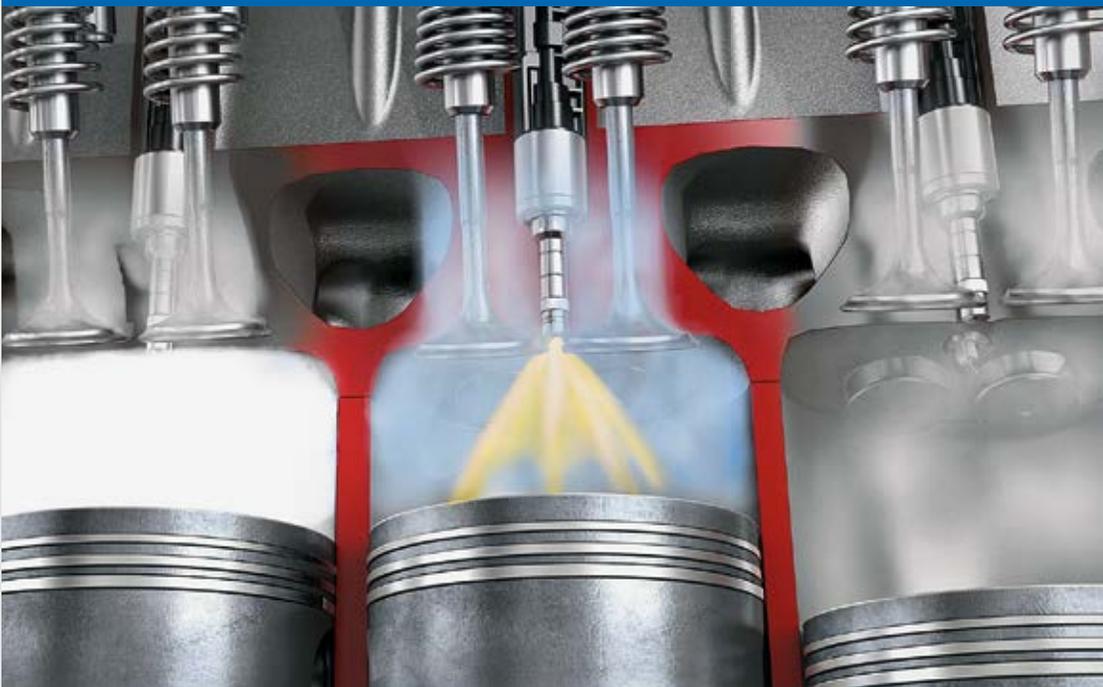


Krafthand-Technik

Benzin-Direkt- einspritzsysteme



**Komponenten,
Funktionen, Diagnose**

Heiko Peter

Krafthand Medien GmbH

ISBN 978-3-87441-131-8

Bibliografische Informationen der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet
über <http://portal.dnb.de> abrufbar.

ISBN: 978-3-87441-131-8

1. Auflage, September 2015

Autor: Heiko Peter

Realisierung/Lektorat: Georg Blenk, Ralf Lanzinger

Titelgestaltung/Layout: Simon Ledermann, Martin Dörfler

Titelbild: Bosch

Bilder/Grafiken: Blenk Georg, Bosch, Mareis Thomas, März Johann, Mitsubishi,
NGK, NTK, Volkswagen

Druck und buchbinderische Verarbeitung: Schätzl Druck & Medien, Donauwörth

Alle Rechte vorbehalten

© Krafthand Medien GmbH

Walter-Schulz-Straße 1 · 86825 Bad Wörishofen

Telefon (08247) 3007-0 · Telefax (08247) 3007-70

info@krafthand.de · www.krafthand.de · www.krafthand-medien.de

Geschäftsleitung: Gottfried Karpstein, Andreas Hohenleitner, Steffen Karpstein

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne die Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeisung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

*Bild- und Grafikmaterial – insbesondere grafische Darstellungen –, welches nicht gesondert mit einem Quellverweis versehen ist, ist dem Autor Heiko Peter © zuzuordnen.

Inhalt

Vorwort	9
1. Grundlagen	13
1.1 Vergleich von Saugrohrinspritzung und Direkteinspritzung	15
1.2 Bauarten und Verfahren	18
1.2.1 Das strahlgeführte Brennverfahren	19
1.2.2 Das wandgeführte Brennverfahren	19
1.2.3 Das luftgeführte Brennverfahren	20
1.3 Betriebsstrategien	20
1.4 Arbeitshinweise und Vorsichtsmaßnahmen	25
1.5 Diagnosewerkzeuge	27
2. Das Kraftstoffsystem	29
2.1 Kraftstoffsysteme im Überblick	30
2.1.1 System Melco im Mitsubishi GDI und bei Volvo	30
2.1.2 System Siemens der 1. Generation	31
2.1.3 System Bosch mit HDP 1 im VW FSI	32
2.1.4 System Bosch mit HDP 2 im Ford SCI und Audi 2,0 FSI	33
2.1.5 System Bosch HDP 2 und Hitachi 2. Generation mit Decos	34
2.1.6 System Bosch HDP 5 und Hitachi 3. Generation mit Decos	35
2.2 Das Kraftstoff-Niederdrucksystem	36
2.2.1 Das Niederdrucksystem Mitsubishi GDI	37
2.2.2 Niederdrucksystem VW FSI mit Vordruckumschaltung	39
2.2.3 Rücklauflose Niederdrucksysteme mit Druckregler am Kraftstofffilter oder am Förderpumpenmodul	42
2.2.4 Bedarfsgeregeltes Niederdruck-Kraftstoffsystem Decos (Volkswagen)	43
2.2.5 Bedarfsgesteuertes Niederdruck-Kraftstoffsystem (Mazda)	49
2.2.6 Fördermodule für Turbomotoren – Systeme, Prüfung	51
2.3 Das Kraftstoff-Hochdrucksystem	55
2.3.1 Hochdruckerzeugung und Regelung	55
2.3.2 Hochdruckerzeugung und Regelung (Melco) Mitsubishi GDI	57
2.3.3 Bosch HDP 1 Dreizylinder-Radialkolbenpumpe	60
2.3.4 Siemens 1. Generation mit Radialkolbenpumpe	62
2.3.5 Siemens 1. Generation mit Axialkolbenpumpe	66
2.3.6 Bosch HDP 2 Einzylinderpumpe	67
2.3.7 Hitachi 2. Generation Einzylinderpumpe	72

2.3.8	Bosch HDP 5 Einzylinderpumpe	76
2.3.9	Hitachi 3. Generation Einzylinderpumpe	81
2.3.10	Continental Axialkolbenpumpe mit Mengen- und Druckregelung	86
2.3.11	Der Hochdrucksensor	90
2.3.12	Der Hochdruckspeicher (Rail)	95
2.4	Kraftstoffinjektoren	97
2.4.1	Magnetventil-Injektoren	100
2.4.2	Piezoinjektoren	109
3.	Ansaugluftsystem	115
3.1	Die Lasterfassung	115
3.1.1	Drehzahl-/Bezugsmarkenerfassung	115
3.1.2	Die Luftmassenmessung	120
3.1.3	Die Luftmassenmessung mit Rückstromerkennung	124
3.1.4	Die Drehmomentregelung	127
3.1.5	Die FLICS-Steuerung	129
3.1.6	Die E-Gas-Drosselklappeneinheit	132
3.1.7	Tumbleklappen	134
3.1.8	Drallklappen	135
3.1.9	Die Turboaufladung	136
3.1.10	Die Ladedruckregelung	137
3.1.11	Die Schubumluftregelung	138
3.1.12	Die Kompressoraufladung	140
3.2	Die Abgasrückführung	141
3.3	Das Sekundärluftsystem	142
3.4	Die Kurbelgehäuse-Entlüftung	146
3.5	Die Aktivkohlefilter-Entlüftung	148
4.	Das Zündsystem	151
4.1	Die Zündungssteuerung	151
4.2	Die Klopfregelung	152
4.3	Doppelfunken-Zündspulen	154
4.4	Einzelfunken-Zündspulen	156
4.5	Die Zündkerzen	161
4.6	Die Zündsystemüberwachung	163

5.	Das Abgas-Nachbehandlungssystem	165
5.1	Die Gemisch-Überwachung	176
5.1.1	Die Zweipunkt-Lambdasonde.....	177
5.1.2	Die Breitband-Lambdasonde	181
5.1.3	Der Abgastemperatursensor.....	188
5.1.4	Die NO _x -Lambdasonde	191
5.1.5	Die Diagnose des Abgassystems	196
	Der Autor	205
	Stichwortverzeichnis	207

Vorwort

Die Saugrohreinspritzung ist tot! Es lebe die Benzin-Direkteinspritzung! Das Konzept der benzingetriebenen Fremdzündungsmotoren ist vormals durch den relativ geringen Wirkungsgrad, den höheren Treibstoffkosten und der folglich zurückgegangenen Nachfrage etwas in den Hintergrund gerückt. Aufgrund zahlreicher Innovationen im Bereich Motorenbau hat es jedoch wieder an Attraktivität gewonnen.

Beim Ottomotor ist diese Entwicklung auf die Renaissance der Benzin-Direkteinspritzung zurückzuführen. Es handelt sich um ein Gemischbildungsverfahren, das den kürzesten Weg des Kraftstoffes in den Zylinder erlaubt. Und es hat genügend Entwicklungspotenzial für die Zukunft.

Doch der Weg bis dahin war steinig. Denn eine ganze Reihe von Anforderungen standen im Lastenheft ganz oben: weniger Verbrauch, geringere Emissionen sowie eine mit der Dieseltechnik vergleichbare Leistung – dies alles unter dem Druck immer strengerer Abgasnormen. Im Hinblick darauf, musste die Einspritztechnik und die Motormechanik den neuen Erkenntnissen angepasst werden.

Dritte Generation

Inzwischen spricht man bereits von der dritten Generation von Benzin-Direkteinspritzsystemen. Während in der ersten Generation noch Schichtladungskonzepte mit wand-/luftgeführten Brennverfahren, Einloch-Magnetventil-Injektoren und der schwefelempfindlichen Speicher-Katalysatortechnik tonangebend waren, so sind es in der zweiten Generation schon strahlgeführte Brennverfahren. Die Verwirklichung dieses Verfahrens gelang durch eine neue Injektoren-Technologie mit Piezostellern und höheren Einspritzdrücken, die mittels neuer bedarfsgeregelter Hochdruckpumpen geschaffen wurden.

Die dritte Generation verzichtet größtenteils auf Schichtladungskonzepte oder schränkt den Betriebsbereich durch andere Strategien ein, da die Euro-5-Abgasnorm den im inhomogenen Schichtladungsbetrieb entstehenden Partikelaustritt der Motoren mit Benzin-Direkteinspritzung streng limitiert. Somit konzentriert man sich auf die strahlgeführte Einspritzung mittels neuer Mehrloch-Magnetventil-Injektoren, die immerhin noch einen homogenen Magerbetrieb ermöglichen. Den Verbrauchsvorteil, der durch die Schichtladung eingebüßt wird, kann mit Downsizing und effizienten Auf-



1

Downsizing mit drei Zylindern, 1,2 l Hubraum, Benzin-Direkteinjektion und schaltbarer Kompressor-Aufladung. Bild: Nissan

ladungssystemen mehr als wettgemacht werden. Dazu kommen alle motormechanischen Innovationen wie Ventilhubregelung und Ein- und Auslass-Nockenwellenverstellung mit einer weiten Spreizung. Die Hersteller übertreffen sich gegenseitig mit immer fortschrittlicheren Konstruktionen wie zum Beispiel dem 1,2-Liter-Dreizylinder mit Turboaufladung oder dem 1,4-Liter mit Doppelaufladung. Mit diesen Motoren verfolgen die OEM beharrlich das Ziel des Downsizing.

Hochinnovativ kommen auch größeren Motoren daher. So ist das strahlgeführte Brennverfahren mit nach außen öffnenden Piezoinjektoren konsequent zur Serienreife entwickelt worden. Der steigende Aufwand für Entwicklung, Erprobung und Herstellung veranlasste die Automobilhersteller zu Kooperationen untereinander. Bei allen Entwicklungen haben auch die Komponentenhersteller einen erheblichen Teil der Systemkompetenz eingebracht und verschiedene Lösungen etab-

liert. Bis auf wenige Ausnahmen binden sich die Automobilhersteller nicht an einen Systemlieferanten. Dies wiederum erschwert den Überblick über die Funktionen der Systeme und deren Diagnose im Service.

Weit verbreitet

Die Benzin-Direkteinspritzung ist im automobilen Breitensegment inzwischen angekommen, wie die entsprechend hohen Zulassungszahlen zeigen. Bald wird auch die Hybridtechnik eine größere Rolle spielen. Es existieren bereits einige Bei-

spiele in dieser Hinsicht von BMW, Mercedes, Porsche sowie mit dem Touareg-Hybrid mit TSI-Technologie von Volkswagen. Doch kann man noch nicht von großen Stückzahlen sprechen. Der Klassenprimus von Toyota, der Prius, wird noch immer bedarfsgerecht von einem Saugrohreinspritzer angetrieben.

