

## Kraftstoffversorgung

### Überblick

Aufgabe des Kraftstoffversorgungssystems ist es, den Kraftstoff vom Tank in definierter Menge mit einem spezifizierten Druck zum Verbrennungsmotor im Motorraum zu fördern. Die jeweilige Schnittstelle bildet beim Motor mit Saugrohreinspritzung (SRE) der Kraftstoffverteiler mit den Saugrohr-Einspritzventilen und beim Motor mit Benzin-Direkteinspritzung (BDE) die Hochdruckpumpe.

Der grundsätzliche Aufbau der Kraftstoffversorgungssysteme ist für beide Einspritzarten ähnlich: der Kraftstoff wird aus dem Tank (dem Kraftstoffspeicher) mittels einer Elektrokraftstoffpumpe durch Kraftstoffleitungen aus Stahl oder Kunststoff zum Motor gefördert. Unterschiedliche Anforderungen führen aber zum Teil zu abweichenden Systemauslegungen und einer Vielfalt an Varianten.

Bei der Saugrohreinspritzung fördert eine Elektrokraftstoffpumpe den Kraftstoff aus dem Tank über die Leitungen und den Kraftstoffverteiler (auch Kraftstoff-Rail genannt) direkt zu den Einspritzventilen. Bei der Benzin-Direkteinspritzung wird der Kraftstoff ebenfalls mit einer Elektrokraftstoffpumpe aus dem Tank gefördert, anschließend wird er jedoch durch eine Hochdruckpumpe zunächst auf einen höheren Druck verdichtet und danach den Hochdruck-Einspritzventilen zugeführt.

### Kraftstoffförderung bei Saugrohreinspritzung

Eine Elektrokraftstoffpumpe (EKP) fördert den Kraftstoff und erzeugt den Einspritzdruck, der bei der Saugrohreinspritzung typischerweise etwa 0,3...0,4 MPa (3...4 bar) beträgt. Der aufgebaute Kraftstoffdruck verhindert weitgehend die Bildung von Dampfblasen im Kraftstoffsystem. Ein in die Pum-

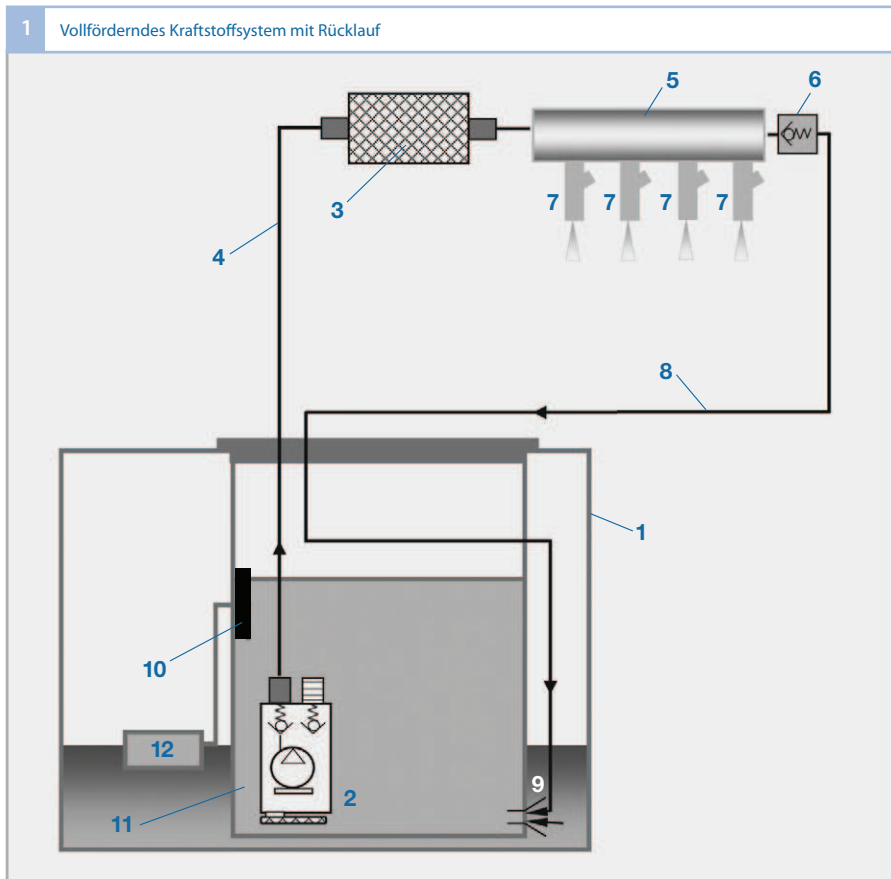
pe integriertes Rückschlagventil unterbindet das Rückströmen von Kraftstoff durch die Pumpe zurück zum Kraftstoffbehälter und erhält so den Systemdruck abhängig vom Abkühlverlauf des Kraftstoffsystems und von internen Leckagen auch nach Abschalten der Elektrokraftstoffpumpe noch einige Zeit aufrecht. So wird die Bildung von Dampfblasen im Kraftstoffsystem bei erhöhten Kraftstofftemperaturen auch nach Abstellen des Motors verhindert.

Es existieren unterschiedliche Arten von Kraftstoffversorgungssystemen. Prinzipiell unterscheidet man vollfördernde und bedarfsgeregelte Systeme. Bei den vollfördernden Systemen wird zwischen Systemen mit Rücklauf vom Motor und rücklaufreien Systemen unterschieden.

### System mit Rücklauf

Der Kraftstoff wird von der Kraftstoffpumpe (**Bild 1**, Pos. 2) aus dem Kraftstoffbehälter (1) angesaugt und durch den Kraftstofffilter (3) und die Druckleitung (4) zum am Motor montierten Kraftstoffverteiler (5) gefördert. Über den Kraftstoffverteiler werden die Einspritzventile (7) mit Kraftstoff versorgt. Ein am Rail angebrachter mechanischer Druckregler (6) hält durch seine direkte Referenz zum Saugrohr den Differenzdruck zwischen Einspritzventilen und Saugrohr konstant – unabhängig vom absoluten Saugrohrdruck, d. h. von der Motorlast.

Der vom Motor nicht benötigte Kraftstoff strömt durch das Rail über eine am Druckregler angeschlossene Rücklaufleitung (8) zurück in den Kraftstoffbehälter. Der überschüssige, im Motorraum erwärmte Kraftstoff führt zu einem Anstieg der Kraftstofftemperatur im Tank. Abhängig von dieser Temperatur entstehen Kraftstoffdämpfe. Diese werden umweltschonend über ein Tankentlüftungssystem in einem Aktivkohlefilter zwischengespeichert und über das



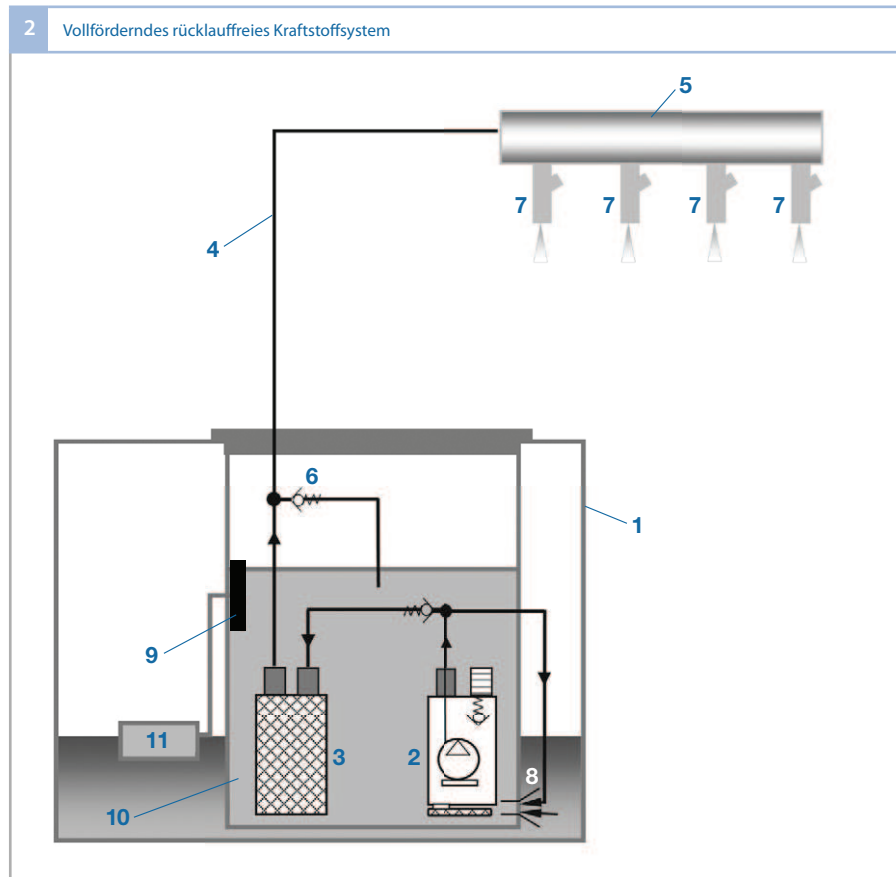
Saugrohr der angesaugten Luft und somit dem Motor zugeführt. Mit dem vom motor-nahen Druckregler (6) zurückströmenden Kraftstoff wird am Tankeinbaumodul eine Saugstrahlpumpe (9, auch Saugstrahl-Düse genannt) angetrieben, mit deren Treibmenge ein Kraftstoff-Förderstrom in ein Reservoir gefördert wird, um der Elektrokraftstoffpumpe (2) unter allen Bedingungen immer ein sicheres Ansaugen zu ermöglichen.

#### Rücklauffreies System

Beim rücklauffreien Kraftstoffversorgungssystem (**Bild 2**) befindet sich der Druckregler (6) im Kraftstoffbehälter und ist Bestandteil des Tankeinbaumoduls. Dadurch entfällt die Rücklaufleitung vom Motor zum Kraftstoffbehälter. Da der Druckregler aufgrund seines Anbauorts keine Referenz zum Saugrohrdruck hat, hängt der relative Einspritzdruck, der über dem Einspritzventil abfällt, hier von der Motorlast ab. Dies wird bei der Berechnung der Einspritzzeit im Motorsteuergerät berücksichtigt.

