

Zeitschrift: Landtechnik Schweiz
Herausgeber: Landtechnik Schweiz
Band: 70 (2008)
Heft: 11

Artikel: Moderne Dieselmotortechnik
Autor: Stirnimann, Roger
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1080501>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

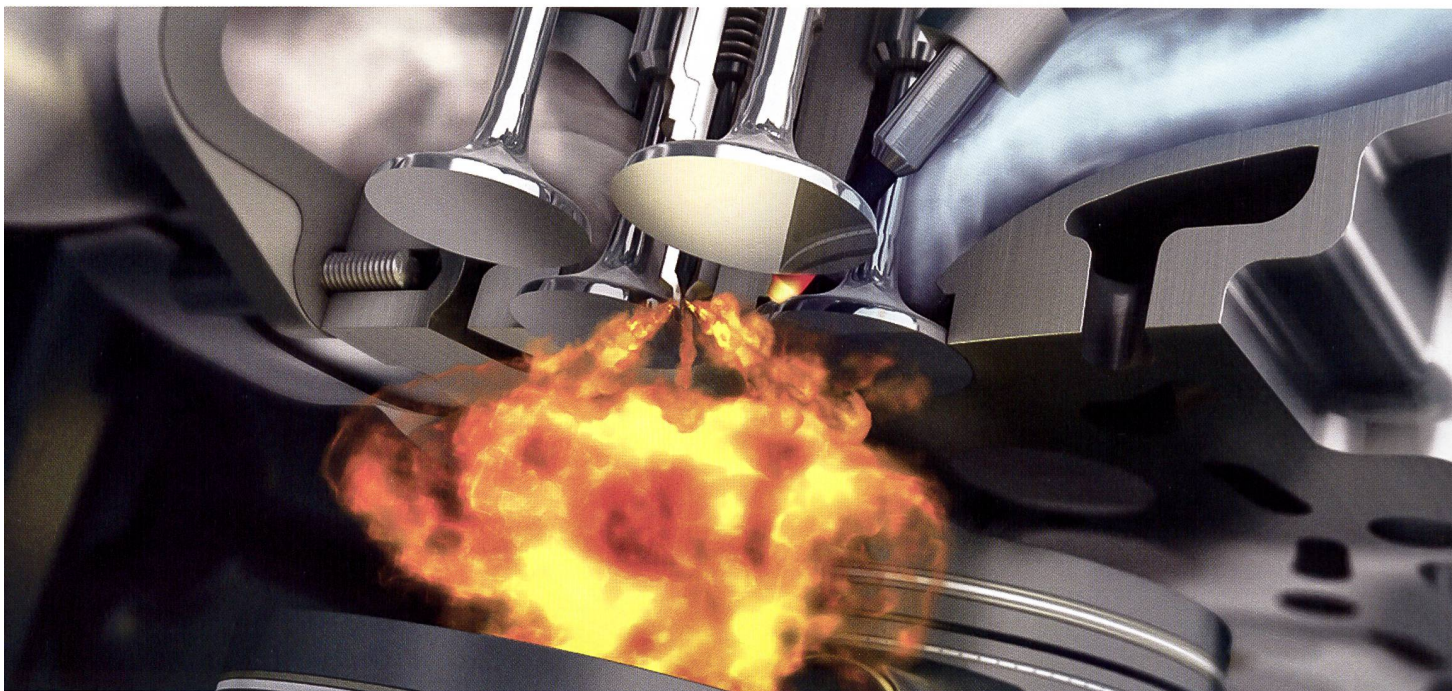
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 03.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>



Die heterogene Verbrennung beim Dieselmotor führt zu einem Zielkonflikt bei der Absenkung der NO_x - und Partikel-Emissionen. (Quelle: Bosch)

Moderne Dieselmotortechnik

Die Dieselmotoren-Entwicklung in der Landtechnik schreitet seit der Einführung entsprechender Abgas-Vorschriften Ende der 1990er-Jahre rasant voran. Dieser Beitrag gibt einen Überblick über die Technik zur Einhaltung der aktuellen Stufe 3A.

