

Moderne Diesel-Einspritzanlagen

**Manuskript zur Weiterbildungsveranstaltung des Landesinstitutes
für Pädagogik und Medien (LPM)
am 04.11.1999**

Ort: Technisch-gewerblichen und sozialpflegerischen Berufsbildungszentrum Merzig
Waldstrasse 51 – 53
66663 Merzig

Autor: Ralf Schuhmacher, BBZ Merzig

1. Anforderungen an moderne Einspritzanlagen / Begriffserklärungen

An das Kraftstoffeinspritzsystem moderner Dieselmotoren werden hohe Anforderungen gestellt:

1.1. Einspritzdruck

je höher der Einspritzdruck, desto geringer wird der Anteil von Partikeln und unverbrannten HC im Abgas

je höher der Einspritzdruck desto feiner die Zerstäubung und desto besser die Durchmischung von Kraftstoff mit der Luft → vollständiger die Verbrennung da Gefahr von (örtlichem) Luftmangel geringer.

Mit Einspritzdrücken **bis etwa 1000 bar** kann man die Rußemissionen von direkt einspritzenden Dieselmotoren insbesondere bei kleiner Motordrehzahl stark vermindern.

Höhere Einspritzdrücke erhöhen den Kraftstoffverbrauch nennenswert, unter anderem weil die Antriebsleistung für die Einspritzpumpe steigt.¹

Anmerkung: Bei Dieselmotoren mit unterteiltem Brennraum (Kammermotoren) werden mit Drücken über 350 bar keine Vorteile erreicht, da die hohen Luftgeschwindigkeiten im Nebenbrennraum und im Verbindungskanal eine ausreichende Durchmischung gewährleisten².

je höher der Einspritzdruck desto höher das erzeugbare Drehmoment (bzw. die erreichbare Motorleistung)

Für die Einspritzung steht nur eine kurze Zeit zur Verfügung (Verbrennung im Kolben). Daher Einspritzung nur während der Zeitspanne, wo der Strahl in die Kolbenmulde spritzt, d.h. Einspritzung nur während max. 40° Kurbelwinkel.

Die Einspritzmenge ergibt sich aus

- ⇒ **dem Querschnitt (und der Form) der Düsenbohrungen**
- ⇒ **dem Einspritzdruck**
- ⇒ **der Einspritzdauer**

Möchte man z.B. im Leerlauf die Leerlaufkraftstoffmenge über Kurbelwinkel von 20° mit einem Druck von 200 bar einspritzen, so ergibt sich hieraus der hierzu notwendige Düsenquerschnitt.

(je höher der Druck, desto besser die Zerstäubung, je länger die Einspritzdauer desto weicher der Motorlauf)

Da hiermit aber der Düsenquerschnitt festgelegt ist, ergibt sich zwangsläufig, dass eine höhere Einspritzmenge (bei annähernd gleicher Einspritzdauer) nur durch einen höheren Einspritzdruck erreicht werden kann.

Soll nun die Vollastmenge (ca. 10 mal so viel wie die Leerlaufmenge) ebenfalls während einem Kurbelwinkel von 20° eingespritzt werden, so ist hierfür ein Druck von 2000 bar erforderlich. (siehe hierzu auch Kapitel 1.5 „Einspritzdauer und Einspritzverlauf“)

daraus folgt für Einspritzanlagen mit vergleichbarer Düsengröße (Zerstäubungsqualität):

➔ **je höher der Druck, desto höher die maximal mögliche Einspritzmenge, d.h. desto höher die mögliche Motorleistung**

Die Motorleistung moderner Dieselmotoren wird nicht durch die angesaugte Luftmenge begrenzt, sondern durch die eingespritzte Kraftstoffmenge.

je höher der Einspritzdruck desto kürzer wird die Einspritzdauer und desto günstiger wird hierdurch der Wirkungsgrad des Motors.

