

Abgasschadstoffe von Dieselmotoren im Tunnelbau

Bulletin 2: Dieselpartikelfilter

1. Ausgangslage und Zielsetzung

Partikel aus der dieselmotorischen Verbrennung sind aufgrund weltweiter toxikologischer Studien [1] bereits 1988 als „wahrscheinlich krebserzeugend“ eingestuft worden. In der Folge wurden auf nationaler Ebene Immissions-Grenzwerte mit Bezug auf den Gesamtkohlenstoffgehalt der Partikel (DME) festgelegt. Die maximal zulässige DME-Konzentration an Arbeitsplätzen (8-Stunden-Mittelwert) liegt beispielsweise in der Schweiz bei 0.2 mg/m^3 [2]. Die deutsche TRGS 554 empfiehlt „zusätzliche Massnahmen zum Schutz der Beschäftigten“ bereits ab 0.1 mg/m^3 [3].

Editorial

Die Konzentration von Dieselpartikeln am Arbeitsplatz muss auf weniger als 0.2 mg pro Kubikmeter Atemluft reduziert werden. Bei bestehenden Motoren ist dies nur durch Partikelfiltration möglich. Im Rahmen des Projektes VERT wurden 5 typische Filter ausgewählt und auf 2 Baumaschinenmotoren untersucht. Alle Filter erzielten Abscheidegrade von mehr als 90%, die Druckverluste blieben im zulässigen Rahmen, und die Baugrösse der meisten Filter erwies sich als brauchbar für die Nachrüstung. Zuverlässigkeit im praktischen Einsatz sowie Tauglichkeit der Verfahren zur periodischen Reinigung der Filter (Regeneration) werden zur Zeit im Baustelleneinsatz untersucht. Darüber soll in einem der nächsten Bulletins berichtet werden. Auch wenn die breite Erfahrung für die Russfiltertechnologie noch fehlt, ist doch nach unserer Einschätzung ein technischer Stand erreicht, der zur Lösung der Emissionsprobleme im Tunnelbau geeignet erscheint.

AUVA, SUVA, TBG

VERT steht für Verminderung der Emissionen von Realmaschinen im Tunnelbau. „Realmaschinen“ meint die bereits real im Feld betriebenen Motoren, also nicht Zukunftsentwicklungen. Über die Hintergründe und Ziele des VERT-Projektes informiert VERT-Bulletin 1 vom Juni 1995.



Bild 1: Dieselmotoren, abgeschieden als Feinstpartikel und Agglomerate auf einer Keramikfaser mit 10μ Durchmesser

Nach dem schweizerischen Emissions-Inventar [2] müssen im Durchschnitt der im Feld befindlichen Baumaschinen Partikelemissionen von ca. 1.5 g/kWh erwartet werden. Beim Luftbedarf eines Dieselmotors von ca. $6 \text{ m}^3/\text{kWh}$ ($\lambda = 2$) entspricht dies einer Schadstofffracht von 250 mg pro Kubikmeter Verbrennungsluft.

Um ausschliesslich durch Frischluftzufuhr am Arbeitsplatz ein Immissionsniveau von weniger als 0.1 mg/m^3 zu erzielen, wäre somit eine Belüftungsmenge erforderlich, die mindestens 2500 mal grösser ist als die Menge an Verbrennungsluft. Wegen der Unvollkommenheit der Durchmischung wäre die Luftqualität trotzdem nicht an allen Arbeitsplätzen gewährleistet, und die Gesamtschadstofffracht, die mit der Tunnelabluft in die Umwelt gelangen würde, bliebe unverändert. Zudem würden die erforderlichen Kosten für die Bewetterung untragbar hoch.

Um dieser unbefriedigenden Situation Rechnung zu tragen, muss das übliche „Verdünnungsdenken“ verlassen werden. Nicht nur die durchschnittliche Schadstoffbelastung (Immission) ist zu begrenzen, sondern auch die Schadstoffemission jedes einzelnen Dieselmotors.

