

Benzin-Direkteinspritzung auf Siegeszug: Strahlgeführt, stark, sparsam

Von Markus Gersthofer

Alle reden vom Downsizing: Im Hubraum kleinere Motoren erreichen dieselbe oder sogar höhere Leistung als frühere größere, aber mit deutlich geringerem Verbrauch. Ihr Geheimnis ist die Aufladung per Kompressor oder (meist) per Turbolader. Der größte Fortschritt wird erreicht, wenn ein noch drittes Merkmal hinzu kommt: die Direkteinspritzung.

Beim Diesel ist sie längst selbstverständlich. Für Benziner gibt es Direkteinspritzung auch bereits sehr mehr als 60 Jahren: in Flugmotoren und in frühen Zweitakt-Personenwagen. Berühmt wurde sie ab 1954 im berühmten 300-SL-Flügeltürer von Mercedes-Benz. Bei ihm zählte vor allem die höhere Leistung, die mit Benzin-Direkteinspritzung möglich wurde. Inzwischen haben Verbrauch und Abgas-Qualität gleiche Bedeutung. Fuel Direct Injection (Fuel-DI), wie sie international heißt, bietet auf allen Feldern Vorteile. Schnelle Fortschritte in der Elektronik, große Serien und automatisierte Fertigungsverfahren wie das Laserbohren haarfeiner Löcher senken die Kosten. „Direkteinspritzung beschert dem Benziner jetzt eine ähnliche Revolution wie vor einigen Jahren dem Diesel“, freut sich Dr. Rolf Bulander, Geschäftsführer bei Bosch und zuständig für Antriebstechnik. Bosch hat bei der Direkteinspritzung beim Diesel wie beim Benziner wesentliche Akzente gesetzt und ist auf diesem Gebiet Weltmarktführer. Die Zukunft lässt eine weitere positive Entwicklung erwarten.

Um den Siegeszug der Direkteinspritzung auch im Benzinmotor zu verstehen, sei ein längerer Blick unter die Motorhaube gestattet. Ottomotoren benötigen ein exakt zusammengesetztes Gemisch aus Kraftstoff und Luft. Es herzustellen, war traditionell Aufgabe des Vergasers. Sein Name täuscht: Er löst das aus dem Tank stammende Benzin lediglich in viele kleine Tröpfchen auf. Auf ihrem Weg durch das Ansaugrohr und im Brennraum verdampfen diese und ergeben dann das benötigte Gas.

Strenge Abgasvorschriften lassen sich nur mit einem Katalysator erfüllen. Dieser

funktioniert nur richtig, wenn die Benzin-Luft-Mixtur sehr exakt zusammengesetzt ist. Der Fachmann spricht von λ 1, das Gemisch darf im Leerlauf wie bei hohen Drehzahlen nur um wenige Promille vom Idealwert abweichen. Der vergleichsweise einfach gebaute Vergaser kommt hier an seine Grenzen. Benzineinspritzung lässt sich elektronisch viel genauer steuern. Zuerst war sie vor allem sportlichen Fahrzeugen vorbehalten, mit dem Aufkommen des Katalysators vor rund 25 Jahren wurde sie Allgemeingut.

Die damals eingeführte Technik indes nutzt nicht das ganze mögliche Potenzial. Ihre Düsen sitzen im Saugrohr in der Nähe der Einlassventile. Sie erzeugen ähnlich wie Vergaser feine Benzintröpfchen. Diese werden zwar elektronisch exakt zugemessen, müssen aber nach wie vor bei dieser „indirekten“ Einspritzung im Saugrohr und im Brennraum verdampfen.

Nicht so bei der modernen direkten Einspritzung. Ihre Injektoren sitzen ähnlich wie Zündkerzen im Verbrennungsraum. Der Motor saugt reine Luft an, erst während der Verdichtung wird eingespritzt. Durch hohen Druck und im wahrsten Sinn des Wortes haarfeine Düsen wird der Kraftstoff so fein zerstäubt, dass er unmittelbar ohne Durchmischung gezündet werden kann. Bedeutendster Vorteil aber ist, dass er im Brennraum verdampft und nicht im Saugrohr.