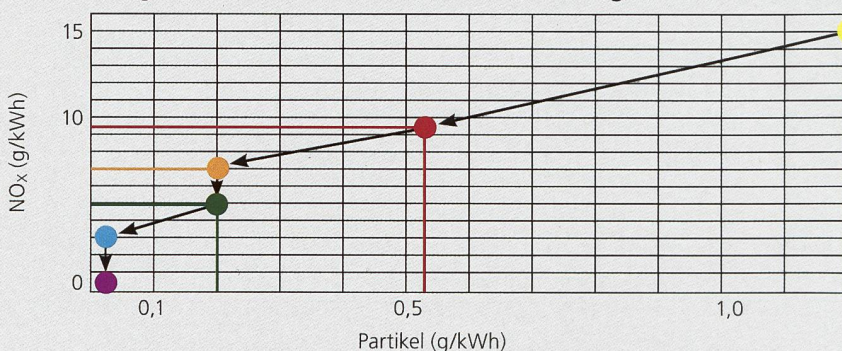
Roger Stirnimann

«Mein Motor macht immer noch grosse Fortschritte...» soll Rudolf Diesel 1895 in einem Brief an seine Frau geschrieben haben, nachdem an seinem Motor zuvor erstmals ein Nutzwirkungsgrad von über 16% ermittelt worden war. Die Dieselmotorentechnologie ist heute auf einem sehr hohen technischen Niveau, die Weiterentwicklung schreitet aber trotzdem in hohem Tempo voran. Treiber hierfür sind die Abgasvorschriften in Europa und Nordamerika. Seit der Einführung solcher Vorschriften für die sogenannten Off-Road-Fahrzeuge (Nicht-Strassen-Fahrzeuge) Ende der 1990er-Jahre wurden der Ausstoss an Stickoxiden NO_x um zwei Drittel und der Ausstoss an Partikeln um rund 80% abgesenkt. Doch damit nicht genug: Von der aktuellen Stufe 3A über die nächste Stufe 3B bis zur letzten Stufe

4 sollen die NO_x - und Partikelemissionen noch einmal um je 90% abgesenkt werden (siehe Grafik 1)!

Der Weg geht damit in Richtung Nullgrenzen und die ganz grossen Herausforderungen stehen deshalb erst noch

Entwicklung der Grenzwerte für NO_x und PM (Leistungsklasse 130–560 kW)



- Vor Einführung der Abgasstufen
- EU-Stufe 1 (entspricht ungefähr Tier 1 in USA)
- EU-Stufe 2 (entspricht ungefähr Tier 2 in USA)
- EU-Stufe 3A (entspricht ungefähr Tier 3 in USA)
- EU-Stufe 3B (entspricht ungefähr Tier 4 interim in USA)
- EU-Stufe 4 (entspricht ungefähr Tier 4 final in USA)

bevor. Zur Veranschaulichung: Ein Stufe-4-Dieselmotor limitiert beim Betrieb in einer mit Smog belasteten Grossstadt nicht nur den Schadstoffausstoss, sondern reinigt die Luft sogar, d.h. die Abgase aus dem Auspuff sind in Bezug auf die Schadstoffe NO_x und Partikel sauberer als die Ansaugluft!

Zielkonflikte erschweren die Entwicklung

Die Herausforderung ist deshalb gross, weil es bei der Schadstoff-Absenkung zwei grosse Zielkonflikte gibt: Einerseits zwischen den beiden Haupt-Schadstoffgruppen Stickoxide (NO_x) und Partikel (PM) und andererseits zwischen den Stickoxiden und dem Kraftstoffverbrauch. So hat beispielsweise die Absenkung der Verbrennungstemperaturen im Zylinder geringere NO_x-Werte zur Folge, erhöht im Gegenzug aber die Partikelbildung und umgekehrt. Gleiches gilt auch für den Zielkonflikt zwischen NO_x und Kraftstoffverbrauch, NO_x-senkende Massnahmen haben meistens negative Auswirkungen auf den Wirkungsgrad und damit auf den Verbrauch; Massnahmen zur Verbesserung des Kraftstoffver-

brauches dagegen führen in der Regel zu höheren Verbrennungstemperaturen und damit zu höheren NO_x-Werten. Die Entwicklung moderner Dieselmotoren stellt deshalb immer eine Gratwanderung zwischen Ökologie und technischer Effizienz dar.

Abgasgesetzgebung

In den USA wurden bereits in den 1970er-Jahren Abgas-Grenzwerte für Strassenfahrzeuge festgelegt, Europa folgte in den 1990er-Jahren mit der Einführung der EURO-Stufen. Die Gesetzgeber beider Kontinente erkannten rasch, dass auch die Off-Road-Maschinen (Land- und Baumaschinen, Schiffe, Diesellokomotiven, Gabelstapler usw.) einen wesentlichen Anteil an den gesamten Stickoxid- und Partikelemissionen verursachten, weshalb in den späten 1990er-Jahren entsprechende Abgas-Richtlinien für diese Fahrzeug-Kategorien eingeführt wurden.

Für Land- und Baumaschinen in Europa gelten seither die in der Richtlinie 97/68/CE festgelegten Grenzwerte. Diese sind leistungsklassenabhängig und werden in mehreren Stufen bis 2014 eingeführt. Im

Gegensatz zu den EURO-Stufen bei Strassenfahrzeugen wird bei den Off-Road-Fahrzeugen nur von «Stufen» (Englisch «Stage» oder «Tier») gesprochen (Stufe 1, Stufe 2, Stufe 3A, Stufe 3B, Stufe 4). Auf Grund unterschiedlicher Grenzwerte und Messzyklen können die EURO-Stufen bei Strassenfahrzeugen nicht direkt mit den Abgasstufen bei den Off-Road-Fahrzeugen verglichen werden.

Für die oberen Leistungsklassen gelten strengere Abgasgrenzwerte und frühere Einführungszeitpunkte als für die unteren Klassen (siehe Tabelle 1).

Dies deshalb, weil grosse Motoren durch die hohen Leistungen einen höheren Gesamtausstoss haben und weil die technischen Massnahmen, die zur Einhaltung der Grenzwerte notwendig sind, solche Motoren nicht im gleichen Verhältnis verteuern wie dies bei den kleineren Aggregaten der Fall wäre. Aus diesem Grund werden Innovationen immer zuerst bei den oberen Leistungsklassen eingeführt und dann auf die unteren Klassen ausgeweitet. Tabelle 2 zeigt eine Auswahl moderner Diesellaggregate in drei Landtechnik-typischen Leistungsklassen.

