

# Les gaz d'échappement des moteurs à combustion sont toujours plus propres

**L'introduction de la norme antipollution III B nécessite le traitement complémentaire des gaz d'échappement pour respecter les valeurs limites plus sévères des gaz d'échappement. Une simple optimisation de la combustion côté moteur ne suffit plus. On peut utiliser soit un filtre à particules pour réduire les particules de suie du moteur diesel, soit un système SCR pour baisser les émissions d'oxydes d'azote. Avec le renforcement des valeurs limites, les deux systèmes seront également utilisés de manière combinée.**

Comme les autres véhicules, les tracteurs sont également soumis aux prescriptions relatives aux gaz d'échappement. La Suisse a adopté les directives européennes en ce domaine, qui prévoient un renforcement des valeurs limites des gaz d'échappement pour les nouveaux véhicules. Le tableau 1 donne un aperçu des anciennes et futures valeurs limites des gaz d'échappement pour les tracteurs et chariots à moteur et leur date d'entrée en vigueur. Il existe deux exceptions: les moteurs fabriqués avant l'entrée en vigueur de la nouvelle norme peuvent encore être montés et les constructeurs de véhicules avec de très faibles quantités peuvent continuer de monter des moteurs du précédent niveau de gaz d'échappement. Il est donc encore possible d'acheter des tracteurs, même des classes de puissance supérieures, qui ne répondent pas encore à la norme III B. Les différents degrés de sévérité des prescriptions sur les gaz d'échappement sont classés par «niveaux» pour les véhicules à usage non routier. Aux États-Unis, les valeurs limites pour les moteurs identiques sont désignées avec «Tier». Tier 4 correspond ainsi approximativement au niveau européen III B, et Tier 4 final au niveau IV. Les niveaux des valeurs limites pour les véhicules utilisés hors des routes ne doivent pas être confondus avec les désignations «EURO». Cette désignation est valable pour les moteurs de véhicules routiers, comme les camions et les voitures, mais pas pour les véhicules agricoles.

Jusqu'à présent, l'optimisation côté moteur était suffisante pour le respect

des prescriptions sur les gaz d'échappement. Avec le niveau de gaz d'échappement IIIA, les émissions étaient suffisamment baissées par le recyclage des gaz d'échappement, le turbocompresseur et le refroidissement d'air d'admission. Avec l'introduction du niveau III B, l'optimisation du moteur ne suffit plus, car les deux composants critiques des gaz d'échappement d'un moteur diesel, les oxydes d'azote et les particules de suie, se comportent différemment lors d'un changement de réglage de moteur. Une réduction simultanée des deux composants d'émission n'est pas possible par des réglages de moteur modifiés. Les fabricants de moteurs ont en principe deux options à disposition:

**Système SCR:** l'optimisation de la combustion provoque par un calage d'injection avancé la réduction de la quantité de suie, mais augmente simultanément la formation d'oxydes d'azote. Les émissions trop élevées d'oxydes d'azote doivent être réduites après le moteur, au moyen d'une réduction catalytique sélective SCR.

**Filtre à particules (DPF):** les oxydes d'azote sont réduits dans le moteur par le recyclage des gaz d'échappement, la séparation des particules de suie présentes dans le gaz d'échappement se fait au moyen de filtres à particules.

## **Le système SCR réduit les oxydes d'azote**

Dans un système SCR, la combustion est optimisée côté moteur afin de baisser les émissions de particules. Il est possible, par exemple, d'augmenter la pression d'injection ou d'avancer le dé-

Au milieu de cette édition:  
**Présentation schématique  
du système Isobus 11783**

Rectificatif:  
Remplace le dépliant  
du forum 1-12

In der Heftmitte:  
**Schematische Darstellung  
Isobus 11783**

Korrigenda:  
Ersetzt das Faltblatt  
aus forum 1-12

**Die Einführung der Abgasstufe III B bedingt eine Abgasnachbehandlung um die verschärften Abgasgrenzwerte einzuhalten. Eine rein motorseitige Verbrennungsoptimierung reicht nicht mehr aus. Zum Einsatz kommen entweder ein Partikelfiltersystem zur Reduktion der Dieselpartikel oder ein SCR-System zur Senkung der Stickoxid-Emissionen. Mit der weiteren Verschärfung der Abgasgrenzwerte werden beide Systeme auch kombiniert zum Einsatz kommen.**



# Abgase von Verbrennungsmotoren werden immer sauberer

Wie andere Fahrzeuge, unterliegen Traktoren einer Abgasgesetzgebung. Die Schweiz hat hierzu die Europäischen Richtlinien übernommen, die jeweils eine Verschärfung der Abgasgrenzwerte für Neufahrzeuge vorsieht. Tabelle 1 gibt einen Überblick der vergangenen und kommenden Abgasgrenzwerte für Traktoren und Motorkarren und deren Datum des Inkrafttretens. Dabei gibt es zwei Ausnahmen: Motoren, die vor Inkrafttreten der neuen Norm gebaut wurden, dürfen noch eingebaut werden und Fahrzeugbauer mit sehr geringen Stückzahlen dürfen weiterhin Motoren der vorangegangenen Abgasstufe einbauen. Deshalb ist es möglich, dass aktuell auch in höheren Leistungsklassen Traktoren gekauft werden können, die noch nicht die Abgasstufe III B erfüllen. Die unterschiedlichen Schärpen der Abgasvorschriften werden bei Non-road-Fahrzeugen mit «Stufe» bezeichnet. In Amerika werden die Grenzwerte für identische Motoren mit «Tier» bezeichnet. Dabei entspricht Tier 4 interim annähernd der

Europäischen Stufe III B, sowie Tier 4 final annähernd der Stufe IV. Die Grenzwertstufen für Fahrzeuge, die abseits von Strassen eingesetzt werden, sind nicht zu verwechseln mit den «EURO» Bezeichnungen. Diese Bezeichnung gilt für Motoren von Strassenfahrzeugen, wie LKW oder PW, aber nicht für landwirtschaftliche Fahrzeuge.