Zum Auflösen der Benzintröpfchen in Gas ist Verdampfungswärme nötig. Sie wird spürbar, wenn z. B. feuchte Haut im Luftzug abkühlt. Entsprechend kühlen verdampfende Tröpfchen die im Brennraum komprimierte Luft. Sie hat eine größere Dichte, die Ladung lässt sich ohne Klopfgefahr (Selbstentzündung) höher komprimieren. Der Wirkungsgrad des Motors steigt, Leistung und Drehmoment nehmen zu, Verbrauch und Emissionen nehmen ab.

Durch den Kühleffekt des eingespritzten Kraftstoffs können Fuel-DI-Motoren oft auf Vollast-Anreicherung verzichten. Hier wird bei Vollgas zusätzlicher Kraftstoff eingespritzt nur zum Zweck, die Verbrennungstemperaturen zu senken – um z. B. einen Turbolader vor Überhitzung zu schützen. Weniger Anreicherung bedeutet weniger Verbrauch: Norm und Praxis weichen weniger stark voneinander ab. Vorteilhaft wirkt sich auch aus, dass Direkteinspritzung die Gemischbildung bei niedrigen Drehzahlen verbessert. Mit ihr ausgerüstete Motoren verfügen über mehr Drehmoment bei niedrigen Touren, sie kommen beim Gasgeben entsprechend kräftiger zur Sache.

Im Kurzstreckenverkehr kommt noch ein weiterer Vorteil hinzu: Im kalten Motor entfällt Benetzung der Saugrohre. So lange diese ihre Betriebstemperatur noch nicht erreicht

haben, schlägt sich ein Teil der Benzintröpfchen an ihren Wänden nieder. Bei Start und Warmlauf muss dies durch ein entsprechend fetteres Gemisch ausgeglichen werden. Direkteinspritzung kommt mit sehr viel weniger Anfettung aus. Sie ermöglicht dazu „Scavenging“: Ein- und Auslassventile sind kurz gleichzeitig offen. Ein kleiner Teil der Frischluft entweicht mit dem Abgas. Für einen Turbolader ergibt dies einen zusätzlichen Schub an Luft, er spricht bei niedrigen Drehzahlen rascher an. Scavenging hilft auch, Temperaturspitzen bei der Verbrennung zu vermeiden und senkt damit vor allem Stickoxid-Emissionen.

Schon heute steigert Direkteinspritzung den thermodynamischen Wirkungsgrad von Benzinmotoren um etwa 15 Prozent. Sie schafft dazu Möglichkeiten für künftige Entwicklungen. Vom Turbolader war bereits die Rede: DI, variable Ventilsteuerung und weitere Feinheiten wie etwa Twin Scroll ermöglichen, dass Turbolader bereits bei niedrigen Drehzahlen Druck aufbauen und damit ein Turboloch vermeiden. Direkteinspritzung bildet damit die ideale Voraussetzung für Downsizing. Kleine und leichte, saubere und sparsame Motoren eignen sich auch hervorragend für künftige elektrifizierte Ottomotoren, für Hybrid- und Plug-in-Modelle.

In die Zukunft weist dazu Schichtladung: Gezielte Strahlen aus der Einspritzdüse erzeugen lediglich im Bereich der Zündkerzen-Elektroden ein kleines Wölkchen zündfähiges Gemisch, der übrige Brennraum ist mit reiner Luft gefüllt. Die Verbrennung nähert sich derjenigen im Dieselmotor, die Technik (allerdings auch Abgas-Nachbehandlung) erfordert nochmals höheren Aufwand. Schichtladung ist heute noch selten, die neuen 1,6-l-Turbomotoren von Mercedes-Benz etwa arbeiten aber mit ihr.

