

Zeitschrift: Landtechnik Schweiz

Herausgeber: Landtechnik Schweiz

Band: 69 (2007)

Heft: 8

Artikel: Partikelfilter-Nachrüstung bei Traktoren : Abstimmung des Filtersystems auf den Fahrzeugeinsatz nötig

Autor: Landis, Marco / Schiess, Isidor / Wolfensberger, Ueli

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1080578>

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: 04.02.2026

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

Partikelfilter-Nachrüstung bei Traktoren

Abstimmung des Filtersystems auf den Fahrzeugeinsatz nötig

Marco Landis, Isidor Schiess, Ueli Wolfensberger, Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Tänikon CH-8356 Ettenhausen, E-Mail: marco.landis@art.admin.ch

Die in der Landwirtschaft eingesetzten Traktoren stossen Dieselrusspartikel aus. Diese Feinstpartikel sind gesundheitsschädigend und krebsfördernd. Filtersysteme können den Partikelausstoß der Traktoren drastisch reduzieren. Serienmäßig werden die Traktoren bisher nicht mit Partikelfiltern ausgerüstet. Um die Möglichkeit der Nachrüstung abzuklären, wurden acht Traktoren und ein Hoflader versuchsweise nachträglich mit Partikelfiltern ausgerüstet. Die Fahrzeuge wurden in verschiedenen Bereichen der Land- und Forstwirtschaft eingesetzt, um möglichst viele unterschiedlichen Arbeiten abzudecken. Als Partikelfilter wurden geschlossene Filtersysteme verwendet. Die Filter stammen von verschiedenen Herstellern und verfügen über unterschiedliche Regenerationssysteme.

Die Wirksamkeit war bei allen gemessenen Filtern mit einem Abscheidegrad von 99 % bezogen auf die Anzahl der Feinpartikel außerordentlich hoch. Bei Einbau und Betrieb sind verschiedene Probleme aufgetreten: hoher Platzbedarf des Filters beim Aufbau, Nichterreichen der notwendigen Abgastemperaturen, Dimensionierung des Filters zur Vermeidung eines Gegendruckanstiegs, Elektronikausfall der Filterüberwachung bis hin zum Totalschaden des Filters.

Der Filteraufbau auf einen Traktor mittlerer Größe verursacht Kosten zwischen etwa CHF 8000.– und 15000.–. Zusätzlich fallen wiederkehrende Kosten für die Filterreinigung und für Zusatzenergie bei aktiven Filtersystemen an.



Abb. 1: Partikelfilter

| Inhalt | Seite |
|--------------------------------------|-------|
| Problemstellung | 46 |
| Versuchsanlage | 46 |
| Begriffe | 46 |
| Regenerationssysteme | 47 |
| Versuchsablauf und Versuchsfahrzeuge | 49 |
| Prüfstandsmessungen | 49 |
| Datenlogger | 51 |
| Praxiserfahrungen | 51 |
| Kosten | 53 |
| Ausblick | 54 |
| Schlussfolgerung | 54 |



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Volkswirtschafts-departement EVD
Forschungsanstalt
Agroscope Reckenholz-Tänikon ART

Problemstellung

Die von Dieselmotoren erzeugten Russpartikel gehören nach heutiger Kenntnis zu den gesundheitsschädlichsten Bestandteilen des PM-10 Feinstaubes. Für die Reduktion dieser Russemissionen gibt es Partikelfilter, die auch die ultrafeinen Partikel in der Grösse von 20–30 Nanometer zurückhalten. Diese gefährlichen lungengängigen und krebserregenden Feinstpartikel werden heute von den gültigen Partikelgrenzwerten für Dieselmotoren nicht erfasst, weil sich die Vorschrift auf eine gravimetrische Messmethode stützt und die Feinstpartikel eine verschwindend kleine Masse aufweisen. Deshalb können Traktormotoren die gesetzlichen Grenzwerte noch längere Zeit ohne Partikelfilter einhalten, und von den Traktorherstellern gibt es bisher keine Anzeichen, Partikelfilter in Traktoren anzubieten. Die landwirtschaftlichen Traktoren machen einen nicht unbedeutenden Anteil an den Dieselrussemissionen aus. Neueste Berechnungen des BAFU gehen von 400 Tonnen pro Jahr aus. Zudem stehen Traktoren überdurchschnittlich lange im Einsatz (die Hälfte der in der Schweiz immatrikulierten Traktoren ist älter als 20 Jahre), und die Betroffenen leiden selbst unter den Dieselrussemissionen. Deshalb schien es angezeigt, die Möglichkeiten zur Nachrüstung von landwirtschaftlichen Maschinen mit Partikelfiltern zu untersuchen.

über längere Zeit im praktischen Einsatz ermittelt worden. Aufgrund dieser Daten wählten fünf Firmen Filtertypen für die Ausrüstung von einem oder mehreren der zur Verfügung gestellten Traktoren aus. Es waren schliesslich neun Traktoren mit Partikelfilter im Versuch, die alle zu Beginn und am Ende des durchschnittlich einjährigen Praxiseinsatzes auf dem Traktorprüfstand ausgemessen wurden. Ausser der Partikelanzahl umfassten die Messungen auch die übrigen gesetzlich limitierten Abgasemissionen (Stickoxide inkl. Stickstoffdioxid (NO_2), Kohlenwasserstoffe, Kohlenmonoxid), Rauch, Treibstoffverbrauch und Leistung. Während des ganzen Praxiseinsatzes wurden laufend die Abgastemperatur und der Gegendruck aufgezeichnet.

Dieselruss

Dieselruss gehört ebenfalls zum Feinstaub, ist also eine Teilmenge vom Feinstaub PM10. Bei der Verbrennung im Motor bilden sich hauptsächlich bei Selbstzündermotoren (Dieselmotoren) aufgrund der inhomogenen Verbrennung zuerst extrem kleine Primärpartikel im Bereich von $0,03\text{ }\mu\text{m}$. Bereits beim Abgasaustritt haben sich diese Primärpartikel zu grösseren trauben- oder kettenförmigen Gebilden zusammengeballt. Diese besitzen dann im Abgas meist eine Grösse von $0,1\text{ }\mu\text{m}$ (ein zehntausendstel Millimeter). Einzelne Partikel wachsen weiter und werden grösser als $0,4\text{ }\mu\text{m}$, dadurch werden sie als schwarzer Rauch sichtbar. Die lungengängigen Feinstpartikel bleiben aber unsichtbar. Die Feinstpartikel aus der Verbrennung in Motoren bestehen nicht nur aus Kohlenstoff, sondern es sind weitere Komponenten angelagert, wie unverbrannter Treibstoff und Öl, Sulfate und auch geringe Mengen Asche. Der menschliche Organismus ist in der Lage, Partikel grösser als $1\text{ }\mu\text{m}$ in der Nase und Luftröhre zu stoppen und sie wieder auszuhusten. Die sehr feinen Partikel können hingegen ungehindert bis in die Lungenbläschen vordringen oder sogar durch die Zellen direkt in die Blutbahn gelangen. Dadurch können sie sich im ganzen Körper verteilen und dort ihre schädliche Wirkung entfalten. Die Dieselrusspartikel gelten gemäss Luftreinhalteverordnung (LRV, SR 814.318.142.1, Anhang 1, Ziffer 83) als krebserregend. Da besonders die feinsten Partikel schädlich sind, ist es aus wissenschaftlicher Sicht ausserordentlich wichtig, die Anzahl der Parti-

Begriffe

Feinstaub PM10

Als PM10 werden feste oder flüssige Feinstpartikel bezeichnet, welche kleiner als $10\text{ }\mu\text{m}$ sind. $1\text{ }\mu\text{m}$ entspricht einem tausendstel Millimeter oder einem millionstel Meter. Aufgrund der geringen Grösse schweben die Partikel in der Luft und sinken nur langsam zu Boden. Feinstaub entsteht durch Prozesse, wie Abrieb oder Aufwirbelung, durch Verbrennung und auch durch chemische Reaktionen von gasförmigen Luftschadstoffen wie Ammoniak, Stickoxiden, Schwefeldioxid und flüchtigen organischen Verbindungen (Bildung von sekundären Aerosolen).

