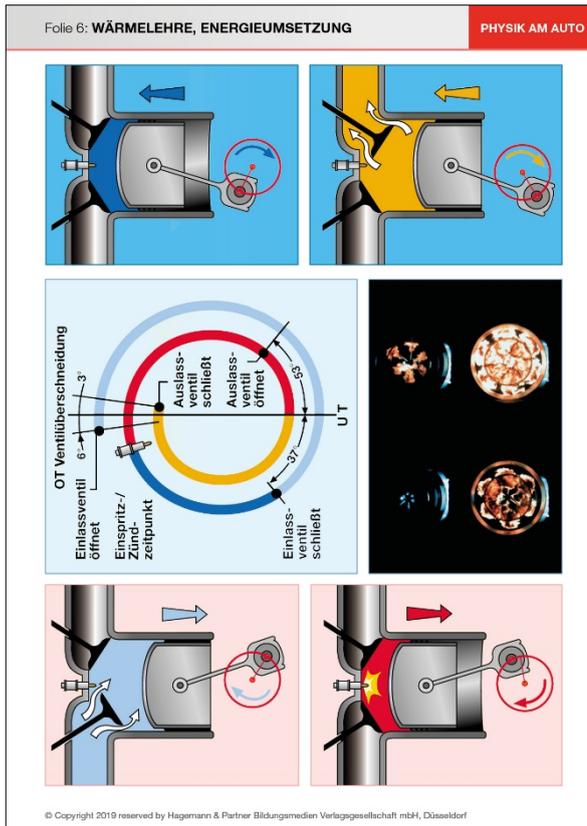


Optimierung von Verbrennungsmotoren I



Thema: Wärmekraftmaschinen, Optimierung durch moderne Techniken

Die Optimierung von Verbrennungsmotoren gehört zum Themenbereich **Wärmekraftmaschinen**. Die Folien sind für den Einsatz unmittelbar nach oder im Zusammenhang mit der Besprechung des Verbrennungsmotors vorgesehen. Sie erweitern das in den üblichen Physikbüchern vermittelte Grundwissen zum Prinzip des Viertaktmotors und des Dieselmotors um die **Optimierung der Motoren** durch moderne Konstruktionstechniken. Dabei geht es u. a. um Abgasverhalten und Senkung des Kraftstoffverbrauchs bei vergleichbarer Leistung.

Inhalt

Die Folie **Optimierung von Verbrennungsmotoren I** zeigt die vier Takte des Verbrennungsmotors im Zusammenhang mit einem sogenannten **Kreisdiagramm**. Im Zusammenhang mit den zugehörigen, gleichfarbig umrahmten Darstellungen der vier Takte ergibt sich eine Übersicht über den Arbeitsablauf, der die **Dynamik** dieser Vorgänge besser wiedergibt und das statische Nebeneinander der üblichen vier Darstellungen überwindet. Es ist allerdings notwendig, sich nach dem ersten Eindruck in das Diagramm einzulesen. Man erkennt den **zeitlichen Ablauf** und die **Periodizität** der Vorgänge (Öffnen und Schließen von Ein- und Auslassventil, Zündzeitpunkt bzw. Einspritzbeginn) während zweier Umdrehungen der Pleuellwelle. Die dargestellten Abläufe wiederholen sich danach in gleicher Form immer wieder. Die Farben der Kästchen entsprechen den Farben im Kreisdiagramm.

Als Bezugsgröße für die zeitlichen Abläufe wird die Winkelstellung der Pleuellwelle verwendet und nicht die Position des Kolbens. Gerade im Bereich des wichtigen oberen Totpunktes ist diese Angabe wesentlich präzi-

ser, da sich die Position des Kolbens über mehrere Winkelgrade kaum verändert.

Die Darstellungen sind so ausgelegt, dass sie für einen Ottomotor wie für einen Dieselmotor gelten können. Ob diese doppelte Verwendungsmöglichkeit parallel oder nacheinander genutzt wird, oder ob doch nur eine Version behandelt wird, entscheidet die jeweilige Unterrichtssituation. Sind in der jeweiligen Physiksammlung die üblichen Motor-Modelle vorhanden, können sie parallel zur Folie eingesetzt werden.

Durch das Kreisdiagramm wird auch besser erkennbar, welche Veränderungsmöglichkeiten bei der Steuerung des Verbrennungsvorganges gegeben sind:

1. Der **Zeitpunkt der Zündung (Ottomotor) bzw. des Einspritzbeginns beim Diesel** kann variabel sein. Schon bei herkömmlicher Motorsteuerung wird dieser Zeitpunkt abhängig von der Motordrehzahl und von der geforderten Motorleistung („Last“) verändert. Noch viel umfangreicher (siehe dazu Kennfeldarstellung auf der **Kopiervorlage**) ist die Anzahl der Parameter, die eine moderne Motorelektronik benutzt, um diesen Zeitpunkt optimal einzustellen.
2. Zugleich kann bei modernen Motoren, die sowohl beim Ottomotor wie beim Diesel das Prinzip der Kraftstoffeinspritzung verwenden, die **Menge** des eingespritzten **Kraftstoffs** optimal bemessen werden. Unten Mitte: 4 Fotos verdeutlichen den hier vorgestellten Verbrennungsvorgang im Motor.
3. Das Kreisdiagramm (Bild oben Mitte) macht ferner deutlich, dass auch eine Veränderungsmöglichkeit besteht bezüglich der Zeitpunkte, zu denen die Ventile geöffnet bzw. geschlossen werden. Diese Möglichkeit der sogenannten „**variablen Steuerzeiten**“ bedingt einigen konstruktiven Aufwand und wird daher noch seltener genutzt.

Die Kopiervorlage **Besuch eines KFZ-Betriebes** spielt eine Sonderrolle. Mit ihr wird ein **Formblatt zur Auswertung eines Kfz-Betriebsbesuches** geboten. Der **Besuch eines Kfz-Betriebes** sollte unbedingt im Zusammenhang mit dem Einsatz dieser Folien durchgeführt werden. Die Motivation der Schüler dürfte durch das Erleben der Praxis stark steigen. Wann der Besuch erfolgen kann, ist mit der regionalen Innung des Kfz-Gewerbes oder direkt mit geeigneten Autohäusern abzusprechen. Vom Einsatz der Folien her ergibt sich kein bestimmter Zeitpunkt, an dem er vorzugsweise stattfinden sollte, denn diese sind für den Einsatz an jeweils passender Stelle während der gesamten Schuljahre 8–10 konzipiert.

Für den Besuch eines Kfz-Betriebes bzw. von Autohäusern während der Klasse 9 (2. Halbjahr) spricht, dass in dieser Phase sicherlich ein Schwerpunkt für den Einsatz der Folien liegt. In dieser Jahrgangsstufe werden in vielen Bundesländern gemäß Richtlinien die Themen der Mechanik behandelt, die auf den Folien „Physik am Auto“ umfangreich berücksichtigt sind. Ein freundschaftlicher Kontakt zu Innungen des Kfz-Gewerbes bzw. Autohäusern der Umgebung sollte aus einem anderen, bereits mehrfach erwähnten Grund frühzeitig aufgebaut werden: Der interessierte Kollege kann so an einige nützliche Demonstrationsobjekte für

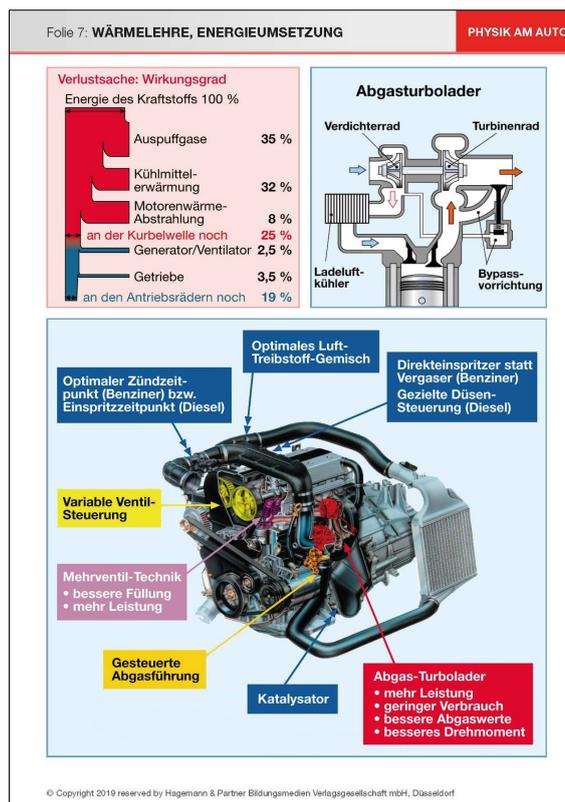
die Physiksammlung kommen, die von den Autohäusern gewiss gerne zur Verfügung gestellt werden, weil sie dort schon im Entsorgungscontainer lagen.

Eine Auswertung nach dem Betriebsbesuch kann mithilfe des Formblattes in der **Kopiervorlage** auf vielfältige Weise geschehen. Wenn von einzelnen Schülern oder Schülergruppen verschiedene Kfz-Betriebe besucht worden sind, kann eine Auswertung daraufhin erfolgen, ob die Größe oder die schwerpunktmäßige Ausrichtung des Betriebes signifikant unterschiedliche Erfahrungen mit sich gebracht haben.