Tabelle 1 – Grenzwerte und Einführungszeitpunkte der Abgasstufen bei Off-Road-Fahrzeugen (Richtlinie 97/68/CE)

Leistungsklasse	Abgasstufe	Grenzwerte					Gültig ab
		CO (g/kWh)	HC (g/kWh)	NO _x (g/kWh)	NMHC+NO _x	PM (g/kWh)	
18 kW ≤ P < 37 kW	Stufe 1	–	–	–	–	–	–
	Stufe 2	5,5	1,5	8,0	–	0,8	2002
	Stufe 3 A*	5,5	–	–	7,5	0,6	2007
	Stufe 3 B	Analog Stufe 3 A					–
	Stufe 4	Analog Stufe 3 A					–
37 kW ≤ P < 56 kW	Stufe 1	6,5	1,3	9,2	–	0,85	2001
	Stufe 2	5,0	1,3	7,0	–	0,4	2004
	Stufe 3 A*	5,0	–	–	4,7	0,4	2008
	Stufe 3 B*	5,0	–	–	4,7	0,025	2013
	Stufe 4	Analog Stufe 3 B					–
56 kW ≤ P < 75 kW	Stufe 1	6,5	1,3	9,2	–	0,85	2001
	Stufe 2	5,0	1,3	7,0	–	0,4	2004
	Stufe 3 A*	5,0	–	–	4,7	0,4	2008
	Stufe 3 B	5,0	0,19	3,3	–	0,025	2012
	Stufe 4	5,0	0,19	0,4	–	0,025	2014
75 kW ≤ P < 130 kW	Stufe 1	5,0	1,3	9,2	–	0,7	2001
	Stufe 2	5,0	1,0	6,0	–	0,3	2003
	Stufe 3 A*	5,0	–	–	4,0	0,3	2007
	Stufe 3 B	5,0	0,19	3,3	–	0,025	2012
	Stufe 4	5,0	0,19	0,4	–	0,025	2014
130 kW ≤ P < 560 kW	Stufe 1	5,0	1,3	9,2	–	0,54	2001
	Stufe 2	3,5	1,0	6,0	–	0,2	2002
	Stufe 3 A*	3,5	–	–	4,0	0,2	2006
	Stufe 3 B	3,5	0,19	2,0	–	0,025	2011
	Stufe 4	3,5	0,19	0,4	–	0,025	2014

* Bei diesen Abgasstufen werden die Grenzwerte für Kohlenwasserstoff (HC) und Stickoxide (NO_x) nicht einzeln ausgewiesen, sondern als Summe aus Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffen (NMHC) und Stickoxiden (NO_x). Die Massangabe ist ebenfalls g/kWh.

Den Grenzwerten in dieser Tabelle liegt bis und mit Stufe 3A der stationäre Prüfzyklus nach ISO 8178 C1 zu Grunde. Ab Stufe 3B ist ein Wechsel auf den transienten «Non Road Transient Cycle» vorgesehen, welcher die stark variierenden Lastanforderungen in der Praxis besser berücksichtigt.

Ab Stufe 3A muss zudem die Einhaltung der Grenzwerte über die sinnvolle Lebensdauer nachgewiesen werden (Verschlechterungsfaktor).

(Quelle: VDMA)

Der perfekte Pflanzenschutz.

Das sind wir Ihnen schuldig.

ELYTE

- Zentraler Hubarm
- ultrakompakt dank Chassis-Fass-Einheit
- Komplett-Ausrüstung
- 1'000, 1'200 oder 1'600 Liter
- Spritzbalken von 15 bis 28 m



Verlangen Sie mehr als ein gutes Design? Rufen Sie uns an!

Die regionalen Stützpunkte:

1713 St. Antoni:	Gabag Landmaschinen AG	Tel. 026 495 19 33
3110 Münsingen:	J. Wüthrich, Landmaschinen	Tel. 031 721 17 17
3216 Ried b. Kerzers:	Urs Maeder Landmaschinen AG	Tel. 031 755 51 94
3225 Müntschemier:	Jampen Landmaschinen AG	Tel. 032 313 24 15
3232 Ins:	Umatec - Fenaco	Tel. 032 312 03 70
3272 Walperswil:	Steck Garage & Landmaschinen	Tel. 032 396 15 66
3312 Fraubrunnen:	Hans Anliker AG, Landmaschinen	Tel. 031 767 73 12
3315 Bätterkinden:	Wyss Landtechnik	Tel. 032 665 33 35
4657 Dulliken:	Limacher & Wyser GmbH	Tel. 062 291 41 87
5606 Dintikon:	Franz Kuhn, mech. Werkstatt	Tel. 056 624 30 20
6287 Aesch:	Grunderco SA	Tel. 041 917 27 27
8173 Neerach:	Jucker AG, Landtechnik	Tel. 044 858 22 73
8451 Kleinandelfingen:	Kurt Freitag, Landmaschinen	Tel. 052 319 18 84
8459 Volken:	Ulrich Ritzmann	Tel. 052 318 14 54
8587 Oberaach:	Jakob Hofer AG, Landmaschinen	Tel. 071 411 63 36
8714 Feldbach:	Fritz Elmer, Landmaschinen	Tel. 055 244 24 16
8934 Knonau:	Hausheer & Sidler Landmaschinen AG	Tel. 044 767 14 87
9313 Muolen:	Bruno Ebnetter, Landmaschinen	Tel. 071 411 22 90
9548 Matzingen:	Schneider Landmaschinen	Tel. 052 376 16 95