Versuchsanlage

Die Zielsetzung des vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) finanziell mitunterstützten Projektes war die Abklärung sämtlicher Anforderungen für einen erfolgreichen Einsatz von Partikelfiltern bei Traktoren, insbesondere bezüglich Robustheit, Einfachheit im Betrieb, Effizienz der Partikeleliminierung (gemäss VERT-Standard, VERT: Verminderung der Emissionen von Realmaschinen im Tunnelbau: mindestens 97 % der Anzahl Partikel), Kostenniveau und Beurteilung der wirtschaftlichen Tragbarkeit. Interessierte Firmen, die Partikelfiltersysteme und deren Aufbau anbieten, wurden eingeladen, an einem ausgewählten Traktor ein Filtersystem nachzurüsten. Vorgängig war der Verlauf der Betriebstemperaturen

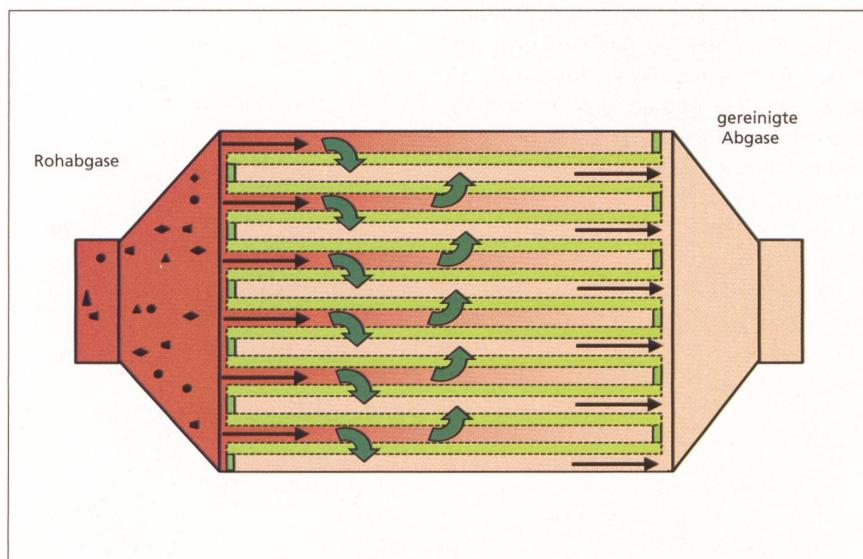


Abb. 2: Schema eines Partikelfilters.

Tab. 1: Im Versuch eingesetzte aktive Regenerationssysteme.

| | |
|--|--|
| | <p>Über eine kleine Pumpe wird Diesel zu einem Brenner geführt. Der Diesel entzündet sich an einer Glühkerze. Bei einem Stillstandsbrenner sorgt ein Gebläse für Luftzufuhr. Durch die Hitze des Brenners wird der Russ entzündet.</p> |
| | |

kel zu messen und nicht deren Gewicht. Bei der gravimetrischen Messmethode, die bisher für die Abgasgrenzwerte massgebend ist, fallen die ultrafeinen Partikel aufgrund ihrer minimalen Masse kaum ins Gewicht.

Partikelfilter

Ein Partikelfilter besteht meist aus einem Filterkörper in Wabenform, daneben existieren auch Faserfilter. Als Werkstoff kommt Siliziumcarbid, Cordierit oder Sintermetall in Frage. Durch die wechselseitig verschlossenen Kanäle eines Wabenfilters wird das Abgas gezwungen, die porösen Trennwände des Filters zu durchströmen. An diesen Trennwänden lagert sich der Russ ab. Für eine gute Abscheidung sind geringe Strömungsgeschwindigkeiten notwendig. Dies macht eine gewisse Baugröße des Filters notwendig.

Bei den Partikelfiltern unterscheidet man zwischen den oben beschriebenen geschlossenen Filtersystemen und sogenannten offenen Filtern oder auch Partikelkatalysatoren genannt, bei denen die Kanäle nicht wechselseitig geschlossen sind. Die offenen Systeme weisen eine deutlich geringere Abscheidewirkung auf und wurden bei dieser Untersuchung nicht berücksichtigt.

Regenerationssysteme

Damit der Filter nicht verstopft, wird der Russ periodisch oder kontinuierlich zu Kohlenstoffdioxid CO_2 (gasförmig) und wenig Asche verbrannt. Russ besteht zum grössten Teil aus Kohlenstoff und beginnt normalerweise bei Temperaturen über 600°C (Russzündtemperatur) abzubrennen. Da diese Temperatur in der Praxis kaum erreicht wird, gibt es grundsätzlich zwei Strategien, um den Russ abzubrennen: Durch Zufuhr von zusätzlicher Energie oder durch Ab senken der Russzündtemperatur. Tabellen 1 und 2 zeigen die im Versuch eingesetzten Filtersysteme. Neben den beschriebenen Systemen gibt es auch Kombinationen sowohl zwischen aktiven und passiven Systemen (zum Beispiel elektrische Beheizung zusammen mit Additivzugabe), als auch innerhalb von passiven Systemen (zum Beispiel Vorkatalysator zusammen mit einem beschichteten Filter). Ein System, das in Vorversuchen, aber nicht im Praxisversuch

Tab. 2: Im Versuch eingesetzte passive Regenerationssysteme.

| | |
|--|--|
| <p>Vorgeschalteter Katalysator CRT-System (= continuously regenerating trap)</p> | <p>Der vorgeschaltete Katalysator erzeugt durch Oxidation Stickstoffdioxid NO_2 aus Stickstoffoxiden NO. Durch das zusätzliche Sauerstoffatom brennt der Russ bereits bei niedrigen Temperaturen ab. Gleichzeitig verringert der Katalysator auch noch die Kohlenwasserstoffe HC und Kohlenmonoxid CO. Gleichzeitig kann aber auch ein Überschuss an Stickstoffdioxid NO_2 entstehen und im Abgas entweichen, dann spricht man von Sekundäremissionen.</p> |
| <p>Beschichteter Filter</p> | <p>Durch den Kontakt des Russes mit der Beschichtung, beispielsweise Platin, reagiert dieser bei niedrigen Temperaturen mit Sauerstoff und verbrennt zu Kohlendioxid CO_2. Auch hier werden je nach Beschichtung Kohlenwasserstoffe HC und Kohlenmonoxid CO reduziert, gleichzeitig kann aber durch Oxidation auch mehr NO_2 entstehen.</p> |
| <p>Zugabe eines Additivs</p> | <p>Dem Treibstoff wird ein Additiv, beispielsweise auf Eisenbasis in geringer Konzentration (maximal 1 %) beigemischt. Das Additiv ist nach der Verbrennung gleichmäßig im Russ verteilt, wirkt dort als Katalysator und senkt dadurch die Russzündtemperatur ab.</p> |

Tab. 3: Versuchsfahrzeuge

| | | |
|--|---|---|
| Lindner Geotrac 65  <p>Motorleistung: 48 kW nach ISO Abgasstufe: Stufe 1 Filterprinzip: Katalytische Beschichtung Filterhersteller: Engelhard Einbaufirma: Baumot Einbau: 14.1.2005 bei 1018 Stunden Filterstunden: mehr als 519 Stunden Einsatzbereich: Hof- und Feldarbeiten, Einsatz vor Mischwagen</p> | Fendt 411 Vario  <p>Motorleistung: 81 kW nach ECE Abgasstufe: Stufe 2 Filterprinzip: Vorkatalysator CRT Filterhersteller: Johnson Matthey Einbaufirma: Hüga Einbau: 21.2.2005 bei 452 Stunden Filterstunden: mehr als 956 Stunden Einsatzbereich: Mittlere bis schwere Transport- und Ackerarbeiten</p> | Schäffer 4042 (Hoflader)  <p>Motorleistung: 29 kW nach ISO Abgasstufe: Stufe 1 Filterprinzip: Dieselstillstandsbrenner Filterhersteller: ATH Einbaufirma: Baumot Einbau: 7.3.2005 bei 509 Stunden Filterstunden: mehr als 598 Stunden Einsatzbereich: Materialumschlag, Ausmisten von Ställen</p> |
| Hürlimann XT 908  <p>Motorleistung: 63 kW nach DIN Abgasstufe: keine Filterprinzip: Additivzumischung Filterhersteller: HUSS Umwelttechnik Einbaufirma: HUSS Umwelttechnik Einbau: 30.3.2005 bei 1153 Stunden Filterstunden: 350 Stunden Einsatzbereich: Forstarbeiten, Einsatz vor Holzspalter</p> | Valtra 6350-4 blau  <p>Motorleistung: 66 kW nach DIN Abgasstufe: Stufe 1 Filterprinzip: Katalytische Beschichtung Filterhersteller: Engelhard Einbaufirma: Baumot Einbau: 1. : 25.7.2005 bei 1105 Stunden 2. : 1.11.2005 bei 1233 Stunden Filterstunden: 1. : 0 Stunden 2. : mehr als 641 Stunden Einsatzbereich: Mittlere bis schwere Transportarbeiten, Seilwindenarbeit</p> | Deutz Agrotron K100  <p>Motorleistung: 70 kW nach ECE Abgasstufe: Stufe 2 Filterprinzip: Elektrische Beheizung Filterhersteller: Johnson Matthey Einbaufirma: Minelli AG Einbau: 16.12.2005 bei 20 Stunden Filterstunden: mehr als 472 Stunden Einsatzbereich: Transport und Ackerarbeiten, Gülle ausbringen</p> |
| Valtra 6350-4 rot  <p>Motorleistung: 74 kW nach ISO Abgasstufe: Stufe 2 Filterprinzip: Vorkatalysator CRT Filterhersteller: Johnson Matthey Einbaufirma: Minelli AG Einbau: 1. : 19.12.2005 bei 9 Stunden 2. : 11.5.2006 bei 225 Stunden 3. : 28.6.2006 bei 280 Stunden 4. : 7.8.2006 bei 389 Stunden Filterstunden: 1. : 0 Stunden 2. : 46 Stunden 3. : 52 Stunden 4. : mehr als 146 Stunden Einsatzbereich: Forstarbeiten</p> | John Deere 6620  <p>Motorleistung: 92 kW nach ECE Abgasstufe: Stufe 2 Filterprinzip: Additivzumischung Filterhersteller: Daubjerg Einbaufirma: Bärle Agrotechnik GmbH Einbau: 1. : 1.2.2006 bei 320 Stunden 2. : 2.5.2006 bei 383 Stunden 3. : 17.8.2006 bei 497 Stunden Filterstunden: 1. : 63 Stunden 2. : 95 Stunden 3. : 145 Stunden Einsatzbereich: Diverse Arbeiten als Vorführtraktor</p> | Same Dorado 75  <p>Motorleistung: 53 kW nach ECE Abgasstufe: keine Filterprinzip: Katalytische Beschichtung Filterhersteller: HUG Engineering Einbaufirma: Hüga Einbau: 1. : 22.6.2006 bei 1698 Stunden 2. : 10.7.2006 bei 1710 Stunden 3. : 21.7.2006 bei 1720 Stunden 4. : 1.9.2006 bei 1766 Stunden Filterstunden: 1. : 12 Stunden 2. : 9 Stunden 3. : 46 Stunden 4. : 128 Stunden Einsatzbereich: Leichte bis mittlere Feldarbeit</p> |

