

## Des mesures pour un air plus propre

**Les jalons sont posés. Les fabricants de moteurs diesel pour les véhicules agricoles non routiers (tels que tracteurs, chargeuses, moissonneuses-batteuses ou ensileuses) ont déjà présenté les premiers moteurs répondant aux normes d'émission de la phase III B. Tous les moteurs d'une puissance de 130 kW à 559 kW fabriqués après le 1.1.2011 doivent satisfaire à ces critères.**

Que recouvrent exactement ces prescriptions sur les gaz d'échappement? Pour l'essentiel, il est question du rejet de deux polluants: les particules fines cancérigènes (PM) et les oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ).

De nombreuses approches différentes en matière de moteur peuvent influencer sur la composition des gaz d'échappement. Chaque mesure visant à réduire les émissions de substances nocives entraîne de nombreuses conséquences, parfois indésirables, sur d'autres aspects connexes. En principe, on distingue les « mesures internes au moteur » et le « post-traitement externe des gaz d'échappement ». Jusqu'à la phase IIIA encore en vigueur actuellement, les constructeurs pouvaient répondre aux exigences uniquement par des mesures internes au moteur. Pour réaliser la phase IIIB, ils doivent tous intégrer un post-traitement externe, à l'exception de JCB.

Le grand problème des mesures internes au moteur réside dans l'existence d'un conflit d'objectif entre les rejets des deux groupes de polluants, les  $\text{NO}_x$  et les PM. Les particules fines (sur tout la suie) résultent d'une combustion incomplète. Les dioxydes d'azote se dégagent lorsque la température de combustion est très élevée et que l'azote de l'air réagit avec l'oxygène. Le conflit d'objectif: de nombreuses mesures pour réduire les émissions de particules conduisent directement ou indirectement à augmenter la température de combustion, ce qui se traduit par une hausse des émissions de  $\text{NO}_x$ . D'un autre côté, beaucoup de mesures limitant la production de  $\text{NO}_x$  entraînent une combustion moins chaude et donc une recrudescence des émissions de particules. Par ailleurs, certaines mesures internes au moteur destinées à juguler les émissions de  $\text{NO}_x$  occasionnent une consommation spécifique de carburant plus élevée.

Aujourd'hui, des technologies de post-traitement externe des gaz d'échappement existent et sont techniquement au point. Leur mise en œuvre comporte toutefois des inconvénients connus, tels que des coûts d'achat et d'exploitation du moteur plus élevés ou des contraintes croissantes concernant le pilotage et l'utilisation du moteur. Le post-traitement externe des gaz d'échappement permet d'éliminer très efficacement les particules et les oxydes d'azote. Les émissions les plus basses combinées à une faible consommation de carburant sont obtenues lorsque les particules ainsi que les oxydes d'azote sont éliminés en externe des gaz d'échappement. Néanmoins, les systèmes de post-traitement externe ne sont aujourd'hui utilisés que s'il n'existe pas d'autre solution pour respecter les normes.

Dans la pratique actuelle, les fabricants de moteurs optent donc pour l'une des stratégies suivantes. La plupart d'entre eux, comme le groupe Case New Holland (Iveco), satisfont aux critères de la phase III B en configurant les moteurs de manière à minimiser les rejets de particules. L'important rejet de  $\text{NO}_x$  qui en résulte est éliminé par post-traitement avec le système SCR. La deuxième stratégie, choisie par exemple par John Deere, consiste à produire le moins possible de  $\text{NO}_x$  dans le moteur, puis à éliminer par un filtre en dehors du moteur les particules qui sont rejetées en quantité relativement importante.

### Mesures de réduction des émissions polluantes

Pour limiter dans le moteur la production d'oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ), il faut maintenir la température de combustion la plus basse possible. Ceci est réalisé en refroidissant l'air d'admission et/ou par un pilotage ciblé de la combustion. Pour réduire la production de particules,



**Die Weichen sind gestellt. Die Hersteller von Dieselmotoren für landwirtschaftliche Offroadfahrzeuge wie Traktoren, Laderfahrzeuge, Mähdrescher oder Feldhäcksler haben bereits die ersten Motoren vorgestellt, die die Abgasnormen der Stufe III B erfüllen.**

**Alle Motoren mit 130 kW bis 559 kW Leistung, welche nach dem 1.1.2011 hergestellt werden, müssen diesen Anforderungen entsprechen.**





# Massnahmen für saubere Luft

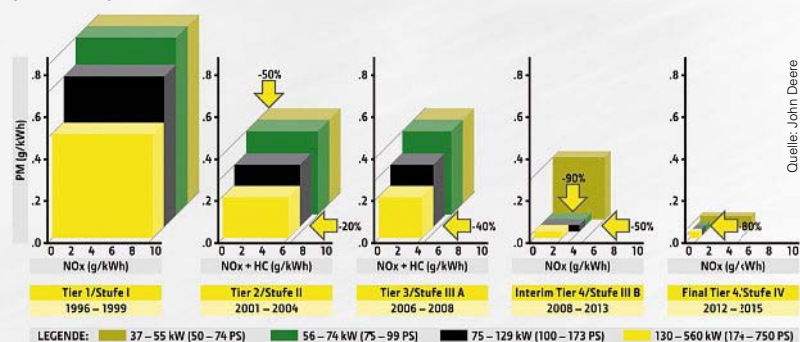
Worum geht es eigentlich genau bei den Abgasvorschriften? Im Wesentlichen dreht sich alles um den Ausstoss der beiden Schadstoffe der krebserregenden Feinstaubpartikel (PM) und der Stickoxide (NO<sub>x</sub>).

Die Zusammensetzung der Abgase kann im Motor mit vielen verschiedenen Ansatzpunkten beeinflusst werden. Jede Massnahme, mit der eine Reduktion des Schadstoffausstosses angestrebt wird, hat wiederum zahlreiche, möglicherweise unerwünschte Auswirkungen auf andere, vernetzte Zusammenhänge im Motor. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen «innermotorischen Massnahmen» und der «externen Abgasnachbehandlung». Bis zur aktuell noch geltenden Stufe III A konnten die Hersteller die Anforderungen

ausschliesslich mit innermotorischen Massnahmen erfüllen. Zur Erfüllung der Stufe III B müssen alle Hersteller mit Ausnahme von JCB eine Abgasnachbehandlung einbauen.