Praxiswissen ist gefragt

Jeder Werkstattfachmann wird früher oder später vor der Aufgabe stehen, ein Benzindirekt-Einspritzsystem fachgerecht warten und reparieren zu müssen. Dies



2

Benzin-Direkteinspritzung und Hybridantrieb. Bild: Volkswagen

verlangt ihm jedoch einiges an Grundwissen ab. Literatur und Schulungen zum Thema gehören inzwischen zu den etablierten Angeboten der Branche und dienen der Ausbildung von Fachpersonal, das die Zukunft der Kfz-Fachbetriebe sichert. Das vorliegende Fachbuch soll jenen helfen, die in ihrer täglichen Arbeit in der Fahrzeugtechnik einen Praxisratgeber suchen, um Benzin-Direkteinspritzsysteme besser verstehen und diagnostizieren zu können. Es soll auch ein problemorientiertes Nachschlagewerk sein. Zu Ehren gelangt es, wenn es nach einiger Zeit markante Gebrauchsspuren aufweist und mit anderer Praxisliteratur in einer Reihe steht.

Mein herzlicher Dank für die Unterstützung gilt meinen Kollegen und den Kfz-Betrieben welche mich in diesem Thema gefordert und gefördert haben.

Von ganzem Herzen danke ich auch meiner Frau und meiner Tochter für das Verständnis und die Motivation das Werk fertigzustellen.

Abschließend gilt mein ausdrücklicher Dank Georg Blenk von der Krafthand Medien GmbH. Herr Blenk hat mich mit viel Geduld während des gesamten Prozesses begleitet. Ohne ihn wäre die Erstellung dieses Buches nicht möglich gewesen.

In diesem Sinne wünsche ich viel Freude bei der Lektüre und viel Erfolg bei der Arbeit mit Benzin-Direkteinspritzsystemen!



Heiko Peter, im September 2015

1. Grundlagen

Den ersten Benzin-Direkteinspritzer für Pkw baute 1952 Gutbrod, eine inzwischen nicht mehr existierende Fahrzeugmarke aus Baden-Württemberg. Ausgerüstet war der Gutbrod Superior 700E, mit einem Zweitaktmotor sowie mit einer modifizierten Dieseleinspritzanlage von Bosch. Dort kannte man sich Prinzip bedingt mit Hochdruckeinspritzung bereits bestens aus. Die Motoren hatten eine sehr gute Leistung und einen um etwa 30 Prozent geringeren Verbrauch als damalige Vergaservarianten. Die Leistungsvorteile ebneten dem Einspritzverfahren kurze Zeit später mit Mercedes den Weg in den Rennsport und mit dem 300 SL und 300 SC auf die Straßen. Doch dann verschwand das Verfahren wieder in der Schublade und die Fahrzeuge im Museum. Die hohe thermische Belastung der Zündkerzen verursachten Motorlaufprobleme. Diese waren ebenso wie die Motorölverdünnung damals nicht sicher in den Griff zu bekommen. Aufgrund der geringeren technischen Möglichkeiten blieb die Benzindirekteinspritzung in vielen Punkten weit hinter ihrem möglichen Potenzial zurück.

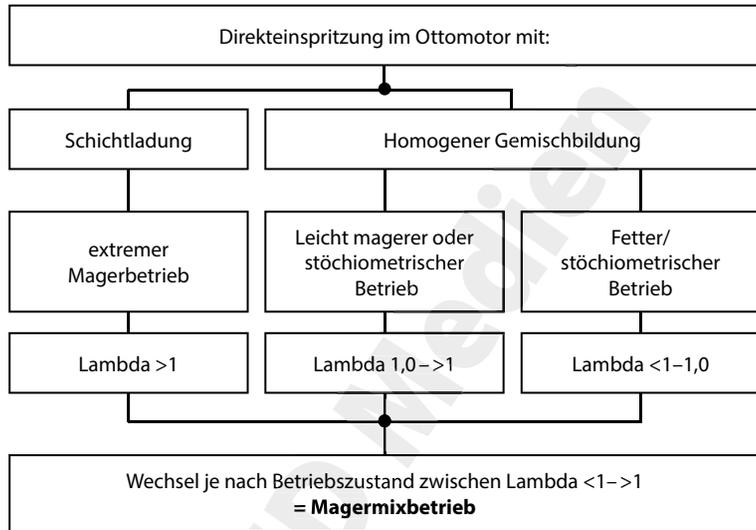
Steigerung des Wirkungsgrads

Unter dem Gesichtspunkt der Wirkungsgradsteigerung und der damit verbundenen Kraftstoffeinsparung entwickelten die

Techniker von Mitsubishi das Verfahren erneut zur Serienreife und präsentierten 1997 in Europa den GDI-Motor. Auch andere Hersteller folgten mit vielfältigen Konzepten. Die Innovationsflut reißt bis heute nicht ab. Nun ist die Direkteinspritzung auf dem besten Weg das marktbeherrschende Konzept bei den Fremdzündungsmotoren zu werden. Die technische Ausnutzung des Potenzials der Direkteinspritzung lässt sich unterteilen in

- Motorkonzepte mit ausschließlich homogener Verbrennung sowie in
- Motorkonzepte mit homogener Verbrennung und mit Schichtladung (ultramagerer Verbrennung).

Letztere sind deutlich aufwendiger und teurer – aber auch sparsamer. Rein homogen verbrennende Konzepte nutzen das Potenzial zwar nicht vollständig, erreichen trotzdem mit angemessenem Aufwand einen beachtlichen Wirkungsgrad. Der Schadstoffausstoß ist dabei mit dem klassischen Drei-Wege-Katalysator bis in die aktuelle Norm beherrschbar. Wenn es um CO₂-Emissionen und damit um günstigen Kraftstoffverbrauch geht, ist von Motoren, die eine Schichtladung ermöglichen, einiges mehr zu erwarten. Die Umschaltung mehrerer Betriebsarten ist mit beiden Konzepten möglich, bei Motoren mit homogener Verbrennung jedoch nur im eingeschränkten Maße. Dennoch hat sich bei



1.1
 Die Einteilung der Konzepte der Benzin-Direkteinspritzung nach der Art der Gemischbildung.

heutigen Motoren mit der neuesten Generation von Direkteinspritzanlagen die homogene Gemischbildung durchgesetzt. Der Grund: Mit dieser Technik sind Teillast-Lambdawerte von bis zu $\lambda = 1,7$ möglich.

Die Verbesserung des Wirkungsgrads beruht auf drei Parametern. Erstens: die direkte Zufuhr des Kraftstoffes in den Verbrennungsraum entzieht der angesaugten Luft zur Verdampfung Wärme. Dadurch nimmt das Volumen der Füllung bei noch geöffnetem Einlassventil ab und weitere Luft kann nachströmen. Damit steigt der Füllungsgrad bei höherer Motorlast.

Zweitens ist die Kraftstoffwolke im Verbrennungsraum im Teillastbereich von einer isolierenden Schicht aus Luft und zurückgeführten Abgas umgeben. Dies minimiert die Kondensationsverluste. Dadurch nimmt aber auch die Füllung im

Verbrennungsraum viel Platz ein. Die nun im Verhältnis weiter geöffnete Drosselklappe führt zu einer Entdrosselung des Motors.

Drittens: Um den Wirkungsgrad weiter zu verbessern, ist es möglich, kurz vor Verdichtungsende den Kraftstoff einzuspritzen. Somit entzieht dieser der aufgeheizten Zylinderfüllung zur eigenen Verdampfung Wärme. Die Folge: Die Selbstentzündung wird gehemmt, bis durch den Zündfunken kennfeldabhängig gezündet wird. Das lässt höhere, fast otto-untypische Verdichtungsverhältnisse zu, was den thermischen Wirkungsgrad verbessert.

Dieselähnliche Gemischbildung

Will man es mit dem Wirkungsgrad auf die Spitze treiben, kann die direkte Lage des Injektors, kombiniert mit einer entspre-

chenden Luftströmung, eine dieselähnliche qualitative Gemischbildung ermöglichen. Dadurch können Verbrauchsvorteile im zweistelligen Bereich gegenüber klassischen Saugrohreinspritzern erreicht werden.

Dem stehen höhere konstruktive Aufwendungen gegenüber, denn höhere Verbrennungsdrücke bedeuten auch eine größere mechanische Belastung.

NO_x-Entwicklung

Da im leichten Magerbetrieb mit permanenten Sauerstoffüberschuss noch relativ hohe Verbrennungstemperaturen und Drücke herrschen, entsteht dabei das streng limitierte NO_x (Stickoxid). Dieses bedarf einer gesonderten Abgasnachbehandlung, da bei derart sauerstoffreichem Abgas der Drei-Wege-Katalysator wirkungslos ist. Der dann notwendige Adsorberkatalysator kann das NO_x kurzzeitig speichern und gibt es nach einer zyklischen Regeneration als gefahrlosen Stickstoff wieder ab. Der Schwefelanteil des Kraftstoffs lagert sich leider ebenso mit ein und verschließt die aktive Schicht. Durch eine zusätzliche Regeneration muss der Schwefel ebenfalls verbrannt werden, was in beiden Fällen durch hohe Abgastemperaturen geschieht und zusätzlichen Kraftstoffverbrauch bedeutet.

Eine Zeit lang hing aus diesem Grund das Überleben des mit Schichtladung betriebenen Benzin-Direkteinspritzers am seidenen Faden. Erst seit 2003 bieten deutsche Tankstellen Kraftstoff mit einem

Schwefelanteil kleiner 10 ppm flächendeckend an. Das Kraftstoffsystem birgt in sich die wesentlichen technischen Unterschiede zur Saugrohreinspritzung. Da wäre der deutlich höhere Systemdruck von bis zu 200 bar, denn es muss die gleiche Kraftstoffmenge in deutlich kürzerer Zeit eingespritzt werden und auch noch unter strapaziösen Umständen. Es verlangt der Hochdruckeinspritzung einiges ab, gegen den Druck von bis zu 17 bar am Verdichtungsende einzuspritzen und die unmittelbaren Brennraumtemperaturen an der Düsenspitze zu kompensieren. Der Antrieb der Hochdruckpumpe ist mechanisch und mindert die gute Bilanz durch die Leistungsaufnahme.

Die für die Erfassung und Verarbeitung der Betriebsdaten zuständigen Steuergeräte sind dagegen leistungsfähiger. Eine komplette Neuentwicklung sind die Endstufen zur Ansteuerung der Hochdruck-Einspritzventile.

1.1 Vergleich von Saugrohreinspritzung und Direkteinspritzung

Auf den ersten Blick ist die Direkteinspritzung die einfachere Lösung, das Gemisch zu bilden. Verglichen mit der Saugrohreinspritzung ist der Weg des Gemischtransports nur kurz und damit frei von Einflüssen wie der Saugrohrtemperatur, dem Saugrohrdruck und der durch die Drosselklappe hervorgerufenen Strömungen. Die damit verbundenen Entmischungen und Kondensationsverluste der Frischladung

1 Grundlagen

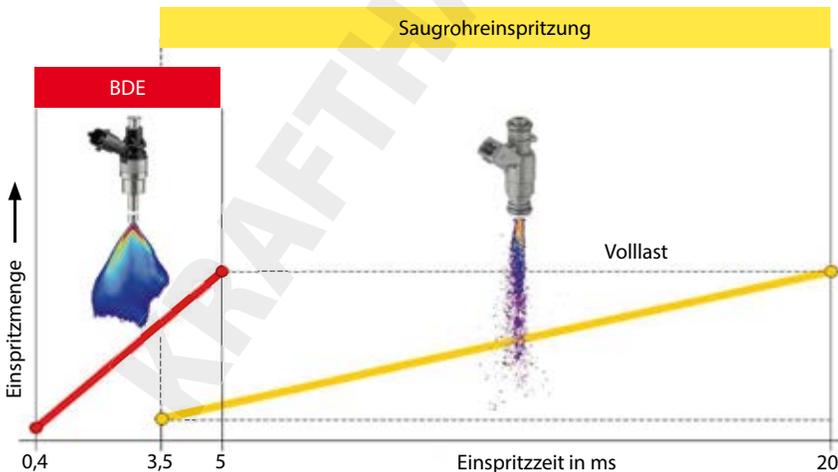
besonders bei Lastwechseln wirken sich negativ auf das Ansprechverhalten und die Schadstoffbilanz aus.

Der Direkteinspritzer transportiert im Saugrohr nur Ansaugluft und zurückgeführtes Abgas in deutlich größeren Anteilen, als es Saugrohreinjectionssysteme verkraften können. Denn hohe Abgas-Rückführraten wirken sich durch die Entdrosselung verbrauchssenkend aus und dienen im Schichtladungsbetrieb der thermischen Isolation der Gemischwolke. Zudem senkt das inerte Abgas die Verbrennungstemperatur, da es nicht mit dem eingespritzten Kraftstoff reagiert und somit die Entstehung von Stickoxiden verhindert. Besonders im Magerbereich – etwas über Lamb-

da 1, wo die Verbrennungsdrücke noch sehr hoch sind und permanenter Sauerstoffüberschuss besteht, ist die Abgasrückführung von großem Nutzen, um die Schadstoffnormen einzuhalten.