eingesetzt wurde, drosselt die Luftzufuhr des Motors mittels Klappe und bewirkt so gezielt eine kurzzeitige Erhöhung der Abgastemperatur.

Aktive Filtersysteme

Bei diesen Systemen wird dem vollen Filter zusätzliche Energie zugeführt, welche zu einem Abbrennen des Russes führt. Solche Systeme eignen sich für Fahrzeuge mit niedrigen Abgastemperaturen, also Fahrzeuge, welche jeweils nur kurzzeitig in Betrieb sind oder eine geringe Motorauslastung haben.

Passive Filtersysteme

Bei diesen Systemen wird die Russzündtemperatur durch unterschiedliche Massnahmen auf etwa 250 bis 300°C abgesenkt. Dadurch brennt der Russ automatisch ab, sobald diese Temperatur während des Betriebs erreicht wird. Solche Systeme eignen sich für Fahrzeuge, welche regelmäßig eine hohe Abgastemperatur erreichen.

Versuchsablauf und Versuchsfahrzeuge

Um die Möglichkeit der Nachrüstung mit Partikelfiltern abzuklären, wurden acht Traktoren und ein Hoflader für die Nachrüstung mit Filtersystemen ausgewählt, die in verschiedenen Bereichen der Land- und Forstwirtschaft eingesetzt werden und möglichst viele unterschiedliche Arbeiten in diesen Gebieten abdecken. Diese Fahrzeuge verfügen über Motoren der Abgasstufe 2 oder älter. Die Grenzwerte der entsprechenden Abgasstufe sind in Abbildung 10 zu finden. Die Abgastemperaturen wurden bei den Versuchsfahrzeugen über einen längeren Zeitraum mit Hilfe eines Datenloggers aufgezeichnet. Den Filterlieferanten wurde daraufhin die Möglichkeit gegeben, sich für Fahrzeuge zu entscheiden, die sie ausrüsten möchten. Die Wahl des Filtersystems erfolgte durch die Lieferanten, die den Aufbau der Filter auf die Fahrzeuge auch selbst vornahmen.

Der Wirkungsgrad der Filter wurde kurz nach der Inbetriebnahme und ein Jahr später auf dem Prüfstand gemessen. Während des Praxiseinsatzes zeichnete man mit Hilfe eines Datenloggers wichtige Parameter, wie Abgastemperatur und Abgasgegendruck auf. Störungen und Probleme, welche durch die Filter entstanden, wurden in

einem Tagebuch dokumentiert. In Tabelle 3 sind neben den technischen Daten der Fahrzeuge auch Filterhersteller und Filteraufbauer aufgeführt sowie die Aufbau-daten mit den jeweiligen Betriebsstunden. War mehr als ein Aufbau notwendig, sind alle Daten notiert. Steht bei den Betriebsstunden mit Filtern (Filterstunden) «mehr als», bedeutet das, dass der Filter immer noch auf dem Fahrzeug ist und der Traktor bis Mitte Januar 2007 bereits die genannte Anzahl Stunden mit dem Filter in Betrieb war. Ist die Zahl abschliessend, musste der Filter aufgrund einer Verstopfung oder eines Schadens ausgebaut werden. Mitte Januar 2007 verfügten noch sechs der neun ausgerüsteten Fahrzeuge über einen Partikelfilter.

werden konnten, deshalb wurden andere Messpunkte mit geringerer Last gefahren.

Partikel

Für die Messung des Filterwirkungsgrades wurde ein Partikelzählgerät CPC der Firma TSI eingesetzt. Die Entnahme, Verdünnung und Aufbereitung des Abgases erfolgte mit dem Gerät «NanometC» der Firma Matter Engineering. Dabei wird ein geringer Teil des Abgasstroms mit Hilfe eines beheizten Rotationsverdünners entnommen und mit Reinluft verdünnt. Die Verdünnung verhindert das Zusammenballen der einzelnen Russpartikel zu grösseren Agglomeraten. Die Beheizung verhindert das Auskondensieren. Der verdünnte Abgasstrom wird anschliessend auf 300°C erhitzt, um alle flüchtigen Bestandteile zu entfernen. Damit die sehr kleinen Partikelzählbar werden, werden diese über ein Butanolbad (Alkoholbad) geführt. Die Partikel wirken als Kondensationskerne und das Butanol lagert sich um diese an. Dadurch werden sie genügend gross und können mit einem Laserzähler detektiert werden.

Alle bisherigen gemessenen, geschlossenen Filtersysteme wiesen im Neuzustand mit einer Abscheiderate von über 99% (Abb. 4) eine hohe Wirksamkeit auf. Auf der vertikalen Achse ist die Partikelanzahl pro Kubikzentimeter aufgezeichnet. Die einzelnen Messpunkte entsprechen dem 6-Stufen-Zyklus. Messpunkt 1 ist bei hoher

Prüfstandsmessungen

Für die Abgasmessungen wurde der FAT-6-Stufen-Zyklus verwendet. Dieser Zyklus beinhaltet sechs verschiedene Punkte aus dem gesamten Motorenkennfeld. Diese Punkte werden prozentual gewichtet und zu einem Gesamtergebnis umgerechnet. Die Leistungsabnahme erfolgte an der Zapfwelle. Lediglich beim Hoflader musste die Leistung hydraulisch gemessen werden. Dort konnte auch der Messzyklus nicht angewendet werden, da die hohen Leistungen hydraulisch nicht abgenommen