Die auf dem Arbeitsblatt aufgeführten Fragen wurden in einem Test verschiedenen Autohäusern vorgelegt, sodass sie nicht zu Unmut bei den besuchten Betrieben führen. Es wird nicht nach betriebsinternen Dingen wie etwa der Anzahl der verkauften Fahrzeuge, dem Jahresumsatz o.Ä. gefragt, sondern nur nach offensichtlichen Daten wie Größe, Alter und Tätigkeitsfeldern des Betriebes. Da die Schülerinnen und Schüler und nicht die Mitarbeiter die Kopiervorlage ausfüllen sollen, hatten die befragten Firmen keine Bedenken. Ferner wurden Fragen aufgenommen, die die Jugendlichen ganz beiläufig zur Reflexion über ihre eigenen Zukunftsperspektiven und Berufswünsche anregen sollen – was natürlich noch durch den Lehrer verstärkt werden kann. Aus diesem Grund wird an den Gesprächspartner die Frage gestellt, welche Ausbildung für seine jetzige Position im Betrieb erforderlich ist. Die Schüler sollen hierdurch – ohne erhobenen Zeigefinger – feststellen, wie wichtig eine solide abgeschlossene Ausbildung ist. Schüler, denen der Betriebsbesuch besonders gut gefallen hat bzw. die durch den Besuch zu einem Betriebspraktikum angeregt wurden, können sich an die Innung des Kfz-Gewerbes wenden. Diese vermittelt Praktikumsstellen an Schüler.

Die Frage nach einem früheren anderweitigen Arbeitseinsatz hat einen ähnlichen Hintergrund: Aus den verschiedenen Antworten lässt sich schließen, wie wichtig eine qualifizierte Ausbildung und Weiterbildung ist. Stellt sich bei der Dauer der Betriebszugehörigkeit heraus, dass diese oftmals kürzer als erwartet ist, erfahren die Schülerinnen und Schüler, wie nötig Flexibilität im späteren Arbeitsleben ist. Der Umfang der Auswertung im Unterricht liegt ganz beim Lehrer. Er kann auch nur einen Teil der Fragen aus dem Formblatt ausfüllen lassen. Ebenfalls denkbar ist für die Auswertung eine fächerübergreifende Zusammenarbeit mit gesellschaftswissenschaftlichen Fächern oder dem Deutschunterricht.

Optimierung von Verbrennungsmotoren II



Inhalt

Oben links: Die Grafik zeigt, wie viel von der eingesetzten Primärenergie beim Betrieb eines herkömmlichen Autos „verloren“ geht, bzw. wie wenig für den eigentlichen Zweck, nämlich den Transport von Personen und/oder Lasten, übrigbleibt. Der geringe Wirkungsgrad fordert geradezu eine Verbesserung durch technische Fortentwicklung.

Unten: Die Darstellung zeigt wichtige Merkmale der Motorkonstruktion und des elektronischen Motormanagements. Man beachte, dass sich nicht alle Elemente der Motorenkonstruktion zugleich an einem Motor finden lassen.

Oben rechts: Das Schema zeigt das wohl bekannteste Beispiel der Motorelemente, den **Abgas-Turbolader**. Er hat die Aufgabe, die Füllung des Motors entscheidend zu verbessern. Einer seiner Vorteile ist, dass zu seinem Antrieb keine weitere Motorleistung aufgebracht werden muss, sondern er durch die an seinem Turbinenrad vorbeistreichenden Abgase angetrieben wird. Die Welle im Innern des Turboladers wird durch die Abgase in schnelle Drehung versetzt. Auf derselben Welle sitzt ein zweites Schaufelrad, mit dessen Hilfe die Außenluft angesaugt und verdichtet wird, das sogenannte „Verdichterrad“. Ein prinzipieller Nachteil dieses Systems wird durch eine Zusatzkonstruktion vermieden: Wenn der Abgas-Turbolader so ausgelegt würde, dass er im oberen Drehzahlbereich (Volllast) die richtige Luftmenge förderte, lieferte er bei unteren und mittleren Drehzahlen zu wenig. Legte man ihn so aus, dass er schon im letztgenannten Bereich richtig förderte, würde er im oberen Drehzahlbereich zu viel Luft bringen. Daher wählt man folgendes Bauprinzip: Der Lader wird dafür ausgelegt, schon im unteren und mitt-

leren Bereich optimal zu arbeiten. Steigt dann die Drehzahl und damit der Druck hinter dem Verdichterrad, öffnet der anwachsende Druck über ein „Ladedruckregelventil“ eine „Bypass-Leitung“, wodurch ein immer größerer Teil der Abgase an der Turbine vorbeiströmen kann. Durch diese Bauweise steigt die Förderleistung des Laders beim Hochdrehen des Motors schnell auf einen Nennwert an, der bei weiterer Drehzahlsteigerung nicht mehr überschritten wird.

Für einen relativ geringen Mehraufwand bietet der Abgasturbolader:

- mehr Motorleistung bei gleichem Verbrauch, bzw.
- weniger Verbrauch bei gleicher Motorleistung,
- bessere Abgaswerte,
- bessere Kraftentfaltung des Motors auch bei unteren und mittleren Drehzahlen.

Eine weitergehende Erklärung aller Elemente der Motorkonstruktion würde den Rahmen dieser Lehrerinformation sprengen.

In einer kurzen Übersicht sei jedoch die Fülle der technischen Weiterentwicklungen angedeutet:

- Elektronisches Motormanagement:
- elektronische Steuerung über **Stellglieder (Aktoren)**: von Kraftstoffzufuhr über elektrische Kraftstoffpumpen; Zündzeitpunkt (Ottomotor) bzw. Einspritzbeginn (Dieselmotor), Einspritzmenge und -dauer, Drosselklappenverstellung, Füllung der Zylinder bei Leerlauf und unter Last, Tankentlüftung, Abgasrückführung, Sekundärluft einblasung etc. soweit vorhanden. Dazu werden mittels zahlreicher Sensoren Daten abgefragt über Drehzahl, Kurbelwellenstellung, Nockenwellenstellung, Motorklopfen, Ansaugluftmenge und -temperatur, Motortemperatur, Kühlmitteltemperatur, Fahrpedalstellung, Drosselklappenstellung, Fahrgeschwindigkeit, Abgaszusammensetzung (Signal der Lambda-Sonde), (Temperatur der Abgasrückführung etc. soweit vorhanden).
- Einsatz eines Katalysators
- Verwendung von Kraftstoffeinspritzung auch beim Ottomotor (statt Vergaser)
- Verwendung neuartiger Einspritzsysteme beim Dieselmotor, welche zusammen mit elektronischer Regelung eine optimale, unabhängige Steuerung von Einspritzmenge, -beginn und -dauer ermöglichen:
 - **Common-Rail-Technik** (= Nutzung einer gemeinsamen, länglichen Kammer, die mit Kraftstoff unter hohem Druck - bis zu 2500 bar - gefüllt ist, für alle Zylinder; aus dieser wird der Einspritzvorgang für die Einzelzylinder über Magnetventile individuell eingeleitet und elektronisch gesteuert.)
 - **Pumpe-Düse-Technik** (je eine Einspritzpumpe für jeden Zylinder), die jeweils über die Nockenwelle angetrieben wird; der Einspritzvorgang, der unter einem sehr hohen Druck stattfindet - **bis zu etwa 2 300 bar** -, kann auch hier für jeden Zylinder zeitlich individuell eingeleitet und in der Menge gesteuert werden.)
 - Verwendung der **„Mehrventiltechnik“** (= mehr als nur je ein Einlass- und ein Auslassventil pro Zylinder, welche als Minimum für die Funktion eines Otto- oder Dieselmotors

erforderlich sind)

- Einsatz von variablen Ventilsteuerzeiten

Zu den Kopiervorlagen: Den Schülern wird im oberen Teil mit einem **Kennfeldvergleich** exemplarisch vor Augen geführt, wie viel differenzierter die **Motorelektronik** gegenüber einer herkömmlichen **Mechanik** auf abgefragte Parameter reagieren kann. Im unteren Teil soll den Schülern klar werden, dass es sich bei dem oben vorgestellten Kennfeldbeispiel tatsächlich nur um eines von vielen handelt. Deshalb werden einige der **Abfrageparameter** einer modernen Motorelektronik vorgestellt. Ohne die Funktion eines jeden der genannten Sensoren bzw. Aktoren detailliert zu kennen, sollten die Schülerinnen und Schüler in der Lage sein, an der Namensgebung der Bauteile ihre Funktion als „Sensor“ oder „Aktor“ zu identifizieren.

Lernziele:

Die Schüler sollen eine Vorstellung davon bekommen, wie sehr die Motorelektronik nahezu alle Abläufe im Motor steuert und regelt, und zumindest diesen Sachverhalt mit eigenen Worten beschreiben können. Nicht vorgesehen ist, dass die Schüler über die zahlreichen genannten Bauteile detaillierte Funktionskenntnisse aufweisen. Allerdings ist der Auftrag, hier noch ein wenig „tiefer zu schürfen“ und etwas mehr über die Aufgaben der erwähnten Bauteile zu verraten, sicherlich ein lohnenswertes Referatthema für einen interessierten Schüler!