Je kürzer die Einspritzdauer desto größer ist der Gleichraumanteil der Verbrennung. Der Wirkungsgrad des Gleichraumprozesses ist besser als der des Gleichdruckprozesses

¹ Bosch Technische Unterrichtung, Dieseleinspritztechnik im Überblick S. 22

² Bosch Technische Unterrichtung, Dieseleinspritztechnik im Überblick S. 22

jedoch:

- je höher der Druck desto höher das Antriebsdrehmoment bzw. die Antriebsleistung der Pumpe.
- Problem bei zu hohem Einspritzdruck im Leerlauf
Einspritzdruck im Leerlauf muss niedrig sein, da sonst während der Zündverzugszeit (relativ) zu viel Kraftstoff eingespritzt wird (harter Motorlauf).

Im Extremfall: gesamter Leerlauf-Kraftstoffbedarf wird bereits während der Zündverzugszeit eingespritzt (→ Nageln)

daraus folgt: **Einspritzdruck nicht so hoch wie möglich, sondern so hoch wie nötig !**
optimal: Einspritzdruck variabel (kennfeldgesteuert)

1.2. Einspritzzeitpunkt

Der Einspritzzeitpunkt (Einspritzbeginn) hat wesentlichen Einfluss auf das Abgasverhalten des Motors.

Der Einspritzzeitpunkt muss genau einstellbar und über die gesamte Lebensdauer des Motors exakt eingehalten werden.

Ein zeitlich vorverlegter Verbrennungsbeginn erhöht die Temperatur im Brennraum und damit die Stickoxidemission.

→ Eine Abweichung des Spritzbeginns vom Sollwert um 1° KW in Richtung *früh* erhöht den NO_x Wert um 15 %

→ eine Veränderung des Einspritzbeginns um $3,5^\circ$ (in Richtung „früh“) bewirkt eine **Verdopplung** der NO_x

Ein zeitlich nachfolgender Spritzbeginn kann zu einer unvollständigen Verbrennung und so zur Emission unvollständig verbrannter Kohlenwasserstoffe führen.

→ Eine Abweichung des Spritzbeginns vom Sollwert um 1° KW in Richtung *spät* erhöht den HC Wert um 15 %

→ eine Veränderung des Einspritzbeginns um $3,5^\circ$ (in Richtung „spät“) bewirkt eine **Verdopplung** der HC,
eine Veränderung des Einspritzbeginns um $4,5^\circ$ bewirkt eine **Verdreifachung** der HC

Toleranz des Einspritzbeginns:

bei Axialkolbenpumpe $\pm 0,5^\circ$

bei Radialkolbenpumpe $\pm 0,75^\circ$

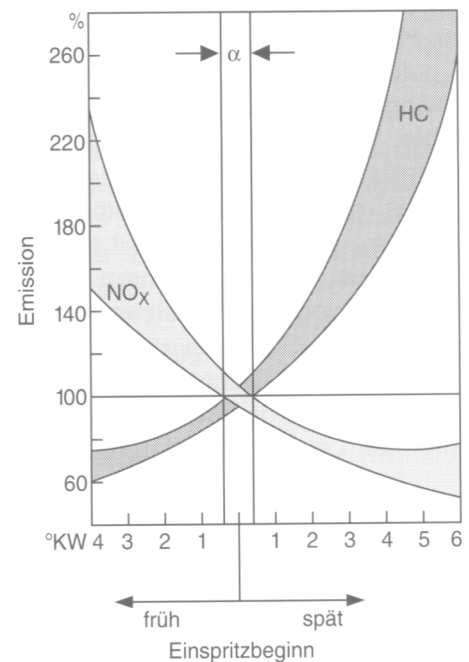
} über die gesamte Lebensdauer um Emissionsanforderungen einzuhalten

Achtung: Antrieb durch Steuerkette auf Dauer ungenau, da durch Verschleiß Längung der Kette und somit Veränderung des Einspritzbeginns wenn nicht elektronische Regelung!
Zahnriemen besser, da durch Austausch des Zahnriemens wieder Originaleinstellung

Anmerkung: Die höhere Toleranz des Einspritzbeginns der Radialkolbenverteilereinspritzpumpe ergibt sich daraus, dass Axialkolbenpumpen in der Regel nicht über eine Förderbeginnregelung mit Hilfe von Nadelbewegungssensoren verfügen. Weiterhin ist hierbei die zu bemerken, dass das Magnetventil einer Radialkolbenpumpe für einen Sechszylindermotor bei einer Motordrehzahl von 5000 1/min 250 Hübe pro Sekunde machen muss!

