachteile)

- Ventil öffnet zu spät, geht nicht ganz auf und schließt zu früh
- Ventil ist kürzer auf
- Klappergeräusche und erhöhter Verschleiß, *Warum?* durch großes Ventilspiel, liegt nicht am Nockengrundkreis auf (Nocken schlägt auf Ventil)
- Hieraus können folgen: schlechte Zylinderfüllung und die maximale erreichbare Leistung sinkt

8) Wo im Ventiltrieb kann der Ventilspielausgleich eingesetzt sein?

Ventilspielausgleich kann sich zwischen Nocken und Ventil oder bei Bauformen Schlepphebel am Aufnahmepunkt des Hebels befinden.

9) Beschreiben Sie Aufbau und Wirkungsweise des hydraulischen Stößel.

Ablaufender Nocken (ohne Belastung)

- Entspannung des Systems
- Spielausgleichsfeder drückt Druckbolzen nach oben bis Stößel am Nocken anliegt
- Kugelventil öffnet sich, Raumvergrößerung im Arbeitsraum (Unterdruck)
- Durch den Systemdruck strömt frisches Öl von außen ein und der Arbeitsraum wird befüllt

Auflaufender Nocken (mit Belastung)

- Kugelventil schließt sich, es baut sich Druck im System auf
- durch die Inkompressibilität von Flüssigkeiten → starre Verbindung

- Nocken wird auf den Stößel auflaufen können, ohne Spiel zu haben und das Ventil betätigen
- *Warum Ringspalt?* (Wärmeausdehnung des Öls ausgleichen)
- Wärmeeintrag: je wärmer das Öl, umso dünnflüssiger
- dadurch wird »Öl« durch den kleinen Ringspalt gepresst (definierte Menge an Öl)
- erfordert die richtige Öl-Viskosität (Zähflüssigkeit, Temperaturabhängig, Fließverhalten), sind an diese Ringspalte angepasst

10) Warum verwendet man bei herkömmlichen 4-Takt-Motoren und Pkw-Dieselmotoren nur noch oben liegende Nockenwellen?

Durch die obenliegende Nockenwelle können die bewegten Massen des Ventiltriebs gering gehalten und somit höhere Drehzahlen erreicht werden. (z. B. Stößelstange, mehr Bewegung → erhöht Reibung und Masse)

11) Welche Nockenausführungen findet man an den Nockenwellen von Verbrennungsmotoren?

1. **spitzer Nocken** (tagenden Nocken)
2. **steiler Nocken** (scharfer Nocken, Kreisbogen Nocken)
3. **unsymmetrischer Nocken**

12) Aus welchem Werkstoff können Nockenwellen bestehen? (keine Prüfung)

1. **Gegossene Nockenwelle**
 - Gusseisen mit Lamellen- o. Kugelgraphit
2. **Gebaute Nockenwelle**
 - Einsatz-, Vergütungs- o. Nitrierstahl

(Eigenschaften: Welche Kräfte wirken? zäh fest versus beweglich)

13) Was versteht man unter desmodromischer Ventilsteuerung?

Bei desmodromischer Ventilsteuerung werden die Einlassventile und Auslassventile jeweils durch einen Öffnungs- und Schließkippebel betätigt.

(Zwangssteuerung, Einsatz: hohe Drehzahlen, AV zuverlässig schließen)

3 Füllungsoptimierung I

3.1 Downsizing (Prüfung)

Verkleinerung der Motoren (Hubraum und Zylinderzahl) bei gleicher Leistung.

3.2 LSPI - Low Speed-Pre-Ignition

LSPI = vorzeitige Zündung, betrifft hoch aufgeladene Downsizing Motoren¹

- **Turbo aufgeladene Motoren**
 - geringes Verdichtungsverhältnis (7-8:1)
 - vor verdichtete Luft wird in den Zylinder eingeblasen und verdichtet
 - Ladedruckregelung (Lastwunsch)
 - vorgewärmte Luft (Ladeluftkühlung)
- **vs. hoch verdichtete Saugmotoren**
 - hohes Verdichtungsverhältnis (10-11:1), endet bei Klopfgrenze

Zwei Zündquellen, Ursache für die Selbstentzündung

1. Niedergeschlagen Kraftstoff in Verbindung mit sehr niedrig Viskoses Öl
 - → ein brennbares Gemisch entsteht, mit einer nicht ganz bekannten Selbstentzündungstemperatur
2. Ölkohlerückstände (Kraftstoffreste) im Bereich der Einspritzdüsen

Durch eine überhohe Verdichtung → steigt Verdichtungsenddruck und damit Verdichtungstemperatur → dadurch hohe thermische Belastung. Die Folge ist ein kapitaler Motorschaden.

Körnerschlag² Kolbensschäden → es entsteht eine Druckspritze bevor der Kolben OT erreicht, eine zweite Flammenfront entsteht, wenn jetzt zwei Flammfronten aufeinandertreffen, entstehen sehr hohe Druckspitzen, auch wenn der Kolben nach UT geht.

¹<https://www.autobild.de/artikel/lspi-vorzeitige-zuendung-16385077.html>

²https://cdn.germanscooterforum.de/monthly_05_2009/post-24449-1241606436.jpg

Kavitation³ Dampfblasenbildung⁴ z. B. Bootsschraube saugt Flüssigkeiten an, Druck fällt ab durch Unterdruck, wenn jetzt die Gasblasen implodieren, entstehen sog. Mikrojets → Druckspitzen.

3.3 Vorteile von Downsizing Motoren

1. Geringere Pumpverluste (2 l vs. 1,2 l bei gleicher Leistung 150 PS)
2. geringere Reibungsverluste aufgrund der geringeren Größe
3. weniger Wärmeübertrag von Gasen zur Zylinderwandung

3.4 Mehrventiltechnik

Fachbuch (Respondeck [5] S. 141)

Um die Zylinderfüllung zu verbessern, werden drei oder mehr Ventile pro Zylinder in Verbrennungsmotoren eingesetzt.

Ziele von Mehrventiltechnik

- Öffnungsquerschnitt der Ventile vergrößern, ohne die Drehzahlfestigkeit durch größere und damit trägere Ventile (mehr Masse) zu mindern.

Vor- und Nachteile von Mehrventiltechnik

- bessere Zylinderfüllung
- Drehzahlfest
- innere Reibung steigt
- Abgaswärmeentzug
 - Der Katalysator kommt schlechter auf Betriebstemperatur, da sich die Abgase an den Abgasrohren abkühlen können.
 - Je mehr Auslassventile vorhanden sind, desto größer ist die Oberfläche der Abgasrohre und desto mehr kühlen die Abgase aus.

Honda NR 750 - Ovale Kolben⁵

Dreiventiltechnik (Vorteile)

- Verbrennungsdruck steigt (kürzere Flammwege)

³<https://prozesstechnik.industrie.de/wp-content/uploads/4/0/40278086.jpg>

⁴<https://www.youtube.com/watch?v=SEGTFbZ5RJ8>

⁵https://de.wikipedia.org/wiki/Honda_NR_750

- geringere Klopfneigung (weniger Zeit zur Gemischerwärmung vor Verbrennungsbeginn)
- Ausstoß unverbrannter Kohlenwasserstoffe verringert sich (Zündkerze ist in der Nähe der Zylinderwand, wo das Kondensat lagert)
- geringere NOx

Vgl. Kapitel »Motorsteuerung / Dreiventiltechnik mit zwei Zündkerzen«

3.5 Nockenwellenverstellung - variable Steuerzeiten

Fachbuch (Brand u. a. [4] S. 249)

Verdrehen der Einlassnockenwelle bzw. der Ein- und Auslassnockenwelle, abhängig von der Motordrehzahl, Motorlast und Temperatur. Hierdurch lässt sich die *Länge der Ventilüberschneidung* anpassen.

Warum machen wir eine Nockenwellenverstellung? (Vorteile)

1. Optimale Zylinderfüllung in den unterschiedlichen Last- und Drehzahlbereichen zu ermöglichen
2. inneres AGR

Ziele der Nockenwellenverstellung

- Wann das Ventil öffnet und schließt zu beeinflussen (variabel)
- bei gleichbleibenden Nocken, Dauer und Öffnungswinkel (Hub) ändern sich nicht
- Verdrehrichtung der Nockenwelle: Früh, Spät

Verstellung der Einlassnockenwelle in Abhängigkeit vom Betriebszustand

Tab. 3.1

Betriebszustand	Leerlauf	Teillast	Volllast
Verstellrichtung NW	Spät	Früh	Spät
Ventilüberschneidung	klein	groß	klein
Abgas	CO sinkt	NOx sinkt	
EV schließt	weit nach UT	kurz nach UT	weit nach UT

Merkmale (Vgl. Tabelle Verstellung der Einlassnockenwelle in Abhängigkeit vom Betriebszustand)

- **Leerlauf** Kein Überströmen von Frischgasen und Abgasen, besserer Verbrennungsverlauf

- **Teillast** Abgase strömen in den Einlasskanal und werden mit den Frischgasen angesaugt. Temperatur sinkt, NO_x-Anteil sinkt
- **Volllast Nachladeeffekt** Frischgase strömen trotz aufwärts gehenden Kolben in den Zylinder nach

Ausgangspunkt → 90er-Jahre, erste Form des AGR (inneres AGR), Drei-Wege-Katalysator, Ottomotor, Euro 2, Teillast (höchste AGR-Rate, 80 km/h auf der Landstraße, keine Lastabfrage, Spritspareffekt, NO_x-Anteil senken)

3.5.1 VarioCam - Verstellbarer Kettenspanner (Audi, VW)

→ Verändern der Ventilöffnungszeit der Einlassnockenwelle

Wie? Vgl. Tabelle Verstellung der Einlassnockenwelle in Abhängigkeit vom Betriebszustand

- KW treibt Auslass-NW an und diese über einer Kette die Einlass-NW
- **Kettenspanner** spannt **Kette nach oben** (federbelastet)
- NW dreht sich **gegen UZS** (Uhrzeigersinn) in **Verstellposition** »spät« (Ausgangslage, Ventilüberschneidung klein)
- SG bestromt Magnetventil, Motoröl fließt in Kettenspanner.
- **Kettenspanner** spannt **Kette nach unten** (Hydraulikzylinder)
- NW dreht sich **im UZS** in **Verstellposition** »früh«, (Ventilüberschneidung groß)

3.5.2 Vanos - Variable Nockenwellensteuerung (BMW)

Wie?

- **Nockenwellenrad und Nockenwelle** sind über ein **steiles Gewinde** miteinander verbunden.
- *Grundposition* NW steht in **Verstellposition** »spät«
- SG bestromt ein Magnetventil (4/2-Wegeventil) → gibt den **Ölzufluss** zum Frühkanal frei
- NW verdreht sich gegen Uhrzeigersinn in **Verstellposition** »früh«
- Durch wechselseitigen Druckaufbau lässt sich die Position der Verstelleinheit halten.

3.5.3 Flügelzellenversteller (Mercedes)

→ Verändern der Steuerzeiten

Wie?

- **Innenrotor** (fest mit NW) und **Außenrotor** (fest mit Kettenrad)
- SG bestromt **Magnetventil** → die **Ölräume** zwischen den Rotorblättern können wechselseitig mit Öl befüllt werden
- Die Kraftübertragung vom Nockenwellenrad auf die NW erfolgt immer über das Öl.
- wird Ölraum rechts vom Innenrotorblatt mit Öl befüllt, kommt es zu einer **Verdrehung der NW gegen UZS** (Uhrzeigersinn) in Richtung »spät«
- wird Ölraum links vom Innenrotorblatt mit Öl befüllt, kommt es zu einer **Verdrehung der NW im UZS** in Richtung »früh«
- Durch wechselseitigen Druckaufbau lässt sich die Position der Verstelleinheit halten.

3.6 Variabler Ventiltrieb

3.6.1 Stufenweise variabler Ventiltrieb

Vorteile

Bessere Zylinderfüllung durch zwei unterschiedliche Nockenprofile

- *obere Drehzahlbereich* → steiler Nocken
 - schnelles Öffnen, lange Öffnungsdauer, schnelles Schließen
- *untere Drehzahlbereich* → spitzer Nocken
 - Verhinderung von ungewollter Abgasrückführung durch zu lange Ventilüberschneidung

3.6.1.1 VTEC - Variable Valve Timing and Lift Electronic Control (Honda)

→ Verändern von Ventilhub und Ventilöffnungszeit

Wie?

- Verstelleinheit liegt in den Schlepphebeln
- **Umschaltung** zwischen dem Nockenprofilen erfolgt durch **Verblocken der Schlepphebel**
- **Schlepphebel entriegelt**
 - Die beiden äußeren Nocken öffnen mithilfe der äußeren Schlepphebel die Ventile.
 - **Spitzer Nocken**
 - * kleiner Ventilhub
 - * kurze Ventilöffnungszeit
 - * *niedrige Drehzahlen*
- SG bestromt Elektromagnet, **Öldruck** verschiebt die **Sperrschieber** und verblockt die Schlepphebel untereinander.
- **Schlepphebel verriegelt**
 - wenn der steile Nocken auf den mittleren Schlepphebel aufläuft, nimmt dieser die beiden äußeren Schlepphebel mit und diese öffnen die Ventile.
 - **Steiler Nocken**
 - * großer Ventilhub
 - * lange Ventilöffnungszeit
 - * *hohe Drehzahlen*

3.6.1.2 VarioCam Plus (Porsche)

→ Verändern von Ventilhub und Ventilöffnungswinkel

Wie?