Ladungsströmung

Da die Gemischbildung komplett im Verbrennungsraum stattfindet, sind dazu unterstützende Ladungsströmungen notwendig. Das bedeutet, dass entweder die Ansaugkanalform oder schaltbare Klappen oder auch eine Kombination aus beiden, diese Strömung betriebspunktabhängig ermöglichen müssen. Die Notwendigkeit und die Ausprägung der technischen Ver-



1.2

Der Vergleich der Einspritzzeiten von Saugrohr- und Direkteinspritzung bei Leerlauf und Volllast zeigt deutlich, wie viel schneller die Direkteinspritzung arbeiten muss. Bild: Bosch

änderungen hängen davon ab, ob der Motor nur im Homogenbetrieb arbeitet oder auch auf Schichtladung ausgelegt ist.

Markantester Unterschied zwischen Saugrohreinspritzung und Direkteinspritzung ist die Lage des Einspritzventils. Bei der Saugrohreinspritzung steht fast die gesamte Zeit eines Arbeitsspiels der Kraftstoffzufuhr und Gemischbildung zur Verfügung. Das entspricht 20 ms bei 6.000 Umdrehungen pro Minute. Während bei der Direkteinspritzung im Vollastbetrieb mit Einspritzung in den Einlasstakt nur eine halbe Kurbelwellenumdrehung und somit nur ein Viertel dieser Zeit, also 5 ms, zur Verfügung stehen. Im Schichtladungsbetrieb mit Einspritzung am Ende des Verdichtungsstaktes ist der Kraftstoffbedarf im Leerlauf im Verhältnis zur Vollast sehr viel geringer als bei der Saugrohreinspritzung (1:12). Daraus ergibt sich eine Leerlauf-Einspritzzeit von ungefähr 0,4 ms.

Unter Hochdruck

Um die benötigte Kraftstoffmenge für die Direkteinspritzung bereitzustellen, werden die Einspritzventile mit deutlich höheren Systemdrücken als bei der Saugrohreinspritzung versorgt. Die notwendige Hochdruckerzeugung (50–200 bar) ist sehr aufwendig, da mechanische Kolbenpumpen und Druckregelventile unter allen Bedingungen die erforderliche Kraftstoffmenge in das Verteilerrail liefern müssen.

Die Hochdruckregelung findet in einem Regelkreis bestehend aus Hochdrucksensor, Motorsteuergerät und Druck-

regelventil statt. Alle Einspritzventile werden durch das Rail, welches ein festgelegtes Speichervolumen hat, mit Kraftstoff versorgt.

Leistungsfähige Steuergeräte

Durch die höheren Anforderungen ist eine völlig neue Generation von Motorsteuergeräten zum Einsatz gekommen, welche die umfangreichen Steuerungs- und Regelungsaufgaben der Benzin-Direkteinspritzung in zeitgemäßer Präzision abarbeiten. Die Systeme umfassen einige Aktoren mehr, um den erweiterten Funktionsumfang der Kraftstoffhydraulik, der Ansaugluftregelung und der Abgasnachbehandlung zu bewältigen.

Gewachsen ist auch die Anzahl der Sensoren. Zum einen, um die notwendigen Betriebsdaten für Berechnungen zu liefern und zum anderen, um die Komponenten von thermischen, chemischen und mechanischen Überlastungen zu schützen. Schon die Endstufen zur deutlich schnelleren Ansteuerung der Benzin-Hochdruckinjektoren haben eine komplette Neuentwicklung hinter sich und sind zum Teil in externen Treibereinheiten untergebracht, um die entstehende Wärme von der restlichen Steuerelektronik zu isolieren. Für die präzise Zumessung des Kraftstoffs werden die Einspritzventile mit komplexen Stromverläufen bei hochtransformierten Spannungen angesteuert.

1.2 Bauarten und Verfahren

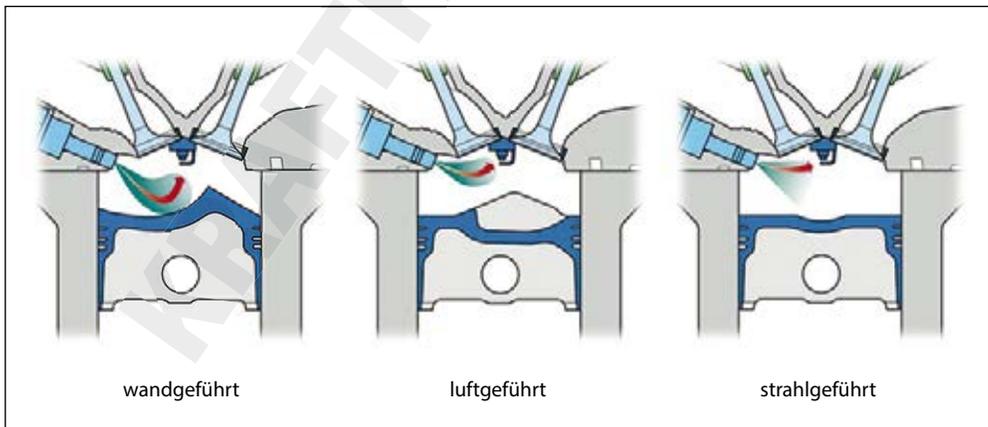
Bei der Benzin-Direkteinspritzung steht der Zusammenführung von Luft und Kraftstoff deutlich weniger Zeit zur Verfügung. Da bei innerer Gemischbildung mit Einspritzung im Verdichtungstakt durch die zeitliche Nähe zur Entflammung generell ein hoher Einfluss auf den Verbrennungsverlauf besteht, ist die Art und Weise, wie die Gemischbildung und die Energieumsetzung im Brennraum zustande kommt, von großer Bedeutung.

Entscheidend ist, dass die Ladung bei jeder Verbrennung entzündet und durchgebrannt werden kann, um Verbrennungsaussetzer und den damit verbundenen erhöhten Ausstoß von unverbrannten Kohlenwasserstoffen (HC) zu vermeiden.

Konstruktionsmaßnahmen

Herkömmliche Motoren gelangen schon bei λ 1,3 an die Laufgrenze. Soll der Motor extrem mager mit bis etwa λ 3 betrieben werden, so muss die Entzündung des Gemischs durch verschiedene konstruktive Maßnahmen gewährleistet werden.

Durch eine zielgerichtete Gestaltung der Ansaugkanäle und der Kolbenoberfläche sowie der optimalen Lage und Entfernung des Einspritzventils von der Zündkerze wurde dies realisiert. Drei unterschiedliche Brennverfahren (strahlgeführt, wandgeführt, luftgeführt, siehe Grafik 1.3 und nachfolgende Kapitel) sind bei der Schichtladung möglich. Abhängig von dem angewendeten Verfahren bilden sich Luftströmungen, um die gewünschte Ladungs-



1.3

Die drei Brennverfahren bei der Einspritzung in den Verdichtungstakt. Die zündfähige Gemischwolke wird auf unterschiedliche Art zur Zündkerze transportiert. Einlassventil links, Auslassventil rechts. Grafik: Volkswagen

bewegung zu erreichen. Bei Schichtladung spritzt das Einspritzventil den Kraftstoff so in die Luftströmung ein, dass er in einem räumlich begrenzten Bereich verdampft. Die Luftströmung transportiert die Gemischwolke zum richtigen Zeitpunkt in die richtige Position an die Zündkerze.

1.2.1 Das strahlgeführte Brennverfahren

Das strahlgeführte Brennverfahren zeichnet sich dadurch aus, dass der Kraftstoff in unmittelbarer Umgebung der Zündkerze eingespritzt wird und dort verdampft. Das Hochdruck-Einspritzventil muss einen breiten Spritzkegel bilden, der präzise mit seiner zündfähigen Randzone auf die Zündkerze ausgerichtet ist, um das Gemisch zum richtigen Zeitpunkt entzünden zu können. Dabei darf die Zündkerze nicht direkt benetzt werden, um die thermische Belastung durch schockartige Temperaturwechsel zu vermeiden. Die vorwiegend eingesetzten, nach außen öffnenden A-Düsen müssen exakt im Brennraum positioniert werden.

Neuere Konzepte setzen auch Mehrlochdüsen mit ähnlich zentraler Brennraumlage ein. Auch dezentral positionierte Mehrlochdüsen mit unsymmetrischer Lochverteilung und unterschiedlichsten Lochanzahlen kommen zum Einsatz. Da der Kolben nicht vordergründig zum Gemischtransport an die Zündkerze gebraucht wird, ist der Schichtladungsbe- reich deutlich breiter als bei den anderen Verfahren. Bei hohen Lasten und Dreh-

zahlen ist die zuführbare Kraftstoffmenge damit annähernd nur von der zur Verfügung stehenden Zeit abhängig.

1.2.2 Das wandgeführte Brennverfahren

Dieses Verfahren ist bei Schichtladungs- motoren der ersten Generation das am meisten eingesetzte. Das dezentral angeordnete Hochdruck-Einspritzventil hat nur ein Düsenloch mit einer dahinter sitzenden Drallscheibe für die Ausbildung des Einspritzstrahles. Oft ist das Düsenloch zur Düsenachse geneigt. Der Prozess ist gekennzeichnet durch das Zusammen- spiel von Einspritzstrahl und Brennraum- wand. Hier wird das Kraftstoffspray mit- tels einer speziellen Ausformung der Kolbenoberfläche zur Zündkerze geführt, unterstützt von einer drall- oder walzen- förmigen Strömung. Durch die zerklüftete Kolbenoberfläche entstehen gerade an den oberen Rändern der Mulde so genann- te ‚Hot Spots‘, die das Gemisch ungewollt zur vorzeitigen Entzündung bringen könn- en. Da die Kolbenoberfläche direkt mit Kraftstoff benetzt wird, sind Ablagerungen und die damit einhergehende höhere Koh- lenwasserstoffemission die Folge. Zusätz- lich sind die Einspritzzeitpunkte unmittel- bar von der Kolbenposition und der Kolbengeschwindigkeit abhängig. Somit sind dem Schichtladungsbetrieb in dieser Hinsicht Grenzen gesetzt, und zwar dort wo die zuführbare Kraftstoffmenge die Lastanforderung nicht mehr bedienen kann.

1.2.3 Das luftgeführte Brennverfahren

Beim luftgeführten Brennverfahren wird der Kraftstoff nur durch die einlassseitig hervorgerufene Ladungsbewegung ohne Brennraumkontakt an die Zündkerze geführt. Die eingesetzten Einloch-Düsen haben eine nach oben geneigte Düsenöffnung, um den Kraftstoffstrahl in die aufsteigende Luftwalze zu injizieren. Durch die intensive Strömung wird das Gemisch auf dem kurzen gemeinsamen Transportweg zur Zündkerze gebildet. Der Kolbenboden ist ebenfalls entsprechend ausgeformt, um die Luftströmung in Richtung Einspritzventil und Zündkerze zu lenken.

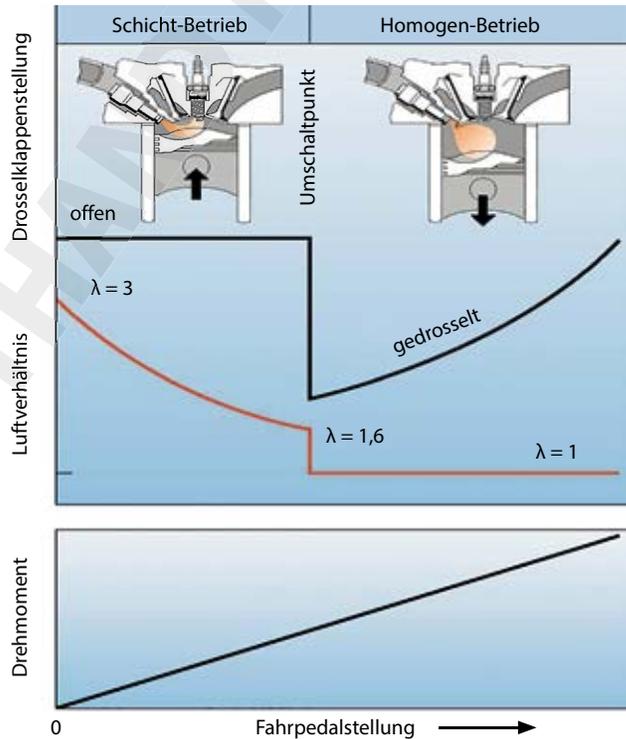
Das Verfahren ist stark abhängig von der Strahlgeometrie und der gezielten Ladungsbewegung. Der Brennraumkontakt der Gemischwolke, die während des Transportes entsteht, soll vermieden werden. Eine stabile Turbulenz muss bis spät in die Kompressionsphase erhalten bleiben, da schon bei geringen Störungen die Luftströmung ausfranst und die Gemischbildung negativ beeinflusst.

Auch alle wandgeführten Verfahren nutzen mehr oder weniger intensive Luft-

strömungen zur Gemischführung. Sie sind damit eine Mischform, die sogenannten wand-/luftgeführten Verfahren.

