



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra



**beco**  
Bernese Wirtschaft  
Economie bernoise

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
**Bundesamt für Umwelt BAFU**

Eidgenössisches Volkswirtschaftsdepartement EVD  
Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART  
**Agroscope Reckenholz Tänikon ART**

## Technologieprojekt des Kantons Bern

# Nachrüstung land- und forstwirtschaftlicher Maschinen mit Partikelfilter

---

### Autoren

Marco Landis, Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART  
Stefan Schär, beco Berner Wirtschaft, Abteilung Immissionsschutz  
Felix Reutimann, Bundesamt für Umwelt BAFU, Abteilung Luftreinhaltung und NIS



# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	4
Einführung .....	5
Kurzbeschreibung Projekt.....	5
Ausgewählte Fahrzeuge .....	6
Aufbauten und Filtersysteme .....	7
Filteraufbauten .....	7
Eingesetzte Filtersysteme .....	7
Nicht ausgerüstete Fahrzeuge .....	9
Technische Begleitung und Praxiserfahrungen.....	10
Betriebsstunden .....	10
Abgastemperaturen.....	10
Abgasgegendrücke .....	11
Technische Störungen und Empfehlungen .....	11
Meinung der Projektteilnehmer.....	12
Kosten.....	13
Anschaffungskosten.....	13
Variable Kosten.....	13
Reduzierte Russmenge .....	14
Ausblick .....	14
Schlussfolgerungen .....	15
Dank .....	16
Literatur.....	16

## Zusammenfassung

Im Technologieprojekt des Kantons Bern wurden 18 land- und forstwirtschaftliche Fahrzeuge mit Filtern nachgerüstet. Ziel war es zusätzliche Erkenntnisse und Erfahrungen für das Vorgehen bei der Nachrüstung mit Partikelfiltern zu sammeln sowie eine praxisnahe Arbeitshilfe für eine erfolgreiche Nachrüstung landwirtschaftlicher Maschinen mit modernen Abgasnachbehandlungssystemen zu erarbeiten. Der Kanton Bern hatte die Projektleitung inne und übernahm drei Viertel der anfallenden Anschaffungs- und Aufbaukosten der Partikelfiltersysteme. Agroscope ART gewährleistete die wissenschaftlich-technische Begleitung des Projektes. Das Bundesamt für Umwelt BAFU sicherte die Finanzierung der Projektbegleitung. Vertreter der Verbände und Organisationen SMU (Schweizerische Metallunion), SVLT (Schweizerischer Verband für Landtechnik) und LANAT (Landwirtschaftsamt des Kantons Bern) sowie der Praxis wurden durch die Projektleitung regelmässig über den Projektstand und die weitere Vorgehensweise informiert.

Die aufgebauten Filter erzielten alle eine sehr gute Wirkung mit hohen Dieselmuss-Abscheideraten. Die Endrohre wiesen auch am Projektende keine sichtbaren Russablagerungen auf. Die Landwirte und andere Anwender zeigten sich sehr zufrieden mit der Wirksamkeit. Mit Ausnahme von zwei Fahrzeugen mit zu engen Platzverhältnissen liessen sich die Filter auf alle Fahrzeuge aufbauen. Die Handhabung der Filter führte zu keinen besonderen Problemen. Die Abgasgegendrucke lagen kaum höher als mit originaler Auspuffanlage und die Motorleistungen und der zusätzliche Dieserverbrauch gaben zu keinen Diskussionen Anlass. Im gesamten Projekt traten keine Schäden an den Motoren auf. Die Regenerationssysteme und Filter waren grossteils auf den Einsatz der Fahrzeuge abgestimmt.

Es zeigte sich, dass die Kosten für Filter und Aufbau im Durchschnitt der 18 Fahrzeuge Fr. 17 500.– betragen. Variable Kosten traten infolge der Filterreinigung, Additivverbrauch und zusätzlichem Treibstoffverbrauch auf. Sie bewegten sich zwischen Fr. 0.50 bis 2.50 pro Betriebsstunde.

Eine vorsichtige Schätzung zeigt, dass die Nachrüstung dieser landwirtschaftlichen Maschinen mit wirksamen Partikelfiltern und deren Einsatz bis zu ihrem voraussichtlichen Lebensende bei zirka 10 000 Betriebsstunden eine Einsparung einer knappen Tonne Dieselmuss möglich macht.

Allerdings traten im Verlauf des Projektes einzelne Störungen auf. Das Spektrum reichte von notwendigen Nachbesserungen am Aufbau, über Probleme mit der Additivversorgung bis hin zu Filterschäden. Bei sechs Fahrzeugen waren Schäden an den Filterelementen zu verzeichnen, die zu einem Wechsel mit entsprechenden Kostenfolgen führten. Die Ursachen hierfür sind vielfältig. Bei einem Filtermodell hielten die Klebstellen der einzelnen Keramikelemente des Monolithen den Belastungen nicht stand. Bei anderen führten Störungen des Regenerationssystems mit den damit verbundenen erhöhten Abgasgegendrücken zu Folgeschäden. Gründe für die Störungen der Regeneration waren fehlerhafte Heizrelais und mangelhafte Additivversorgung. Eingefrorene Druckleitungen der Additivversorgung bewirkten zum Beispiel falsche Drucksignale, die zu einer Unterdosierung des Additivs führten. Bei Motoren der Abgasstufe III A traten gehäuft Störungen auf. Diese Störungen verursachte die elektronische Motorüberwachung verbunden mit der Abgasrückführung. Ein leichter Anstieg des Abgasgegendrucks führt zu einer Erhöhung der Rückführrate des Abgases und dadurch zu höheren Russmissionen, welche den Gegendruck weiter erhöhen. So kann der Gegendruck eines Partikelfilters auf einem Motor der Stufe III A sehr schnell ansteigen und lässt kaum Zeit für Gegenmassnahmen. Bei den Störungen handelt es sich demzufolge mehrheitlich um Mängel an Aufbauten oder um Probleme der Regenerationssysteme.

Der Einsatz der Fahrzeuge in der Land- und Forstwirtschaft ist geprägt von rauen Arbeitsbedingungen, wie Verschmutzung, Einsatz bei jedem Wetter, Kurzeiteinsätze und wechselnden Arbeiten mit geringer und hoher Motorbelastung. Das erschwert den Einsatz der Filtersysteme und stellt besondere Anforderungen bezüglich Aufbau und Robustheit. Es ist aber anzumerken, dass mit einer Ausnahme alle Störungen behoben werden konnten und alle Fahrzeuge (teilweise mit neuen Filtern) wieder in Betrieb genommen wurden.

Die Akzeptanz der Partikelfilter ist in der landwirtschaftlichen Praxis verhalten. Die innerhalb des Projektes durchgeführte Umfrage zeigte, dass die hohen Anschaffungskosten und die Befürchtung technischer Probleme die wichtigsten Gründe sind, die gegen eine Nachrüstung sprachen. Weiter wird der Verlust der Garantie für den Motor durch den Motorhersteller sowie die Angst vor Mehraufwand und hohen Unterhaltskosten als



Grund für eine Nicht-Teilnahme am Technologieprojekt genannt.

Trotz der vielen kleinen technischen Probleme bis hin zu Filterschäden lässt sich schlussfolgern, dass bei sachgerechtem Aufbau und bei zum Fahrzeugeinsatz passendem Regenerationssystem die Filter zuverlässig funktionieren, deren Nutzer zufrieden stellen und dass sie eine sehr hohe Russabscheiderate aufweisen.



Abbildung 1: Russfreies Auspuffrohr nach 1600 Betriebsstunden mit Partikelfilter.