Das grosse Problem der innermotorischen Massnahmen besteht darin, dass zwischen dem Ausstoss der beiden Schadstoffgruppen NO<sub>x</sub> und PM ein Zielkonflikt besteht. Fein-

**Emissionsvorschriften für nicht strassengebundene Maschinen und Fahrzeuge (EPA und EU): 37 – 560 kW (50 – 750 PS)**  
**Exigences relatives aux émissions des machines et véhicules non routiers (EPA et UE): 37 – 560 kW (50 – 750 ch)**





## Législation en matière de gaz d'échappement

Les prescriptions sur les gaz d'échappement en vigueur dans l'UE et reprises simultanément par la Suisse établissent une distinction entre la circulation routière et le secteur non routier. Dans le premier cas, les phases «Euro 0» à «Euro 6» s'appliquent aux moteurs diesel. Actuellement, la phase Euro 5 est mise en œuvre dans le domaine de la circulation routière. La directive 97/68/CE s'applique aux engins non routiers et comprend les phases I à IV. Ces phases ont été dérivées des phases américaines appelées «Tier 1» à «Tier 4» avec toutefois certaines dissemblances. La différence majeure réside dans le fait que, dans la législation américaine, les moteurs sont répartis en 10 classes de puissance de 0 à plus de 560 kW, alors que l'UE a seulement fixé 5 classes de 19 à 559 kW. Les limites maximales de rejets polluants peuvent varier pour les 5 classes de puissance au sein d'une même phase. La grande différence entre les classes est que la phase suivante entre en vigueur avec un décalage temporel. Les moteurs d'une puissance de 130 kW à 559 kW fabriqués à partir de début 2011 doivent remplir les exigences de la phase III B. Pour les classes inférieures, les critères de la phase III B entreront en vigueur début 2012 (56 à 129 kW) et début 2013 (37 à 55 kW). Pour les moteurs diesel d'une puissance de 19 à 37 kW, les contraintes de la phase III A restent valables jusqu'à nouvel ordre. Aucun règlement n'existe dans l'UE pour ceux dont la puissance n'atteint pas 19 kW ou excède 560 kW.

## Abgasgesetzgebung

Die in der EU geltenden und von der Schweiz jeweils zeitgleich übernommenen Abgasvorschriften unterscheiden zwischen den Bereichen «Strassenverkehr» und «Offroad». Im Strassenverkehr gelten für Dieselmotoren die mit «Euro 0» bis «Euro 6» bezeichneten Abstufungen. Aktuell befindet sich im Bereich Strassenverkehr die Euro 5 Etappe in der Umsetzung. Im Offroadbereich gilt die Richtlinie 97/68/EC, wobei die Abstufungen mit «Stufe I bis Stufe IV» bezeichnet werden. Diese Abstufungen wurden von den US-amerikanischen Abstufungen mit den Bezeichnungen «Tier 1» bis «Tier 4» abgeleitet, wobei gewisse Unterschiede bestehen. Ein Hauptunterschied besteht darin, dass die Motoren in der US-Gesetzgebung in 10 Leistungsklassen von Null bis über 560 kW Leistung unterteilt sind, während in der EU nur 5 Leistungsklassen von 19 bis 559 kW existieren. Die Schadstoffgrenzwerte können jeweils für die 5 Leistungsklassen innerhalb einer Stufe unterschiedlich hoch sein. Der Hauptunterschied zwischen den Leistungsklassen besteht jedoch darin, dass die jeweils folgende Stufe zeitlich versetzt in Kraft tritt. Motoren mit 130 kW bis 559 kW Leistung und einem Herstellungsdatum ab Anfang 2011 müssen die Anforderungen der Stufe III B erfüllen. Für die unteren Leistungskategorien werden die Anforderungen der Stufe III B auf Anfang 2012 (56 bis 129 kW) bzw. Anfang 2013 (37 bis 55 kW) in Kraft treten. Für Dieselmotoren mit einer Leistung von 19 bis 37 kW bleiben bis auf Weiteres die Anforderungen der Stufe III A gültig. Für Dieselmotoren mit einer Leistung von unter 19 kW und über 560 kW besteht in der EU keine Regelung.

la combustion dans le moteur doit être optimale, ce qui nécessite une pression d'injection élevée, une atomisation du carburant la plus fine possible et une bonne alimentation en oxygène.

- **Le refroidissement de l'air de suralimentation nécessite des radiateurs puissants.**

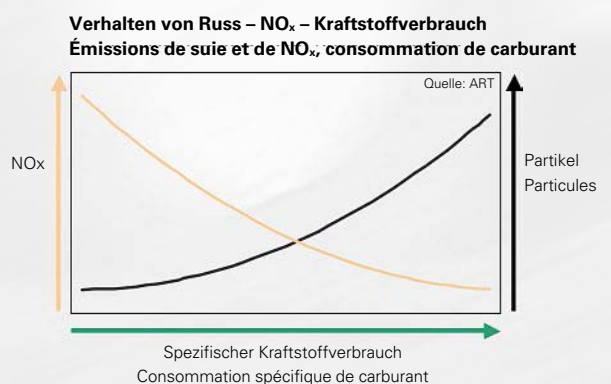
Le refroidissement de l'air de suralimentation, c'est-à-dire le refroidissement de l'air d'admission compressé entre le turbocompresseur et le collecteur d'admission, réduit la température d'admission et donc les émissions de NO<sub>x</sub>. Parmi les effets secondaires positifs, on notera l'allongement de la durée de vie des moteurs grâce à la limitation des contraintes thermiques. On obtient aussi un couple plus élevé pour des régimes moins importants ainsi qu'une meilleure puissance volumique. Un refroidissement important de l'air de suralimentation requiert néanmoins des radiateurs plus performants, autrement dit une plus grande surface de refroidissement (problème de place, taille de guepe des tracteurs John Deere) et un rendement des ventilateurs nettement

supérieur (perte énergétique, consommation de carburant). Dorénavant, le refroidissement de l'air de suralimentation caractérise presque tous les moteurs de la phase III B.

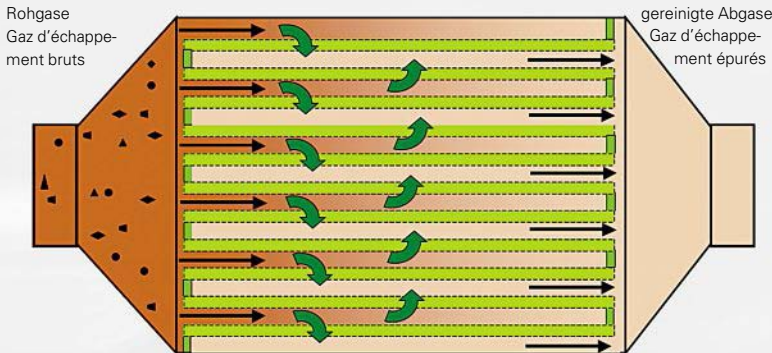
- **La recirculation des gaz d'échappement abaisse la température.**