Dem Kraftstoffverteiler (5) wird nur die Kraftstoffmenge zugeführt, die auch einge-

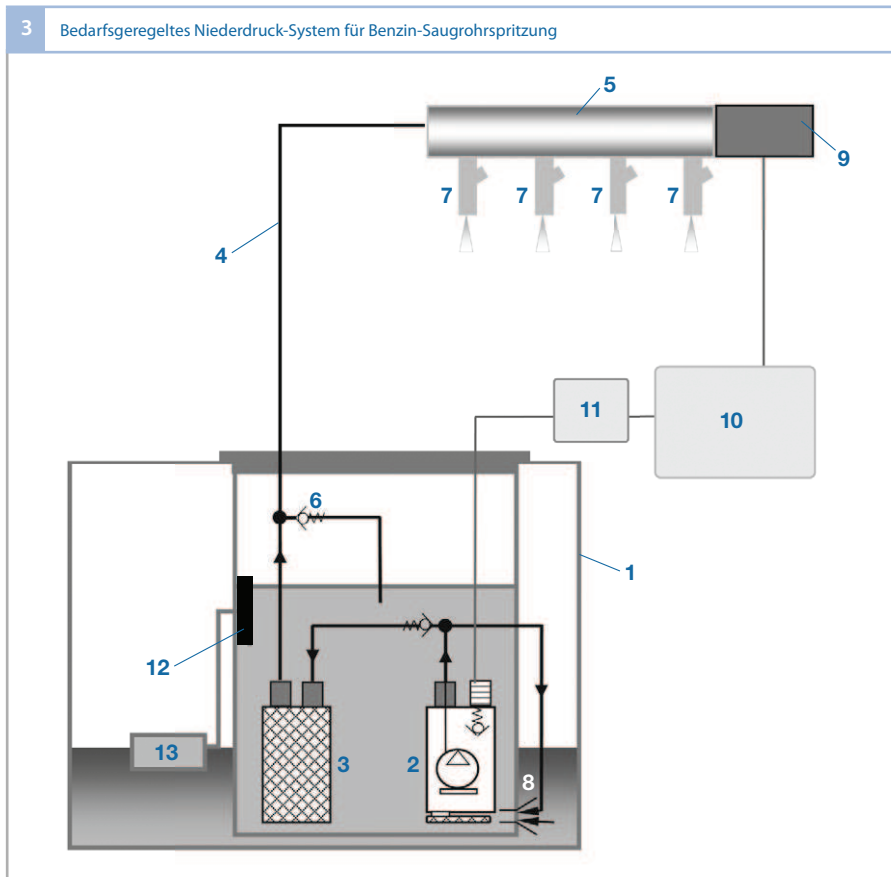
- Bild 2**
- 1 Kraftstoffbehälter
  - 2 Elektrokraftstoffpumpe
  - 3 Kraftstofffilter
  - 4 Kraftstoffleitung
  - 5 Kraftstoffverteiler (Rail)
  - 6 Druckregler
  - 7 Einspritzventile
  - 8 Saugstrahlpumpe
  - 9 Tankfüllstandsgeber
  - 10 Reservoir
  - 11 Schwimmer



spritzt wird. Die von der vollfördernden Elektrokraftstoffpumpe (2) geförderte Mehrmenge wird direkt vom tanknahen Druckregler (6) in den Kraftstoffbehälter geleitet, ohne den Umweg über den Motorraum zu nehmen. Daher ist die Erwärmung des Kraftstoffs im Kraftstoffbehälter und damit auch die Kraftstoffverdunstung deutlich geringer als beim System mit Rücklauf. Aufgrund dieser Vorteile werden heute überwiegend rücklauffreie Systeme eingesetzt. Die Saugstrahlpumpe (8) wird in diesem System direkt im Fördermodul aus dem Vorlauf der Elektrokraftstoffpumpe betrieben.

#### Bedarfsgeregeltes System

Beim bedarfsgeregelten System (**Bild 3**) wird von der Kraftstoffpumpe nur die aktuell vom Motor verbrauchte und zur Einstellung des gewünschten Drucks notwendige Kraftstoffmenge gefördert. Die Druckeinstellung erfolgt über eine modellbasierte Vorsteuerung und einen geschlossenen Regelkreis, wobei der aktuelle Kraftstoffdruck über einen Niederdrucksensor erfasst wird. Der mechanische Druckregler entfällt und wird durch ein Druckbegrenzungsventil ersetzt (Pressure Relief Valve PRV), damit sich auch bei Schubabschaltung oder nach Abstellen des Motors kein zu hoher Druck aufbauen kann.



Zur Einstellung der Fördermenge wird die Betriebsspannung der Kraftstoffpumpe über ein vom Motorsteuergerät angesteuertes Pumpelektronikmodul eingestellt. Der Druck variiert in diesem System zwischen 250 und 600 kPa relativ zur Umgebung, kann aber auch auf einen konstanten Wert eingestellt werden.

Aufgrund der Bedarfsregelung wird kein überschüssiger Kraftstoff komprimiert und somit die Pumpenleistung auf das gerade erforderliche Maß minimiert. Dies führt gegenüber Systemen mit vollfördernder Pumpe zu einer Senkung des Kraftstoffverbrauchs. So kann auch die Kraftstofftempe-

ratur im Tank gegenüber dem rücklauffreien System noch weiter reduziert werden.

Weitere Vorteile des bedarfsgeregelten Systems ergeben sich aus dem variabel einstellbaren Kraftstoffdruck. Zum einen kann der Druck beim Heißstart erhöht werden, um die Bildung von Dampfblasen zu vermeiden. Zum anderen kann vor allem bei Turbomotoren der Zumesbereich der Einspritzventile erweitert werden (durch Einspritzmengenspreizung), indem bei Vollast eine Druckerhöhung und bei sehr kleinen Lasten eine Druckabsenkung realisiert wird. Eine zunehmend genutzte Möglichkeit besteht auch darin, den Einspritzdruck beim

**Tabelle 1**  
Eigenschaften bedarfsgeregelter Kraftstoffsysteme

Einspritzart	Saugrohreinspritzung		Benzindirekteinspritzung
Variante	Konstanter Druck	Variabler Druck	Variabler Druck
Druck in kPa	≈ 350	250 ... 600	200 ... 600
Vorteile gegenüber konstanter Fördermenge		<ul style="list-style-type: none"> <li>– Erweiterter Zumessbereich</li> <li>– Bessere Gemischaufbereitung im Kaltstart</li> </ul>	Besserer Heißstart

Kaltstart zu erhöhen, um damit die Zerstäubung und Gemischaufbereitung der Einspritzventile zu verbessern.

Des Weiteren ergeben sich mithilfe des gemessenen Kraftstoffdrucks verbesserte Diagnosemöglichkeiten des Kraftstoffsystems gegenüber bisherigen Systemen. Darüber hinaus führt die Berücksichtigung des aktuellen Kraftstoffdrucks bei der Berechnung der Einspritzzeit zu einer präziseren Kraftstoffzumessung.

#### Kraftstoffförderung bei Benzin-Direkteinspritzung

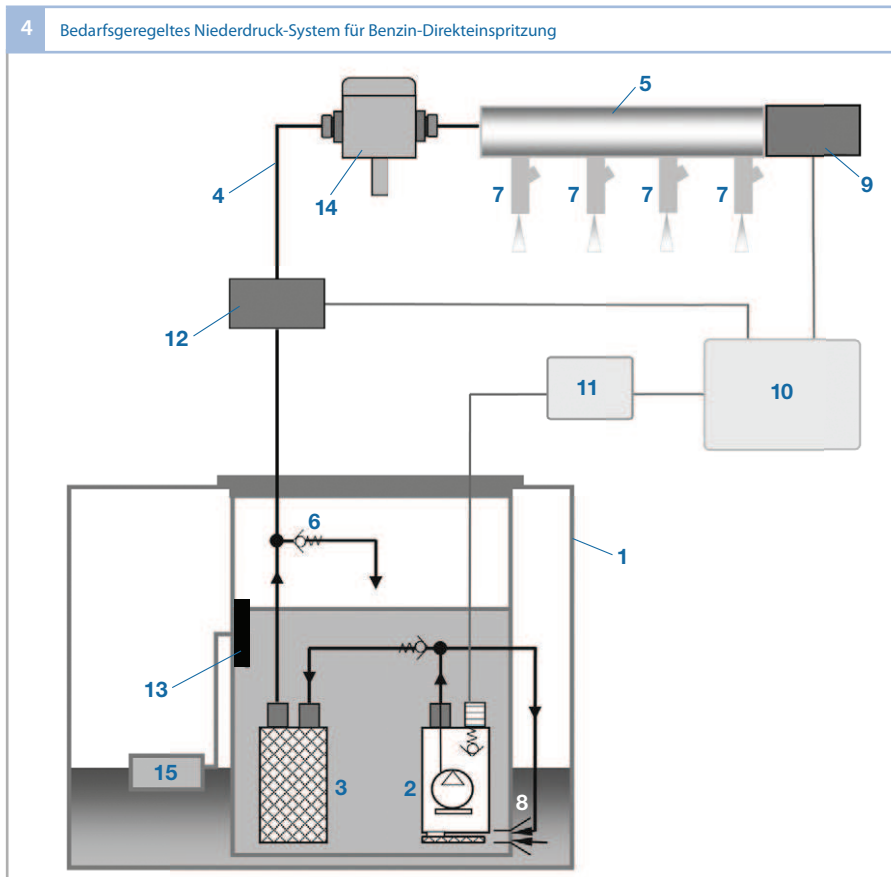
Bei der direkten Einspritzung von Kraftstoff in den Brennraum steht im Vergleich zur Einspritzung in das Saugrohr nur ein verkürztes Zeitfenster zur Verfügung. Auch kommt der Gemischaufbereitung eine erhöhte Bedeutung zu. Daher muss der Kraftstoff bei der Direkteinspritzung mit deutlich höherem Druck eingespritzt werden als bei der Saugrohreinspritzung. Das Kraftstoffsystem unterteilt sich in Niederdruckkreislauf und Hochdruckkreislauf.

#### Niederdruckkreis

Für den Niederdruckkreislauf eines Systems zur Benzin-Direkteinspritzung kommen im Prinzip die aus der Saugrohreinspritzung bekannten Kraftstoffsysteme und Komponenten zum Einsatz. Da die im Hochdruckkreislauf eingesetzten Hochdruckpumpen zur Vermeidung von Dampfblasenbildung im Heißstart und Heißbetrieb einen erhöhten Vorförderdruck (Vordruck) benötigen, ist es

vorteilhaft, Systeme mit variablem Niederdruck einzusetzen. Bedarfsgeregelte Niederdrucksysteme eignen sich hier besonders gut, da sich für jeden Betriebszustand des Motors der jeweils optimale Vordruck für die Hochdruckpumpe einstellen lässt. Die entsprechenden Anforderungen sind in [Tabelle 1](#) dargestellt, eine Realisierung in [Bild 4](#).

Es kommen aber auch noch rücklauffreie Systeme mit umschaltbarem Vordruck – gesteuert über ein Absperrventil – oder Systeme mit konstant hohem Vordruck zum Einsatz, die aber energetisch als nicht optimal zu bewerten sind.