Bild 1: Streuband der Stickoxid- und Kohlenwasserstoffemission in Abhängigkeit vom Spritzbeginn.

α Optimaler Spritzbeginn.



Einspritzung zu früh	Einspritzung zu spät
Harter Motorlauf	Weicher Motorlauf
Schwarzrauch	Weißrauch
Leistungsanstieg	Leistungsverlust
Temperaturanstieg	Temperaturabfall

Merke:

Der Dieselmotor arbeitet mit einem gemischten Prozeß (Gleichraum + Gleichdruckprozeß = Seiliger-Prozeß).

Der Gleichraumprozeß hat einen besseren Wirkungsgrad als der Gleichdruckprozeß !

Der Gleichraumprozeß (Verbrennung im Bereich von OT) hat einen **höheren Wirkungsgrad**, aber einen **harten Motorlauf** zur Folge.

Der Gleichdruckprozeß (Verbrennung während der Abwärtsbewegung des Kolbens) hat einen **schlechteren Wirkungsgrad**, jedoch einen **weichen Motorlauf** zur Folge.

Faustregel:

Alle bisher bekannten Maßnahmen zum Erreichen eines weichen Motorlaufes verschlechtern den Wirkungsgrad !!

1.3. Verstellung des Einspritzbeginns

Verstellbereich > 20° Kurbelwinkel (problematisch bei mechanischen Verstellsystemen in Axial- und Radialkolbenverteilereinspritzpumpen)

schnelle Anpassung des Einspritzbeginns z.B. bei plötzlichem Lastwechsel (dynamisches Verhalten der Verstellung, Ansprechverhalten)

drehzahl-, temperatur- und lastabhängige Verstellung**Zündverzug ist drehzahlabhängig**

Der Motor hat bei höheren Drehzahlen einen höheren Zündverzug. Weiterhin hängt die Laufzeit des Kraftstoffs bei Förderung von der Leitungslänge ab und ergibt bei höheren Drehzahlen einen Spritzverzug.

Zündverzug ist abhängig von Kraftstofftemperatur, Motortemperatur und Ansauglufttemperatur

Die unterschiedlichen Zündverzüge bei verschiedenen Temperaturen müssen ausgeglichen werden.

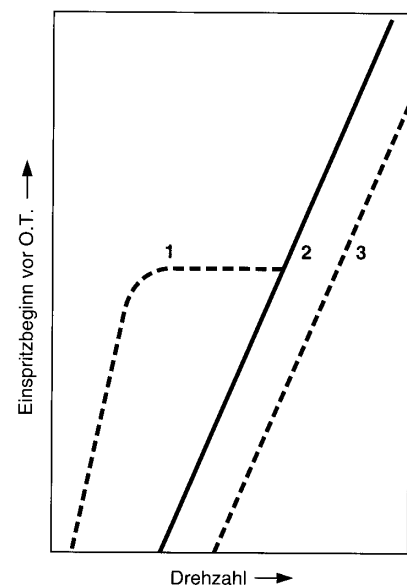
Zündverzugszeit ist auch lastabhängig!

Je höher die Belastung des Motors desto höher wird die Zündverzugszeit ! (Die Verdampfungswärme des Kraftstoffs senkt die Verdichtungstemperatur → je mehr Kraftstoff eingespritzt wird, desto höher ist die „Abkühlung der verdichteten Luft und desto höher wird die Zündverzugszeit.)

Außerdem: Aus Geräusch- und Emissionsgründen wird bei Teillast häufig ein anderer Spritzbeginn benötigt als bei Volllast.

daraus folgt: **Einspritzbeginn kennfeldgesteuert, schnelles Ansprechverhalten der Regeleinrichtung**

Bild 2: Spritzbeginnkennfeld in Abhängigkeit von Drehzahl, Kaltstart-Temperatur und Last.
1 Kaltstart, 2 Volllast, 3 Teillast.



1.4. Kraftstoffzumessung, Laufruheregung, Ruckeldämpfung

Kraftstoffzumessung

Bei der Zuteilung des Kraftstoffes auf die einzelnen Zylinder müssen die Kraftstoffmengen Kraftstoffzumessung genau zugemessen werden³.

Die **Leerlauf-Einspritzmenge** eines Dieselmotors beträgt 5 ... 7 mm³.