FISCHER
BERTHOUD

FISCHER neue GmbH
Ihr Pflanzenschutz-Spezialist
1868 Collombey-le-Grand, En Boverly A
Tel. 024 473 50 80
Filiale: 8552 Felben-Wellhausen
Tel. 052 765 18 21
www.fischer-gmbh.ch

Ihre Hilfe sorgt für lebendige Berggebiete.
PC 80-32443-2

Schweizer Berghilfe
Aide Suisse aux Montagnards
Aiuto Svizzero ai Montanari
Agid Svizzer per la Muntogna

TEWO

Telefon 044 712 60 60, www.berghilfe.ch

FELLA

AGRAMA, Bern
Halle 632, Stand C 001

Super Frühbezugsrabatt!



Kaufen Sie keine Futterernte-Maschine ohne einen Preis-Leistungsvergleich mit FELLA. Scharf kalkulierte Preise dank Direktvertrieb zu Ihrem Landmaschinen-Händler.

Zusätzliche Frühbestellprämien

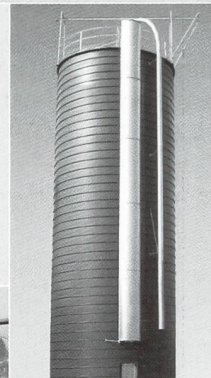
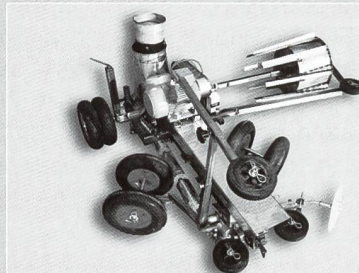
Fr. 300.- bis Fr. 3500.-
bis 30. November 2008

FELLA Schweiz
www.fella-werke.de

026 419 28 71
fella-schweiz@bluewin.ch

Stocker Fräsen & Metallbau AG

Schweizer Fabrikat – führend in Technik, Preis und Qualität



www.silofraesen.ch



Silofräsen
Pferdemistabsauganlagen
Gärfuttersilo



Böllistrasse 422 • CH-5072 Oeschgen • 062 871 88 88
Fax 062 871 88 89 • Mobile 079 211 20 73
www.silofraesen.ch • info@silofraesen.ch

Einhaltung der Stufe 3A: Aktuelle Dieselmotortechnik

Aufladung

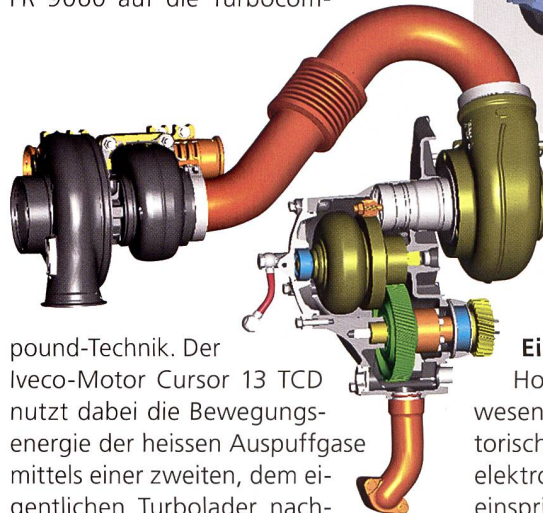
Vier Ventile pro Zylinder, Turbolader und Ladeluftkühlung gehören in den Leistungsklassen ab 100 PS mittlerweile zum Standard (Tabelle 2). Die Vierventiltechnik ermöglicht eine bessere Zylinderfüllung mit Luft und erlaubt zudem eine mittige und vertikale Anordnung der Einspritzdüsen. Motoren mit Zweiventiltechnik kommen nur noch in den Klassen unter 100 PS zur Anwendung, wie das Beispiel des Perkins-Motors 1104D-44TA im Claas Axos 340 zeigt. Die Turbolader sind meistens mit Wastegate-Ventilen ausgestattet, damit diese schon bei tieferen Drehzahlen genügend hohe Ladedrücke aufbauen.

Motoren mit externer gekühlter Abgasrückführung werden zunehmend mit variablen Turboladern bestückt (Variable Geometry Turbocharger VGT), weil sich damit die Rückföhraten genauer steuern lassen. VGT-Lader werden so ausgelegt, dass im Nennleistungspunkt des Motors der gewünschte Ladedruck erreicht wird. Dem Ladedruckabfall bei sinkender Motordrehzahl wird über das Verengen des Zuströmquerschnittes zum Turbinenlaufrad entgegengewirkt, meistens durch verstellbare Leitschaufeln. Vertreter mit dieser Technik sind beispielsweise die PowerTech Plus-Motoren von John Deere oder die ACERT-Motoren C7 und C9 von Caterpillar.

