

PUNKT 2006, Preisträger Kategorie Text/Sparte Magazin
Christopher Schrader: Zündende Ideen, SZ-Wissen 04/2005

Zündende Ideen

Diesel oder Otto: Das Rennen um den ultimativen Motor treibt Fahrzeug-Entwickler zu Höchstleistungen

Hat dieses Taxi keinen vierten Gang? Auf dem Weg durch Wolfsburg schaltet der Fahrer immer direkt vom dritten in den fünften und rollt mit niedriger Drehzahl durch die Stadt. Dann taucht die Straße in einen Tunnel, an dessen Ende der Fahrer nicht zurückschaltet, sondern einfach das Gaspedal durchtritt. Sein Wagen schnurrt die Steigung empor, ein Wagen mit Benzinmotor hätte empört gebrummt oder sogar gebockt, jedenfalls nicht gezogen. „Ist halt ein Diesel“, sagt der Taxifahrer.

Für Wolfgang Steiger, Leiter der Antriebsforschung bei Volkswagen, ist das ein schönes Beispiel für die Inhalte seines Berufs, der ihm auch so etwas wie eine Berufung ist. „Wenn wir wollen, dass die Leute sparsam fahren, müssen wir ihnen Triebwerke anbieten, die das erlauben. Moderne Diesel können es, konventionelle Benziner noch nicht.“ Wer sie flott bewegen will, muss sie auf Umdrehungszahlen um die 4000 pro Minute halten – und dazu ständig schalten. Steiger schwebt ein anderer Fahrstil vor: „Schaltfaul“ soll er sein und eher niedertourig, wie bei dem Taxifahrer. Das verbessert den Verkehrsfluss und senkt den Benzinverbrauch.

Nun weiß Steiger so gut wie jeder andere, dass Autofahren vor allem eine Charakterfrage ist. Mancher braucht das Röhren eines mächtigen Motors, um sich gut zu fühlen. Aber es gibt auch viele Autofahrer, die Steigers Tipps durchaus folgen würden. Bedingung wäre nur, dass sie ihr Auto trotzdem als faszinierende Maschine mit ordentlichem Beschleunigungsvermögen erleben können. Viele von ihnen haben sich in den vergangenen Jahren für einen Diesel entschieden. Die Selbstzünder stellen seit Oktober 2004 sogar die Mehrheit der Neuzulassungen in Westeuropa, denn sie verbrauchen weniger – steuerlich subventionierten – Treibstoff als Benziner und sie pressen ihren Fahrer schon beim leichten Tritt auf das Gaspedal in die Sitze, ohne dass der Motor aufheult.

PUNKT 2006, Preisträger Kategorie Text/Sparte Magazin
Christopher Schrader: Zündende Ideen, SZ-Wissen 04/2005

Um solche Dieselfahrer zurück zu gewinnen und den Benziner-Kunden ein sparsames, gleichwohl flottes Fahren zu ermöglichen, entwickeln Ingenieure wie Steiger neue Triebwerke. Der VW-Forscher hofft, dass seine Kunden sogar ein wenig von der zugrunde liegenden Physik der Motoren begreifen

und bei Tresengesprächen über ihre Boliden nicht mehr mit veralteten technischen PS- und Zylinderzahlen angeben: „Die müssten eigentlich vom Drehmoment sprechen und zum Beispiel sagen: ‚320 Newtonmeter ab 1700 Umdrehungen.‘“

Steiger meint es ernst: „Drehmoment ist das, was die Leute eigentlich wollen, es ist für die Beschleunigung verantwortlich.“ Die Newtonmeter messen das Vermögen eines Autos, seine Kraft auf die Straße zu übertragen. Und ein moderner Turbodiesel entwickelt hohes Drehmoment eben schon bei 2000 Umdrehungen pro Minute, während im Benziner die Nadel des Drehzahlmessers auf 4000 klettern muss.