Elemente des Motorenbaus

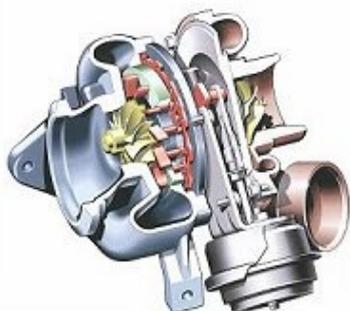
Dieses Schnittbild stellt eine Weiterentwicklung auf dem Gebiet der Turbolader vor. Schon beim „normalen“ Turbolader ergibt sich das Problem, dass folgende Bedingungen gleichzeitig erfüllt werden müssen: Einerseits soll schon bei niedriger Drehzahl genügend Ladeluftdruck aufgebaut werden, andererseits darf aber bei höher werdenden Drehzahlen dieser Ladeluftdruck nicht beliebig anwachsen. Zur Erfüllung dieser sich widersprechenden Forderungen wird beim „normalen“ Turbolader eine Ladedruckregelung durch den sogenannten Bypass und ein Ladedruckregelventil eingesetzt.

Eine andere technische Lösungsmöglichkeit dieses Problems zeigt das Bild des Abgas-Turboladers mit **„variabler Turbinengeometrie“**. Hier sind zusätzlich **verstellbare „Leitschaufeln“** unmittelbar vor dem Eintritt der Abgase in die Schaufeln der Abgasturbine angebracht. Die Verstellung erfolgt durch eine „Unterdruckdose“

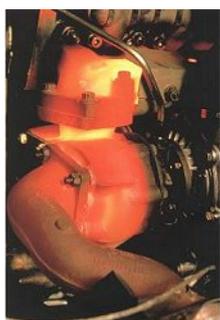
Wirkungsweise

Wenn die Motordrehzahl **niedrig** ist, werden die Schaufeln so gestellt, dass der Abgasstrom durch sie verengt wird. Dadurch erhöht sich in der verbleibenden Strömung die Geschwindigkeit der Abgase. Der Abgasstrom wird dabei so gelenkt, dass er die Turbinenschaufeln weiter außen trifft. Nach dem Hebelgesetz bewirkt dies ein höheres Drehmoment; die Turbine arbeitet in diesem Zustand also besonders effektiv. Ist die Motordrehzahl **hoch**, wird der Eintrittsquerschnitt der Abgase in die Turbine vergrößert. Dadurch sinkt die mittlere Geschwindigkeit der Gasteilchen. Sie treffen die Turbinenschaufeln nicht mehr vorzugsweise am Außenrand, sondern auf deren volle Länge verteilt. Die Turbi-

nenleistung arbeitet jetzt ineffektiver. Dies ist aber beabsichtigt, da jetzt ja vom Motor viel mehr Abgase entlassen werden, ohne dass der Ladedruck steigen soll. Verstellt man trotz hochdrehenden Motors die Leitschaufeln in die Stellung für niedrige Drehzahlen, so erhöht sich die Turbinenleistung deutlich. Diese Verengung des Abgasstromes kann kurzfristig sinnvoll sein, wenn z. B. für einen Überholvorgang am Berg maximale Leistung erforderlich ist (sogenannter „Overboost“). Dieser Fahrerwunsch wird automatisch durch den „Kickdown“ des Gaspedals möglich. Ein solcher Turbolader ermöglicht optimalen Ladeluftdruck für die verschiedensten Betriebszustände. Die Regelung durch einen Bypass ist nicht nötig.



Welchen thermischen Belastungen das Material des Abgas-Turboladers ausgesetzt ist, dokumentiert dieses Foto eines rotglühenden Turboladers unter Volllast (siehe unten). Die Abgase eines Ottomotors sind bis zu 1000 °C heiß. Selbst bei einem Dieselmotor können durchaus noch 800 °C erreicht werden. Es ist dennoch nicht üblich, den Turbolader in das Kühlsystem des Fahrzeugs einzubeziehen. Man kühlt den Lader zwangsläufig etwas, indem seine Lager mit in das Schmiersystem des Motorölkreislaufs einbezogen sind. Der Fahrer eines Autos mit Turbolader muss dies bei der Wahl seines Motoröls bedenken, da solche Fahrzeuge strengere Anforderungen an die Ölqualität stellen.



Rußfilter

Schon ein „normaler“ Dieselmotor hat prinzipbedingte Vorteile hinsichtlich der Kraftstoffausnutzung gegenüber einem Ottomotor. Er produziert daher auch weniger der schädlichen „Treibhausgase“. Moderne Dieselmotorenkonstruktionen mit z. B. Common-Rail-Technik erzeugen gegenüber einem konventionellen Dieselmotor noch weniger Schadstoffe: sie geben rund 20 % weniger CO₂, 40 % weniger CO, 50 % weniger Kohlenwasserstoffe und 60 % weniger Rußpartikel in die Umgebung ab. Diese Partikel sind es aber, die den Dieselmotor unbeliebt machen. Wer hat sich nicht schon über

einen schlecht eingestellten LKW geärgert, der mit Vollgas den Berg hinauffährt und dabei dicke schwarze Qualmwolken aus dem Auspuff entlässt? Diese Rußpartikel sind es auch, die als krebserregend gelten. Beim Benzinmotor treten sie nicht in vergleichbarer Form auf. Man schafft hier Abhilfe durch den Einbau von Dieselfußfiltern. Die Partikel werden während des normalen Fahrbetriebs in einem speziellen Partikelfilter gesammelt und treten nicht in die Umwelt aus. Damit dieser Filter nicht nach einiger Zeit voll ist, werden die im Filter abgelagerten Rußpartikel in bestimmten Abständen verbrannt (etwa alle 400 bis 500 km Fahrstrecke). Dieser Verbrennungsprozess wird durch einen Drucksensor ausgelöst, der den Füllgrad des Filters registriert. Bisher erfolgte die Verbrennung im Filterelement, z. B. durch elektrische Beheizung. Eine Neuentwicklung von Rußfiltern (Peugeot) nutzt die Möglichkeiten der Common-Rail-Technik des eingebauten Dieselmotors. Für die Verbrennung der Rußpartikel benötigt man Temperaturen von ca. 550 °C. Solche Verbrennungsbedingungen werden durch drei Maßnahmen erreicht:

1. Bei der Common-Rail-Technik sind im Ablauf der Einspritzvorgänge Spritzbeginn, -menge und -dauer elektronisch individuell beeinflussbar. Es ist daher möglich, zusätzlich während des laufenden Arbeitstaktes nochmals eine gewisse Kraftstoffmenge in jeden Zylinder einzuspritzen. Durch diese sogenannte Nachverbrennung im Zylinder, erhöht sich die Abgastemperatur um 200 bis 250 °C.
2. Eine weitere Temperaturerhöhung erzielt man durch eine „**Nachverbrennung im Oxidationskatalysator**“. Dieser ist als Vorkatalysator direkt mit dem Filterelement zusammengebaut. Die in seinem Innern ablaufende Eliminierung der bis dorthin noch unverbrannten Kohlenwasserstoffe erhöht die Temperatur um weitere 100 °C. Beide Maßnahmen zusammen angewandt führen zu einer vorübergehenden **Erhöhung der Abgastemperaturen im Filter auf über 450 °C**. Der Vorgang spielt sich vom Fahrer unbemerkt ab und dauert 2-3 Minuten.
3. Damit schon diese Temperatur von 450 °C für die Verbrennung der Partikel ausreicht, wird dem Kraftstoff permanent ein spezieller **Cerin-Zusatz** in organischer Lösung beigemischt. Dieser zusätzliche Betriebsstoff des Fahrzeugs befindet sich in einem Zusatztank, der unmittelbar neben dem normalen Dieseltank angeordnet ist. Das Cerin-Additiv wird proportional zur jeweils getankten Kraftstoffmenge automatisch dem Dieselfuelstoff zugesetzt. Die Mengenverhältnisse sind 37,5 ml Additivlösung (darin sind 1,9 g Cerin enthalten) auf 60 l Diesel. In zahlreichen Versuchen wurde nachgewiesen, dass diese Chemikalie weder gesundheits- noch umweltschädlich ist, sie wurde vom deutschen und französischen Umweltministerium zugelassen und ist EU-weit freigegeben. In dem Additiv-Tank befindet sich eine Menge von 5 Liter Cerin-Zusatz, der für eine Fahrstrecke von 80 000 km ausreicht. Nach dieser Laufzeit muss der Filter eine Hochdruckreinigung beim Händler erhalten, wodurch die Cerin-Ablagerungen beseitigt werden. Bei dieser Gelegenheit wird der Zusatztank für die nächsten 80 000 km erneut befüllt.

Mehrventiltechnik

Bei einfachen konventionellen Motoren werden pro Zylinder zwei Ventile eingebaut, je ein Einlass- und ein Auslassventil. Bei der dargestellten Anordnung werden diese beiden Ventile durch eine darüber liegende Nockenwelle („hängende Ventile“ mit „obenliegender Nockenwelle“) gesteuert. Dies stellt schon seit Jahren die Standardanordnung im Fahrzeugbau dar. Motoren mit „stehenden Ventilen“, Stößelstangen und „untenliegender“ Nockenwelle werden heute nur noch für sehr einfache Anwendungen hergestellt, z.B. für Rasenmäher (durch die Bezeichnungen „oben“ und „unten“ dort allerdings nicht verwirren lassen, beim Rasenmäherbeispiel liegt der Motor horizontal!). Die englische Bezeichnung für „obenliegende Nockenwelle“ ist oft als Abkürzung OHC zu finden, das bedeutet „Over Head Camshaft“.