Bisher war zur Einhaltung der Abgasvorschriften eine motorseitige Optimierung ausreichend. Bei Abgasstufe III A liessen sich die Emissionen durch Abgasrückführung, Turbolader und Ladeluftkühler genügend senken. Mit der Einführung von Stufe III B reicht die motorseitige Optimierung nicht mehr aus, da sich die beiden kritischen Abgasbestandteile eines Dieselmotors, Stickoxide und Russpartikel, bei veränderter Motoreinstellung gegensätzlich verhalten. Eine gleichzeitige Reduktion der beiden Abgaskomponenten durch geänderte Motoreinstellungen ist nicht möglich. Den Motorenherstellern stehen grundsätzlich zwei alternative Wege zur Verfügung:

**SCR-System:** Die Verbrennungsoptimierung bewirkt durch einen früheren Einspritzzeitpunkt die Reduktion der Russmasse, erhöht gleichzeitig aber die Bildung von Stickoxiden. Die zu hohen Stickoxid-Emissionen müssen nach dem Motor mittels SCR-Abgasnachbehandlung reduziert werden.

**Partikelfilter (DPF):** Die Stickoxide werden innermotorisch durch Rückführung von Abgasen reduziert, die Abscheidung der im Abgas vorhandenen Russpartikel erfolgt mittels Partikelfilter.

## SCR-System reduziert Stickoxide

Beim SCR-System wird motorseitig die Verbrennung optimiert, um die Partikelemissionen zu senken. Hierfür kann beispielsweise der Einspritzdruck erhöht und der Einspritzzeitpunkt nach vorne verschoben werden. Dadurch kommt es zu einer heisseren Verbrennung, was die Bildung von Partikeln senkt. Hingegen erhöht sich durch die heisse Verbrennung der Ausstoss an Stickoxiden, die nach dem Motor aus dem



calage de l'injection. Ceci provoque une combustion à plus haute température, qui diminue la formation de particules. Par contre, l'émission d'oxydes d'azote augmente avec une combustion plus chaude, et ils doivent être éliminés des gaz d'échappement après le moteur. Le système de post-traitement de gaz d'échappement SCR – SCR signifie selective catalytic reduction – transforme les oxydes d'azote (NOx) en azote non toxique (N<sub>2</sub>) et en eau (H<sub>2</sub>O) au moyen d'une urée aqueuse, appelée AdBlue. Cette urée aqueuse à 32,5 pourcent est injectée dans les gaz chauds et s'y transforme en ammoniacque (NH<sub>3</sub>). L'ammoniacque réagit avec les oxydes d'azote dans l'élément catalyseur, pourvu par exemple d'un revêtement de pentoxyde de vanadium ou d'oxyde de titane. Afin d'éviter de produire des émissions d'ammoniacque nocives par un surdosage d'AdBlue, un catalyseur à piège est monté en aval du système et permet de neutraliser l'éventuel ammoniacque en composés non toxiques. L'optimisation de la combustion permet d'améliorer le rendement du moteur, ce qui baisse la consommation de diesel. La consommation d'AdBlue correspond à environ 5 pourcent de la consommation de diesel, donc env. 5 décilitres pour une consommation horaire de 10 litres. La consommation d'Adblue dépend très fortement du degré de charge du moteur. À pleine charge, les mesures ont montré des consommations de l'ordre de 7 pourcent en volume, au ralenti, par contre, aucun AdBlue n'est injecté. La capacité du réservoir est généralement prévue de manière à devoir remplir le réservoir d'AdBlue après deux à trois ravitaillements en diesel. L'urée est disponible en bidons de 10 litres et jusqu'à des cuves de 1'000 litres de capacité. Les coûts dépendent de la quantité. Il est par exemple possible de s'approvisionner dans les stations-service, où le prix est actuellement d'environ 70 centimes le litre. Une propriété spécifique de l'urée est le point de congélation, qui est à -11 °C. Dans le véhicule même, cela ne pose pas de problème, car le réservoir est conçu pour que l'urée puisse se dilater lorsqu'elle gèle, sans provoquer de fissures au réservoir. Afin de garantir le fonctionnement du système de post-traitement des émissions même à de très basses températures, le réservoir est chauffé par le système de refroidissement du moteur, ce qui conduit à une rapide liquéfaction après

le démarrage du moteur. Afin d'éviter le gel ou la cristallisation de l'urée dans les conduites jusqu'au point d'injection dans le tuyau d'échappement, le système complet est automatiquement vidé après arrêt du moteur.

#### **Le filtre à particules réduit la suie du diesel**

Pour atteindre des émissions d'oxydes d'azote côté moteur inférieures à la valeur limite, on utilise un système de recyclage des gaz d'échappement. Une partie des gaz passe à travers un refroidisseur pour être mélangée ensuite à l'air d'admission. Le gaz déjà brûlé ne participe plus activement à la combustion, ce qui conduit à des températures de combustion plus basses et diminue la formation d'oxydes d'azote. Une vanne permet de réguler la quantité de gaz recyclé nécessaire. Si le moteur tourne à pleine charge, la quantité de diesel injectée est importante. Ceci augmente simultanément le besoin d'air frais, afin d'avoir suffisamment d'oxygène pour la combustion. Pour avoir toujours suffisamment d'air frais dans la chambre de combustion en mode dynamique du moteur, on utilise des turbocompresseurs à géométrie variable ou des doubles turbocompresseurs. Ils permettent une compression suffisante de l'air d'admission même à faible vitesse de rotation, en particulier si cette vitesse est variable. Un intercooler abaisse ensuite la température de l'air compressé.

Côté échappement, il s'agit de diminuer les particules. Un filtre à particules filtre les particules de suie, les particules d'usure du moteur et les résidus de carburant ou d'huile moteur dans le flux de gaz d'échappement. Les filtres à particules fermés ont généralement un corps de filtration en nid d'abeille. Les matériaux utilisés sont le plus souvent le carbure de silicium ou la cordiérite. Comme les canaux sont fermés alternativement, les gaz doivent traverser les parois de séparation poreuses. Les particules de suie s'y déposent. Afin que les particules retenues n'obstruent pas le filtre, la suie dans le filtre doit être régulièrement brûlée. Les températures minimales nécessaires à cet effet sont atteintes en plaçant un catalyseur à oxydation avant le filtre. Celui-ci abaisse la température d'inflammation de la suie et baisse simultanément par oxydation la teneur en hydrocarbures et en monoxyde de carbone dans les gaz. Pour permettre une régénération des filtres

Abgas entfernt werden müssen. Das SCR-Abgasnachbehandlungssystem – SCR steht für selective catalytic reduction – wandelt die Stickoxide (NOx) mittels Zugabe einer wässrigen Harnstofflösung, genannt AdBlue zu ungiftigem Stickstoff (N<sub>2</sub>) und Wasser (H<sub>2</sub>O) um. Die 32,5-prozentige Harnstofflösung wird in das heisse Abgas eingespritzt und wandelt sich dort zu Ammoniak (NH<sub>3</sub>) um. Das Ammoniak reagiert im Katalysatortelement, das beispielsweise mit Vanadiumpentoxid oder Titandioxid beschichtet ist mit den Stickoxiden. Um bei einer Überdosierung von AdBlue keine schädlichen Ammoniakemissionen zu erzeugen, ist dem System ein sogenannter Sperrkatalysator nachgeschaltet, der allfälliges Ammoniak zu ungiftigen Komponenten neutralisiert. Durch die Verbrennungsoptimierung kann der Motor mit einem besseren Wirkungsgrad betrieben werden, was den Dieselverbrauch senkt.