Die Entwickler von Ottomotoren haben deshalb in den vergangenen Jahren bei ihren Diesel-Kollegen gespickt und kopieren jetzt deren Erfolgsrezepte: Direkt-Einspritzung und Turbo-Aufladung. Noch haben die Firmen ihre Entwicklungsabteilungen für Benziner und Diesel oft in verschiedenen Städten angesiedelt. Doch technisch beginnen die Motoren sich bereits anzunähern. Die Ingenieure opfern viele

der traditionellen Eigenschaften der Benziner und nutzen dabei häufig von Diesel-Kollegen oder Konkurrenten übernommene Ideen.

Seit mehr als hundert Jahren schrauben die Entwickler an den Verbrennungsmotoren herum, die die etwa 800 Millionen zählende Flotte von Autos und Lastwagen auf dem Globus antreiben. Sie müssen keinesfalls fürchten, ihre Jobs zu verlieren: Bis 2030 könnte sich die Zahl der Autos in Deutschland von heute 45 Millionen auf 53 Millionen erhöhen, sieht eine Studie des Mineralölkonzerns Shell voraus. Weltweit dürften nach Verbandsprognosen dann 1,5 Milliarden Fahrzeuge die Straßen verstopfen.

Die ständige Fummelei hat messbare Erfolge: „Es ist nach 100 Jahren Entwicklungszeit immer wieder verblüffend, dass von Motormodell zu Motormodell Verbesserungen im Verbrauch von zehn Prozent

PUNKT 2006, Preisträger Kategorie Text/Sparte Magazin
Christopher Schrader: Zündende Ideen, SZ-Wissen 04/2005

erreicht werden“, sagt Hans Peter Lenz, Professor der Technischen Universität Wien und Organisator des alljährlichen Wiener Motoren-Symposiums, auf dem die Automobilhersteller Ende April ihre neusten Entwicklungen präsentieren. Die Autos kommen im Durchschnitt mit 25 Prozent weniger Kraftstoff aus als 1990, bestätigt Klaus Borgmann, Chef-Motorenentwickler bei BMW. „Und das, obwohl sie schwerer geworden sind, weil zusätzliche Sicherheitsmerkmale Gewicht kosten.“ Auch die Ausstattung geht zu Lasten des Verbrauchs, denn die Energie für Klimaanlage und elektrisch klappbare Außenspiegel kommt aus dem Tank. BMW ist daher stolz darauf, mit der neuen 5er-Reihe die „Gewichtsspirale“ durchbrochen zu haben.

„Wir könnten im Prinzip schon heute jeden Wagen auf Drei-Liter-Auto trimmen“, sagt Wolfgang Steiger. „300 Kilogramm an Gewicht raus, die neuesten Triebwerke, vielleicht ein Elektromotor zur Unterstützung rein. Aber dann kann sich die normale Familie das Auto nicht mehr leisten.“ Bezahlbare Sparmotoren würden noch einige Entwicklungszeit brauchen: „Triebwerke, die 25 Prozent weniger schlucken und die Abgaswerte noch mal um 90 Prozent reduzieren, laufen schon auf den Forschungs-Prüfständen.“

Allerdings nimmt die Komplexität der Aggregate dabei ständig zu und hat inzwischen gewaltige Dimensionen erreicht. Das zeigt sich besonders an der Steuerelektronik, ohne die kein moderner Motor auskommt. Computer unter der Haube regeln alle Details der Arbeit der Maschine: Ventilöffnung, Einspritzung, Zündung, Abgasbehandlung – insgesamt rund 30 Stellgrößen. „Die Leute haben immer so einen Respekt vor Stephen Hawking, dem englischen Kosmologen“, sagt Georg Wachtmeister, Professor für Verbrennungskraftmaschinen an der Technischen Universität München. „Er entwirft elf-dimensionale Räume, um Urknall und Schwarze Löcher zu erklären. Aber ein Motorsteuergerät arbeitet in 30 Dimensionen.“ Und die Ingenieure, die damit umgehen, denken in diesem Universum.