Möglichkeiten der Optimierung:

1. Da ein rundlicher Hohlraum für den Verbrennungsvorgang optimal ist, kommt dieser Forderung die dargestellte Anordnung mit den hängenden Ventilen sehr entgegen.
2. Bei mehr als zwei Ventilen pro Zylinder kann die Brennraumgestaltung und die Zylinderfüllung zusätzlich verbessert werden: Mehr Einlassventile bewirken **größere Öffnungsquerschnitte** und damit einen **höheren Liefergrad**. Ferner lässt sich die Temperatur in der Umgebung der thermisch besonders beanspruchten Auslassventile senken, wenn **zwei** Auslassventile verwendet werden.
3. Ein weiterer Vorteil zeigt sich, wenn man bedenkt, dass Ventile hin- und hergehende Massen sind. Lassen sich solche Massen verringern, lässt sich die Drehzahlfestigkeit eines Motors steigern. Wenn mehrere kleinere Ventile die Funktion erfüllen, kann der „Ventilhub“ (die Weite der Hin- und Her-Bewegung) sowie die Masse eines einzelnen Ventils verringert werden. Daher ist ein Mehrventilmotor **drehzahlfester**. Diese Vorteile bedeuten natürlich deutlich mehr konstruktiven Aufwand bei der Ventilsteuerung und dem Aufbau der Zylinderköpfe.

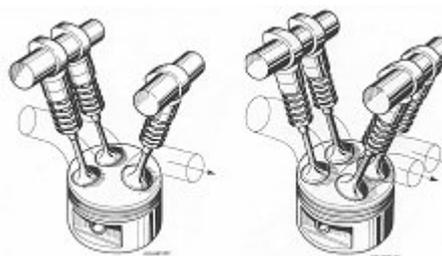
Variable Ventilsteuerung

Vor allem bei hochdrehenden Ottomotoren lässt sich die Forderung nach geringen Abgasemissionen und niedrigem Verbrauch sowohl bei hohen Drehzahlen (im maximalen Leistungsbereich) als auch bei mittleren Drehzahlen (im Bereich des besten Drehmomentes) und schließlich noch bei niedrigen Drehzahlen nur erfüllen, wenn die **Steuerzeiten** der Ventile **nicht immer gleich** sind. (Zur Ventilsteuerung vgl. die Steuerdiagramme („Kreisdiagramme“) auf der Folienabbildung, dort sind die üblichen Öffnungs- und Schließzeiten der Einlass- und Auslassventile in zeitlicher Folge dargestellt.) Es gibt mehrere technische Möglichkeiten für variable Ventilsteuerzeiten, von denen hier vier vorgestellt werden sollen. Diese beeinflussen Öffnungszeit und/oder Öffnungsbeginn der Ventile.

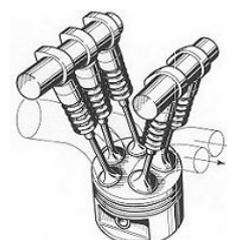


Zu Bild 1 und Bild 2: (häufigste Variante):

1. Man verdreht die **Nockenwelle** bei Bedarf um ihre Längsachse. Die Auswirkung auf die Ventilsteuerung ist: Da die Nocken**form** nicht verändert wird, wird die eigentliche **Öffnungszeit** des Ventils **nicht verändert**. Man verändert aber den **Öffnungsbeginn** in Richtung früher oder später.



2. Von Fiat wird eine Lösung vorgestellt, bei der die Nockenwelle in Längsrichtung verschoben werden kann. Die einzelnen Nocken haben ein besonderes Profil. Dies bewirkt, dass die Wirkung des ablaufenden Nockens auf das zugehörige Ventil nicht immer gleichartig ist. Je nach Verschiebung der Nockenwelle in Längsrichtung sind somit stufenlose Änderungen in Steuerzeit und Ventilhub möglich. Im Steuerdiagramm wird klar: Sowohl die **Öffnungszeit** eines Ventils wird stufenlos **variabel** als auch der **Öffnungsbeginn**.
3. Die Entwicklung schnell schaltender elektromagnetischer Ventile für die Einspritztechnik beim Common-Rail-Dieselmotor ermöglicht, dass die Nockenwelle nicht verändert wird, dafür aber die Länge der Ventilstößel. Da die Magnetventile sehr schnell schalten können, kann man mit dieser Technik das Verhalten des Ventils hinsichtlich **Öffnungszeit** und **Öffnungsbeginn** gezielt und stufenlos verändern.



4. Bei dieser technischen Lösung von Honda hat die Nockenwelle zur Steuerung der Ventile jeweils nicht nur ein Nockenprofil, sondern **zwei**. Eines davon ist für hohe, eines für niedrige Dreh-

zahlen zuständig. Die zugehörige elektro-mechanische Steuerung sorgt für die Auswahl des „richtigen“ Profils, das dann für die Ventilsteuerung herangezogen wird, während das andere jeweils bedeutungslos ist. Mit dieser Technik können **Öffnungszeit** und **-beginn** in zwei Stufen variiert werden.

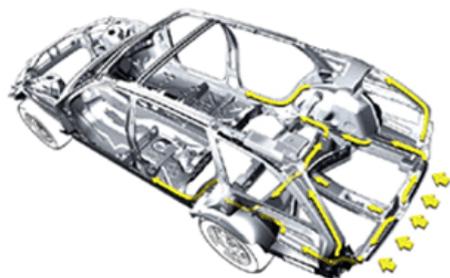
Energieaufnahme durch gezielte Karosserie- verformung

In den Bildern und Texten dieser Website tauchte dieses Thema bisher nicht auf, weil Formeln zu konkreten Rechenaufgaben in der Sekundarstufe I nicht vorgesehen sind. Erst einige Wochen nach Beginn der Sekundarstufe II wird im Fach Physik der Begriff „kinetische Energie“ soweit mit Hintergrundwissen untermauert, dass auch quantitative Aufgaben zu Autothemen (Energieumwandlung bei einem Aufprall etc.) möglich erscheinen.

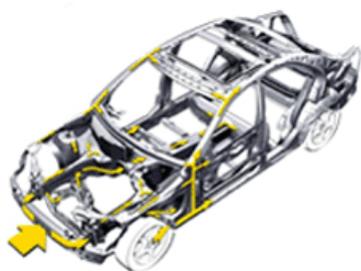
Der grundsätzliche Effekt der Energieumwandlung kann in der Sekundarstufe I angesprochen werden, auch wenn es bei einer Darstellung der Tatsachen und bei qualitativen Betrachtungen bleiben muss.

Wie die Verwandlung der beim Aufprall entstehenden kinetischen Energie in Verformung gezielt abläuft, kann man den hier gezeigten Bildern entnehmen.

Die folgenden Bilder zeigen an zwei verschiedenen Karosserietypen (gelbe Kraftpfeile beachten!), wie die auftretenden Kräfte bei einem **Frontalaufprall** gezielt auf die festeren Teile der Karosserie gelenkt werden, die für eine solche Kräfteaufnahme vorgesehen sind.



Kraftverteilung bei einer Karosserie der Mercedes A-Klasse



Kraftverteilung bei einer Karosserie der Mercedes C-Klasse

Im unteren Bild wird das Gleiche für einen **Seitenaufprall** gezeigt. Die eigentliche Fahrgastzelle soll sich dabei möglichst wenig verformen. Die Hauptrolle bei der ablaufenden Energieumwandlung müssen die Träger übernehmen. Diese allerdings verformen sich sehr und verwandeln dabei kinetische Energie in „Verformungs-

energie“ (ein nicht ganz physikalischer Begriff!), d. h. letztendlich in Wärme. Eine solche gezielte Verformung eines Trägerelements sieht man in der Abbildung unten. Man sollte sich überlegen, wie viele kräftige Schläge mit einem Vorschlaghammer erforderlich wären, um die gleiche Verformung durch Menschenhand zu erzeugen. So gewinnt man eine Vorstellung davon, welche Kräfte und Energien bei einem Aufprall wirken.



seitliche Kraftverteilung, Mercedes C-Klasse



Einspritztechniken

Bei der technischen Realisierung unterscheiden sich die Ablaufphasen bei Dieselmotoren und direkt-einspritzenden Benzinmotoren (jeweils mit Common-Rail-System) nur noch in Details. Dies ist die Folge speziell entwickelter Bauteile und deren Einsatzmöglichkeiten.

Ein kurzer Rückblick: Früher bestimmte beim Dieselmotor die Einspritzpumpe selbst den **Einspritzbeginn** (= Zündzeitpunkt). Im Inneren der Einspritzpumpe befindet sich der „Spritzversteller“. Mit diesem kann der Aufbau des Hochdrucks etwas vor- oder nachverlegt werden. Da ein Einspritzventil alter Art bei einem bestimmten Druck in der angeschlossenen Hochdruckleitung von selbst mit dem Einspritzen beginnt, konnte auf diese Weise der Einspritzbeginn direkt von der Einspritzpumpe bestimmt werden.