Alternativ zu den VGT-Ladern werden vermehrt auch zweistufige Aufladun-

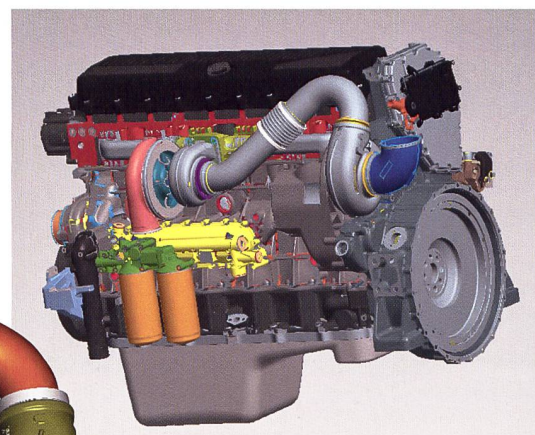
gen mit zwei freilaufenden und in Reihe geschalteten Turboladern eingesetzt, wovon der eine als Niederdruck- und der andere als Hochdrucklader ausgeführt ist. Caterpillar setzt diese Technik beispielsweise bei den grösseren ACERT-Motoren C13 und C15 ein.

Als bisher einziger Landtechnik-Hersteller setzt New Holland beim Feldhäcksler FR 9060 auf die Turbocom-



pound-Technik. Der Iveco-Motor Cursor 13 TCD nutzt dabei die Bewegungsenergie der heissen Auspuffgase mittels einer zweiten, dem eigentlichen Turbolader nachgeschalteten Turbine, die diese in mechanische Energie umwandelt und über eine hydrodynamische Kupplung auf das Motor-Schwungrad zurückführt (siehe Bild oben).

Turbocompound-Motoren werden seit Jahren u.a. vom schwedischen Lastwagenhersteller Scania verbaut und können ihre Vorteile bezüglich Wirkungsgrad insbesondere bei hohen Drehzahlen und hoher Last ausspielen; ein Betriebszustand, welcher beim Feldhäcksler-Einsatz sehr typisch ist.



New Holland setzt als bisher einziger Landtechnik-Hersteller auf Turbocompound. (Quelle: New Holland)

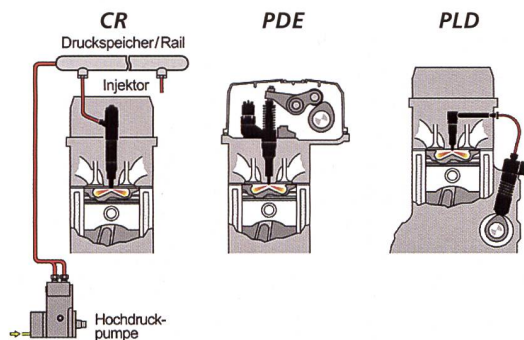
Einspritzsysteme

Hohe Einspritzdrücke spielen eine wesentliche Rolle bei der innermotorischen Partikel-Reduktion. Die elektronisch geregelten Hochdruckeinspritzsysteme Common Rail (CR), Pumpe-Leitung-Düse (PLD) sowie Pumpe-Düse-Einheit (PDE) gehören bei modernen Stufe-3A-Diesellaggregaten deshalb mittlerweile zum Standard (Bild Seite 8).

Einzig in den Leistungsklassen unter 100 PS werden noch mechanisch geregelte Verteiler-Einspritzpumpen eingesetzt. Bei der Pumpe-Düse-Einheit bilden die Einzeleinspritzpumpe und die Einspritzdüse eines jeden Motorzylinders eine Einheit, die meist von einer obenliegenden Nockenwelle über Kipphebel

Tabelle 2 – Moderne Dieselmotoren – eine Auswahl

Motorentyp	Iveco Cursor 13 TCD	Sisu Citius 84 CTA	Deutz TCD 2013	Caterpillar C9 ACERT	John Deere PowerT. Plus 4045	Perkins 1104D-44TA
Anzahl Zylinder	6	6	6	6	4	4
Anzahl Ventile/Zyl.	4	4	4	4	4	2
Hubraum	12.9 l	8.4 l	7.1 l	8.8 l	4.5 l	4.4 l
Turbolader	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Ladeluftkühlung	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Einspritzsystem	Pumpe-Düse	Common Rail	Common Rail	HEUI	Common Rail	Verteiler-Pumpe
Einspritzregelung	Elektronisch	Elektronisch	Elektronisch	Elektronisch	Elektronisch	Mechanisch
Besonderheiten	Interne Abgasrückführung, Turbo-Compound	SCR-Abgasnachbehandlung	Externe gekühlte Abgasrückführung	Externe gekühlte Abgasrückführung, Variable Turbolader-Geometrie	Externe gekühlte Abgasrückführung, Variable Turbolader-Geometrie	Interne Abgasrückführung
Erfüllt derzeit Abgasstufe...	3A (130–560 kW)	3A (130–560 kW)	3A (130–560 kW)	3A (130–560 kW)	3A (75kW ≤ P < 129kW)	3A (56kW ≤ P < 75kW)
Einbaubeispiel	Feldhäcksler New Holland FR 9060	Traktor Massey Ferguson 8690	Traktor Fendt Vario 936	Systemschlepper Claas Xerion 3300	Traktor John Deere 6430	Traktor Claas Axos 340
Nennleistung bei dieser Anwendung	395 kW / 537 PS (ISO 14396)	250 kW / 340 PS (ISO 14396)	243 kW / 330 PS (ECE R24)	224 kW / 305 PS (ECE R24)	92 kW / 125 PS (ECE R24)	74 kW / 100 PS (ECE R24)