FAT 6-Stufen-Test

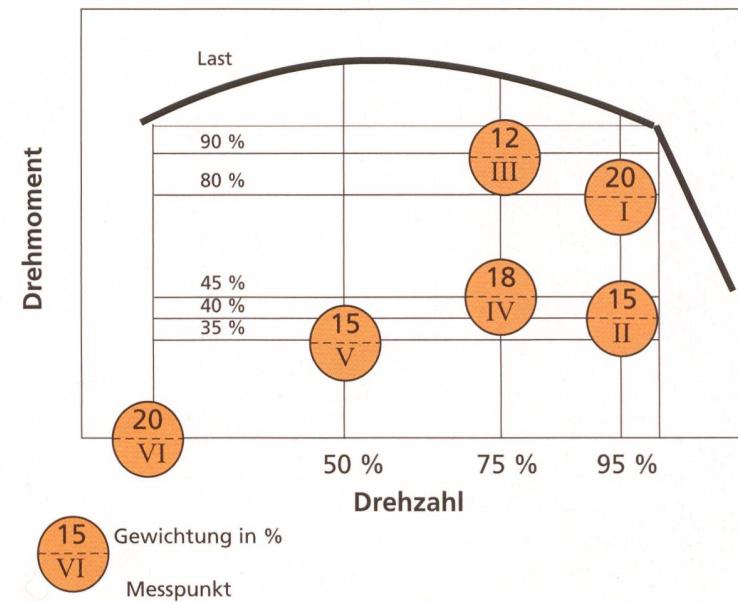


Abb. 3: 6-Stufen- Messzyklus

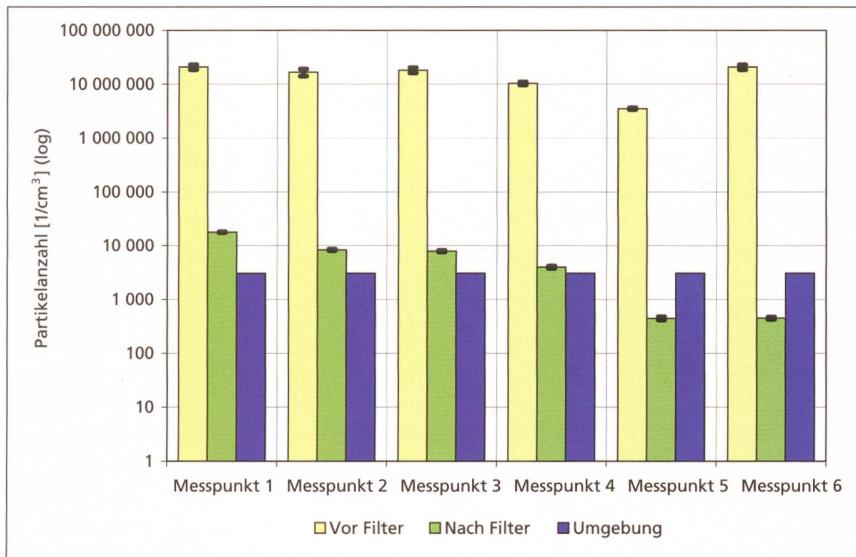


Abb. 4: Wirkungsgrad eines Partikelfilters bei den sechs Messpunkten des FAT-Messzyklus. Die Partikelanzahl ist auf einer logarithmischen Skalierung aufgezeichnet. Jeder Teilstrich der Skalierung ist um jeweils Faktor zehn höher als der darunterliegende.

Drehzahl und hoher Last, Messpunkt 6 entspricht dem unteren Leerlauf des Motors. Vor dem Filter befinden sich im Abgas rund 10 Millionen Partikel pro Kubikzentimeter. Diese sehr grosse Anzahl in einem so kleinen Volumen zeigt auch deutlich, wie ultrafein die Partikel sind. Auch nach dem Filter sind noch Partikel nachweisbar, doch liegen diese Werte viel tiefer, so sind beim Messpunkt 1 noch gut 10000 Partikel pro Kubikzentimeter nachweisbar, bei Messpunkt 6 (Leerlauf) weniger als tausend Partikel pro Kubikzentimeter. Das sind sogar noch weniger Partikel als in der Umgebung vorhanden sind. Dies spricht eindeutig für eine sehr hohe Filtereffizienz von über 99 %, die mit allen Filtern erreicht wurde.

Auch nach einem Jahr Betrieb konnte bei den Filtern noch eine derart hohe Abscheidegrade gemessen werden. Lediglich bei einem Filter entstanden kleine Durchlassstellen, welche zu einem Absinken des Wirkungsgrades auf 97 % führten.

Übrige Abgasbestandteile

Die übrigen gasförmigen Schadstoffe, wie Stickoxide NO_x , Kohlenwasserstoffe HC und Kohlenmonoxid CO wurden mit einer Abgasmessanlage Pierburg AMA2000 gemessen. Da die Stickstoffdioxide NO_2 nicht direkt messbar sind, wurden sie als Differenz zwischen den Stickoxiden NO_x und Stickstoffmonoxid NO gerechnet.

Bei den Messungen wurde festgestellt, dass Systeme, welche einen Vorkatalysator verwenden, oder Filter, welche mit Platin

beschichtet sind, den Anteil an Kohlenmonoxid CO und Kohlenwasserstoffen HC im Abgas deutlich reduzieren können (Abb. 5). Die Summe der Stickoxide NO_x blieb unverändert, jedoch stieg hier der Ausstoß an Stickstoffdioxid NO_2 an (Abb. 6). NO_2 -Überschuss entsteht, wenn der Katalysator mehr NO zu NO_2 aufoxidiert als für die Russverbrennung notwendig ist.

Leistung

Neben den Abgaswerten wurde auch die Leistung bei allen Versuchsfahrzeugen

gemessen. Da der Gegendruck von der Filterbeladung und der Art des originalen Schalldämpfers abhängt, ist eine generelle Aussage bezüglich Leistungsverlust schwierig. Bei Fahrzeugen, bei denen der Gegendruck mit Filter gleich wie mit dem originalen Schalldämpfer ist, wurde kein Leistungsverlust festgestellt. Bei erhöhtem Gegendruck, wie er teilweise bei ersten Aufbauversuchen auftrat, war ein Leistungsverlust von maximal 3 % feststellbar. Um die Abhängigkeit zwischen Gegendruck und Leistung darzustellen, wurden Messungen an einem Motor mit originalem Schalldämpfer durchgeführt, bei dem der Auspuff mittels einer verstellbaren Klappe mehr oder weniger verengt wurde. Der Schalldämpfer erzeugte bei Nennleistung einen Gegendruck von 60 mbar. Eine Verengung des Auspuffes zog einen Anstieg des Gegendruckes nach sich. Abbildung 7 zeigt die Nennleistung des Motors in Abhängigkeit des Gegendruckes. Der Anstieg des Gegendruckes von 60 mbar auf 150 mbar zeigt einen Leistungsverlust von 1 kW bei Nennleistung. 150 mbar ist ein typischer Alarmwert bei Partikelfiltern, folglich bewegen sich die Gegendrucke des Filters in der Praxis meist darunter, dementsprechend gering ist auch der Leistungsverlust. Wird der Gegendruck noch weiter bis auf 240 mbar gesteigert, beträgt der Leistungsverlust 1,6 kW.

Da die Einspritzmenge bei maximaler Leistung nicht gesteigert werden kann, bleibt der absolute Treibstoffverbrauch in Litern pro Stunde gleich. Der spezifische Verbrauch in g/kWh nimmt jedoch zu, da der

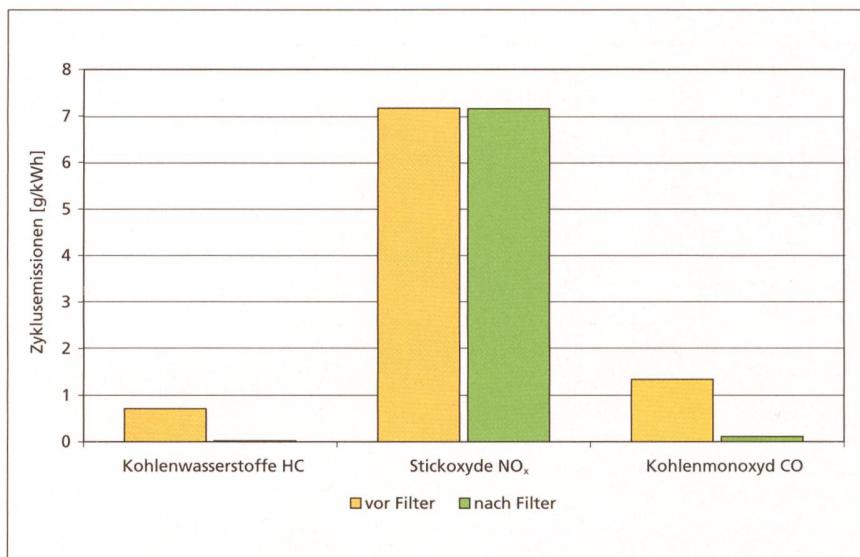


Abb. 5: Einfluss eines CRT-Systems auf die Zyklusemissionen der übrigen Abgasbestandteile: CO und HC werden massiv reduziert, NO_x bleibt unbeeinflusst. Gemessen am Valtra 6350-4 rot.

Verbrauch durch eine geringere Leistung dividiert wird. Im Teillastbereich, wo der Motor meist betrieben wird, ist der Luftdurchsatz geringer, was zu einem geringeren Gegendruck führt. Dadurch ist hier der Leistungsverlust noch geringer als bei Volllast.