## Einführung

Landwirtschaftliche Fahrzeuge sind im Non-Road Bereich die Hauptverursacher von krebserregendem Dieselruss (Schäffeler und Keller 2008). Land- und Forstwirtschaft tragen fast die Hälfte zum Dieselruss-Ausstoss des Non-Road Bereiches bei. Im Gegensatz zu den Baumaschinen, bei denen die langjährigen Erfahrungen mit Filtersystemen im Untertagebau genutzt werden konnten, besteht für die Nachrüstung von landwirtschaftlichen Fahrzeugen ein Nachholbedarf.

2007 konnte im Rahmen eines Forschungsprojektes der Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART gezeigt werden, dass die Wirksamkeit der Filter ausserordentlich hoch ist, Einbau und Betrieb der Filter jedoch sorgfältig geplant werden müssen. Jeder Filter muss auf das entsprechende Fahrzeug sowie die Art des Einsatzes abgestimmt und regelmässig gewartet und gepflegt werden. Weitere Grundlagen dazu sind im ART-Bericht 677 nachzulesen (Landis et al. 2007).

Um zusätzliche Erfahrungen bei der Nachrüstung von Landmaschinen mit Partikelfiltern zu sammeln, förderte der Kanton Bern die Nachrüstung einer begrenzten Anzahl landwirtschaftlicher Fahrzeuge mit Partikelfiltern. Im Rahmen eines Technologieprojektes übernahm der Kanton dabei drei Viertel der anfallenden Kosten.

Es kann für die Landwirte verschiedene Motive geben, seine Landmaschine mit einem Partikelfilter auszurüsten. Mögliche Gründe sind: Sorge um die eigene Gesundheit und die der Mitmenschen; Arbeitnehmerschutz sowie Umwelt-, Image- und Marketinggründe; Vorteile bei der Akquise von Aufträgen der öffentlichen Hand, da Partikelfilter vermehrt ein Selektionskriterium darstellen. Mit dem Projekt soll der freiwilligen Nach- beziehungsweise Ausrüstung von landwirtschaftlichen Fahrzeugen mit Partikelfiltern im Kanton Bern der Weg geebnet werden. Zudem sollen klare Empfehlungen für eine erfolgreiche Nachrüstung landwirtschaftlicher Maschinen mit modernen Abgasnachbehandlungssystemen erarbeitet werden.

## Kurzbeschreibung Projekt

Im Rahmen dieses Technologieprojektes wurden 18 landwirtschaftliche Fahrzeuge aus dem Kanton Bern mit Partikelfiltern ausgerüstet und einem zweijährigen Praxistest unterzogen. ART übernahm während zwei Jahren die wissenschaftlich-technische Begleitung und unterstützte die Fahrzeughalter durch Information und Beratung bei der Wahl und dem Betrieb des Partikelfilters. Die Funktionstüchtigkeit der Partikelfiltersysteme wurde von Fachleuten periodisch überprüft, Problemfälle wurden untersucht, störungsanfällige Systeme ersetzt. Als direkter Ansprechpartner nahmen die Landmaschinenwerkstätten eine Schlüsselrolle ein. Sie beraten die Landwirte und sind für die Installation sowie den Unterhalt des Partikelfiltersystems zuständig. Die Landmaschinenwerkstätten wurden daher als aktive Partner in das Projekt einbezogen.

Mit den aus dem Praxistest gewonnenen Erkenntnissen und Erfahrungen soll der freiwilligen Nach- bzw. Ausrüstung von landwirtschaftlichen Fahrzeugen im Kanton Bern mit Partikelfiltern der Weg geebnet werden. Ziel ist ein technischer Bericht mit praxisnahen Empfehlungen über das Vorgehen bei der Nach- bzw. Ausrüstung von Landmaschinen mit einem geprüften geschlossenen Partikelfiltersystem gemäss BAFU-Filterliste (Bundesamt für Umwelt BAFU 2010) und SNR 277205

(Schweizerische Normen-Vereinigung 2009) sowie für den Unterhalt des Partikelfilters. Ebenfalls vorgesehen ist die Erarbeitung einer Arbeitshilfe vor allem für Landwirte und die Landmaschinenwerkstätten, aber auch für Werkhöfe sowie weitere in die Nachrüstung involvierte Unternehmen, welche die wichtigsten Erkenntnisse und Erfahrungen für das Vorgehen bei der Nachrüstung oder Neuanschaffungen von Partikelfiltersystemen bei Landmaschinen sowie für deren Einbau, Betrieb und Unterhalt enthält.

## Ausgewählte Fahrzeuge

Mittels Schreiben an Landmaschinenwerkstätten und Inseraten in der landwirtschaftlichen Fachpresse wurden die Landwirte auf das Projekt aufmerksam gemacht. Der provisorischen Anmeldung folgte eine Besichtigung der Fahrzeuge durch Mitarbeitende von ART und beco. Nach der definitiven Aufnahme ins Projekt wurden 13 Traktoren, zwei Transporter, ein Zweiachsmäher, ein selbstfahrender Futtermischwagen und ein Forstschlepper mit unterschiedlichen Partikelfiltersystemen ausgerüstet. Besitzer der Fahrzeuge waren zur Hälfte Landwirte, gefolgt von kantonalen Betrieben, zwei Einwohnergemeinden, einer Bürgergemeinde, einer Stiftung und einer landwirtschaftlichen Genossenschaft (Abbildung 2).

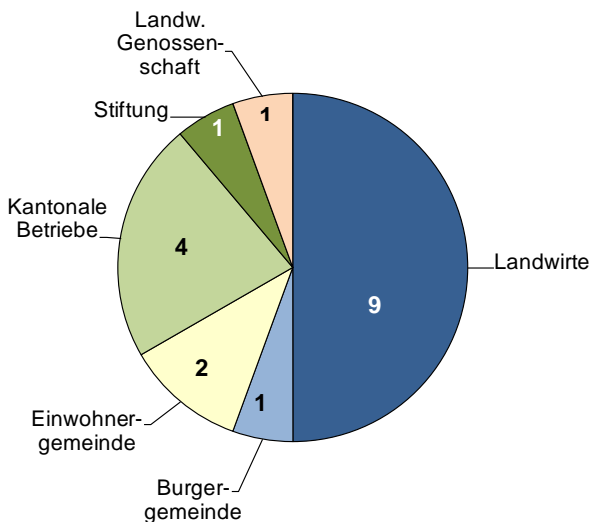


Abbildung 2: Besitzer der Projektfahrzeuge

Die Motoren der Projektfahrzeuge wiesen Leistungen zwischen 31 und 130 kW, im Mittel 80 kW auf. Bei zwei Fahrzeugen erfolgte der Filteraufbau auf Neufahrzeuge. Beim Schiltrac Transporter erfolgte der Filteraufbau auf das Neufahrzeug

durch den Hersteller. Bei den restlichen Fahrzeugen erfolgte der Aufbau der Partikelfilter-Systeme auf im Einsatz stehende Fahrzeuge. Der älteste Traktor wies zum Zeitpunkt der Filternachrüstung ein Alter von 9,5 Jahren auf. Die Betriebsstunden der Fahrzeuge bewegten sich zwischen Null und 6400 Stunden (Abbildung 3). Beim Fahrzeug mit 6400 Betriebsstunden handelte es sich um eine Forstmaschine, deren technischer Zustand sehr gut war und bei der von einer weiteren Lebensdauer von 6000 Stunden ausgegangen wurde.

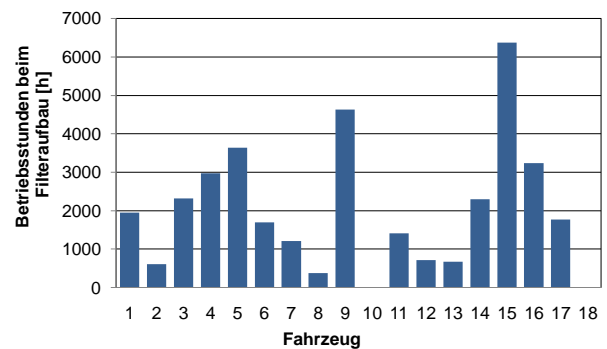


Abbildung 3: Anzahl Betriebsstunden der Fahrzeuge zum Zeitpunkt des Filteraufbaus.