Die Hochdruckeinspritzsysteme Pumpe-Düse und Common Rail sind bei modernen Dieselmotoren ab 100 PS vorherrschend. (Quelle: Bosch)

betätigt wird. Elektronisch gesteuerte, schnell schaltende Magnetventile bestimmen den optimalen Einspritzbeginn und die exakte Einspritzmenge. PDE-Systeme erlauben auf Grund der hohen Steifigkeit Einspritzdrücke bis ca. 2000 bar. Ein Vertreter mit klassischem PDE-System ist der in der Tabelle dargestellte Cursor-Motor 13 TCD von Iveco. Auch das HEUI-System von Caterpillar (Hydraulic Electronic Unit Injection) gehört zur Gruppe der Pumpe-Düse-Systeme, hier wird der Druck aber über einen hydraulischen Druckverstärker innerhalb der Pumpe-Düse-Einheit aufgebaut. Sehr ähnlich wie das PDE aufgebaut ist das PLD-Einspritzsystem. Hier sitzen die Einzeleinspritzdüsen im Gegensatz zur Pumpe-Düse-Einheit aber nicht oben, sondern seitlich am Motor und der Kraftstoff wird über kurze Hochdruckleitungen mit bis zu 1800 bar zu den Düsenhalterkombinationen an den Zylindern geführt. Nachteilig bei dennockengesteuerten PLD- und PDE-Systemen ist die Abhängigkeit der erreichbaren Einspritzdrücke von der Motordrehzahl und der Einspritzmenge. Diese steigen zudem während der Einspritzdauer an und fallen bis zum Einspritzende wieder ab.

Bei der Speichereinspritzung Common Rail sind Druckerzeugung und Einspritzung voneinander entkoppelt. Der Einspritzdruck wird unabhängig von Motordrehzahl und Einspritzmenge von einer Hochdruckpumpe erzeugt. Der unter hohem Druck stehende Kraftstoff wird in einer gemeinsamen Speicherleiste (Common Rail) gespeichert und dann

über Hochdruckleitungen zu den magnetventilgesteuerten Injektoren geführt. Dadurch können die für die jeweiligen Betriebsbedingungen optimalen Einspritzdrücke eingestellt und während der Einspritzung aufrechterhalten werden. Zusammen mit den grösseren Möglichkeiten bei der Formung last- und drehzahlabhängiger Einspritzverläufe (z. B. Piloteinspritzung, mehrfach unterteilte Haupteinspritzung oder Nacheinspritzung), bieten Common Rail-Systeme den grösseren Spielraum zur Umsetzung von Massnahmen zur Einhaltung der Lärm- und Abgasemissionen. Die Maximaldrücke liegen bei den heutigen Landtechnik-Motoren bei ca. 1600 bar.

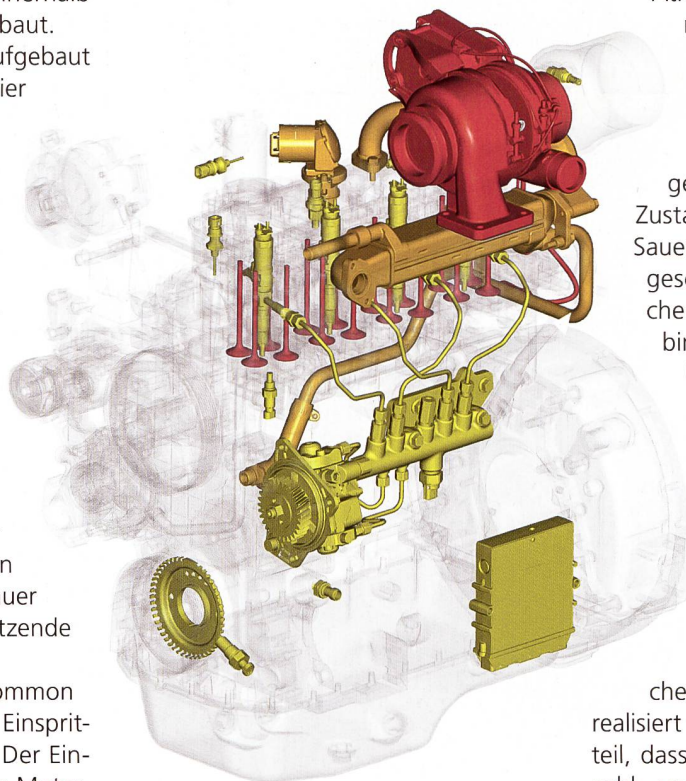
Ein Blick zur Lastwagenbranche zeigt, dass es in Zukunft auch noch höher geht: Scania markiert derzeit mit 2400 bar die Fahnnenspitze! Das gemeinsam mit Cummins entwickelte XPI-Common Rail arbeitet mit zweistufigem Druckaufbau. Auch Bosch hat gerade eben eine neue Common Rail-Generation vorgestellt und stellt sogar 2500 bar in Aussicht. Erreicht werden soll dies durch einen zusätzlichen hydraulischen Drucküber-

setzer im Injektor. Damit dürfte sich die Common Rail-Technik längerfristig, zumindest in den oberen Leistungsklassen, wohl endgültig durchsetzen.