(Ein Regentropfen hat das Volumen von ca. 30 mm³, d.h. **ca. 20% eines Regentropfens**.)

Der **Unterschied** der Kraftstoffmenge zwischen den verschiedenen Zylindern sollte so gering wie möglich, max. 10% betragen (= 0,5 mm³ = **1/60 eines Wassertropfens** bzw. 1,6 % eines Wassertropfens)

Die **Vollast-Einspritzmenge** für eine Vierzylinder-Viertakt-Motor mit 75 kW Leistung beträgt ca. 59 mm³.

Laufruheregung

(Bei allen EDC-Anlagen)

= zylinderselektive Zumessung der Einspritzmenge Verbesserung der Laufruhe des Motors im Leerlauf.

Wegen mechanischer Toleranzen und Alterung erzeugen nicht alle Zylinder eines Motors das gleiche Drehmoment. Das hat besonders im Leerlauf einen „unrunden“ Motorlauf zur Folge. Der Laufruheregler ermittelt nun die Drehzahländerungen nach jeder Verbrennung und vergleicht sie miteinander. Die Einspritzmenge für jeden Zylinder wird dann anhand der Drehzahlunterschiede so eingestellt, dass alle Zylinder einen gleichen Beitrag zur Drehmomenterzeugung liefern. Der Laufruheregler ist nur im unteren Drehzahlbereich aktiv.⁴

Mit anderen Worten:

Das Steuergerät erfasst bei jedem Arbeitstakt mit Hilfe des Drehzahlgebers den Drehgeschwindigkeitsanstieg des Schwungrades. Weicht bei einem Zylinder die Winkelgeschwindigkeitsänderung (= Winkelbeschleunigung) stark ab, verändert das Steuergerät bei den folgenden Arbeitstakten die Einspritzmenge, bis alle Zylinder gleich laufen.

Die Laufruheregung wird (zur Zeit) nur aktiviert, wenn der Motor mit Leerlaufdrehzahl dreht und die Fahrgeschwindigkeit kleiner als 2,5 km/h.

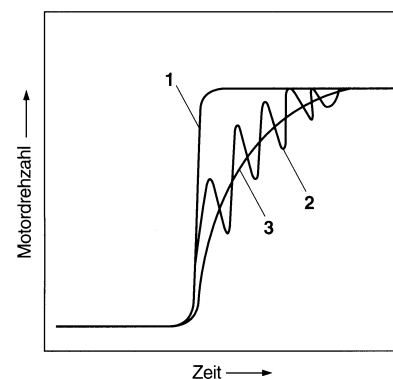
Ruckeldämpfung

Bei plötzlichem Betätigen oder Loslassen des Fahrpedals ergibt sich eine große Änderungsgeschwindigkeit der Einspritzmenge und somit auch des abgegebenen Motordrehmoments. Die elastische Motorlagerung und der Antriebsstrang erzeugen durch diesen abrupten Lastwechsel Ruckelschwingungen, die sich in einer Schwankung der Motordrehzahl auswirken.

Der aktive Ruckeldämpfer verringert diese periodischen Drehzahlschwankungen, indem die Einspritzmenge mit derselben Schwingungsperiode variiert wird: bei ansteigender Drehzahl wird weniger, bei abfallender Drehzahl mehr eingespritzt. Die Ruckelbewegung wird dadurch stark gedämpft.

Bild 11: Aktiver Ruckeldämpfer.

1 Plötzliche Fahrpedalbetätigung (Fahrerwunsch),
2 Drehzahlverlauf ohne aktive Ruckeldämpfung,
3 mit aktiver Ruckeldämpfung.



1.5. Einspritzdauer und Einspritzverlauf

Einspritzdauer

Diese geringe Kraftstoffmenge sollte nicht „schlagartig“, sondern (wegen weichem Motorlauf) während einer bestimmten Zeitspanne eingespritzt werden (Aufteilung des Kraftstoffes über weiten Bereich).