Mehrheitlich verfügten die Fahrzeuge über Motoren der Abgasstufe II. Mit neuesten Motoren der Stufe IIIA waren sechs Fahrzeuge ausgerüstet. Motoren der Abgasstufe I waren bei zwei Fahrzeugen eingebaut. Ein Motor erfüllte noch keine Abgasstufe. Bis auf einen Traktor mit einem Saugmotor verfügten alle Motoren über eine Aufladung mittels Abgasturbolader.

Die Fahrzeuge werden überwiegend in den klassischen landwirtschaftlichen Arbeitsgebieten, wie Grünlandbewirtschaftung, Ackerbau und Transportarbeiten eingesetzt (Abbildung 4).

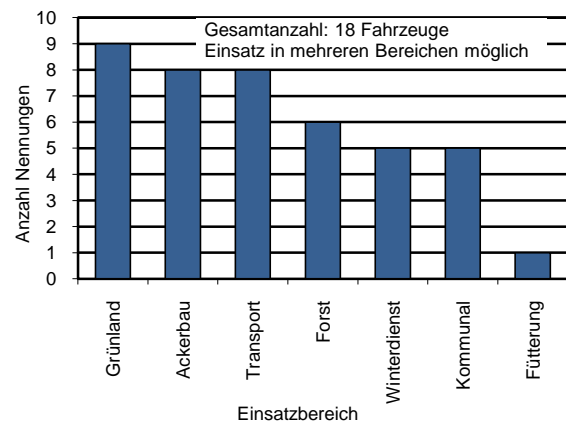


Abbildung 4: Einsatzgebiete der Projektfahrzeuge

Sechs Fahrzeuge arbeiten im Forst. Davon sind drei Maschinen in professionellen Forstbetrieben, die restlichen Maschinen im bäuerlichen Forst im Einsatz. Mit Schneepflügen ausgerüstet, werden fünf Fahrzeuge im Winterdienst eingesetzt. Im kommunalen Bereich, beispielsweise für den Strassenunterhalt, laufen fünf Fahrzeuge.

## Aufbauten und Filtersysteme

### Filteraufbauten

Die Filteraufbauten erfolgten durch Landmaschinenwerkstätten oder spezialisierte Filternachrüsterfirmen. Die Forschungsanstalt ART beriet interessierte Landwirte und Nachrüster. Die Aufbauten wurden geprüft und für die Projektdauer plombiert.

Folgende Firmen (in alphabetischer Reihenfolge) waren in die Ausrüstung der Traktoren mit Partikelfiltern involviert:

- Bühler Landtechnik, Lenk
- Clean-Life Umwelttechnik AG, Huttwil
- esytec AG, Feusisberg
- H. Anliker AG, Fraubrunnen
- HSM Schweiz AG, Holziken
- LMG, Grasswil
- Matra, Zweigniederlassung der Robert Aebi AG, Lyss
- Minelli AG, Pfäffikon
- Odermatt Landmaschinen, Hunzenschwil
- Oscar Fäh AG, Oberbüren
- Schiltrac Fahrzeugbau, Buochs
- Schuler Landmaschinen, Schindeleggi
- Stucki Landtechnik, Belp
- Studer AG, Lyssach
- Zaugg Heinz, Landtechnik, Trubschachen

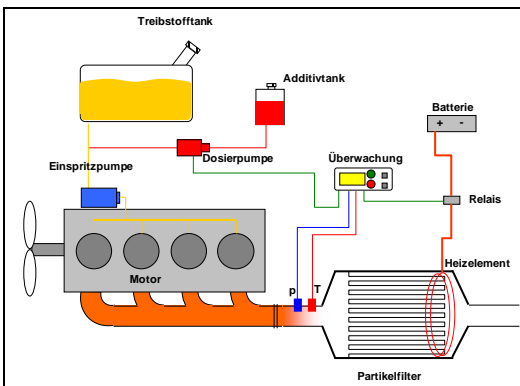


Abbildung 5: Alle Filter waren während des Projekts mit Plomben versehen.

### Eingesetzte Filtersysteme

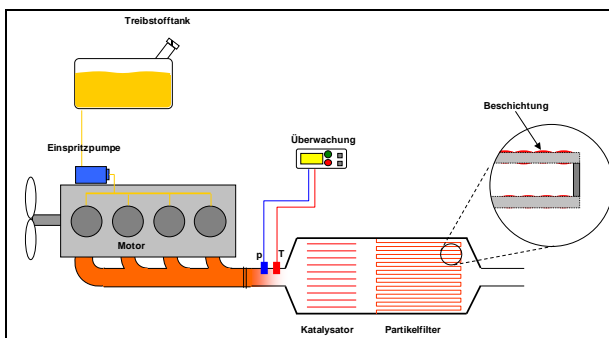
Sieben Fahrzeuge wurden mit passiven Filtersystemen (Additivsysteme oder CRT-Systeme) ausgerüstet. Elf Maschinen verfügen über kombinierte Regenerationssysteme (Additiv und elektrische Heizung oder beschichteter Filter mit elektrischer Heizung). Rein aktive Systeme (Dieselbrenner oder elektrische Heizung) wurden keine eingebaut. Die Ausrüstungen erfolgten ab August 2008 bis Oktober 2009. Zum Einsatz kamen nur geschlossene und geprüfte Filtersysteme, die sich auf der Filterliste des BAFU befinden (Bundesamt für Umwelt BAFU 2010).

### 9x HJS SMF/AR (aktiv / passives System)



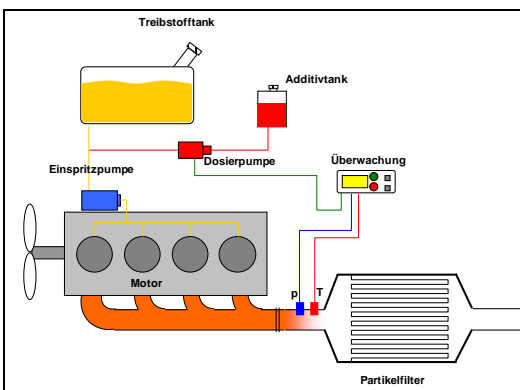
Das Additiv führt zu einer Herabsetzung der Russzündtemperatur. Bei Einsätzen mit hoher Last reicht die Abgastemperatur zum Abbrennen des Russes. Bei geringer Abgastemperatur und beladenem Filter erhitzt die Glühwendel den Russ, so dass er sich entzündet.

### 2x Johnson Matthey CCRT (passives System)



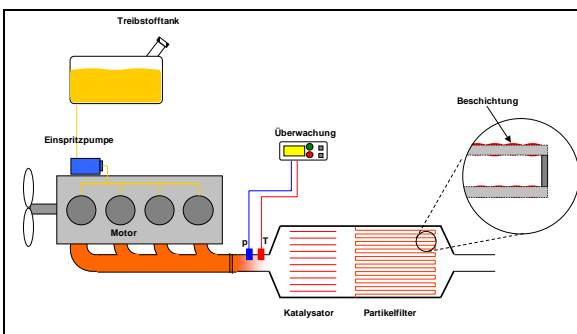
Der vorgeschaltete Katalysator erzeugt durch Oxidation Stickstoffdioxid  $\text{NO}_2$  aus Stickstoffmonoxid  $\text{NO}$ . Durch das zusätzliche Sauerstoffatom brennt der Russ bereits bei niedrigen Temperaturen ab. Die Beschichtung des Filterelements führt zusätzlich zu einem Absinken der Russzündtemperatur. Durch die Beschichtungen auf dem Katalysator und dem Filterelement werden Kohlenwasserstoffe  $\text{HC}$  und Kohlenmonoxid  $\text{CO}$  reduziert.