## Komponenten der Kraftstoffförderung

### Elektrokraftstoffpumpe

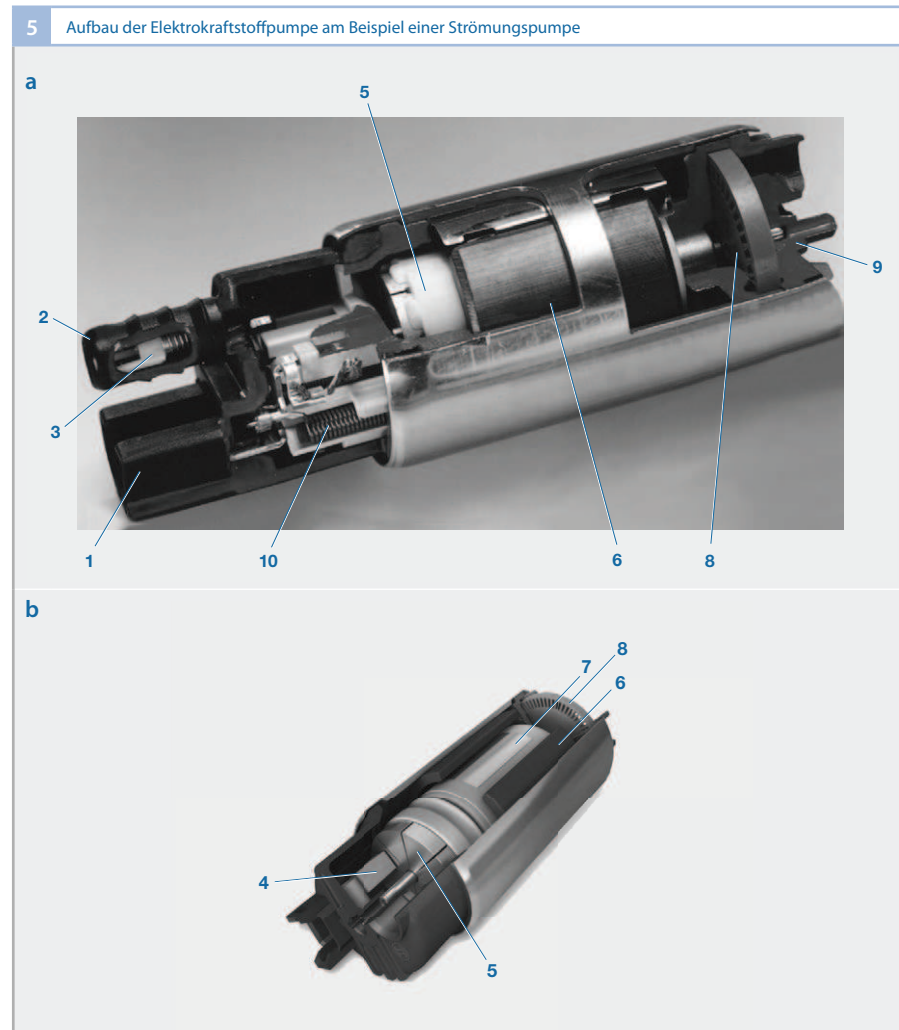
#### Aufgabe

Die Elektrokraftstoffpumpe muss dem Motor in allen Betriebszuständen ausreichend Kraftstoff mit dem zum Einspritzen nötigen Druck zuführen. Die wesentlichen Anforderungen sind:

- Fördermenge zwischen 60 und 300 l/h bei Nennspannung,
- Druck im Kraftstoffsystem zwischen 250 und 600 kPa relativ zur Umgebung,

- Aufbau des Kraftstoffdruckes ab 50..60 % der Nennspannung; bestimmend hierfür ist der Betrieb bei Kaltstart.

Außerdem dient die Elektrokraftstoffpumpe zunehmend als Vorförderpumpe für moderne Direkteinspritzsysteme sowohl für Benzin- als auch für Dieselmotoren. Für die Benzin-Direkteinspritzung sind beim Heißförderbetrieb zumindest zeitweise Drücke bis 650 kPa bereitzustellen.



### Aufbau

Die Elektrokraftstoffpumpe wird von einem Elektromotor angetrieben (**Bild 5**). Standard bei diesem Motor sind ein Ständer mit Permanentmagneten und ein Läufer mit Kupferkommutator. Für hohe Leistungen, Sonderanwendungen und Dieselsysteme werden auch zunehmend Kohlekommutatoren eingesetzt. Bei neuen Fahrzeugen am Markt werden auch zunehmend elektronische Kommutierungssysteme ohne Kommutator

und Kohlebürsten verwendet. Das Pumpenteil ist als Verdränger- oder als Strömungspumpe ausgeführt. Weitere Bestandteile sind der Anschlussdeckel mit elektrischen Anschlüssen, das Rückschlagventil (gegen Auslaufen des Kraftstoffsystems), bei Bedarf ein Druckbegrenzungsventil sowie der hydraulische Ausgang. Der Anschlussdeckel enthält üblicherweise auch die Kohlebürsten für den Betrieb des Kommutator-Antriebsmotors und Elemente für die Funkentstörung (Drosselspulen und ggf. Kondensatoren).

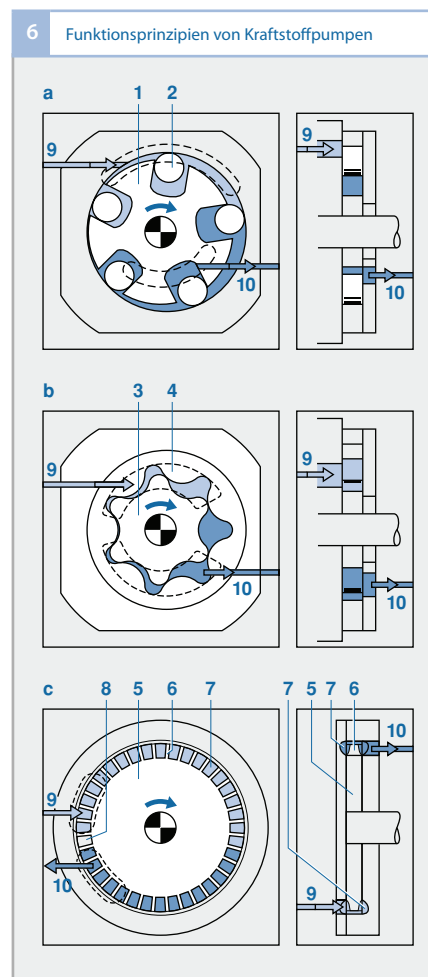
### Verdrängerpumpe

In einer Verdrängerpumpe werden grundsätzlich Flüssigkeitsvolumina angesaugt und in einem (abgesehen von Undichtheiten) abgeschlossenen Raum durch die Rotation des Pumpelements zur Hochdruckseite transportiert. Für die Elektrokraftstoffpumpe kommen hauptsächlich die *Rollenzellenpumpe* (Bild 6a) und die *Innenzahnradpumpe* (Bild 6b) zur Anwendung. Verdrängerpumpen sind vorteilhaft für Niederdrucksysteme mit hohen Systemdrücken (450 kPa und mehr) und haben ein gutes Niederspannungsverhalten, d. h. eine relativ „flache“ Förderleistungskennlinie über der Betriebsspannung. Der Wirkungsgrad kann bis zu 25 % betragen. Je nach Detailausführung und Einbausituation können die unvermeidlichen Druckpulsationen Geräusche verursachen.

Während für die klassische Funktion der Elektrokraftstoffpumpe in elektronischen Benzineinspritzsystemen die Verdrängerpumpe von der Peripheralpumpe weitgehend abgelöst wurde, ergibt sich für die Verdrängerpumpe ein neues Anwendungsfeld bei der Vorförderung für Direkteinspritzsysteme (Benzin und Diesel) mit ihren wesentlich erweiterten Druckbedarf und Viskositätsbereich.

### Peripheralpumpe

Für Niederdrucksysteme bis 600 kPa haben sich Peripheralpumpen (Bild 6c) durchgesetzt. Die Peripheralpumpe ist eine Strömungspumpe. Ein mit zahlreichen Schaufeln (6) im Bereich des Umfangs versehenes Laufrad dreht sich in einer aus zwei feststehenden Gehäuseteilen bestehenden Kammer. Diese Gehäuseteile weisen im Bereich der Laufradschaufeln jeweils einen Kanal (7) auf. Die Kanäle beginnen in Höhe der Saugöffnung (9) und enden dort, wo der Kraftstoff das Pumpenteil mit Systemdruck verlässt (10). Zur Verbesserung der Heiß-



**Bild 6**  
 a Rollenzellenpumpe (RZP)  
 b Innenzahnradpumpe (IZP)  
 c Peripheralpumpe (PP)  
 1 Nutscheibe (exzentrisch)  
 2 Rolle  
 3 inneres Antriebsrad  
 4 Laufer (exzentrisch)  
 5 Laufrad  
 6 Laufradschaufeln  
 7 Kanal  
 8 „Unterbrecher“  
 9 Saugöffnung  
 10 Auslass

fördereigenschaften befindet sich in einem gewissen Winkelabstand von der Ansaugöffnung eine kleine Entgasungsbohrung, die (unter Inkaufnahme einer minimalen Leckage) den Austritt eventueller Gasblasen ermöglicht. Der Druck baut sich längs des Kanals durch den Impulsaustausch zwischen den Laufradschaufeln und der Flüssigkeit auf. Die Folge davon ist eine spiralförmige Rotation des im Laufrad und in den Kanälen befindlichen Flüssigkeitsvolumens. Peripheralpumpen sind geräuscharm, da der Druckaufbau kontinuierlich und nahezu



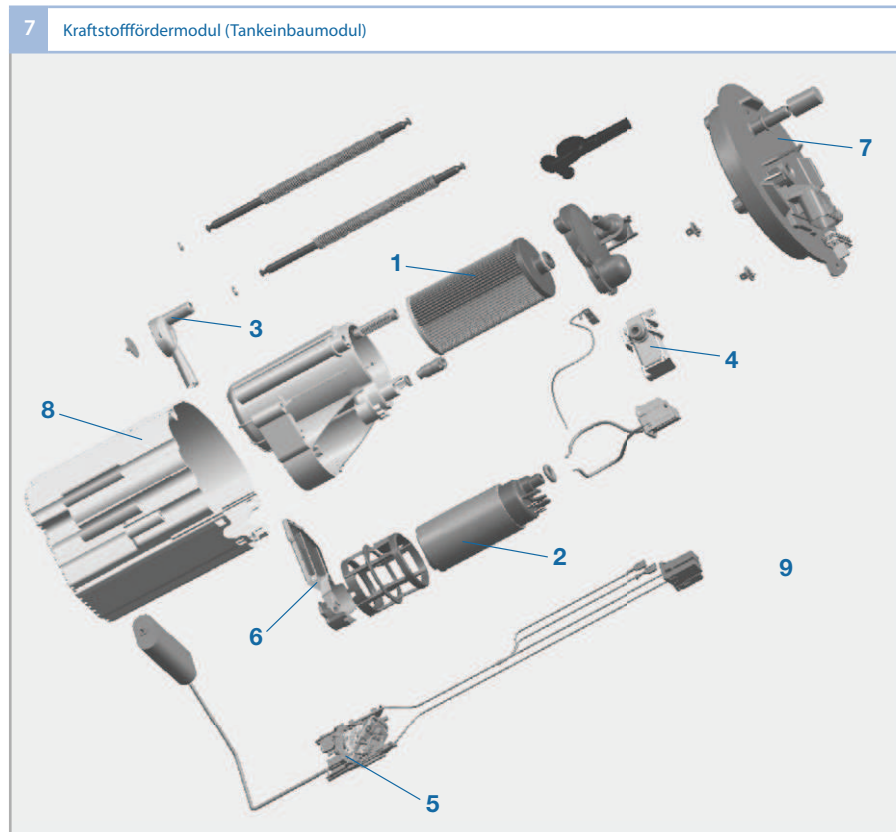


Bild 7

- 1 Kraftstofffilter
- 2 Elektrokraftstoffpumpe
- 3 Strahlpumpe (geregelt)
- 4 Kraftstoffdruckregler
- 5 Tankfüllstandssensor
- 6 Vorfilter
- 7 Modulflansch
- 8 Reservoir

pulsationsfrei erfolgt. Die Konstruktion ist gegenüber Verdrängerpumpen deutlich vereinfacht. Systemdrücke bis 650 kPa sind auch mit einstufigen Pumpen erreichbar. Der Wirkungsgrad dieser Pumpen beträgt bis zu 26 %.

#### Ausblick

Die Kraftstoffversorgung vieler moderner Fahrzeuge erfolgt durch bedarfsgesteuerte Kraftstofffördersysteme. In diesen Systemen treibt ein Elektronikmodul die Pumpe in Abhängigkeit vom erforderlichen Druck an, der durch einen Kraftstoffdrucksensor gemessen wird. Die Vorteile solcher Systeme sind:

- geringerer Stromverbrauch,
- reduzierter Wärmeeintrag durch den Elektromotor,
- reduziertes Pumpengeräusch,
- Einstellmöglichkeit variabler Drücke im Kraftstoffsystem.