Datenlogger

Auf allen Versuchsfahrzeugen war ein Datenlogger installiert, der laufend die Abgastemperaturen vor und nach Filter sowie den Abgasgegendruck aufzeichnet. Da die Logger bereits ein Jahr vor dem Filtereinbau aufgebaut wurden, lassen sich Veränderungen durch den Filter gut erkennen. Insbesondere das Verhalten des Gegendruckes ist ein wichtiges Indiz für eine allfällige Leistungsbeeinträchtigung durch den Filter. Abbildung 8 zeigt das Verhalten des Gegendruckes vor und nach Filtereinbau beim Traktor Lindner Geotrac 65. Die Säulen links zeigen dabei den Gegendruck mit dem originalen Schalldämpfer auf, die Säulen rechts den Gegendruck mit Partikelfilter. Die hellen Säulen stellen den maximal gemessenen Gegendruck dar, die dunklen Säulen den durchschnittlichen Gegendruck in der jeweiligen Periode. Die leichten Schwankungen der Gegendrücke werden durch die unterschiedlichen Arbeiten des Traktors ausgelöst. Eine starke Belastung des Motors führt zu einem hohen Luftdurchsatz und dementsprechend zu

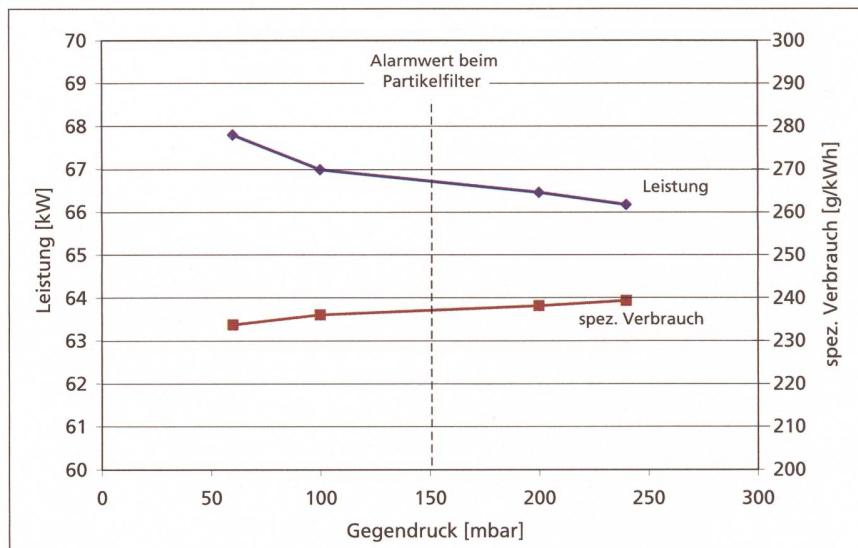


Abb. 7: Einfluss des Abgasgegendruckes auf Nennleistung und spezifischen Verbrauch beim Motor S.L.H. 1000.4WT.

einem hohen Abgasgegendruck. Der Traktor wurde auch nach dem Filtereinbau für die gleichen Arbeiten eingesetzt. Dass sich der Gegendruck im gleichen Bereich wie vor dem Einbau bewegt, zeigt, dass keine zusätzliche Belastung für den Motor entsteht und daher die Leistung und auch der Verbrauch ungefähr gleich sind. Da mit zunehmender Befüllung mit Russ oder Asche der Gegendruck ebenfalls ansteigt, ist dieser ein wichtiger Indikator für eine notwendige Regeneration oder auch Filterreinigung.

Praxiserfahrungen

Aufbau

Wichtig und mitunter mit Schwierigkeiten verbunden beim Aufbau eines Partikelfilters ist die richtige Platzierung. Zum einen sollte bei passiven Filtersystemen der Filter möglichst nahe am Motor liegen, damit möglichst wenig Wärme zwischen Motor und Filter verloren geht. Zum andern darf die maximal zulässige Sichtfeldeinschränkung nicht zu gross sein. Diese ist in Richtlinie 74/347/EWG zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliederstaaten betreffend das Sichtfeld und die Scheibenwischer von land- oder forstwirtschaftlichen Zugmaschinen auf Rädern geregelt.

Ebenso muss auch den Einsätzen des Traktors Rechnung getragen werden. Werden häufig Frontanbaugeräte eingesetzt, müssen diese von der Kabine aus überblickt werden können. Mit dem Partikelfilter lässt sich zwar der originale Schalldämpfer ersetzen, doch meist ist der korrekt ausgelegte Filter grösser. Eine gewisse Filtergrösse ist für einen geringen Abgasgegendruck notwendig. Wegen zu hohem Abgasgegendruck mussten bei wenigen Versuchsfahrzeugen die zuerst aufgebauten Filter gegen grössere getauscht werden. Hier zeigte sich auch, dass die Filtergrösse nicht von der Leistung, sondern hauptsächlich vom Luftdurchsatz des Motors bestimmt wird. Gewisse Brennersysteme konnten zudem zum Zeitpunkt des Versuches aufgrund der stehenden Anordnung der Glühkerze nur

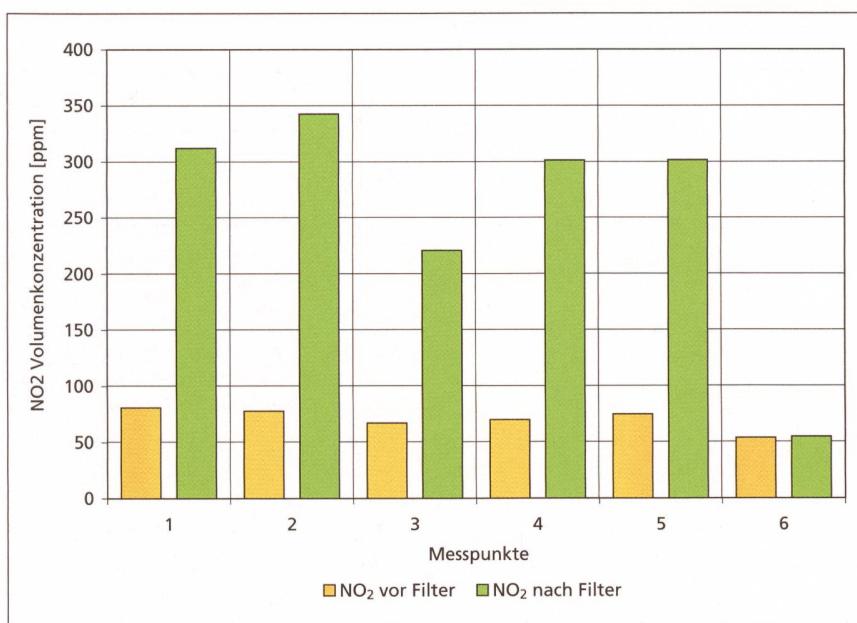


Abb. 6: Einfluss eines CRT-Systems auf NO₂ bei den sechs Messpunkten. Bei CRT-Systemen kann ein NO₂-Schlupf entstehen, wenn mehr NO₂ aufoxidiert wird, als für die Regeneration benötigt wird. Gemessen am Valtra 6350-4 rot.

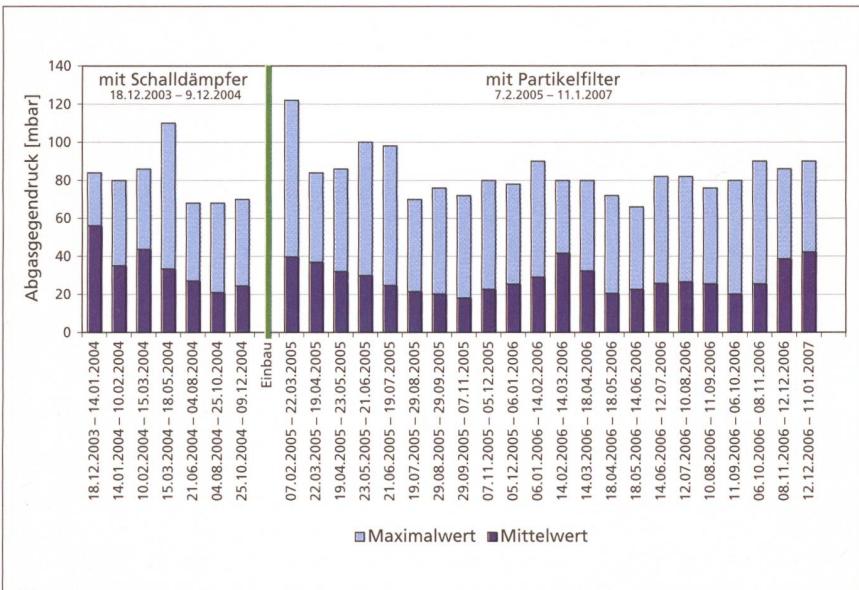


Abb. 8: Gegendruckaufzeichnung durch Datenlogger beim Lindner Geotrac 65

liegend eingebaut werden. Ansonsten können die meisten Filter sowohl liegend wie auch stehend eingebaut werden.

Wartung der Filter

Regeneration

Während bei den passiven Filtersystemen die Regeneration automatisch abläuft, sobald die Abgastemperatur genügend hoch ist, muss die Regeneration bei aktiven Filtersystemen von Zeit zu Zeit ausgelöst werden. Durch die Filterüberwachung wird angezeigt, wie hoch der Füllgrad des Filters ist. Dadurch wird der Zeitpunkt einer notwendigen Regeneration ersichtlich. Die Arbeit beschränkt sich bei den Stillstand-Brennersystemen auf das Starten der entsprechenden Sequenz an der Filterüberwachung bei stehendem Motor. Bei den elektrischen Systemen mit einer Regeneration ab Steckdose muss für die Regeneration der Filter mittels eines Luftschauches und eines Stromkabels an die Regenerierstation angeschlossen werden. Die Dauer zwischen den einzelnen Regenerationsvorgängen bewegt sich zwischen acht und über 30 Betriebsstunden, abhängig vom Arbeitseinsatz des Traktors. Die Regeneration dauert beim Brennersystem rund 15 Minuten, bei der elektrischen Regeneration etwa eine Stunde.