- Verstelleinheit liegt im Tassenstößel
- SG bestromt **Elektromagnet**, damit wird der **Tassenstößel mit Öldruck** gesteuert
- Diese bestehen aus **zwei Stößeln**, die mithilfe eines **Bolzens** gegeneinander verriegelt werden können.
- innere Stößel → kleinen Nocken

- äußere Stößel → großen Nocken
- **Stößel verriegelt** → große Ventilhub
 - Innere und äußere Stößel wird durch einen Bolzen verriegelt
- **Stößel entriegelt** → kleiner Ventilhub
 - sinkt der Öldruck, wird durch die Federkraft der Bolzen zurückgeschoben

3.6.1.3 Valvelift (Audi, + Zylinderabschaltung)

Wie?

- Änderung des Nockenprofils durch Verschieben der Verstelleinheit (Nockenstück) auf der NW
- SG bestromt **Elektromagnet** → **Metallstift** fährt aus **in eine Spiralnut** und verschiebt das **Nockenstück**
- damit schalte ich zwischen **zwei Nockenprofilen** um
- Arretierung des Nockenstücks erfolgt durch eine federbelastete Kugel.
- **Zylinderabschaltung** (Teillast)
 - Nockenprofil → Nockengrundkreis
 - Die Ventile bleiben bei abgeschaltetem Zylinder geschlossen.

3.6.2 Stufenlos variabler Ventiltrieb

Vorteile

→ Verändern von Ventilhub in allen Drehzahlbereichen

Ziel im unteren Drehzahlbereich: Ein zündbares Gemisch zu realisieren.

Wie?

- Durch geringe Ventilöffnung und damit Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit der Frischgase
 - »Venturi-Prinzip« eine Verengung in einem Strömungskanal
 - * → höhere Strömungsgeschwindigkeit
 - * → bessere Verwirbelung
 - * → bessere Verteilung des Kraftstoff-Luftgemisches
- Drosselklappe könnte wegfallen, wird aber weiterhin verbaut

- **Wozu ist die Drosselklappe dann noch notwendig?**
 - Schaltung des AGR (Abgasrückführung)
 - * Aufbau eines Druckgefälles/Druckdifferenz, durch Schließen der Drosselklappe wird ein Unterdruck erzeugt, was dazu führt, dass die Abgase in den Ansaugtrakt einströmen können
- Notlauf

3.6.2.1 Valvetronic

→ Verändern von Ventilöffnungswinkel (Hub) und Ventilöffnungsdauer (Nockenwellenverstellung)

Wie?

- SG verdreht mithilfe eines **Stellmotors** eine **Exzenterwelle** (Halbmondförmig)
- Druck des Nockens wird zunächst auf einen **Zwischenhebel** übertragen
- Der **Leerweg**, den der Zwischenhebel von der Betätigung durch den Nocken bis zur Übertragung auf das Ventil durchläuft, ist mittels einer Exzenterwelle einstellbar.
- Je größer der Leerweg, desto kleiner der Ventilhub.
- **Ventilhub** 0,3 mm und 9,85 mm

3.6.2.2 Elektrohydraulischer Ventiltrieb (MultiAir)

Vorteil Vollvariable Steuerzeiten

→ stufenlose Veränderung von Ventilhub, Ventilöffnungsdauer und die Anzahl der Ventilhübe der EV

Wie?

- auf der **Auslassnockenwelle** gibt es einen **Extranocken**, über Schlepphebel wird ein **Pumpenelement** betätigt
 - → der erzeugt einen **Öldruck**, um die **Einlassseite** zu steuern,
- **Magnetventil geschlossen** Druck wird auf den Kolben übertragen, Ventil öffnen
- **Magnetventil offen** Ventil schließen. Der Öldruck fließt in den Druckspeicher ab.
- **Vorteil Druckspeicher:** von der Nockenwelle unabhängiger Zeitpunkt, mit Öffnung eines Magnetventils (SG) ein Öldruck aus dem Druckspeicher nutzen, der das **Ventil öffnet/schließt**
- **elektrohydraulisch-pneumatisch** (Ventile unabhängig von NW betätigen, noch nicht in der Großserie)

- chinesische Hersteller Qoros und der schwedische Luxusportwagenhersteller Königsegg

3.6.2.3 Elektromagnetischer Ventiltrieb (noch nicht zur Serienreife geschafft)

Vorteile

- Vollvariable Steuerzeiten
- Anzahl der geöffneten Ventile pro Zylinder frei wählbar
- Zylinderabschaltung (ohne Gaswechselverluste möglich)
- Wegfall von Nockenwellen (Gewichtseinsparung)

Wie?

- Unterstützung des Elektromagneten beim schnellen Öffnen und Schließen des Ventils.
- Abbremsen des Ventils kurz vor den Endstellungen geöffnet und geschlossen
- Ventile beim abgeschalteten oder defekten Systems in halbgeöffnete Stellung bringen, um Motorschäden durch Aufsetzen der Ventile zu verhindern.

3.7 Lösung - Füllungsoptimierung I

1) Warum werden die herkömmlichen Serienmotoren statt mit 2 häufig mit 3 oder 4 Ventilen ausgerüstet?

Mehrventiltechnik ermöglicht eine **bessere Zylinderfüllung** durch **Vergrößerung des Ein- und Auslassquerschnittes** und **Verbesserung der Strömungsverhältnisse** im Zylinder. Dies wäre bedingt auch durch größere Ein- und Auslassventile möglich. Würde aber aufgrund der **größeren bewegten Massen** im Ventiltrieb die **Drehzahlfestigkeit** herabsetzen.

2) Warum rüstet man einen Dreiventilmotor mit 2 Zündkerzen und Doppelzündung aus?

1. Kontrollierte schneller Druckanstieg
2. Kondensierte Kraftstoffbestandteile an der Zylinderwand können durch den Verbrennungsbeginn in Zylinderwandnähe wieder vergasen und wieder an der Verbrennung teilnehmen.
 - Geringere HC-Ausstoß
3. Geringe Aufheizung des Gemisches vor der Verbrennung
 - Geringe Klopfneigung und geringe NO_x-Ausstoß

3) Was versteht man unter variabler Ventilsteuerung?

Bei der variablen Ventilsteuerung werden die **Steuerzeiten** der Einlass- und in manchen Fällen auch die der AV bedarfsgerecht **in Abhängigkeit von Drehzahl und Last** verändert. Dies geschieht **durch Verdrehen der Einlass- bzw. Auslass-NW**.

4) Beschreiben Sie Aufbau und Funktion der »Vario-Cam« - Nockenwellenverstellung.

Das Vario-Cam System besteht aus einer direkt von der KW des Motors angetriebenen Auslass-NW und einer von der Auslass-NW angetriebenen Einlass-NW.

Der **Kettenspanner** der zwischen den NW liegenden Steuerkette ist in der Lage diese sowohl nach oben als auch nach unten zu spannen.

Spannt er die **Kette nach oben**, wird die **Einlass-NW gegen den UZS** (Uhrzeigersinn) in die **Verstellposition spät** gebracht.

Spannt der Kettenspanner die **Kette nach unten**, so verdreht die **Einlass-NW im UZS** (Uhrzeigersinn) in **Verstellposition früh**.

5) Welchen Vorteil bietet das VTEC-System gegenüber einem herkömmlichen Ventiltrieb?

Beim VTEC-System kommen im unteren Drehzahlbereich **spitze** und im oberen Drehzahlbereich **steilen Nocken** zum Einsatz.

Hierdurch wird gewährleistet, dass der Gaswechsel im Zylinder im **unteren Drehzahlbereich** (viel Zeit) stattfinden kann, **ohne die Beimischung von Altgas** durch zu frühes Öffnen der Einlassventile zu riskieren.

Jedoch auch im **oberen Drehzahlbereich** (wenig Zeit) mithilfe einer geänderten Nockenprofils mit längeren Ventilöffnungszeiten ein **zuverlässiger Gaswechsel** gewährleistet werden kann.

6) Wodurch erfolgt die Umschaltung zwischen den Nockenprofilen beim Valvelift-System?

Beim Valvelift-System wird, sobald das SG dies veranlasst, ein **Elektromagnet bestromt**, wodurch ein **Metallstift** ausfährt, der bei ablaufenden Nocken in eine dafür vorgesehene **Verstellnut** einfährt und die gesamte Verstelleinheit auf der Nockenwelle um ca. 7 mm verschiebt bis der **zweite Nocken** gerade über den Rollenschlepphebel steht.

7) Welche Aufgabe haben die Kompressions- und Dekompressionsfedern eines elektromagnetischen Ventiltriebs?

- **Unterstützung** des Elektromagneten **beim schnellen Öffnen und Schließen** des Ventils.
- **Abbremsen des Ventils** kurz vor den Endstellungen geöffnet und geschlossen
- Ventile beim abgeschalteten oder defekten Systems **in halbgeöffnete Stellung** bringen, um Motorschäden durch Aufsetzen der Ventile zu verhindern.

4 Füllungsoptimierung II

4.1 Wie beschreiben Sie die Dynamische Aufladung?

Ausgangslage Ansaugen, Volumenvergrößerung, Druckdifferenz

Die **einströmenden Frischgase** werden am geschlossenen Ventil **reflektiert** und an der bereits im Ansaugrohr stehenden Luftmasse (Außenluft) erneut reflektiert und bewegt sich wieder auf das EV zu und wenn jetzt das Ventil öffnet können die Frischgase schneller in den Zylinder einströmen, weil die **Massenträgheit** einer ruhenden Luftmasse nicht überwunden werden muss.

Wir machen uns hier die **kinetische Energie** der sich bereits **in Bewegung gesetzten Luftmasse** zunutze, sodass der Beginn des Einströmens kein Losbrechmoment der Luftmasse darstellt, sondern eine schon in sich bewegten Luftmasse/Luftsäule zu nutzen und lässt damit das **Einströmen schneller beginnen** und dadurch wird ein besserer Füllungsgrad erreicht (Frischgasanteil steigt, mehr Kraftstoff → mehr Leistung und Drehmoment).

4.1.1 Schwingsaugrohr

Variante

1. **Schaltsaugrohr** einfaches umschalten zwischen
 - **lange Saugrohrlänge** und großes Sammlervolumen, große Massen (sind träge)
 - **unteren Drehzahlbereich**
 - Klappe geschlossen
 - **kurze Saugrohrlänge**, kleine Massen (sind agiler)
 - **oberen Drehzahlbereich**
 - Klappe offen
 - Gassäule kann direkt aus dem Luftsammler in Richtung EV strömen
2. **Stufenlos regelbare Sauganlage**

4.1.2 Resonanzsaugrohr

Beim Resonanzsaugrohr wird nicht der Weg (Saugrohrlänge) den die Luftsäule durchlaufen muss, sondern deren Geschwindigkeit verändert. Dies erreicht man durch Drehzahl-abhängigen zu- und wegschalten einer zusätzlichen Luftmasse im Ansaugrohr.

1. Im **oberen Drehzahlbereich** ist die Luftmasse M_2 durch die **Resonanzklappe** vom Saugrohr getrennt.
 - Die **bewegte Luftmasse** entspricht einer relativ **kleinen Masse** M_1 .
 - Wodurch sie sehr **agil** ist und mit einer hohen Frequenz vom EV zur stehenden Außenluft zurück **reflektiert** werden kann.
2. Im **unteren Drehzahlbereich** wird die **Resonanzklappe** geöffnet und damit die **zusätzliche Luftmasse** M_2 aktiviert.
 - Dadurch wird die Gesamtmasse $M_1 + M_2$ im Saugrohr erhöht, wodurch die **Geschwindigkeit der Luftsäule** abnimmt.
 - Sodass sie die längere Zeit zwischen zwei Ventilöffnungen bei geringerer Drehzahl zur Verfügung steht, um das EV nach ihrer **Reflexion** mit der Außenluft wieder zu erreichen.

4.1.3 Resonanz- und Schwingsaugrohr (keine Prüfung)

Bei einem 6-Zylinder-Reihenmotor werden die *Zylindergruppen 1, 2, 3* und *4, 5, 6* getrennt und damit hat man immer ein Ventil, was sich öffnet und in der anderen Gruppe eins, was sich schließt.

1. Im **unteren Drehzahlbereich** ist die Umschaltklappe geschlossen:
 - Bei der Befüllung der Zylinder 1, 2 und 3 wirkt der Raum vor den Zylindern 4, 5 und 6 als Resonanzraum und umgekehrt.
 - Resonanzaufladung, hier schwingen die Luftmassen von rechts nach links.
2. Im **oberen Drehzahlbereich** ist die Umschaltklappe geöffnet:
 - Die Luft wird direkt angesaugt (kurzer Ansaugweg und hohe Frequenz der Gassäule).
 - Für jeden einzelnen Zylinder lässt man diese Reflexionsphase durchlaufen.