### 2x Airmeex Carmex SC (passives System)



Dem Treibstoff wird ein Additiv, zum Beispiel auf Eisen- oder Platinbasis in geringer Konzentration (rund 0,5 %) beigemischt. Dieses Additiv ist nach der Verbrennung des Treibstoffs gleichmässig im Russ verteilt und wirkt als Katalysator, der die Russzündtemperatur absenkt.

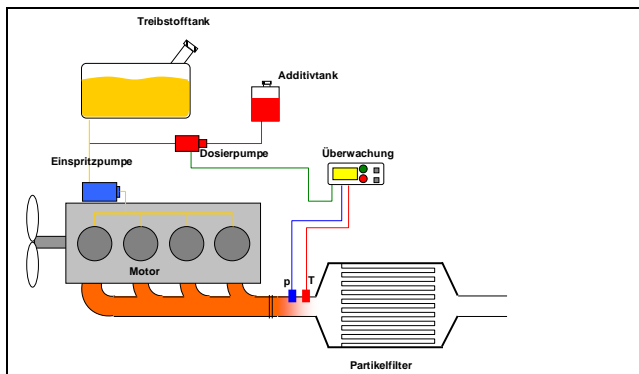
### 2x Dinex DPX (passives System)



Der vorgeschaltete Katalysator erzeugt durch Oxidation Stickstoffdioxid  $\text{NO}_2$  aus Stickstoffmonoxid  $\text{NO}$ . Durch das zusätzliche Sauerstoffatom brennt der Russ bereits bei niedrigen Temperaturen ab. Die Beschichtung des Filterelements führt zusätzlich zu einem Absinken der Russzündtemperatur. Durch die Beschichtungen auf dem Katalysator und dem Filterelement werden Kohlenwasserstoffe  $\text{HC}$  und Kohlenmonoxid  $\text{CO}$  reduziert.

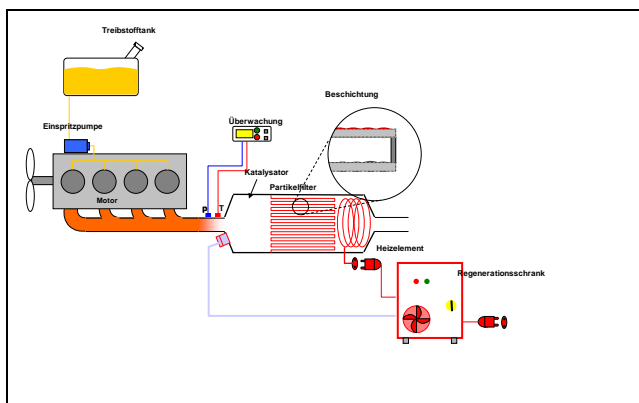


### 1x Daugbjerg PF (passives System)



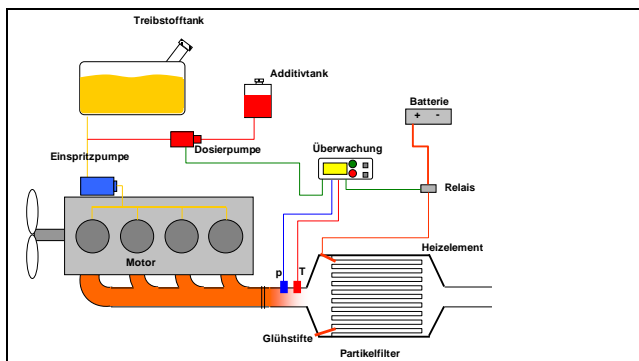
Dem Treibstoff wird ein Additiv, zum Beispiel auf Eisen- oder Platinbasis in geringer Konzentration (rund 0,5 %) beigemischt. Dieses Additiv ist nach der Verbrennung des Treibstoffs gleichmässig im Russ verteilt und wirkt als Katalysator, der die Russzündtemperatur absenkt.

### 1x HUG mobiclean electro (aktiv / passives System)



Gerät der Russ mit der Beschichtung des Filters in Berührung, reagiert er bei niedrigen Temperaturen mit Sauerstoff und verbrennt zu Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>). Bei zu geringer Abgastemperatur kann der Filter über einen Schnellkuppler mit einem Regenerationsschrank verbunden werden. Die elektrische Erwärmung des Filters führt dann zum Abbrand des Russes. Durch die Beschichtung des Filters ist bei der aktiven Regeneration die Russzündtemperatur geringer, so dass mit 230V Spannung gearbeitet werden kann.

### 1x Pirelli Feelpure AR (aktiv / passives System)



Das Additiv führt zu einer Herabsetzung der Russzündtemperatur. Bei Einsätzen mit hoher Last reicht die Abgastemperatur zum Abbrennen des Russes. Bei geringer Abgastemperatur und beladenem Filter erhitzen Glühstifte den Russ soweit, dass er sich entzündet.

### Nicht ausgerüstete Fahrzeuge

Neben den am Projekt teilnehmenden Fahrzeugen waren weitere 19 Fahrzeuge für das Projekt angemeldet und besichtigt worden. Drei Fahrzeuge konnten von ART und beco nicht für das Projekt zugelassen werden. In einem Fall hatte das Fahrzeug die technische Lebensdauer beinahe erreicht und sollte in Kürze durch ein neues Fahrzeug ersetzt werden. Eine Maschine wurde nicht in der Landwirtschaft eingesetzt und bei einem

Fahrzeug war der Filter bereits ein Jahr auf dem Vorführfahrzeug aufgebaut. Bei den restlichen Fahrzeugen erfolgte der Rückzug aus dem Projekt seitens der Besitzer. Hauptgründe für den Rückzug aus dem Projekt waren zu hohe Anschaffungskosten, die Befürchtung von technischen Problemen, der Verlust der Garantie für den Motor durch den Motorhersteller, Angst vor Mehraufwand und zu hohe Unterhaltskosten (Abbildung 6).

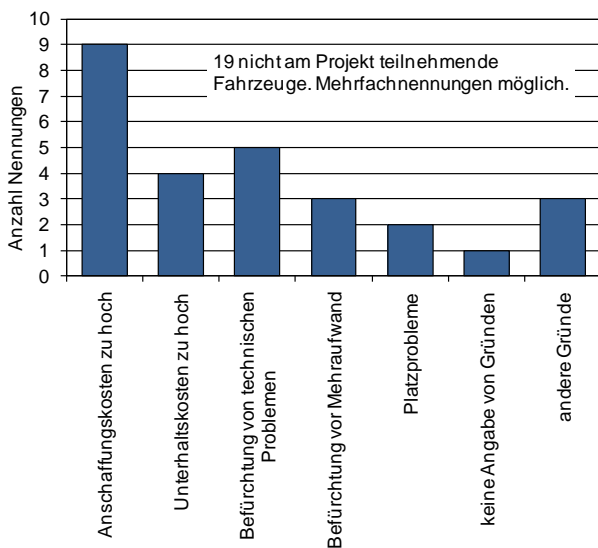


Abbildung 6: Anzahl genannte Gründe für den Verzicht einer Nachrüstung.