Reinigen von Filterasche

Der Russ verbrennt bei der Regeneration nicht restlos zu Kohlenstoffdioxid CO₂. Zurück bleibt etwas Asche, welche aus unbrennbaren Restanteilen von Diesel- und

Schmieröl sowie Additivkomponenten besteht. Da diese Asche die Filterporen verstopft, muss der Filter von Zeit zu Zeit von der angefallenen Asche gereinigt werden. Ein mit Asche gefüllter Filter lässt sich am höheren Gegendruck erkennen. Bei der Reinigung, welche durch den Filterlieferanten erfolgt, wird der Filter auf einem elektrischen Ausbrennofen ausgebrannt und die zurückbleibende Asche wird entgegen der Durchströmrichtung mit Druckluft zurückgeblasen. Die Asche wird dabei aufgefangen und fachgerecht entsorgt. Bei einem Teil der Versuchsfahrzeuge musste eine solche Reinigung bereits durchgeführt werden. Die Reinigung fand in einem Fall bereits nach 250 Stunden, in zwei weiteren Fällen nach etwa 500 Stunden statt. Die Reinigungsintervalle richten sich nach den Herstellerangaben, sind aber auch vom Ölverbrauch des Motors abhängig. Durch den Einsatz von speziellen Motorenölen lässt sich der Ascheanfall reduzieren.

Erfahrungen und Störungen

Im Laufe der Versuchsdauer kam es bei einigen Fahrzeugen zu kleineren oder größeren Störungen. Die Schlussfolgerung, dass Partikelfilter nicht funktionieren, weil im Versuch Filterschäden auftraten, wäre jedoch falsch. Vielmehr hängt eine gute Funktion eines Filtersystems hauptsächlich von der richtigen Kombination von System und Einsatz des Fahrzeugs ab. In einem Fall war das gewählte Filtersystem nicht auf den Einsatzbereich des Fahrzeugs abgestimmt, was zum Schadenfall führte. Im Versuch gab es keine Beschädigung der Motoren.

- Lindner Geotrac 65

Dieser Traktor wird meist vor einem Futtermischwagen betrieben. Die hohe Motorbelastung während des Mischvorgangs führt zu hohen Temperaturen. Da die Temperaturen regelmäßig erreicht werden, regeneriert das passive Filtersystem sehr zuverlässig. Auch sonst sind bei diesem Fahrzeug keine Probleme aufgetreten.

- Fendt 411 Vario

Nach dem Einbau musste ein Hitzeschutzblech entlang des Filters angebracht werden, da sonst bei einer Berührung des Filters Verbrennungsgefahr bestand. Ebenfalls musste der Auspuff gekürzt werden, da er zu weit über die Kabine ragte. Nach einigen Betriebsstunden mit Filter wurde zudem ein Riss am oberen Deckel des Partikelfilters sichtbar. Zu diesem Riss der Schweißnähte führten die Relativbewegungen zwischen Auspuff und Filter, weil der Filter am Chassis und das Auspuffrohr an der elastisch gelagerten Kabine montiert waren. Das Problem konnte durch eine elastische Montage des Auspuffrohres gelöst werden. Bei diesem Traktor kam es zu häufigen Störungen mit der Filterüberwachung. Dabei nahmen sowohl die Sensoren wie auch die Überwachungseinheit Schaden, sodass diese ersetzt werden musste.

- Schäffer 4042

Der Filter dieses Hofloaders kann den Russ über eine Zeitspanne von acht bis zehn Stunden speichern. Die Regeneration mit dem Stillstandsbrenner dauert gut zehn Minuten. Während dieser Zeit muss der Motor abgeschaltet sein. Beim Brenner kam es zweimal zu einer Störung, verursacht durch eine defekte Glühkerze vom Dieselpumpenbrenner. Dadurch konnte die Regeneration nicht mehr erfolgen und die Glühkerze musste ersetzt werden.

- Hürlimann 908 XT

Für diesen in der Forstwirtschaft eingesetzten Traktor war ursprünglich ein aktives Filtersystem mit einem Brenner vorgesehen. Aus Platzgründen konnte dieses System, das zwingend horizontal hätte aufgebaut werden müssen, nicht verwendet werden. Deshalb wurde ein passives Filtersystem mit einer Additivzugabe aus einem kleinen Zusatztank aufgebaut. Als der Traktor über mehrere Tage bei sehr geringer Last vor dem Holzspalter eingesetzt wurde, war die Abgastemperatur für eine Regeneration zu

tief. Durch den dauernden Standgasbetrieb gelangte zudem Motorenöl in den Verbrennungsraum, in den Abgasstrang und schliesslich auch in den Filter und verstopfte diesen. Der Filter musste ausgebaut und extern regeneriert werden. Nach der Reinigung wurde derselbe Filter wieder aufgebaut. Wiederum erreichten jedoch die Abgastemperaturen während der Seilwindenarbeit oder auch beim Holzspalten die für die Regeneration notwendige Temperatur nicht, was zu Gegendrücken im Bereich von 200 mbar führte. Diese Bedingungen bewirkten ein deutliches Absinken der Filterleistung, was auf einen Schaden am Filtermonolyten hindeutete. Das Filtersystem musste demontiert werden.

- Valtra 6350-4 blau

Ein zuerst aufgebauter Filter verursachte einen derart hohen Gegendruck, dass er sofort entfernt werden musste. Der danach von einer anderen Firma aufgebaute, beschichtete Filter regeneriert sehr zuverlässig. Der originale Schalldämpfer blieb vorerst noch vor dem Filter eingebaut, musste aber nachträglich entfernt werden, da dieser einerseits zusätzlichen Gegendruck verursachte und andererseits auch zu einem Temperaturverlust des Abgases führte.

- Deutz Agrotron K100

Das elektrisch regenerierende Filtersystem kann den Russ über einen Zeitraum von zehn bis über 30 Stunden speichern. Die Dauer hängt dabei wesentlich vom Einsatz des Traktors ab. Wird der Traktor stark und gleichmäßig belastet, werden längere Zeiten erreicht, weil bei den hohen Temperaturen eine selbsttätige Regeneration erfolgt. Bei Kurzzeiteinsätzen und häufigen Lastwechseln sinkt die Speicherzeit. Das Abbrennen des Russes erfolgt in knapp einer Stunde. Der Filter muss an die stationäre Regenerationsstation angeschlossen werden, der Vorgang läuft dann autonom ab. Bis jetzt sind bei diesem Fahrzeug keine Probleme aufgetreten.

- Valtra 6350-4 rot

Da dieser Forstraktor zusätzlich mit einem Frontlader ausgerüstet war, wurde hier versucht, den Filter unter der Motorhaube einzubauen. Ein erster, beschichteter Filter mit ovaler Form erwies sich als zu klein und musste ersetzt werden. Ein zweiter Versuch mit einer räumlichen Trennung des CRT-Systems zwischen

dem Katalysator und dem Filter scheiterte ebenfalls, da die Distanz zwischen Katalysator und Filter zu gross war. Ein weiteres aufgebautes CRT-System war zu klein, um bei den im Forstsitz auf-tretenden geringen Abgastemperaturen genügend wirksam zu regenerieren. Das grössere, ausserhalb des Motorraums aufgebaute System funktioniert bis jetzt. Bei diesen Versuchen ging es darum, die Grenzen der Aufbaumöglichkeiten mit diesem System auszuloten und mögliche Lösungen zu testen.

- John Deere 6620

Auf diesen Traktor wurde ein nicht VERT-geprüfter Filter aufgebaut. Der erste Filter verursachte einen Gegendruck von 170 mbar bei Nennleistung, was zu einem leichten Leistungsverlust von 2,5 % bei maximaler Leistung geführt hat. Er wurde daraufhin durch einen Filter mit feineren und mehr Kanälen ersetzt. Beim zweiten Filter kam es zu Rissen innerhalb der Klebstellen des Monolyten. Gemäss Herstellerfirma ist dieser Schaden auf einen wegen eines Fertigungsfehlers nicht vorhandenen Freiraum zurückzuführen, welcher Bewegungen aufgrund von Temperaturänderungen aufnehmen sollte. Beim dritten Filter entstanden ebenfalls Risse in den Klebestellen, sodass auch dieser ausgebaut werden musste.

- Same Dorado 75

Auf diesen, mit einem luftgekühlten Saugmotor ausgerüsteten Traktor wur-

den beschichtete Filter aufgebaut. Dabei kam es zu insgesamt vier Schäden an den Filtern. Die Schäden sind darauf zurückzuführen, dass sich die Filter noch in der Entwicklungsphase befunden haben. Die maximal zulässige Abgastemperatur des Filters von 600°C wurde für kurze Zeiträume überschritten. Weiter überstieg die Sichtfeldeinschränkung durch den Aufbau die gesetzlichen Richtlinien deutlich. Deshalb wird dieser Traktor wieder ohne Filter betrieben.