Heutige Steuergeräte für Benzin-Direkteinspritzung verarbeiten laufend bis zu 18 000 Parameter. Sie stammen von zahlreichen Sensoren z. B. für die Motor- und Nockenwellen-Drehzahl, für die Klopfneigung, für Drosselklappen- und Gaspedalwinkel, Ladedruck, Lambda-Wert, Luft-, Öl- oder Kühlwasser-Temperatur. Bei einem Sechs-ZylinderMotor, der mit 6000 Umdrehungen pro Minute läuft, muss die Elektronik daraus 18 000 Einspritzimpulse pro Minute errechnen - oder 300 pro Sekunde. Jede Düse wird dabei individuell überwacht. Wenn sich ihre Spritzcharakteristik etwa durch Alterung, durch Anlagern eines Ruß- oder Ascheteilchens verändert, passt das Steuergerät sofort Einspritzverlauf und -menge an. Der dafür erforderliche Rechner lässt sich durchaus mit einem modernen Laptop vergleichen.

Direkteinspritzung erfordert auch bei der Hardware erheblich höheren Aufwand. Genügen bei herkömmlicher Saugrohreinspritzung zehn bar Druck, um die Düsen sicher zu versorgen, so verlangen die im Zylinderkopf und damit im Bereich hohen Drucks

untergebrachten DI-Düsen bis zu 200 bar. Formel-1-Rennmotoren arbeiten sogar mit Drücken bis zu 500 bar.

Ein Wunderwerk für sich bilden die zugehörigen Einspritzdüsen. Ihre Magnetventile öffnen und schließen in Tausendstel-Sekunden – so rasch, dass sogar Mehrfach-Einspritzung möglich wird. Der für die jeweilige Verbrennung nötige Kraftstoff wird in mehreren Teilmengen eingespritzt, was unter bestimmten Betriebsbedingungen Vorteile bringen kann.