La recirculation des gaz d'échappement (EGR, de l'anglais Exhaust Gas Recirculation) est un autre procédé répandu qui vise à réduire la température de combustion maximale et donc les rejets de NO<sub>x</sub>. Le principe est simple: dans certaines conditions de fonctionnement, la vanne EGR du moteur s'ouvre. Une quantité de gaz contrôlée et refroidie est redirigée vers le collecteur d'admission et mélangée à de l'air d'admission frais. Comme lors de ce procédé le taux d'oxygène décroît dans l'air d'admission, la température baisse pendant la combustion, ce qui réduit aussi le niveau de NO<sub>x</sub>. Un inconvénient de ce système est que la consommation de carburant et les rejets de particules peuvent s'accroître en raison de la faible présence d'oxygène dans la chambre de combustion.

staubpartikel (vorwiegend Russ) entstehen durch eine unvollständige Verbrennung. Stickoxide entstehen dann, wenn die Verbrennungstemperatur sehr hoch ist und der Luftstickstoff mit Sauerstoff reagiert. Der Zielkonflikt: Viele Massnahmen zur Reduktion des Partikelausstosses führen direkt oder indirekt zu höheren Verbrennungstemperaturen und infolge dessen zu einem Anstieg der NO<sub>x</sub>-Emissionen. Andererseits führen viele NO<sub>x</sub>-Reduktionsmassnahmen zu einer weniger heissen Verbren-



**Diesel-Partikelfilter (DPF) / Filtre à particules diesel (DPF)**



Das Abgas durchströmt die porösen Trennwände des Filters. Dort lagert sich der Russ periodisch oder kontinuierlich zu CO<sub>2</sub> und wenig Asche verbrannt. Les gaz d'échappement traversent les parois poreuses du filtre. La suie s'y dépose. Pour que le filtre ne s'encrasse pas, la suie est brûlée périodiquement ou en continu et transformée en CO<sub>2</sub> et en un peu de cendres.

nung und damit zu einem Anstieg der Partikelemissionen. Weiter können gewisse innermotorische Massnahmen zur Reduktion des NO<sub>x</sub>-Ausstosses zu einem höheren spezifischen Treibstoffverbrauch führen. Technologien für die externe Abgasnachbehandlung sind heute vorhanden und technisch ausgereift. Deren Einsatz bringt jedoch bekanntlich Nachteile mit sich, so etwa höhere Kosten bei Anschaffung und Betrieb des Motors oder steigende Anforderungen betreffend Steuerung und Bedienung des Motorbetriebs. Mit einer externen Abgasnachbehandlung können sowohl Partikel als auch Stickoxide sehr effizient eliminiert werden. Die geringstmöglichen Emissionen in Verbindung mit geringem Treibstoffverbrauch erreicht man also, indem sowohl Partikel als auch Stickoxide extern aus den Abgasen entfernt werden. Die Systeme zur externen Abgasnachbehandlung werden aber heute nur dann praktiziert, wenn die Anforderungen sonst nicht erfüllt werden können. In der heutigen Praxis schlagen die Motorenhersteller deshalb eine der folgenden zwei Strategien ein: Die meisten Hersteller, beispielsweise die Case-New Holland Gruppe (Iveco), erfüllen die Stufe III B, indem sie den Motor so konfigurieren, dass eine möglichst geringe Masse an Partikeln entsteht. Der damit verbundene hohe NO<sub>x</sub>-Ausstoss wird mit einer Abgasnachbehandlung mit dem SCR-System eliminiert. Die zweite

Strategie, die beispielsweise John Deere gewählt hat, besteht darin, im Motor möglichst geringe NO<sub>x</sub>-Emissionen zu erzeugen und dann die relativ grosse Menge an Partikeln ausserhalb des Motors mit einem Partikelfilter aus den Abgasen zu entfernen.

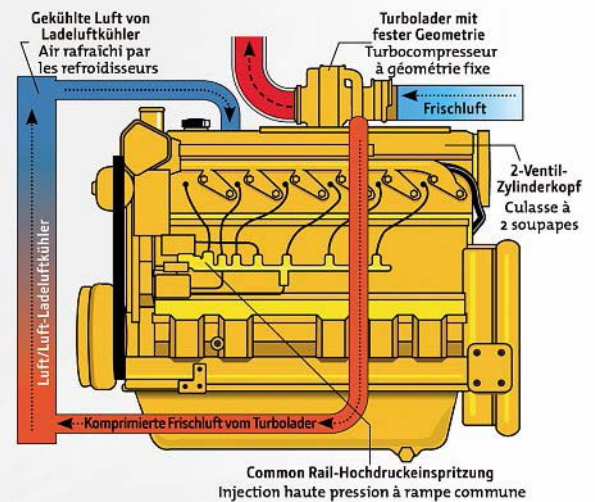
**Massnahmen zur Reduzierung des Schadstoffausstosses**

Um im Motor die Produktion von Stickoxiden (NO<sub>x</sub>) zu begrenzen, muss die maximale bei der Verbrennung auftretende Temperatur möglichst tief gehalten werden. Dieses Ziel wird erreicht durch die Kühlung der Ansaugluft und/oder durch eine gezielte Steuerung der Verbrennung. Um die Produktion von Partikelmasse zu reduzieren, muss die Verbrennung im Motor optimal erfolgen, was einen hohen Einspritzdruck mit möglichst feiner Vernebelung und gute Sauerstoffzufuhr erfordert.

**Ladeluftkühlung verlangt Kühlerleistung**

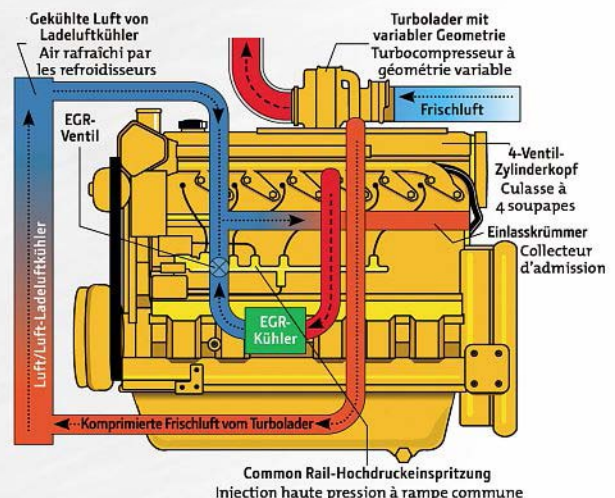
Die Ladeluftkühlung, also die Kühlung der verdichteten Ansaugluft zwischen Turbolader und Ansaugkrümmer, reduziert die Ansaugtemperatur und somit die NO<sub>x</sub>-Emissionen. Als positiver Nebeneffekt erhöht sie die Lebensdauer der Motoren durch geringere thermische Belastung und ermöglicht ein höheres Drehmoment bei niedrigen Drehzahlen sowie eine bessere Leistungsdichte. Eine starke Ladeluftkühlung hat allerdings den

Nachteil, dass eine wesentlich höhere Kühlerleistung benötigt wird. Das erfordert jedoch eine grössere Kühlerfläche (Platzproblem, Wespen-tailenform bei John Deere Traktoren) und ebenfalls eine bedeutend höhere Lüfterleistung (Energieverlust, Treibstoffverbrauch). Die Ladeluftkühlung kommt heute in fast allen Stufe-III-B-Motoren zum Einsatz.