Kosten

Der Investitionsbedarf für einen Partikelfilteraufbau auf einen Traktor mittlerer Grösse beträgt zwischen CHF 8000.– und 15 000.–. In diesem Preis ist die Montage inbegriffen. Der Preis hängt von verschiedenen Faktoren ab: Motorgrösse, Partikelfiltersystem und vor allem auch vom Aufwand der Montage. Muss der Motor vor der Filtermontage noch revidiert werden, weil der Ölverbrauch zu hoch ist, entstehen zusätzliche Kosten. Da über die Lebensdauer eines Filters noch keine Aussagen gemacht werden können, ist die Abschätzung der zu erwartenden Mehrkosten pro Betriebsstunde äusserst schwierig. Abbildung 9 zeigt die zu erwartenden Zusatzkosten pro Betriebsstunde für die Abschreibung, Verzinsung und Feuerversicherung des Partikelfilters für verschiedene Preisklassen und für unterschiedliche Abschreibebedauern. Für die Berechnung wurden ein jährlicher Ein-

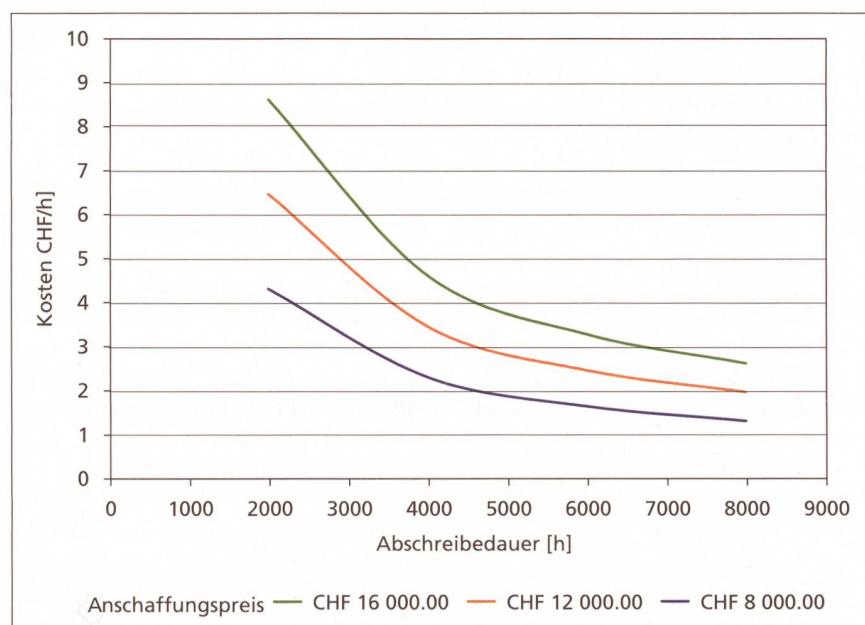


Abb. 9: Zusatzkosten pro Betriebsstunde für Abschreibung, Zins und Feuerversicherung eines Partikelfilters bei einer jährlichen Betriebsdauer von 600 Stunden.

satz von 600 Stunden, was etwa einem gut ausgelasteten, neuen Traktor entspricht, sowie eine Verzinsung von 3,5 % und eine Feuerversicherung von 0,2 % zugrunde gelegt.

Neben der Anschaffung fallen auch wiederkehrende Kosten für Wartung und Unterhalt an. Die Reinigung des Filters von Asche, welche alle 250 bis 1000 Betriebsstunden zu erfolgen hat, ergibt Zusatzkosten von zirka CHF 500.– pro Reinigung.

Zusätzlich können noch weitere Kosten auftreten wie:

- Stromkosten für Regeneration bei elektrischen Systemen:

Der Strombedarf pro Regeneration beträgt 2 kWh, was Stromkosten von zirka 40 Rappen entspricht. Die Regeneration hat etwa alle 10 Stunden zu erfolgen, was die Betriebsstunde um 4 Rappen verteuert.

- Kosten für das Additiv bei Additivsystemen:

Die Kosten für einen Liter Additiv betragen gut CHF 100.–. Bei einer Beimischung von 0,5 % zum Diesel und einem stündlichen Verbrauch von 8 Litern Diesel verteuert dies die Betriebsstunde um 40 Rappen.

- Treibstoffkosten für die Regeneration mittels Brennersystem:

Pro Regenerationsvorgang werden knapp 1 dl Dieseltreibstoff benötigt. Bei einem Regenerationsintervall von 10 Stunden und einem Dieselpreis von CHF 1.70 wird die Betriebsstunde um weniger als 2 Rappen verteuert.

- Allfällige Kosten für den Einsatz eines aschearmen Spezialmotoröls. Aschearmes Motoröl kostet rund 15 bis 25 % mehr.

Beispiel der Verteuerung der Betriebskosten durch Partikelfilter

Folgende Annahmen wurden getroffen (Tab. 4):

- Anschaffungspreis des Filters: CHF 12 000.–
- Passives Filtersystem ohne Zusätze
- Abschreibungsdauer von Traktor und Filter 7200 Stunden
- Zinsfuss 3,5 %, Feuerversicherung 0,2 %
- Filterreinigung alle 400 Stunden bei Kosten von CHF 500.–
- Jährliche Auslastung 600 Stunden
- Selbstkosten (Kosten, welche für Abschreibung, Zins, Versicherung und Gebühren, Treibstoff und Reparaturen anfallen) des Traktors von CHF 37.30 pro Betriebsstunde (Traktor mit 100 PS) (Quelle: Tarifat).

Tab. 4: Kosten im Betrieb

| | Kosten pro Betriebsstunde | |
|---------------------------------------|---------------------------|--------------|
| Abschreibung | CHF | 1.67 |
| Zins + Feuerversicherung | CHF | 0.46 |
| Filterreinigung | CHF | 1.18 |
| Gesamt Filter | CHF | 3.31 |
| Traktor 74 kW (100 PS) | CHF | 37.30 |
| Verteuerung pro Betriebsstunde | | 9 % |

Tabelle 4 zeigt eine Verteuerung der Betriebsstunde von 9 %, wobei mit einer optimistischen Lebensdauer des Filters von 7200 Stunden gerechnet wurde. Da die einzelnen Kostenpunkte variieren können, zum Beispiel durch einen unterschiedlichen Anschaffungspreis, eine kürzere Lebensdauer des Filters und unterschiedliche Wartungskosten, kann diese Verteuerung nicht pauschal auf alle Filteraufbauten angewendet werden. Modellrechnungen zeigen im kostengünstigsten Fall Mehrkosten von 5 % pro Betriebsstunde. Wird im Modell mit einem sehr teuren Filter gerechnet, der nur über eine Lebensdauer von 2000 Stunden verfügt, und werden zusätzlich noch hohe Wartungskosten miteinbezogen, kann eine Verteuerung der einzelnen Betriebsstunde bis zu 23 % entstehen.

Ausblick

Die Entwicklung bei den Filtersystemen schreitet schnell voran. Insbesondere bei den aktiven Systemen kommen neue Regenerationssysteme auf den Markt. So ist beispielsweise die katalytische Verbrennung von Treibstoff vor dem Filter eine Möglichkeit, die Abgastemperaturen anzuheben. Es gibt auch die Kombination von aktiven mit passiven Systemen. Solche Systeme regenerieren bei hohen Abgastemperaturen kontinuierlich. Wenn die Temperaturen nicht mehr erreicht werden, wird Zusatzenergie der Regeneration zugeführt.

Mit grösseren Stückzahlen und laufender Produktionsoptimierung wird auch der Anschaffungspreis für die Filter sinken. Es ist davon auszugehen, dass zunehmende Erfahrung und die teilweise Standardisierung bei häufig vertretenen Fahrzeugen auch die Montagezeiten verkürzen und damit verbilligen.

In der Gesetzgebung wird auf europäischer Ebene der Partikelgrenzwert mit der EU-Stufe IIIB für Fahrzeuge > 37kW in den Jahren 2011 bis 2013, abgestuft nach Leistungsklassen, deutlich abgesenkt. Dieser Grenzwert bezieht sich jedoch auf die Par-

tikelmasse und nicht auf die Partikelanzahl.

Für das Einhalten dieses Grenzwertes sind folgende technischen Lösungen denkbar:

- Motor mit Abgasrückführung und geschlossenem Partikelfilter
- Motor mit Abgasrückführung und offenem Filter oder Oxidationskatalysator
- Motor mit SCR-System bzw. SCRT-System. Bei SCR-Systemen (selective catalytic reduction) werden die Stickoxide im Abgas durch Einspritzten einer Harnstofflösung in den Abgasstrang beseitigt. Diese ermöglicht eine Motoreinstellung mit geringem Partikelmasseausschluss und hohem Ausstoss an NO_x, welches dann nachträglich reduziert wird. Bei SCRT-Systemen sind ein Partikelfilter und ein SCR-System kombiniert.