1.3 Betriebsstrategien

Die unterschiedlichen Brennverfahren ermöglichen bei konsequenter Anwendung als Schichtladungsmotor den Betrieb mit mehreren Einspritzstrategien. In Anpassung an den jeweiligen Lastzustand und Lastwunsch wählt die Motorelektronik die



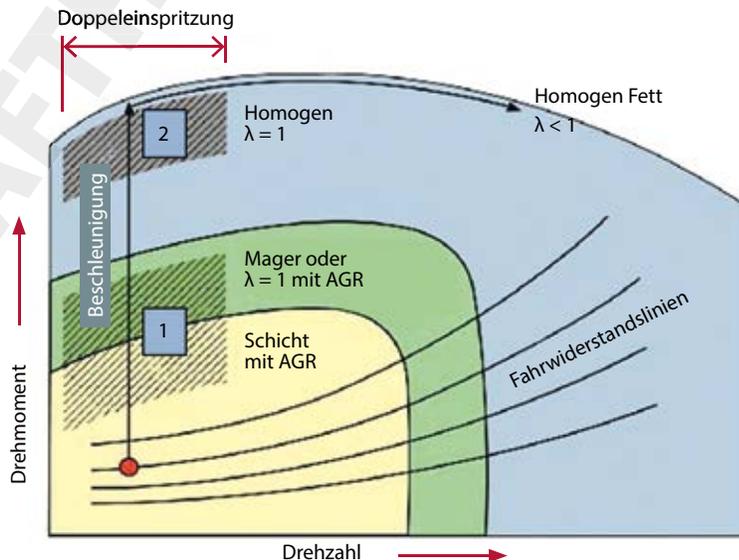
1.4 Wechsel zwischen Homogen- und Schichtladung. Das Drehmoment verhält sich proportional zur Gaspedalstellung. Bild: Bosch

optimale Betriebsstrategie und steuert die dafür notwendigen Aktuatoren entsprechend der Kennfeldvorgaben an. Das bedeutet: während des Betriebes wird zwischen Homogen- und Schichtladung umgeschaltet. Die Regelung muss durch geeignete Übergangsszenarien sicherstellen, dass im Fahrverhalten keinerlei Leistungs- oder Drehmomentsprünge bemerkbar sind. Das vom Motor abgegebene Drehmoment ändert sich entsprechend dem Fahrerwunschmoment. Das heißt, die Änderung der Drosselklappenstellung und des Kraftstoff-Luft-Verhältnisses verhalten sich nicht proportional zur Fahrpedalstellung. Bei Schichtladung ist die Drosselklappe nahezu ganz offen und die Luft kann ungedrosselt in den Motor strömen. Das abgegebene Moment wird nur durch die eingespritzte

Kraftstoffmenge beeinflusst. Das vom Motor abgegebene Drehmoment verhält sich somit wie beim Selbstzündungsmotor proportional zur Kraftstoffmasse.

Ab einem bestimmten Lambdawert entwickelt sich die Gemischbildung im Schichtbetrieb negativ. Es wird eine Umschaltung in den Homogenbetrieb notwendig. Die Betriebsgrenze der Schichtladung ist erreicht. Zur Umschaltung muss die Luftmasse, über die nun im Homogenbetrieb die Drehmomentänderung erfüllt wird, sehr schnell gedrosselt und ein gewünschtes Lambda-Verhältnis sichergestellt werden. Mit steigendem Fahrerwunschmoment wird die Drosselklappe bei konstantem Lambda-Verhältnis weiter geöffnet. Proportional zur Luftmasse steigen die eingebrachte Kraftstoffmasse und damit das Drehmoment.

1.5
Betriebsartendiagramm in Abhängigkeit von Last und Drehzahl.
 Bereich 1 kennzeichnet die Betriebsart Homogen-Schicht.
 Bereich 2 kennzeichnet die Betriebsart Homogen-Klopfschutz.



Nur ein relativ kleiner Bereich mit geringer Drehmomentabgabe – etwa bis zur halben Nenndrehzahl – ist extrem mager mit geschichteter Gemischbildung abgestimmt. Durch die qualitative Gemischbildung und die damit verbundene Möglichkeit des weitestgehend entdrosselten Betriebes, in Verbindung mit einem reduzierten Wandwärmeverlust durch die Ladungsschichtung, ergeben sich in dieser Betriebsart die größten Verbrauchseinsparungen um bis zu 20 Prozent. Der dabei mögliche Lambdawert kann bis zu $\lambda = 3,0$ betragen. Dies entspricht einem Luft-Kraftstoff-Verhältnis von 30 bis 40 zu 1.

Dem extrem mageren Bereich mit Schichtladung kann ein homogener Magerbereich folgen, bevor bei noch höheren Lasten auf homogene Gemischbildung mit $\lambda = 1$ und ‚fetter‘ umgeschaltet wird. Allerdings ist dieser homogene Magerbetrieb nur in engen λ -Bereichen möglich. Dabei wird er durch die sich erhöhende NO_x -Emission in Richtung fett begrenzt, in die andere Richtung durch die Magerlaufgrenze des Motors und die damit verbundenen Verbrennungsaussetzer.

Bei Höchstlast kann die Gemischzusammensetzung mit Lambdaverhältnissen $\lambda < 1$ fett abgestimmt werden, was die Verbrauchsvorteile einschränkt. Unter Berücksichtigung aller genannten Betriebsbedingungen ergibt sich das so genannte Betriebsartendiagramm.

Innerhalb dieses Kennfeldes sind weitere Kriterien wie beispielsweise der Bauteileschutz, die Regeneration des Speicherkatalysators, der Notlauf und die

Temperatur des Katalysators zu berücksichtigen. Die Berücksichtigung dieser Kriterien kann andere Betriebsarten erforderlich machen als es im eigentlichen Betriebsartenkennfeld vorgesehen ist.

Die Momentenanpassung während der Betriebsartumschaltung erfolgt durch die Füllungssteuerung, die Kraftstoffmasse und den Zündzeitpunkt. Die Umschaltung innerhalb der einzelnen Betriebsstrategien muss dabei so erfolgen, dass für den Fahrer keine ungewollten Veränderungen des Drehmomentes entstehen.

Vorteile des Homogen-Betriebs

Die Vorteile im Homogen-Betrieb entstehen durch direktes Einspritzen der gesamten Einspritzmenge, etwa 330° ‚Kurbelwelle‘ vor dem Zünd-OT in den Ansaugtakt. Durch die Innenkühlung wird der Liefergrad erhöht und die Klopfneigung reduziert. Somit kann die Verdichtung des Motors erhöht und der Wirkungsgrad verbessert werden. Dabei wird der angesaugten Luftmasse ein Teil der Wärme durch das Verdampfen des Kraftstoffes entzogen. Das Lambdaverhältnis liegt im Teillastbereich bei etwa $\lambda = 1$ sowie unter Beschleunigung und Volllast etwas darunter, da hier, wie bei der klassischen Gemischbildung, ein etwa zehn Prozent fetteres Gemisch für die maximale Leistungsausbeute benötigt wird.

In der Taktzeit, die zur Verfügung steht, kann eine große Menge Kraftstoff zugeführt und vermischt werden. Da der Brennraumdruck sich in etwa auf dem Niveau des Atmosphärendrucks oder sogar darunter befindet, sind zur Einbringung des Kraft-

1.6
Homogen-Betrieb mit früher Einzelspritzung in den Ansaugtakt.



1.7
Doppeleinspritzung im Homogen-Schicht-Betrieb mit Kraftstoffmengenteilung 75 zu 25 Prozent.



stoffs nur geringe Einspritzdrücke notwendig, was diese Betriebsstrategie auch als Notlaufstrategie prädestiniert.

In einer weiteren Betriebsart, dem Homogen-Mager-Betrieb, wird ebenfalls im Ansaugtakt eingespritzt, allerdings mit dem Ziel, in einem Übergangsbereich zwischen Schicht- und Homogen-Betrieb den Motor mit einem homogenen mageren Gemisch zu betreiben. Bei einem Betrieb mit $1 < \lambda < 1,6$ wird der Kraftstoffverbrauch gegenüber dem Homogen-Betrieb mit $\lambda = 1$ reduziert. Im Homogen-Schicht-Betrieb ist der gesamte Brennraum mit einem homogen mageren Grundgemisch gefüllt. Dieses Gemisch entsteht durch frühe Einspritzung von etwa 75 Prozent der berechneten Gesamt-Kraftstoffmenge im Ansaugtakt. Eine zweite Einspritzung der restlichen 25 Prozent erfolgt im Kompressionstakt. Dadurch entsteht eine fettere zündfähige Zone im Bereich der Zündkerze. Diese Schichtladung ist leicht entflammbar und

kann mit der Initialzündung das umgebende sonst durch den hohen Lambdawert zündunwillige Homogen-Mager-Gemisch entflammen. Diese Betriebsstrategie wird genutzt, um beim Umschalten von Homogen- auf Schicht-Betrieb den Drehmomentverlauf besser anpassen zu können.

Durch eine gezielte Doppeleinspritzung bei Volllast im Homogen-Klopfschutz-Betrieb kann auf die Spätverstellung des Zündzeitpunktes zur Vermeidung von Klopfen verzichtet werden. Die kühlende Ladungsschichtung nahe dem errechneten Zündzeitpunkt verhindert die gefährliche Selbstentzündung des homogenen Gemisches.

Schicht-Kat-Heizen

Eine weitere Art der Doppeleinspritzung, das Schicht-Kat-Heizen, ermöglicht das schnelle Aufheizen des Katalysators. Dabei wird wie im Schicht-Betrieb durch Haupt-

1 Grundlagen

1.8

Doppeleinspritzung die Dritte: Hier dient die späte Zumessung der zweiten Teilmenge der schnellen Erwärmung der Katalysatoren.



1.9

Einspritzzeitpunkt im Verdichtungstakt bei Schichtladung. Der Kraftstoffzufuhr sind hier enge Grenzen gesetzt.



einspritzung in den Verdichtungstakt ein mageres Gemisch bereitet. Nach der Entzündung des Kraftstoffs wird noch einmal im Arbeitstakt eingespritzt. Dieser Kraftstoffanteil verbrennt sehr spät und heizt durch die zeitliche Nähe zum Öffnungspunkt des Auslassventils den Abgasstrang stark auf.

Die kontrollierte Einspritzung der vorherberechneten Kraftstoffmenge in den Verdichtungstakt findet nur im eng begrenzten Bereich der Schichtladungsstrategie statt. Unter hohem Kraftstoffdruck von 50–120 bar findet die Einspritzung zwischen frühestens 90° und spätestens 20° ‚Kurbelwelle‘ vor dem OT statt.

Bei noch früherem Spritzbeginn ist die bei einigen Verfahren notwendige Kolbenmulde noch zu weit weg. Darüber hinaus bringt ein späteres Spritzende bei zu kurzer Gemischbildungszeit ein zu fettes Ge-

misch an die Zündkerze. Der eigentlichen Gemischbildung bleiben oft nur etwa 15° Kurbelwellenwinkel. Die Schichtladungs-freigabe bedarf einiger steuerungs-technischer Vorbedingungen wie zum Beispiel einen fehlerlosen Betrieb und genügend Katalysator-temperatur. Das Gemisch befindet sich im Brennraum thermisch gut abgeschirmt, umgeben von mit hoher Rate zurückgeführten Abgas.

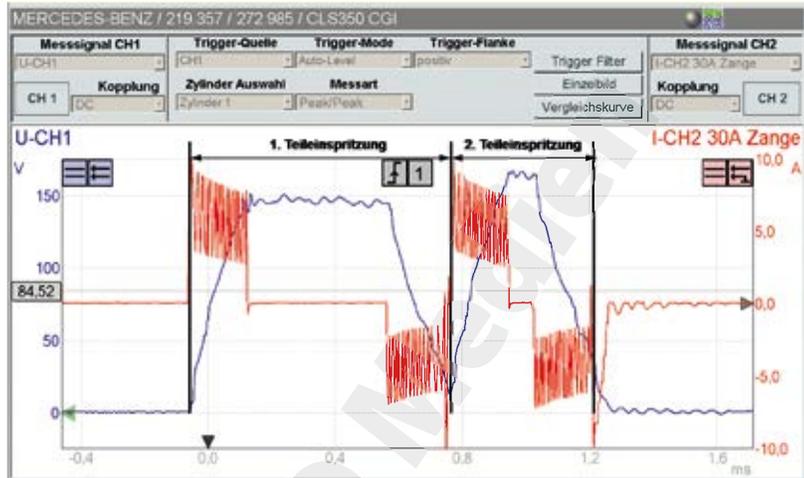
Mehrfache Einspritzung – Variationen

Weitere Strategien, wie zum Beispiel die dreifache Einspritzung, sind mit schnell-schaltenden Hochdruckeinspritzventilen ebenfalls möglich und verfeinern im Wesentlichen die Übergänge zwischen den Betriebsstrategien oder dienen dem Bauteilschutz.