## Technische Begleitung und Praxiserfahrungen

Die Fahrzeuge wurden vom Sommer 2008 bis Herbst 2010 im Praxiseinsatz betreut. Die Betreuung umfasste das regelmässige Auslesen der gespeicherten Loggerdaten, die visuelle Kontrolle der Filtersysteme, sowie die Dokumentation der Störungen. Die Wirksamkeit der Filtersysteme wurde mittels Abgasmessung direkt nach dem Filtereinbau und am Ende der Projektlaufzeit vor Ort mittels Abgasmessungen überprüft. Die Ergebnisse der Loggerdaten werden mit dem Einsatztagebuch des Fahrzeugs abgeglichen, um Aussagen zu Abgastemperaturen bei verschiedenen Arbeiten zu erhalten. Auftretende Störungen oder Filterschäden werden analysiert um die Ursache zu eruiieren und entsprechende Massnahmen zur Vermeidung zu ergreifen.

## Betriebsstunden

Bis Mitte Oktober 2010 absolvierten die Filterfahrzeuge bis zu 1600 Stunden. Die Mehrheit der Fahrzeuge absolvierte rund 800 Stunden mit Partikelfilter (Abbildung 7).

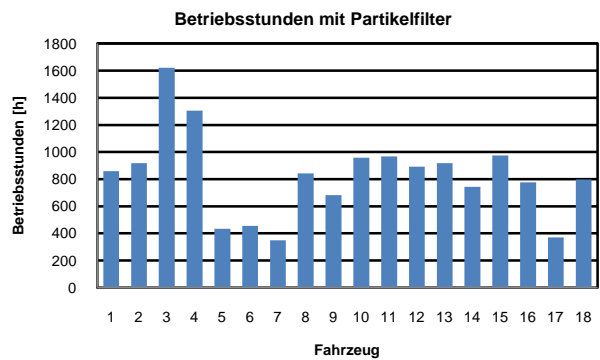


Abbildung 7: Nach der Nachrüstung geleistete Betriebsstunden mit Partikelfilter.

## Abgastemperaturen

Die Auswertungen der gespeicherten Temperaturwerte zeigte die inhomogene Motorbelastung bei land- und forstwirtschaftlichen Fahrzeugen deutlich. Die Fahrzeuge leisteten Einsätze mit hoher Last, beispielsweise schwere Transportarbeiten oder Ackerbauarbeiten, wie auch Arbeiten mit sehr geringer Motorbelastung, die tiefe Abgastemperaturen bewirkten. Zu Arbeiten mit geringer Last gehören Forstarbeiten, wie Seilwindenbetrieb oder der Einsatz des Traktors vor einem Kartoffelvollernter. Die maximalen Abgastemperaturen erreichten rund 500 bis 600 °C. Die mittleren Temperaturen bewegten sich zwischen 180 und 300 °C.



Abbildung 8: Alle Filtersysteme waren mit einer elektronischen Filterüberwachung und Datenspeicherung ausgerüstet.

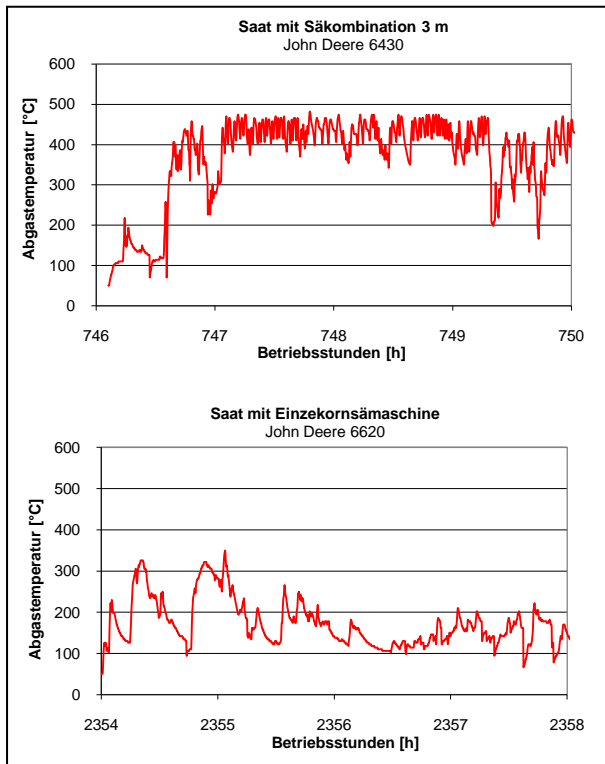


Abbildung 9: Beispiele der Abgastemperaturen bei schwerer und leichter Arbeit.

### Abgasgegendrucke

Entscheidend für tiefe Abgasgegendrucke war eine ausreichende Dimensionierung des Filters. Bei Fahrzeugen mit grossen Filtersystemen erreichte der Abgasgegendruck Maximalwerte von 100 mbar. Im Mittel bewegte sich der Gegendruck bei diesen Motoren um 15 bis 20 mbar. Bei Fahrzeugen mit hoher Motorbelastung und kleineren Filtern bewegten sich die mittleren Gegendrucke im Bereich von 60 mbar. Bei Störungen an den Filtersystemen konnten in Einzelfällen Druckspitzen über 500 mbar gemessen werden. Von Motorenherstellern sind die Motoren für Gegendruckwerte zwischen 120 und 200 mbar freigegeben. Bei einem Fahrzeug musste der Filter gewechselt werden, da das Volumen eher zu klein war. Generell zeigte sich im Projekt, dass es bei Filtern mit geringen Abgasgegendrücken zu weniger Störungen kam. Diese Filter wiesen eine grössere Toleranz gegenüber kurzzeitigen Anstiegen des Gegendrucks aufgrund von höherem Russausstoss der Motoren oder tiefen Abgastemperaturen auf.

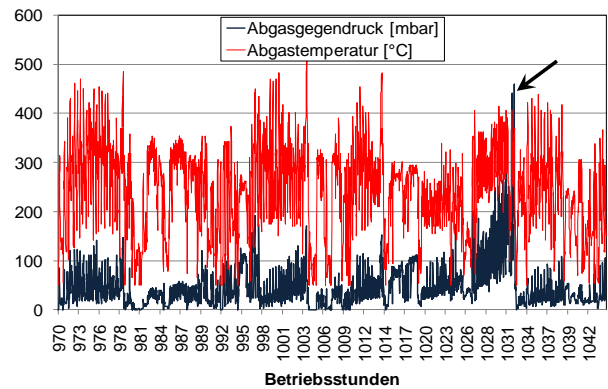


Abbildung 10: Mittels Datenlogger aufgezeichneter Verlauf von Abgastemperatur und Gegendruck mit Störung bei 1031 Betriebsstunden.

### Technische Störungen und Empfehlungen

Während des Praxiseinsatzes traten verschiedene technische Störungen auf. Das Spektrum reichte dabei von Nachbesserungen an den Aufbauten über Störungen mit der Additivversorgung, Problemen bei der aktiven Regeneration bis hin zu Filterschäden.

Die aufgebauten Filter- und Regenerationssysteme eigneten sich mehrheitlich für die jeweiligen Einsatzarten der Fahrzeuge. Lediglich bei einem Fahrzeug muss während des Einsatzes darauf geachtet werden, dass der Motor in regelmässigen Abständen stärker belastet wird, um den Russabbrand auszulösen. Der Einsatz von Systemen, die bei zu geringen Abgastemperaturen eine aktive Regeneration auslösen, hat sich positiv ausgewirkt. Bei Fahrzeugen mit regelmässig hohen Abgastemperaturen funktionieren passive Filtersysteme einwandfrei.

Zum Aufbau gehört ein vollständig ausgefülltes AKPF-Formular (AKPF= Arbeitskreis Partikel-Filter-Systemhersteller). Ein vollständig ausgefülltes Formular ist die Grundlage für die Eintragung der Filternachrüstung auf administrativem Weg in den Fahrzeugausweis. Im Projekt waren die Formulare teilweise nicht vollständig ausgefüllt, insbesondere die Lärmmessung wurde nicht von allen Aufbaufirmen durchgeführt. Für strassenzugelassene Fahrzeuge ist die Lärmmessung Pflicht.