4.2 Fremdaufladung

Die Frischluft wird von einem Gebläse angesaugt und vor verdichtet und mit einem Überdruck an den Motor geliefert.

4.2.1 Abgasturbolader

Das **Turbinenrad** wird durch den Abgasstrom (bis zu $320.000 \text{ min}^{-1} = 5.333 \text{ s}^{-1}$) beschleunigt. Dieses Turbinenrad ist über eine **Welle** mit dem **Verdichterrad** verbunden, das die Frischluft ansaugt und auf bis zu $2,2 \text{ bar}$ verdichtet und an den Motor liefert.

Was versteht man unter Laufzeug? Kombi von Turbinenrad, Welle und Verdichterrad.

4.2.1.1 Turbolader mit Bypass für Ladedruckbegrenzung

Warum Ladedruck begrenzen?

- Klopfgrenze
- Mechanische Überbelastung von Bauteilen

Ladedruckbegrenzung → Ladedruckregelventil (**Wastegate**) oder Bypassklappe

4.2.1.2 VTG-Lader (Variable Turbinengeometrie, meist bei Dieselmotoren)

Konstanten Ladedruck und eine konstante Drehmomentkurve über einen nahezu gesamten Drehzahlbereich.

Beim VTG-Lader sind vor dem Turbinenrad Leitschaufeln angeordnet, die den Einlassquerschnitt abhängig von der Drehzahl anpassen.

1. Im unteren Drehzahlbereich

- d.h. bei einem kleinen Abgasstrom
- verstellen wir die **Leitschaufeln** so, dass der **Querschnitt** klein ist
- bei einer verhältnismäßig großen **Strömungsgeschwindigkeit**
- hier trifft der gesamte **Abgasstrom**
- auf das äußere Ende meines **Turbinenrades**, die wirksame Fläche wird größer
- großen **Hebelarm** und damit mehr Drehmoment

2. Im oberen Drehzahlbereich

- verstellen wir die **Leitschaufeln** so, dass der **Querschnitt** groß ist
- hier trifft der gesamte **Abgasstrom**

- auf die Mitte meines **Turbinenrades**, die wirksame Fläche wird kleiner
- und damit haben wir den **gleichen Ladedruck** wie im unteren Drehzahlbereich

Damit der VTG-Lader auch in **Ottomotoren** eingebaut werden kann, muss darauf geachtet werden, dass die verbauten Materialien eine dementsprechende thermische Belastbarkeit aushalten kann, um eben einen reibungslosen Ablauf zu gewährleisten. Dieselmotoren haben eine geringere Abgastemperatur.

4.2.1.3 Registeraufladung (Stufenaufladung)

- Mitte 90er-Jahre, Audi RS2 und Porsche
- kleiner und großer Turbolader sind in Reihe
- Regelklappen für Abgasstromseite und Frischluftseite
- Ladedruckbegrenzung → **Wastegate** (Bypassventil) stufenlose Ansteuerung über SG

1. unteren Drehzahlbereich:

- Regelklappen geschlossen
- **kleiner Turbo**
 - bei einem kleinen Abgasstrom
 - kommt schneller auf Drehzahl, agiler
 - Warum? Durch geringere Massenträgheit
 - bestimmt Ladedruck
- **großer Turbo**
 - dreht schon mal mit und arbeitet als Vorverdichter für den kleinen Lader

2. mittleren Drehzahlbereich:

- Regelklappen öffnen synchron
- verhindert Drossel Wirkung

3. oberen Drehzahlbereich:

- Regelklappen voll offen
- **kleiner Turbo** läuft ohne Wirkung
- **großer Turbo** bei einem großen Abgasstrom, max. Fördern

Herstellernamen *Twin-Turbo* - Bezeichnung nicht geschützt!

4.2.1.4 Doppelaufladung

- zwei gleich große/kleine Turbolader sind parallel im Verbund
 - Ladedruckbegrenzung → **Wastegate** geöffnet
1. **unteren Drehzahlbereich:** Turbo 1 aktiv
 2. **mittleren Drehzahlbereich:** Turbo 2 läuft an durch Öffnen eines Ventils, die vor verdichtete Luft wird zum Turbo 1 gefördert
 3. **oberen Drehzahlbereich:** beide Turbo's aktiv

Herstellernamen *Bi-Turbo* - Bezeichnung nicht geschützt!

4.2.1.5 Twin-Scroll-Lader

Bei einem 4 Zylinder Motor werden die **Abgasströme** der *Zylinder 1 und 4* sowie der *Zylinder 2 und 3* in getrennten Kanälen zur Turbine geleitet.

Durch Strömung-Impulse (Tick, Tick, ... immer abwechselnd kleiner und großer Kanal) entsteht eine Impulsaufladung auf die Turbinenschaufeln.

Vorteil: keine gegenläufigen Strömungen

1. **kleiner Kanal** leitet den Abgasstrom auf die Innenflächen der Turbinenschaufeln.
 - schnelleres und sensibleres Ansprechverhalten des Laders
2. **großer Kanal** leitet den Abgasstrom auf den Rand der Turbinenschaufeln.
 - sorgt für höhere Drehzahl und Leistung des Turboladers

4.2.2 Mechanische Lader

Der Antrieb erfolgt durch KW über Keilriemen.

4.2.2.1 Schraubenkompressor (Roots-Lader, Kompressor)

Beim Schraubenkompressor verdichten zwei ineinander verdrillte Laderschaufeln/Rotoren die Luft Richtung Einlasskanal.

Ladedruckregelung erfolgt durch Bypassklappe oder Magnetkupplung (Kompressor kann entkoppelt werden, um unnötigen Kraftstoffverbrauch zu reduzieren)

Lastwunsch wird gesteuert durch den Fahrer über → Hauptdrosselklappe

1. **Saugbetrieb / Teillast**
 - Bypassklappe offen, Drossel frei

- Leer fördern lassen (→ d.h. Überschüssige Luft wird auf die Saugseite des Laders gefördert)
- hier herrscht Unterdruck

2. Ladebetrieb / Volllast

- Bypassklappe geschlossen
- voller Ladedruck

4.2.2.2 Comprex-Lader (keine Serienreife, keine Prüfung)

Besteht aus einem rotierenden Röhrenkörper, der von der Kurbelwelle angetrieben wird. Beim Comprex-Lader schiebt Abgas die Frischluft in den Ansaugtrakt. Das erfordert eine präzise Abstimmung auf die Motorsteuerung.

Hyprex-Lader

Der Hyprex-Lader ist eine Weiterentwicklung des Comprex-Laders. Der Röhrenkörper wird durch einen elektronisch geregelten Elektromotor angetrieben.

4.2.2.3 Kombi von Turbolader und Kompressor (VW bei den Twincharger-TSI-Motoren)

Hauptvorteile verknüpfen

- **Kompressor** (im unteren Drehzahlbereich → direktes Ansprechverhalten)
- **Turbolader** (im oberen Drehzahlbereich → nahezu keine Leistungsentnahme vom Verbrennungsmotor)

4.2.3 Elektrische Lader (eLader)

- Antrieb des Verdichterrads: 48 V Elektromotor
- unabhängig vom Abgasstrom und damit kein Turboloch
 - **unteren Drehzahlbereich** → elektrische Lader
 - **oberen Drehzahlbereich** → Abgasturbolader

4.2.4 Warum muss ich die Ladeluft kühlen?

Was begrenzt den maximalen Ladedruck?

Klopfgrenze, **wodurch tritt eine klopfende Verbrennung ein?** Ungewollte Glühzündung, **wodurch entsteht eine Glühzündung?** Durch zu viel Druck und Hitze.

Wenn ich dem System Hitze entziehe, kann ich mit dem Ladedruck höher gehen. Meine angesaugte Luftmasse hat eine höhere Dichte, ich kann gleichzeitig mehr davon reinpacken. Dadurch ist meine Leistungsfähigkeit noch mal gestiegen.

4.3 Lösung - Füllungsoptimierung II

1) Nennen Sie Möglichkeiten zur Leistungssteigerung eines Verbrennungsmotors.

In der mir verfügbaren Zeit möglichst viel Kraftstoff und Luft in den Zylinder zu bekommen. Dieses Kraftstoff-Luft-Gemisch wird zur Verbrennung gebracht und soll meinen Kolben effektiv nach unten treiben.

Mögliche Systeme

1. Einventiltechnik → Mehrventiltechnik
2. Saugmotor → Fremdaufladung
3. Steuerzeiten → variable Steuerzeiten (Nachladeeffekt nutzen)
4. Ventiltrieb → variable Ventiltrieb (unterschiedliche Nockenprofile und Ventilöffnungszeiten)
5. Dynamische Aufladung (Strömungsenergie der bereits bewegten Luftmasse nutzen innerhalb meines Ansaugsystems)
6. Motordrehzahl anheben → z. B. Honda (kleinen Hubraum und hohe Drehzahl)
7. Hubraum vergrößern
8. Zündung optimieren

2) Definieren Sie Dynamische Aufladung und Fremdaufladung

a) Dynamische Aufladung

Die dynamische Aufladung erfolgt ausschließlich durch Nutzung der kinetischen Energie der Gassäule im Ansaugtrakt. Wird das EV geschlossen, kommt es zur Reflexion und an der bereits im Ansaugrohr stehenden Luftmasse (Außenluft) erneut reflektiert und bewegt sich wieder auf das EV zu. Im Idealfall soll die Gassäule wieder vor dem EV stehen, wenn diese gerade öffnet.

Erreichbar ist diese durch

1. dynamische Ansaugwege
 - lange Wege für niedrige Drehzahlen
 - kurze Wege für hohe Drehzahlen
2. Resonanzsaugrohr - durch Änderung der Luftgeschwindigkeit durch zuschaltbare Luftmassen
 - Resonanzklappe offen, zusätzliche Luftmasse aktiviert, das erhöht die Gesamtmasse im Saugrohr, wodurch die Geschwindigkeit der Luftsäule abnimmt (Massenträgheit) → für niedrige Drehzahlen

- Resonanzklappe geschlossen, die bewegte Luftmasse ist gering, sehr agil und mit hoher Frequenz vom EV zu stehenden Außenluft und zurück reflektiert
→ für hohe Drehzahlen

b) Fremdaufladung

Die Frischluft wird von einem Gebläse angesaugt und vor verdichtet und mit einem Überdruck an den Motor geliefert. Füllungsgrad auf bis zu 160% erreicht werden können.

Systeme: Abgasturbolader, eLader, Kompressor

3) Welche Möglichkeiten bieten Schaltsaugrohre?

Sie ermöglichen eine bedarfsgerechte Änderung der Ansaugwege. Diese Maßnahme bewirkt eine Erhöhung der Zylinderfüllung und somit eine Steigerung des Drehmoments bzw. Motorleistung. Die Laufdauer der Luftsäule ändert sich mit der Frequenz.

Schaltsaugrohr einfaches umschalten zwischen

- **lange Saugrohrlänge** und großes Sammlervolumen, große Massen (sind träge)
 - **unteren Drehzahlbereich**
 - Klappe geschlossen
- **kurze Saugrohrlänge**, kleine Massen (sind agiler)
 - **oberen Drehzahlbereich**
 - Klappe offen
 - Gassäule kann direkt aus dem Luftsammler in Richtung EV strömen

4) Wie ist grundsätzlich die Wirkungsweise eines Abgas-Turboladers?

Das **Turbinenrad** wird durch den Abgasstrom beschleunigt. Dieses Turbinenrad ist über eine **Welle** mit dem **Verdichterrad** verbunden, das die Frischluft ansaugt und auf bis zu 2,2 bar verdichtet und an den Motor liefert.

5) Was bedeutet das Kürzel VTG in Verbindung mit Fremdaufladung?

Variable Turbinengeometrie

Beschreiben Sie das Verhalten dieses Laders in Abhängigkeit zur Drehzahl.

$$\uparrow M \approx F \cdot \uparrow r$$

1. Bei **niedriger Drehzahl** mit geringer Abgasmenge wird durch die Leitschaufelstellung ein kleiner Eintrittsquerschnitt bemessen und der Abgasstrom auf den äußeren Rand des Turbinenrades geleitet. Hierdurch wird das Abgas beschleunigt und trifft zudem auf einen langen Hebelarm. Am Turbinenrad entsteht ein großes Moment, die Turbinendrehzahl und der Ladedruck steigen.

2. Bei **hohen Drehzahlen** mit entsprechend größere Abgasmenge wird durch die Leitschaufel ein großer Einlassquerschnitt eingestellt und der Abgasstrom relativ nah an das Zentrum des Turbinenrades geleitet. Die höhere Abgasgeschwindigkeit in Verbindung mit dem größeren Abgasvolumen kompensiert den kleinen Hebelarm am Turbinenrad. Wodurch der Ladedruck konstant bleibt.

6) Warum werden VTG-Lader nur bei Dieselmotoren verwendet?