Wie gut das bislang gelungen ist, zeigen die Abgaswerte moderner Autos. Seit Jahresbeginn gilt in Deutschland der Standard Euro-4. Demnach darf ein neues Dieselauto nur ein Prozent der Ruß-Partikel-Werte von 1970 erreichen. Aus den Abgasen von Benzinern sind im gleichen Zeitraum 97 Prozent der Stickoxide, Kohlenwasserstoffe und des Kohlenmonoxids verschwunden. „Wenn man mit einem betriebswarmen Auto mit Ottomotor durch die Stadt fährt, ist das Abgas aus dem Auspuff sauberer als die Luft, die der Motor ansaugt“, sagt Axel Eiser, der bei Audi Sechszylinder entwickelt.

PUNKT 2006, Preisträger Kategorie Text/Sparte Magazin
Christopher Schrader: Zündende Ideen, SZ-Wissen 04/2005

Und schon 2007 sollen in den USA sowie 2010 in Europa mit Euro-5 noch schärfere Richtlinien in Kraft treten. Für Dieselmotoren wird das zum Problem, Benzin-Aggregate schaffen die Limits leicht. „Mit kleinen Weiterentwicklungen unterbieten Ottomotoren auch noch die Grenzwerte des Euro-9-Standards“, sagt Rolf Leonhard vom Zulieferer Bosch.

Genau darin sehen die Entwickler der Benziner ihre Chance. Beim Diesel dürfte die Abgastechnik den ohnehin einige Tausend Euro höheren Preis der Autos noch weiter nach oben treiben. Beim Ottomotor könnte der Verbrauch sinken, ohne dass die Kosten explodieren. Dazu aber müssen die Ingenieure die Arbeitsweise des Triebwerks ändern.

Beide Motortypen teilen den grundsätzlichen Arbeitszyklus (siehe Grafik Seite 21). In den Details aber hat der Diesel zwei Vorteile: Er verdichtet die Luft stärker und besitzt somit einen systematisch höheren Wirkungsgrad. Und er zieht so viel Luft in den Zylinder, wie er kann; in modernen Motoren presst ein Turbolader sogar zusätzliches Gas hinein. Der Benziner hingegen saugt die Luft durch einen Kanal, den die Drosselklappe je nach Stellung des Gaspedals mehr oder minder einengt. Das kostet Energie – umso mehr, je weniger Leistung gerade gefordert wird. In der so genannten Teillast arbeiten Ottomotoren also besonders ineffektiv.

Diese Drosselverluste versuchen die Autokonzerne zu verringern. BMW hat die Drosselklappe praktisch außer Funktion gesetzt und regelt die Luftmenge im Zylinder mit einem Verfahren, das Ventilhub und -öffnungszeit dem Bedarf anpasst. Das Valvetronic genannte System spart nach Firmenangaben etwa zehn Prozent Kraftstoff. Daimler-Chrysler hingegen hat in Wien einen 5,7-Liter-Motor für amerikanische Pick-ups vorgestellt, der vier seiner acht Zylinder abschalten kann. Das verringert den Benzinverbrauch um sieben bis zehn Prozent.

Einen noch größeren Fortschritt versprechen sich die Entwickler von einer Technik, die Dieselmotoren seit jeher beherrschen: Der Kraftstoff wird direkt in den Brennraum eingespritzt. Das ermöglicht einen so genannten Magerbetrieb. In der Kammer ist mehr Luft als nötig, die Drosselklappe muss den Motor nicht so dramatisch am Atmen hindern. Allerdings müssen die Entwickler das verdampfende Benzin

PUNKT 2006, Preisträger Kategorie Text/Sparte Magazin
Christopher Schrader: Zündende Ideen, SZ-Wissen 04/2005

genau steuern, weil sich ein mageres Luft-Kraftstoff-Gemisch nicht in jedem Fall zünden lässt – und das Auto schon wegen gelegentlicher Aussetzer beim Abgastest durchfallen würde.