Bei zukünftigen Systemen wird die reine Pumpenregelung um weitere Funktionen erweitert, z. B. um die Tankleckdiagnose und die Auswertung des Tankfüllstandssensorsignals. Um den steigenden Anforderungen bezüglich Druck und Lebensdauer sowie den weltweit unterschiedlichen Kraftstoffqualitäten gerecht zu werden, werden bürstenlose Motoren mit elektronischer Kommutierung in Zukunft eine bedeutendere Rolle spielen.

### Kraftstofffördermodule

Während in den Anfängen der elektronischen Benzineinspritzung die Elektrokraftstoffpumpe ausschließlich außerhalb des Tanks angeordnet war, überwiegt heute der Tankeinbau der Elektrokraftstoffpumpe (Bild 7). Dabei ist die Elektrokraftstoffpumpe (2) Bestandteil eines Kraftstofffördermoduls, das weitere Elemente umfassen kann:

- einen Topf (8) als Kraftstoffreservoir für die Kurvenfahrt (meist aktiv befüllt durch eine Saugstrahlpumpe (3) oder passiv durch ein Klappensystem, Umschaltventil o. Ä.),
- einen Tankfüllstandsensor (5),
- einen Druckregler (4) bei rücklauffreien Systemen (RLFS),
- einen Vorfilter (6) zum Schutz der Pumpe,
- einen druckseitigen Kraftstofffilter (1), der über die gesamte Fahrzeuglebensdauer nicht gewechselt werden muss,
- elektrische und hydraulische Anschlüsse im Modulflansch (7).

Darüber hinaus können Tankdrucksensoren (zur Tankleckagediagnose), Kraftstoffdruck-

sensoren (für bedarfsgeregelte Systeme) sowie Ventile integriert werden.

### Benzinfilter

Aufgabe des Benzinfilters ist die Aufnahme und die dauerhafte Speicherung von Schmutzpartikeln aus dem Kraftstoff, um das Einspritzsystem vor Verschleiß durch Partikelerosion zu schützen.

#### Aufbau

Kraftstofffilter für Ottomotoren werden druckseitig hinter der Kraftstoffpumpe angeordnet. Bei neueren Fahrzeugen werden bevorzugt Intank-Filter eingesetzt, d. h., der Filter ist in den Kraftstoffbehälter integriert. Er ist in diesem Fall immer als Lifetime-Filter (Lebensdauerfilter) ausgelegt, der während der Lebensdauer des Fahrzeugs nicht gewechselt werden muss. Daneben werden weiterhin Inline-Filter (Leitungseinbaufilter) eingesetzt, die in die Kraftstoffleitung eingebaut werden. Diese können als Wechselteil oder als Lebensdauerbauteil ausgelegt sein. Das Filtergehäuse ist aus Stahl, Aluminium

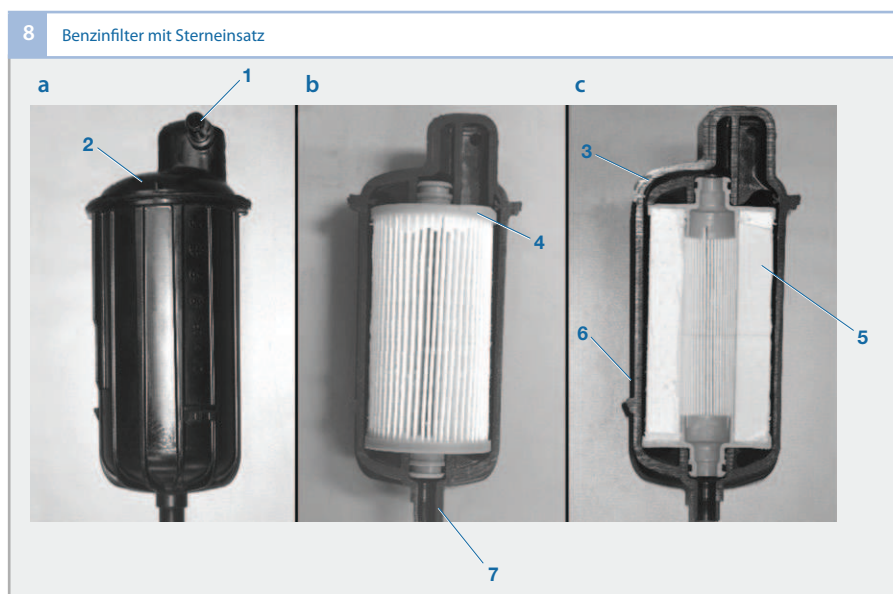


Bild 8

- a Filtergehäuse  
b Filterelement  
c Querschnitt

- 1 Kraftstoffaustritt  
2 Filterdeckel  
3 innenverschweißte Kante  
4 Stützscheibe  
5 Filtermedium  
6 Filtergehäuse  
7 Kraftstoffeintritt

oder Kunststoff gefertigt. Es wird durch einen Gewinde-, einen Schlauch- oder einen einrastenden Schnellanschluss (sog. Quick-Connector) mit der Kraftstoffzuleitung verbunden. In dem Gehäuse befindet sich der Filtereinsatz, der die Schmutzpartikel aus dem Kraftstoff herausfiltert. Der Filtereinsatz ist so in den Kraftstoffkreislauf integriert, dass die gesamte Oberfläche des Filtermediums möglichst mit gleicher Fließgeschwindigkeit von Kraftstoff durchströmt wird.

#### Filtermedium

Als Filtermedium werden spezielle Mikrofaserpapiere mit Harzprägung eingesetzt, die bei höheren Anforderungen zusätzlich mit einer Kunstfaserschicht (Melt-blown) verbunden sind. Dieser Verbund muss eine hohe mechanische, thermische und chemische Stabilität gewährleisten. Die Papierporosität und die Porenverteilung des Filterpapiers bestimmen den Schmutzabscheidegrad und den Durchflusswiderstand des Filters.

Filter für Benzinmotoren werden in Wickel- oder Sternausführung gefertigt. Beim Wickelfilter wird ein geprägtes Filterpapier um ein Stützrohr gewickelt. Der verunreinigte Kraftstoff durchfließt den Filter in Längsrichtung. Beim Sternfilter (**Bild 8**) wird das Filterpapier gefaltet und sternförmig ins Gehäuse eingelegt. Kunststoff-, Harz- oder Metallendscheiben sowie ggf. ein innerer Stützmantel sorgen für Stabilität. Der verunreinigte Kraftstoff durchfließt den Filter von außen nach innen, die Schmutzpartikel werden dabei vom Filtermedium abgeschieden.

#### Filtrationseffekte

Das Abscheiden fester Schmutzpartikel erfolgt sowohl durch den Siebeffekt als auch durch Aufprall-, Diffusions- und Sperreffekte. Der Siebeffekt beruht darauf, dass größere Partikel aufgrund ihrer Abmessungen die

Poren des Filters nicht passieren können. Kleinere Partikel hingegen bleiben, wenn sie auf Fasern des Filtermediums stoßen, an ihnen haften. Dabei unterscheidet man drei Mechanismen: Beim Sperreffekt werden die Partikel mit der Kraftstoffströmung um die Faser gespült, berühren diese jedoch am Rand und werden durch intermolekulare Kräfte dort gehalten. Schwerere Partikel hingegen aufgrund ihrer Massenträgheit nicht dem Kraftstoffstrom um die Filterfaser, sondern stoßen frontal auf sie (Aufpralleffekt). Beim Diffusionseffekt berühren sehr kleine Partikel aufgrund ihrer Eigenbewegung (Brownsche Molekularbewegung) zufällig eine Filterfaser, an der sie haften bleiben. Die Abscheidegüte der einzelnen Effekte hängt von der Größe, dem Material und der Durchflussgeschwindigkeit der Teilchen ab.

#### Anforderungen

Die erforderliche Filterfeinheit hängt vom Einspritzsystem ab. Für Systeme mit Saugrohrreinspritzung hat der Filtereinsatz eine mittlere Porenweite von ca. 10  $\mu\text{m}$ . Für die Benzin-Direkteinspritzung ist eine feinere Filtrierung erforderlich. Die mittlere Porenweite liegt im Bereich von 5  $\mu\text{m}$ . Partikel mit einer Größe von mehr als 5  $\mu\text{m}$  müssen zu 85 % abgeschieden werden. Darüber hinaus muss ein Filter für Benzin-Direkteinspritzung im Neuzustand folgende Restschmutzforderung erfüllen: Metall-, Mineral- und Kunststoffpartikel sowie Glasfasern mit Durchmessern von mehr als 200  $\mu\text{m}$  müssen zuverlässig aus dem Kraftstoff gefiltert werden.

Die Filterwirkung hängt von der Durchströmungsrichtung ab. Beim Wechsel von Inline-Filtern muss deshalb die auf dem Gehäuse mit einem Pfeil angegebene Durchflussrichtung eingehalten werden. Das Wechselintervall herkömmlicher Inline-Filter liegt je nach Filtervolumen und Kraft-

stoffverschmutzung normalerweise zwischen 30 000 km und 90 000 km. Intank-Filter erreichen in der Regel Wechselintervalle von mindestens 160 000 km. Für Systeme mit Benzin-Direkteinspritzung gibt es Filter (Intank und Inline) mit einer Standzeit von über 250 000 km.

### Kraftstoffdruckregler

#### Aufgabe

Bei der Saugrohreinspritzung ist die vom Einspritzventil eingespritzte Kraftstoffmenge abhängig von der Einspritzzeit und von der Druckdifferenz zwischen Kraftstoffdruck im Kraftstoffverteiler und Gegendruck im Saugrohr. Bei Systemen mit Rücklauf wird der Druckeinfluss kompensiert, indem ein Druckregler die Differenz zwischen Kraftstoffdruck und Saugrohrdruck konstant hält. Dieser Druckregler lässt gerade so viel Kraftstoff zum Kraftstoffbehälter zurückfließen, dass das Druckgefälle an den Einspritzventilen konstant bleibt. Zur vollständigen Durchspülung des Kraftstoffverteilers ist der Kraftstoffdruckregler normalerweise an dessen Ende montiert. Bei rücklauffreien Systemen sitzt der Druckregler in der Tank-einbaueinheit im Kraftstoffbehälter. Der Kraftstoffdruck im Kraftstoffverteilerrohr wird auf einen konstanten Wert gegenüber dem Umgebungsdruck geregelt. Die Druckdifferenz zum Saugrohrdruck ist daher nicht konstant und wird bei der Berechnung der Einspritzdauer berücksichtigt.