Auch die Menge des eingespritzten Kraftstoffs wurde von der Einspritzpumpe direkt zugemessen. Man veränderte die Menge, indem man den Aufbau des Hochdrucks nach kürzerer oder längerer Zeit stoppte. Eine entsprechende Kraftstoffmenge gelangte daher fein verteilt über die Einspritzdüse in den Zylinder. Bei einem Dieselmotor bestimmte man auf diese Weise von jeher die aktuelle Leistung des Motors über die Menge des eingespritzten Kraftstoffs. Im Ansaugluftkanal befinden sich bei einem Diesel (anders als beim herkömmlichen Ottomotor, siehe weiter unten) keinerlei Drossелеlemente zur Leistungsbeeinflussung.

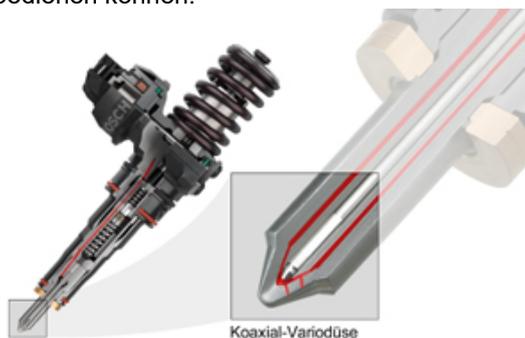
Steigende Anforderungen an die Schadstoffarmut der Abgase machten eine wichtige Änderung erforderlich. Dabei ergaben sich zugleich die willkommenen Nebeneffekte der besseren Kraftstoffausnutzung, Geräuschverminderung u.v.m. Die Aufgaben der Hochdruc-

ckerzeugung und der exakten Steuerung von Einspritzbeginn und -dauer wurden aufgeteilt. Die Aufgabe der Hochdruckerzeugung übernimmt nun eine separate Hochdruckpumpe. Der über einen längeren Zeitraum zur Verfügung stehende Hochdruck wird dann von der elektronisch gesteuerten Einspritzdüse zu einer variantenreichen Einspritzung genutzt, wobei sich ganz gezielt und individuell Beginn und Menge bestimmen lassen. Auch sind mehrere Einspritzungen nacheinander möglich.

Es existieren zwei Systeme:

Jede Einspritzdüse kann eine eigene Hochdruckpumpe haben, die mit dieser oft als kompakte Einheit zusammengebaut ist (Pumpe-Düse-System, Unit Injector System). Der Antrieb einer Einheit erfolgt direkt von der im Motorblock nahebei liegenden Nockenwelle aus. Dieses Prinzip ist im „Profilager“ des Nutzfahrzeugbaus weit verbreitet und erscheint daher ausgereift und zuverlässig, auch einige PKW-Dieseln benutzen es.

Die zweite Möglichkeit ist die einer gemeinsamen Hochdruckpumpe für alle Einspritzdüsen. Die Pumpe fördert permanent Kraftstoff unter enorm hohem Druck in einen Hohlraum („Common Rail“), aus dem sich dann die Einspritzdüsen elektronisch gesteuert nach Bedarf bedienen können.



Möglichkeit 1



Möglichkeit 2

Die Einspritzdüsen sind bei beiden Systemen für eine elektronische Steuerung ausgelegt. Ihre Nadeln öffnen zwar immer noch einfach dadurch, dass der Druck des Kraftstoffs auf ihre Druckschulter einen bestimmten Wert übersteigt. Aber man erreicht z. B. durch Magnetventile, dass der Kraftstoff (bei extrem kurzen Wegen im Inneren der Düse) ganz präzise zu von der Bordelektronik berechneten Zeitpunkten unter dem

Öffnungsdruck an der Nadelschulter anliegt. Daraufhin öffnet die Nadel und die Düse spritzt ein. Kann dies in hinreichend kurzer Zeit nacheinander ablaufen, eignet sich eine solche Düse für mehrere Einspritzungen während desselben Arbeitstaktes.

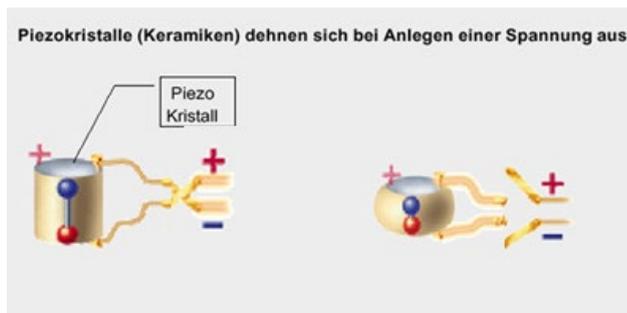
(Mindestens) eine Vor-Einspritzung lässt den Verbrennungsprozess sanfter beginnen, sodass die folgende Haupteinspritzung unter idealeren Bedingungen ablaufen kann. Deutliche Geräuschreduzierung und besseres Abgasverhalten sind die Folgen.

Schon die „klassische“ Bauweise ohne Magnetventile und mit ausschließlicher Steuerung durch die Einspritzpumpe erlaubte eine solche doppelte Einspritzung. Man benutzte besondere Einspritzdüsen mit zweifachen Druckfedern im Inneren. Die Zeitfolge und die Kraftstoffmengenverteilung auf Vor- und Haupteinspritzung lagen jedoch unveränderlich fest. Hinzu kommt: Für besondere Zwecke der Abgasreinigung sind zusätzlich evtl. eine oder mehrere Nach-Einspritzungen erforderlich. (Darüber findet sich an anderer Stelle mehr, vgl. die Abschnitte über den Partikelfilter.) Spätestens hier muss die althergebrachte Einspritzdüse ohne steuernde Zusatzeinrichtungen passen.

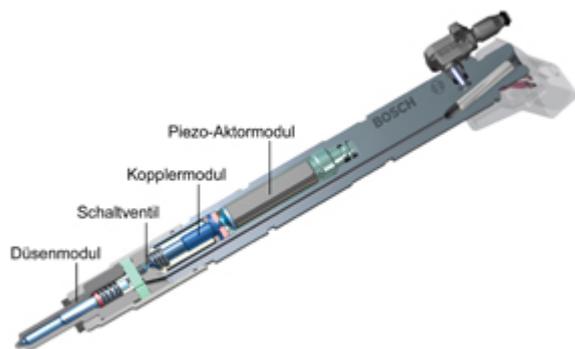
Die übliche Bauform solcher Einspritzdüsen ist die mit magnetischer Ansteuerung. Eine weitere Generation solcher „Injektoren“ arbeitet mit einer piezo-elektrischen Ansteuerung.

Das Prinzip der Piezo-Elektrizität kennt man im Alltag von der etwas höherwertigen Ausführung der Einweg-Feuerzeuge. Diese zünden das austretende Gas nicht mit einem Reibrad und einem Feuerstein, sondern mit einem „Klick“ auf die Zündtaste. Dabei „klickt“ der Benutzer im Inneren auf ein Federelement. Nachdem dessen Vorspannung überwunden ist, schnellt dies mit einiger Kraft auf einen Piezo-Kristall. Dieser reagiert daraufhin mit der Erzeugung einer Hochspannung von einigen Kilovolt. Die Spannung wird geeignet abgegriffen, und der entstehende Funke zündet das Gas. Ähnliche Piezo-Gasanzünder sind in komfortable Gasherde oder Gasheizgeräte eingebaut.

Das gleiche Prinzip benutzten auch die früheren einfachen Tonabnehmer bei Schallplattenspielern. Die Nadel beeinflusste einen Piezo-Kristall mit geringer Kraft, wenn sie der Rillenveränderung auf der Schallplatte folgte. Der Kristall reagierte auf diese geringe Krafteinwirkung mit der Abgabe einer entsprechend geringen elektrischen Spannung. Diese schwankte entsprechend der Vorgabe durch die Rillenform im Rhythmus der aufgezeichneten Musik. Nach entsprechender Verstärkung war daher der Inhalt der Platte zu hören.

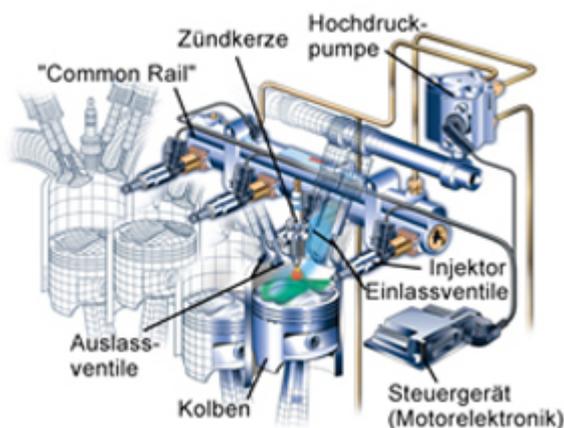


Das Piezo-Prinzip ist umkehrbar. Legt man an einen Piezo-Kristall eine elektrische Spannung an, so reagiert dieser mit einer entsprechenden mechanischen Längenveränderung.



Obwohl diese nicht sehr groß ist, reicht sie für den Zweck der Steuerung eines „Injektors“ aus. Um die Formveränderung bis in den Millimeterbereich zu vergrößern, werden die Piezo-Kristall-Elemente scheibchenweise gestapelt. Andererseits geschieht der Piezo-Effekt rasch und präzise mit An- und Abschalten der Spannung; ein verzögernder magnetischer Hystereseeffekt kann sich prinzipiell nicht einstellen, was für eine schnelle Steuerung der Düsen besonders wichtig ist. Eine piezo-gesteuerte Einspritzdüse kann nach Herstellerangaben neben der Haupteinspritzung mehrere Vor- und Nacheinspritzungen ausführen.