Leerlauf: Einspritzmenge 5 ... 7 mm³ während der Dauer von 15 ... 20 °KW

³ Bosch Technische Unterrichtung, Dieseleinspritztechnik im Überblick S. 15

⁴ Bosch Technische Unterrichtung, Diesel-Radialkolben-Verteilereinspritzpumpe, Ausgabe 97/98, S. 38

Die Zeit hierfür beträgt ca. 3 ... 4 ms

bei Vollast: Einspritzdauer von **25 ... 30° (max. 40°) KW** (zur Einspritzung von 59 mm³)

Die Zeit hierfür beträgt bei Nenndrehzahl (4000 1/min) ca. 1 ... 1,25 ms

zum Vergleich: Führt ein Fahrzeug mit 200 km/h so legt es in einer Millisekunde 56 mm zurück !

Für die Einspritzung steht nur eine kurze Zeit zur Verfügung (Verbrennung im Kolben). Daher Einspritzung nur während der Zeitspanne, wo der Strahl in die Kolbenmulde spritzt, d.h. Einspritzung nur während max. 40° Kurbelwinkel.

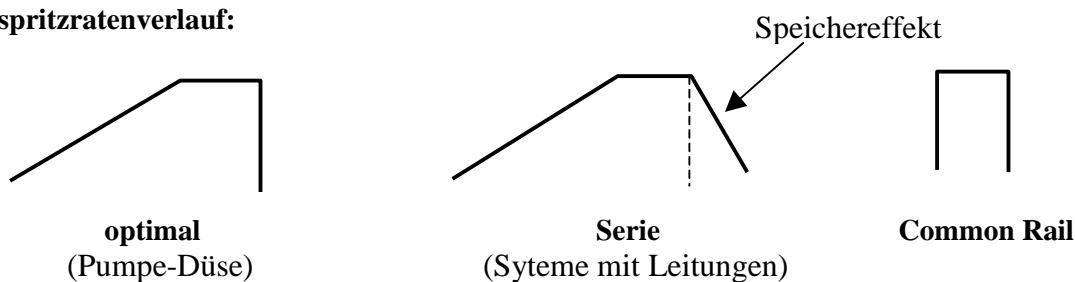
Außerdem sollte dieser Kraftstoff feinst zerstäubt und gleichmäßig im Brennraum verteilt werden.

Einspritzratenverlauf⁵

Während der Einspritzdauer soll **am Anfang wenig Kraftstoff, am Ende viel Kraftstoff** fließen. Das Einspritzventil soll dann **möglichst schnell und sicher schließen**.

Ein solcher Einspritzverlauf führt zu einem flach ansteigenden Verbrennungsdruck. Damit läuft die Verbrennung leise ab.

Einspritzratenverlauf:



Leitungslänge zwischen Pumpe und Einspritzdüse (Speichereffekt) beeinflusst Einspritzratenverlauf nachteilig.

„Die Anwendung einer Einspritzraten-Verlaufsformung wird weltweit als eine Möglichkeit gesehen, die NO_x – Emissionen und das Verbrennungsgeräusch zu minimieren, ohne den Kraftstoffverbrauch und die Partikelemission negativ zu beeinflussen.“⁶

Ausblick: Common Rail Injektoren mit Piezoelementen ermöglichen „hochfrequentes Takten“ bei Düsenöffnung → weicher Druckanstieg beim Öffnen der Düse („Rate shaping“)

Nachspritzen müssen vermieden werden

Besonders ungünstig wirken sich sogenannte „Nachspritzen“ aus.

Beim Nachspritzen öffnet das Einspritzventil nach dem Schließen noch einmal kurz und spritzt zu einem späteren Zeitpunkt der Verbrennung schlecht aufbereiteten Kraftstoff ab.

Nachspritzen entstehen durch Druckschwingungen in den Hochdruckleitungen oder durch „Aufprallen“ der Düsennadel in auf die Sitzfläche (wie Springen eines Hammers auf einem Amboß). Dieser Kraftstoff verbrennt unvollständig oder gar nicht und strömt als unverbrannter Kohlenwasserstoff in den Auspuff.

⁵ Bosch Technische Unterrichtung, Dieseleinspritztechnik im Überblick S. 19 f.