#### Aufbau und Arbeitsweise

Der Kraftstoffdruckregler ist als membran-gesteuerter Überströmdruckregler ausgebildet (**Bild 9**). Eine Gummigewebemembran (4) teilt den Kraftstoffdruckregler in eine Kraftstoffkammer und in eine Federkammer. Die Feder (2) presst über den in die Membran integrierten Ventilträger (3) eine beweglich gelagerte Ventilplatte auf einen Ventil-

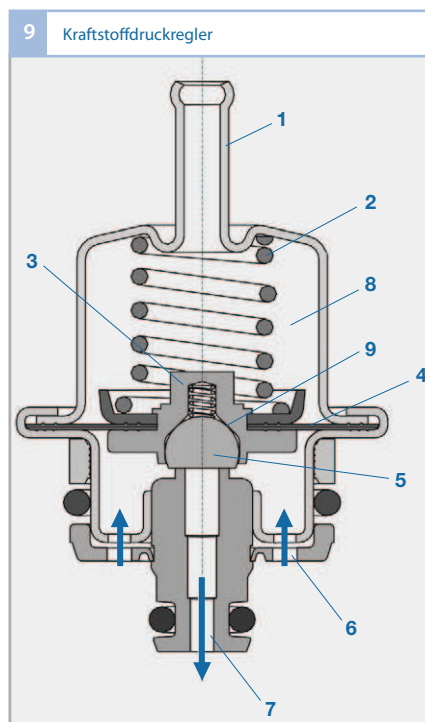


Bild 9

- 1 Saugrohranschluss
- 2 Feder
- 3 Ventilträger
- 4 Membran
- 5 Ventil
- 6 Kraftstoffzulauf
- 7 Kraftstoffrücklauf
- 8 Federkammer
- 9 Ventilsitz

sitz. Wenn die durch den Kraftstoffdruck auf die Membran ausgeübte Kraft die Federkraft überschreitet, öffnet das Ventil und lässt gerade so viel Kraftstoff zum Kraftstoffbehälter fließen, dass sich an der Membran ein Kräftegleichgewicht einstellt. Die Federkammer ist pneumatisch mit dem Sammelsaugrohr hinter der Drosselklappe verbunden. Der Saugrohrunterdruck wirkt dadurch auch in der Federkammer. An der Membran steht damit das gleiche Druckverhältnis an wie an den Einspritzventilen. Das Druckgefälle an den Einspritzventilen hängt deshalb allein von der Federkraft und der Membranfläche ab und bleibt folglich konstant.

### Kraftstoffdruckdämpfer

Das Takten der Einspritzventile und das periodische Ausschleichen von Kraftstoff bei Elektrokraftstoffpumpen nach dem Verdrän-

gerprinzip führt zu Schwingungen des Kraftstoffdrucks. Diese Schwingungen können Druckresonanzen verursachen und damit die Zumessgenauigkeit des Kraftstoffs beeinträchtigen. Die Schwingungen können sich unter Umständen auch über die Befestigungselemente von Elektrokraftstoffpumpe, Kraftstoffleitungen und Kraftstoffverteilerrohr auf den Kraftstoffbehälter und die Karosserie des Fahrzeugs übertragen und Geräusche verursachen. Diese Probleme werden durch eine gezielte Gestaltung der Befestigungselemente und durch den Einsatz spezieller Kraftstoffdruckdämpfer vermieden.

Der Kraftstoffdruckdämpfer ist ähnlich aufgebaut wie der Kraftstoffdruckregler, jedoch ohne den Überströmpfad. Wie bei diesem trennt eine federbelastete Membran den Kraftstoff- und den Luftraum. Die Federkraft ist so dimensioniert, dass die Membran von ihrem Sitz abhebt, sobald der Kraftstoffdruck seinen Arbeitsbereich erreicht. Der dadurch variable Kraftstoffraum kann beim Auftreten von Druckspitzen Kraftstoff aufnehmen und beim Absinken des Drucks wieder Kraftstoff

abgeben. Um bei saugrohrbedingter Schwankung des Kraftstoffabsolutdrucks stets im günstigsten Betriebsbereich zu arbeiten, kann die Federkammer mit einem Saugrohranschluss versehen sein. Wie der Kraftstoffdruckregler kann auch der Kraftstoffdruckdämpfer am Kraftstoffverteilerstück oder in der Kraftstoffleitung sitzen. Bei der Benzin-Direkteinspritzung ergibt sich als zusätzlicher Anbauort die Hochdruckpumpe.

## Rückhaltesysteme für Kraftstoffdämpfe, Tankentlüftung

Fahrzeuge mit Ottomotor sind mit einem Kraftstoffdampf-Rückhaltesystem (Tankentlüftungssystem) ausgestattet, um zu verhindern, dass der im Kraftstoffbehälter ausdampfende Kraftstoff in die Umgebung gelangt. Die maximal zulässigen Verdunstungsemissionen von Kohlenwasserstoffen sind in der Abgasgesetzgebung festgelegt.

### Entstehung von Kraftstoffdämpfen

Vermehrte Ausdampfung von Kraftstoff aus dem Kraftstoffbehälter entsteht durch Erwärmung des Kraftstoffs im Kraftstoffbehälter aufgrund erhöhter Umgebungstemperatur, durch benachbarte heiße Bauteile (z. B. Abgasanlage) oder durch den Rücklauf von erwärmtem Kraftstoff in den Tank, und durch Abnahme des Umgebungsdrucks, z. B. bei einer Fahrt bergauf.

### Aufbau und Arbeitsweise

Der Kraftstoffdampf wird über eine Entlüftungsleitung (Bild 10, Pos. 2) vom Kraftstoffbehälter (1) zum Aktivkohlebehälter (3) geleitet. Die Aktivkohle absorbiert den im Kraftstoffdampf enthaltenen Kraftstoff und lässt die Luft über die Öffnung der Frischluftzufuhr (4) ins Freie entweichen. Damit der Aktivkohlefilter für neu ausdampfenden

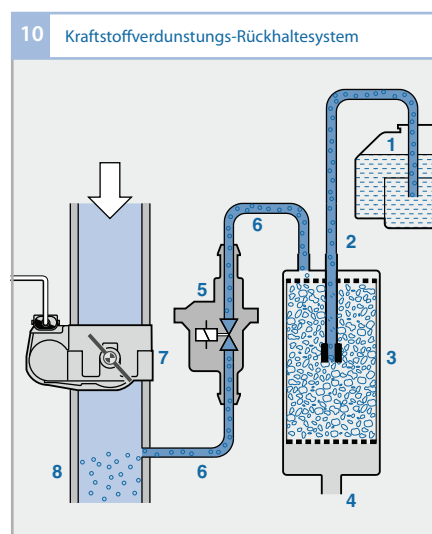


Bild 10

- 1 Kraftstoffbehälter
- 2 Entlüftungsleitung des Kraftstoffbehälters
- 3 Aktivkohlebehälter
- 4 Frischluft
- 5 Regenerierventil
- 6 Leitung zum Saugrohr
- 7 Drosselklappe
- 8 Saugrohr

Kraftstoff aufnahmefähig bleibt, muss er regelmäßig regeneriert werden. Dazu ist der Aktivkohlebehälter über ein Regenerierventil (5) mit dem Saugrohr (8) verbunden. Zur Regenerierung wird das Regenerierventil von der Motorsteuerung angesteuert und gibt die Leitung zwischen dem Aktivkohlebehälter und dem Saugrohr frei. Aufgrund des im Saugrohr herrschenden Unterdrucks wird Frischluft (4) durch die Aktivkohle angesaugt. Die Frischluft nimmt den absorbierten Kraftstoff aus dem Aktivkohlefilter auf und führt ihn dem Saugrohr zu. Von dort gelangt er mit der vom Motor angesaugten Luft in den Brennraum. Damit dort die richtige Kraftstoffmenge zur Verfügung steht, wird gleichzeitig die Einspritzmenge reduziert. Die durch den Aktivkohlefilter angesaugte Kraftstoffmenge wird über die Luftzahl  $\lambda$  berechnet und auf einen Sollwert geregelt.

Die zulässige Regeneriergasmenge, d. h. der über das Regenerierventil einströmende Luft-Kraftstoff-Strom, wird wegen möglicher Schwankungen der Kraftstoffkonzentration begrenzt; denn je größer der Anteil des über das Ventil zugeführten Kraftstoffs ist, desto schneller und stärker muss das System die Einspritzmenge korrigieren. Die Korrektur erfolgt über die  $\lambda$ -Regelung, wobei Konzentrationsschwankungen mit einer zeitlichen Verzögerung ausgeglichen werden. Damit Abgaswerte und Fahrbarkeit nicht beeinträchtigt werden, müssen Schwankungen der Luftzahl durch eine Begrenzung der Regeneriergasmenge beschränkt werden.

#### Besonderheiten bei Turboaufladung und Benzin-Direkteinspritzung

Die Wirkung der Regenerierung ist bei Systemen mit Benzin-Direkteinspritzung im aufgeladenen Betrieb und bei Magersystemen im Schichtbetrieb begrenzt, da aufgrund der weitgehenden Entdrosselung ein

geringerer oder gar kein Saugrohrunterdruck verfügbar ist. Das hat einen gegenüber dem Homogenbetrieb verminderten Regeneriergasstrom zur Folge. Reicht dieser – beispielsweise bei hoher Ausgasung des Kraftstoffs – nicht aus, wird der Motor so lange im Homogenbetrieb gefahren, bis die zunächst hohe Kraftstoffkonzentration im Regeneriergasstrom gesunken ist. Dies lässt sich über die  $\lambda$ -Sonde feststellen. Für aufgeladene Systeme gibt es zusätzlich oder alternativ die Möglichkeit, eine zweite Einleitstelle mit einer Venturi-Düse vor dem Turbolader in das System zu integrieren.

#### Erweiterte Anforderungen

Die optimale Regenerierung des Rückhaltesystems bedingt einerseits den verbrennungsmotorischen Betrieb an sich und andererseits ein möglichst hohes (treibendes) Druckgefälle zwischen dem Saugmodul und der Umgebung. Durch immer stärkeres Motor-Downsizing und damit verbundene höhere Aufladegrade (bei Turbomotoren) wird das verfügbare Druckgefälle über die normale Aufladung hinaus weiter reduziert. Zusätzlich schränken neue Systeme zur weiteren Verbrauchseinsparung (Start-Stopp-Systeme, Hybride) die Verfügbarkeit des verbrennungsmotorischen Betriebs stärker ein. Beide Trends erfordern in der Summe erweiterte Maßnahmen in der Tankentlüftung wie beispielsweise den Einsatz von Drucktanks zur Reduzierung der Ausgasung (der Tankinnendruck steigt dabei bis zu 30...40 kPa über den Umgebungsdruck an) oder von aktiven Spülpumpen zur Unterstützung der Regenerierung des Aktivkohlebehälters.



laufenden Viertakter für den Einsatz im Automobil wurden für flüssige Kraftstoffe entwickelt und mit Leichtbenzin, z. B. dem oben genannten Ligroin, betrieben. Erhältlich war Ligroin in der Apotheke. Mit Einführung des Spritzdüsenvergasers war man auch in der Lage, die Motoren mit schwerflüchtigem Benzin zu betreiben, was die Verfügbarkeit von geeigneten Kraftstoffen bedeutend verbesserte.

Erste Raffinerien speziell für Benzin entstanden ab 1913. Zur Ausbeuterverbesserung bei der Benzinerzeugung wurden chemische Verfahren entwickelt, welche die chemische Zusammensetzung und Eigenschaften des Benzins veränderten. Bereits zu dieser Zeit wurden auch die ersten Additive oder „Qualitätsverbesserer“ eingeführt. In den folgenden Jahrzehnten wurden weitere Nachbearbeitungsverfahren zur Erhöhung der Benzinausbeute und der Kraftstoffqualität entwickelt, um den Anforderungen der Umweltschutzgesetzgebung und der Weiterentwicklung der Ottomotoren Rechnung zu tragen.

#### Kraftstoffsorten und Zusammensetzung

In Deutschland werden zwei Super-Kraftstoffe mit 95 Oktan angeboten, die sich im

Ethanolgehalt unterscheiden und maximal 5 Volumenprozent Ethanol (für Super) beziehungsweise 10 Volumenprozent Ethanol (für Super E10) enthalten dürfen. Außerdem ist ein Super-Plus-Kraftstoff mit 98 Oktan erhältlich. Einzelne Anbieter haben ihre Super-Plus-Kraftstoffe durch 100-Oktan-Kraftstoffe (V-Power 100, Ultimate 100, Super 100) ersetzt, die in Grundqualität und durch Zusatz von Additiven verändert sind. Additive sind Wirksubstanzen, die zur Verbesserung von Fahrverhalten und Verbrennung zugesetzt werden.

