



Schleppermotor: Macht sauber durstig?



MF und Valtra haben als erste Serientraktoren mit AdBlue-Technologie vorgestellt. Die Harnstoff-Lösung reduziert die schädlichen Stickoxide.

Die Abgasnormen für Traktoren werden immer strenger. Die Konstrukteure treiben riesigen Aufwand, um die Werte einzuhalten. Was das für die Praxis bedeutet, haben wir mit Landmaschinenmechaniker-Meister Reinhard Timpe diskutiert.

Beim Auto gibt's schon ewig die Abgasuntersuchung. Seit 1996 müssen aber auch die Motoren von Land- und Baumaschinen Schritt für Schritt immer sauberer werden. Dahinter stecken strenge Abgasnormen, die ursprünglich in den USA (Kalifornien) festgelegt und dann – mit zeitlicher Verzögerung – auch von der EU übernommen wurden. Auch bei uns heißen die einzelnen Stufen griffig nach US-Vorbild „TIER 1 bis 4“:

Vorreiter sind vor allem größere Motoren. So müssen in der letzten Stufe 4 z. B. ab 2014 Triebwerke mit mehr als 130 kW (176 PS) 97 % weniger Stickoxide und Partikel ausstoßen als zu Beginn der Abgasregelung 1996 (Übersicht). Kleinere Motoren ziehen in gewissem Abstand nach, je nach Größe auch teils mit weniger strengen Grenzwerten. Nur Motoren mit weniger als 19 kW (26 PS) bleiben davon verschont.

Um diese Ziele zu erreichen, müssen die Motorenhersteller einen enormen technischen und konstruktiven Aufwand betreiben. Bei der Entwicklung neuer Motoren geht der Löwenanteil der Kosten für die Abgasbehandlung drauf. Deshalb orientieren sich Neuentwicklungen bei Schleppern nicht mehr nur am Markt. Entscheidend ist viel mehr, wann die neue Abgasstufe „droht“. Andere Motoren, deutlich größeres Kühlsystem oder sogar Filteranlagen bedingen teils komplette Neukonstruktionen der Traktoren.

Das heißt auch, dass mit der nächsten Abgasstufe Modelle vom Markt verschwinden müssen, die in der Praxis durchaus beliebt sind und hohe Absatzzahlen erreichen. Ein prominentes Beispiel dafür ist vielleicht die 500er-Baureihe von Fendt, die Ende der 90er-Jahre eingestellt wurde.

Übersicht: 97 % weniger Schadstoffe bis 2014!

Abgasstufen für Motoren mit mehr als 130 kW. Die Flächen zeigen, wie stark Partikel und Stickoxide in den einzelnen Schritten reduziert werden müssen.

Warum der Aufwand?

Warum dieser Aufwand? Es geht vor allem um zwei Schadstoffgruppen. Bei der idealen Verbrennung entstehen zwar nur Stickstoff, Sauerstoff und Kohlendioxid – die ohnehin in der Luft vorhanden sind – sowie Wasser. Weil es in der Praxis nie ideal abläuft, enthalten die realen Abgase der Motoren auch Stickoxide (NO_x), Rußpartikel und Kohlenmonoxid.

Das bekannteste Stickoxid ist Lachgas. Es ist als Treibhausgas und Ozonkiller verurteilt. Andere Stickoxide reagieren mit Wasser und gehen als aggressiver Saurer Regen nieder. Stickoxide entstehen in Motoren vor allem durch hohen Verbrennungsdruck und hohe Temperaturen – eigentlich die Kennzeichen für die effiziente Verbrennung.

Ruß oder Partikel sind teils so fein, dass sie tief in die Lunge eindringen und dort unter Umständen Krebs verursachen können. Kohlenmonoxid ist ein gefährliches Atemgift, das sich 325 Mal stärker an die roten Blutkörperchen bindet als Sauerstoff.

Stickoxide, Russ und Kohlenmonoxid führen zu einem Gegensatz, der nur mit hohem technischen Aufwand zu lösen ist. Denn senkt man einseitig den Stickoxid-Gehalt, kann das den Motor weniger effizient machen. Rußpartikel und Kohlenmonoxid in den Abgasen steigen. Optimierte man die Verbrennung auf einen niedrigen Verbrauch und einen geringen Gehalt an Ruß, steigen die Stickoxide.

Ohne Kunstgriffe sind niedrige Stickoxide und geringer Rußanteil kaum zu haben. Die ideale Verbrennung aus Sicht der Abgasreduzierung ist homogen und kalt. Die Hersteller verfolgen deshalb mehrere Ansatzpunkte parallel.