**Abgasrückführung senkt die Temperatur**

Die Abgasrückführung EGR (englisch Exhaust Gas Recirculation) ist ein weiteres verbreitetes Verfahren um die maximale Verbrennungstemperatur und somit den NO<sub>x</sub>-Ausstoss zu reduzieren. Das Prinzip ist einfach: Unter bestimmten Betriebsbedingungen wird das EGR-Ventil des Motors geöffnet. Eine kontrollierte





### • Turbocompresseurs améliorés

Une possibilité de réduction supplémentaire des émissions de NO<sub>x</sub> consiste à renforcer les performances de l'EGR. Ceci requiert une pression d'admission plus élevée, et ce, sur toute la plage de régime dans la mesure du possible. Il existe trois variantes possibles de suralimentation pour améliorer l'alimentation par rapport à un turbocompresseur habituel.

Le **turbocompresseur wastegate** est conçu de manière à générer un flux d'air plus puissant à bas régime pour améliorer le couple du moteur. À régime élevé, la commande wastegate « décharge » une partie de l'air. Les turbocompresseurs wastegate offrent un meilleur répondant ainsi qu'un couple maximal plus élevé sans limitations des dimensions du moteur.

Avec les **turbocompresseurs à géométrie variable (VGT)**, la quantité des gaz d'échappement recirculés et mélangés à de l'air frais s'adapte aux différents besoins. Ceci est réalisé par une gestion moteur spéciale (ECU) qui permet d'ouvrir les ailettes VGT pour une puissance maximale et un rendement optimal. L'intensité de recirculation des gaz d'échappement refroidis dépend de la charge et du régime du moteur. Les ailettes sont partiellement fermées si le flux de gaz est faible. Ainsi, la pression sur les ailettes augmente, la turbine tourne plus vite et génère une pression d'admission plus importante.

Le système d'admission le plus complexe et le plus efficace consiste à monter des **turbocompresseurs en série**. Il offre d'excellentes caractéristiques de couple pour une faible production de NO<sub>x</sub>. Dans cette configuration, de l'air frais est aspiré et comprimé une première fois dans un turbocompresseur basse pression (à géométrie fixe). Cet air comprimé (sous pression) est amené dans un turbocompresseur haute pression (à géométrie variable) où la pression augmente encore. Puis l'air sous pression arrive dans le refroidisseur d'air de suralimentation, où il est refroidi avant de passer dans le collecteur d'admission du moteur. Grâce à la répartition de la compression de l'air sur deux unités, celles-ci peuvent fonctionner à un rendement maximum et à des régimes plus bas. Cela réduit la sollicitation des composants des turbocompresseurs et améliore la fiabilité générale. En outre, les turbocompresseurs en série offrent une puissance volumique plus élevée, un meilleur

couple à bas régime et une fiabilité accrue à haute altitude.

### • Système d'injection du combustible et gestion moteur

Un composant-clé pour limiter les rejets de particules et de NO<sub>x</sub> est la technique d'injection du combustible et la gestion moteur électronique (ECU) correspondante. Ce « cerveau électronique » du moteur traite les signaux de différents capteurs et des cartographies préprogrammées afin d'analyser continuellement en une fraction de seconde d'importantes fonctions du moteur comme la quantité de carburant, le calage d'injection, le rapport air/carburant, le niveau EGR ainsi que de nombreux autres paramètres de commande. Il les pilote et les adapte en fonction des conditions de fonctionnement de manière à obtenir la combustion souhaitée pour chaque situation de charge et de fonctionnement.

L'injection haute pression à rampe commune la plus moderne ne permet pas uniquement de commander et contrôler en permanence tous les paramètres d'injection nécessaires comme la pression, le calage, etc. Elle assure aussi une combustion plus efficace. Les installations les plus récentes, commandées par ordinateur, génèrent d'abord, grâce à une injection multiple, une flamme à faible température dans laquelle plusieurs injections ont lieu. Ce procédé permet de maintenir une faible température de combustion et de réduire les émissions d'oxydes d'azote. Comme la concentration de carburant est moins élevée avec un dispositif à injections multiples, l'approvisionnement en oxygène est meilleur, ce qui peut aussi diminuer les émissions de particules. Il est possible d'adapter le processus d'injection au régime et à la charge: l'efficacité énergétique du carburant s'en trouve globalement améliorée.

### • Filtre à particules très efficace et sans matière consommable supplémentaire

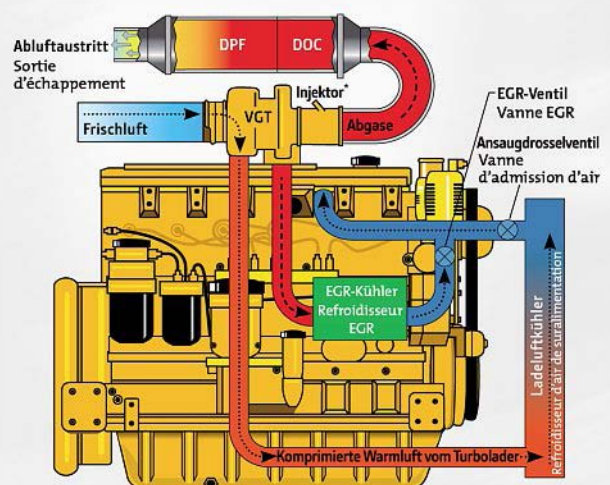
Dans le cadre de la phase III B, John Deere est le seul constructeur à miser actuellement sur le filtre à particules diesel (DPF) pour l'ensemble de sa gamme. Les deux premières séries 7R et 8R équipées d'un filtre à particules monté en usine devraient être présentées en juin. Case New Holland a aussi annoncé son intention d'équiper de DPF les tracteurs de moins de 100 ch.

und abgekühlte Menge wird in den Einlasskrümmer zurückgeführt und mit frischer Ansaugluft vermischt. Da in der Ansaugluft bei diesem Prozess der Sauerstoffgehalt sinkt, verringert sich die Temperatur während des Verbrennungsprozesses, wodurch gleichzeitig auch das NO<sub>x</sub>-Niveau reduziert wird. Ein Nachteil dieses Systems ist, dass aufgrund des geringeren Sauerstoffangebots im Brennraum der Treibstoffverbrauch und der Partikelaustritt höher ausfallen können.