In den USA wird zwischen Regular (92 Oktan), Premium (94 Oktan) und Premium Plus (98 Oktan) unterschieden; die Kraftstoffe in den USA enthalten in der Regel 10 Volumenprozent Ethanol. Durch den Zusatz sauerstoffhaltiger Komponenten wird die Oktanzahl erhöht und den Anforderungen moderner, immer höher verdichtender Motoren nach besserer Klopfestigkeit Rechnung getragen.

Ottokraftstoffe bestehen zum Großteil aus Paraffinen und Aromaten (Bild 11). Paraffine mit einem rein kettenförmigen Aufbau (n-Paraffine) zeigen zwar eine sehr gute Zündwilligkeit, allerdings auch eine geringe

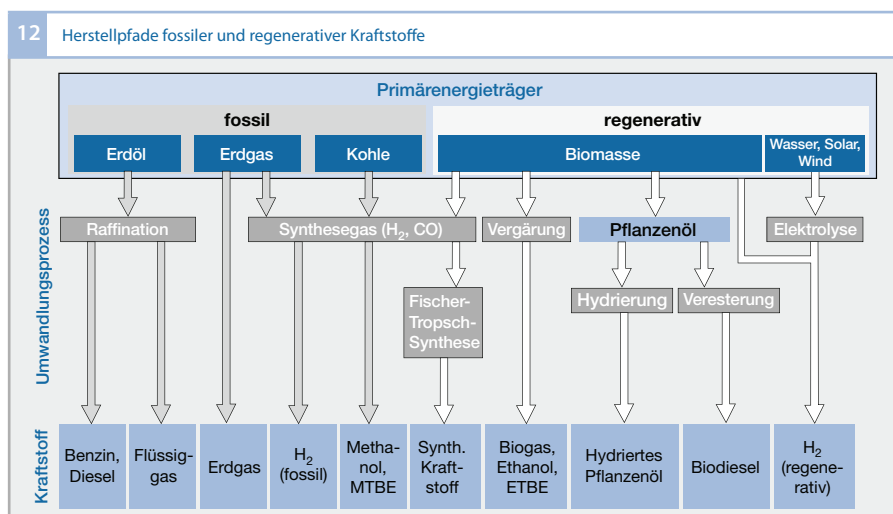


Bild 12  
ETBE Ethyltertiärbutylether  
MTBE Methyltertiärbutylether



Klopffestigkeit. Iso-Paraffine und Aromaten sind Kraftstoffkomponenten mit hoher Klopffestigkeit. Die meisten Ottokraftstoffe, die heute angeboten werden, enthalten sauerstoffhaltige Komponenten (Oxygenates). Dabei ist insbesondere Ethanol von Bedeutung, da die „EU-Biofuels Directive“ Mindestgehalte an erneuerbaren Kraftstoffen vorgibt, die in vielen Staaten mit Bioethanol realisiert werden. Länder wie China, die vorhaben, ihren hohen Kraftstoffbedarf aus Kohle zu decken, werden zukünftig verstärkt auf Methanol setzen. Aber auch die aus Methanol oder Ethanol herstellbaren Ether MTBE (Methyltertiärbutylether) bzw. ETBE (Ethyltertiärbutylether) werden eingesetzt, von denen in Europa derzeit bis zu 22 Volumenprozent zugegeben werden dürfen.

Reformulated Gasoline bezeichnet Ottokraftstoff, der durch eine veränderte Zusammensetzung niedrigere Verdampfungs- und Schadstoffemissionen verursacht als herkömmliches Benzin. Die Anforderungen an Reformulated Gasoline sind in den USA im Clean Air Act von 1990 festgelegt. Es sind z. B. niedrigere Grenzwerte für Dampfdruck, Aromaten- und Benzolgehalt sowie für das Siedende vorgegeben. Die Zugabe von Additiven zur Reinhaltung des Einlasssystems ist ebenfalls vorgeschrieben.

### Herstellung

Bei der Produktion von Kraftstoffen wird zwischen fossilen und regenerativen Verfahren unterschieden (siehe [Bild 12](#)). Kraftstoffe werden überwiegend aus fossilem Erdöl hergestellt. Erdgas als zweiter fossiler Energieträger spielt eine untergeordnete Rolle – sowohl in der Direktnutzung als gasförmiger Kraftstoff, als auch als Ausgangsprodukt für die Herstellung von synthetischen paraffinischen Kraftstoffen. Das für die Herstellung synthetischer Kraftstoffe benötigte Synthesegas kann auch aus Kohle erzeugt werden. Kohle als Rohstoff wird allerdings nur unter

besonderen politischen und regionalen Randbedingungen eingesetzt. Die Verwendung von Biomasse zur Synthesegaserzeugung befindet sich noch im Versuchsstadium. Aus dem Synthesegas werden an Katalysatoren in der Fischer-Tropsch-Synthese paraffinische Kohlenwasserstoffmoleküle verschiedener Kettenlänge aufgebaut, die für die Zumischung zu Kraftstoffen oder für den direkten motorischen Einsatz chemisch noch weiter modifiziert werden müssen.

Die Herstellung von Biokraftstoffen gewinnt zunehmend an Bedeutung, wobei im Wesentlichen drei Verfahren genutzt werden. Die direkte Vergärung von Biomasse führt zu Biogas. Bioethanol erhält man durch Vergärung zucker- oder stärkehaltiger Agrarfrüchte. Pflanzliche Öle oder tierische Fette können entweder zu Biodiesel umgeestert oder durch Hydrierung in paraffinische Kraftstoffe (hydriertes Pflanzenöl, Hydro-Treated Vegetable Oil HVO) umgewandelt werden.

### Konventionelle Kraftstoffe

Erdöl ist ein Gemisch aus einer Vielzahl von Kohlenwasserstoffen und wird in Raffinerien verarbeitet. Benzin, Kerosin, Dieselmotorkraftstoff und Schweröle sind typische Raffinerieprodukte, deren Mengenverhältnis durch die technische Ausstattung der Raffinerie bestimmt wird und nur eingeschränkt einer sich ändernden Marktnachfrage angepasst werden kann. Bei der Destillation des Erdöls wird das Gemisch an Kohlenwasserstoffen in Gruppen (Fraktionen) ähnlicher Molekülgröße aufgetrennt. Bei der Destillation unter Atmosphärendruck werden die leicht siedenden Anteile wie Gase, Benzine und Mitteldestillat abgetrennt. Eine Vakuumdestillation des Rückstandes liefert leichtes und schweres Vakuumgasöl, die die Grundlage für Diesel und leichtes Heizöl bilden. Der bei der „Vakuumdestillation“ verbleibende

Anforderungen	Einheit	Spezifikationswert	
		Minimalwert	Maximalwert
<b>Klopffestigkeit</b>			
Research-Oktananzahl Super	–	95	–
Motor-Oktananzahl Super	–	85	–
Research-Oktananzahl Super Plus (für Deutschland)	–	98	–
Motor-Oktananzahl Super Plus (für Deutschland)	–	88	–
Dichte (bei 15 °C)	kg/m <sup>3</sup>	720	775
Ethanolgehalt für E5	Volumenprozent	–	5,0
Ethanolgehalt für E10	Volumenprozent	–	10,0
Methanolgehalt	Volumenprozent	–	3,0
Sauerstoffgehalt für E5	Massenprozent	–	2,7
Sauerstoffgehalt für E10	Massenprozent	–	3,7
Benzol	Volumenprozent	–	1,0
Schwefelgehalt	mg/kg	–	10,0
Blei	mg/l	–	5,0
Mangengehalt bis 2013	mg/l	–	6,0
Mangengehalt ab 2014	mg/l	–	2,0
<b>Flüchtigkeit</b>			
Dampfdruck im Sommer	kPa	45	60
Dampfdruck im Winter (für Deutschland)	kPa	60	90
Verdampfte Menge bei 70 °C im Sommer	Volumenprozent	20 (22 für E10)	48 (50 für E10)
Verdampfte Menge bei 70 °C im Winter	Volumenprozent	22 (24 für E10)	50 (52 für E10)
Verdampfte Menge bei 100 °C	Volumenprozent	46	71 (72 für E10)
Verdampfte Menge bei 150 °C	Volumenprozent	75	–
Siedende	°C	–	210

**Tabelle 2**  
Ausgewählte Anforderungen an Ottokraftstoffe gemäß DIN EN 228

Rückstand wird zu schwerem Heizöl und Bitumen verarbeitet.

Die aus der Destillation hervorgehenden Mengen an unterschiedlichen Produktfraktionen entsprechen weder den Markterfordernissen, noch wird die erforderliche Produktqualität erreicht. Größere Kohlenwasserstoffmoleküle können durch Cracken mit Wasserstoff (Hydrocracken) oder in Gegenwart von Katalysatoren weiter aufgespalten werden. Bei Umwandlungen im Reformier entstehen aus linearen Kohlenwasserstoffen verzweigte Moleküle, die bei

Ottokraftstoffen zur Erhöhung der Oktanzahl beitragen. Bei der Raffination im Hydrofiner wird im Wesentlichen der Schwefel entfernt. Alkohole und viele Additive werden dem Kraftstoff erst am Ende der Raffinerieprozesse zugesetzt.

#### Alkohole und Ether

##### *Herstellung aus Zucker und Stärke*

Bioethanol kann aus allen zucker- und stärkehaltigen Produkten gewonnen werden und ist der weltweit am meisten produzierte Bio-Kraftstoff. Zuckerhaltige Pflanzen (Zucker-

rohr, Zuckerrüben) werden mit Hefe fermentiert, der Zucker wird dabei zu Ethanol vergoren. Bei der Bioethanolvergewinnung aus Stärke werden Getreide wie Mais, Weizen oder Roggen mit Enzymen vorbehandelt, um die langkettigen Stärkemoleküle teilzuspalten. Bei der anschließenden Verzuckerung erfolgt eine Spaltung in Dextrose-moleküle mit Hilfe von Glucoamylase. Durch Fermentation mit Hefe wird in einem weiteren Prozessschritt Bioethanol erzeugt.

#### *Herstellung aus Lignocellulose*

Die Verfahren, die Bioethanol aus Lignocellulose herstellen, stehen großtechnisch noch nicht zur Verfügung, haben aber den Vorteil, dass die ganze Pflanze verwendet werden kann und nicht nur der zucker- oder stärkehaltige Anteil. Lignocellulose, die das Strukturgerüst der pflanzlichen Zellwand bildet und als Hauptbestandteile Lignin, Hemicellulosen und Cellulose enthält, muss chemisch oder enzymatisch aufgespalten werden. Wegen des neuartigen Ansatzes spricht man auch von Bioethanol der 2. Generation.

#### *Herstellung aus Synthesegas*

Methanol wird in katalytischen Verfahren aus Synthesegas, einem Gemisch von Kohlenmonoxid und Wasserstoff, hergestellt. Das zur Produktion erforderliche Synthesegas wird im Wesentlichen nicht regenerativ, sondern aus fossilen Energieträgern wie Kohle und Erdgas erzeugt und leistet keinen Beitrag zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Wird Synthesegas hingegen aus Biomasse gewonnen, kann daraus „Biomethanol“ hergestellt werden.

