

Vergleich der verschiedenen Systeme

	Axialkolben- pumpe	Radialkolben- pumpe	Pumpendüse	Common Rail	Anmer- kung
erreichbarer Spitzendruck (pumpenseitig)	750 bar	max 1000 bar	2000 bar	1350 bar ❶	
erreichbarer Spitzendruck (düsenseitig = Einspritzdruck)	1000 bar	1600 bar max. 1800 bar	2000 bar	1350 bar	
max. mögl. spezif. Leistung des Motors	40 kW/l	50 kW/l	42 kW/l bis 55 kW/l möglich	45 kW/l	❷
max. Zylinderzahl	4 ❸	6 ❸	unbegrenzt	unbegrenzt	
mittl. Antriebs- leistung	++	+ ❹	+/- ❺ ❻	-- ❼ ca. 3,9 kW	
Spitzenantriebs- momente	+/-	- (ca. 150 Nm)	-- ❽ (ca. 300 Nm ?)	++ ca. 30 Nm (gleichmäßig)	
Kosten bei mehr als 6 Zyl.	nicht möglich	nicht möglich	+/-	++	
Flexibilität	-- ❾	-- ❾	-- ❾	++ ❿	
Einfluß auf Motor- konstruktion	gering	gering	hoch ❸	gering	
Voreinspritzung	nur angelagerte Einspritzung mit Zweifeder- Düsenhalter	wie Axialkolben- pumpe, jedoch „echte“ Voreinspritzung in Entwicklung	„echte“ Vorein- spritzung (nur für PKW- Anlagen)	Mehrfach- einspritzung	
Einspritzraten- verlauf	durch Nockenform der Hubscheibe	durch Nockenform des Nockenrings	durch Nockenform der Nockenwelle	-- ❿	

❶ Einspritzdruck wird durch Injektoren begrenzt!
plötzliche, schlagartige Öffnung und Schließung der Nadel hydraulisch durch vollen Druck (bei Volllast 1350 bar !)
→ extreme Kräfte, mit welcher die Nadel geöffnet bzw. beim Schließen auf die Dichtfläche (in den Sitz) „geschmettert“ wird. → Dauerhaltbarkeitsprobleme

❷ 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.

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.

3 theoretische Möglichkeit des Einbaus von 2 Pumpen bei Motoren mit mehr Zylindern, aber

- hohe Kosten (Kosten einer Pumpe ca. 1/3 der Motorkosten)
- Steuerung und Synchronisation schwierig

Die Verteilereinspritzpumpe eines Sechszylindermotors, der mit **5 000 Umdrehungen pro Minute** läuft, muss den Einspritzdruck **250 mal pro Sekunde** aufbauen.

4 Antriebsleistung der Radialkolbenpumpe höher da höhere Druckerzeugung

5 Ausnutzung wellendynamischer Effekte nicht möglich, „voller“ Einspritzdruck muss jeder Zeit von Pumpe erzeugt werden

6 Ausnutzung wellendynamischer Effekte erfordert bestimmte Länge und Durchmesser der Leitungen → problematisch bei Pumpe-Leitung-Düse, da sehr kurze Leitungen

7 Der Kraftstoff muss immer gegen hohes Druckniveau gefördert werden. Die geförderte Kraftstoffmenge ist immer wesentlich höher als die tatsächlich eingespritzte Kraftstoffmenge (wegen druckseitiger Regelung (saugseitige Regelung beabsichtigt aber schwierig)).

→ hohe Kraftstoffleckagen an der Düsennadel da ständig hoher Druck auf Düsennadel lastet (auch bei geschlossener Düse drängt sich Kraftstoff an der Nadel vorbei in den Rücklauf → Wärmeentwicklung → Energie“verlust“.

Kraftstoffkühler vor Kraftstoffbehälter erforderlich, da im Rücklauf Temperaturen bis 140° C entstehen, Kraftstoffbehälter bis an die Grenzen thermisch hoch belastet, manche Hersteller erwägen Einbau von Kraftstoffbehälter aus Stahlblech.

8 **geschätzter Wert** (*genaue Angaben liegen nicht vor*)

„Die Pumpendüsen – Kipphebel müssen wesentlich höhere Kräfte übertragen als die Nachbarn zur Ventilbetätigung“¹.

¹ Mot Jufa 23/1998 S. 6

jedoch: Das Antriebsspitzenmoment ist bei nockenbetätigten Systemen vom erzeugten Pumpenförderdruck abhängig.

Da bei Pumpendüsen (wegen fehlender Hochdruckleitung) nicht mit wellendynamischen Effekten gearbeitet werden kann muss die Pumpe den „vollen“ Einspritzdruck (2000 bar) erzeugen.