Beim NO_x wirken diese Maßnahmen:

- Kühlere Luft im Brennraum durch

größere Kühlerfläche und vor allem Ladeluftkühlung.

- Geringere Sauerstoffkonzentration durch Systeme zur Abgasrückführung und Voreinspritzung.

- Verzögerter Einspritzzeitpunkt durch Anpassen der Einspritzanlage.

Partikel und Kohlenmonoxid hält man durch diese Maßnahmen in Grenzen:

- Höherer Einspritzdruck mit feinerer Zerstäubung des Kraftstoffs durch moderne Einspritzsysteme wie Common-Rail.

- Höhere Luftdichte im Zylinder durch Turbolader (teils mit variabler Geometrie), Ladeluftkühlung (niedrigere Temperatur entspricht einer höheren Dichte) und Vierventiltechnik.

- Verbesserte Nachbrennraten durch kontrollierte Nacheinspritzung.

- Exaktere Einspritzmenge durch elektronische Einspritzsysteme.

- Verringerter Ölverbrauch durch verbesserte Kolbenringe, geringere Toleranzen zwischen Kolben und Laufbuchse und exaktere Ventildichtungen.

- Höherer mittlerer Verbrennungsdruck.

Natürlich lassen sich nicht alle Maßnahmen auf einen Schlag umsetzen. Die Motorenhersteller arbeiten seit 1996 Schritt für Schritt an dem Thema. Außerdem gibt es zu den jeweiligen Stichtagen noch Übergangszeiten. Motoren die zum Stichtag bereits produziert waren, dürfen

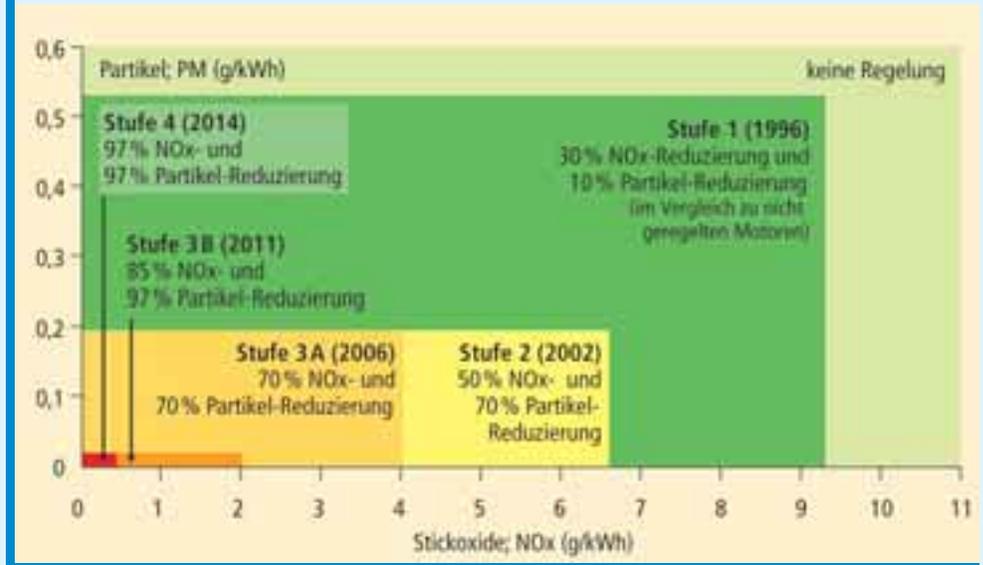
in den nächsten 1 bis 2 Jahren noch eingebaut werden. Nur lässt sich die Produktion „auf Halde“ sehr schwer planen, so dass diese Übergangszeiten in der Praxis kaum Einfluss auf die Entwicklung haben.