#### *Herstellung der Ether*

Methyltertiärbutylether (MTBE) und Ethyltertiärbutylether (ETBE) werden durch säurekatalysierte Addition von Methanol bzw. Ethanol an Isobuten hergestellt. Die Ether, die einen niedrigeren Dampfdruck, einen

höheren Heizwert und eine höhere Oktanzahl als Ethanol haben, sind chemisch stabile Komponenten mit guter Materialverträglichkeit. Sie haben daher sowohl aus logistischer als auch motorischer Sicht Vorteile gegenüber der Verwendung von Alkoholen als Blendkomponente. Aus Gründen der Nachhaltigkeit wird überwiegend ETBE aus Bioethanol eingesetzt.

#### **Normung**

Die europäische Norm EN 228 (Tabelle 2) definiert die Anforderungen für bleifreies Benzin zur Verwendung in Ottomotoren. In den nationalen Anhängen sind weitere, länderspezifische Kennwerte festgelegt. Verbleibende Ottokraftstoffe sind in Europa nicht zugelassen. In den USA sind Ottokraftstoffe in der Norm ASTM D 4814 (American Society for Testing and Materials) spezifiziert.

Bioethanol ist aufgrund seiner Eigenschaften sehr gut zur Beimischung in Ottokraftstoffen geeignet, insbesondere, um die Oktanzahl von reinem mineralölbasiertem Ottokraftstoff anzuheben.

Nachdem der Ethanolgehalt in der europäischen Ottokraftstoffnorm EN 228 lange auf 5 Volumenprozent (E5) begrenzt war, enthält die Ausgabe von 2013 an erster Stelle eine Spezifikation für 10 Volumenprozent Ethanol (E10). Im europäischen Markt sind derzeit noch nicht alle Fahrzeuge mit Materialien ausgerüstet, die einen Betrieb mit E10 erlauben. Als zweite Qualität wird deshalb eine Bestandschutzsorte mit einem maximalen Ethanolgehalt von 5 Volumenprozent beibehalten.

Nahezu alle Ottokraftstoffnormen erlauben die Zugabe von Ethanol als Blendkomponente. In den USA enthält der überwiegende Anteil der Ottokraftstoffe 10 Volumenprozent Ethanol (E10).

Bioethanol kann in Ottomotoren von Flexible-Fuel-Fahrzeugen (FFV, Flexible Fuel Vehicles) auch als Reinkraftstoff (z. B. in Bra-

silien) verwendet werden. Diese Fahrzeuge können sowohl mit Ottokraftstoff als auch mit jeder Mischung aus Ottokraftstoff und Ethanol betrieben werden. Um einen Kaltstart bei tiefen Temperaturen zu gewährleisten, wird die maximale Ethanolkonzentration (von 85 % im Sommer) im Winter entsprechend der Anforderungen auf 50–85 % reduziert. Die Qualität von E85 ist für Europa in der technischen Spezifikation CEN/TS 15293 und in den USA in der ASTM D 5798 definiert.

In Brasilien werden Ottokraftstoffe grundsätzlich nur als Ethanolkraftstoffe angeboten, überwiegend mit einem Ethanolanteil von 18...26 Volumenprozent, aber auch als reines Ethanol (E100, das etwa 7 % Wasser enthält). In China kommt neben E10 auch Methanol-Kraftstoff zum Einsatz. Für konventionelle Ottomotoren liegt die Obergrenze bei 15 % Methanol (M15). Aufgrund negativer Erfahrungen mit Methanolkraftstoffen während der Ölkrise 1973 und auch wegen der Toxizität ist man in Deutschland von der Verwendung von Methanol als Blendkomponente wieder abgekommen. Weltweit betrachtet werden derzeit nur vereinzelt Methanolbeimengungen durchgeführt, dann meist mit einem Anteil von maximal 3 % (M3).

### Physikalisch-chemische Eigenschaften

#### Schwefelgehalt

Zur Minderung der  $\text{SO}_2$ -Emissionen und zum Schutz der Katalysatoren zur Abgasnachbehandlung wurde der Schwefelgehalt von Ottokraftstoffen ab 2009 europaweit auf 10 mg/kg begrenzt. Kraftstoffe, die diesen Grenzwert einhalten, werden als „schwefelfreie Kraftstoffe“ bezeichnet. Damit ist die letzte Stufe der Entschwefelung von Kraftstoffen erreicht. Vor 2009 war in Europa nur noch schwefelarmer Kraftstoff (Schwefelgehalt unter 50 mg/kg) zugelassen, der Anfang 2005 eingeführt wurde. Deutschland hat bei

der Entschwefelung eine Vorreiterrolle übernommen und bereits 2003 durch steuerliche Maßnahmen schwefelfreie Kraftstoffe etabliert. In den USA liegt seit 2006 der Grenzwert für den Schwefelgehalt von kommerziell für den Endverbraucher erhältlichen Ottokraftstoffen bei max. 80 mg/kg, wobei zusätzlich ein Durchschnittswert von 30 mg/kg für die Gesamtmenge des verkauften und importierten Kraftstoffs nicht überschritten werden darf. Einzelne Bundesstaaten, z. B. Kalifornien, haben niedrigere Grenzwerte festgelegt.

#### Heizwert

Für den Energieinhalt von Kraftstoffen wird üblicherweise der spezifische Heizwert  $H_u$  (früher als unterer Heizwert bezeichnet) angegeben; er entspricht der bei vollständiger Verbrennung freigesetzten nutzbaren Wärmemenge. Der spezifische Brennwert  $H_o$  (früher als oberer Heizwert bezeichnet) hingegen gibt die gesamte freigesetzte Reaktionswärme an und umfasst damit neben der nutzbaren Wärme auch die im entstehenden Wasserdampf gebundene Wärme (latente Wärme). Dieser Anteil wird jedoch im Fahrzeug nicht genutzt. Der spezifische Heizwert  $H_u$  von Ottokraftstoff beträgt 40,1...41,8 MJ/kg. Sauerstoffhaltige Kraftstoffe oder Kraftstoffkomponenten (Oxygenates) wie Alkohole und Ether haben einen geringeren Heizwert als reine Kohlenwasserstoffe, weil der in ihnen gebundene Sauerstoff nicht an der Verbrennung teilnimmt. Eine mit üblichen Kraftstoffen vergleichbare Motorleistung führt daher zu einem höheren Kraftstoffverbrauch.

#### Gemischheizwert

Der Heizwert des brennbaren Luft-Kraftstoff-Gemischs bestimmt die Leistung des Motors. Der Gemischheizwert liegt bei stöchiometrischem Luft-Kraftstoff-Verhältnis für alle flüssigen Kraftstoffe und Flüssiggase bei ca. 3,5...3,7 MJ/m<sup>3</sup>.

### Dichte

Die Dichte von Ottokraftstoffen ist in der Norm EN 228 auf 720...775 kg/m<sup>3</sup> begrenzt.

### Klopffestigkeit

Die Oktanzahl kennzeichnet die Klopffestigkeit eines Ottokraftstoffs. Je höher die Oktanzahl ist, desto klopfester ist der Kraftstoff. Dem sehr klopfesten Iso-Oktan (Trimethylpentan) wird die Oktanzahl 100, dem sehr klopfreudigen n-Heptan die Oktanzahl 0 zugeordnet. Die Oktanzahl eines Kraftstoffs wird in einem genormten Prüfmotor bestimmt: Der Zahlenwert entspricht dem Anteil (in Volumenprozent) an Iso-Oktan in einem Gemisch aus Iso-Oktan und n-Heptan mit dem gleichen Klopfverhalten wie der zu prüfende Kraftstoff.

Die Research-Oktanzahl (ROZ) nennt man die nach der Research-Methode [3] bestimmte Oktanzahl. Sie kann als maßgeblich für das Beschleunigungsklopfen angesehen werden. Die Motor-Oktanzahl (MOZ) nennt man die nach der Motor-Methode [2] bestimmte Oktanzahl. Sie beschreibt vorwiegend die Eigenschaften hinsichtlich des Hochgeschwindigkeitsklopfens. Die Motor-Methode unterscheidet sich von der Research-Methode durch Gemischvorwärmung, höhere Drehzahl und variable Zündzeitpunkteinstellung, wodurch sich eine höhere thermische Beanspruchung des zu untersuchenden Kraftstoffs ergibt. Die MOZ-Werte sind niedriger als die ROZ-Werte.

### Erhöhen der Klopffestigkeit

Normales Destillat-Benzin hat eine niedrige Klopffestigkeit. Erst durch Vermischen mit verschiedenen klopfesten Raffineriekomponenten (katalytische Reformate, Isomerisate) ergeben sich für moderne Motoren geeignete Kraftstoffe mit hoher Oktanzahl. Durch Zusatz von sauerstoffhaltigen Komponenten wie Alkoholen und Ethern kann die Klopf-

festigkeit erhöht werden. Metallhaltige Additive zur Erhöhung der Oktanzahl, z. B. MMT (Methylcyclopentadienyl Mangan Tri-carbonyl) bilden Asche während der Verbrennung. Die Zugabe von MMT wird deshalb in der EN 228 durch einen Grenzwert für Mangan im Spurenbereich ausgeschlossen.

### Flüchtigkeit

Die Flüchtigkeit von Ottokraftstoff ist nach oben und nach unten begrenzt. Auf der einen Seite sollen genügend leichtflüchtige Komponenten enthalten sein, um einen sicheren Kaltstart zu gewährleisten. Auf der anderen Seite darf die Flüchtigkeit nicht so hoch sein, dass es bei höheren Temperaturen zur Unterbrechung der Kraftstoffzufuhr durch Gasblasenbildung (Vapour-Lock) und in der Folge zu Problemen beim Fahren oder beim Heißstart kommt. Darüber hinaus sollen die Verdampfungsverluste zum Schutz der Umwelt gering gehalten werden.

Die Flüchtigkeit des Kraftstoffs wird durch verschiedene Kenngrößen beschrieben. In der Norm EN 228 sind für E5 und E10 jeweils zehn verschiedene Flüchtigkeitsklassen spezifiziert, die sich in Siedeverlauf, Dampfdruck und dem Vapour-Lock-Index (VLI) unterscheiden. Die einzelnen Nationen können, je nach den spezifischen klimatischen Gegebenheiten, einzelne dieser Klassen in ihren nationalen Anhang übernehmen. Für Sommer und Winter werden unterschiedliche Werte in der Norm festgelegt.

### Siedeverlauf

Für die Beurteilung des Kraftstoffs im Fahrzeugbetrieb sind die einzelnen Bereiche der Siedekurve getrennt zu betrachten. In der Norm EN 228 sind deshalb Grenzwerte für den verdampften Anteil bei 70 °C, bei 100 °C und bei 150 °C festgelegt. Der bis 70 °C verdampfte Kraftstoff muss einen Mindestanteil erreichen, um ein leichtes Starten des kalten

Motors zu gewährleisten (das war vor allem früher wichtig für Vergaserfahrzeuge). Der verdampfte Anteil darf aber auch nicht zu groß sein, weil es sonst im heißen Zustand zu Dampfblasenbildung kommen kann. Der bei 100 °C verdampfte Kraftstoffanteil bestimmt neben dem Anwärmverhalten v. a. Betriebsbereitschaft und Beschleunigungsverhalten des warmen Motors. Das bis 150 °C verdampfte Volumen soll nicht zu niedrig liegen, um eine Motorölverdünnung zu vermeiden. Besonders bei kaltem Motor verdampfen die schwerflüchtigen Komponenten des Ottokraftstoffs schlecht und können aus dem Brennraum über die Zylinderwände ins Motoröl gelangen.