Der Verbrauch von AdBlue beträgt etwa 5 Prozent des Dieselverbrauchs, bei einem stündlichen Dieselverbrauch von 10 Litern also rund 5 Deziliter. Der AdBlue-Verbrauch hängt sehr stark vom Motorbelastungsgrad ab. Bei Vollastbetrieb zeigten Messungen Verbräuche im Bereich von 7 Volumenprozenten, im Leerlauf hingegen wird kein AdBlue eingedüst. Die Grösse des Tanks ist meist so dimensioniert, dass bei jeder zweiten bis dritten Betankung mit Diesel auch der AdBlue-Tank aufgefüllt werden muss. Die Harnstofflösung ist in Kanistern mit 10 Litern, bis zu Tanks mit 1000 Litern Fassungsvermögens, erhältlich. Die Kosten sind dabei von der Menge abhängig. Teilweise ist der Bezug bei öffentlichen Tankstellen möglich, wobei sich der Preis aktuell bei rund 70 Rappen pro Liter bewegt. Eine spezifische Eigenschaft der Harnstofflösung ist der Gefrierpunkt bei -11 °C. Im Fahrzeug selbst stellt dies kein Problem dar, da der Tank so gestaltet ist, dass sich die Harnstofflösung beim Gefrieren ausdehnen kann, ohne dass es zu Rissen im Tank kommt. Um die Funktion des Abgasnachbehandlungssystems auch bei sehr kalten Temperaturen zu

Etappe	Motorleistung [kW]	Inkrafttreten	Grenzwerte [g/kWh]			
			Kohlenmonoxid CO	Kohlenwasserstoffe HC	Stickoxide NOx	Partikelmasse PM
Stufe I	75 ≤ P < 130	01.07.2002/ 01.10.2002	5.0	1.3	9.2	0.7
	37 ≤ P < 75	1.10.2002	5.0	1.3	9.2	0.7
Stufe II	130 ≤ P ≤ 560	01.07.2002/ 01.10.2002	3.5	1.0	6.0	0.2
	75 ≤ P < 130	01.07.2002/ 01.07.2003	5.0	1.0	6.0	0.3
	37 ≤ P < 75	01.01.2003/ 01.01.2004	5.0	1.3	7.0	0.4
	18 ≤ P < 37	01.07.2002/ 01.10.2002	5.5	1.5	8.0	0.8
Stufe IIIA	130 ≤ P ≤ 560	01.01.2005/ 01.01.2006	3.5	4.0		0.2
	75 ≤ P < 130	01.01.2006/ 01.01.2007	5.0	4.0		0.3
	37 ≤ P < 75	01.01.2007/ 01.01.2008	5.0	4.7		0.4
	19 ≤ P < 37	01.01.2006/ 01.01.2007	5.5	7.5		0.6
Stufe IIIB	130 ≤ P ≤ 560	01.01.2010/ 01.01.2011	3.5	0.19	2.0	0.025
	75 ≤ P < 130	01.01.2011/ 01.01.2012	5.0	0.19	3.3	0.025
	56 ≤ P < 75	01.01.2011/ 01.01.2012	5.0	0.19	3.3	0.025
	37 ≤ P < 56	01.01.2012/ 01.01.2013	5.0	4.7		0.025
Stufe IV	130 ≤ P ≤ 560	01.01.2013/ 01.01.2014	3.5	0.19	0.4	0.025
	56 ≤ P < 130	01.01.2013/ 01.01.2014	5.0	0.19	0.4	0.025

Tabelle 1: Entwicklung der Abgasgrenzwerte für Traktoren und Motorkarren. Der erste angegebene Termin ist gültig für neue Motortypen, der zweite Termin hat Gültigkeit für die 1. Inverkehrsetzung, bzw. 1. Inbetriebnahme von neuen Motoren.

Tableau 1: évolution des valeurs limites des gaz d'échappement pour tracteurs et chariots à moteur. La première date indiquée est valable pour les nouveaux types de moteur, la deuxième date est valable pour la 1<sup>re</sup> mise en circulation, resp. la 1<sup>re</sup> mise en service de nouveaux moteurs.

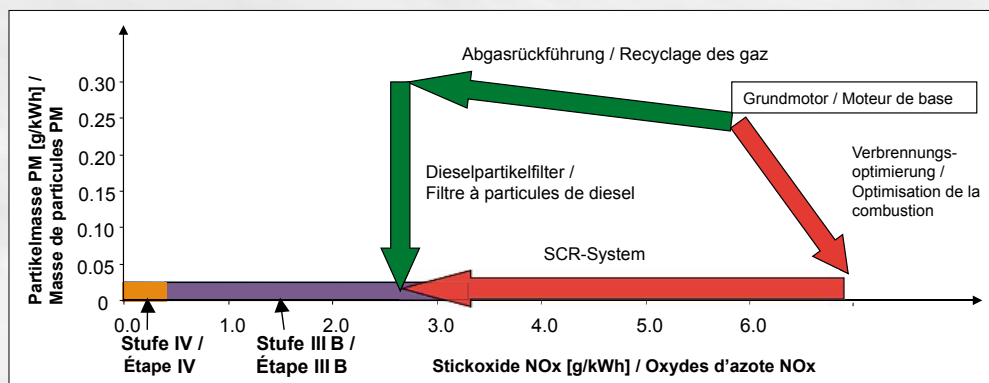


Abbildung 1: Grenzwerte der Abgasstufen und Möglichkeiten zur Einhaltung der Abgasstufe III B. Grün dargestellt die Methode mit Abgasrückführung und Partikelfilter, rot die Variante mit Verbrennungsoptimierung und SCR-System. Grenzwerte gelten für Motoren von 75 bis 130 kW.

Figure 1: valeurs limites des niveaux d'émission et possibilités pour respecter le niveau d'émission III B. En vert, la méthode avec recyclage des gaz d'échappement et filtre à particules, en rouge, la variante avec optimisation de la combustion et système SCR. Valeurs limites pour les moteurs de 75 à 130 kW.