Die Abgastemperatur bei Ottomotoren ist im Volllastbereich bis zu 1000 °C (im Vergleich Dieselmotor bis ca. 800 °C) zu hoch. Die Temperatur am Verstellmechanismus darf 850 °C nicht übersteigen, da dieser sonst ausfallen könnte.

Ergänzung, dies gilt nicht für moderne VTG-Lader mit Molybdän beschichteten Verstellmechanismus. Diese sind für den Einsatz im Ottomotor geeignet.

7) Beschreiben Sie Aufbau und Wirkungsweise der Doppel- und Registeraufladung

a) Doppelaufladung

- zwei gleich große/kleine Turbolader sind parallel im Verbund
 - Ladedruckbegrenzung → **Wastegate** geöffnet
1. **unteren Drehzahlbereich:** Turbo 1 aktiv
 2. **mittleren Drehzahlbereich:** Turbo 2 läuft an durch Öffnen eines Ventils, die vor verdichtete Luft wird zum Turbo 1 gefördert
 3. **oberen Drehzahlbereich:** beide Turbo's aktiv

b) Registeraufladung

- kleiner und großer Turbolader sind in Reihe
 - Regelklappen für Abgasstromseite und Frischluftseite
 - Ladedruckbegrenzung → **Wastegate** (Bypassventil) stufenlose Ansteuerung über SG
1. **unteren Drehzahlbereich:**
 - Regelklappen geschlossen
 - **kleiner Turbo**, geringe Massenträgheit
 - bei einem kleinen Abgasstrom
 - kommt schneller auf Drehzahl, agiler
 - Warum? Durch geringere Massenträgheit
 - bestimmt Ladedruck
 - **großer Turbo**
 - dreht schon mal mit und arbeitet als Vorverdichter für den kleinen Lader

2. **mittleren Drehzahlbereich:**

- Regelklappen öffnen synchron
- verhindert Drossel Wirkung

3. **oberen Drehzahlbereich:**

- Regelklappen voll offen
- **kleiner Turbo** läuft ohne Wirkung
- **großer Turbo** bei einem großen Abgasstrom, max. Fördern

8) **Welchen Vorteil erreicht man durch die Ladeluftkühlung?**

Eine bessere Zylinderfüllung durch höhere Luftdichte. Durch Senkung der Ladelufttemperatur z. B. 120 °C auf 70 °C (ca. 50 °C abkühlen) niedrige Verbrennungstemperatur, Selbstentzündungstemperatur wird später erreicht, geringere Klopfneigung und dadurch höhere Ladedrücke.

Innere Kühlung

1. durch die Temperatur der angesaugten Luftmasse wird das innere des Zylinders gekühlt
2. Kraftstoff wird flüssig in den Zylinder eingespritzt und fängt an, an der umgebenen Wärme gasförmig zu werden. Durch den Aggregatzustandswechsel von flüssig in gasförmig entsteht ein Druckverlust und dadurch entziehen wir der Umgebungsluft Wärme.

9) **Was versteht man unter »Downsizing«?**

Verkleinerung der Verbrennungsmotoren (Hubraum und Zylinderzahl) bei gleicher Leistung.

Warum macht man das? Durch Verringern des Hubraums oder wegfallen einzelne Zylinder verringern wir die Reibungsverluste und damit einen geringeren Verlust der erzeugten Leistung. Um Kraftstoff zu sparen.

10) **Wodurch ist die Leistungssteigerung durch Aufladung eines Otto-Motors begrenzt?**

Ladedruck kann nicht unbegrenzt erhöht werden. **Warum?** Durch die Klopfgrenze des Kraftstoff-Luft-Gemisches. Lädt man einen Ottomotor zu stark auf, kommt es zu einer ungewollten Kompressionszündung, der sogenannten klopfenden Verbrennung.

Klopfgrenze, wodurch tritt eine klopfende Verbrennung ein? Ungewollte Glühzündung, **wodurch entsteht eine Glühzündung?** Durch zu viel Druck und Hitze.

11) **Wassereinspritzung**

Aufbau: Wassertank, Einspritzdüsen

Sinn?

4 Füllungsoptimierung II

- dem Brennraum die Temperatur entziehen
- dadurch Klopfneigung reduzieren
- Ladedruck erhöhen
- Leistung ausschöpfen

Kompensieren der Außentemperatur z. B. 40 °C

- durch mehr Wasser Einspritzen
- wird vom Motorsteuergerät überwacht
- Last/Drehzahl abhängig
- Ansaugluft 25 °C zusätzlich runterkühlen
- 8 % höhere Leistung und gleichzeitig 8 % Kraftstoffeinsparung

Vorteil

Die Temperaturen von → Kolbenboden, Ventile, Katalysator, Lader entlasten.

Einspritzung - Zerstäubung unter einem hohen Druck möglichst fein zerstäuben (Mehrlöchdüse) Tröpfchenbildung (Kugeloberfläche). Je feiner ich zerstäube, umso höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass ich einen vollständigen Verdunstungsprozess habe, der dazu führt, dass ich im Idealfall keinerlei Rußbildung erzeuge. Bei bestimmten Lastzuständen, hohen Einspritzdruck und kurzer Einspritzzeit habe ich das Problem, dass die Tröpfchengröße ansteigt und so zu einer Entstehung von Ruß kommt.

5 Betriebs- und Hilfsstoffe

5.1 Was sind Betriebsstoffe?

Sind Stoffe, die zum Betrieb des Kraftfahrzeuges nötig sind.

Beispiele: Kraftstoffe, Motoröl, Bremsflüssigkeit

5.2 Was sind Hilfsstoffe?

Sind alle Stoffe, die zum Warten, Reinigen und Pflegen von Fahrzeugen notwendig sind.

Beispiele: Politur, Bremsenreiniger, Scheibenreiniger

5.3 Scheibenwaschwasserzusatz

- **Sommer** mit Enzymen (Insektenreste besser entfernen)
- **Winter** mit Gefrierschutz

5.4 Woraus bestehen Kraftstoffe?

Kraftstoffe sind hauptsächlich Kohlen - Wasserstoff - Verbindungen (geringer Anteil Schwefel). Die Anzahl der Atome und deren Verbindungen bestimmen die Art des Kraftstoffes. Zur Verbesserung der Eigenschaften werden ihnen Additive zugefügt.

Was unterscheidet Otto- vom Dieseldieselkraftstoff?

- die Struktur der Verbindungen
- Größe der Moleküle
- zahlenmäßige Verhältnisse der Atome

Benzin: ringförmiger Molekülaufbau, Oktanzahl → Zündunwillig

Diesel: kettenförmiger Molekülaufbau, Cetanzahl → Zündwilligkeit

Wirkungsgrad eines Verbrennungsmotors

1. Dieselmotoren ca. 46 % und Ottomotoren ca. 35 % → Bewegungsenergie als Antriebsenergie für Motor
 2. Rest in Reibung und Wärme
- **Oktanzahl** Klopfestigkeit des Kraftstoffes
 - »Je klopfester der Kraftstoff ist, umso höher kann er eine thermische Belastung aushalten, ohne sich selbst zu entzünden.«
 - **Cetanzahl** Zündwilligkeit von Diesekraftstoff (Wie stark ein Kraftstoff zur Selbstzündung neigt)
 - **Zündverzug** $\frac{1}{1000}$ s (eines intakten Motors ohne Verbrennungsstörung)

Aufbau der Kohlenwasserstoffmoleküle

1. **einfache Kettenform**, zündwillig und verbrennen leicht (nicht klopfest)
 2. **verzweigte Kettenform** (Isomere) zündunwillig (klopfest)
- **Paraffine** kettenförmiger Aufbau, wenig klopfest,
 - gasförmig – bei niedrigem Druck verflüssigtes Treibgas, (Beispiel: Propan)
 - flüssig – bestandteile des Benzins und Diesekraftstoffes, (Beispiel: Oktan, Cetan)
 - **Isoparaffine** kettenförmiger Aufbau, mit Seitenketten, verzweigt, sehr klopfest
 - Bestandteil des Eichkraftstoffes für Ottokraftstoffe, (Beispiel: Isooktan)
 - **Aromaten** ringförmiger Aufbau, sehr klopfest, häufig mit Doppelbindung, (Beispiel: Benzol)

5.5 Wo kommen die Kraftstoffe her?

1. **Erdöl** aus ca. 80 % Kohlenstoff und 12 % Wasserstoff, ca. 1–3 % Schwefel
2. **E-Fuels** Kraftstoffe aus dem CO₂ der Luft, klimaneutral⁶
 - Stromerzeuger: Windrad oder Solarenergie
 - Offshore-Windparks sind Windparks, die im Küstenvorfeld der Meere errichtet werden.
 - haben keine Speicher, Wechselspannung kann nicht gespeichert werden

⁶<https://www.youtube.com/watch?v=qq0fj10LQXo>

5.6 Warum ist ein Dieselmotor effizienter als ein Ottomotor?

- Energiedichte höher
- Wirkungsgrad höher gegenüber Ottomotor
- Wärmeabführung geringer

5.7 Herstellung von Kraftstoffen

Trennverfahren

1. **Filtern** Verunreinigungen werden aus dem Rohöl entfernt
2. **Destillieren** Trennen, *Atmosphärische Destillation* (Druck bei 1013 mbar) und *Vakuum Destillation* (bei Unterdruck, um Siedepunkt herabzusetzen)
3. **Raffinieren** Nachbehandeln, Reinigen

Destillieren von Rohöl

Fraktionierende Destillation darunter versteht man das Aufteilen von Rohöl nach Siedebereichen. Hierzu wird das Rohöl erhitzt und in eine Kolonne geleitet, wo die einzelnen Bestandteile kondensieren und über Glockenböden abgeführt werden.

Gase die dabei entstehen sind:

1. Propan
2. Butan
3. Methan

Die anfallenden Produkte sind

1. Leicht- und Schwerbenzin
2. Petroleum
3. Diesel
4. Gas- und Spindelöle
5. Mineralische Motoröle
6. Zylinderöl
7. Bitumen

Umwandlungsverfahren

1. **Cracken** nennt man das Spalten von schwer siedende (langkettige) Kohlenwasserstoffmolekülen in leicht siedende (kurzkettige) Kohlenwasserstoffmoleküle, wodurch die Klopfestigkeit eines Kraftstoffs erhöht wird. Langkettige Kohlenwasserstoffmoleküle sind »schwer siedend und reaktionsfreudig«. Kurzkettige Kohlenwasserstoffmoleküle sind »leicht siedend und reaktionsträge«.

- *Crackarten:* thermisches Cracken, katalytisches Cracken und Hydrocracken

2. **Reformieren** Kettenförmige Paraffine aus der Destillation werden mit Katalysatoren (Platin) in klopfeste Isoparaffine und Aromate umgewandelt
3. **Polymerisieren**, die beim Cracken und Reformieren entstandenen gasförmigen Kohlenwasserstoffe werden über Katalysatoren zu größeren Molekülen zusammengeballt, hauptsächlich zu Isoparaffinen

Katalysator ist ein Stoff, der die Reaktionsgeschwindigkeit einer chemischen Reaktion beeinflusst, ohne dabei selbst verbraucht zu werden.

Bemerkung: Katalysator **altern** vs. Beispiel Bremsbelag **verschleissen** (Reibung)

Schwefel giftig und hat schmierende Wirkung → Kraftstoff entschwefeln (Ersatzstoff gesucht) und **Harz** betrifft Oldtimer, wo die Einspritzung verharzen kann.