Schlussfolgerung

Die geschlossenen Filtersysteme weisen alle einen sehr hohen Abscheidegrad von über 99 % bezüglich Partikelanzahl auf. Während des Versuches traten bei einigen Filtern Störungen auf. Das Spektrum reichte von zu hohen Gegendrücken, welche einen erneuten Aufbau mit einem grösseren Filter erforderlich machten, über Störungen mit den elektronischen Filterüberwachungssystemen bis hin zu drei Fahrzeugen, bei denen es zu einem oder mehreren Filterschäden kam. Beschädigungen an Motoren gab es keine. Es gibt mehrere Ursachen für Filterschäden. Ein Filtermodell befand sich noch im Prototypenstadium und ein Fahrzeug erreichte die nötigen Abgastemperaturen für das passive System nicht, wobei der Motor zugleich bei niedriger Drehzahl Öl zu pumpen begann, was den Filter verstopfte.

Die im Versuch eingesetzten Fahrzeuge waren Baujahr 2000 oder neuer. Erfahrungen mit Filtersystemen auf älteren Traktoren oder modernen, die Abgasstufe 3A (teilweise mit Abgasrückführung) erfüllen, liegen aus diesem Versuch nicht vor. Der nachträgliche Aufbau eines Partikelfilters bei Traktoren ist grundsätzlich mach-

bar, jedoch müssen einige wichtige Kriterien berücksichtigt werden:

- Der Motor muss in gutem technischen Zustand sein. Übermässiger Ölverbrauch deutet darauf hin, dass sich möglicherweise unverbranntes Öl im Abgas finden kann, was für Partikelfilter schädlich ist. Ein solcher Motor muss vor der Filternachrüstung revidiert werden.

- Das zu wählende Filtersystem muss auf den Einsatz des Fahrzeugs abgestimmt sein. Dabei ist vor allem auf Arbeiten mit geringer Last zu achten. Wird der Traktor beispielsweise im Sommer für Transportarbeiten verwendet und im Winter im Forst, ist die Auslastung des Motors im Winter geringer, folglich muss ein System auch bei diesen Bedingungen funktionieren. Im Idealfall werden die auftretenden Abgastemperaturen vorgängig über eine längere Einsatzzeit aufgezeichnet.

- Passive Systeme können verwendet werden, wenn eine genügend hohe Abgastemperatur (in der Regel bei einem CRT-System > 250 °C) während einer ausreichend langen Betriebsdauer (in der Regel > 40 % der Betriebszeit) erreicht wird. Diese Bedingungen sind systemabhängig und müssen dem Filterlieferanten bekannt sein.
- Bei ungenügender oder unsicherer Abgastemperatur ist ein aktives System vorzusehen. Bei Stillstand-Brennersystemen muss der Motor während der Regenerationsphase abgestellt sein. Systeme mit

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|-----------------------|---|
| BAFU | Bundesamt für Umwelt |
| VERT | Verminderung der Emissionen von Realmaschinen im Tunnelbau |
| CO₂ | Kohlenstoffdioxid |
| CO | Kohlenmonoxid |
| NO | Stickstoffmonoxid |
| NO₂ | Stickstoffdioxid |
| NO_x | Stickoxide |
| HC | Kohlenwasserstoffe |
| CRT | continuously regenerating trap (Regenerationssystem) |
| SCR | selective catalytic reduction (System zur Stickoxidreduktion) |
| µm | Mikrometer, 1 µm entspricht einem tausendstel Millimeter (Grösse) |
| °C | Grad Celsius (Temperatur) |
| mbar | Millibar (Druck) |
| kW | Kilowatt (Leistung) |
| g/kWh | Gramm pro Kilowattstunde (spezifischer Verbrauch) |
| CHF | Schweizer Franken (Währung) |

elektrischer Heizung müssen zur Regeneration an eine Station angeschlossen werden. Neuerdings sind Systeme in Entwicklung, bei denen eine Regeneration vom Bordnetz während des Betriebs möglich ist.

- Die Auslegung des Partikelfilters muss gewährleisten, dass der Gegendruck im Abgassystem einen vom Motorhersteller anzugebenden Maximalwert in keinem Betriebspunkt übersteigt. Dieser Maximalwert liegt in der Regel um 100 bis 200 mbar. Das bedeutet, dass der Filter je nach Luftdurchsatz relativ gross sein muss.

- Die Position und Montage des Filters kann bei Traktoren schwierig sein, da die Einbauräume je nach zusätzlichen Anbaugeräten (zum Beispiel Frontlader) sehr beschränkt sind. Bei der Position des Filters am vorderen Kabinenposten muss die gesetzliche Vorschrift bezüglich Sichtfeldbeschränkung beachtet werden.

Grundsätzlich gilt:

Jeder Aufbau muss auf das entsprechende Fahrzeug abgestimmt sein. Es gibt keine Universallösung.

Dank

ART dankt folgenden Firmen, Institutionen und Personen, die den Versuch mit den Partikelfiltern für Traktoren ermöglicht und begleitet haben:

- Den am Versuch beteiligten Firmen HÜGA, Baumot, Huss, Minelli, Bärle und deren Filterlieferanten.
- Den Verantwortlichen der beteiligten Firmen, die das Projekt personell und finanziell unterstützt haben.
- Dem BAFU für die finanzielle Unterstützung des Projekts.
- Der Begleitgruppe, die sich für das Projekt engagierte und wertvolle Inputs geleistet hat.
- Der Arbeitsgruppe mit den Herren Thomas Lutz (ETH Zürich), Andreas Mayer (TTM), Felix Reutimann (BAFU) sowie Edwin Stadler für die aktive Mitarbeit, Beratung und die vielen Diskussionen.

| Norm | Etappe | Kate-gorie | Inkraft-treten* | Motor-leistung (kW) | Grenzwerte in [g/kWh] | | | |
|---------------------------------------|-------------|------------|----------------------|---------------------|-----------------------|--------------|-----------------|-------|
| | | | | | CO | HC | NO _x | Part. |
| (2000/25/EG) | Stufe I | B | 1.07.2002/ 1.10.2002 | 75 ≤ P < 130 | 5,0 | 1,3 | 9,2 | 0,70 |
| | | C | -----/ 1.10.2002 | 37 ≤ P < 75 | 5,0 | 1,3 | 9,2 | 0,70 |
| | Stufe II | E | 1.07.2002/ 1.10.2002 | 130 ≤ P ≤ 560 | 3,5 | 1,0 | 6,0 | 0,2 |
| | | F | 07.2002/03 | 75 ≤ P < 130 | 5,0 | 1,0 | 6,0 | 0,3 |
| | | G | 01.2003/04 | 37 ≤ P < 75 | 5,0 | 1,3 | 7,0 | 0,4 |
| | | D | 1.07.2002/ 1.10.2002 | 18 ≤ P < 37 | 5,5 | 1,5 | 8,0 | 0,8 |
| 2005/13/EG analog zu 2004/26/EG | Stufe III A | H | 01.2005/06 | 130 ≤ P ≤ 560 | 3,5 | 4,0 (HC+NOx) | 0,2 | |
| | | I | 01.2006/07 | 75 ≤ P < 130 | 5,0 | 4,0 (HC+NOx) | 0,3 | |
| | | J | 01.2007/08 | 37 ≤ P < 75 | 5,0 | 4,7 (HC+NOx) | 0,4 | |
| | | K | 01.2006/07 | 19 ≤ P < 37 | 5,5 | 7,5 (HC+NOx) | 0,6 | |
| | Stufe III B | L | 01.2010/11 | 130 ≤ P ≤ 560 | 3,5 | 0,19 | 2,0 | 0,025 |
| | | M | 01.2011/12 | 75 ≤ P < 130 | 5,0 | 0,19 | 3,3 | 0,025 |
| | | N | 01.2011/12 | 56 ≤ P < 75 | 5,0 | 0,19 | 3,3 | 0,025 |
| | | P | 01.2012/13 | 37 ≤ P < 56 | 5,0 | 4,7 (HC+NOx) | 0,025 | |
| | Stufe IV | Q | 01.2013/14 | 130 ≤ P ≤ 560 | 3,5 | 0,19 | 0,4 | 0,025 |
| | | R | 01.2013/14 | 56 ≤ P < 130 | 5,0 | 0,19 | 0,4 | 0,025 |

* Erster Termin: gültig für neue Motorentypen. Zweiter Termin: gültig für erste Inverkehrsetzung bzw. erste Inbetriebnahme von neuen Motoren.

Abb. 10: Entwicklung der Emissionsgrenzwerte (in g/kWh) für Traktoren und Motorkarren.
Quelle: BAFU



**ANS LIMIT.
UND WEITER.**

Das wahre Limit erkennt man erst, wenn man es überschreitet. Nur wer dort weiter geht, wo andere stehen bleiben, macht Unmögliches möglich. Wie hoch Ihre Ziele auch sind: das Öl dazu kommt von MOTOREX. 062 919 75 75, www motorex com