Doch auch ein Direkteinspritzer, der niemals mager fährt, fordert die Ingenieure heraus: Schließlich müssen sich Benzin und Luft noch vermischen. Die Lösung, auf die der Volkswagen-Konzern setzt, ist ein Luftwirbel im Zylinder, sagt Axel Eiser von Audi. An einem Monitor in seiner Entwicklungsabteilung in Ingolstadt führt er vor, was er meint. Während sich der Kolben noch senkt, spritzt das Benzin als grüner Strahl in die Brennkammer. Die einströmende Luft und der Kolben, der am unteren Totpunkt umkehrt und dann die Füllung verdichtet, zwingen die Treibstoffwolke auf eine Kreisbahn. Auf dem Weg durch den Zylinder verdampft der Sprit und vermischt sich mit Luft. Auf dem Monitor wandelt sich die Farbe langsam von grün zu blau – das Signal dafür, dass ein zündfähiges Gemisch entstanden ist.

Jürgen Pfeil beobachtet, ob solche Computersimulationen mit den Vorgängen in einem wirklichen Motor übereinstimmen. Der Ingenieur leitet am Institut für Kolbenmaschinen der Universität Karlsruhe eine Arbeitsgruppe, die mit verschiedenen Methoden in laufende Aggregate späht – so wie Orthopäden mit dem Endoskop in zerschundene Knie blicken. Auf einem Monitor schwirren bunte Dreiecke im Kreis, sie beschreiben die Luftströmung im Zylinder. Wenig später schießt ein Schatten in den Brennraum und verwirbelt sich: das seitlich eingespritzte Benzin. Schließlich zucken Flammen. Alle drei Muster ändern sich von Arbeitszyklus zu Arbeitszyklus, mal brennt das Gemisch zuerst in der Mitte, mal am Auslassventil. Auch die erzeugte Leistung und die Schadstoffmenge im Abgas schwanken. Diese Variationen, die keine Simulation zeigt, müssen Autohersteller zu beherrschen lernen. „Wenn man nicht weiß, wie die Verbrennung genau läuft, weiß man auch nicht, wo die Abgase entstehen“, sagt Amin Velji, der Geschäftsführer des Instituts. „Und man kann weder Emission noch Verbrauch reduzieren.“

Um die Luft im Zylinder zu lenken, haben bisher viele Firmen die Kolben ihrer Motoren mit Nasen und Mulden versehen. Das überzeugt Hersteller wie BMW und Mercedes allerdings nicht. „Man muss die Magertechnologie anders entwickeln“, sagt Klaus Borgmann von BMW und lehnt sich verschwörerisch über den Tisch, „und dann richtig einsetzen.“ Sein Rezept heißt strahlgeführte Direkteinspritzung. Die Einspritzdüse sitzt neben der Zündkerze mittig über dem Kolben und spritzt das Benzin kegelförmig in den Zylinder. Das ist technisch aufwändig, denn am Dach des Zylinders ist es sehr heiß. Aber BMW

PUNKT 2006, Preisträger Kategorie Text/Sparte Magazin
Christopher Schrader: Zündende Ideen, SZ-Wissen 04/2005

verspricht sich von der Technik, die in spätestens zwei Jahren serienreif sein soll, einen Verbrauchsvorteil von zehn Prozent gegenüber seinen Valvetronic-Motoren.

Die Direkteinspritzung von Benzin allein wird aber nicht ausreichen. Das erwünschte hohe Drehmoment bei niedrigen Touren erreichen die Motoren noch nicht. Und wie sehr der Verbrauch sinkt, hängt vom Fahrstil der Kunden ab. Darum kopieren die Ottomotor-Fachleute ein weiteres Erfolgsrezept ihrer Kollegen: Mit einem Turbolader pressen sie mehr Luft in den Zylinder, als der Motor selbst ansaugen könnte. Damit steigern sie nicht nur das Drehmoment, sondern senken auch den Verbrauch. „Jeder Kunde spart so 15 Prozent“, sagt Wolfgang Steiger.

Diese Kombination von Direkteinspritzung und Turbolader zwingt die Hersteller dazu, über ihr Markenimage nachzudenken. VW zum Beispiel wird das Potenzial nutzen, seinen Autos kleinere Motoren einzubauen, die die Leistungswerte heutiger größerer Maschinen erreichen oder gar übertreffen. Die kleineren Aggregate brauchen schon wegen ihres geringeren Gewichts weniger Benzin. Zudem werden sie seltener in der ineffizienten Teillast betrieben. „Aber die Käufer müssen akzeptieren, dass sie keinen Zwei-Liter-Wagen mehr fahren, sondern einen mit 1,4 Litern Hubraum“, erklärt Steiger.