Die genannten Bauelemente bieten sich auch zur Verwendung in einem Ottomotor mit direkter Benzineinspritzung in den Brennraum an. Bis auf die Tatsache, dass auch dieser Ottomotor zum Einleiten des Zündvorgangs eine Zündkerze braucht, sind alle anderen vorhin erwähnten Bauelemente des Common-Rail-Systems hier ebenfalls vorhanden. Ein Motor dieser Bauart hat sogar das typische Element der Leistungssteuerung anderer Ottomotoren verloren: Während die Leistung des „normalen“ Ottomotors durch die Drosselklappe im Ansaugweg bestimmt wird, mit der man die angesaugte Luftmenge beeinflusst, kann der direkteinspritzende Ottomotor wie ein Diesel ohne „störende Hindernisse“ im Ansaugtrakt über die eingespritzte Kraftstoffmenge gesteuert werden.



Bei den Einspritzdüsen solcher Otto- und auch Dieselmotoren gibt es Ausführungen mit magnetischer Steuerung (z. B. der unten erwähnte VW-Motor) und solche mit Piezo-System (z. B. bei Mercedes). Ein typischer Vertreter dieser Motorengeneration ist beispielsweise der so genannten „FSI-Motor“, der von VW für den Kleinwagen „Lupo“ als Sprit sparende Benzin-Alternative zur Dieselsonne im „3-Liter-Lupo“ (1997-2005) entwickelt wurde.

Hinweis für Lehrer zu den Kopiervorlagen:

Die Kopiervorlagen bieten einen interessanten Einblick in typische Rechenaufgaben in den Kfz-Ausbildungsberufen wie z. B. der oder dem Kfz-Mechatroniker/in. Gleichzeitig bieten sie anwendungsbezogene Aufgaben und damit eine gute Vorbereitung auf die Zentralen Abschlussprüfungen im Fach Mathematik.

Bei der Lösung der Aufgabe 4 zum **Kraftstoffstrom** auf der **Kopiervorlage Einspritzdauer und Kraftstoffstrom durch die Düse** kann zwischen gymnasialen und nicht-gymnasialen Anforderungen differenziert werden.

Katalysator

Thematik

Dieses Kapitel überschreitet die Fächergrenze zur Chemie. Da heute vielfach fächerübergreifende Themen für die Unterrichtspraxis empfohlen werden, bietet sich das Thema Katalysator als ein schönes Beispiel an.

Verbrennung

1. Die Luftzahl λ („Lambda“)

Nach Erkenntnissen der Chemie werden im (unter Idealbedingungen) laufenden Verbrennungsmotor im Verhältnis genau 1 kg Kraftstoff zusammen mit 14,7 kg Luft verbrannt (stöchiometrisch korrektes Kraftstoff-Luftverhältnis). Man beachte besonders auch für die Luft die Angabe in der Masseneinheit kg, also nicht in einer der vielleicht erwarteten Volumeneinheiten „Liter“ oder „m³“. Mit λ bezeichnet man nun das Verhältnis von tatsächlich zugeführter Luftmasse zu der Luftmasse, die entsprechend der momentanen Kraftstoffzufuhr gemäß dem stöchiometrisch korrekten Verhältnis eigentlich zuzuführen wäre:

$$\lambda = \frac{\text{tatsächlich zugeführte Luftmasse}}{\text{theoretisch erforderliche Luftmasse}}$$

Wenn also die „korrekte“ Luftmasse zugeführt wird, hat λ den Wert 1.

Bei einem Überschuss an Kraftstoff (Gemisch „fetter“, tatsächlich zugeführte Luftmasse ist im Verhältnis zur Kraftstoffmenge zu niedrig) ergibt sich demnach ein Wert von $\lambda < 1$.

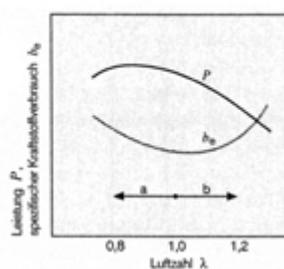
Bei einem Überschuss an Luft (Gemisch „magerer“, tatsächlich zugeführte Luftmasse ist im Verhältnis zur Kraftstoffmenge zu hoch) tritt ein Wert von $\lambda > 1$ auf.

2. Auswirkungen verschiedener λ -Werte

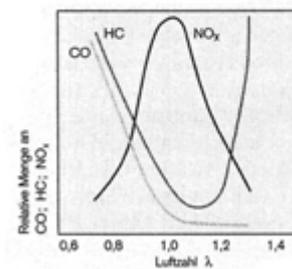
Herkömmliche Ottomotoren ohne Direkteinspritzung erreichen ihre Höchstleistung bei einem leicht zu fetten Gemisch bei λ ca. 0,85–0,95, also bei 5 bis 15 % Luftmangel. Umgekehrt haben sie den geringsten Kraftstoffverbrauch bei λ ca. 1,1–1,2, also bei einem mageren Gemisch von 10 bis 20 % Luftüberschuss (siehe Diagramm).

Das zweite Diagramm zeigt die Schadstoffzusammensetzung im Rohabgas des Motors. Man erkennt, dass im angestrebten Fall „ $\lambda = 1$ “ noch keineswegs alle Schadstoffanteile minimal sind. Aber die für „ $\lambda = 1$ “ vorliegende Zusammensetzung ist genau die für die Nachbereitung mit einem Katalysator erwartete. Nur dann können die angestrebten chemischen Vorgänge im Innern des Katalysators korrekt ablaufen. Wenn also aus den oben erwähnten Gründen (vorübergehende maximale Leistungsanforderung; Wunsch nach besonders sparsamer „magerer“ Motorauslegung) oder während der Aufwärmphase nach dem Kaltstart die Bedingung „ $\lambda = 1$ “ nicht eingehalten werden kann, müssen weitere Maßnahmen rund um den Katalysator getroffen werden. So erfordert beispielsweise ein Motor mit Direkteinspritzung und der Möglichkeit zum sparsamen „Schichtladebetrieb“ im Leerlauf- und Teillastbereich einen speziellen zweiten NO_x-Speicherkatalysator.

Einfluss der Luftzahl λ auf die Leistung P und den spezifischen Kraftstoffverbrauch b_s bei homogener Gemischverteilung



Einfluss der Luftzahl λ auf die Schadstoffzusammensetzung im Rohabgas bei homogener Gemischverteilung



3. Chemische Abläufe im Katalysator

Die hier betrachteten vom Motor produzierten Schadstoffe sind:

- Kohlenwasserstoffe (C_xH_y)
- Kohlenmonoxid (CO)
- Stickoxide (NO_x)

Der Katalysator hilft dazu, diese Bestandteile in die ungiftigen Endprodukte

- Wasserdampf (H₂O)
- Kohlendioxid (CO₂)
- Stickstoff (N₂)

umzuwandeln.

Der Name „Dreivegeekatalysator“ für den inzwischen üblichen Katalysator mit Lambda-Regelung ergibt sich aus seinen drei Aufgabenbereichen:

- aus CO wird durch Oxidation CO₂
- aus HC wird durch Oxidation H₂O und CO₂
- aus NO_x wird durch Reduktion N₂

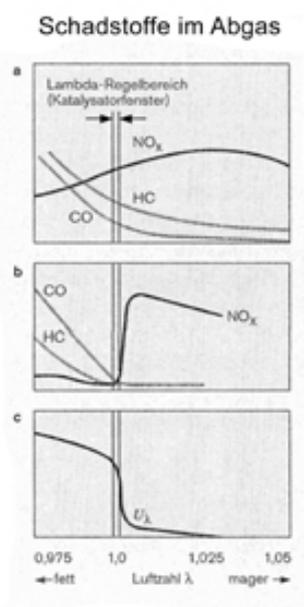
Begriffsbestimmung: Unter Katalysator versteht man in der Physik und Chemie einen Stoff, der chemische Reaktionen ermöglicht oder ihre Geschwindigkeit beeinflusst, ohne selbst verändert zu werden.

Die nun im Innern des Dreivegeekatalysators ablaufenden Reaktionen sind:

Reaktionsgleichungen im Dreivegeekatalysator

- 1) $2 \text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{CO}_2$
- 2) $2 \text{C}_2\text{H}_6 + 7 \text{O}_2 \rightarrow 4 \text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$
- 3) $2 \text{NO} + 2 \text{CO} \rightarrow \text{N}_2 + 2 \text{CO}_2$
- 4) $2 \text{NO}_2 + 2 \text{CO} \rightarrow \text{N}_2 + 2 \text{CO}_2 + \text{O}_2$

Arbeitsweise: (Zitat: aus Bosch, Gelbe Reihe) Schadstoffe im Abgas



4. Betriebsbedingungen, Einbaulage und Aufbau des Katalysators

Betriebsbedingungen:

Die geschilderten Vorgänge beginnen erst ab einer Betriebstemperatur von über 300 °C zu laufen. Die optimale Katalysatortemperatur ist 400-800 °C. Daher ist es wichtig, diese schnell zu erreichen und im Betrieb diesen Bereich auch nach oben nicht zu verlassen, da zu hohe Temperaturen wiederum zu einer vorschnellen Alterung führen. Daher muss in der Warmlaufphase schnell diese optimale Temperatur erreicht werden. Man kann dazu bei herkömmlichen Motoren ohne Direkteinspritzung den Zündwinkel in Richtung „spät“ einstellen sowie die Technik der „Sekundärlufteinblasung“ verwenden. Dabei wird in den Abgaskrümmen „künstlich“ Frischluft zugeführt. Die während der Warmlaufphase hohen Anteile unverbrannten Kraftstoff-Luft-Gemisches im Abgas werden mit diesem zusätzlichen Luftsauerstoff verbrannt und erzeugen eine höhere Temperatur im Abgasstrang. Bei Motoren mit Direkteinspritzung ist eine zweite „Nacheinspritzung“ während des Arbeitstaktes möglich. Dieser Kraftstoff verbrennt sehr spät und heizt ebenfalls die Abgase auf, sodass der Katalysator schnell in den erforderlichen Temperaturbereich kommt.