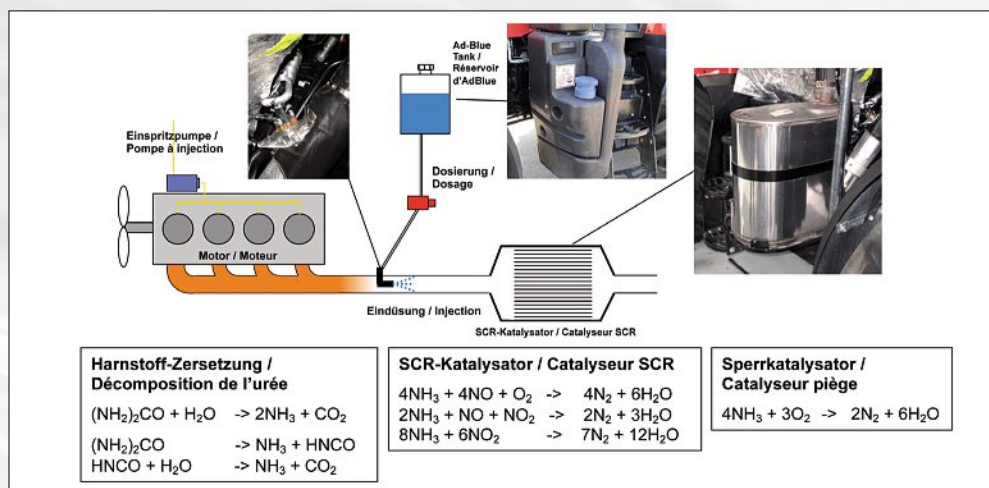


Abbildung 2: Funktionsweise des SCR-Systems mit Angabe der chemischen Reaktionen.

Figure 2: mode de fonctionnement du système SCR avec indication des réactions chimiques.

gewährleisten ist der Tank über die Motorkühlung beheizt, was zu einer schnellen Verflüssigung nach dem Motorstart führt. Um ein Gefrieren oder Auskristallisieren der Harnstofflösung in den Leistungen bis zur Eindüsenstelle im Abgasrohr zu verhindern, wird das komplette System nach Motorstopp automatisch entleert.

### Partikelfilter reduziert Dieselruß

Um motorseitige Stickoxid-Emissionen unterhalb des Grenzwertes zu erreichen, kommt eine Abgasrückführung zum Einsatz. Dabei wird ein Teil des Abgases durch einen Kühler geleitet und der Ansaugluft beige-mischt. Die bereits verbrannte Luft nimmt nicht mehr aktiv an der Verbrennung teil und führt so zu tieferen Verbrennungstemperaturen, was die Bildung von Stickoxiden senkt. Zur Steuerung der rückgeführten Abgasmenge kommt ein Ventil zum Einsatz, das je nach Bedarf die Menge des rückgeführten Abgases regelt. Läuft der Motor beispielsweise bei Vollast, wird viel Diesel eingespritzt. Dies erhöht gleichzeitig den Bedarf an Frischluft, damit überhaupt genügend Sauerstoff für die Verbrennung vorhanden ist, als bei geringer Motorbelastung. Um im dynamischen Motorbetrieb immer ausreichend Frischluft im Verbrennungsraum zur Verfügung zu haben, kommen Abgasturbolader mit variabler Geometrie oder Doppelturbolader zum Einsatz. Sie erlauben bereits bei geringer Drehzahl eine ausreichende Verdichtung der Ansaugluft, insbesondere bei wechselnden Drehzahlen des Motors. Ein Ladeluftkühler senkt anschliessend die Temperatur der verdichteten Luft.

Auf der Abgasseite gilt es die Partikel zu vermindern. Ein Partikelfilter filtert dazu die Russpartikel, die Abriebpartikel des Motors und Rückstände vom Treibstoff oder Motorenöl aus dem Abgasstrom. Geschlossene Partikelfilter bestehen meist aus einem wabenförmigen Filterkörper. Als Werkstoffe finden sich mehrheitlich Siliziumcarbid oder Cordierit. Auf Grund der wechselseitig verschlossenen Kanäle muss das Abgas die





même à faible charge du moteur, la surveillance du filtre est intégrée dans la commande du moteur. Si le filtre est trop obstrué par la suie, elle augmente la température des gaz au moyen d'une post-injection afin de brûler la suie. Il existe aussi des moteurs qui injectent avant le catalyseur du diesel, qui brûle et chauffe ainsi les gaz d'échappement. Les brûleurs au diesel placés avant le filtre sont une autre solution possible. Comme l'augmentation de la température des gaz coûte en carburant, la régénération n'a lieu que si le filtre est obstrué. Généralement la température des gaz est suffisante pour brûler la suie sans mesures supplémentaires. La possibilité d'augmenter la température des gaz côté moteur ou par un brûleur permet une régénération sûre du filtre, même si le moteur est à faible charge. Dans certains cas, l'air d'admission est réduit pendant la régénération, ce qui conduit également à des températures plus élevées des gaz d'échappement.

#### **Avantages et inconvénients des systèmes**

L'avantage principal du système SCR est la consommation réduite de carburant due à l'amélioration du rendement du moteur. La diminution de la consommation de carburant réduit simultanément les émissions de dioxyde de carbone CO<sub>2</sub>. En renonçant au recyclage des gaz, le moteur est moins complexe techniquement et le besoin de puissance de refroidissement plus faible, ce qui permet d'utiliser un radiateur plus petit. Le désavantage est le besoin supplémentaire d'urée (AdBlue). L'urée doit être achetée, stockée et toujours versée à temps.

L'avantage du recyclage des gaz en combinaison avec un filtre à particules est qu'il n'y a pas besoin d'un produit

supplémentaire. Le désavantage est la consommation légèrement plus élevée et la nécessité d'avoir une huile moteur et un carburant de meilleure qualité. Le nettoyage du filtre des résidus de cendre doit être pris en compte.