Auch Mercedes traut seinen Kunden zu, dass der Verstand über das Statusdenken siegt. BMW hingegen geht den anderen Weg: „Die Technik macht Sinn, wir denken aber zurzeit nicht daran, deswegen kleinere Motoren anzubieten“, sagt Klaus Borgmann.

Die Entwickler von Dieselmotoren sehen den Anstrengungen ihrer Kollegen gelassen zu. „Wir mussten diese Neuerungen schon vor langer Zeit einführen“, sagt Richard Bauder von Audi. „Unsere Bauteile im Diesel sind aber noch nicht am Ende ihrer Möglichkeiten angekommen“, ergänzt Ulrich Dohle, bei Bosch zuständig für Diesel-Einspritzsysteme. Neue Düsen, die von Piezokristallen gesteuert werden, haben die Leistung der jüngsten Motoren noch einmal gesteigert und das typische Nageln weiter unterdrückt; Mercedes baut solche Triebwerke bereits in ein Cabrio ein. „Bei den Benzinern wurde außerdem die Reibung im Motor mit großem Aufwand reduziert, das steht dem Diesel noch bevor.“

Schwieriger wird es für die Ingenieure, die Abgaswerte der Diesel drastisch zu reduzieren. Während in modernen Aggregaten die Rußpartikel durch die Steuerung der Verbrennung und die inzwischen oft

PUNKT 2006, Preisträger Kategorie Text/Sparte Magazin
Christopher Schrader: Zündende Ideen, SZ-Wissen 04/2005

serienmäßig eingebauten Filter unter Kontrolle sind, machen die Stickoxide Probleme. Sie entstehen an den Stellen im Brennraum, an denen die Temperaturen besonders hoch sind. „Und solche Hot Spots gibt es immer“, sagt Georg Wachtmeister von der TU München.

Um die Hitze zu bekämpfen, leiten die Motorenhersteller heute schon – teilweise gekühltes – Abgas zurück in die Zylinder. Außerdem prüfen sie zurzeit, ein Grundprinzip ihrer Aggregate aufzugeben: dass sich der Kraftstoff sofort entzündet, wenn er in den Zylinder gelangt. Hier haben die Ingenieure ausnahmsweise einmal bei den Kollegen von der Benzinfraktion gespickt. In Versuchsmotoren mit HCCI-Technik (Homogeneous Charge Compression Injection) wird das Dieselöl so früh eingespritzt, dass es sich mit Luft vermischt, bevor es durch die bei der Kompression entstehende Hitze entflammt. Das verringert zwar die Entstehung von Stickoxiden, schadet aber dem Wirkungsgrad und mindert den Verbrauchsvorteil. Außerdem erzeugt ein solcher Diesel typische Geräusche: „Der Motor nagelt wieder“, sagt Peter Bartsch von der Ingenieursfirma AVL im österreichischen Graz. „Und wenn Sie bei einem Auto der Oberklasse den Diesel wahrnehmen, bekommt der Hersteller ein Verkaufsproblem.“

Technisch unterscheiden sich Diesel und Benziner dann eigentlich nur noch wegen der Zündkerze. Und die Entwickler überlegen, ob sie die wirklich brauchen. Im so genannten Combined Combustion System (CCS), das VW erprobt, entzündet sich das Gemisch von selbst, wenn der Kolben es zusammenschiebt. Dafür bräuchte der Motor zwar einen Treibstoff, den es noch nicht gibt; das ist für die Automobilhersteller aber nur ein kleines Problem. „Der neue Kraftstoff wäre dem Kerosin vergleichbar“, sagt Wolfgang Steiger. „Ein solcher Motor könnte bis zu acht Prozent weniger verbrauchen als ein heutiger Diesel, wäre nicht teuer und würde den schärfsten Abgasbestimmungen entsprechen.“