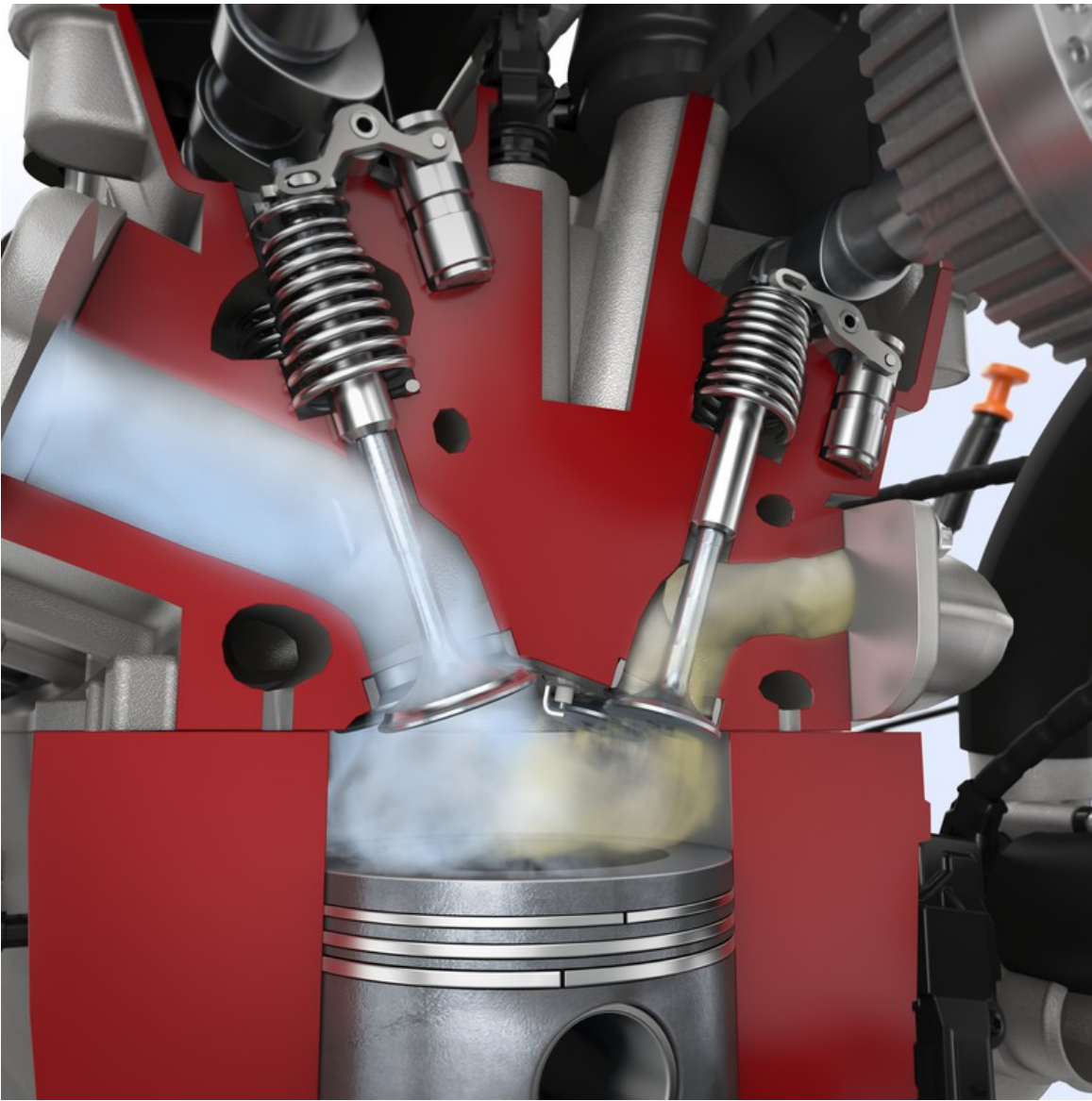
Jede Düse besitzt bis zu fünf im wahrsten Sinn des Wortes haarfeine Öffnungen. Sie haben trotz ihrer Winzigkeit verschiedene Durchmesser. Aus ihnen sprühen feinste Benzintröpfchen „strahlgeführt“ sogar in unterschiedlichen Winkeln, so dass sie die Luft im Brennraum möglichst gut durchdringen, aber nicht auf Kolben oder Zylinderwände auftreffen. Bosch bohrt diese Löcher mit unglaublicher Genauigkeit per Laser – wofür man zusammen mit dem Werkzeugmaschinen-Hersteller Trumpf und der Universität Jena 2013 mit dem deutschen Zukunftspreis ausgezeichnet wurde.

Mit Downsizing samt Aufladung und Elektrifizierung steht Fuel-DI vor einer großen Zukunft. Ab 2021 dürfen neue Personenwagen in der EU durchschnittlich nur noch 95 Gramm CO₂ pro Kilometer ausstoßen – was bei Benzinmotoren einem Verbrauch von 3,6 Litern pro 100 Kilometer entspricht. Direkteinspritzung bildet eine Schlüsselkomponente, dieses anspruchsvolle Ziel zu erreichen. Schon 2016, schätzt Bosch, wird die Hälfte der europäischen Neufahrzeuge mit DI-Benzinmotoren ausgestattet sein. Andere Länder wie die USA und sogar China planen ähnliche Verbrauchsvorschriften. „In wenigen Jahren spielt die Musik auch in Amerika und China“, erwartet der Marktführer.