Les deux systèmes de traitement des gaz d'échappement conviennent pour respecter les composants gazeux réglementaires pour le niveau III B. En ce qui concerne les émissions de particules, on a toutefois constaté que ce n'est pas la masse de particules actuellement réglementée qui représente un risque pour la santé, mais plutôt le nombre de particules. Ces connaissances ont été prises en compte au plan européen pour les prochaines prescriptions sur les gaz d'échappement pour les voitures et camions. Ces prescriptions incluent également une valeur limite du nombre de particules. Pour les machines de chantier en Suisse, une telle valeur limite a déjà été introduite dans le cadre de la modification de l'ordonnance sur la protection de l'air OPair. Pour respecter les exigences de l'ordonnance sur la protection de l'air, il existe deux possibilités : dans la première, le moteur doit être équipé d'un filtre à particules testé, indiqué sur la liste des filtres de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV). Pour la deuxième possibilité, le moteur (y compris le système de traitement des gaz d'échappement) doit présenter une mesure certifiée concernant le nombre de particules. Les moteurs autorisés sont indiqués sur la liste des moteurs. Des informations détaillées et les deux listes (filtres et moteurs) sont disponibles sous le lien suivant : <http://www.bafu.admin.ch/partikelfilterliste/index.html?lang=fr>

Une valeur limite du nombre de particules ne peut être respectée qu'avec

porösen Trennwände durchströmen. An diesen lagern sich die Russpartikel ab. Damit die gefilterten Partikel nicht die Filter verstopfen, muss der Russ im Filter regelmässig verbrannt werden. Erreicht werden die dafür notwendigen Mindesttemperaturen, indem vor dem Filter ein Oxidationskatalysator zum Einsatz kommt. Dieser reduziert die Russzündtemperatur und senkt durch Oxidation gleichzeitig den Kohlenwasserstoff- und den Kohlenmonoxid-Gehalt im Abgas. Um bei sehr geringer Motorbelastung eine sichere Regeneration des Filters zu erreichen, ist die Filterüberwachung in die Motorensteuerung integriert. Sie erhöht bei einem hohen Befüllungsgrad des Filters mit Russ mittels Nacheinspritzungen die Abgastemperaturen, um den Russ zu verbrennen. Es existieren auch Motoren, die vor dem Katalysator Diesel einspritzen, der verbrennt und so das Abgas aufheizt. Eine weitere Alternative stellen Dieselmotoren dar, die vor dem Filter platziert sind. Da die Erhöhung der Abgastemperatur Treibstoff kostet, findet eine Regeneration nur dann statt, wenn der Filter gefüllt ist. Grösstenteils dürfte die Abgastemperatur ausreichend sein, um ohne zusätzliche Massnahmen den Russ abzubrennen. Die Möglichkeit die Abgastemperatur motorseitig oder durch Brenner zu erhöhen, erlaubt eine sichere Regeneration des Filters auch bei geringer Motorbelastung. Teilweise wird während der Regeneration auch die Ansaugluft gedrosselt, was ebenfalls zu höheren Abgastemperaturen führt.

**Vor- und Nachteile der Systeme**

Der Hauptvorteil des SCR-Systems liegt im geringeren Treibstoffverbrauch aufgrund des Motorbetriebs mit einem besseren Wirkungsgrad. Durch den geringeren Treibstoffverbrauch reduziert sich gleichzeitig der Ausstoss an Kohlenstoffdioxid CO<sub>2</sub>. Durch den Verzicht auf eine Abgasrückführung ist der Motor technisch weniger komplex gebaut und der Kühlleistungsbedarf ist geringer, was den Einsatz kleinerer Motorkühler erlaubt. Nachteilig wirkt sich der zusätzliche Bedarf des Betriebsstoffes (AdBlue) aus. Die Harnstofflösung muss beschafft, gelagert und jeweils rechtzeitig getankt werden. Der Vorteil der Abgasrückführung in Kombination mit Partikelfilter besteht im Verzicht auf einen zusätzlichen Betriebsstoff. Nachteilig wirken sich der etwas höhere Verbrauch und hohe Qualitätsanforderungen an das Motorenöl und den Treibstoff aus. Die notwendige Reinigung des Filters von Ascherückständen ist zu berücksichtigen.

Beide Abgasnachbehandlungssysteme sind geeignet, um die gesetzlich reglementierten Abgasbestandteile der Stufe III B einzuhalten. Bei den Partikelemissionen hat man allerdings festgestellt, dass nicht die Partikelmasse, die aktuell gesetzlich reglementiert ist, eine Aussage zur Gesundheitsgefährdung ermöglicht, sondern die Partikelanzahl hierfür relevant ist. Diese Erkenntnis hat bereits bei den kommenden Abgasvorschriften für Autos und Lastwagen auf europäischer Ebene Einzug gehalten. Dort wird neben der Erfüllung eines Partikelmassewertes auch ein Anzahlgrenzwert eingeführt. Für Baumaschinen in der Schweiz wurde im Rahmen der Änderung der Luftreinhaltevorschrift LRV ein derartiger Grenzwert bereits eingeführt. Um die Anforderungen der Luftreinhaltevorschrift zu erfüllen, bestehen zwei Möglichkeiten: Bei der ersten Möglichkeit muss der Motor mit einem geprüften Partikelfilter, wie er auf der Filterliste des Bundesamtes für Umwelt BAFU aufgeführt ist, ausgerüstet sein. Für die zweite Möglichkeit muss der Motor (inkl. Abgasbehandlungs-

system) eine Zertifizierungsmessung bezüglich Partikelanzahl vorweisen. Die zugelassenen Motoren werden auf der Motorenliste aufgeführt. Nähere Informationen und die beiden Listen (Filter- und Motorenliste) sind unter folgendem Link zu finden: <http://www.bafu.admin.ch/partikelfilterliste/index.html?lang=de&lang=de>

Ein Partikelanzahlgrenzwert kann nur mit einem geschlossenen Partikelfiltersystem eingehalten werden, ein SCR-System reicht nicht aus. Zwar sind die Partikelanzahlwerte bei einem SCR-System aufgrund der höheren Verbrennungstemperatur leicht tiefer als bei einem Motor ohne Abgasnachbehandlung, doch werden nie die tiefen Partikelemissionen wie nach einem Partikelfilter erreicht. Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse von Messungen an der Forschungsanstalt Agroscope. Verglichen wurden drei verschiedene Motortechniken: Ein Motor der Abgasstufe III A mit Abgasrückführung, ein Motor der Abgasstufe III B mit SCR-Abgasnachbehandlung und ein Motor der Abgasstufe II mit einem nachgerüsteten Partikelfilter. Der Motor mit SCR-Abgasnachbehandlung erreichte leicht tiefere Partikelwerte als der Motor der Stufe III A. Im Vergleich zum Motor mit nachgerüstetem Partikelfilter liegt die Partikelanzahl immer noch auf einem hohen Niveau. Der auf den Motor der Abgasstufe II nachgerüstete Filter weist einen sehr hohen Abscheidegrad von rund 99,99% auf. Dies wird im Vergleich zur Partikel-

**Motortechniken im Vergleich bezüglich Partikelanzahl / Techniques de moteur en comparaison relative au nombre de particules**