► **Einspritzen: Später, mehr Druck und feinere Tropfen**

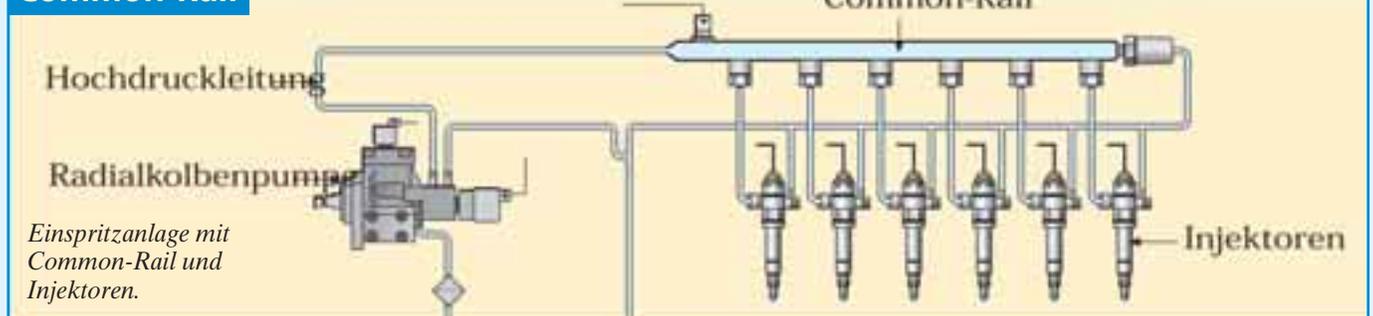
Die erste Abgasstufe ließ sich auch bei Motoren mit mechanischer Einspritzanlage recht einfach erreichen: Man musste nur den Einspritzzeitpunkt Richtung „später“ verlegen. Dadurch sinken die Verbrennungstemperatur und damit auch der Ausstoß an NO_x. Nachteil: Die Effizienz des Motors leidet, der Verbrauch steigt also an. Bei steigenden Dieselpreisen wurde das in der Praxis nur widerwillig akzeptiert.

Die nächste Abgasstufe bedeutete teils das Aus für mechanische Einspritzanlagen, aber auf jeden Fall für Vorkammermotoren. Elektronisch geregelte Einspritzpumpen wurden eingeführt, so z.B. die bekannte Pumpe VP 44 von Bosch. Der weitere Aufbau der Einspritzanlage blieb zunächst im Prinzip unverändert: Von der Pumpe führt zu jeder Einspritzdüse eine eigene Leitung.

Die TIER 3a lässt sich zumindest bei größeren Motoren meistens nur über Common-Rail-Anlagen umsetzen. Hier

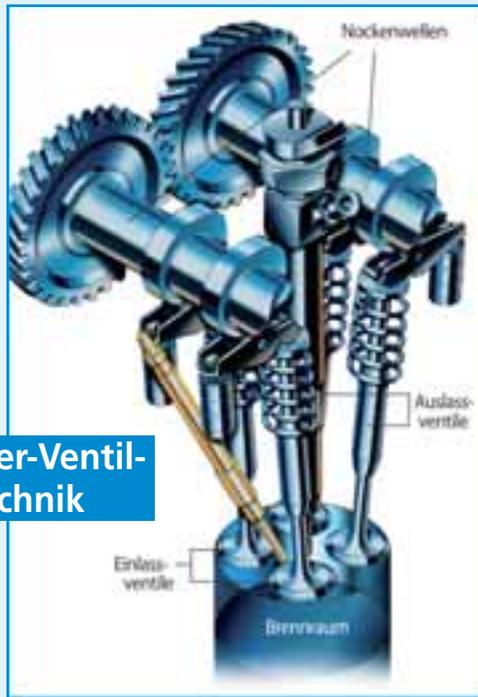


Common-Rail



versorgt eine Hochdruckpumpe ein zentrales Hochdruck-Rohr (Common-Rail). Hier sind die Injektoren angeschlossen, die den Platz der klassischen Einspritzdüsen einnehmen.

Diese Pumpen sorgen für einen höheren Einspritzdruck und - zusammen mit neuen Düsen - für eine feinere Zerstäubung des Diesels. Mechanische Reihenspritzpumpen erreichen einen Druck von 800 bis 900 bar. Die ersten elektronischen Pumpen kommen auf rund 1400 bar und die modernsten Common-Rail-Pumpen erreichen Drücke bis 2500 bar. Die feinere Zerstäubung sorgt für eine vollständigere



Vier-Ventil-Technik

Mit den Abgasvorschriften sind die Kühlerflächen der Traktoren deutlich gewachsen.

Verbrennung und senkt den Rußgehalt.