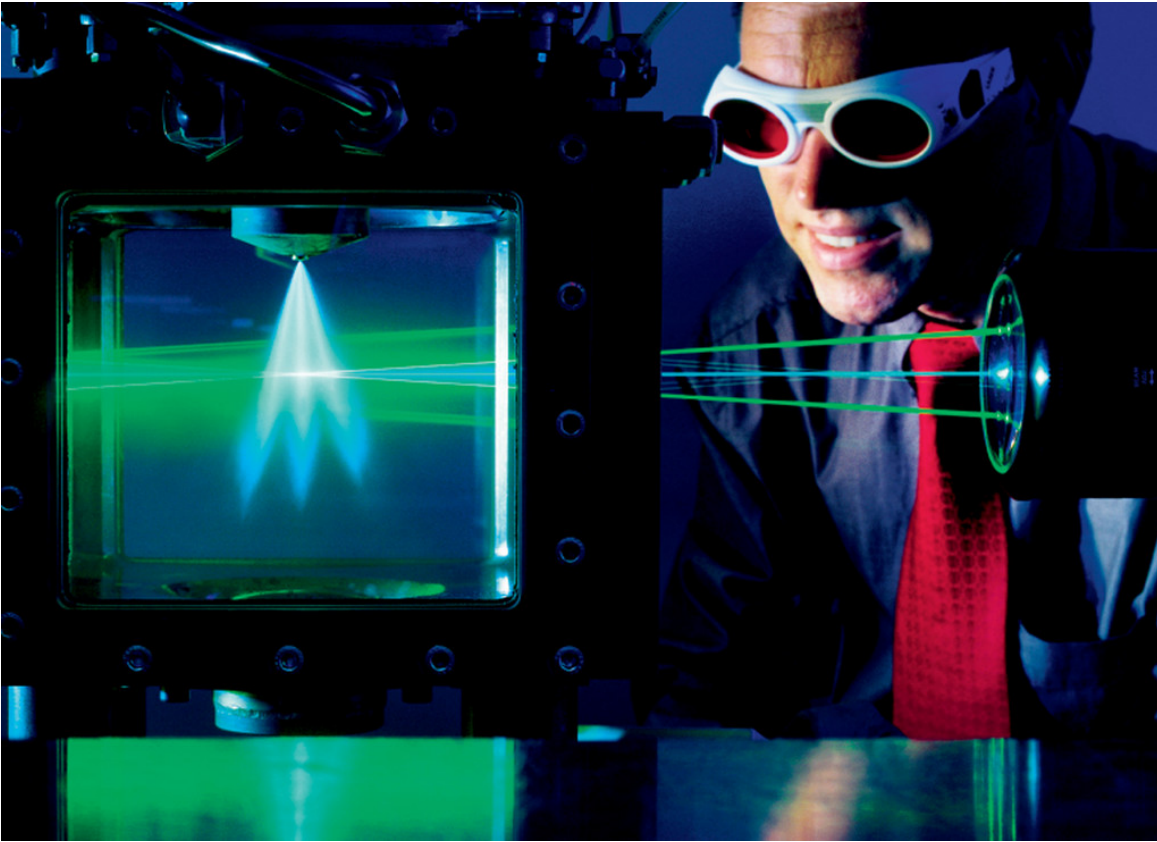
Dem Autofahrer können leistungsfähige und dennoch sparsame Fahrzeuge nur recht sein. In wenigen Jahren werden mit einer Vier beginnende Verbrauchszahlen für die Mittelklasse, mit einer Drei für Kleinwagen selbstverständlich sein. (ampnet/fer)



Benzin-Direkteinspritzung von Bosch.



Benzin-Direkteinspritzung von Bosch.



Benzin-Direkteinspritzung.