⁶ Peter Herzog (Dipl.-Ing. Dr. techn.) in ATZ (Automobiltechnische Zeitschrift, 12/1996 S. 700)

Voreinspritzung

Definition Voreinspritzung: Zwischen Vor- und Haupteinspritzung → Nullförderung

**Bei Zweifeder-Düsenhalter spricht man von „anglagerter“
Einspritzung**

Zweck: Die Voreinspritzung einer geringen Kraftstoffmenge (1 – 2% der Vollastmenge) dient zur **Verringerung des Verbrennungsgeräusches**. (Laufruhe des Motors wird verbessert).⁷

Prinzip: **Durch Voreinspritzung erhöhen ich Druck und Temperatur derart, dass Zündverzug der Haupteinspritzung sich drastisch verkürzt**

Zeitpunkt: Abstand zwischen Vor- und Haupteinspritzung ist drehzahl- und lastabhängig und liegt ca. 5° ... 10° KW vor Haupteinspritzung (max. bis 90° KW vor OT)

Nachteile: **Verbrauch und Emissionen verschlechtern sich**, da bei Haupteinspritzung bereits örtlich Luftmangel

Regel: je höher die Voreinspritzmenge desto höher der Verbrauch und die Emissionen

d.h. Verbesserung des Motorlaufgeräusches auf Kosten von Verbrauch und Emissionen

Entwicklungsziel: Voreinspritzmenge so gering wie möglich.

(derzeit ca. 1,5 mm³/Einspritzung)

Weniger derzeit nicht möglich wegen Fertigungstoleranzen bei Serienfertigung

jedoch: es muss immer soviel Kraftstoff eingespritzt werden dass Voreinspritzung sicher gewährleistet ist da sonst hartes Laufgeräusch

Übrigens: Voreinspritzung ist keine neue Erfindung. Bereits im Krieg wurde Voreinspritzung eingesetzt. Hier wurde hochwertiger Kraftstoff voreingespritzt um danach um Kraftstoff schlechter Qualität für die Haupteinspritzung verwenden zu können.

Nacheinspritzung

Zweck: Bereitstellung von unverbrannten Kohlenwasserstoffen als Reduktionsmittel zukünftiger DENOX Katalysatorsysteme (HC wird im DENOX Katalysator zur Reduktion von NO_x benötigt)

Zeitpunkt: nach Ende der Hauptverbrennung evtl. sogar während des Ausschiebetaktes.

Nachteile:

1. großes Problem der **Ölverdünnung** wegen Kraftstoff, welcher sich an der Zylinderwand niederschlägt
2. **Verschleiß** der Zylinderlaufbahn wegen Abwaschung des Ölfilms an der Zylinderwand

3. **deshalb:** Überlegungen einer Nacheinspritzung außerhalb des Brennraumes (in den Auspuff) Über die Abgasrückführung wird ein Teil des Kraftstoffs wieder der Verbrennung zugeführt und wirkt wie eine sehr frühe Voreinspritzung⁸.

„Da die Nacheinspritzung sehr spät und deshalb der Druck im Brennraum gering ist, ist die Reichweite der Einspritzstrahlen groß, die Zylinderwände können durch die Strahlen erreicht werden. In Dauerversuchen muss deshalb nachgewiesen werden, dass durch diese Verdünnung des Ölfilms kein Motorschaden entsteht.“⁹

Anwendung: bei Common Rail problemlos möglich, wird jedoch wegen oben genannter Probleme noch nicht genutzt.

⁷ BMW S. 4

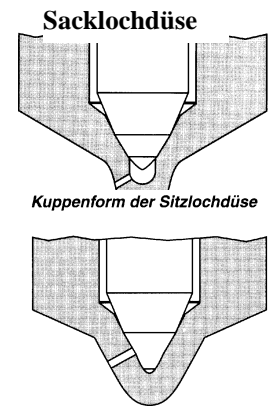
⁸ Bosch Technische Unterrichtung, Diesel – Speichereinspritzsystem Common Rail (Ausgabe 98/99) S. 10

⁹ MTZ Motortechnische Zeitschrift 58 (1997) 10 S. 578

1.6. Einspritzdüsen möglichst ohne „Totvolumen“

Ähnlich wie ein „Nachspritzen“ wirkt sich ein „Totvolumen“ im Einspritzventil stromab des Dichtsitzes aus. Der in einem solchen Volumen gespeicherte Kraftstoff tritt nach Abschluß der Verbrennung als Kraftstoffdampf in den Brennraum aus und strömt ebenfalls in den Auspuff. Auch dieser Kraftstoff erhöht die Emission von unverbrannten Kohlenwasserstoffen.