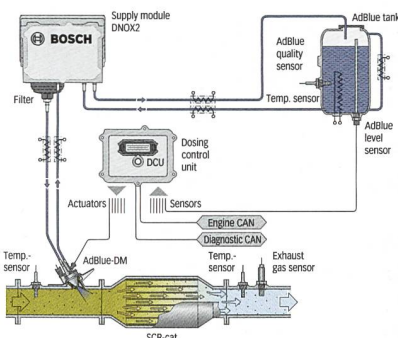
Reduktion von NO_x – zwei Strategien

Mit der Einführung der Stufe 3A ging eine weitere Absenkung der Stickoxide einher, welche mit den bisherigen innermotorischen Massnahmen nicht mehr zu erreichen war. Die Hersteller von Dieselmotoren verfolgen seither zwei unterschiedliche Technik-Strategien zur Verminderung des NO_x-Ausstosses: Vermeiden der Entstehung im Zylinder mittels AGR (Abgasrückführung) oder ausermotorische Nachbehandlung mittels SCR (Selektive Katalytische Reduktion). Die Abgasrückführung ist ein effizientes Mittel zur innermotorischen Reduktion der Stickoxide (NO_x). NO_x entsteht, wenn der Sauerstoff und der Stickstoff in der Luft in einer Umgebung mit hohem Druck und hoher Temperatur eine Reaktion eingehen. Dieselmotoren arbeiten mit hohen Verdichtungsverhältnissen und mageren Kraftstoffgemischen. Dies hat eine sauerstoff- und stickstoffreiche Atmosphäre im Verbrennungsraum zur Folge, die zur NO_x-Bildung führt. Durch Rückführung eines Teils der Abgase in den Verbrennungsraum wird die Menge an überschüssiger Luft reduziert, so dass ein Zustand mit weniger verfügbaren Sauerstoff- und Stickstoffmolekülen geschaffen wird, die sich in einer chemischen Reaktion zu NO_x verbinden können.

Unterschieden wird zwischen interner und externer gekühlter Abgasrückführung. Bei der internen AGR wird entweder das Auslassventil während des Ansaugtaktes oder das Einlassventil während des Ausstosstaktes kurz geöffnet. Beide Methoden können durch einfache Modifikation der Nockenwelle realisiert werden, haben aber den Nachteil, dass die AGR stetig in allen Drehzahl- und Lastbereichen arbeitet. Zur Anwendung kommt die interne AGR u.a. in den in der Tabelle aufgeführten Motoren von Iveco und Perkins. Bei der externen gekühlten AGR wird dem Abgasstrom eine bestimmte Ab-



Moderne Dieselmotortechnik auf einen Blick: Gekühlte Abgasrückführung, Common Rail, Vierventiltechnik, Turbolader mit variabler Geometrie und elektronische Steuerungseinheit. (Quelle: John Deere)



Legende: Bei der SCR-Abgasnachbehandlung werden die Stickoxide im Abgasstrang vermindert. (Quelle: Bosch)

gasmenge entnommen, durch einen Kühler geleitet und anschliessend über ein Membranventil wieder der Ansaugluft beigemischt. Die AGR-Rückführraten liegen bei den heutigen Stufe 3A-Dieselmotoren im Teillastbereich bei 10–15 % und gehen bei Volllast gegen Null. Die gekühlte AGR ist aufwendiger und erfordert zusätzliche Kühlkapazität, ermöglicht aber durch die elektronische Steuerung des Membranventils

eine höhere Leistungsdichte und eine bessere Drehmomentsteuerung. Durch die Kühlung werden zudem die negativen Auswirkungen auf den Kraftstoffverbrauch vermindert. Zur Anwendung kommt sie beispielsweise bei Motoren von Deutz, Caterpillar und John Deere (siehe Tabelle).

Ein anderer Ansatz zur NO_x -Absenkung wird mit der Selektiven Katalytischen Reduktion (SCR) verfolgt. Motoren mit diesem Abgasnachbehandlungssystem werden durch innermotorische Massnahmen auf niedrigen Kraftstoffverbrauch und tiefe Partikel-Emissionen getrimmt. Die dadurch erhöhten NO_x -Emissionen werden durch Einsprühen einer wässrigen Harnstofflösung vor einem speziellen Abgaskatalysator in den Abgasstrom wieder vermindert. Der Harnstoff wird im Katalysator durch eine passive Umwandlung zuerst in Ammoniak (NH_3) umgewandelt, welcher anschliessend mit den NO_x - und Sauerstoff-Molekülen im Abgas reagiert. Gebildet wird dabei Wasser und Luftstickstoff. Die Harn-

stofflösung trägt den Markennamen Adblue und muss in einem separaten Zusatztank mitgeführt werden (Siehe auch Illustration SCR-System). Da ein SCR-Motor grundsätzlich auch ohne Adblue funktionieren würde, ist die Motorelektronik so programmiert, dass sie im Falle einer Funktionsstörung oder gar eines leeren Adblue-Tankes die Motorleistung massiv reduziert. SCR wird seit einigen Jahren bei LKW's eingesetzt (siehe Kasten). Massey Ferguson ist der erste Landtechnik-Hersteller, welcher die SCR-Technologie beim neuen Gross-tractor 8690 einsetzt (Sisu-Motor Citius 84 CTA).