Durch die eingesetzte schnelle Steuergeräteelektronik ist es in Verbindung mit

1.10

Oszilloskopbild des Spannungsverlaufs (blau) und des Stromverlaufs (rot) eines Piezoinjektors mit Doppeleinspritzung.



der Direkteinspritzung außerdem möglich, die Lastwechseldynamik deutlich zu verbessern. Der eingehende Lastwechselbefehl kann noch während dem Einspritzprozess am Einspritzventil durch Verkürzung oder Verlängerung der Öffnungszeit wirksam werden. Selbst bei schon fortschreitender Verbrennung kann der Verlauf noch durch eine zusätzliche Kraftstoffzugabe beeinflusst werden. Somit ergibt sich eine Vielzahl von möglichen Einspritzvariationen, die dem Betrachter in der Diagnose tiefe Furchen in der Stirn hinterlassen dürften.

setzen, sollte einige grundlegende Vorgehensweisen und Maßnahmen kennen.

Zuerst einmal haben Laien nichts an diesen Systemen verloren. Wir haben es hier mit hochsensiblen unter hohen Drücken stehenden Komponenten zu tun, die drucktechnisch entschärft werden müssen, bevor sie geöffnet werden. Zuerst muss der Druck im System abgebaut werden, indem die elektrische Vorförderpumpe im Tank stillgelegt wird. Danach muss der Motor gestartet und mehrmals im Stand beschleunigt werden, bis er ausgeht. Zur Sicherheit kann das Absinken des Hochdruckes kontrolliert wer-

1.4 Arbeitshinweise und Vorsichtsmaßnahmen

Wer den Mut und den Weitblick hat, sich mit modernen Hochdruck-Einspritzsystemen zu beschäftigen und sie Instand zu



Im Gesamtsystem herrschen hohe Drücke! Diese Drücke müssen vor Wartungsarbeiten erst abgebaut werden!



1.11

Hinweise, die man befolgen sollte: Mit gelben Aufklebern signalisiert Mitsubishi an der Motorabdeckung des GDI kritische Stellen. Ein ähnlicher Hinweis ist auf dem Düsentreiber des Carisma GDI zu finden.

Tipp

Einige Systeme sind mit externen Einspritzdüsentreibern ausgerüstet, die im Betrieb sehr warm werden und an denen man sich bei Montagearbeiten leicht verbrennen kann. Daher ist, wenn möglich, eine Abkühlzeit vorzusehen, bevor der Düsentreiber direkt berührt wird. Mit einem Infrarotthermometer hat der Diagnostiker die Temperatur immer gefahrlos im Blick.

den, indem der entsprechende Istwert mit dem Diagnosetester verfolgt wird. Nach einer kurzen Wartezeit kann das erkaltete System vorsichtig unter Zuhilfenahme von einigen saugfähigen Lappen geöffnet werden.

Die Verwendung von Neuteilen

Der Dichtheit kommt nach Arbeiten an kraftstoffführenden Teilen eine hohe Bedeutung zu. Ob demontierte Bauteile wiederverwendet werden dürfen, ist den Herstelleranleitungen zu entnehmen. Eine exakte und saubere Arbeit ist Grundvoraussetzung! Alle Komponenten sind hoch-

präzise gefertigt und können nur störungsfrei arbeiten, wenn sie mit peinlichster Vorsicht in Punkto Sauberkeit behandelt wurden.

Die meisten Bauteile sind sehr stoß- und korrosionsempfindlich, daher Neuteile in der Originalverpackung lagern und Schutzfolien oder Beschichtungen erst kurz vor der Montage entfernen. Demontierte Teile sind entsprechend zu lagern und zu schützen, am besten in dem Medium, mit dem sie im System in Berührung kommen. Fusselfreie Tücher und das vorgeschriebene Spezialwerkzeug sowie gepflegte zeitgemäße Messtechnik sind selbstverständlich.

Zündsysteme

Die Hochleistungszündsysteme sind gegenüber herkömmlichen Zündsystemen in der Leistung etwa doppelt so stark. Sie sollten daher auch mit gebührenden Respekt und Verständnis gehandhabt werden. Da die meisten Zündsysteme mit Stabzündspulen also mit Direktzündung arbeiten, ist die Sicherheit gegenüber äußerlichen Funkendurchschlägen gebannt. Dennoch bergen unkonventionelle Zündfunkenprüfungen im zerlegten Zustand ungeahnte Risiken und sollten unterbleiben, denn angemessene Messtechnik kann, professionell eingesetzt, den Fehler gefahrloser und schneller aufspüren.

1.5 Diagnosewerkzeuge

Mehrmarkentester, Oszilloskop

Bei der Auslese von Steuergeräten sind in den Motorsteuerungen ab der Euro-3- Abgasnorm zweierlei Diagnoseplattformen verfügbar. Die reproduzierbarsten Daten erlangt der Diagnoseprofi über die standardisierte OBD-Plattform. Da diese Daten nur auf das nötigste reduziert sind, empfiehlt sich zusätzlich die erweiterte Diagnose mittels Mehrmarkentester in der herstellerindividuellen Diagnoseplattform.

Die angezeigten Istwerte werden im Steuergerät aufbereitet und über die serielle Diagnose-Schnittstelle an das Auslesegerät übermittelt. Sie stellen somit keine Echtzeitdaten dar. In Abhängigkeit von der Datenübertragungsrate sind grafisch dargestellte Istwerte für die hochauflösende Diagnose einiger Bauteile einfach ungeeignet. Eine Oszilloskopqualität erreicht eine solche Aufzeichnung nicht. Somit sollte der Diagnoseprofi zur Beurteilung schnellerer Signale tatsächlich ein Oszilloskop zur Hand nehmen. Wer tiefer einsteigen will, gemeint ist der ernsthafte Diagnoseprofi, benötigt ein zeitgemäßes Mehrkanaloszilloskop.

Die Diagnosegeräte können nur die Daten aus den Steuergeräten abfragen, die der Hersteller bei der Applikation des Systems dort freigegeben hat. Das soll nach Erfahrungen des Autors aber auch bei Diagnosegeräten der Markenwerkstätten hin und wieder zu wenig sein. Generell lassen sich in der Diagnoseplattform der Herstel-

1 Grundlagen

ler alle nötigen Daten abfragen, Stellglieder aktivieren und Funktionen ausführen. Die OBD ist für derartige Zusatzfunktionen nicht geschaffen, da die entsprechende Standardisierung schwierig ist.

Druckmessgeräte/Strommesszange

Zur Prüfung von pneumatischen Komponenten empfiehlt sich eine umschaltbare Druck-Unterdruckpumpe mit Manometer und ein Sortiment aus Adaptern und Abzweigstücken mit den gebräuchlichsten Schläuchen in unterschiedlichen Längen.

Für Druckmessungen im Kraftstoffsystem kann ein Druckmesskoffer mit verschiedenen Manometern, wie aus dem Dieselmotorbereich oder von der K- und KE-Jetronic bekannt, verwendet werden. Zwischenzeitlich hat auch die Spezialwerkzeugbranche die Bedürfnisse an Hydraulikmessgeräten für Benzin-Direkteinspritzer wahrgenommen und bietet adäquate Messkoffer mit den wichtigsten Adaptio-

nen an. Aufgrund des maximalen Hochdrucks von etwa 200 bar wird auch eine kostengünstige Messmöglichkeit im Hochdruckbereich mit einem flüssigkeitsgedämpften Zeigermanometer zukünftig verfügbar sein.

Zusätzlich ist eine Strommesszange für Ströme bis 30 oder 50 Ampere mit einer möglichst hohen Genauigkeit zu empfehlen.

Messadapter, Prüfkabel

Alle Messungen müssen zerstörungsfrei durchführbar sein, denn nichts ist schwieriger zu finden als ein bei der Diagnose selbst verschuldeter Fehler. Dazu benötigt der Diagnoseprofi einen Messadapterkoffer oder ein Prüfkabelset, welches die meisten Adaptionen für Kabel und Stecker beinhaltet. Natürlich darf das gute alte Multimeter nicht fehlen. Nur sollte man auf die inneren Werte achten. Das heißt geringe Toleranzen und hohe Impedanz sowie umschaltbares Autorange.

2. Das Kraftstoffsystem

Das Kraftstoffsystem ist in einen Niederdruckbereich und in einen Hochdruckbereich unterteilt. Die Niederdruckseite enthält die Bauteile der Vorförderung vom Kraftstoffbehälter bis zur Hochdruckpumpe und kann auf konventionelle Art mit einem Druckregler sowie mit einer bedarfsgerechten Kraftstoffpumpensteuerung ausgerüstet sein.



Da der Kraftstoffseite bei der Benzin-Direkteinspritzung eine noch wichtigere Funktion in Bezug auf die Gemischbildung und Abgasemission zukommt, spielt die On-Board-Diagnose eine noch größere Rolle.

Auf der Hochdruckseite befinden sich die Komponenten der Hochdruckerzeugung und Regelung bis hin zum Verteilerrohr und den Injektoren. Alle Bestandteile

des Systems sind auf die erhöhten Erfordernisse der Benzin-Hochdruckeinspritzung ausgelegt und daher in der Handhabung und Diagnose entsprechend umsichtig zu behandeln.

Fehlfunktionen werden schon zeitig durch die erweiterte Sensorik anhand von Rechenprozessen erkannt und durch Fehlercodes quittiert. Der Zusammenhang der Fehlermeldungen mit dem tatsächlich defekten Bauteil bedarf der präzisen Systemkenntnis.

Funktionsbeschreibung *Hochdruck*

Der Kraftstoff wird durch eine im Tank angeordnete elektrische Vorförderpumpe über den Kraftstofffilter und den Druckregler zur eigentlichen Hochdruckpumpe gefördert. Der Vorförderdruck ist zumeist von einem federbelasteten Membran-Druckregler auf den gewünschten Niederdruck begrenzt oder er wird von Kraftstoffpumpe bedarfsgerecht generiert.



Die Herausforderung von Hochdruck-Einspritzsystemen liegt nicht nur in der Erzeugung des Hochdrucks, sondern vor allen in der Geschwindigkeit des Druckaufbaus. Denn viele Systeme machen aus Effizienz- und Emissionsgründen einen Hochdruckstart, bei dem es gilt, den notwendigen Start-Freigabedruck möglichst schnell zu erreichen.

Die nockenwellengetriebene Hochdruckpumpe erhöht den Kraftstoffdruck und fördert diesen zum Kraftstoffverteilerrohr (Rail), von wo aus die Injektoren den Kraftstoff entnehmen und direkt in den Verbrennungsraum injizieren.

Eine Herausforderung ist die Kraftstofftemperatur, die nach Fahrten mit hoher Last oder bei Heißstart mit allen Mitteln im erträglichen Rahmen gehalten werden muss, um eine Dampfblasenbildung zu vermeiden. Im Lauf der Zeit haben sich etliche Systeme etabliert, die in ihrer technischen Gestaltung sehr unterschiedlich sind.

2.1 Kraftstoffsysteme im Überblick

Die Vielfalt der Kraftstoffsysteme ist derart groß, dass eine Unterteilung nach mehreren technischen Aspekten vorgenommen werden muss. Die Niederdrucksysteme lassen sich in bedarfsgeregelte und nicht bedarfsgeregelte Systeme unterteilen. Weiterhin gibt es mehrere Variationen von Fördermodulen und Verbaupositionen von Kraftstofffiltern. Moderne aufgeladene Motoren weisen aufgrund der thermischen Einflüsse speziell bei Niederdrucksystemen konstruktive Feinheiten auf.

Die Hochdrucksysteme lassen sich nach der Art der Druckregelung in hochdruckgeregelte und mengengeregelte Systeme unterscheiden. Während die hochdruckgeregelten Systeme nur auf eine Art funktionieren, gibt es bei den mengengeregelten Systemen eine Mehrzahl von Möglichkeiten, die sich oft direkt an der

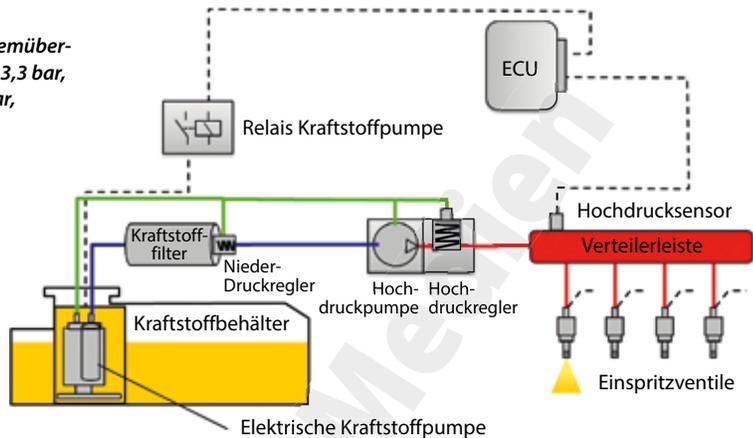
konstruktiven Auslegung der Hochdruckpumpe orientieren. Daher bildet die Art der Regelung immer eine Einheit mit der Hochdruckerzeugung und sogar bis auf wenige Ausnahmen auch eine Einheit mit der Art der Niederdruckregelung. Bleibt noch zu erwähnen, dass die Systemauslegung hochgradig von dem konstruktiv bestimmten Hochdruckwert und dem gewünschten Volumenstrom abhängig ist. Diese zwei Faktoren werden bedingt vom eingesetzten Brennverfahren und den damit in Verbindung stehenden Injektoren und letztlich von dem Hubraum und der Leistung des Motors bestimmt.