Das kleinste Totvolumen erreicht man mit „Sitzlochdüsen“, bei denen die Spritzbohrungen in den Dichtsitz gebohrt sind.



1.7. Abgasrückführung

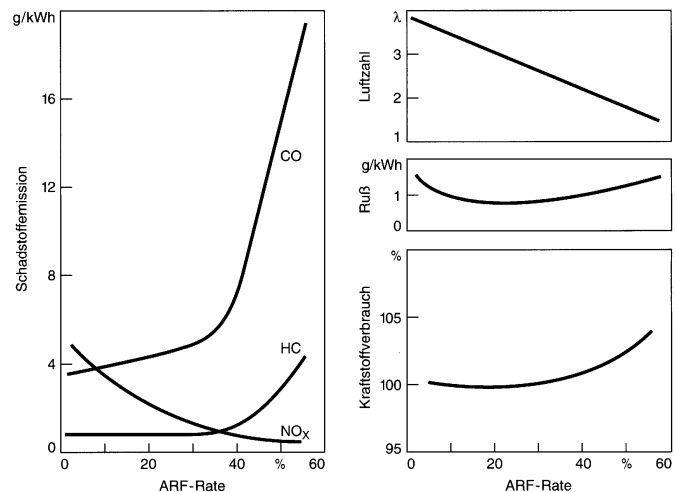
Zur Verminderung von NO_x – Emissionen im Abgas bei (Teillast) kann bei Dieselmotoren im Teillastbereich bis zu 40% Abgas zur Ansaugluft zugeführt werden.

Einfluß der Abgasrückführ(ARF)-Rate auf die Motorkennwerte.

Hierdurch sinken

1. die Sauerstoffkonzentration und
2. die Verbrennungstemperatur,

wodurch sich die Bildung von NO_x vermindert.



Frage: Wieso senkt Abgasrückführung die Stickoxide

Antwort:

- 1) Durch Abgasrückführung sinkt die Verbrennungstemperatur¹⁰ und damit die Entstehung von Stickoxiden (je höher die Temperatur von O_2 und N_2 desto höher die Bildung von Stickoxiden).

Frage: Wieso sinkt die Verbrennungstemperatur durch Rückführung von heißen Abgasen (anstelle von kalter Luft wenn keine Abgasrückführung) ?

Antwort: Temperatur sinkt weil die **Verbrennungsgeschwindigkeit** des Kraftstoff-Abgas-Luftgemisches **langsamer** wird. Dadurch sinkt die Spitztemperatur der Flammenfront.
 → erhöhter Anteil Gleichdruckprozeß, da Verbrennung während der Abwärtsbewegung des Kolbens (Kolben weicht dem ansteigenden Druck aus, max. Verbrennungsdruck und damit auch max. Verbrennungstemperatur sinken)

- 2) Durch Abgasrückführung sinkt der Anteil von Sauerstoff welcher nicht zur Verbrennung benötigt wird, d.h. es verbleibt nach der Verbrennung weniger „Restsauerstoff“, somit kann weniger Stickoxid entstehen (da der Sauerstoff fehlt)

theoretisch könnte man den gleichen Effekt durch eine Drosselklappe im Ansaugrohr erreichen,

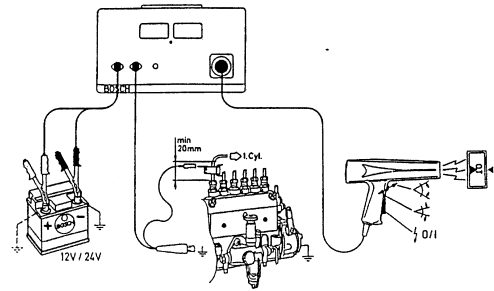
¹⁰ Bosch Technische Unterrichtung, Diesel – Speichereinspritzsystem Common Rail (Ausgabe 98/99) S. 11.

jedoch würde dann der Verdichtungsdruck und damit die Verdichtungstemperatur absinken und dadurch die Zündverzugszeit stark ansteigen (nageln!).