Der sachgerechte Aufbau des Filtersystems auf das Fahrzeug bildet die Basis für einen reibungslosen Betrieb. Beim Aufbau ist darauf zu achten, dass die Zugänglichkeit zu wichtigen Fahrzeugteilen, beispielsweise Luftfilter oder Ölmesstab, für

die Wartung weiterhin gewährleistet ist, was erstaunlicherweise nicht immer der Fall war. Bei einzelnen Fahrzeugen kam es bereits nach einem Jahr zu Korrosion an Bauteilen des Filtersystems wie Schrauben und Rohrleitungen. Ausgeprägt ist dies bei Fahrzeugen, die im Winterdienst auf salznassen Strassen im Einsatz stehen. Hier zählt sich der Einsatz korrosionsbeständiger Bauteile aus. Generell sollten nur korrosionsfeste Materialien verbaut werden. Bei einzelnen Filtern fehlte ein Schutz des Filters gegen Beschädigungen oder gegen die unbeabsichtigte Berührung des heissen Filters. Bei Forsteinsätzen können die Filter beim Überfahren von Ästen beschädigt werden. Für solche Einsätze sollte ein Schutz montiert werden, der möglichst aus einer geschlossenen Platte besteht, in der sich keine Äste verfangen können. Da die Oberfläche der Filter sehr heiss werden kann, ist der Filter mit einem Schutzgitter gegen das unbeabsichtigte Berühren auszurüsten. Die im Einsatz auftretenden Erschütterungen und Vibrationen können zu Rissen an Bauteilen führen. Eine Abstützung oder die verteilte Einleitung der Kräfte kann für Abhilfe sorgen. Die Aufbauten waren mehrheitlich sachgerecht ausgeführt. Es zeigte sich, dass auch Landmaschinenwerkstätten, die vorgängig noch nie einen Filter aufgebaut hatten, hervorragende Aufbauten ausführten.

Eingefrorene Kondenswasserabscheider oder abgerissene Leitungen zum Gegendrucksensor führten zu Störungen der Filterüberwachung. Beim Einsatz von Funkwinden im Forst mit permanent eingeschalteter Zündung traten Fehlermeldungen auf. Ist der Traktor mit einer Staudruckbremse ausgerüstet, führt dies zu Fehlermeldungen, wenn die Filterüberwachung nicht darauf eingestellt ist.

Störungen der Additivbeimischung entstanden durch Luft, die in die additivführenden Leitungen gelangte, bei verklebtem Entlüftungsventil des Additivtanks oder defekte Additivpumpen. In mehreren Fällen musste das Relais, das die aktive elektrische Regeneration auslöst, aufgrund einer Fehlfunktion gewechselt werden.

Bei sechs Fahrzeugen waren Filterschäden während des Betriebs zu verzeichnen, die einen Wechsel der Filterelemente erforderten. Weiter wurden bei zwei Fahrzeugen die Filter vorsorglich oder während der Filterreinigung gewechselt. Ein weiterer Filter musste aufgrund von auftretenden hohen Spitzenwerten des Abgasgedrucks

gegen ein grösseres Modell getauscht werden. Ein zusätzlicher Filter zeigte zum Ende der Begleitung eine schlechte Abscheidewirkung, die sich in erhöhten Trübungswerten während der Beschleunigungsphase und mit Russ belegtem Endrohr des Auspuffs widerspiegelte. Die Ursachen der Filterschäden sind vielfältig. Bei einem Filtermodell hielten die Klebstellen der einzelnen Keramikelemente des Filtermonolithen den Belastungen nicht stand. Meist handelte es sich um Folgeschäden aufgrund einer vorgängigen Störung. Beispiele hierfür sind zu hohe Abgasgedrücke, die durch Störungen des Regenerationssystems verursacht werden. Dies zeigt, dass es ausserordentlich wichtig ist, Warnmeldungen der Filterüberwachung zu beachten und entsprechende Gegenmassnahmen rechtzeitig einzuleiten. Bei zwei Schäden konnte die Ursache nicht mehr eindeutig geklärt werden. Hier wird ein Zusammenspiel mehrerer Faktoren vermutet.

Bei Motoren der Abgasstufe IIIA traten gehäuft Störungen auf. Die elektronische Motorüberwachung verursacht diese Störungen in Verbindung mit der Abgasrückführung. Ein leichter Anstieg des Abgasgedrucks führt zu einer Erhöhung der Rückführrate des Abgases und dadurch zu höheren Russemissionen, die den Gegendruck weiter erhöhen. So kann der Gegendruck eines Partikelfilters auf einem Motor der Stufe III A sehr schnell ansteigen und lässt kaum Zeit für Gegenmassnahmen wie das Einleiten einer höheren Belastung. Folge davon ist, dass die Motorsteuerung eine Unregelmässigkeit, wie erhöhte Temperaturen oder Drücke feststellt und in „Notbetrieb“ umschaltet.

Trotz verschiedener technischer Probleme sind während der gesamten Projektdauer keine Schäden an Motoren zu verzeichnen. Offensichtlich sind die Filter und nicht die Motoren das schwächste Glied in der Kette, das beim Auftreten von Problemen bricht.

## **Meinung der Projektteilnehmer**

Im Herbst 2010 wurden Fragebogen mit insgesamt zehn Fragen an die Besitzer der Fahrzeuge abgegeben, um zusätzliche Informationen für das Projekt zu erheben.

Die Fahrzeugbesitzer erfuhren mehrheitlich aus der landwirtschaftlichen Fachpresse vom Projekt. Die Motivation zur Teilnahme am Projekt entsprang grösstenteils dem Wunsch, etwas für die



Umwelt zu tun. Auch erhoffte Vorteile beim Einsatz im Kommunalbereich wurden erwähnt. Die bisherigen Erfahrungen bei den Fahrzeugbesitzern und Fahrern sind bei funktionierendem Filtersystem sehr positiv. Die hohe Wirksamkeit der Filter wird besonders hervorgehoben. Pannen oder Filterschäden wurden als störend empfunden, insbesondere wenn das Fahrzeug dabei für längere Zeit ausfiel. Der Zusatzaufwand wird von der Mehrheit als gering empfunden. Die hohen Kosten werden als Hindernis zur Ausrüstung der Fahrzeuge mit Filtern genannt, ohne Subvention hätten die wenigsten ihre Fahrzeuge umgebaut. Die Mehrheit wäre bereit zwischen Fr. 3000.– bis 5000.– pro Filternachsrüstung auszugeben. Von den Herstellern von Traktoren werden serienmässig eingebaute Partikelfilter gewünscht, so dass die Systeme optimal aufeinander abgestimmt sind.

## Kosten

### Anschaffungskosten

Die Kosten für die Nachrüstung der landwirtschaftlichen Fahrzeuge mit einem Partikelfiltersystem betragen im Durchschnitt Fr. 17 500.– (Abbildung 11). In den Kosten sind die Anschaffung des Filters und die Montage enthalten. Vorbereitende Massnahmen, wie Wechsel der Einspritzdüsen, das Einstellen der Einspritzpumpe und die allfälligen Transportkosten des Fahrzeugs zum Filteraufbauer sind in den Gesamtkosten enthalten. Neben den ausgerüsteten Fahrzeugen lagen auch Offerten für die Ausrüstung weiterer Fahrzeuge vor, deren Kosten sich auf ähnlichem Niveau bewegten.