#### Dampfdruck

Der bei 37,8 °C (100 °F) nach EN 13016-1 gemessene Dampfdruck von Kraftstoffen ist in erster Linie eine Kenngröße, mit der die sicherheitstechnischen Anforderungen im Fahrzeugtank definiert werden. Der Dampfdruck wird in allen Spezifikationen nach unten und oben limitiert. Er beträgt z. B. für Deutschland im Sommer maximal 60 kPa und im Winter maximal 90 kPa. Für die Auslegung einer Einspritzanlage ist die Kenntnis des Dampfdrucks auch bei höheren Temperaturen (80...100 °C) wichtig, da sich ein Anstieg des Dampfdrucks durch Alkoholumischung insbesondere bei höheren Temperaturen zeigt. Steigt der Dampfdruck des Kraftstoffs z. B. während des Fahrzeugbetriebs durch Einfluss der Motortemperatur über den Systemdruck der Einspritzanlage, kann es zu Funktionsstörungen durch Dampfblasenbildung kommen.

#### Dampf-Flüssigkeits-Verhältnis

Das Dampf-Flüssigkeits-Verhältnis (DFV) ist ein Maß für die Neigung eines Kraftstoffs zur Dampfbildung. Als Dampf-Flüssigkeits-Verhältnis wird das aus einer Kraftstoffeinheit entstandene Dampfvolumen bei

definiertem Gegendruck und definierter Temperatur bezeichnet. Sinkt der Gegendruck (z. B. bei Bergfahrten) oder erhöht sich die Temperatur, so steigt das Dampf-Flüssigkeits-Verhältnis, wodurch Fahrstörungen verursacht werden können. In der Norm ASTM D 4814 wird z. B. für jede Flüchtigkeitsklasse eine Temperatur definiert, bei der ein Dampf-Flüssigkeits-Verhältnis von 20 nicht überschritten werden darf.

#### Vapor-Lock-Index

Der Vapour-Lock-Index (VLI) ist die rechnerisch ermittelte Summe des zehnfachen Dampfdrucks (in kPa bei 37,8 °C) und der siebenfachen Menge des bis 70 °C verdampften Volumenanteils des Kraftstoffs. Mit diesem zusätzlichen Grenzwert kann die Flüchtigkeit des Kraftstoffes weiter eingeschränkt werden, mit der Folge, dass bei dessen Herstellung nicht beide Maximalwerte von Dampfdruck und Siedekennwerten gleichzeitig realisiert werden können.

#### Besonderheiten bei Alkoholkraftstoffen

Der Zusatz von Alkoholen ist mit einer Erhöhung der Flüchtigkeit insbesondere bei höheren Temperaturen verbunden. Außerdem kann Alkohol Materialien im Kraftstoffsystem schädigen, z. B. zu Elastomerquellung führen und Alkoholkorrosion an Aluminiumteilen auslösen. In Abhängigkeit vom Alkoholgehalt und von der Temperatur kann es selbst bei Zutritt von nur geringen Mengen an Wasser zur Entmischung kommen. Bei der Phasentrennung geht Alkohol aus dem Kraftstoff in eine zweite wässrige Alkoholphase über. Das Problem der Entmischung besteht bei den Ethern nicht.

#### Additive

Additive können zur Verbesserung der Kraftstoffqualität zugesetzt werden, um Verschlechterungen im Fahrverhalten und in

der Abgaszusammensetzung während des Fahrzeugbetriebs entgegenzuwirken. Eingesetzt werden meist Pakete aus Einzelkomponenten mit verschiedenen Wirkungen. Sie müssen in ihrer Zusammensetzung und Konzentration sorgfältig abgestimmt und erprobt sein und dürfen keine negativen Nebenwirkungen haben.

In der Raffinerie erfolgt eine Basisadditivierung zum Schutz der Anlagen und zur Sicherstellung einer Mindestqualität der Kraftstoffe. An den Abfüllstationen der Raffinerie können beim Befüllen der Tankwagen markenspezifische Multifunktionsadditive zur weiteren Qualitätsverbesserung zugegeben werden (Endpunktdosierung). Eine nachträgliche Zugabe von Additiven in den Fahrzeugtank birgt bei Unverträglichkeit das Risiko von technischen Störungen.

#### Detergentien

Die Reinhaltung des gesamten Einlasssystems (Einspritzventile, Einlassventile) ist eine wichtige Voraussetzung für den Erhalt der im Neuzustand optimierten Gemischeinstellung und -aufbereitung und somit grundlegend für einen störungsfreien Fahrbetrieb und die Schadstoffminimierung im Abgas. Aus diesem Grund sollten dem Kraftstoff wirksame Reinigungsadditive (Detergentien) zugesetzt sein.

#### Korrosionsinhibitoren

Der Eintrag von Wasser kann zu Korrosion im Kraftstoffsystem führen. Durch den Zusatz von Korrosionsinhibitoren, die sich als dünner Film auf der Metalloberfläche anlagern, kann Korrosion wirksam unterbunden werden.

#### Oxidationsstabilisatoren

Die den Kraftstoffen zugesetzten Alterungsschutzmittel (Antioxidantien) erhöhen die Lagerstabilität. Sie verhindern eine rasche Oxidation durch Luftsauerstoff.

#### Metalldesaktivatoren

Einzelne Additive haben auch die Eigenschaft, durch Bildung stabiler Komplexe die katalytische Wirkung von Metallionen zu deaktivieren.

#### Gasförmige Kraftstoffe

##### Erdgas

Der Hauptbestandteil von Erdgas ist Methan ( $\text{CH}_4$ ) mit einem Mindestanteil von 80 %. Weitere Bestandteile sind Inertgase wie Kohlendioxid oder Stickstoff und kurzkettige Kohlenwasserstoffe. Auch Sauerstoff und Wasserstoff sind enthalten. Erdgas ist weltweit verfügbar und erfordert nach der Förderung nur einen relativ geringen Aufwand zur Aufbereitung. Je nach Herkunft variiert jedoch die Zusammensetzung des Erdgases, wodurch sich Schwankungen bei Dichte, Heizwert und Klopfestigkeit ergeben. Die Eigenschaften von Erdgas als Kraftstoff sind für Deutschland in der Norm DIN 51624 festgelegt. Ein europäischer Standard für Erdgas, der auch die Qualitätsanforderungen an Biomethan berücksichtigt, ist in Bearbeitung.

Biomethan lässt sich aus Biomasse, z. B. aus Jauche, Grünschnitt oder Abfällen gewinnen und weist bei der Verbrennung im Vergleich zu fossilem Erdgas deutlich reduzierte  $\text{CO}_2$ -Gesamtemissionen auf. Für die Erzeugung von Methan durch Elektrolyse von Wasser mit Strom aus erneuerbaren Energien und Umsetzung des erzeugten Wasserstoffs  $\text{H}_2$  mit Kohlendioxid  $\text{CO}_2$  gibt es erste Pilotanlagen.

Erdgas wird entweder gasförmig komprimiert (CNG, Compressed Natural Gas) bei einem Druck von 200 bar gespeichert oder es befindet sich als verflüssigtes Gas (LNG, Liquid Natural Gas) bei  $-162^\circ\text{C}$  in einem kältefesten Tank. Verflüssigtes Gas benötigt nur ein Drittel des Speichervolumens von komprimiertem Erdgas, die Speicherung erfordert jedoch einen hohen Energieaufwand zur Verflüssigung. Deshalb wird Erdgas an

den Erdgas-Tankstellen in Deutschland fast ausschließlich in komprimierter Form angeboten. Erdgasfahrzeuge zeichnen sich durch niedrige CO<sub>2</sub>-Emissionen aus, bedingt durch den geringeren Kohlenstoffanteil des Erdgases im Vergleich zum flüssigen Ottokraftstoff. Das Wasserstoff-Kohlenstoff-Verhältnis von Erdgas beträgt ca. 4 : 1, das von Benzin hingegen 2,3 : 1. Bedingt durch den geringeren Kohlenstoffanteil des Erdgases entsteht bei seiner Verbrennung weniger CO<sub>2</sub> und mehr H<sub>2</sub>O als bei Benzin. Ein auf Erdgas eingestellter Ottomotor erzeugt schon ohne weitere Optimierung ca. 25 % weniger CO<sub>2</sub>-Emissionen als ein Benzinmotor (bei vergleichbarer Leistung). Durch die sehr hohe Klopfestigkeit des Erdgases von bis zu 130 ROZ (im Vergleich dazu liegt Benzin bei 91...100 ROZ) eignet sich der Erdgasmotor ideal zur Turboaufladung und lässt eine Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses zu.

#### Flüssiggas

Flüssiggas (LPG, Liquid Petroleum Gas, auch als Autogas bezeichnet) fällt bei der Gewinnung von Rohöl an und entsteht bei verschiedenen Raffinerieprozessen. Es ist ein Gemisch aus den Hauptkomponenten Propan und Butan. Es lässt sich bei Raumtemperatur unter vergleichsweise niedrigem Druck verflüssigen. Durch den geringeren Kohlenstoffanteil gegenüber Benzin entstehen bei der Verbrennung ca. 10 % weniger CO<sub>2</sub>. Die Oktanzahl beträgt ca. 100...110 ROZ. Die Anforderungen an Flüssiggas für den Einsatz in Kraftfahrzeugen sind in der europäischen Norm EN 589 festgelegt.

#### Wasserstoff

Wasserstoff kann durch chemische Verfahren aus Erdgas, Kohle, Erdöl oder aus Biomasse sowie durch Elektrolyse von Wasser erzeugt werden. Heute wird Wasserstoff überwiegend großindustriell durch Dampfreformierung aus Erdgas gewonnen. Bei die-

sem Verfahren wird CO<sub>2</sub> freigesetzt, sodass sich insgesamt nicht zwangsläufig ein CO<sub>2</sub>-Vorteil gegenüber Benzin, Diesel oder der direkten Verwendung von Erdgas im Verbrennungsmotor ergibt. Eine Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen ergibt sich dann, wenn der Wasserstoff regenerativ aus Biomasse oder durch Elektrolyse aus Wasser hergestellt wird, sofern dafür regenerativ erzeugter Strom eingesetzt wird. Lokal treten bei der Verbrennung von Wasserstoff im Motor keine CO<sub>2</sub>-Emissionen auf.

#### Speicherung

Wasserstoff hat zwar eine sehr hohe gewichtsbezogene Energiedichte (ca. 120 MJ/kg, sie ist damit fast dreimal so hoch wie die von Benzin), die volumenbezogene Energiedichte ist jedoch wegen der geringen spezifischen Dichte sehr gering. Für die Speicherung bedeutet dies, dass der Wasserstoff entweder unter Druck (bei 350...700 bar) oder durch Verflüssigung (Kryogenspeicherung bei -253 °C) komprimiert werden muss, um ein akzeptables Tankvolumen zu erzielen. Eine weitere Möglichkeit ist die Speicherung als Hydrid.

#### Einsatz im Kfz

Wasserstoff kann sowohl in Brennstoffzellenantrieben als auch direkt in Verbrennungsmotoren eingesetzt werden. Langfristig wird der Schwerpunkt bei der Nutzung in Brennstoffzellen erwartet. Hier wird ein besserer Wirkungsgrad als beim H<sub>2</sub>-Verbrennungsmotor erreicht.

#### Literatur

- [1] DIN EN 228: Januar 2013, Unverbleite Ottokraftstoffe – Anforderungen und Prüfverfahren
- [2] EN ISO 5163:2005, Bestimmung der Klopfestigkeit von Otto und Flugkraftstoffen – Motor-Verfahren
- [3] EN ISO 5164:2005, Bestimmung der Klopfestigkeit von Ottokraftstoffen – Research-Verfahren