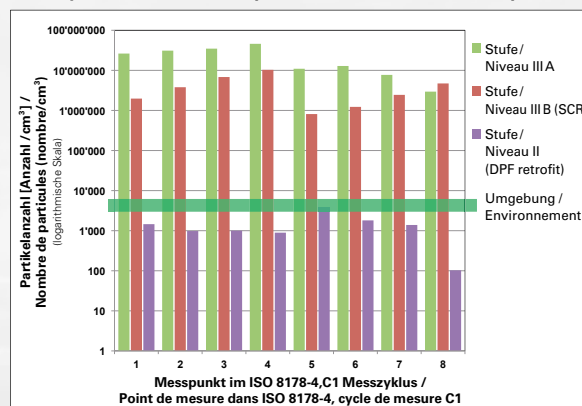


Abbildung 3: Vergleich der unterschiedlichen Abgasnachbehandlungssysteme bezüglich Partikelanzahl (Pn) im 8-Stufentest. Die grünen Säulen zeigen die Pn-Emissionen eines Motors der Stufe III A ohne Abgasnachbehandlungssystem, die roten Säulen die Pn-Emissionen eines Motors mit SCR Abgasnachbehandlung und die violetten Säulen die Pn-Emissionen des Motors der Abgasstufe II mit nachgerüstetem, geschlossenem Partikelfilter.

Figure 3 : comparaison des différents systèmes de traitement des gaz d'échappement relative au nombre de particules (Pn) dans le test à 8 niveaux. Les colonnes vertes indiquent les émissions Pn d'un moteur de niveau III A sans système de traitement des gaz d'échappement, les colonnes rouges, les émissions Pn d'un moteur avec traitement SCR, et les colonnes violettes, les émissions Pn du moteur de niveau II avec filtre à particules fermé monté ultérieurement.

konzentration in der Umgebungsluft verdeutlicht. Bei den meisten Messpunkten des 8-Stufenzyklus liegen die Partikelemissionen im Abgas unterhalb der Partikelkonzentration der Umgebungsluft.

**Unterschiedliche Strategien der Hersteller**

Die Hersteller haben bislang die Technologien der leistungsstärkeren Motoren bekannt gegeben, da die Einführung der neuen Abgasvorschrift

Motorenhersteller Fabricants de moteurs	Abgasnachbehandlungstechnologie zum Erreichen von Stufe III B Technologie de traitement des gaz d'échappement pour niveau III B
Perkins	DPF
John Deere	DPF
Fiat PowerTrain (Iveco)	SCR (für höhere Leistungsklassen), DPF (für kleinere Leistungsklassen) SCR (pour niveaux de puissance supérieurs), DPF (pour niveaux de puissance inférieurs)
Deutz	SCR (hauptsächlich für Landmaschinen), DPF (für Baumaschinen) SCR (principalement pour machines agricoles), DPF (pour machines de chantier)
Agco Sisu Power	SCR

Tabelle 2: Technologien der Motorenhersteller zur Einhaltung der Abgasstufe III B. (DPF = Dieselpartikelfilter, SCR = Abgasnachbehandlung mittels Harnstofflösung)

Tableau 2: technologies des fabricants de moteurs pour respecter le niveau III B. (DPF = filtre à particules diesel, SCR = post-traitement des gaz d'échappement avec urée)



un système de filtre à particules fermé, un système SCR ne suffisant pas. Les valeurs de nombre de particules sont légèrement plus basses dans un système SCR que dans un moteur sans traitement de gaz, à cause de la température de combustion plus élevée, mais on n'atteint pas les faibles émissions de particules comme après un filtre à particules. La figure 3 montre les résultats de mesures effectuées par la Station de recherche Agroscope. Trois différentes techniques de moteur ont été comparées: un moteur de niveau III A avec recyclage des gaz, un moteur de niveau IIIB avec traitement des gaz SCR et un moteur de niveau II avec un filtre à particules monté ultérieurement. Le moteur avec traitement SCR a atteint des valeurs de particules légèrement plus basses que le moteur du niveau III A. Comparé avec le moteur avec filtre à particules monté ultérieurement, le nombre de particules est toutefois encore très élevé. Le filtre monté sur le moteur de niveau II présente un très haut taux de séparation d'environ 99,99 %. Ceci est démontré par la comparaison avec la concentration de particules dans l'air ambiant. Pour la plupart des points de mesure du cycle à 8 niveaux, les émissions de particules dans les gaz d'échappement sont inférieures à la concentration de particules dans l'air ambiant.

#### Les différentes stratégies des fabricants

Les fabricants ont jusqu'à présent rendu publiques les technologies des moteurs plus puissants, car l'introduction des nouvelles prescriptions sur les gaz d'échappement sont classées en fonction des niveaux de puissance et les valeurs limites des moteurs moins puissants ne seront baissées que plus tard. Le tableau 2 donne un aperçu de l'état actuel des technologies utilisées par différents fabricants de moteurs.

#### Effets sur l'exploitation des véhicules

L'utilisation de systèmes de traitement des gaz d'échappement nécessite des travaux d'entretien et de contrôle dans l'exploitation quotidienne. Pour les systèmes SCR, l'urée doit être régulièrement complétée. Généralement, le réservoir d'AdBlue est dimensionné de manière à devoir être rempli après deux à trois ravitaillements en diesel. Un niveau bas est indiqué à temps, afin qu'il reste suffisamment de temps pour le remplissage. Si par contre les indica-

tions sont ignorées et que l'on essaie de rouler sans AdBlue, les oxydes d'azote ne peuvent pas être réduits dans le catalyseur. Un capteur après le catalyseur détecte les émissions trop élevées et baisse ensuite nettement la puissance du moteur. Une conduite lente est encore possible, mais le travail normal est empêché, ce qui oblige le conducteur à faire le plein de solution d'urée.

Lors de l'emploi d'un filtre à particules, il faut prendre garde à la qualité de l'huile moteur, car une mauvaise qualité produit plus de cendre, qui ensuite obstrue le filtre. Un test sur le terrain effectué à la Station de recherche Agroscope Reckenholz-Tänikon ART avec différentes qualités d'huile et trois véhicules (deux tracteurs et une machine forestière) montra une réduction de cendre dans le filtre d'environ 50 pourcent avec l'emploi d'une huile moteur pauvre en cendre. Les huiles Low SAPS offrent une proportion minimale de cendre sulfatée, de phosphore et de soufre. Lors de l'essai, tous les véhicules ont d'abord roulé avec de l'huile moteur ordinaire. Après un an, le filtre à particules a été nettoyé et tous les résidus de cendre collectés. Après un changement d'huile moteur pour une huile pauvre en cendre, les machines ont fonctionné durant la même durée qu'avec l'huile normale. Le filtre a ensuite été de nouveau nettoyé. L'examen s'est fait avec des filtres montés ultérieurement, c'est pourquoi la durée jusqu'au nettoyage du filtre était si courte. Pour les filtres de série, le législateur américain exige des intervalles de nettoyage de minimum 3'000 h pour les moteurs de moins de 130 kW et de 4'500 h pour les moteurs plus puissants.