5.8 Ottokraftstoffe – leicht siedende Kraftstoffe

Bemerkung:

- **Flammpunkt** beschreibt den Punkt oberhalb einer Flüssigkeit um eine Flamme entstehen lassen zu können durch eine fremde Zündquelle d.h. beginn des Ausgasens eines Kraftstoffes um über ihn ein Zündfähiges Gemisch bilden zu können, was sich durch eine extreme Zündquelle endzünden kann vs. **Selbstentzündungstemperatur** entzündet sich selbst (Dieselkraftstoff)
- **Siedepunkt** Übergang vom flüssigen in den gasförmigen Zustand
- **Klopfestigkeit** geringe Neigung eines Kraftstoffes, sich unter hohen Temperaturen und Drücken selbst zu entzünden

Anforderungen an Ottokraftstoff (Prüfung)

- leicht und vollständig vergasen, leicht siedend
- hohe klopfestigkeit
- geringe Neigung zur Dampfblasenbildung
- Korrosionsschutz Eigenschaft
- hohe Alterungsbeständigkeit
- geringe Belastung mit Emmisionsfördernden Stoffen

1. **Flammpunkt** unter $< -35\text{ °C}$
2. **Siedeverlauf** beim Ottomotor muss der Kraftstoff leicht und vollständig vergasen, da nur gasförmiger Kraftstoff verbrannt werden kann.
3. **Siedebereich** Verdampfen zwischen 30 °C und 215 °C
4. **Kaltstartverhalten** damit ein kalter bzw. noch nicht betriebswarmer Motor bei niedrigen Temperaturen sicher anspringt und im Leerlauf rund läuft, benötigt er einen Kraftstoff mit niedriger Siedekurve.
 - **E70-Punkt** verdampfter Anteil bei 70 °C
 - **T10-Punkt** Temperatur, bei dem 10 % des Kraftstoffs verdampft sind
5. **Heisstartverhalten** Bei einem betriebswarmen oder heißen Motor sowie im Sommer besteht die Gefahr der Dampfblasenbildung im Kraftstoffsystem. (zu viel Luft)
Beispiel: K-Jetronic
 - **E180-Punkt** verdampfter Anteil bei 180 °C
 - **T90-Punkt** Temperatur, bei dem 90 % des Kraftstoffs verdampft sind
6. **Klopffestigkeit**
 - Maß für die Klopffestigkeit (\rightarrow wie stark ein Kraftstoff zur Selbstzündung neigt)
 - ROZ (Research-Oktanzahl)
 - MOZ (Motor-Oktanzahl) \rightarrow wird unter anderen Prüfbedingungen ermittelt
 - Was gibt die Oktanzahl an?
 - wie viel Vol.-% Iso-Oktan sich in einem Bezugskraftstoff befinden
 - Oktanzahl bestimmen
 - Beispiel: Super (ROZ 95 \rightarrow 95 % Isooktan und Normalheptan 5 %)
 - Wird in einem Prüfmotor mit variablem Verdichtungsverhältnis ermittelt, in dem der Kraftstoff mit einem Referenzkraftstoff aus Normalheptan (ROZ = 0, kloppfreudig) und Isooktan (ROZ = 100, kloppfest) verglichen wird.
7. **Arten von Klopfbremsen** (Maßnahmen, um die Klopffestigkeit zu erhöhen)
 - metallhaltig, sind Verboten (verbleite Benzin)
 - metallfreien Klopfbremsen wie Benzol, begrenzt auf 1 Vol.-% sind stark krebserregend, sind sehr effektiv
 - organischen Sauerstoff-Verbindungen wie Alkohole, Ethanol

5.9 Bremsflüssigkeit

hygroskopisch entzieht aus der Umgebungsluft Feuchtigkeit, wird eingezogen in die Bremsflüssigkeit und verteilt sich gleichmäßig im System. (Vorteil)

Trockensiedepunkt / Mindestsiedepunkte: DOT₃ = 205 °C, DOT₄ = 230 °C, DOT_{5.1} = 260 °C

Eigenschaften von DOT₄

- hat einen hohen Trockensiedepunkt ≥ 230 °C (Mindestsiedepunkt)
- hat einen hohen Nasssiedepunkt ≥ 170 °C
- hygroskopisch, entzieht der atmosphärischen Luft die Feuchtigkeit und speichert diese.
- ist hochgiftig, 100 cm³ sind bereits tödlich
- Aggressiv, greift Lacke und die menschliche Haut an

DOT_{5.1}

- nicht Mischbar mit DOT_{3/4}
- hydrophob (wassermeidend, Wasser in Tropfenform, Vgl. hygroskopisch)
- Einsatz: Militär, Harley
- Farbe: blau

Nass-Siedepunkt ist der Siedepunkt bei 3,5 °C Wasseranteil. (nach ca. 2 Jahren erreicht)
Vgl. Tabelle

Tab. 5.1

Wassergehalt	DOT ₃	DOT ₄	DOT _{5.1}
0,8 %	200 °C	220 °C	245 °C
2 %	160 °C	190 °C	210 °C
3,5 %	140 °C	165 °C	180 °C

»Je höher der Anteil an Wasser, desto niedriger wird der Siedepunkt.« Gefahr der Dampfblasenbildung durch die beim Bremsen entstehenden Wärme.

5.10 Kühlflüssigkeit

- Gemisch aus (Kalkarmen) Wasser und Gefrierschutzmittel
- Gefrierschutzmittel **Glykol** senkt die Gefriertemperatur
- Kühlflüssigkeit enthält ab Werk meist zwischen 40 % und 50 % Gefrierschutzmittel
- Standards: von VW **G11** (grün/blaugrün), **G12** (Pink), **G13** (rotviolet), sowie von BASF **Glysantin**
- G11 mit (G12 oder G13) **nicht mischbar** (Motor - »Aluverträglichkeit«)
- Messen: Refraktometer oder Messspindel (Aräometer)

G13

1. dieselben Kühl- und Gefrierschutzeigenschaften wie G12++, wird aber aus **Glyzerin** statt aus *Glykol* hergestellt.
2. Glyzerin ist erheblich weniger umweltschädlich als Glykol.
3. hervorragende Kühleigenschaften und bietet Schutz vor Korrosion und Kalkablagerungen.

5.11 AdBlue

- ist eine Mischung aus 32,5 % (ca. $\frac{1}{3}$) Harnstoff und Demineralisierten Wasser
- Harnstoff dient als Trägerflüssigkeit für den giftigen Ammoniak, der zur Reduktion von Stickoxiden durch das SCR-System benötigt wird.
- gefriert bei $-11,5\text{ }^{\circ}\text{C}$

chemische Prozess Dosierventil → **Hydrolysestrecke** Harnstoff → Ammoniak (Reduktionsmittel, Gefahrstoff, giftig) → SCR-Katalysator → NO_x + Ammoniak (NH_3) → umgewandelt in Stickstoff + Wasser

1. **Oxidationskatalysator** (Sauerstoff wird frei), Arbeitsbereich $400 - 800\text{ }^{\circ}\text{C}$, ca. $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ »light-off-Point« (50 % Umwandlungsrate)
 - Benzin: $\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$, $\text{HC} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$, $\text{NO}_x \rightarrow \text{N}_2 + \text{O}_2$
 - Diesel: $\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2$, $\text{HC} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
 - (Kohlenmonoxid in Kohlenstoffdioxid, unverbrannte Kohlenwasserstoffe in Kohlenstoffdioxid und Wasser, Stickoxide in Stickstoff und Sauerstoff)
2. **Dieselpartikelfilter** (DPF-Regeneration) ab ca. $600\text{ }^{\circ}\text{C}$
 - $\text{PM} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ (Partikel und Sauerstoff in Kohlenstoffdioxid)

- Regeneration (angesammelten Partikel im Partikelfilter verbrennen, Staudruck, Differenzdrucksensor)
 - Nacheinspritzung in Verbrennungsraum: Dabei wird der Kraftstoff erst sehr spät in den Brennraum eingespritzt, wodurch die Flamme bis in den Ausstoßtakt brennt und die Abgastemperatur im Partikelfilter steigt.
 - Auspufföffnungs-Einspritzung über ein EPI-Ventils (Exhaust Port Injection) direkt in den Abgaskrümmer
- 3. **SCR-Katalysator** (selektive katalytische Reduktion) ab ca. 170 – 250 °C
 - Stickoxidreduktion: $\text{NO}_x + \text{NH}_3 \rightarrow \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$ (Stickoxide und Ammoniak in Stickstoff und Wasser)
- 4. **NOx-Speicherkatalysator** wird von Schwefelbestandteilen zugesetzt und muss regeneriert werden.

Wenn der Schadstoffausstoß steigt, führt das zum Erlöschen der Betriebserlaubnis (Abgasemissionsklasse nicht mehr gültig, bedeutet **Steuerhinterziehung**)

5.12 Ölverdünnung oder Ölvermehrung

ACHTUNG: Ein zu hoher Ölstand kann ein Indiz für eine Ölverdünnung sein durch häufige Kaltstarts.

- schädlich für Motoröl und Katalysator
- beim Diesel: lange Stillstandszeiten (vgl. Biodiesel – Wasser anziehend)
- wenn Dieselmotorkraftstoff in das Motoröl gelangt
 - Beispiel: DPF-Regeneration → Nacheinspritzung und den an den Kolbenringen abfließenden Kraftstoff kommt es zu Motorproblemen durch Ölverdünnung (zu hoher Ölstand, schlechte Ölqualität)

5.13 Kältemittel

GWP (Global Warming Potential, Treibhauspotenzial) gibt den Treibhauseffekt eines Stoffes im Vergleich zu Kohlendioxid an. Welche Auswirkungen ein Stoff auf die Umwelt hat?

Treibhauseffekt bezeichnet die Erwärmung der Erde durch Reflektion von Wärmestrahlung in der Atmosphäre.

R134a (Tetrafluorethan) hat seinen Siedepunkt bei ca. –26 °C bei atmosphärischem Druck. Bei 15 bar Überdruck liegt der Siedepunkt von R134a bereits bei ca. 55 °C.

- GWP-Faktor 1430

R1234yf (Tetrafluorpropen) verhält sich ähnlich (Siedetemperatur bei Atmosphärendruck -29 °C).

- GWP-Faktor 4

R744 (CO_2) sind höhere Drücke in der Klimaanlage erforderlich.

- GWP-Faktor 1

R12 enthält Fluorchlorkohlenwasserstoffe (**FCKW**), die in der Atmosphäre die Ozonschicht zerstören. Seit 1991 wurde daher **R134a** (ohne Chlorverbindungen) verwendet und 2017 meist durch **R1234yf** abgelöst.

Diffusion beschreibt einen physikalischen Prozess, bei dem sich zwei Stoffe nach und nach durchmischen, bzw. ein Stoff einen anderen durchdringt. (Beispiel: Bremsflüssigkeit, Kältemittel)

5.14 Biodiesel – Fatty Acid Methyl Esther (kurz: FAME)

entsteht, indem ölhaltige Erzeugnisse, wie Raps mithilfe von Ethanol oder Methanol nachbehandelt werden. Dieser Vorgang wird als »umestern« bezeichnet. Biodiesel kommt entweder als Reinkraftstoff oder als bis zu 7%ige Beimischung zum Dieselmotorkraftstoff (sog. Petrodiesel) zum Einsatz.

Eigenschaften von Biodiesel und Folgen für den Einsatz im Verbrennungsmotor:

1. **Umweltfreundlich** (hängt stark von der Umsetzung ab, Einsatz fossiler Energieträger reduziert und den Ausstoß von Treibhausgasen mindert.)
2. **Korrosiv** (kann zur Zersetzung führen, Beispiel: Dichtungen und Schläuchen)
3. **Reinigend** (kann Filtersysteme oder kraftstoffführende Bauteile verstopfen)
4. **Hygroskopisch** (zieht aufgrund seines Alkoholanteils Wasser an) **erhöhter Wasseranteil kann zu folgenden Erscheinungen führen**
 - Heraufsetzung des Kalter-Filter-Verstopfungs-Punkt (**CFPP**)
 - Die Wasserbestandteile stocken wesentlich früher aus, was bei Temperaturen unter 0 °C zum Verstopfen des Kraftstofffilters führen kann.
 - Übersäuerung des Kraftstoffs
 - pH-Wert kann sinken, dass Korrosionsschutzschichten angegriffen werden.
 - Förderung des Wachstums von Bakterien (**Dieselpest**)
 - Verstopfung von Filter durch Bakterienkulturen

- Erosive Schädigung des Einspritzsystems: Die Mikroorganismen werden mit hoher Geschwindigkeit durch das Einspritzsystem gefördert und tragen dabei oberflächlich Material ab. Das kann zu Undichtigkeiten führen (Beispiel: Dichtsitz des Injektors).
 - Kavitation
 - Durch den Abfall des Siedepunkts (Diesel vs. Wasser) kann es zu Folgeerscheinungen (Beispiel: Druckabfall, Undichtigkeit) kommen.
5. **Hoher Flammpunkt** (Biodiesel vs. Diesel)
- Während Dieseldieselkraftstoff bei betriebswarmen Motor zumindest teilweise verdampft und über die Kurbelgehäuseentlüftung abgeführt wird, bleibt der Biodiesel nahezu vollständig im Motoröl enthalten. Dies führt zu Ölverdünnung und Überfüllung.
6. **Geringer Energiegehalt** (Leistungsrückgang bzw. ein Mehrverbrauch)
7. **Biologisch abbaubar**
8. **Nahezu schwefelfrei**
- Vorteil, wenn Fahrzeug über NOx-Speicherkatalysator verfügt.

Erosion feine Partikel in der Luft oder in Flüssigkeiten tragen Material von der Oberfläche ab (durch Reibung oder Schleifen).

5.15 Bioethanol (Ottomotoren)

Benzin

1. **Super E5** Gemisch aus 95 % Benzin und bis zu 5 % Bioethanol
2. **E10** Gemisch aus 90 % Benzin und bis zu 10 % Bioethanol
3. **E85** (85 % Ethanol) in Diskussion (vgl. Ethanol)

Es wurde eingeführt, um den Anteil regenerativer Energiequellen am Kraftstoff zu erhöhen.