Bei 14 der 18 Fahrzeuge waren die Kosten nach Anschaffungs- und Aufbaukosten aufgeschlüsselt. Die Kosten für die Anschaffung des Filtersystems lagen im Bereich von Fr. 150.– pro kW Motorleistung. Die Aufbauten waren teilweise sehr aufwändig, beispielsweise durch die Anfertigung passender Konsolen zur Befestigung der Filter oder dem Aufbau einer Spannungsversorgung mit 24 Volt anstelle des 12 Volt Bordnetzes. Anschaffung und Aufbau der Filtersysteme führen zu rund 15 % höheren Anschaffungskosten der Fahrzeuge. Bei leistungsschwächeren Traktoren und dem Einsatz eines teuren Filtersystems können die Kosten bis zu 30 % des Fahrzeugneupreises betragen.

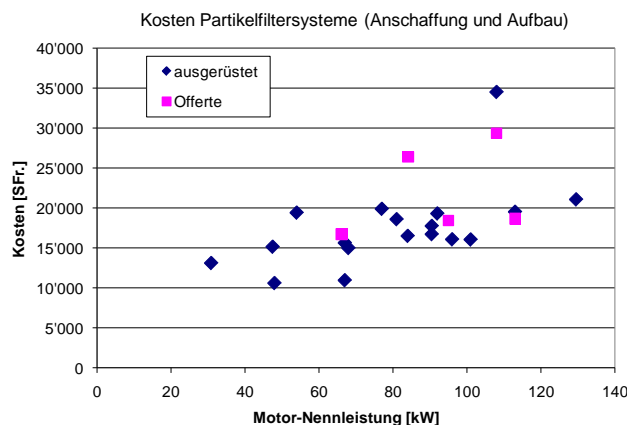


Abbildung 11: Anschaffungskosten der verbauten und für weitere Fahrzeuge offerierten Filtersysteme (Anschaffung und Aufbau).

Im Rahmen des Projektes lagen die Kosten der Filtersysteme im Mittel bei 34 % des aktuellen Fahrzeugrestwerts. Für die Bestimmung des Restwerts der Fahrzeuge wurden die Rücknahmepreislisten des Schweizerischen Landmaschinen-Verbandes (Schweizerischer Landmaschinen-Verband 2009) verwendet. Bei einem Fahrzeug ist der Wert des Filtersystems grösser als der Restwert des Fahrzeugs. Der Grund liegt im kostengünstigen Fahrzeug, dessen Alter (Jahrgang 1999) und dem teuren Filtersystem, das aufgebaut wurde.

### Variable Kosten

Eine Aussage zu den variablen Kosten lässt sich zum jetzigen Zeitpunkt nur ansatzweise treffen. Der Grund liegt hauptsächlich in der Unkenntnis der Kosten für die reguläre Reinigung der Filter von Ascherückständen. Durch die schadensbedingten Filterwechsel und die vorzeitigen Filterreinigungen aufgrund von Störungen fehlen Erkenntnisse über die Intervalle zwischen den Filterreinigungen. Dadurch ist die Berechnung der Verteuerung pro Betriebsstunde nur näherungsweise möglich.

Die bisherigen Kosten für reguläre Filterreinigungen bewegten sich zwischen Fr. 270.– und 1400.–. Die Intervalle für die Reinigung der Filterelemente lagen bei den bisherigen regulären Filterreinigungen bei vier Fahrzeugen zwischen 550 und 900 Betriebsstunden. Die Filterreinigungen führten zu Mehrkosten im Bereich von Fr. 0.50 bis 2.50 pro Betriebsstunde.

Als zusätzliche Kosten fallen der Verbrauch von Additiven, ein möglicher Mehrverbrauch und die Kosten für aschearmes Motorenöl an. Die Kosten für Additive betragen rund Fr. 80.– bis 100.– pro Liter Additiv. Bei den Projektfahrzeugen wurde Additiv in Konzentrationen von rund 0,5 bis 1 Promille dem Diesel zudosiert, was eine Verteuerung der Betriebsstunde aufgrund des Additivverbrauchs von 20 bis 80 Rappen bewirkte. Die Mehrkosten durch das Additiv sind dabei hauptsächlich vom stündlichen Diesel-Verbrauch der Motoren abhängig. Filtersysteme ohne Additivzugabe erzeugten diesbezüglich keine Zusatzkosten. Aufgrund der Messung des Abgasgedruckes vor und nach Filteraufbau bei den jeweiligen Projektfahrzeugen und von Prüfstandmessungen der Forschungsanstalt ART, die den Einfluss eines veränderten Abgasgedruckes auf den spezifischen Verbrauch zeigten, wurde der Dieselmehrverbrauch berechnet. Es zeigte sich, dass der Abgasgedruck bei den meisten Fahrzeugen durch den Filtereinbau nur leicht oder kaum anstieg. Demzufolge weisen diese Motoren keinen Mehrverbrauch auf. Bei Motoren mit einem tiefen Abgasgedruck mit originalem Schalldämpfer, vornehmlich Motoren der Abgasstufe IIIA, führte der höhere Abgasgedruck aufgrund des Filtereinbaus zu kalkulierten Mehrverbräuchen im Bereich von 1,5 %. Maximal führte das zu einer Verteuerung der Betriebsstunde um 20 Rappen.

Die Kosten für die teilweise notwendigen Filterwechsel wurden im Rahmen der Garantieleistungen durch die Nachrüstfirmen übernommen.

Über alle Fahrzeuge gesehen lagen die variablen Mehrkosten, hervorgerufen durch Filterreinigungen, Mehrverbrauch und Additivverbrauch, zwischen Fr. 0.50 bis Fr. 2.60. pro Betriebsstunde.

## Reduzierte Russmenge

Die aufgrund der Filternachrüstungen reduzierbare Russmenge wurde in Anlehnung an die Berechnungsmethodik des Berichts Umwelt-Wissen BAFU 2008/28 (Schäffeler und Keller 2008) abgeschätzt. Die Berechnung erfolgte für jedes Fahrzeug individuell. Die spezifischen Partikelmassen-Emissionen entstammten soweit verfügbar den Typengenehmigungsunterlagen der entsprechenden Fahrzeuge. Die Lebensdauer der Fahrzeuge wurde bei Traktoren mit 10 000 Betriebsstunden angenommen. Der Lastfaktor errechnete sich auf Basis der Motornennleistung, des stündlichen Verbrauchs während der Projektdauer, des spezi-

fischen Verbrauchs und der Korrektur des spezifischen Verbrauchs bei Abweichung vom Norm-Lastfaktor. Die Lastfaktoren wurden auf Basis der Motorleistung und des stündlichen Diesel-Verbrauchs berechnet. Sie bewegten sich im Bereich von 0,15 bis 0,35, was einer geringen Motorbelastung entspricht. Die Nachrüstung der 18 Fahrzeuge reduziert den Ausstoss von krebserregendem Dieseleruss bis zur Ausserverkehrsetzung der Fahrzeuge um rund 900 kg. Es zeigte sich, dass besonders bei Motoren mit hohen spezifischen Emissionen die reduzierte Menge gross ist. Je geringer die Russmissionen, desto geringer wird die eingesparte Menge. Die Reduktion der Anzahl Russpartikel ist bei allen Fahrzeugen sehr hoch. Bei funktionierenden Filtersystemen sind die Auspuffrohre nach mehreren hundert Betriebsstunden noch immer blank und nicht durch Russ geschwärzt.