2.1.1 System Melco im Mitsubishi GDI und bei Volvo

Das System des Mitsubishi GDI von Melco besteht aus einer konventionellen Niederdruckseite mit federbelastetem Membrandruckregler und einer Hochdruckpumpe mit einem Druckreglergehäuse. Dort wird ein durch einen hydraulisch-mechanischen Druckregler konstanter Wert von 50 bar im Verteilerrail und somit an den Hochdruck-Einspritzventilen eingestellt. Ein piezoelektrischer Drucksensor im Hochdruckkreis überwacht den Kraftstoffdruck und gibt das Signal zur Verarbeitung an das Motorsteuergerät weiter. Der Hochdruck kann vom Steuergerät nicht beeinflusst werden. In der Hochdruckpumpe befinden sich zudem Flatterventile, die wie ein Bypassventil wirken. Über das Bypassventil wird das System mit Niederdruck wäh-

2.1

Melco GDI Kraftstoff-Systemübersicht (blau = Niederdruck 3,3 bar, rot = Hochdruck 45–53 bar, grün = Rücklauf).



rend der Vorlaufphase der Vorförderpumpe und nach Einschalten der Zündung gefüllt, um nach längeren Standzeiten einen schnellen Druckaufbau zu gewährleisten. Die Hochdruck-Einspritzventile werden mit höherer Spannung und höherem Strom angesteuert, um die neuen Betriebsbedingungen zu bestehen. Dabei kommt ein zusätzliches Düsentreibersteuergerät zur Anwendung. Auch bei diesem System ist ein Aktivkohlebehälter eingebaut, der in Intervallen gespült werden muss. Die Einbaorte liegen im Motorraum oder am Tank. Der Kraftstoff muss trotz der hochdruckseitigen Regelung nicht gekühlt werden.

2.1.2 System Siemens der 1. Generation

Das Kraftstoffsystem von Siemens ist mit einer variablen Hochdruckregelung ausgestattet. Ein Kraftstoffsystem dieser Bauart wird in der ersten Generation der Direkt-

einspritzer bei den HPI-Motoren von PSA, dem Renault IDE, dem 2,2 Direct von Opel und im M271 bei Mercedes-Benz eingesetzt.

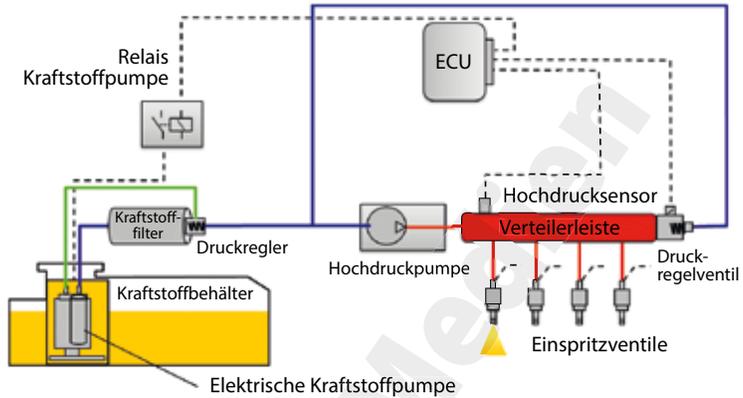
Das Hochdruck-Regelventil wird vom Steuergerät angesteuert, um hochdruckseitig den von der Pumpe erzeugten Druck in der Verteilerleiste und somit an den Injektoren kennfeldgerecht einzustellen. Der abgeregelte Kraftstoff gelangt vom Regelventil über eine kurze Rücklaufleitung in den Niederdruckkreis auf die Saugseite der Hochdruckpumpe. Die durch die Entspannung in den Kraftstoff eingetragene Wärme wird dadurch nicht in den Kraftstoffbehälter zurückgeführt. Dort würde der nachfolgende Temperaturanstieg zur ständigen Beladung des Aktivkohlefilters führen.

Die Niederdruckregelung erfolgt zu meist am nahe dem Kraftstoffbehälter befindlichen Kraftstofffilter mit integriertem federbelasteten Membran-Druckregler. Der Niederdruck wird auf konstant 3,5 bar

2 Das Kraftstoffsystem

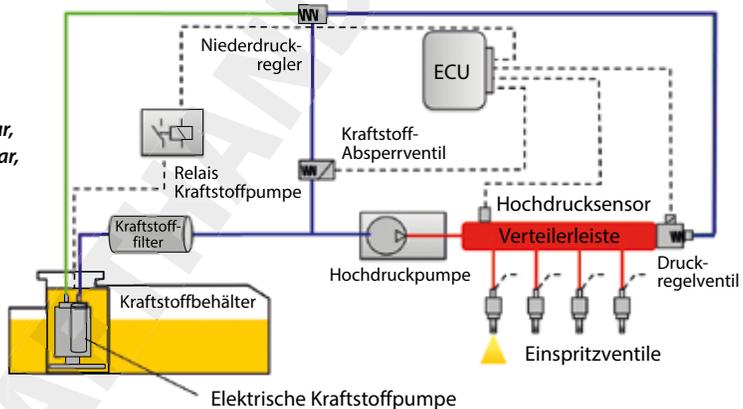
2.2

Siemens Kraftstoff-Systemübersicht
(blau = Niederdruck 3,5 bar, rot = Hochdruck bis 120 bar, grün = Rücklauf).



2.3

Bosch/VW Kraftstoff-Systemübersicht der ersten Generation
(blau = Niederdruck 3,5 bar, rot = Hochdruck 50–100 bar, grün = Rücklauf).



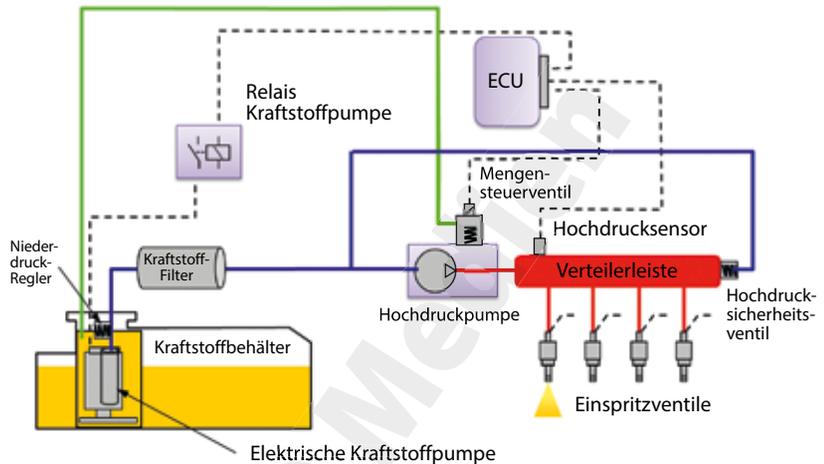
geregelt. Auf kurzem Weg gelangt der überschüssige Kraftstoff von dort aus drucklos in den Kraftstoffbehälter zurück. Die Hochdruckerzeugung ist herstellereinspezifisch. So ist das System bei Mercedes und Renault mit einer Dreizylinder-Radialkolbenpumpe und bei PSA und Opel mit einer Dreizylinder-Axialkolbenpumpe ausgestattet.

2.1.3 System Bosch mit HDP 1 im VW FS1

Das Kraftstoffsystem der ersten Generation FS1 bei VW vom Systemlieferanten Bosch wird niederdruckseitig von einer In-Tank-Elektro-Kraftstoffpumpe mit Kraftstoff versorgt. Der Niederdruck wird von einem im Motorraum befindlichen

2.4

System des Audi FSI mit Bosch HDP 2 und konventioneller Vorförderung mit rücklaufloser Niederdruckregelung direkt an der In-Tank-Pumpeneinheit (blau = Niederdruck 6 bar, rot = Hochdruck 40–120 bar, grün = Rücklauf).



Membrandruckregler auf konstant 3 bar geregelt. Bei Heißstarts allerdings verschließt ein Absperrventil die Vorlaufleitung des Druckreglers von der Kraftstoffpumpe. Zur Vermeidung von Dampfblasen steigt der Druck so bis auf den Öffnungsdruck des Überdruckventils in der Elektro-Kraftstoffpumpe von etwa 6 bar an.

Die Hochdruckpumpe ist eine Dreizylinder-Radialkolbenpumpe und läuft immer mit voller Förderleistung. Der Hochdruck wird je nach Betriebszustand auf 50 bar im Leerlauf bis etwa 100 bar oberhalb von 4.000/min von einem Druckregelventil im Rail geregelt. Das Druckregelventil übernimmt bei der Platzierung im Hochdruckbereich gleichzeitig die Funktion der Druckbegrenzung ab etwa 120 bar. Der überschüssige Kraftstoff wird mit der Rücklaufmenge der Hochdruckpumpe und des Niederdruckreglers in den Kraftstoffbehälter zurückgeleitet.

2.1.4 System Bosch mit HDP 2 im Ford SCI und Audi 2,0 FSI

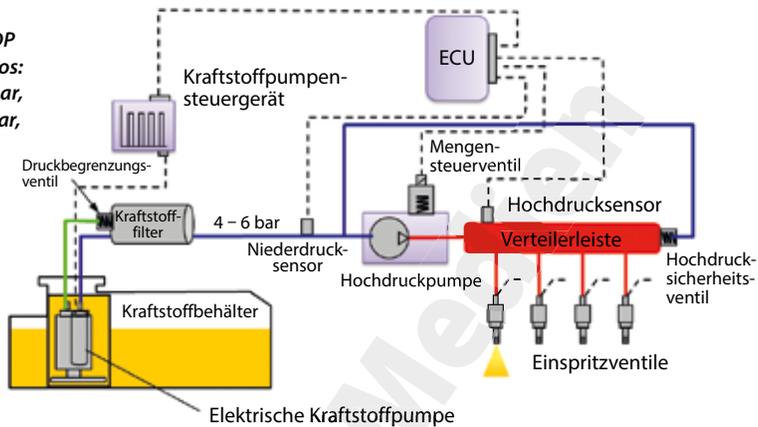
Im SCI-Motor von Ford und im 2,0 Liter FSI-Motor von Audi kommt erstmals ein System mit mengengeregelter Hochdruckpumpe HDP 2 von Bosch zum Einsatz. Das System von Toyota ist identisch. Es ist allerdings ausschließlich mit eigenen Komponenten im Hochdruckbereich ausgestattet. Die Niederdruckförderung findet durch eine Elektro-Kraftstoffpumpe statt, die sich in einem Schwalltopf im Kraftstoffbehälter befindet.

In der Einheit befindet sich gleichzeitig der Niederdruckregler, der den überschüssig geförderten Kraftstoff gleich vor Ort in den Behälter zurückführt. Man spricht in diesem Fall von einem rücklauflosen Niederdrucksystem. Zusätzlich befindet sich bei Ford noch das bekannte Absperrventil (Dosierventil) zur Heißstart-Druckanhebung im Niederdruckkreis. Im Gegensatz dazu fährt Audi das Niederdrucksystem

2 Das Kraftstoffsystem

2.5

Das System mit Hitachi HDP der 2. Generation und Decos: (blau = Niederdruck 4–6 bar, rot = Hochdruck 40–120 bar, grün = Rücklauf).



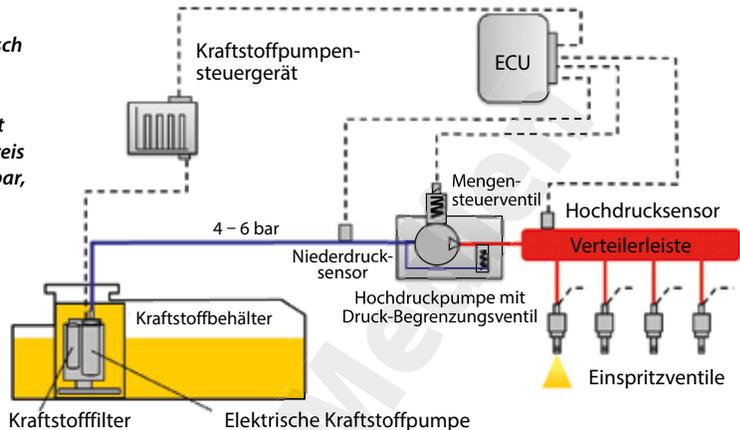
zur Dampfblasenvermeidung gleich mit aufwendigen 6 bar. Die Vordruckumschaltung fällt dafür bei diesen Motoren weg. Die Schaltung der Elektro-Kraftstoffpumpe übernimmt ein entsprechendes Relais, welches den Schaltbefehl masseseitig an der Spule des Steuerstromkreises vom Motorsteuergerät bekommt. Die Hochdruck-erzeugung obliegt der Einzylinder-Hochdruckpumpe mit angebaubtem Mengensteuerventil, welches für eine Reduzierung der Leistungsaufnahme der Hochdruck-erzeugung sorgt. Der überschüssige Kraftstoff gelangt so nicht erst in den Hochdruckkreis sondern wird über den Rücklauf zum Kraftstoffbehälter zurückgeführt. Das nun zusätzlich im Rail verbaute Hochdrucksicherheitsventil führt die Leckage-menge wieder dem Niederdruckbereich vor der Hochdruckpumpe zu. Somit steht der Rücklauf unter Vorförderdruck. Der Rail-drucksensor, das Motorsteuergerät und das Mengensteuerventil bilden den Hochdruck-Regelkreis.