Ethanol

- *Nachteil:* geringer Heizwert (hoher Verbrauch, geringe Reichweite)
- *Nachteil:* Ethanol wirkt als Lösungsmittel und kann Dichtungen angreifen
- *Vorteil:* Klopffest, steigert die Oktanzahl (ROZ₁₀₄)
- *Eigenschaften:* ungiftig, regenerativ, korrosiv, hygroskopisch, bei Raumtemperatur flüssiger Alkohol

5.16 Gasförmige Kraftstoffe (Motoren mit Fremdzündung)

1. **Autogas** / Flüssiggas / **LPG** (Liquefied Petroleum Gas)
 - Gemisch aus Propan und Butan
 - Speicherung: *flüssig* bei niedrigem Druck ca. 2 – 10 bar
 - Sommermischung 60 % Butan und 40 % Propan
 - Wintermischung 40 % Butan und 60 % Propan
2. **Erdgas**
 - Gasgemisch, Hauptbestandteil ist **Methan**
 - Speicherung: **CNG** (Compressed Natural Gas, komprimiertes Gas) *gasförmig* bei Umgebungstemperatur und 200 bar
 - Speicherung: **LNG** (Liquefied Natural Gas) *flüssig* bei -160 °C und 2 bar
3. **Wasserstoff**
 - ideale Kraftstoff (unbegrenzte Verfügbarkeit, Energiegehalt, Verbindungseigenschaften)

Wie wird Wasserstoff gewonnen? Wasserstoff wird durch Elektrolyse gewonnen. Dabei wird mithilfe der elektrischen Energie Wasser in Wasserstoff (H_2) und Sauerstoff (O_2) zerlegt.

Brennstoffzellen (kalte Verbrennung) sind elektrochemische Zellen, mit denen die chemische Energie eines geeigneten Brennstoffs (Methanol) mit Sauerstoff (O_2) aus der Luft ununterbrochen in elektrische Energie umgewandelt werden kann.

5.17 Dieselkraftstoff – schwer siedende Kraftstoffe

Anforderung an Dieselkraftstoff

- hohe zündwilligkeit
 - gute Korrosionsschutz Eigenschaft
 - hohe alterungsbeständigkeit
 - geringe Belastung mit Emmisionsfördernden Stoffen
 - gute Schmiereigenschaft
1. **Flammpunkt** über $> 55\text{ °C}$
 2. **Siedebereich** Verdampfen zwischen 170 °C und 380 °C

3. **Selbstentzündungstemperatur** ca. 220 °C

Additivierung / Additive und Auswirkung

1. **Fließverbesserer** (kältefest, filtrierbar / filtergängig)
2. **Schmierfähigkeit** (Schwefelersatz)
3. **Biozide** sollen das Bakterienwachstum im Dieseldieselkraftstoff verhindern. Diese würden zu folgenden Problemen im Einspritzsystem führen:
 - Verstopfen der Filtersysteme durch die lebenden oder abgestorbenen Bakterien
 - Erosionsschäden durch die mit hoher Geschwindigkeit und hohem Druck durch das Einspritzsystem geförderten Bakterien (ähnlich Sandstrahleneffekt)
 - Korrosionsschäden durch die Bakterien Exkremente (H_2SO_3 und H_2SO_4)
4. **Zündbeschleuniger** (Cetanzahl erhöhen, Verringerung des Zündverzugs, schnelleres Eintreten des Verbrennungsprozesses)

Cetanzahl ist ein Maß für die Zündwilligkeit von Dieseldieselkraftstoff.

CFPP (Cold Filter Plugging Point, Kalter-Filter-Verstopfungs-Punkt) gibt die Temperatur an, dass den Filter für Kraftstoff nicht mehr durchfließen kann.

Winterdiesel ist Dieseldieselkraftstoff, der einen geringeren CFPP aufweist. Dieseldieselkraftstoff enthält Paraffin, das bei geringen Temperaturen kristallisiert. Die entstandenen Kristalle setzen sich in den Kraftstofffilter und verstopfen diesen.

Schwefel hat Schmierwirkung (Ausgleich durch Additive)

- beim Verbrennen: von Schwefel und Wasser → **Folge** Säure / Übersäuren (vgl. Eigenschaften von Biodiesel)
- für NO_x-Speicherkatalysator sollte Schwefelanteil gering sein

5.18 Schmieröle

Aufgaben

1. Schmieren (Lager, Gleitstellen von Kolben und Zylinder)
2. Kühlen (ableiten der Wärme vom Kolben)
3. Abdichten (Zwischen Kolbenringen und Zylinderlaufbuchsen, Feinabdichtung an Radialwellendichtringe)
4. Reinigen (Aufnehmen von Verbrennungsrückständen, Abrieb, Wasser, Säuren)
5. Geräusche dämpfen

Anforderung an Motorenöle

1. hoher Viskositätsindex (Änderung der Viskosität über der Temperatur)
2. hohe Temperaturbeständigkeit
3. geringe Verdampfungsneigung (geringer Ölverbrauch)
4. Öl soll einen niedrigen Stockpunkt haben
5. soll weiterhin eine hohe Schmutz- und Säureaufnahmefähigkeit besitzen
6. niedrigen Schwefel-, Asche- und Phosphorgehalt

Merkmale von Vollsynthetischen Öl

1. **Sehr hoher Viskositätsindex** (stabile Schmierung über einen großen Temperaturbereich)
2. **Gute Fließfähigkeit** (Kraftstoffeinsparung und schnelle Förderung des Öls an die Schmierstellen bei sehr niedrigen Temperaturen)
3. **Hohe Druckfestigkeit** (Schmierfilm wird auch bei starker Druckbelastung nicht unterbrochen)
4. **Gutes Schmutztrageverhalten** (Abrieb oder Verbrennungsrückstände werden im Öl in Schwebe gehalten)
5. **Sehr alterungsbeständig** (deshalb sind Langzeitölwechselintervalle bei Verbrennungsmotoren möglich)
6. **Geringe Verdampfungsverluste** (niedriger Ölverbrauch auch bei hohen thermischen Belastungen)

Nachteil: Höhere Herstellungskosten

Bemerkung: beim Wechsel von Mineralöl zu Synthetiköl ist das erste Wechselintervall aufgrund der starken reinigenden Wirkung verkürzt werden muss.

Einteilung der Motoröle

1. **SAE-Viskositätsklassen:** (Auswahl nach Temperaturbereich, seit 1911, beginnt bei SAE 0 bis 60)
 - Einbereichsölen (Beispiel: SAE 50)
 - Mehrbereichsölen (Beispiel: SAE 0W-40)
2. **Motoröl Klassifizierung**
 - **API** höhere Anforderungen
 - S-Klassen für Ottomotoren
 - C-Klassen für Dieselmotoren
 - **ACEA** (europäische Klasse) Mindestanforderungen an die Qualität

- A-Klassen-Öle für Ottomotoren
- B-Klassen-Öle für Pkw-Dieselmotoren
- E-Klassen-Öle für Nfz-Dieselmotoren

- ILSAC International

Freigabe-Vorschriften der Hersteller beachten, um Motorschäden oder Schäden an der Einspritzanlage zu vermeiden.

Mehrbereichsöle sind Schmieröle, die mehr als eine Viskositätsklasse abdecken. *Beispiel:* **SAE 15W-40** verhält sich bei tiefen Temperaturen wie ein Öl der Klasse 15W und bei hohen Temperaturen wie ein SAE 40 Öl.

»Je kleiner die Zahl vor dem W, desto fließfähiger ist das Öl in der Kälte und je höher die SAE-Kennzahl, desto zähflüssiger ist das Öl.«

- **Kaltstart** (Kaltstarterleichterung → geringe Reibung und schnelle Durchölung bei niedrigen Außentemperaturen) und
- **Wärmebelastbarkeit** (Temperaturfestigkeit bei hohen Temperaturen und gute Schmierfähigkeit)

Was bedeutet bei der SAE-Klasse 10W-40 der Buchstabe W?

Der Buchstabe W bedeutet Winter.

Was sind Leichtlauföle?

Als Leichtlauföle (z.B. 0W-30) bezeichnet man Mehrbereichsöle, die ein sehr gutes Niedrigtemperaturverhalten (geringe Reibung bei Kaltstart) und bei hohen Temperaturen eine Viskosität wie ein Einbereichsöl SAE 30 bieten.

Warum sind bei Dieselmotoren mit Dieselpartikelfiltern spezielle Öle erforderlich?

Um einen niedrigen Schwefel-, Asche- und Phosphorgehalt zu erreichen. Ascherückstände aus dem Öl lagern sich in den Dieselpartikelfiltern ab und verringern dessen Speicherkapazität. Da Ascherückstände selbst bei hohen Temperaturen nicht frei gebrannt werden können, kommt es zum Ausfall des Filters.

Viskosität ist ein Maß für die Zähflüssigkeit von Flüssigkeiten.

Unter Viskosität versteht man die Eigenschaft einer Flüssigkeit ihrer Verformung einen Widerstand entgegenzusetzen.

Öl hat eine *niedrige Viskosität* und damit einen niedrigen Verformungswiderstand, wenn es dünnflüssig (fließfähiger, Leichtlauffeffekt) ist und eine *hohe Viskosität*, wenn es Zähflüssig ist.

Die Tragfähigkeit des Schmierfilms ist allerdings bei höheren Viskosität besser als bei einer niedrigen.

Ermittlung der Viskosität eines Öls

1. Kinematische Viskosität (Kapillarviskosimeter)
2. Dynamische Viskosität (Rotationsviskosimeter)

Nenne 5 – 7x Additive und Eigenschaften

1. **Detergents** Schmutz lösen (von Metalloberflächen Beispiel: Kolben und Ölleitungen, halten dadurch geschmierte Oberflächen sauber)
2. **Dispersants** Schmutz in der Schwebe halten (verhindern Ablagerungen, Schlamm-bildung)
3. **Verschleißschutzzusätze** (EP - Extreme Pressure) (die unter hohen Druck stehen-den metallischen Gleitflächen einen übermäßigen Verschleiß verhindern, Beispiel: Zahnradflanken oder zwischen Nocken und Tassenstößel)
4. **Korrosionsschutzzusätze** (bauen auf nicht mehr Ölbenetzten Metalloberflächen was-serabweisende Schutzfilme auf, schützen vor aggressiven Verbrennungsrückständen und neutralisieren Säuren)
5. **Reibwertveränderer** (beeinflussen gezielt den Reibwert zwischen Materialpaarun-gen. Beispiel: erforderlich bei Synchrongetrieben, Nasskupplungen, Lamellenkupp-lung in Automatikgetrieben)
6. **Alterungsschutzadditive** (verhindern die Oxidation des Öls unter Einfluss von Wärme und Sauerstoff)
7. **Stockpunktniedriger** (verbessert die Fließeigenschaften des Öls bei tiefen Tempe-raturen. Beispiel: verringert Motorverschleiß bei Kaltstart)
8. **Antischaum** verhindern die Schaumbildung im Öl. (durch bewegte Teile)
9. **VI-Verbesserer** (Viskositätsverbesserer) sind im kalten Zustand zusammengeknäu-elt im Öl enthalten. Erwärmt sich das Öl entknäueln sie sich und nehmen ein größeres Volumen ein. Dadurch wirken sie der zunehmenden Düninflüssigkeit des Öls bei Erwärmung entgegen und können einen belastungsfähigeren Schmierfilm aufbauen.

Pourpoint (Grenzpumptemperatur) ist die Temperatur, bei der das Öl gerade noch fließt.

Stockpunkt gibt die Temperatur an, bei der das Öl »stockt«. Dadurch ist gewährleistet, dass beim Motorstart genügend Öl zur Ölpumpe und in den Schmierölkreislauf fließt.

Schlammablagerungen wird durch Alterungsprodukte, Ruß, unverbrannte Kraftstoffres-te, Stickoxide und Wasser verursacht. → **Folgen** sind Verstopfen von Ölleitungen und Ölfiltern, erzeugen von Fressschäden an Kolben und Zylinderlaufbahnen sowie Lager-schäden.

Schaumbildung dadurch wird der Ölfilm unterbrochen, Ölalterung beschleunigt und die Kompressibilität des Öls erhöht. → **Folgen** (1) Schmiereigenschaften verringert sich, dadurch sind Fressschäden möglich. (2) Ölwechselintervalle verkürzen sich (3) Störung bei der Kraftübertragung durch verringerten Druckaufbau in hydraulischen Schaltelemen-ten

Wodurch altert Öl? Ölanalyse⁷

1. Druck und Temperatur
2. Sauerstoff (O₂)
3. Laufkilometer und Zeit

Neues Öl ist basisch (Vgl. »Motor sauer fahren«).

5.19 Getriebeöle

Anforderungen

1. Verschleißschutz (an Zahnflanken und Lagerlaufflächen. Besonders bei Hypoidantrieben kann der Schmierfilm weg gequetscht werden, was zu erhöhtem Verschleiß führt.)
2. Unterschiedliches Reibverhalten (beim Synchronisieren muss der Ölfilm abgetragen werden können)
3. Alterungsschutz (über die gesamte Lebensdauer)
4. Dichtungsverträglichkeit

Welche Viskositätsklassen gelten für Mehrbereichsgetriebeöle?

1. SAE 80W-90
2. SAE 75W-90 (Leichtlauf-Getriebeöl)

Nennen Sie die Besonderheit der Getriebeöle für Hypoidachsen.

Getriebeöle für Hypoidachsen sind, um den Verschleiß gering zu halten, mit einem sehr hohen Anteil an EP-Zusätzen (Extrem Pressure, Lasttrageverhalten) versehen, die an den Metalloberflächen Schutzschichten bilden, damit der Schmierfilm zwischen den Zahnradflanken nicht weggedrückt wird.