Unabhängig davon also, ob es den Ingenieuren gelingt, neue Benziner als ernsthafte Alternative zu den Dieselmotoren auf dem Markt zu etablieren – in etwa 15 Jahren könnten die Unterschiede beider Typen verschwunden sein. „Diesel und Otto wachsen zusammen“, sagt Georg Wachtmeister. Daimler-Chrysler-Vorstandsmitglied Thomas Weber, zuständig für Forschung und Entwicklung, hat beim Symposium in Wien diese Vision in eine griffige Formel verpackt: „Der Motor der Zukunft heißt Diesotto.“

PUNKT 2006, Preisträger Kategorie Text/Sparte Magazin
Christopher Schrader: Zündende Ideen, SZ-Wissen 04/2005

Lebe schnell, stirb jung. Niemand folgt diesem Motto so zügellos wie die Formel 1. Nicht ihre Fahrer allerdings, ihre Motoren sind zum frühen Tod verdammt. Nur zwei Wochenenden und etwa 1500 Kilometer müssen sie durchhalten. In den sechs Stunden ihres Einsatzes treiben sie die Boliden mit 19000 Umdrehungen pro Minute auf Geschwindigkeiten um 300 Stundenkilometer. Ihre Konstrukteure geben sich jedoch bescheiden. „Im Vergleich zu den Entwicklern von Straßenfahrzeugen haben wir einen einfachen Job“, sagt Jean-Philippe Mercier von Renault. „Wir müssen uns nicht um die Abgaswerte kümmern oder uns Sorgen machen, ob das Auto nach kalten Nächten anspringt.“ Mario Theissen, Motorsportdirektor bei BMW, stimmt zu: „Wir reizen die Extreme aus, wo beim Serienauto Kompromisse nötig sind.“

So entstehen erstaunliche Triebwerke: Per Reglement auf drei Liter Hubraum begrenzt, holen sie aus zehn Zylindern 900 PS und wiegen etwa 90 Kilogramm. Ein Serienmotor hätte bei dem Hubraum sechs Zylinder, 250 PS und wöge 180 Kilogramm. Die bewegten Teile eines Formel-1-Motors sind sehr leicht, um die hohen Drehzahlen zu ertragen. Die nötigen Metall-Legierungen wären in Serienautos unbezahlbar.

Nach 14 Tagen ist der Spaß vorbei. Jeder Motor wird demontiert, BMW nutzt einzelne Teile nach genauer Prüfung für Testaggregate. Rennen fährt keine Schraube mehr.

Wäre das Bremsen nicht lebenswichtig, man müsste es verbieten. Denn beim Anhalten verwandelt das Auto seine Bewegungsenergie in nutzlose Wärme. Seit langem versuchen Ingenieure, die Verschwendung zu stoppen, doch erst jetzt sind Autos auf dem Markt, denen das gelingt. Das bekannteste ist der Toyota Prius. Er erzeugt beim Bremsen Strom, den er in Batterien speichert. Sie speisen einen Elektromotor, der den Benzinmotor beim Anfahren und im Stadtverkehr unterstützt: ein Hybridsystem.

Die Vorteile zeigen sich vor allem im Benzinverbrauch in der Stadt: Fünf Liter auf 100 Kilometer gibt Toyota an. Beim Stopp oder bei Schleichfahrt wird der Benzinmotor abgeschaltet und erst bei Bedarf vom Elektromotor gestartet. Wer Autobahn fährt, verbraucht wegen des zusätzlichen Gewichts eher mehr Benzin als nötig. Wegen des Prius-Erfolgs arbeiten viele Firmen an Hybridantrieben. Erster Schritt wäre ein so genannter Startergenerator, der den Benzinmotor nach dem Stopp an der Ampel anwirft

PUNKT 2006, Preisträger Kategorie Text/Sparte Magazin
Christopher Schrader: Zündende Ideen, SZ-Wissen 04/2005

und ein wenig Bremsenergie speichert. Damit ließen sich im Stadtverkehr 15 Prozent Benzin sparen, so Ingenieure, mit dem „vollen Hybridantrieb“ 25 Prozent.