#### Perspectives

En 2014, avec l'introduction du niveau IV, aura lieu le prochain renforcement des valeurs limites, qui exigeront une nouvelle réduction des oxydes d'azote. Un système de traitement des gaz d'échappement pour la réduction des oxydes d'azote (système SCR) sera sans doute nécessaire. Suivant les fabricants de moteurs, cette norme sera probablement atteinte avec seulement un système SCR ou avec la combinaison d'un système SCR et d'un système de filtre à particules.

Le 25 octobre de l'année passée, le Parlement européen a adopté en première lecture la création d'un nouveau niveau V, qui sous réserve de la faisabilité technique doit s'orienter aux exi-

ten nach Leistungsklassen abgestuft ist und die Grenzwerte der leistungsschwächeren Motoren erst später gesenkt werden. Tabelle 2 gibt einen Überblick des derzeitigen Standes der eingesetzten Technologien der unterschiedlichen Motorenhersteller.

#### Auswirkungen auf Betrieb der Fahrzeuge

Der Einsatz von Abgasnachbehandlungssystemen bedingt im täglichen Betrieb gewisse Wartungs- und Kontrollarbeiten. Bei SCR-Systemen muss die Harnstofflösung regelmäßig aufgefüllt werden. Meist ist der Ad-Blue Tank so gross dimensioniert, dass eine Nachfüllung bei jeder zweiten oder dritten Treibstofffüllung erfolgen kann. Ein geringer Füllstand wird rechtzeitig angezeigt, so dass genügend Zeit zum Nachtanken bleibt. Werden die Warnmeldungen hingegen ignoriert und versucht ohne AdBlue zu fahren, können die Stickoxide im Katalysator nicht reduziert werden. Ein Sensor nach dem Katalysator detektiert die zu hohen Emissionen und senkt dadurch die Motorleistung deutlich. Langsames Fahren ist weiterhin möglich, speditives Arbeiten wird damit aber behindert, was den Fahrer zum Nachfüllen der Harnstofflösung zwingt. Beim Einsatz eines Partikelfilters ist auf die Qualität des Motoröls zu achten, da eine schlechte Ölqualität mehr Asche bildet, die den Filter zu-



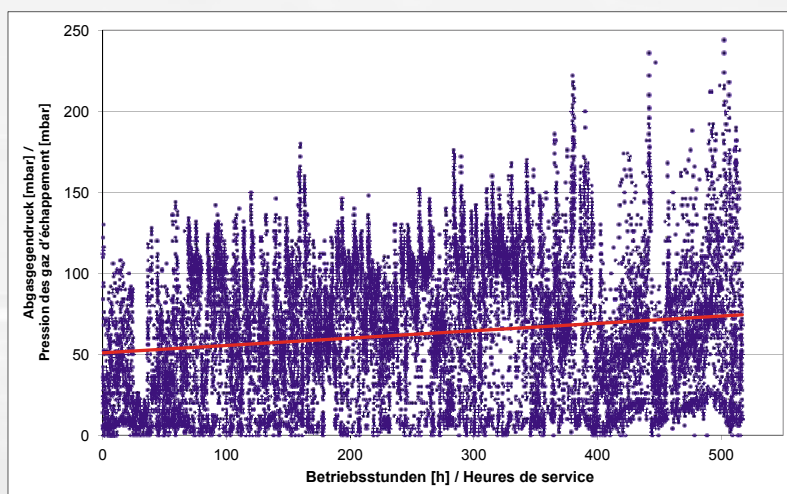


Abbildung 4: Anstieg des Abgasgegendrucks bei einem Partikelfiltersystem aufgrund von Ascheablagerungen im Filter. Je mehr Ascherückstände sich im Filter befinden, desto kleiner wird die Filterfläche, was den Abgasgegendruck ansteigen lässt.

Figure 4: augmentation de la pression des gaz dans un système de filtre à particules en raison du dépôt de cendre dans le filtre. Plus il y a de cendre dans le filtre, plus la surface du filtre se réduit, ce qui fait monter la pression des gaz d'échappement.

	Fendt Farmer 411 Vario		Deutz-Fahr Agrotan K100		HSM 805 HD	
Ölsorte / type d'huile	normal oil	Low-SAPS	normal oil	Low-SAPS	normal oil	Low-SAPS
Laufzeit / durée [h]	553	553	415	416	674	660
Ölnachfüllung / recharge d'huile [l]	7	5.5	2	2.4	< 1	< 1
Asche / cendre [g]	76.1	28.0	13.1	7.4	17.6	7.2
Asche / cendre [g/100h]	13.8	5.1	3.2	1.8	2.6	1.1
Veränderung Aschemenge / Changement quantité de cendre [%]	-63 %		-44 %		-59 %	



Abbildung 5: Ergebnisse des Feldversuchs mit einem aschearmen Motorenöl. Die Aschemengen konnten durch den Einsatz des Low-SAPS Motorenöl um rund 50 % gesenkt werden. Die Bilder zeigen die Aschemengen jeweils links mit normalem Motorenöl, rechts mit aschearmem Öl (Low SAPS Öl).

Figure 5: résultats des essais sur le terrain avec de l'huile moteur pauvre en cendre. La quantité de cendre a été réduite d'environ 50 % par l'usage d'huile moteur Low-SAPS. Les photos montrent la quantité de cendre, à gauche avec de l'huile normale, à droite avec de l'huile pauvre en cendre (huile Low SAPS).