Abgas dient als Füllgas damit die Verdichtungstemperatur und der Verdichtungsdruck genügend hoch bleiben (um kurze Zündverzugszeit beizubehalten)

2. Prüfung des Förderbeginns an Reiheneinspritzpumpen

2.1. Prüfung mit Piezogeber und Stroboskoplampe



2.2. Prüfung mit Induktivgeber

Der Zahn für den Induktivgeber am Regler der Einspritzpumpe ist um $19,5^\circ$ nach Förderbeginn versetzt.

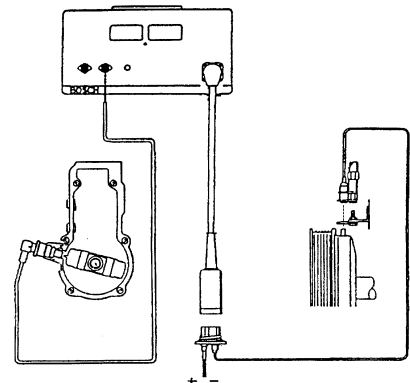
Da Kurbelwelle sich doppelt so schnell dreht wie Einspritzpumpe:

Kurbelwellenmarkierung wird $2 \times 19,5^\circ = 39^\circ$

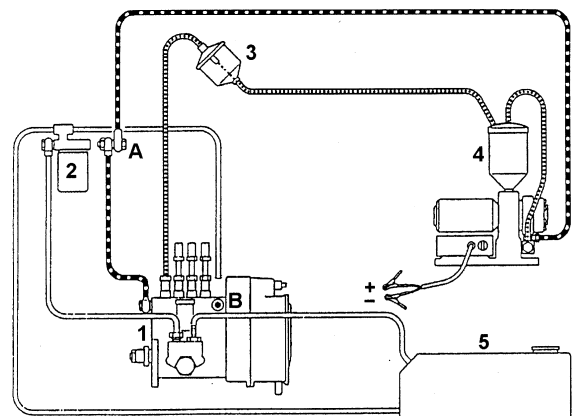
Wäre Förderbeginn genau in OT so würde die Stroboskoplampe (bzw. die Digitalanzeige am Tester) in 39° in Richtung spät anzeigen.

Soll ein Förderbeginn von 24° vor OT eingestellt werden, so muß die Anzeige

$39 - 24 = 15^\circ$ nach OT anzeigen!



2.3. Prüfung nach der Hochdruck - Überlaufmethode



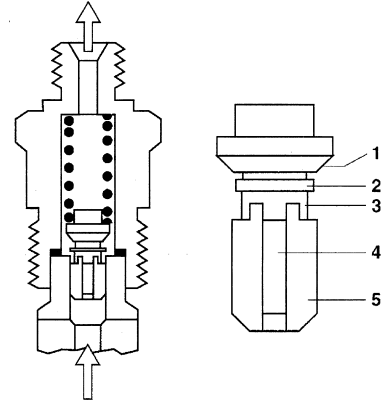
3. Bauarten von Druckventilen zum Entlasten der Hochdruckleitungen

3.1. Aufbau und Funktionsprinzip eines Gleichraum - Druckventils

Bei Bewegung des Pumpenkolbens in Richtung UT werden die Hochdruckleitungen entlastet indem ein vorgegebenes Volumen (Volumen des Entlastungskolbens) aus den Hochdruckleitungen zurückströmen kann.

Bei unterschiedlichem Verschleiß (Undichtigkeit des Entlastungskolbens) kann der Restdruck in des Hochdruckleitungen unterschiedlich werden → Einspritzbeginn kann unterschiedlich werden

Auch: Druckwellenproblematik („Nachspritzen“)
deshalb besser: Gleichdruck - Druckventil



3.2. Aufbau und Funktionsprinzip eines Gleichdruck - Druckventils

Das „Rückschlagventil“ (Teile 1, 2 und 3) und läßt soviel Kraftstoff aus den Hochdruckleitungen zurückströmen, bis sich dein Druck (entsprechend der Vorspannung der Feder (3) in den Hochdruckleitungen einstellt.
kein unterschiedlicher Restdruck in den Hochdruckleitungen
Druckspitzen in den Hochdruckleitungen (durch Druckschwingungen hervorgerufen) werden vermieden

→ „Nachspritzen“ wird vermieden