Welche Aufgaben/Anforderungen haben Automatikgetriebeöle?

1. Drehmomentübertragung von Pumpen- zum Turbinenrad
2. Schmieren von Lager, Planetenrädern und Freiläufe,
3. Betätigen von Lamellenkupplungen

⁷<https://de.oelcheck.com/>

5.20 Schmierfette

Schmierfette sind eingedickte Schmieröle. Sie bestehen aus einer Basisflüssigkeit (Mineralöl), die durch Gerüstbildner (Eindicker, bilden Struktur des Fettes) zu einer pastenartigen Masse stabilisieren.

Konsistenz ist der Widerstand eines Fettes gegen Verformung. Die Eindringtiefe eines genormten Kegels in das Fett führt zur Einteilung in die NLGI-Klassen.

NLGI-Klassen (vgl. Tabelle)

Tab. 5.2

Konsistenz	Eigenschaft	Verwendung
Klasse 000 – 1	sehr weich	Fließfette
Klasse 2 – 3	weich	Abschmierfette
Klasse 4 – 5	fest	Wasserpumpenfette

Eigenschaften von Schmierfetten (vgl. Tabelle)

Tab. 5.3

Seifenbasis	wasserfest	Verwendung	Temperaturbereich [°C]
Kalziumseifenfett	ja	Abschmierfett	–40 ... 60
Natriumseifenfett	nein	Wälzlagerfett	max. 100
Lithiumseifenfett	ja	Mehrzweckfett	–20 ... 130

EP-Schmierfette (Extreme-Pressure, können hohen Drücken standhalten)

Hochtemperaturfette (> 130°C)

Tropfpunkt ist die Temperatur, bei der unter Prüfbedingungen, der erste Tropfen des schmelzenden Schmierfettes abtropft.

5.21 Lösung - Betriebs- u. Hilfsstoffe

1) Was versteht man unter einer fraktionierenden Destillation und welche Produkte fallen dabei an?

Unter fraktionierender Destillation versteht man das Aufteilen von Rohöl nach Siedebereichen. Hierzu wird das Rohöl erhitzt und in eine Kolonne geleitet, wo die einzelnen Bestandteile kondensieren und über Glockenböden abgeführt werden.

Gase die dabei entstehen sind:

1. Propan
2. Butan
3. Methan

Die anfallenden Produkte sind

1. Leicht- und Schwerbenzin
2. Petroleum
3. Diesel
4. Gas- und Spindelöle
5. Mineralische Motoröle
6. Zylinderöl
7. Bitumen

2) Was versteht man unter Viskosität? (Prüfung)

Unter Viskosität versteht man die Eigenschaft einer Flüssigkeit ihrer Verformung einen Widerstand entgegenzusetzen.

3) Was versteht man unter Cracken und was wird dadurch erreicht? Welche Arten von Cracken gibt es?

Cracken nennt man das Spalten von schwer siedende (langkettige) Kohlenwasserstoffmolekülen in leicht siedende (kurzkettige) Kohlenwasserstoffmoleküle, wodurch die Klopfbarkeit eines Kraftstoffs erhöht wird. Langkettige Kohlenwasserstoffmoleküle sind »schwer siedend und reaktionsfreudig«. Kurzkettige Kohlenwasserstoffmoleküle sind »leicht siedend und reaktionsträge«.

Crackarten: thermisches Cracken, katalytisches Cracken und Hydrocracken.

Katalysator ist ein Stoff, der die Reaktionsgeschwindigkeit einer chemischen Reaktion beeinflusst, ohne dabei selbst verbraucht zu werden.

4) Was gibt die Cetanzahl an?

Das ist ein Maß für die Zündwilligkeit von Dieseldieselkraftstoff.

5) Welche Aufgabe haben Biozide als Additiv im Dieselkraftstoff?

Biozide sollen das Bakterienwachstum im Dieselkraftstoff verhindern. Diese würden zu folgenden Problemen im Einspritzsystem führen:

- Verstopfen der Filtersysteme durch die lebenden oder abgestorbenen Bakterien
- Erosionsschäden durch die mit hoher Geschwindigkeit und hohem Druck durch das Einspritzsystem geförderten Bakterien (ähnlich Sandstrahleneffekt)
- Korrosionsschäden durch die Bakterien Exkremente H_2SO_3 und H_2SO_4

6) Warum dürfen moderne Dieselmotoren keinesfalls mit Ottokraftstoff betrieben werden?

Dieselmotoren erfüllen neben ihrer Hauptaufgabe, als Energielieferant noch die Aufgabe, die Bauteile des Einspritzsystems zu schmieren.

Diese Aufgabe kann Ottokraftstoff nicht übernehmen. Der Schmierfilm in den Bauteilen der Einspritzanlage, vorwiegend in der Hochdruckpumpe, reißt ab. Es kommt zur Trockenreibung und damit zur Zerstörung der Bauteile.

Alte Dieseleinspritzsysteme waren demgegenüber weniger anfällig, weshalb je nach Hersteller eine Beimischung von bis zu 50 % Ottokraftstoff möglich war.

7) Was versteht man unter E10-Kraftstoff?

Unter E10 Kraftstoff versteht man ein Gemisch aus 90 % Benzin und bis zu 10 % Bioethanol. Es wurde eingeführt, um den Anteil regenerativer Energiequellen am Kraftstoff zu erhöhen.

8) Welche Anforderungen werden an Motoröl gestellt?

1. hoher Viskositätsindex (Änderung der Viskosität über der Temperatur)
2. hohe Temperaturbeständigkeit
3. geringe Verdampfungsneigung (geringer Ölverbrauch)
4. Öl soll einen niedrigen Stockpunkt haben
5. soll weiterhin eine hohe Schmutz- und Säureaufnahmefähigkeit besitzen

9) Welche Gruppen von Fetten unterscheidet man?

1. Lithiumseifenfett
2. Natriumseifenfett
3. Kalziumseifenfett

10) Welche Eigenschaften hat Bremsflüssigkeit (DOT4)?

- hat einen hohen Trockensiedepunkt ≥ 230 °C (Mindestsiedepunkt)
- hat einen hohen Nasssiedepunkt ≥ 170 °C

5 Betriebs- und Hilfsstoffe

- hygroskopisch, entzieht der atmosphärischen Luft die Feuchtigkeit und speichert diese.
- ist hochgiftig, 100 cm³ sind bereits tödlich
- Aggressiv, greift Lacke und die menschliche Haut an

6 Klimaanlage

6.1 Aktive und Passive Sicherheit

Aktive Sicherheit Maßnahmen zur Vermeidung von Unfällen

- *Beispiele:* ABS, ESP, Klima, Scheibenwischer, ACC (adaptive Geschwindigkeitsregelung)

Passive Sicherheit Maßnahmen zur Minderung von Unfallfolgen

- *Beispiele:* Airbag (Fahrer-, Beifahrer-, Kopf- und Seitenairbags), Gurtstraffer, Batterietrennschalter (Kurzschluss, Brandgefahr), Motorhaubenaufsteller

Airbag löst nach ca. 15 – 50 ms aus (Zündung – Entfaltung), Crashsensoren: max. 30° Aufprallwinkel zur Längsachse

Gurtstraffer zieht Gurt nach ca. 20 – 25 ms bis zu 15 cm ein.

6.2 Aufbau und Funktionsweise einer Klimaanlage

Luftgütesensor: misst Schadstoffe in der Außenluft (Frischlufte vs. Innenraumluft)

Wärme vs. negative Wärme (Kälte)

Enthalpie Element, das eine bestimmte Wärmeenergie hat

Komponenten

1. **Magnetkupplung** Verbindung zwischen Riemenscheibe und Antriebswelle
 - Spaltmaß: 0,4 – 0,6 mm
2. **Kompressor** Kältemittel verdichten
 - Taumelscheibenverdichter (Förderleistung variieren)
 - Flügelzellenverdichter
 - Spiralverdichter (Hybrid- und Elektrofahrzeuge)
 - Kompressor mit variablem Hub und externer Regelung (PWM-Signal)
3. **Trockner** Kältemittel trocknen, filtern, beruhigen, Sammler

4. **Expansionsventil** regelt Kältemittelzufluss zum Verdampfer, um zu verhindern, dass der Kompressor flüssiges Kältemittel ansaugt (Flüssigkeitsschlag)
5. **Druckschalter und Überdruckventil** Schutz der Klimaanlage
 - Kühlerlüfter / Kondensatorgebläse
 - EIN: ~ 16 bar, AUS: ~ 10 bar
 - Magnetkupplung
 - Druckschalter: Druck zu niedrig ~ 2 bar, Druck zu hoch ~ 28 bar
 - Verdampfersonde / Vereisungssensor
 - Vereisungsschutz EIN $> +4^{\circ}\text{C}$, AUS $< 0^{\circ}\text{C}$

Funktion

Kältemittel nimmt Energie auf und gibt sie wieder ab bei Änderung seines Aggregatzustandes.

Bei geringem Druck und niedriger Temperatur verdampft Kältemittel. Der Siedepunkt kann durch Druckänderung verschoben werden. Erhöht man den Druck, dann steigt die Verdampfungstemperatur.

Beispiel: R134a

- Atmosphärische Druck: ca. 1 bar \rightarrow Siedepunkt: ca. -26°C
- Überdruck: ca. 15 bar \rightarrow Siedepunkt: ca. 55°C

Verdampfer verdampfen, Energie aufnehmen, *Wärme_zu*, aus der Umgebung wird Wärme entzogen. Notwendig, wenn man eine Flüssigkeit verdampfen möchte. (flüssig \rightarrow gasförmig)

vs.

Kondensator kondensieren, Energie abgeben, *Wärme_ab* an die Umgebung (gasförmig \rightarrow flüssig)

Wärmepumpe Heizen (PTC) und Kühlen

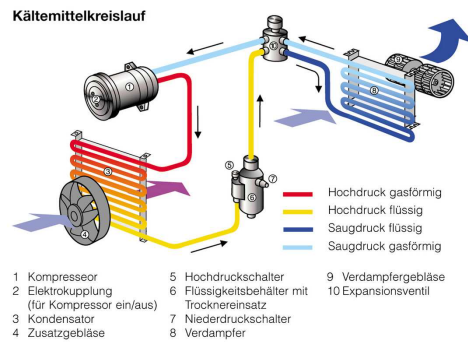


Abb. 6.1: Klimakreislauf

6.3 Kältemittelkreislauf

1. **Kompressor** (Gasverdichter, Komprimieren, Druck steigt, gasförmig) der kalte Dampf (gasförmig) wird abgesaugt und verdichtet. Dadurch steigt Druck und Temperatur des Gases.
 - Umlauf des Kältemittels
 - Fördermenge beeinflusst Kälteleistung
2. **Kondensator** (Verflüssiger, Kondensieren) das unter hohen Druck stehende heiße Gas wird in den Kondensator gepresst. Durch den Fahrtwind / Lüfter wird das heiße Gas abgekühlt und verflüssigt. Je besser gekühlt wird, desto geringer der Druck.
 - Aggregatzustandswechsel: gasförmig → flüssig (Druck ist konstant)
 - **Trockner** flüssiges Kältemittel wird entfeuchtet und gefiltert.
3. **Expansionsventil** (Dosiereinheit, Druckminderer, Drossel, Expandieren, flüssig) Kältemittel expandiert (Druck sinkt) und regelt die Menge des Kältemittels zum Verdampfer.
4. **Verdampfer** (Verdampfen) warme Luft bringt das entspannte flüssige Kältemittel bei geringer Temperatur zum Verdampfen. Dabei entzieht das Kältemittel der Luft Wärme und kühlt sie ab.
 - Aggregatzustandswechsel: flüssig → gasförmig (Druck ist konstant)

6.4 Klimaservice

Ruhedruck (Motor aus)

- Kältemitteldruck abhängig von Umgebungstemperatur (Vgl. Dampftafel / Richtwerte Schmidt [7] S. 120)

Betriebsdruck (Motor an im LL, Klima ON, max. Gebläse, Keine Umluft, Heizung OFF, Temp. LOW, 5 – 10 Min. laufen lassen)

- **Sollwerte** Quelle: Andreas Lamm⁸
- ND 1 – 3 bar
- HD 7 – 20 bar
- Kühlung
 - Außentemperatur 20°C → 2 – 8°C **Ausströmtemperatur**
 - Außentemperatur 30°C → < 15°C Ausströmtemperatur

Klimadiagnose

1. Betriebsdruck (Vgl. Sollwerte)
 - **Läuft Kondensatorlüfter?**
 - Wenn Defroster EIN, dann muss Lüfter laufen!
2. Ausströmtemperatur (Vgl. Sollwerte)
3. Zustand Kältemittel (Schauglas)

Vgl. *Diagnosetabelle*

Tab. 6.1

Hochdruck	Niederdruck	Ursache
normal, zu hoch	zu niedrig	Expansionsventil, Filter, Kondensator
normal, zu niedrig	zu hoch	zu viel Kältemittel, Kompressor
normal, zu niedrig	zu niedrig	zu wenig Kältemittel, Magnetkupplung
zu niedrig	zu hoch	zu viel Kältemittel, Kondensator, Kondensatorlüfter

Anhand der Leitungstemperaturen auf mögliche defekte im Kältemittelkreislauf schließen (Schmidt [7] S. 115).