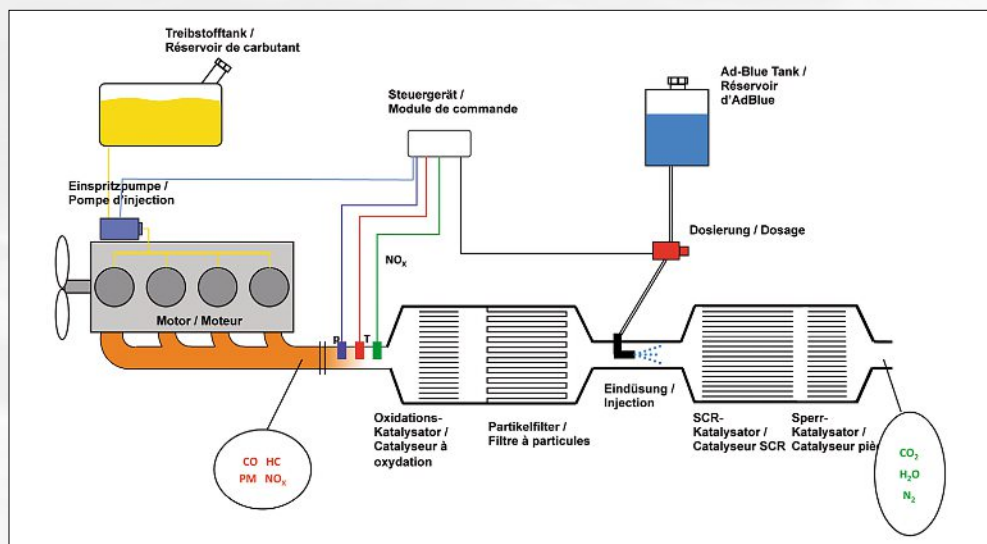


Abbildung 6: Kombination eines Partikelfilters und eines SCR-Systems zum Erreichen der möglichen Abgasstufe V.

Figure 6: combinaison d'un filtre à particules et d'un système SCR pour atteindre le niveau V.

sätzlich belädt. Ein Feldversuch an der Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART mit unterschiedlichen Ölqualitäten an drei Fahrzeugen (zwei Traktoren und eine Forstmaschine) zeigte beim Einsatz eines aschearmen Motorenöls eine Aschereduktion im Filter von rund 50 Prozent. Low-SAPS Öle besitzen minimale Anteile von Sulfatasche, Phosphor und Schwefel. Im Versuch liefen alle Fahrzeuge zuerst mit konventionellem Motorenöl. Nach einem Jahr wurde der Partikelfilter gereinigt und alle Ascherückstände gesammelt. Nach einer Motorölmstellung auf das aschearme Motorenöl liefen die Maschinen die gleiche Laufzeit, wie mit dem normalen Öl. Anschliessend erfolgte eine weitere Filterreinigung. Die Untersuchung erfolgte an nachgerüsteten Filtern, weshalb die Laufzeit bis zur Filterreinigung nur kurz war. Für Serienfilter werden durch den amerikanischen Gesetzgeber Reinigungsintervalle von mindestens 3000 h bei Motoren mit einer Leistung unter 130 kW und von 4500 h bei leistungsstärkeren Motoren verlangt.

**Ausblick**

2014 erfolgt mit Einführung der Stufe IV die nächste Verschärfung der Abgasgrenzwerte, die eine weitere Reduktion der Stickoxide fordert. Zur Erfüllung ist höchstwahrscheinlich ein Abgasnachbehandlungssystem zur Reduktion der Stickoxide notwendig (SCR-System). Je nach Motorenhersteller gibt es Anzeichen, die Norm nur mit einem SCR-System zu erreichen, oder aber in Kombination eines SCR- und eines Partikelfiltersystems. Am 25. Oktober letzten Jahres hat das Europäische Parlament in erster Lesung, die Beratung zur Schaffung einer neuen Abgasstufe V aufgenommen, die sich vorbehaltlich der technischen Machbarkeit, an den Anforderungen der Euro-VI-Normen für schwere Nutzfahrzeuge orientieren soll. Das bedeutet, dass ein zusätzlicher Grenzwert für die Partikelanzahl eingeführt werden soll, um eine wirksame Verringerung ultrafeiner Partikel sicherzustellen. Die genauen Grenzwerte, sowie der Einführungszeit-



gences des normes Euro-VI pour les véhicules utilitaires lourds. Cela signifie qu'une valeur limite supplémentaire pour le nombre de particules doit être introduite, afin de garantir une réduction efficace des particules ultrafines. Les valeurs limites précises ainsi que la période d'introduction du nouveau niveau V ne sont pas encore définies. Avec la probable introduction de la valeur limite de nombre de particules (niveau V), il n'y aura sans doute pas d'autres voies que le filtre à particules. Ceci rendra presque obligatoires les deux technologies de traitement des gaz d'échappement (SCR pour réduire les oxydes d'azote et DPF pour réduire les particules). Ceci est visible dans l'Euro VI pour camions. L'utilisation combinée des deux systèmes de traitement des gaz est appelée système SCRT. Généralement, c'est un filtre à particules en combinaison avec un système SCR en aval.

Comparé aux moteurs des années 90, ces systèmes de traitement des gaz marquent une étape importante, car les moteurs n'émettent quasiment plus de gaz nocifs. Les défis techniques pour atteindre ce niveau élevé ne doivent pas être sous-estimés et ne sont possibles qu'avec des gestions de moteur électroniques modernes, des systèmes d'injection haute pression, des catalyseurs et des filtres à particules. ■

*Marco Landis, Station de recherche  
Agroscope Reckenholz-Tänikon ART,  
Tänikon 1, 8356 Ettenhausen  
marco.landis@art.admin.ch*

raum der neuen Abgasstufe V liegen noch nicht vor.

Mit der wahrscheinlichen Einführung des Anzahlgrenzwertes (Stufe V) wird wohl kein Weg an einem Partikelfilter vorbeiführen. Dies wird fast zwangsläufig beide Abgasnachbehandlungstechnologien (SCR zur Reduktion der Stickoxide und DPF zur Reduktion der Partikel) erforderlich machen. Dies ist aktuell bei den Euro VI LKWs zu sehen. Beim kombinierten Einsatz beider Abgasnachbehandlungssysteme spricht man von SCRT-Systemen. Dabei ist meist ein Partikelfilter in Kombination mit einem nachgeschalteten SCR-System gemeint.

Im Vergleich zu Motoren aus den 1990-er Jahren stellen diese Abgasbehandlungssysteme einen grossen Meilenstein dar und bewirken, dass die Motoren kaum noch schädliche Abgase ausstossen. Die technischen Anforderungen zur Erreichung dieses hohen Niveaus sind nicht zu unterschätzen und sind nur durch modernste elektronische Motorsteuerungen, Hochdruckeinspritzsystemen, Katalysatoren und Partikelfilter erreichbar. ■

*Marco Landis, Forschungsanstalt  
Agroscope Reckenholz-Tänikon ART,  
Tänikon 1, 8356 Ettenhausen  
marco.landis@art.admin.ch*