## Ausblick

Der Ausstoss an krebserregendem Dieseleruss landwirtschaftlicher Fahrzeuge betrug im Jahr 2010 rund 310 Tonnen, was in der Schweiz etwa 20 % der gesamten motorischen Dieseleruss-Emissionen ausmacht. Damit liegen die landwirtschaftlichen Fahrzeuge an zweiter Stelle hinter den Personenwagen mit rund 600 Tonnen und vor den schweren Nutzfahrzeugen (Lastwagen) mit 230 Tonnen jährlichem Dieselerussausstoss. Diese Zahlen belegen, dass die vollzogenen Massnahmen bei den land- und forstwirtschaftlichen Fahrzeugen noch wenig weit fortgeschritten sind. Ab 2011 tritt abgestuft nach Motorleistung mit der Abgasstufe IIIB eine Verschärfung der Abgasgrenzwerte für land- und forstwirtschaftliche Neufahrzeuge in Kraft. Dabei wird für Leistungen ab 37 kW der Partikel-Masse-Grenzwert verschärft. Die bisherigen Verlautbarungen der Motorenhersteller deuten darauf hin, dass zur Erreichung der neuen Abgasgrenzwerte bei leistungsstärkeren Motoren vor allem SCR-Systeme zur NO<sub>x</sub>-Reduktion eingesetzt werden. Allerdings gibt es auch Motorenhersteller, wie John Deere und Perkins, die ankündigten zur NO<sub>x</sub>-Reduktion Abgasrückführung und zur Erreichung des Partikelgrenzwertes einen geschlossenen Partikelfilter einzusetzen. Diese Motoren finden auch Anwendung in land- und forstwirtschaftlichen Fahrzeugen.

In der Abgasgesetzgebung des Nonroad-Bereichs ist noch kein Partikel-Anzahl-Grenzwert vorgeschrieben. Wann die Grenzwerte für den Non-

road-Bereich analog zum Strassenverkehr (EURO 6/EURO VI) um einen Partikelanzahlgrenzwert ergänzt werden, ist noch nicht abzusehen. Sobald dies eintritt, müssen zur Erreichung der Grenzwerte zwingend geschlossene Partikelfilter eingesetzt werden. Bis dahin ist nach anderen Massnahmen zur Minimierung der Partikelanzahl zu suchen.

Gemäss BAFU entspricht die Ausrüstung neuer land- und forstwirtschaftlicher Maschinen mit Partikelfiltern heute dem Stand der Technik. Die Erfahrungen aus dem vorliegenden Projekt zeigen, dass Partikelfiltersysteme eine wirksame Massnahme zur Senkung des Dieselerussausstosses sind, dass die Technik der Nachrüstung noch verfeinert werden kann und die hohen Kosten nicht ausser Acht gelassen werden dürfen.

## Schlussfolgerungen

Eine Nachrüstung von land- und forstwirtschaftlichen Fahrzeugen mit Filtersystemen ist technisch möglich. Je nach Einbausituation kann der Platzbedarf der Filter Einschränkungen verursachen. Besonders bei kompakten Traktoren mit angebautem Frontlader stellt dies ein Problem dar. Ein Aufbau eines Filters kann zu einer Beeinträchtigung des Sichtfeldes führen. Vor dem Aufbau des Filters muss der Motor in einem einwandfreien Zustand gebracht werden (Einspritzdüsen und Einspritzpumpe überprüfen).

Ein möglichst problemloser Betrieb des Filtersystems beginnt mit der Wahl des richtigen Filtersystems. Hier gilt: Das Filtersystem muss zum Einsatz des jeweiligen Fahrzeugs passen. Die korrekte Dimensionierung des Filters zur Vermeidung höherer Abgasgedrücke und erhöhten Treibstoffverbrauchs ist wichtig.

Verschiedene technische Störungen sind im Verlaufe des Projektes aufgetreten. Bei sechs Fahrzeugen mussten die beschädigten Filter gewechselt werden. Weiter kam es zu Störungen mit der Additivversorgung, Störungen bei der Auslösung der aktiven Regeneration oder eingefrorenen Druckleitungen oder Kondenswasserabscheider. Moderne Traktormotoren der Abgasstufe IIIA hatten häufiger Probleme. Die Gründe liegen in der elektronischen Motorüberwachung verbunden mit der Technik der Abgasrückführung. Viele technische Störungen sind auf Probleme der Regenerationssysteme oder unsachgemässe Aufbauten zurückzuführen.

Serienmässig installierte Filter bei Neufahrzeugen sind in die Motorsteuerung eingebunden. Das erlaubt eine Regeneration bei allen Betriebszuständen. Probleme mit der Regeneration können so weitestgehend vermindert werden. Auch Probleme durch unsachgerechte Aufbauten werden nicht mehr auftreten. Es ist daher einfacher die Partikel mit einem ab Werk installierten Filter zu reduzieren. Beim Neukauf eines Fahrzeugs sollte auf einen serienmässigen Partikelfilter geachtet werden.

Geschlossene Dieselpartikelfilter reduzieren den Ausstoss von krebserregendem Dieseleruss massiv. Eine Modellrechnung zeigt, dass aufgrund der Filternachrüstung, die 18 im Kanton Bern laufenden Fahrzeuge, bis zum Ende ihrer Lebensdauer rund 850 kg Russ weniger emittieren werden. Gleichzeitig wird durch den Einsatz der Partikelfilter, die auf der BAFU-Partikelfilterliste aufgeführt sind, auch die Partikel-Anzahl um mindestens 97 % reduziert.

Die Kosten für eine Nachrüstung eines Partikelfilters auf einen Traktor der Leistungsklasse von 80 bis 100 kW liegen bei rund Fr. 15 000.– bis 20 000.–. Dies entspricht ungefähr 15 % des Fahrzeugneuwerts. Bei der Nachrüstung älterer Fahrzeuge können die Kosten des Filtersystems den Restwert des Fahrzeugs übersteigen. Die hohen Kosten lassen sich mit den immer noch geringen Stückzahlen, den hohen Motorleistungen und dem Einsatz eher komplexerer Filtersysteme mit aktiv/passiver Regeneration erklären.

Die Betriebskosten können zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht exakt kalkuliert werden, liegen aber aufgrund der bisherigen Daten der 18 Fahrzeuge im Bereich zwischen Fr. 0.50 und 2.60 pro Arbeitsstunde. Darin sind Abschreibung und Verzinsung der Anschaffungskosten nicht inbegriffen. Aussagen hierzu können zum jetzigen Zeitpunkt keine gemacht werden, da die Lebensdauer der Filter nicht bekannt ist.

Partikelfilter stellen eine sehr wirkungsvolle Massnahme zur Reduktion des Dieselerussausstosses dar. Wie dieses Projekt belegt, stellt deren Nachrüstung hohe Anforderungen. Die bei einigen Herstellern künftig serienmässige Ausrüstung, wird bewirken, dass die Kinderkrankheiten der Nachrüstung bald der Vergangenheit angehören.

## Dank

Ein Dank geht an:

- Die Landwirte für die Bereitschaft zur Mitarbeit im Projekt und fürs gewissenhafte Ausfüllen der Fahrtenbücher.
- Die Landmaschinenwerkstätten und den Filternachrüstfirmen für die Aufbauten.
- Der SMU für die Motivation der Landmaschinenwerkstätten.
- Der Begleitgruppe für die angeregten Diskussionen.

## Literatur

Bundesamt für Umwelt BAFU 2010: Partikelfilterliste. Zugriff unter:

<http://www.bafu.admin.ch/partikelfilterliste/index.html?lang=de&lang=de>.

Landis M., Schiess I. u. Wolfensberger U. 2007: Partikelfilter-Nachrüstung bei Traktoren. ART-Bericht 677, Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Ettenhausen, 12 S.

Schäffeler U. u. Keller M. 2008: Treibstoffverbrauch und Schadstoffemissionen des Offroad-Sektors, Studie für die Jahre 1980–2020. Bundesamt für Umwelt BAFU, Umwelt-Wissen Nr. BAFU 2008/28, Bern, 172 S.

Schweizerische Normen-Vereinigung 2009: Schweizer Regel SNR 277205: Prüfung von Partikelfiltersystemen für Verbrennungsmotoren. Winterthur, 49 S.

Schweizerischer Landmaschinen-Verband 2009: Rücknahmepreislisten für Landwirtschaftstraktoren 2009. Bern, 287 S.