### • Verbesserte Turbolader

Eine Möglichkeit zur weiteren Reduzierung von NO<sub>x</sub>-Emissionen besteht darin, die EGR-Leistung anzuheben. Dies erfordert einen höheren Ladedruck und dies möglichst über den gesamten Drehzahlbereich. Es stehen drei unterschiedliche Aufladungsvarianten zur Auswahl, um das Ladeverhalten gegenüber einem herkömmlichen Turbolader zu verbessern:

Der **Wastegate-Turbolader** ist so aufgebaut, dass er im unteren Drehzahlbereich einen stärkeren Luftfluss entwickelt, um das Drehmoment des Motors bei niedrigen Drehzahlen zu verbessern. Bei höheren Motordrehzahlen «entlädt» das Wastegate-Steuergerät einen Teil der Luft. Wastegate-Turbos bieten ein besseres Ansprechverhalten sowie ein höheres Spitzendrehmoment ohne Einschränkungen hinsichtlich der Motorabmessungen.



\* Für Motoren mit 130 kW (174 PS) und mehr.

Pour les moteurs de 130 kW (174 ch) et plus.



ge elektronische Motorsteuerung (ECU). Dieses «elektronische Hirn» des Motors verarbeitet Signale verschiedener Sensoren und vorprogrammierte Leistungskennfelder, um wichtige Motorfunktionen wie die Kraftstoffmenge, den Einspritzzeitpunkt, das Luft/Kraftstoff-Verhältnis, das EGR-Niveau sowie viele weitere Steuerparameter laufend in Sekundenbruchteilen zu analysieren und zu jedem Betriebszustand passend so zu steuern und abzustimmen, dass in jedem Last- und Betriebszustand die gewünschte Verbrennung erzielt wird.

Die modernste Common Rail-Hochdruckeinspritzung ermöglicht nicht nur eine konstante Steuerung und Kontrolle aller relevanten Einspritzparameter wie Druck, Zeitpunkt usw. sondern sorgt zusätzlich für eine effizientere Verbrennung. Bei modernsten, computergesteuerten Anlagen wird mittels Mehrfach-Kraftstoffeinspritzung zunächst eine Flamme auf niedrigem Temperaturniveau erzeugt, in die dann weitere Einspritzvorgänge erfolgen. Durch dieses Verfahren lässt sich die Verbrennungstemperatur niedriger halten

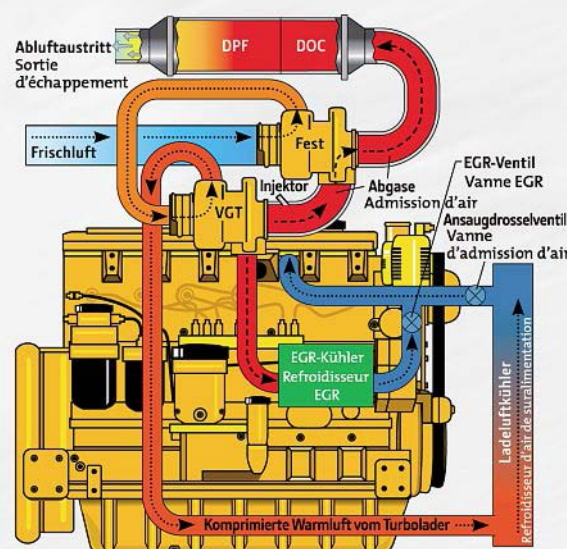
Bei **Turboladern mit variabler Geometrie (VGT)** wird die Menge des zurückgeleiteten und mit Frischluft gemischten Abgases an den jeweiligen Bedarf angepasst. Realisiert wird dies durch eine spezielle Motorsteuerung (ECU), mit der sich die Öffnung der VGT-Klappen so einstellen lässt, dass eine maximale Leistung und ein optimaler Wirkungsgrad erzielt werden. Entscheidend für die Intensität der gekühlten Abgasrückführung sind Belastung und Drehzahl des Motors. Bei schwachem Abgasfluss sind die Klappen teilweise geschlossen. Dadurch erhöht sich der Druck auf die Turbinenschaufeln, die Turbine dreht schneller und erzeugt einen höheren Ladedruck.

Die **Reihenturboladung** ist das komplexeste und wirksamste Ladesystem, welches den besten Drehmomentverlauf bei gleichzeitig tief gehaltener  $\text{NO}_x$ -Produktion ermöglicht. Bei der Reihenturboladung wird zunächst Frischluft in einen Niederdruck-Turbolader (mit fester Geometrie) eingesogen, in der die Luft zum ersten Mal komprimiert wird. Dann wird diese komprimierte bzw. aufgeladene Luft einem Hochdruck-Turbolader (mit variabler Geometrie, VGT) zugeführt, in welchem der Druck noch weiter angehoben wird. Anschliessend wird die Druckluft in den Ladeluftkühler weitergeleitet, wo sie gekühlt und dann an den Einlasskrümmer des Motors übergeben wird. Durch die Verteilung der Lade-

luftverdichtung auf zwei Turbolader können beide Einheiten mit maximalem Wirkungsgrad und geringeren Drehgeschwindigkeiten arbeiten. Dies reduziert die Belastung der Turbolader-Komponenten und verbessert die allgemeine Zuverlässigkeit. Ausserdem bietet die Reihenturboladung eine höhere Leistungsdichte, ein besseres Drehmoment bei niedrigen Drehzahlen und mehr Zuverlässigkeit beim Betrieb in grossen Höhen.

#### • Kraftstoffeinspritzanlage und Motorsteuerung

Eine Schlüsselkomponente zur Verringerung des PM- und  $\text{NO}_x$ -Ausstosses ist die Technik zur Kraftstoffeinspritzung und die dazu gehörige





Les tracteurs de John Deere offriront un dispositif de filtrage des gaz d'échappement avec un catalyseur d'oxydation diesel (DOC) et un filtre à particules diesel (DPF). Le DOC agit sur les gaz d'échappement, limitant ainsi le monoxyde de carbone, les hydrocarbures et certaines particules solides. Le DPF en aval piège les particules restantes et les retient à presque 100 pour cent. Les particules filtrées sont brûlées dans le DPF par un processus de nettoyage continu appelé régénération passive. Celle-ci se produit pendant le fonctionnement normal du moteur lorsque la chaleur du flux d'échappement et des catalyseurs entraîne l'oxydation des particules accumulées dans le filtre. Si la régénération passive n'est pas possible en raison de la température trop faible des gaz d'échappement, l'élimination des particules s'effectue grâce à un processus de nettoyage automatique. Une post-injection de diesel augmente temporairement et artificiellement la température des gaz jusqu'à ce que la régénération se produise et soit terminée.