Einbaulage

Nach der Warmlaufphase soll die Temperatur des Katalysators im Optimalbereich von ca. 400 °C bleiben. Daher ist eine Einbaulage zu weit vom Motor entfernt ungünstig. Der Katalysator sitzt üblicherweise hinter dem Abgaskrümmen in direkter Motornähe.

Der folgende Text sowie die folgenden Grafiken stammen von:

<http://www.kfztech.de/kfztechnik/motor/abgas/katalysator.htm>:

Aufbau von Katalysatoren:

Der Katalysator besteht aus vier Komponenten:

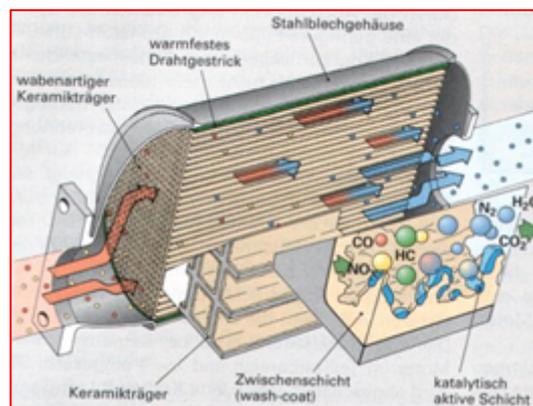
1. dem Träger:

Als Träger werden sogenannte Monolithe (AlMg-Silikat = Keramik) oder Metallträger verwendet. Wichtig ist eine möglichst große Oberfläche, um große Abgasmengen verarbeiten zu können. Der Träger ist mit mehreren tausend Kanälen durchzogen, durch die das Abgas strömt. Um den Strömungswiderstand möglichst klein zu halten, ist der Monolith sehr dünnwandig (ca. 0,3 mm). Da bei Metallträgern die Gefahr des Durchbrennens oder einer mechanischen Beschädigung geringer ist, kann die Wandstärke viel dünner ausgelegt werden (ca. 0,05 mm).

Vorteile des Keramikträgers: bessere Rückgewinnung der Edelmetalle, kostengünstiger, konstantere Betriebstemperatur

Vorteile des Metallträgers: stoßunempfindlicher, hitzebeständiger, schnellere Aufheizzeit, geringerer Abgasgedruck

Der Metallträger Metallit besteht aus sehr dünnen Stahlfolien (0,03-0,08 mm). Er eignet sich für verschiedene Katalysator-Arten.



2. der Zwischenschicht (Wash-Coat oder Träger-schicht):

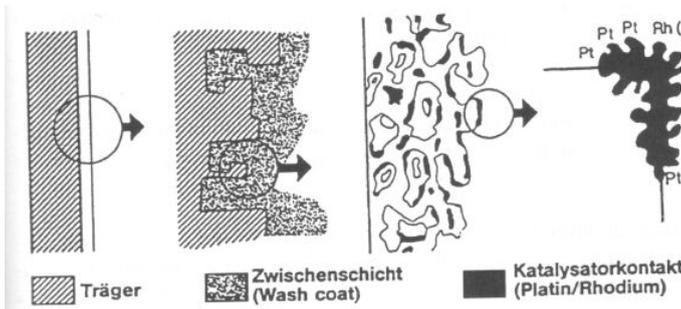
Zur weiteren Vergrößerung der Oberfläche ist der Keramikträger mit einer Schicht aus Aluminiumoxid (Al_2O_3) versehen. Dadurch vergrößert sich die Oberfläche um das 700fache. Die Sauerstoffspeicherfähigkeit wird ebenso erhöht.

3. der katalytisch aktiven Schicht:

Auf die Zwischenschicht wird die aus den Edelmetallen Platin und Rhodium und auch Palladium bestehende katalytisch aktive Schicht aufgedampft. Das Platin begünstigt die Oxidationsvorgänge, das Rhodium die Reduktionsvorgänge. Die Metalle reagieren aber nicht selbst, sie rufen nur die Reaktion hervor. Das Verhältnis Platin zu Rhodium beträgt etwa 5:1. Die Gesamtmenge der beiden Edelmetalle liegt pro Katalysator zwischen 4 und 9 Gramm.

4. dem Gehäuse mit Dämpfung:

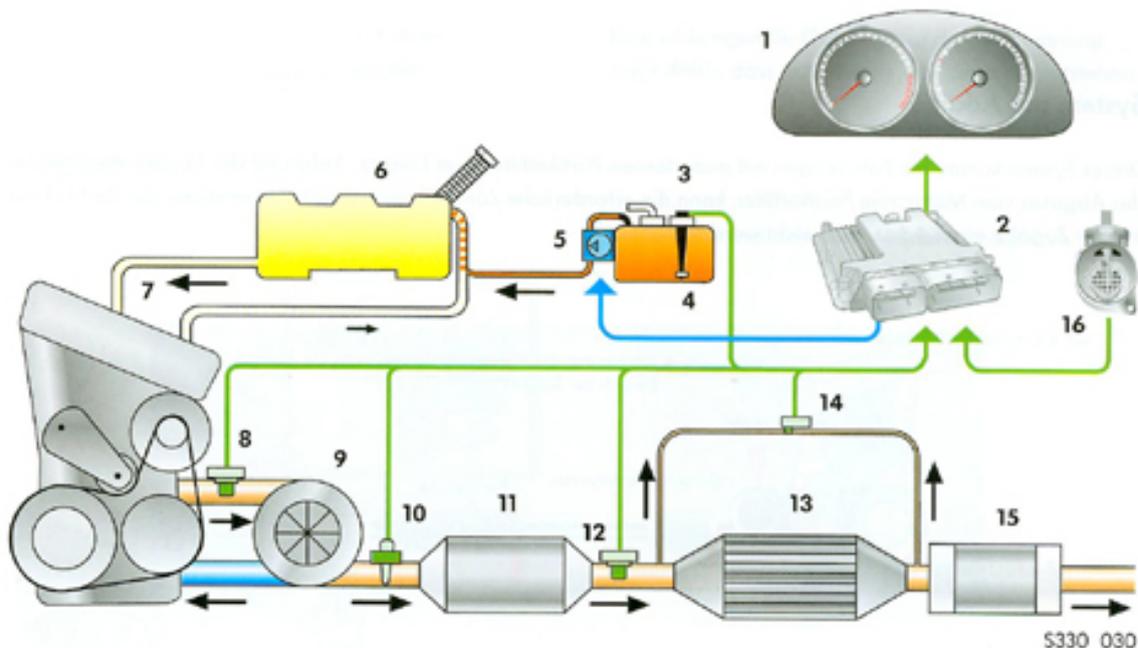
Da der keramische Träger sehr spröde ist und auch eine andere Wärmedehnung als das Gehäuse aufweist, wird er in eine Dämpfungsschicht, ein Drahtgestrick oder eine Keramikfasermatte eingebettet. Metallträger benötigen die Dämpfungsschicht nicht.



Partikelfilter

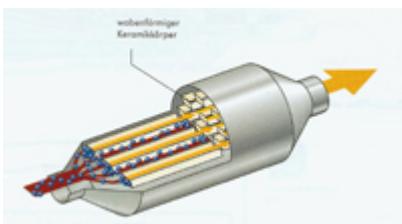
Das unter „Optimierung von Verbrennungsmotoren I“ vorgestellte System der Peugeot-Partikelfilterung (mit der Notwendigkeit einer Additivzugabe zum Kraftstoff, siehe Bild unten) hat inzwischen seine mehrjährige Bewährungsprobe gut bestanden. Gleichzeitig ist die öffentliche Diskussion über schädliche Partikel in Dieselabgasen jetzt besonders aufgeflammt, nachdem die vorgegebenen EU-Grenzwerte in Großstädten ständig überschritten wurden. Zwar hatte die übrige Industrie die Erwartung geäußert, durch Einsatz aufwändiger Motorkonstruktionen die Partikelabgabe auch ohne Filter ausreichend reduzieren zu können. Es zeigte sich aber, dass diese Hoffnung zumindest verfrüht war. Obwohl durch solche Maßnahmen eine bemerkenswerte Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und eine Optimierung der Verbrennungsabläufe im Motor gelangen, wurde eine Reduzierung der Abgaspartikel auf gesundheitsunschädliche Werte ohne Filter nicht erreicht. Interessanterweise konnte zwar die Gesamtmasse aller ausgestoßenen Partikel reduziert werden, aber die Größe eines einzelnen Teilchens war bei den neuen Motoren kleiner als die der Teilchen im altbekannten schwarzen Dieselruß. Solche Feinstpartikel gelten jedoch als nicht minder gesundheits-schädlich.