Dazu kommt die exaktere Steuerung des Einspritz-Zeitpunkts. Mechanische Einspritzanlagen fördern den Diesel in Abhängigkeit vom Kurbelwellenwinkel. Der Einspritzzeitpunkt lässt sich nur mechanisch verstellen, es gibt nur eine Einspritzung pro Verbrennungstakt. Die VP 44 kann bereits 2 Mal pro Takt einspritzen, die Injektoren des Common-Rail bis zu 5 Mal. Die Injektoren lassen sich vollkommen unabhängig von der Kurbelwelle steuern, die Motorsoftware des Steuergerätes (ECU, Engine Control Unit) übernimmt das Regiment. Das Einspritzen einer sehr geringen Menge vor dem Oberen Totpunkt senkt die Sauerstoffkonzentration (weniger NO_x). Die Haupteinspritzung wird leicht verzögert (geringere Verbrennungstemperatur, weniger NO_x), durch die Nacheinspritzung steigt die Temperatur und Rußpartikel verbrennen. Durch die genaue Steuerung der Einspritzung kann das Common-Rail

Beim Zylinderkopf mit vier Ventilen sitzt der Injektor in der Mitte. Das verbessert die Durchmischung.



den Mehrverbrauch des Motors durch die NO_x -Reduzierung teils kompensieren.

Die Software entscheidet

Die Motor-Software ist verantwortlich für die Charakteristik des Triebwerks. Auch wenn Traktoren unterschiedlicher Hersteller vielleicht den „gleichen“ Motor haben, können die Software und damit Leistungswerte des Motors sehr unterschiedlich sein. Die Elektronik ermöglicht aber auch die Manipulation: Das „Chip-Tuning“ modifiziert das so genannte Motorkennfeld, was die Leistung und vor allem die Effizienz erhöht, aber auch

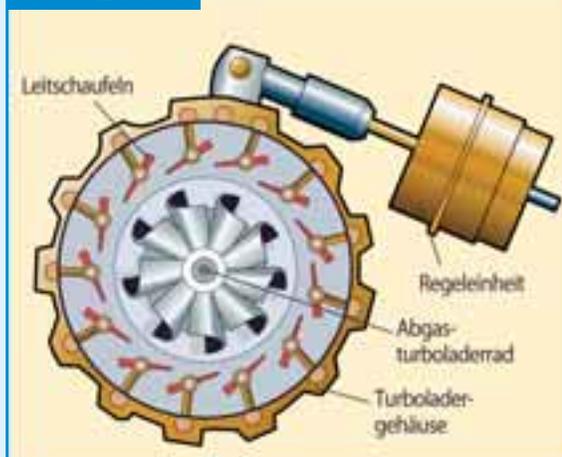
den NO_x-Gehalt steigen lässt. Oder „spezielle“ Fühler gaukeln der Elektronik z.B. niedrigere Messwerte vor, was sich wiederum auf die Einspritzung auswirkt. Beides führt zum Erlöschen der Betriebs-erlaubnis. Weiteres Problem: Durch „Tuning“ steigen Verbrennungstemperatur und thermische Belastung massiv an. Das hat in der Praxis schon bei gechipten Schleppern zum Durchbrennen der Alu-Kolben geführt.

► **Große Kühler: Die Wärme muss weg!**

Die Abgasnormen wirken sich nicht nur auf die Innereien des Motors aus. Sie beeinflussen auch das Design durch größere Kühler und größere Luftansaugflächen der Haube. Mit den Kühlern müssen auch die Lüfter wachsen. Hohe Lüfterleistung kostet Diesel. Vor allem wenn der Lüfter auf Volllast ausgelegt ist und auch im Teillastbereich mit voller Leistung läuft. Moderne Visco-Lüfter laufen mit variabler Drehzahl und arbeiten damit effizienter. Ein anderer interessanter Ansatz kommt von John Deere: Der Lüfter des E-premium arbeitet mit einem elektrischen Antrieb, was die Regelung der Lüfterdrehzahl vereinfacht.

Neben der Motor-, Öl- und Kraftstoffkühlung gehört zu einem modernen Motor auch die Ladeluftkühlung (Intercooler) in Verbindung mit dem Turbolader. Der Turbo erwärmt die Luft beim Komprimieren. Warme Luft hat eine geringere Dichte, die Luftdichte beim Füllen des Zylinders nimmt ab. Durch den Ladeluftkühler nimmt die Gasmenge bei konstantem Druck und Volumen zu. Das macht

VTG-Lader



Die Leitschaufeln steuern den Anströmwinkel der Abgase auf das Turbinenrad und damit die Drehzahl des Turbos.

sische Turbo erst bei höherer Drehzahl in Schwung. Darunter regiert das Turbo-Loch, die Verbrennungsqualität nimmt deutlich ab.

Die Konstrukteure versuchen, die Turboleistung von Anfang an abzurufen.

die Verbrennung effizienter, der Rußgehalt nimmt ab.