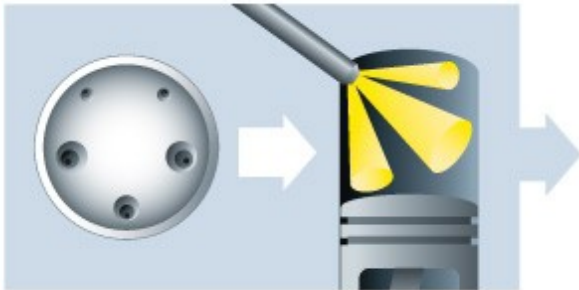
Präzise Meisterleistung

Exakte Kontrolle der Kraftstoff-Verteilung

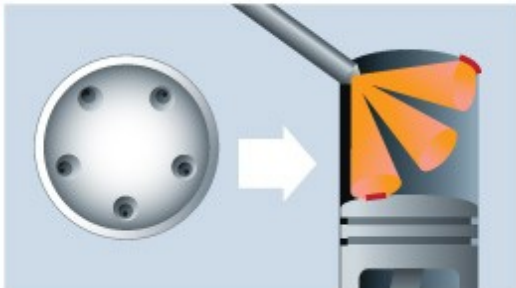
Mit ultrakurzen Laserpulsen gebohrte Löcher ermöglichen eine optimale Kraftstoff-Verteilung in Benzinmotoren. Dies führt zu einer sehr effizienten Verbrennung, daher zu weniger Emissionen und geringerem Verbrauch.



Unterschiedlich große Löcher sorgen für die noch gezieltere Kraftstoffverteilung im Brennraum. Das trägt zur optimalen Verbrennung bei. Das Benetzen von Zylinderwand und Kolben wird vermieden.



Herkömmliche Einspritzung: Die teilweise Benetzung von Zylinderwand und Kolben führt zu Verlusten.



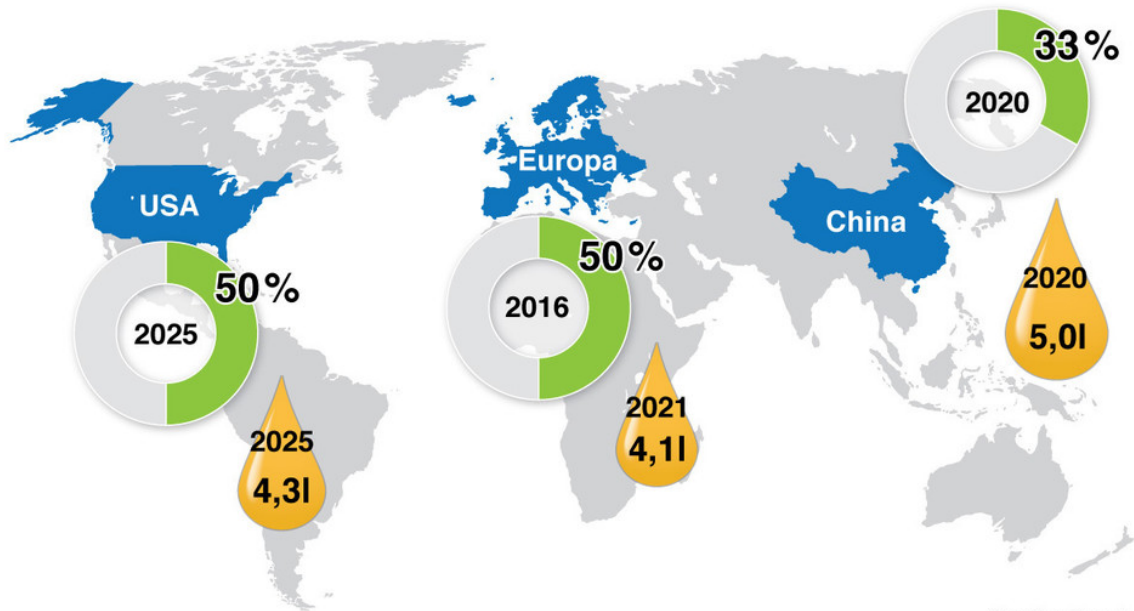
Benzin-Direkteinspritzung von Bosch.

Benzin-Direkteinspritzung weltweit

Absatz-Prognose für Neuwagen mit Direkteinspritzung

■ Anteil der Neuwagen mit Benzin-Direkteinspritzung im Jahre

💧 Vorgeschriebene Emissionsgrenze umgerechnet in Verbrauch von Benzin



Quelle: Bosch

Absatz-Prognose für Neuwagen mit Direkteinspritzung.



Benzin-Direkteinspritzung von Bosch.



Benzin-Direkteinspritzung von Bosch.