Es wurden Alternativsysteme neu bzw. weiterentwickelt, die z.T. ohne Zugabe eines Additivs zum Kraftstoff auskommen. Allerdings stellen diese Systeme einen erhöhten Anspruch an den Dieselmotorkraftstoff, der nahezu schwefelfrei (und damit um ca. 3 Cent pro Liter teurer) sein muss, um eine langfristige Betriebssicherheit zu garantieren.



- | | |
|--|--|
| 1. Steuergerät im Schalttafeleinsatz J285 | 9. Turbolader |
| 2. Motorsteuergerät | 10. Lambdasonde G39 |
| 3. Additivtank | 11. Oxidationskatalysator |
| 4. Geber für leeres Kraftstoffadditiv G504 | 12. Temperatursensor vor Partikelfilter G506 |
| 5. Pumpe für Additiv-Partikelfilter V135 | 13. Partikelfilter |
| 6. Kraftstofftank | 14. Drucksensor 1 für Abgas G450 |
| 7. Dieselmotor | 15. Schalldämpfer |
| 8. Temperatursensor vor Turbolader G507 | 16. Luftmassenmesser |

So haben die Verkehrsbetriebe Zürich, die schon 1990 einen Großversuch mit 132 Dieselnbussen mit Partikelfiltern starteten, zuletzt Mercedes-Modelle mit einem „CRT-Partikelfiltersystem“ (CRT = Continuously Regenerating Trap) erfolgreich getestet. Dieses System verbindet die Vorteile des Partikelfilters zugleich mit der Wirkung eines Oxidationskatalysators.



Im Folgenden werden zwei weitere Systeme vorgestellt:

1. Partikelfilterung im VW-Passat

Das System ähnelt dem von Peugeot: Dem Dieseldieselfkraftstoff wird ein Additiv beigegeben. Dieses Additiv befindet sich in einem separaten Behälter in der Nähe des Haupttanks. Die Zumischung erfolgt nach jedem Tankvorgang über eine elektrische Pumpe. Die Fahrzeugelektronik nutzt das Signal vom Geber für den Tankinhalt zu einer Dosierungsberechnung aus; die errechnete Additivmenge wird dann hinzugegeben.

Im Additiv enthaltenes Eisen lagert sich zusammen mit den Rußpartikeln im Filter ab. Wenn dann der Filter durch Verbrennung dieser Ablagerungen regeneriert wird, ist deren Zündtemperatur mithilfe dieser Eisenteilchen so weit abgesenkt, dass eine komplette Verbrennung erfolgt. (Zum Vergleich: Beim Peugeot wird bei gleichem Grundprinzip hierfür die organische Zumischung „Cerin“ benutzt.) Diese Zumischung ist deshalb erforderlich, weil der Partikelfilter im Abgasstrang hinter dem Oxidationskatalysator eingebaut ist und die Temperatur an dieser Stelle dann schon relativ niedrig ist. Bereits direkt hinter dem Motor ist die Abgastemperatur bei einem Dieselmotor mit 250 °C im Leerlauf und 500 – 600 °C bei Vollast deutlich niedriger als bei einem Ottomotor, bei dem die entsprechenden Werte 800 °C und 700 – 1000 °C betragen. In einem weiter hinten liegenden Partikelfilter ist die Temperatur daher ohne weitere Maßnahmen für eine Rußverbrennung viel zu gering.

Die erforderliche Temperaturerhöhung der Abgase wird mithilfe des elektronischen Motormanagements erzielt. Der Regenerationsvorgang geschieht wie folgt:

- a) Die Abgasrückführung wird abgeschaltet, wodurch sich die Verbrennungstemperatur erhöht.
- b) Der Dieselverbrennungsvorgang wird an-

ders als üblich gesteuert: Die Haupteinspritzung geschieht mit verringerter Kraftstoffmenge, etwas später wird ca. 35 ° nach dem oberen Totpunkt des Kolbens eine Nacheinspritzung vorgenommen. Auch hierdurch erhöht sich die Abgastemperatur.

- c) Die Zufuhr der Ansaugluft wird durch eine elektrische Drosselklappe verringert.
- d) Gleichzeitig wird der Ladedruck des Turboladers entsprechend angepasst, damit der Fahrer den ganzen Vorgang nicht durch ein verringertes Drehmoment während des Regenerierens als störende Veränderung empfindet.

Auf diese Weise entsteht im Partikelfilter die zur Rußverbrennung nötige Zündtemperatur von 600–650 °C. Der Vorgang wird von der Fahrzeugelektronik ohne Zutun des Fahrers ausgelöst. Mehrere Auslösebedingungen werden von ihr geprüft. Verwertbare Auslösesignale sind die **Abgastemperatur**, die **Fahrstrecke** und die Tatsache einer **dreimaligen Überschreitung** des Gegendrucks des Filters (in Abständen automatisch gemessen im Leerlauf und mit ausgeschalteter Abgasrückführung). Ein parallel zum Filter eingebauter Sensor misst piezo-elektrisch den Druckunterschied im Abgasstrom vor und hinter dem Partikelfilter. Zusammen mit dem augenblicklichen Signal des Luftmassenmessers der Ansaugluft erkennt die Elektronik dann, ob der Filter zu verstopfen beginnt. Bei Bedarf leitet die Elektronik dann die Regeneration ein. Dies geschieht, unmerklich für den Fahrer, je nach Betriebsbedingungen etwa alle 500–700 km und dauert ca. 5–7 Minuten.

Ein Rest anorganischer Asche aus Ölverbrennungsrückständen und Partikeln aus dem eisenhaltigen zugesetzten Additiv kann nicht verbrannt werden und lagert sich im Filter ab. Die Bordelektronik hält diesen nach statistischer Erfahrung anfallenden „Aschemassewert“ fest, einen Extra-Sensor hierfür gibt es nicht. Nach etwa 120 000 km ist der Filter so weit mit Asche gefüllt, dass er ausgetauscht werden muss. Eine mechanische Reinigung und Aufbereitung – wie etwa beim Peugeot-System – ist aus Kosten- Nutzen-Gründen nicht vorgesehen.

Bei beiden Systemen muss anlässlich dieser Generalüberholung der Anlage die Additivflüssigkeit erneuert werden. Bis dahin reicht die Erstfüllung laut Herstellerangaben aus.

Stand 2019: Der VW Passat ist auch mit Benzinmotoren erhältlich. Das Modell Passat GTE ist ein Plug-In-Hybrid. Der NDR berichtet in einem Beitrag im November 2018, dass die Produktion des VW Passat im VW-Werk Emden bis zum Jahr 2022 auslaufe. Ab 2022 sollen in den VW-Werken in Emden und Hannover nur noch Elektroautos gebaut werden.

2. Partikelfilter des Spezial-Zulieferbetriebs HJS

Das vorgenannte VW-Filtersystem benutzt ein Partikelfilterelement aus Keramik (Siliziumkarbid). Demgegenüber besteht der Filter der Firma HJS aus Sintermetall. Dieses Filtersystem erhielt 2003 den Deutschen Umweltpreis und hat – laut Her-

stellerangaben – u. a. folgende Vorteile:

- Filterwirkung max. 99 %, i. A. stets über 95 %
- optimale An- und Durchströmung
- niedriger Abgasgegendruck
- hohe Speichermöglichkeit für Ascheablagerungen
- modularer, selbsttragender Aufbau (daher einfache Lagerung)
- einfache Anpassung an unterschiedliche Bauraum-Vorgaben
- leicht zu reinigen
- kostengünstiges „Canning“ (Einbau in Gehäuse), auch Ersatz gegen ein eventuell vorhandenes Keramikfilter in einem CRT-System möglich
- einfaches Recycling (Trägermaterial Metall statt Keramik)

Die meisten der genannten Vorteile begründen sich leicht in der Form dieser Filter: Sie haben einen Aufbau aus „Filtertaschen“ aus Sintermetall, anstelle des wabenförmigen Aufbaus der Keramikfilter. Der Regenerationsprozess geschieht auch hier durch Erhöhung der Filtertemperatur über die Zündtemperatur der eingelagerten Rückstände. Sintermetallfilter eignen sich sowohl für derzeitige Additivsysteme als auch für Systeme ohne Additivzugabe. Sie lassen sich zur Regeneration zusätzlich elektrisch beheizen. Dadurch lässt sich theoretisch jede Zündtemperatur der Ablagerungen erreichen. Zusätzlich lässt sich wie beim Additivsystem durch vorübergehende Veränderung der Motorsteuerung während des Abbrandprozesses die Temperatur erhöhen.

Die Bauform (Varianten zeigen die drei untenstehenden Bilder) dieser Filter ermöglicht ferner ein hohes Rückhaltevermögen an unverbrennbaren Ascheresten, was die Wartungsintervalle streckt. Ärgerlich an allen bisherigen Filtersystemen ist, dass die eigentlichen Filter nach Angaben der Fahrzeughersteller beim Einsatz von sogenanntem „Bio-Diesel“ sehr schnell verstopfen. Die Freigabe vieler Serien-Dieselfahrzeuge für Bio-Diesel gilt zurzeit nicht, wenn das Fahrzeug mit einem der vorgestellten Partikelfiltersysteme ausgerüstet ist.