Auch die Mehrventil-Technik sorgt für einen schnelleren Gasaustausch und das bessere Füllen des Brennraums. Beim Dreiventiler sitzen zwei im Einlasskanal und eines im Auslass. Im Trend liegen aber Vierventiler mit zwei Einlass- und zwei Auslassventilen. Hier sitzt der Injektor zentral im Zylinderkopf, was die Verteilung des Kraftstoffs gleichmäßiger macht.

Auch die Form des Kolbens hat großen Einfluss auf die Verteilung des Kraftstoffs im Brennraum. Bei der Optimierung der Kolben achten die Konstrukteure außerdem darauf, dass der Kolben möglichst wenig Quetschzonen am Rand hat. In den Quetschzonen kann sich kein homogenes Gemisch bilden.

► **Moderne Turbos lassen sich regeln**

Auch Turbolader sorgen für die bessere Füllung des Brennraums und erhöhen die Leistung. Weil die Abgase für den Antrieb der Turbine sorgen, kommt der klas-

Dazu gibt es mehrere Ansätze, z.B. der Einsatz von zwei parallelen Turboladern, Turboladern mit Wastegate oder eines Laders mit variabler Geometrie (VTG)

Bei der Zwei-Lader-Lösung gibt's verschiedene Konstruktionen. Beim Bi-Turbo arbeiten zwei gleiche, kleinere Turbos parallel. Durch die geringere Trägheit der Masse kommen die kleinen Turbinen schneller auf Touren. Bei der zweistufigen Aufladung arbeiten ein kleiner (hoher Druck, geringe Menge) und ein großer Turbo (niedrigerer Druck, große Menge) zusammen. Bei niedriger Drehzahl sorgen beide für die Zylinderfüllung und damit für einen schnellen Drehmoment-Anstieg. Steigt die Motordrehzahl leitet dann ein Bypass-Ventil (Wastegate) mehr Abgase zum großen Turbo.

Beim VTG-Lader sitzen im Turbinengehäuse verstellbare Leitschaufeln. Bei geringer Motordrehzahl verflachen die Leitschaufeln den Anströmwinkel auf das Abgas-turboladerrad. Das erhöht die Drehzahl des Turbos und damit die geförderte Luftmasse. Bei hoher Motordrehzahl sorgen die Leitschaufeln für einen steileren Anströmwinkel und somit für

eine niedrigere Laderdrehzahl. Bei Dieselmotoren im Pkw-Bereich ist ein VTG-Lader mittlerweile Standard.

Abgas gegen Stickoxide

Ab Stufe Tier 3a muss der NO_x-Gehalt um 70 % reduziert werden. Dazu greifen die Konstrukteure noch tiefer in die Trickkiste. Sie senken Temperatur und Sauerstoffgehalt, indem sie einen Teil der Abgase zurück in den Brennraum leiten. Das Ganze nennt sich Abgasrückführung AGR oder EGR (Exhaust Gas Recirculation). Wichtig ist der Unterschied von interner und externer Abgasrückführung.

Die interne Abgasrückführung kommt weitgehend ohne zusätzliche Bauteile aus. Deshalb wird sie vor allem bei kompakten Traktoren eingesetzt. Das Ganze läuft nur über die Nockenwelle. Ein zusätzlicher Nocken öffnet beim Ansaugtakt das Auslassventil für einen kleinen Moment und der Motor saugt Abgas zurück in den Brennraum. Nachteil: Das Abgas gelangt ungekühlt in den Zylinder, was letztlich den Dieserverbrauch etwas erhöht.