Les filtres à particules diesel n'ont pas une très bonne réputation dans l'agriculture. Ceci remonte toutefois à l'époque où de telles installations n'étaient disponibles qu'en post-équipement. Les solutions en première monte devraient rendre caduc le principal problème du montage a posteriori, à savoir l'absence d'intégration du système de filtre à la gestion du moteur. Les experts estiment qu'en pratique, les DPF de série ne devraient guère causer plus de problèmes que pour les millions de véhicules routiers qui en sont déjà dotés depuis des années.

#### Système SCR avec consommable supplémentaire

Le système SCR (Selective Catalytic Reduction en anglais) est actuellement la seule technique aboutie permettant d'amoinrir les émissions de NO<sub>x</sub> incluant un processus en aval du moteur. Cette technologie fonctionne avec l'additif standardisé «AdBlue» à base d'urée, qui est vaporisé entre le turbo-compresseur et le catalyseur dans le conduit d'échappement. Sous la chaleur des gaz d'échappement, l'urée se transforme en ammoniacque et neutralise la teneur en NO<sub>x</sub>, l'oxyde d'azote devenant de l'oxygène, de l'ozone et de l'eau. Le SCR est utilisé pour la circulation routière depuis plusieurs années déjà sans difficulté majeure. Le

système présente deux inconvénients : la nécessité de construire un deuxième réservoir destiné à la solution d'urée et l'alourdissement de la logistique des consommables.

Les constructeurs de moteurs qui misent sur des solutions SCR avancent que leurs moteurs consomment jusqu'à 5 pour cent de carburant en moins que leurs homologues sans SCR. Cela est possible parce que les processus à l'intérieur du moteur peuvent être configurés pour une combustion optimale et efficace.

L'utilisation du système SCR dans l'agriculture ne fait pas l'unanimité parmi les spécialistes. On estime que le système (comme le DPF) nécessite une température minimale des gaz pour fonctionner. Cette condition ne serait pas toujours remplie, en particulier dans les classes de puissance inférieures et à charge partielle. Un autre problème se pose pour les véhicules non routiers : l'AdBlue cristallise s'il est stocké à une température inférieure à -11 °C. Ceci peut aussi déjà se produire à une température légèrement inférieure à 0 °C à l'occasion du remplissage. Au réchauffage, les cristaux se dissolvent et n'altèrent nullement la qualité du produit.

#### Les pièges à NO<sub>x</sub> encore en développement

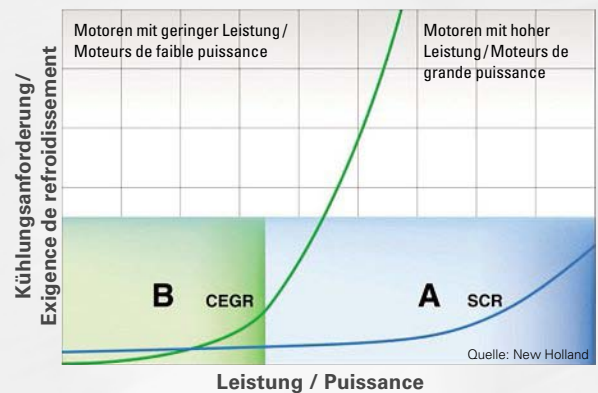
Les pièges à NO<sub>x</sub> (aussi appelés LNT de l'anglais lean NO<sub>x</sub> trap) constituent d'après John Deere une solution alternative au système SCR. Avantage : un piège à NO<sub>x</sub> permettrait de réduire les NO<sub>x</sub> sans consommable supplémentaire.

Son fonctionnement est décrit ainsi par John Deere : « Les pièges à NO<sub>x</sub> accumulent les oxydes d'azote pendant le fonctionnement habituellement «maigre» du moteur diesel grâce à un processus chimique. Dès que la saturation est atteinte, les adsorbants sont régénérés : les oxydes d'azote sont réduits lors de courtes phases de fonctionnement «gras». Cette technologie permet une conversion des oxydes d'azote avec un taux d'efficacité supérieur à 80 pour cent. Néanmoins, l'efficacité du système est limitée par une intoxication croissante de l'adsorbant liée au soufre contenu dans le diesel. Pour garantir le bon fonctionnement de l'adsorbant, il faut donc procéder à certains moments à une désulfatation par des températures plus élevées et un enrichissement périodique. L'introduction de cette tech-

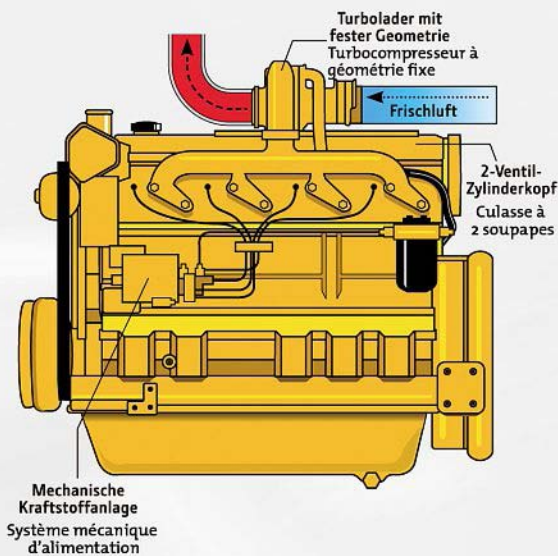
und der Ausstoss von Stickoxiden verringern. Da die Kraftstoffkonzentration bei Mehrfacheinspritzungen weniger hoch ausfällt, ist die Sauerstoffversorgung besser, was auch die Partikelemissionen senken kann. Da die Einspritzvorgänge der Drehzahl und der Last angepasst werden können, wird auch die Kraftstoffeffizienz insgesamt verbessert.

#### Partikelfilter hoch wirksam ohne zusätzliche Betriebsstoffe

John Deere setzt zurzeit für die Erfüllung der Stufe III B als einziger Hersteller für die gesamte Palette auf den Dieselpartikelfilter, kurz DPF. Die ersten beiden Baureihen 7R und 8R mit werkseitig eingebauter Filteranlage sollen im Juni vorgestellt werden. Auch Case New Holland hat angekündigt, die Traktoren unter 100 PS Motorleistung zukünftig mit DPF auszurüsten.