Motoren mit SCR haben gegenüber solchen mit AGR grundsätzlich einen Vorteil beim Dieselverbrauch, weil der direkte Zielkonflikt zwischen Stickoxiden und Verbrauch umgangen werden kann. Berücksichtigt werden muss dabei allerdings auch der Verbrauch an Adblue, welcher bei der Stufe 3A bei rund 3 % des Dieselverbrauches liegt sowie die Versorgungslogistik. ■

Seitenblick zu den schweren Nutzfahrzeugen

Wie im Abschnitt «Abgasgesetzgebung» bereits erwähnt, wurde der Schadstoffausstoss der Verbrennungsmotoren in Strassenfahrzeugen einige Jahre früher limitiert als bei Off-Road-Fahrzeugen. Die Strassenfahrzeuge nehmen deshalb eine technologische Vorreiterrolle ein und es können – insbesondere aus den Entwicklungen bei schweren Nutzfahrzeug-Dieselmotoren – jeweils gewisse Tendenzen für den Off-Road-Bereich abgelesen werden.

Vierventiltechnik, Turbolader, Ladeluftkühlung und elektronisch geregelte Hochdruck-Einspritzsysteme gehören selbstverständlich auch bei Nutzfahrzeugen zum Standard. Besonders interessant war die Entwicklung in den vergangenen fünf Jahren hinsichtlich der Technik-Strategien zur Absenkung der Stickoxide. Auf der internationalen Nutzfahrzeugmesse «IAA Nutzfahrzeuge» 2004 in Hannover präsentierten die meisten LKW-Hersteller im Hinblick auf die damals bevorstehende Einführung von EURO 4 Lösungen auf SCR-Basis, allen voran Mercedes Benz, welche nicht nur EURO 4- sondern auch gleich EURO 5-Motoren vorstellte. Die Technik für die beiden Stufen war identisch, bei EURO 5 wurden einfach höhere Adblue-Mengen verwendet. Die anderen Hersteller mussten daraufhin nachziehen und boten fortan neben EURO 4- gleichzeitig auch EURO 5-Aggregate an, weit vor dem offiziellen Einführungstermin dieser nächsten Stufe (2009). Auch MAN und Scania, welche schon damals die Meinung vertraten, dass die Abgasrückführung der elegantere Weg zur Reduktion der Stickoxide sei, mussten sich mangels marktreifer Lösungen dem Diktat des Marktes beugen und EURO 5-Motoren anbieten, was damals eben nur über den SCR-Pfad möglich war. Die Verfechter der selektiven ka-

talytischen Reduktion waren überzeugt, dass EURO 5 ohne SCR ohnehin nicht zu schaffen wäre.

Doch die dieselmotorische Entwicklung blieb nicht stehen und MAN und Scania stellten an der diesjährigen IAA Nutzfahrzeuge ihre neuesten Motorenentwicklungen vor, welche EURO 5 ohne SCR erfüllen. MAN erreicht dies mit hohen Abgas-Rückführraten, zweistufiger Aufladung, doppelter Ladeluftkühlung, 9-Loch-Düsen und Einspritzdrücken bis 1800 bar sowie einem nachgeschalteten Oxydationskatalysator. Scania setzt dagegen auf eine zweistufige Kühlung der rückgeführten Abgase, variable Turbolader-Geometrie und auf das Common Rail-Einspritzsystem XPI mit zweistufigem Druckaufbau, welches Maximaldrücke von stolzen 2400 bar erreicht! Beide Hersteller versprechen Kraftstoff-Verbrauchswerte, welche die Gesamtverbräuche an Diesel und Adblue bei den SCR-Lösungen nicht übersteigen. Selbst EURO 6 trauen sich beide Hersteller mittlerweile ohne SCR zu.

Wie aus diesen genannten Zutaten hervorgeht, ist der technische Aufwand auf Basis der Abgasrückführung dabei allerdings recht hoch! Warum halten diese beiden Hersteller dermassen stark an der Abgasrückführung fest, wenn sich die Abgasnormen doch auch mit vergleichsweise einfacher Technik und SCR einhalten lassen? Da sind einerseits die Argumente, dass die Kunden es bevorzugen, wenn sie einfach nur Diesel und keine Zusatzstoffe tanken müssen und dass SCR weiterhin nicht flächendeckend zur Verfügung steht, andererseits spielt sicher auch das Wissen im Hinterkopf der MAN- und Scania-Ingenieure eine Rolle, dass sich die zukünftig im Fokus stehenden homogenen Brennverfahren wie z. B. HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) nur im Zusammenspiel mit einer Abgasrückführung realisieren lassen.