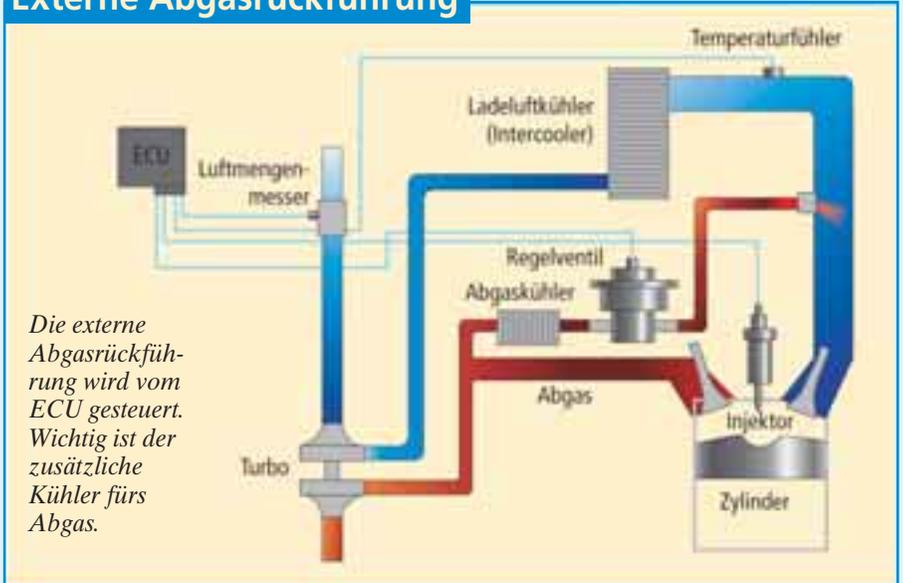
Anders bei der externen Abgasrückführung, die vor allem in Großschleppern eingesetzt wird. Hier dosiert die Elektronik die Abgasmenge in den Ansaugkanal. Außerdem ist meist ein Abgaskühler integriert. Zusammen mit dem Ladeluftkühler verbessert das die Zylinderfüllung. Das wirkt sich günstig auf den Verbrauch aus.

Saubere Motoren mit zwei Tanks?

Bis zur Abgasstufe 3A konnten die Ingenieure die Grenzwerte durch die angepasste Konstruktion der Motoren erreichen. Als Prüfstein gelten die Stufe 3B und dann natürlich die Stufe 4.

Die Partikel-Emission darf ab 3B nur noch 3 % des ursprünglichen Werts betra-

Externe Abgasrückführung



gen. Dieses Ziel ist wahrscheinlich nur noch mit Filtern zu erreichen, die Partikel z.B. durch Adhäsion aus dem Abgas entfernen. Die Elektronik überwacht Eingangs- und Ausgangsdruck des Filters. Ab einer bestimmten Druckdifferenz regeneriert sich der Filter, z.B. indem per Nach einspritzung die Abgastemperatur erhöht wird. Dadurch verbrennt der Ruß. Pkw-Hersteller setzen teils auch Filter ein, die sich permanent regenerieren.

Bauraum ist knapp. Deshalb ist es nicht ganz einfach, so einen Filter, der schnell ein Volumen von 20 l haben kann, an der Maschine elegant unterzubringen. Die scharfen Abgasstufen werden sich also noch mehr auf das Design der Traktoren auswirken als ihre Vorgänger.

Auch beim NO_x wird die Luft dünn.

AdBluetank am MF: Die Harnstofflösung wird vor einem Katalysator in den Abgasstrom dosiert.

Fotos/Zeichnungen: Orb, France Agricole, Werkbilder

Zumindest die Stufe 4 ist mit herkömmlichen Maßnahmen nicht zu erreichen. Bereits im Herbst haben MF und Valtra einen neuen Großschlepper vorgestellt, dessen Sisu-Motor mit der SCR-Technologie arbeitet. Im Lkw-Bereich hat sich diese Technik seit einigen Jahren bewährt.

SCR steht für die „selektive katalytische Reduktion“ von Stickoxiden. Das heißt: Das System dosiert Ammoniak in den Abgasstrom, das mit den Stickoxiden zu Stickstoff und Wasser reagiert. Das Ammoniak wird nicht als Gas dosiert, sondern als Harnstofflösung, die den Markennamen „AdBlue“ trägt. Pro 100 l Diesel verbraucht das System etwa 3 l Harnstofflösung. Weil das Mittel im Lkw-Bereich gängig ist, gibt's kein Problem mit der Beschaffung. Nachteile sind die zusätz-

lichen Kosten – 1 l AdBlue kostet um 60 Cent/l – und natürlich der zweite Tank plus Logistik. Schäden gibt's nicht, wenn der Motor ohne die Harnstofflösung läuft, doch die Elektronik regelt dann die Leistung des Triebwerks deutlich nach unten, um hier keine Lücke zu lassen.

Großer Vorteil: SCR funktioniert ohne Eingriff in die Verbrennung. Die Motoren können also abgerüstet und auf Effizienz getrimmt werden. Die Injektoren spritzen wieder zum idealen Zeitpunkt ein. Die Kühlerpakete können schrumpfen. Und vor allem gibt es dann keinen Grund mehr, die Motoren zu chippen. Insider glauben, dass die Effizienz infolge von SCR um 5 bis 10 % steigen wird. Dafür kann der Schlepper dann gerne auch einen Zusatztank mitschleppen!



Harnstoff-Einspritzung