Die Traktoren von John Deere werden über eine katalytische Abgasfilteranlage mit Diesel-Oxidationskatalysator (DOC) und Dieselpartikelfilter (DPF) verfügen. Der DOC reagiert mit den Abgasen und bewirkt auf diese Weise eine Verringerung von Kohlenmonoxiden, Kohlenwasserstoffen und einigen Feststoffpartikeln. Der nachgeschaltete DPF fängt die verbleibenden Partikelanteile ein und hält diese fast zu 100 Prozent fest. Herausgefilterte Partikel werden durch einen kontinuierlichen Reinigungsprozess im DPF verbrannt (= passive Regeneration). Die passive Regeneration erfolgt während des normalen Motorbetriebs, wenn Hitze aus dem Abgasstrom und Katalysa-



toren im Abgasfilter die Oxidierung der gesammelten PM auslösen. Ist eine passive Regeneration wegen zu geringer Abgastemperatur nicht möglich, erfolgt die PM-Beseitigung mit Hilfe eines automatischen Reinigungsprozesses, bei dem durch eine Nacheinspritzung von Dieselpartikelfilter haben in der Landwirtschaft einen nicht sehr guten Ruf. Dieser stammt allerdings aus einer Zeit, in der solche Anlagen nur als Nachrüstung erhältlich waren. Das Hauptproblem von Nachrüstungen, nämlich die fehlende Integration des

Filtersystems in die Motorsteuerung, dürfte mit werkseitigen Lösungen hinfällig werden. Experten gehen davon aus, dass serienmässig eingebaute DPF in der Praxis kaum mehr Probleme verursachen werden, wie dies bereits seit Jahren im Strassenverkehr bei Millionen von Fahrzeugen der Fall ist.

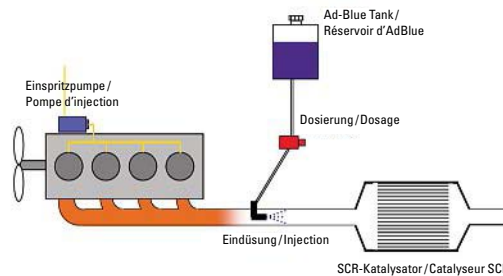
**SCR-System mit zusätzlichem Betriebsstoff**

Das System SCR (englisch Selective Catalytic Reduction) ist zurzeit die einzige praxisreife Technik, mit der sich die NO<sub>x</sub>-Emissionen in einem dem Motor nachgeschalteten Prozess reduzieren lassen. Diese Technologie

arbeitet mit dem standardisierten Additiv «AdBlue» auf Harnstoffbasis, das zwischen Turbolader und Kat in den Abgaskanal eingespritzt wird. Im heissen Abgas wandelt sich der Harnstoff in Ammoniak um und neutralisiert so den NO<sub>x</sub>-Gehalt, indem das Stickoxid in Sauerstoff, Stickstoff und Wasser umgewandelt wird. SCR ist im Strassenverkehr bereits seit mehreren Jahren ohne grössere Probleme im Praxiseinsatz. Der Hauptnachteil des Systems besteht darin, dass ein zweiter Tank mit der Harnstofflösung eingebaut werden muss und dass die Betriebsmittellogistik entsprechend aufwändiger wird.

**SCR System / Système SCR**

In das Abgas wird eine Harnstofflösung eingespritzt, welche im Katalysator die Stickoxide beseitigt. Verbrauch zirka 2 bis 5% des Kraftstoffverbrauches. Une solution à base d'urée est injectée dans les gaz d'échappement, elle permet d'éliminer les oxydes d'azote dans le catalyseur. Consommation : environ 2 à 5% de la consommation de carburant.



<p><b>Harnstoff-Zersetzung</b> Décomposition de l'urée</p> $(NH_2)_2CO + H_2O \rightarrow 2NH_3 + CO_2$ $HNCO + H_2O \rightarrow NH_3 + CO_2$	<p><b>SCR-Katalysator</b> Catalyseur SCR</p> $4NH_3 + 4NO + O_2 \rightarrow 4N_2 + 6H_2O$ $2NH_3 + NO + NO_2 \rightarrow 2N_2 + 3H_2O$ $8NH_3 + 6NO_2 \rightarrow 7N_2 + 12H_2O$	<p><b>Sperrkatalysator</b> Catalyseur piège</p> $4NH_3 + 3O_2 \rightarrow 2N_2 + 6H_2O$
---	--	---

Quelle: ART



Motorenhersteller, die auf SCR-Lösungen setzen, argumentieren, dass ihre Motoren im Vergleich zu Motoren ohne SCR einen bis zu 5 Prozent geringeren Kraftstoffverbrauch aufweisen. Dies ist möglich, weil die innermotorischen Prozesse auf eine optimale, effiziente Verbrennung ausgelegt werden können. Das SCR-System ist unter Fachleuten bezüglich Einsätzen in der Landtechnik nicht unumstritten. Es wird davon ausgegangen, dass das System (ähnlich wie beim DPF) eine minimale Abgastemperatur benötigt, um zu funktionieren. Besonders in den unteren Leistungsklassen und im Teillastbereich dürfte dies nicht immer erfüllt werden. Ein weiteres



nologie requiert des commandes complexes et très performantes pour les composants électroniques utilisés. Il faut aussi clarifier des aspects critiques comme la désulfatation et la stabilité thermique, mais aussi les coûts des métaux onéreux mis en œuvre, avant qu'il ne soit question d'appliquer cette technologie à grande échelle dans le secteur des moteurs diesel. »

#### Importance accrue des huiles de moteur et des carburants diesel

La qualité de l'huile de moteur et du carburant diesel jouent depuis toujours un rôle non négligeable en matière d'émissions. Mais lorsqu'il s'agit de satisfaire aux exigences de la phase III B et plus tard de la phase IV, les produits utilisés revêtent une importance accrue. Une faible teneur en cendres est capitale, surtout en combinaison avec un DPF. Les cendres, qui sont un sous-produit de matières solides inorganiques, s'accumulent pendant la combustion dans le filtre à particules et doivent être retirées de temps à autre au cours d'un procédé de nettoyage relativement complexe. C'est pourquoi les huiles utilisées doivent présenter une faible teneur en métaux à l'état de traces, peu de soufre, de phosphore et de calcium (on les appelle les huiles low SAPS). Comme pour les huiles, le type de carburant diesel utilisé peut avoir des effets décisifs sur les dispositifs de contrôle des émissions. L'utilisation de filtres pour gaz d'échappement nécessite des carburants diesel dont le taux de soufre est inférieur à 15 ppm (diesel à faible teneur en soufre, ULSD). Les carburants diesel à forte teneur en soufre (plus de 15 ppm) peuvent affecter le bon fonctionnement et la longévité du filtre ou du catalyseur.

#### Le nombre de particules décisif pour l'avenir

C'est de la réussite des stratégies adoptées pour la fabrication des moteurs que dépendra plus tard la manière de satisfaire aux critères de la prochaine phase IV. La question primordiale sera de savoir si, en plus du procédé de mesure (masse de particules) utilisé jusqu'ici, une valeur limite supplémentaire pour le nombre de particules sera aussi introduite. Ce devrait être le cas pour la circulation routière lors du lancement d'Euro 6. Dans le domaine non routier, cette question n'est pas encore tranchée et fait l'objet d'après discussions.