2.1.5 System Bosch HDP 2 und Hitachi 2. Generation mit Decos

Das System mit Bosch HDP 2 kann ebenso mit einem Niederdruckkreis mit bedarfs-ge-erter Kraftstoff-Vorförderung, Decos, ausgestattet sein wie das System mit der Hitachi HDP der 2. Generation. Decos bedeutet: demand controlled fuel supply – bedarfsgeregelte Kraftstoffförderung. Die Ansteuerung der Elektro-Vorförderpumpe übernimmt ein Leistungsteil in Form eines Kraftstoffpumpensteuergerätes, welches nahe der Pumpeneinheit auf dem Kraftstoffbehälter oder auf der Abdeckung darüber verbaut ist. Die Vorförderpumpe wird drehzahl-gere-gelt und erzeugt damit einen vom Steuergerät angestrebten Niederdruck. Womit alle Bauteile der bisherigen Regelung entfallen. Dazu erhielt das System einen Niederdrucksensor, der in einem Regelkreis mit dem Motorsteuergerät, dem Pumpensteuergerät und der Vorförderpumpe einen Istwert als Regelungsgrund-

2.6

Das aktuelle System mit Bosch HDP 5 oder Hitachi HDP der 3. Generation und bedarfsgeregelter Vorförderung mit rücklauflosem Hochdruckkreis (blau = Niederdruck 4–6,5 bar, rot = Hochdruck).



lage liefert. Somit ist eine Senkung der Leistungsaufnahme des Niederdrucksystems möglich, da der Kraftstoff nun schon auf der Vorförderseite bedarfsgerecht limitiert an die Hochdruckerzeugung gelangt. Der Hochdruckkreis ist auch bei der Hitachi HDP mit einem externen Hochdruck-Sicherheitsventil versehen. Im Unterschied zu der Bosch HDP 2 besitzt die Hochdruckpumpe keinen externen Rücklauf. Dadurch benötigt das System in der Vorförderleitung zur Hochdruckpumpe eine Dämpfungsdrossel welche die Druckpulsationen der Absteuermenge dämpfen soll. Die Kraftstoffsysteme für aufgeladene Motoren besitzen am Kraftstofffilter ein Druckbegrenzungsventil von dem aus der Rücklauf direkt in dem Kraftstoffbehälter mündet.

2.1.6 System Bosch HDP 5 und Hitachi 3. Generation mit Decos

In aktuellen Benzinhochdruck-Einspritzanlagen kommen vorwiegend Systeme

mit bedarfsgeregeltem Niederdrucksystem und mengengeregelten Hochdruckpumpen zum Einsatz. Diese Systeme zeichnen sich durch ihre geringe Leistungsaufnahme und angemessene Pumpenbelastung im Niederdruckbereich sowie auch bei Turbomotoren beherrschbare Kraftstofftemperaturen aus.

Die Hochdruckerzeugung findet bevorzugt mit Einzylinder-Radialkolbenpumpen wie Hitachi Generation 3, Bosch HDP 5 oder auch mit saugmengengeregelten Axialkolbenpumpen statt (wie beispielsweise bei BMW, PSA oder Porsche).

Eher die Ausnahme bilden großvolumige Motoren, die zwei Pumpen benötigen, um die Volumenströme zu generieren. Die Systeme haben immer kompaktere Komponenten. Beispielsweise ist das Druck-Sicherheitsventil direkt in die Pumpe integriert und das den abgeregelten Kraftstoff intern auf die Saugseite in den Niederdruckbereich zurückführt. Somit entfällt der Rücklauf komplett.

Die durch die pulsierende Kraftstoffmenge hervorgerufenen Druckspitzen werden durch eine Dämpfungsdrossel in der Vorlaufleitung nahe dem Fördermodul von der Vorförderpumpe ferngehalten. Die Drossel befindet sich in der Leitung. Sie ist äußerlich kaum zu sehen und in der Grafik (Abb. 2.6) auch nicht eingezeichnet.

Einige Systeme werden mit einem externen Kraftstofffilter ausgerüstet, in dem sich ein Niederdruck-Sicherheitsventil befindet, von wo aus eine Rücklaufleitung zum Fördermodul-Oberteil im Kraftstoffbehälter führt.

Der Niederdrucksensor ist bei einigen Systemen ebenfalls nicht mehr verbaut, da das Steuergerät mit einer Testroutine in festgelegten Zyklen einen Ersatzwert ermitteln kann. Das äußerliche Fehlen einiger Komponenten soll dennoch nicht über die Komplexität dieses Systems hinwegtäuschen. Gerade im Niederdruckbereich hat sich bei aufgeladenen Motoren einiges geändert.

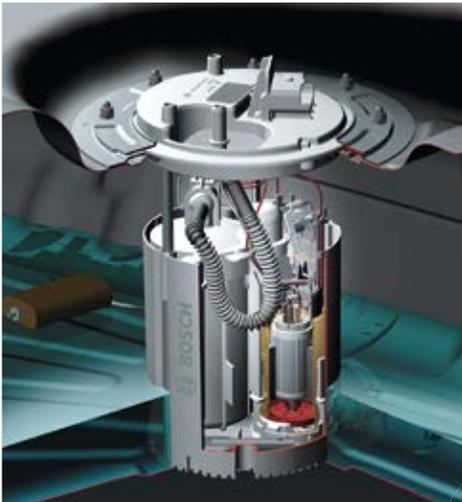
2.2 Das Kraftstoff-Niederdrucksystem

Der Niederdruckkreis kann bei Benzindirekt-Einspritzanlagen je nach Anforderung an das Gesamtsystem sehr unterschiedlich ausgelegt sein. Wie bei der Saugrohreinjection gibt es auch hier die Varianten mit Kraftstoffrücklauf und ohne Kraftstoffrücklauf sowie mit Membrandruckregler und mit bedarfsgeregelter Vorförderung, wo der Druckregler entfällt.

Das Kraftstoff-Niederdrucksystem besteht aus der In-Tank-Einheit mit einer elektrischen Vorförderpumpe, einer Saugstrahlpumpe, einem Kraftstofffilter und einem Druckregler. Alle Bauteile können je nach Systemvariante getrennt wie auch kompakt in einem Förderpumpenmodul zusammengefasst sein. Die Kraftstoffpumpen können auf einer Achse mit nur einer Pumpenstufe für den Hauptförderdruck und zweistufig mit einer Strömungspumpe zur Befüllung des Pumpenraumes mit einem Überdruck von 0,25 bar und einer Hauptförderpumpe in einem Gehäuse ausgeführt sein. Der Druckregler ist bis auf eine Ausnahme entweder am Kraftstofffilter platziert oder er befindet sich ebenfalls im Förderpumpenmodul. Das Förderpumpenmodul enthält außerdem das Grob-Ansaugsieb und den Tankfüllstandsgeber.

Bei Satteltanks gibt es noch eine teleskopartige Ansaugverlängerung mit Saugstrahlpumpe für die andere Tankhälfte. Über das Vorsieb am Boden des Förderpumpenmoduls wird der Kraftstoff gefiltert und durch die Saugstrahlpumpe angesaugt. So füllt sich der Schwalltopf. Ein Klappenventil sorgt für sofortigen Verschluss der Leitung, sobald der Kraftstoffstrom abbricht. So wird ein Leerlaufen des Systems verhindert. Die nach dem Venturi-Prinzip wirkende Saugstrahlpumpe wird über den Volumenstrom der Rücklaufmenge der elektrischen Kraftstoffpumpe betrieben.

Die Kraftstofffilter für die Benzin-Direkteinspritzung müssen eine sehr feine Filtrierung des Kraftstoffs zum Schutz der



2.7

Förderpumpenmodul mit zweistufiger Elektro-Kraftstoffpumpe und Kraftstofffilter, im Schwalltopf eingebettet. Bild: Bosch

Bauteile gewährleisten. Schmutzpartikel größer 5 µm müssen mit einem Abscheidegrad von 85 Prozent aufgefangen werden. Die Porengröße von Filtern bei der Saugrohreinspritzung ist mit rund 10 µm doppelt so groß.

Anfangs sind die Filter noch grün. Der Abscheidegrad erreicht erst nach 5.000 km etwa 99 Prozent. Die Wechselintervalle sind trotzdem in den vergangenen Jahren länger geworden – nicht selten mehr als 120.000 km bis hin lebenslang. Die Kraftstofffilter sind der elektrischen Kraftstoffpumpe nachgeschaltet, damit sie auch etwaigen Abrieb mit auffangen können.

Eine zusätzliche Additivierung des Kraftstoffs kann zu negativen Langzeit-

Tipp

Bei Defekten an der Hochdruckpumpe sind auch im Niederdruckkreis in jedem Fall der Kraftstofffilter und eventuell auch die Kraftstoffpumpe zu erneuern. Es muss davon ausgegangen werden, dass bereits Späne aus dem Kraftstoffbehälter die Kraftstoffpumpe passiert haben. Bei komplett rücklauflosen Systemen gelangt der Abrieb nicht in den Kraftstoffbehälter, sondern bleibt im Hochdruckkreis und maximal bis zum Filter zurück. Die betreffenden Teile sind hier ebenfalls zu erneuern.

folgen führen, und zwar durch die Auflösung von pumpeninternen Lötverbindungen und den Verlust an Schmierfähigkeit. Ebenso verursacht ein hoher Ethanolanteil Alkoholatkorrosion an Aluminiummaterialien.

2.2.1 Das Niederdrucksystem Mitsubishi GDI

Im Niederdrucksystem ist die elektrische Vorförderpumpe im Schwalltopf mit dem Tankgeber zu einem Fördermodul zusammengefasst. Im Motorraum des Mitsubishi GDI ist der Kraftstofffilter mit direkt aufgebauten und vom Saugrohrdruck unab-

2 Das Kraftstoffsystem

hängigen Niederdruckregler in einer Einheit verbaut. In der späteren Ausführung befinden sich diese Bauteile dann auch am Kraftstoffbehälter, um gerade die Rücklaufmenge vom Niederdruckregler auf kürzestem Weg zurückzuführen und den Wärmeeintrag klein zu halten.

Funktion der Vorförderung ist es, möglichst blasenfreien Kraftstoff an die Hochdruckpumpe zu liefern. Der Schwalltopf dient der Beruhigung des Kraftstoffs und sorgt dafür, dass der Inhalt noch vor dem Ansaugen durch die Pumpe Gasblasen ausscheiden kann. Die Rückläufe speisen den Kraftstoff mit teilweise recht hohen Temperaturen ein, denn gerade bei geringen Lasten ist die Abstemmenge aus der Hochdruckseite groß.

Da das System durch den Kraftstoff geschmiert und gekühlt wird, hängt von ihm auch die Haltbarkeit aller Bauteile ab. Weil das Kraftstoffsystem für die Funktion der Direkteinspritzung eine wesentliche Bedeutung hat, kommt dem auch eine höhere Aufmerksamkeit bei der Prüfung zu.

Bei abgezogenem Kraftstoffpumpenrelais lässt sich der Laststromkreis durch

eine abgesicherte Kabelbrücke im Stecksockel des Relaishalters problemlos überbrücken und die Pumpe damit in den Dauerlauf versetzen. Der erzeugte Druck ist im Parameter Raildruck zu sehen und kann nach Ansteuerende noch verfolgt werden. Der Sollwert ist 3,24–3,43 bar. Sinkt der Haltedruck innerhalb von zehn Minuten ab, sind probeweise alle Rückläufe nacheinander sowie auch der Zulauf von der Vorförderpumpe zu verschließen. Bei entsprechenden Änderungen deutet das auf das jeweilige undichte und damit defekte Teil hin.

Kommt der Druck nicht oder nur sehr langsam zustande, so ist die Prüfung der ‚üblichen Verdächtigen‘ wie Pumpe, Filter und Leitungen obligatorisch. Da der Motor auch mit sehr geringem Druck noch läuft, ist aber unter diesen Bedingungen eine weitere Messung notwendig, um den Defekt entweder der Hoch- oder der Niederdruckseite zuordnen zu können. Dazu wird ein spezieller Messadapter (Mitsubishi Spezialwerkzeug) gebraucht, der in die Leitung zur Hochdruckpumpe geschraubt wird und an den ein Manometer angeschlossen werden kann. Mit dieser Adaption sind auch aufschlussreiche Probefahrten machbar. Unter allen Bedingungen sollte der gemessene Druck stabil zwischen 3,24 und 3,43 bar liegen.