Übersicht über fehlerhafte Füllmengen und Komponenten die sich an den Druckmanometern widerspiegeln können (Schmidt [7] S. 116 – 117).

Magnetkupplung am Kompressor prüfen

1. Spannungsversorgung prüfen (Verkabelung, Sicherung, Relais)
 1. Magnetkupplung (Spannung am Verbraucher) Soll: 12 V

⁸<https://klimacheck.com/>

2. Masseanschluss (gegen Masse) Soll: 0 V
 3. Relais (gegen Masse) Soll: 12 V
 4. Druckschalter (gegen Masse) Soll: 12 V
2. Temperatur- und Druckschalter, Steuergerät, Luftspalt

Kondensatorlüfter prüfen

- Sicherung, Relais, Verkabelung, Motor, Schwergängigkeit

Klima-Service-Gerät

- Vakuumzeit $60 \text{ Min/kg} \cdot \text{Kältemittelmenge [kg]}$ ($1 \text{ h} \hat{=} 1 \text{ kg}$)
- Füllung
- Kompressor-Öl

Phasen

1. **Absaugen** (von Kältemittel und Kompressoröl)
2. **Evakuieren** (Vakuum, Wasser entfernen, Dichtigkeit prüfen)
3. **Aufbereiten** (Kältemittel von Wasser und Öl trennen und wiegen)
4. **Auffüllen** (von Kältemittel und Kompressoröl)

Verlust an Kältemittel [%] $= \frac{\text{abgesaugte Menge}}{\text{Füllmenge}} \cdot 100$ Beispiel: $\frac{180 \text{ g}}{640 \text{ g}} \cdot 100 = 28 \%$

Jährlich ca. 10 % Verlust normal.

7 Matheaufgaben

7.1 Druckberechnung am Pleuellager

Kolbenflächenberechnung: $A = \frac{d^2}{4} \cdot \pi$

Kolbendurchmesser $d = 80 \text{ mm} = 8 \text{ cm}$

$$A_{\text{Kolben}} = \frac{(80 \text{ mm})^2}{4} \cdot \pi = 5026,55 \text{ mm}^2 = 50,27 \text{ cm}^2$$

Kolbenkraftberechnung: $\text{Druck} = \frac{\text{Kraft}}{\text{Fläche}}$

$$p = \frac{F}{A} \quad p [N/cm^2] \quad F [N] \quad A [cm^2] \quad 10 \text{ N/cm}^2 = 1 \text{ bar}$$

Verbrennungsdrücke:

Benzin $\rightarrow 65 \text{ bar} = 650 \text{ N/cm}^2$ Diesel $\rightarrow 180 \text{ bar} = 1800 \text{ N/cm}^2$

$$F = p \cdot A$$

$$F_{\text{Kolben}_B} = 50,27 \text{ cm}^2 \cdot 650 \text{ N/cm}^2 = 32675,5 \text{ N}$$

$$F_{\text{Kolben}_D} = 50,27 \text{ cm}^2 \cdot 1800 \text{ N/cm}^2 = 90486 \text{ N}$$

Kreisbogenberechnung: $A = \frac{d \cdot \pi}{2} \cdot b$

$$d_{\text{Kurbelwelle}} = 60 \text{ mm} = 6 \text{ cm}$$

$$d_{\text{Lager}} = 25 \text{ mm} = 2,5 \text{ cm}$$

$$A_{\text{Krb}} = \frac{6 \text{ cm} \cdot \pi}{2} \cdot 2,5 \text{ cm} = 23,56 \text{ cm}^2$$

Druckberechnung Pleelfuß:

$$p_{\text{Pleuel}_{\text{Benzin}}} = \frac{F}{A} = \frac{32675,5 \text{ N}}{23,56 \text{ cm}^2} = 1386,91 \text{ N/cm}^2 = 138,69 \text{ bar}$$

$$p_{\text{Pleuel}_{\text{Diesel}}} = \frac{F}{A} = \frac{90486 \text{ N}}{23,56 \text{ cm}^2} = 3840,66 \text{ N/cm}^2 = 384,07 \text{ bar}$$

Versorgungsdruck (Öldruck) max. 5 bar

$$\rightarrow p_{\text{Pleuel}_{\text{Benzin}}} : 138,69 \text{ bar}$$

$$\rightarrow p_{\text{Pleuel}_{\text{Diesel}}} : 384,07 \text{ bar}$$

Vgl. Kapitel »Motormechanik / Hydrodynamischer Schmierkeil«

7.2 Motorberechnung - siehe Datenblatt Audi S6

Tabellenbuch (Bell, Elbl und Schüler [2] S. 32 - 33) FS (Bell, Elbl und Schüler [1] S. 32 - 37)

Aufgabe 1a Zylinderhubraum

geg: $V_H = 4172 \text{ cm}^3, z = 8$

ges: V_h

Formel: $V_H = V_h \cdot z \rightarrow V_h = \frac{V_H}{z}$

Lösung: $V_h = 521,5 \text{ cm}^3$

Aufgabe 1b Bohrung

geg: $s = 9,3 \text{ cm}, V_h = 521,5 \text{ cm}^3$

ges: d

Formel: $V_h = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot s \rightarrow d = \sqrt{\frac{V_h \cdot 4}{\pi \cdot s}}$

Lösung: $d = 8,4497 \text{ cm} = 84,4969 \text{ mm}$

Aufgabe 1c Verdichtungsraum

geg: $\epsilon = 11 : 1, V_h = 521,5 \text{ cm}^3$

ges: V_c

Formel: $V_c = \frac{V_h}{\epsilon - 1}$

Lösung: $V_c = 52,15 \text{ cm}^3$

Aufgabe 1d Hubraumleistung in KW

geg: $P_{eff} = 250 \text{ KW}, V_H = 4172 \text{ cm}^3 = 4,172 \text{ l}$

ges: P_H

Formel: $P_H = \frac{P_{eff}}{V_H}$

Lösung: $P_H = 59,9233 \text{ KW/l}$

spezifische Leistung (\rightarrow Literleistung, bessere Vergleichbarkeit)

Umrechnungsfaktor

$1 \text{ PS} = 0,735 \text{ KW}$	$1 \text{ KW} = 1,36 \text{ PS}$
-----------------------------------	----------------------------------

$\frac{81,4 \text{ PS/l}}{1,36} = 59,85 \text{ KW}$

Aufgabe 1e

geg: $M = 420 \text{ Nm}, n = 3400 \text{ U/min}$

ges: P_{eff}

Formel: $P_{eff} = \frac{M \cdot n}{9550}$

Lösung: $P_{eff} = 149,5288 \text{ KW}$

Aufgabe 1f Effektiven Kolbendruck bei maximaler Leistung

geg: $P_{eff} = 250 \text{ KW}$, $V_H = 4,172 \text{ l}$, $n = 7000 \text{ U/min}$

ges: p_{eff}

Formel: $p_{eff} = \frac{1200 \cdot P_{eff}}{V_H} \cdot n$

Lösung: $p_{eff} = 10,2726 \text{ bar}$

Aufgabe 1g mittlere Kolbengeschwindigkeit bei maximaler Leistung

geg: $s = 0,093 \text{ m}$, $n = 7000 \text{ U/min}$

ges: v_m

Formel: $v_m = \frac{s \cdot n}{30}$

Lösung: $v_m = 21,7 \text{ m/s}$

(Standard v_m : Otto = 9 – 16 m/s, Diesel = 8 – 14 m/s, zwei Nullpunkte: OT, UT)

Aufgabe 2 Motortyp nach Art der Motorsteuerung

- »double overhead camshaft« (dohc)
- zwei Nockenwellen über Zylinderkopf

Aufgabe 3 Hub-Bohrung-Verhältnis

Hub > Bohrung, $s > d$, $93 \text{ mm} > 84,5 \text{ mm}$ Langhuber

oder

$$\alpha = \frac{s}{d} = \frac{93}{84,5} = 1,1$$

$\alpha > 1$ Langhuber, $\alpha = 1$ Quadrathuber, $\alpha < 1$ Kurzhuber

Aufgabe 4 elastischer Bereich

Drehzahlbereich vom Maximalen Drehmoment zur Maximalen Leistung: 3400 – 7000 U/min

7.3 Druck - Volumen - Temperatur

Verhältnis von Druck, Volumen und Temperatur beim Verdichten

Verdichtung

10 : 1

Zustand	1	2	3
V₁	500 cm ³	$\frac{500 \text{ cm}^3}{10} = 50 \text{ cm}^3$	$\frac{500 \text{ cm}^3}{10} = 50 \text{ cm}^3$
p₁	1 bar	$1 \text{ bar} * 10 = 10 \text{ bar}$	$10 \text{ bar} * 2 = 20 \text{ bar}$
T₁	293,2 K 20 °C	293,2 K	$293,15 \text{ K} * 2 = 586,3 \text{ K}$ 313,2 °C
<hr/>			
Kolben in UT		Kolben in OT	Kolben in OT
		Verdichtungswärme unberücksichtigt	Verdichtungswärme berücksichtigt

Verhindert man die Ausdehnung, z. B. beim Verdichten, so verdoppelt sich der Druck.

7.4 Motor - Hubraum - Verdichtung

Motor - Hubraum - Verdichtung

pi	=	3,14159		
d	=	8,5 cm	85 mm	Bohrung
s	=	9,71 cm	97,1 mm	Hub
VH	=	2204 cm ³	2,204 l	
Vh	=	551 cm ³	100 cm ³	0,1 l
z	=	4	Zylinderanzahl	Otto 10 : 1
ε	=	16,7	:	1 Diesel 20 : 1

Hubraum

$$V_h = (\pi \times d^2 / 4) \times s$$

Civic	2	3
551 cm ³	500 cm ³	500 cm ³

Gesamthubraum

$$VH = V_h \times z$$

2204 cm ³	2000 cm ³	2000 cm ³
----------------------	----------------------	----------------------

Verdichtungsraum

$$V_c = \frac{V_h}{\epsilon - 1}$$

35 cm ³	100 cm ³	50 cm ³
--------------------	---------------------	--------------------

Verdichtungsverhältnis

$$\epsilon = \frac{V_h}{V_c} + 1$$

16,7 : 1	6,0 : 1	11,0 : 1
----------	---------	----------

Verbrennungsraum

$$V_c + V_h$$

586 cm ³	600 cm ³	550 cm ³
---------------------	---------------------	---------------------

OT, UT

Totpunkte, Umkehrpunkte, Kolben steht still

Bogenlänge

$$l_b = \frac{\pi \times s \times \alpha}{360^\circ}$$

3,46 cm

Hub

$$s = \frac{4 \times V_h}{\pi \times d^2}$$

8,81 cm

Literaturverzeichnis

- [1] Marco Bell, Helmut Elbl und Wilhelm Schüler. *Formelsammlung Fahrzeugtechnik*. ger. 10., überarbeitete und erweiterte Auflage. Hamburg: Handwerk und Technik, 2020. ISBN: 9783582515902.
- [2] Marco Bell, Helmut Elbl und Wilhelm Schüler. *Tabellenbuch Fahrzeugtechnik*. ger. 29., völlig überarbeitete Auflage. Fahrzeugtechnik. Hamburg: Handwerk und Technik, 2021. ISBN: 9783582939579.
- [3] Marco Bell, Helmut Elbl, Wilhelm Schüler und Bell. *Technische Mathematik Fahrzeugtechnik*. ger. 5., überarbeitete Auflage. Fahrzeugtechnik. Stuttgart: Handwerk und Technik, 2016. ISBN: 9783778235409.
- [4] Monika Brand, Richard Fischer, Rolf Gscheidle, Tobias Gscheidle, Uwe Heider, Berthold Hohmann, Wolfgang Keil, Rainer Lohuis, Jochen Mann, David Renz, Bernd Schlögl und Alois Wimmer. *Fachkunde Kraftfahrzeugtechnik*. ger. 31., neubearbeitete Auflage, korrigierter Nachdruck. Europa-Fachbuchreihe für Kraftfahrzeugtechnik. Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 2020. ISBN: 9783808523254.
- [5] Michael Respondeck. *Servicetechniker Band 1*. German. Vogel Business Media GmbH & Co. KG, 2019. ISBN: 9783834333759.
- [6] Volkert Schlüter und Ralf Deussen. *Prüfungsfragen und Antworten für das Kfz-Techniker-Handwerk*. German. 2021. ISBN: 9783834362742. URL: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:101:1-2021060315504020014374> (besucht am 3. Nov. 2021).
- [7] T. Schmidt. *Praxiswissen Pkw-Klimaanlagen – Technik, Service, Diagnose*. 2., erw. Aufl. Krafthand Medien GmbH, 2015. ISBN: 9783874411325.
- [8] Gerald Schneeage. *Motormanagement Sensoren Aufbau, Funktion und Prüfung mit dem Oszilloskop*. German. Krafthand Medien GmbH, 2021. ISBN: 9783874411868.