Pourquoi cette question est-elle décisive? Les spécialistes s'accordent au moins sur un point: si l'on introduit une valeur maximale pour le nombre de particules, le filtre à particules sera vraisemblablement incontournable. Dans ce cas, d'après les connaissances actuelles, le système SCRT deviendra standard. Ce système de post-traitement des gaz d'échappement associe catalyseur d'oxydation, filtre à particules et catalyseur SCR. ■

Ruedi Burkhalter

Problem könnte im Offroadbereich die Tatsache darstellen, dass AdBlue bei einer Lagertemperatur von unter  $-11^{\circ}\text{C}$  kristallisiert. Das kann auch bereits bei einer Temperatur von leicht unter  $0^{\circ}\text{C}$  anlässlich der Befüllung geschehen. Bei Erwärmung lösen sich die Kristalle wieder auf und bewirken keine Qualitätsminderung des Produkts.

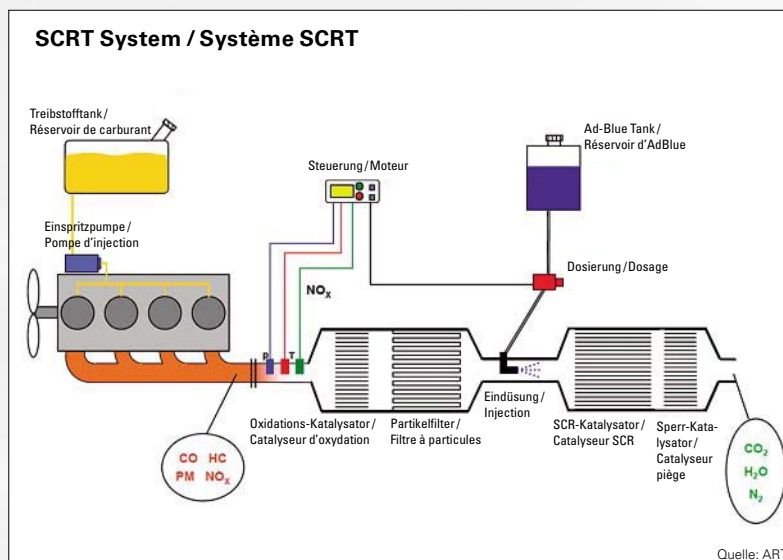
#### NO<sub>x</sub>-Adsorber noch in Entwicklungsphase

NO<sub>x</sub>-Adsorber, auch LNTs (Lean-NO<sub>x</sub>-Traps) genannt, sind laut John Deere eine Alternative zum SCR System. Der Vorteil: Ein NO<sub>x</sub>-Adsorber würde die NO<sub>x</sub>-Reduktion ohne zusätzlichen Betriebsstoff ermöglichen.

Die Funktionsweise wird von John Deere folgendermassen beschrieben: «NO<sub>x</sub>-Adsorber speichern Stickoxide während des üblicherweise «mageren» Dieselmotorbetriebs durch einen entsprechenden chemischen Prozess. Sobald eine Sättigung eintritt, werden diese Adsorber regeneriert, wobei die Stickoxide in kurzen



«Fett-Betriebsphasen zur Reduktion freigegeben werden. Mit dieser Technologie kann eine Umwandlung der Stickoxide mit einem Wirkungsgrad von mehr als 80 Prozent erreicht werden. Allerdings wird die Systemeffizienz durch eine fortschreitende Vergiftung des Adsorbers aufgrund der Schwefelanteile im Dieselkraftstoff beeinträchtigt. Um die permanente Funktionstüchtigkeit des Adsorbers sicherzustellen, muss daher zu gegebener Zeit eine Schwefelreinigung durch periodische Anreicherung und höhere Temperaturen erfolgen. Die Einführung dieser Technologie erfordert komplexe und leistungsstarke Steuerungen für die verwendeten Elektronikkomponenten. Auch kritische Aspekte wie Entschwefelung und thermische Stabilität sowie die Kosten für die enthaltenen wertvollen Metalle müssen geklärt werden, bevor eine breite Anwendung dieser Technologie im Bereich Dieselmotoren in Frage kommt.»



**Motoröle und Dieselkraftstoffe werden wichtiger**

Die Qualität von Motoröl und Dieselkraftstoff spielen beim Thema Emissionen seit jeher eine wichtige Rolle. Aber wenn es darum geht, die Emissionsvorschriften der Stufe III B und später Stufe IV zu erfüllen, kommt den verwendeten Produkten eine noch grössere Bedeutung zu. Besonders bei der Verwendung eines DPF ist ein tiefer Aschegehalt sehr wichtig. Asche, ein Nebenprodukt anorganischer Feststoffe, sammelt sich während des Verbrennungsprozesses im Dieselpartikel an und muss dann in einem relativ aufwändigen Reinigungsverfahren von Zeit zu Zeit entfernt werden. Daher müssen Öle mit geringerem Spurenmetallgehalt, mit wenig Schwefel, Phosphor und Calcium (sogenannte Low-SAPS-Öle) verwendet werden. Ähnlich wie bei den Ölen kann auch die Art des verwendeten Dieselkraftstoffs entscheidende Auswirkungen auf die Emissionskontrollvorrichtungen haben. Der Einsatz von Abgasfiltern erfordert Dieselkraftstoffe mit einem Schwefelgehalt von weniger als 15 ppm (ultra-schwefelarmer Diesel, ULSD). Dieselkraftstoffe mit höherem Schwefelgehalt (mehr als 15 ppm) können die Funktionstüchtigkeit und Nutzungsdauer des Abgasfilters oder Katalysators beeinträchtigen.

**Partikelanzahl entscheidet über die Zukunft**

Von der jetzt erfolgten Weichenstellung in der Motorenherstellung wird es später abhängig sein, wie die Anforderungen der folgenden Stufe IV gemeistert werden können. Die alles entscheidende Frage wird sein, ob neben dem bisher angewendeten Messverfahren (Partikelmasse) auch ein zusätzlicher Grenzwert für die Partikelanzahl eingeführt wird. Im Strassenverkehr soll dies bei der Einführung von «Euro 6» der Fall sein. Im Offroadbereich ist diese Frage noch nicht beantwortet und wird heiss diskutiert.

Ach ja, warum diese Frage entscheidend ist: In einem zumindest sind sich die Fachleute einig: Wird ein Grenzwert für die Partikelanzahl eingeführt, dann dürfte vermutlich kein Weg mehr am Partikelfilter vorbeiführen. In diesem Fall würde nach heutigen Erkenntnissen wohl das SCRT-System zum Standard werden. Dieses Abgas-Nachbehandlungssystem ist eine Kombination aus Oxidationskatalysator, Partikelfilter und SCR-Katalysator.

Ruedi Burkhalter