Besteht die Möglichkeit des Einsatzes eines Messadapters nicht, prüft der Diagnosetechniker die Förderleistung der elektrischen Vorförderpumpe an der Rücklaufleitung des intakten Niederdruckreglers. Diese soll größer 950 ml in 30 s bei einer

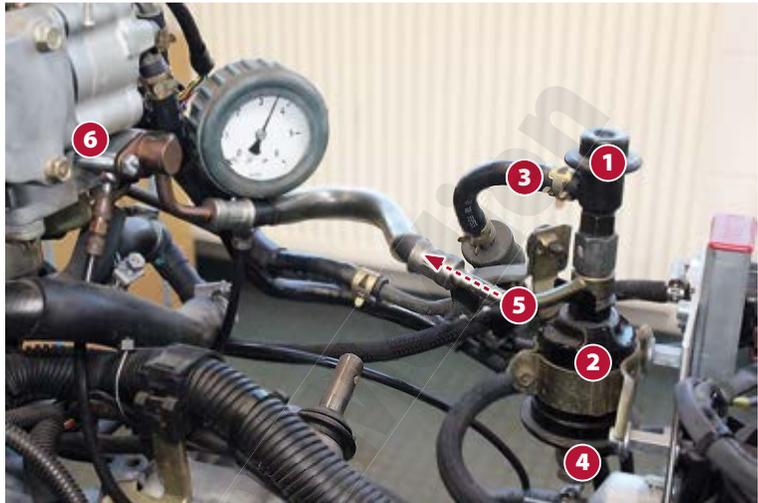
Tipp

Der Diagnosetechniker sollte bei Problemen im Kraftstoffsystem die Suche auf der Niederdruckseite beginnen. Zum Messen des Vorförderdrucks kann man zuerst die Istwerte des Auslesegerätes zu Hilfe nehmen.

2.8

Niederdruckregler und Kraftstofffilter mit Anschlüssen zur Druckmessung an einem Prüfstandmotor eines Carisma GDI vor Modelljahr 2001.

1. Niederdruckregler
2. Kraftstofffilter
3. Rücklauf
4. Zulauf von der Vorförderpumpe
5. Niederdruckzulauf zur Hochdruckpumpe
6. Niederdruck-Messadapter mit Abzweig zum Manometer



Versorgungsspannung von 12 V betragen. Die Stromaufnahme beträgt dabei normal 4,5–5,5 A und sollte 7,5 A nicht übersteigen. Ist das der Fall, so ist noch der Kraftstofffilter auf freien Durchgang und das Leitungssystem auf Verengungen zu untersuchen. Die Stromaufnahme und der Spannungsabfall werden am besten direkt am aufgesteckten Anschlussstecker des Fördermoduls gemessen, welches durch eine Serviceklappe unter der Sitzbank hinten leicht zugänglich ist.

Bei Allrad-Fahrzeugen mit Satteltank ist ein geringer Rücklaufdruck notwendig. Grund ist die in einer Tankhälfte verbaute Saugstrahlpumpe, die man zum Umpumpen des Kraftstoffes in die Hälfte mit der Fördereinheit benötigt.

Bei ausgefallenen Saugstrahlpumpen im Tank ist die Gefahr von Druckschwankungen und damit verbundenen Verbrennungsaussetzern bei niedrigen Tankfüllständen sehr hoch.

2.2.2 Niederdrucksystem VW FSI mit Vordruckumschaltung

Um der Problematik des Heißstarts bei Benzin-Direkteinspritzern entgegenzuwirken, ohne die elektrische Kraftstoffpumpe dauerhaft extrem zu belasten, verwendet Volkswagen bei FSI-Motoren der ersten Generation ein Kraftstoffsystem mit Rücklauf und Vordruckumschaltung (FSI ist die Bezeichnung für Benzinmotoren mit Direkteinspritzung. Sie unterscheiden sich von den TSI-Motoren in erster Linie dadurch, dass sie nicht durch Turbolader oder Kompressor aufgeladen werden.). Der

2 Das Kraftstoffsystem

Druck im Niederdruckkreis kann hier auf zwei Werte eingestellt werden. Bei hoher Kraftstofftemperatur müssen beim Start und im anschließenden Heißeerlauf Maßnahmen ergriffen werden, um die Dampfblasenbildung in der Hochdruckpumpe zu verhindern. Da die Kraftstofftemperatur nicht direkt ermittelt wird, ist beim Start des Motors der Vordruck erhöht, wenn die Kühlmitteltemperatur mehr als 115 °C und die Ansauglufttemperatur mehr als 50 °C beträgt.

Ein Absperrventil, welches sich zwischen dem Vorlauf zur Hochdruckpumpe und dem Niederdruckregler befindet, wird hierzu vom Motorsteuergerät angesteuert und damit geschlossen. Somit wirkt ein in der Fördereinheit mit der Kraftstoffpumpe integriertes Druckbegrenzungsventil, der

Vordruck wird kurzzeitig auf den Wert von 5–6,8 bar angehoben. Das Druckbegrenzungsventil übernimmt an dieser Stelle die Druckregelfunktion. Normalerweise dient es dem Schutz der Komponenten vor Überdruck bei blockiertem Vorlauf.

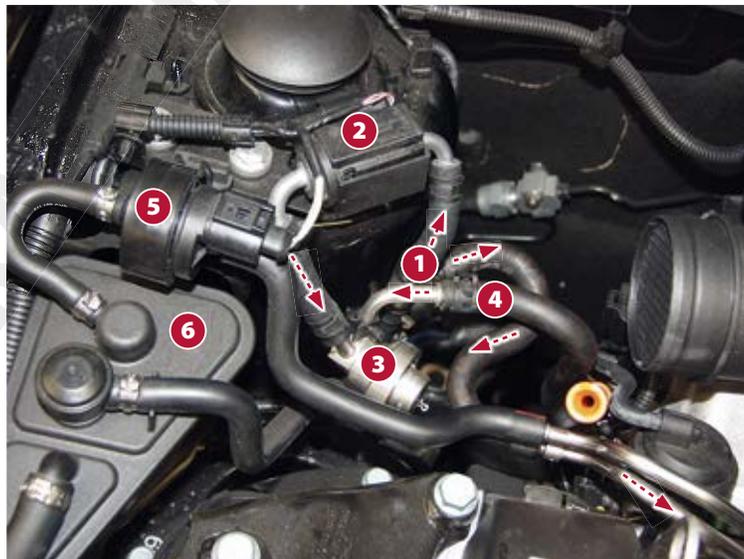
Nach 30–60 Sekunden ist die Hochdruckpumpe durchspült und so weit abgekühlt, sodass die Gefahr der Dampfblasenbildung nicht mehr besteht. Das Absperrventil öffnet dadurch, dass das Motorsteuergerät die Ansteuerung unterbricht. Das Ventil ist stromlos offen und der Druckregler übernimmt wieder die Regelaufgabe. Er stellt den Vordruck auf 3 bar ein.

Zwangsläufig ist bei Ausfall des Absperrventils im geöffneten Zustand oder Abriss der elektrischen Verbindung mit Heißstartproblemen zu rechnen. In extre-

2.9

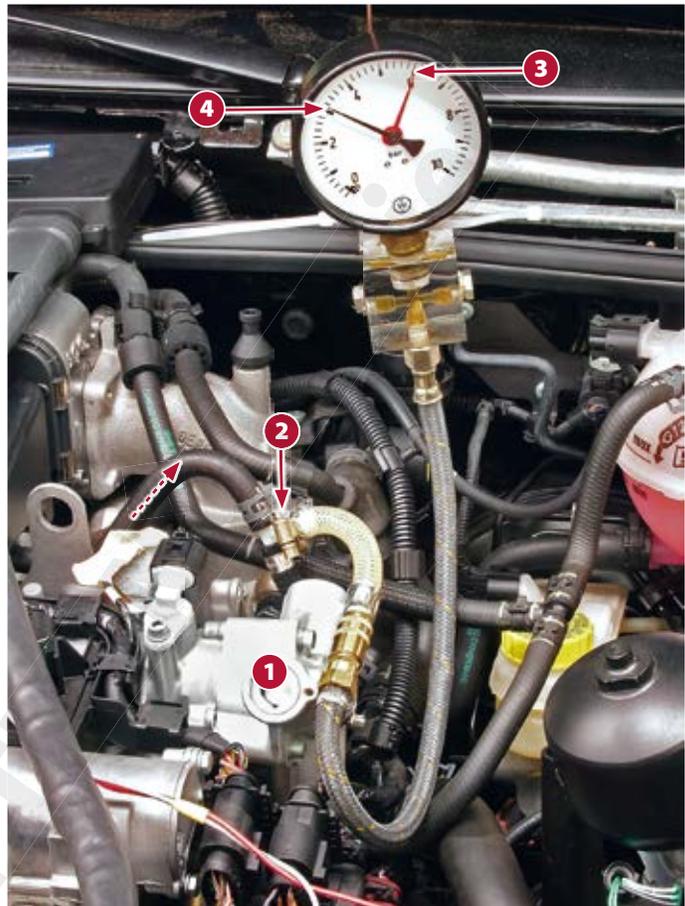
Die Bauteile der Niederdruckregelung:

1. Kraftstoffvorlauf zur Hochdruckpumpe und zum Kraftstoff-Absperrventil
 2. Kraftstoff-Absperrventil
 3. Kraftstoff-Druckregler
 4. Rücklauf vom Druckreglerventil
 5. Tankentlüftungsventil
 6. Aktivkohlebehälter
- Bild: Hubertus Günther



2.10

Vordruckmessung an einem VW mit Abschaltventil. Das Manometer ist in die Saugseite (2) der Hochdruckpumpe (1) adaptiert. Der rote Schleppzeiger (3) im Manometer zeigt den schon gemessenen erhöhten Vordruck von etwa 6 bar. Der schwarze Zeiger (4) signalisiert einen fehlerfreien Normaldruck von 3 bar nach der Umschaltung.
Bild: Hubertus Günther



men Fällen kann das zu einem Fehlerspeichereintrag durch das Ansprechen der Verbrennungsaussetzer-Überwachung führen, hervorgerufen durch die vermehrte Dampfblasenbildung im Hochdruckbereich und die damit einhergehende Schwankung der zylinderindividuellen Einspritzmengen. Das Absperrventil und der Druckregler befinden sich bei Volkswagen im Mo-

torraum. Es handelt sich also um ein Kraftstoffsystem mit Rücklauf.

Zur Funktionsprüfung des Niederdruck-Systems schließt der Kfz-Profi ein Manometer am Zulauf der Hochdruckpumpe an und steuert im Stellgliedtest das Kraftstoffdosierventil an. Jetzt sollte der Kraftstoffdruck zwischen 3 bar und 5,8 bar pendeln.

Benzin-Direkteinspritzsysteme Komponenten, Funktionen, Diagnose

Heiko Peter beschreibt im vorliegenden Fachbuch Benzin-Direkteinspritzsysteme verschiedene Bauformen der direkten Kraftstoffzuführung sowie der Luftansaug-, der Zündtechnik und der Abgasnachbehandlung. Dabei verbindet der Autor theoretische Grundlagen und werkstattpraktisches Hintergrundwissen.

Zu Beginn vergleicht Peter die Saugrohr- und die Direkteinspritzung, skizziert Bauarten, gibt Arbeitshinweise und geht auf Diagnosegeräte und Werkzeuge ein. Im Nachgang widmet er sich den Kraftstoffsystemen. Er liefert einen Überblick über verschiedene Bauarten und geht auf die Hochdruck- und Niederdrucksysteme ein. Die Beschreibung der Technik verschiedener Hersteller wie Bosch, Melco oder Hitachi an verschiedenen Fahrzeugen, wird durch praxisnahe Ausführungen ergänzt. Das Thema Injektoren rundet dieses umfangreiche Kapitel ab.

In den nachfolgenden Abschnitten behandelt der Autor das Ansaugluftsystem sowie die Aufladung. Über die Lasterfassung und die Steuerung leitet er über zur Abgasrückführung, zum Sekundärluftsystem, zur Kurbelgehäuse- sowie zur Aktivkohlebehälter-Entlüftung. Abgerundet wird das Werk mit Kapiteln zum Zündsystem, zur Abgasnachbehandlung sowie zur Gemisch-Überwachung mithilfe von Sensoren.



Heiko Peter

„Das vorliegende Buch zum Thema Benzin-Direkteinspritzsysteme zeichnet sich durch die detaillierte, technische und verständliche Ausarbeitung aus. Der Autor liefert zusätzlich wertvolle praktische Tipps sowie relevante Hintergrundinformationen. Ich empfehle es jedem Kfz-Profi.“

Andreas Ullmann
(Geschäftsführer,
Glaubitz GmbH & Co. KG)

„Dem Autor ist es gelungen, das komplexe Thema Benzin-Direkteinspritzung in allen relevanten Facetten verständlich darzustellen. Ein Standardwerk für den praxisorientierten Kfz-Profi.“

Elmar Wenzel
(Geschäftsführer Trainmobil
Trainings für Praktiker GmbH)