(Da bei Radialkolbenpumpe der von der Pumpe erzeugte Druck „nur“ 1000 bar beträgt wozu ein Antriebsspitzenmoment von 150 Nm benötigt wird, ergibt sich bei einem Förderdruck von 2000 bar ein erforderliches Antriebsmoment von 300 Nm)

Pumpendüsenantrieb stark belastet, Kraftfluss von Kurbelwelle zu Pumpendüsenelement (lange Strecke bis Pumpenelement)

- Schwingungsprobleme im Kettentrieb,
- torsionssteifer Antrieb erforderlich (dadurch auch erhöhter Platzbedarf)
- hohe Lagerbelastung da hohe Zugkräfte z.B. in der Antriebskette
- Probleme durch Torsionsschwingungen in der Nockenwelle (je weiter Pumpenelement von Antriebsseite entfernt ist desto höher werden die durch Schwingungen hervorgerufenen Ungenauigkeiten (z.B. Förderbeginn, aber auch Einspritzratenverlauf da Drehwinkelgeschwindigkeitsveränderungen des Nockens
 → Verwendung von Pumpendüsen erfordert völlige Neukonstruktion des Motors (kein „alter“ Motor mit anderem Zylinderkopf möglich)

9 Motorspezifisches Einspritzsystem erforderlich (z.B. Nocken der Hubscheibe bzw. des Nockenrings bei Radialkolbenverteiler einspritzpumpe) sind an geforderten Einspritzratenverlauf angepasst.

10 **flexibel**, da elektronische Steuerung,
extrem flexibel wenn Injektoren mit Piezoventil (da dann auch elektronisch gesteuerter Einspritzratenverlauf möglich)

Die drei miteinander technisch konkurrierenden Systeme, wie Verteiler-einspritzpumpen-, Pumpendüse- und Common Rail Einspritzsystem, haben ihre spezifischen Vorteile in unterschiedlichen Disziplinen.

Ein in allen Punkten überlegenes Einspritzsystem existiert bis heute nicht.

Ausblick

saugseitige Regelung der Hochdruckpumpe bei Common-Rail

Bei heutigen Common-Rail-Anlagen wird der Raildruck durch ein Druckregelventil (am Rail oder an der Hochdruckseite der Hochdruckpumpe) geregelt. Dies bedeutet, dass der Druck geregelt wird, indem ein Teil des hoch verdichteten Kraftstoffs wieder aus dem Rail abströmt.

Die Hochdruckpumpe muss viel mehr Kraftstoff gegen den hohen Druck im Rail fördern als tatsächlich eingespritzt wird (nur max. 30% werden eingespritzt, der Rest entweicht als „Lecköl“ bzw. wird zur Raildruckregelung vom Druckregelventil wieder abgelassen. Der Kraftstoff in der Rücklaufleitung hat Temperaturen bis 140° C. Er muß sogar gekühlt werden.

Die Antriebsleistung der Hochdruckpumpe beträgt deshalb bis ca. 4 kW, wodurch sich der Wirkungsgrad des Gesamtmotors verschlechtert.

Würde eine saugseitige Druckregelung möglich, so brauchte die Hochdruckpumpe nur soviel Kraftstoff gegen den hohen Raildruck zu fördern wie tatsächlich zur Einspritzung (und für die Leckverluste) benötigt wird.

Common-Rail-Injektoren mit Piezoventilen

Common-Rail-Injektoren mit Piezoventilen erlauben ein hochfrequentes Takten der Injektorventile. Hierdurch kann eine Einspritzratenverlaufsformung auch bei Common-Rail Anlagen erreicht werden.

höherer Druck bei Common-Rail

Durch eine Erhöhung des maximalen Einspritzdruckes könnte auch bei Common-Rail die max. Leistung pro Zylinder erhöht werden. Schwachstelle hierbei bilden derzeit die Injektoren (hohe Druckkräfte welche auf die Düsennadel einwirken und diese beim Schließen in den Sitz pressen erzeugen Dauerhaltbarkeitsprobleme)

Vario-Einspritzdüsen (querschnittgesteuerte Düse)

„Ein Konzept, an dem Bosch arbeitet ist die querschnittgesteuerte Düse. Bei ihr öffnet die Düsennadel nach außen, und die Größe der freigegebenen Spritzquerschnitte ist vom Nadelhub abhängig. Damit realisiert die querschnittgesteuerte Düse neue Möglichkeiten, den Verbrennungsablauf zu beeinflussen.“²

Durch eine querschnittgesteuerte Düse können auch kleine Kraftstoffmengen (z.B. bei Teillast) mit hohem Druck und damit mit guter Zerstäubung eingespritzt werden.

² Bosch, Systemlösungen für moderne Dieselmotorkonzepte S. 15