Angesichts der Bedeutung der Partikelemission, die bei bestehenden Motoren nur durch Abgasnachbehandlung,

also durch Filtration, wirksam vermindert werden kann, wurde im Rahmen des Projektes VERT ein Schwerpunkt zur Evaluation solcher Nachrüstmassnahmen gesetzt. Im folgenden wird der Zwischenstand nach Abschluss der Untersuchungen am Motorprüfstand dargestellt. Über die anschliessenden Feldversuche wird später berichtet.

2. Eigenschaften von Dieselpartikeln

Bei ungenügender Gemischaufbereitung und Luftmangel entstehen, vor allem in der ersten Phase der dieselmotorischen Verbrennung, winzige Partikel mit graphitähnlichem Aufbau, von denen viele wieder verbrennen. Die übrig gebliebenen schliessen sich während der Expansionsphase zu sogenannten Primärpartikeln von 10 - 20 nm Durchmesser ($1 \text{ nm} = 0.001 \mu\text{m}$) zusammen und verlassen so den Motor. Während des Transportes bis zum Ende des Auspuffrohrs entstehen daraus zum Teil Agglomerate, die grösser als 300 nm werden können - der Dieselfrauch wird damit sichtbar.

Aufgrund ihrer Entstehung sind Russpartikel lockere, oberflächenreiche Strukturen. Ihre Dichte liegt bei 0.02 bis 0.06 g/cm³, die spezifische Oberfläche liegt typischerweise im Bereich von 50 bis 150 m²/g [4].

Im allgemeinen beobachtet man eine trimodale Verteilung, wobei der mittlere Bereich um 50 - 150 nm im Hinblick auf die toxischen Wirkungen im Alveolarbereich am wichtigsten ist. Bild 2 zeigt die Verteilung bei einem typischen Baumaschinen-Motor.

Partikel dieser Grösse sind nicht sichtbar, dringen tief in die Lunge ein und stellen aufgrund ihrer Grösse, ihrer stofflichen Zusammensetzung und ihrer hohen spezifischen Oberfläche ein toxisches Risiko dar.

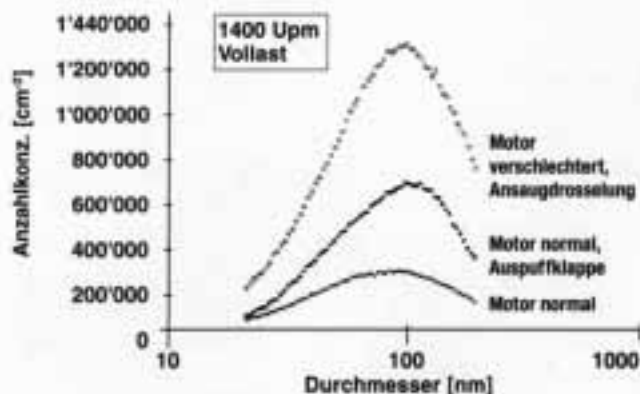


Bild 2: Partikelgrössenverteilung im Abgas eines Di-Dieselmotors (Nennleistung 100 kW), bei hohem, mittlerem und geringem Luftüberschuss sowie verschlechterter Verbrennung durch Förderbeginn-Verschiebung.

Neben dem Kohlenstoff enthalten die Partikel angelagerte Kohlenwasserstoffe, kondensierte Schwefelsäure, Aschebestandteile, z.B. aus dem Schmieröl, und Motorabrieb. Bild 3 zeigt nach Messungen der Volkswagen AG eine typische Zusammensetzung für PKW-Motoren[5]. Die Zusammensetzung kann schwanken, bei den durchschnittlich höheren Lasten des Nutzfahrzeugmotors ist typischerweise der Kohlenstoffanteil höher, der Anteil der Kohlenwasserstoffe geringer.

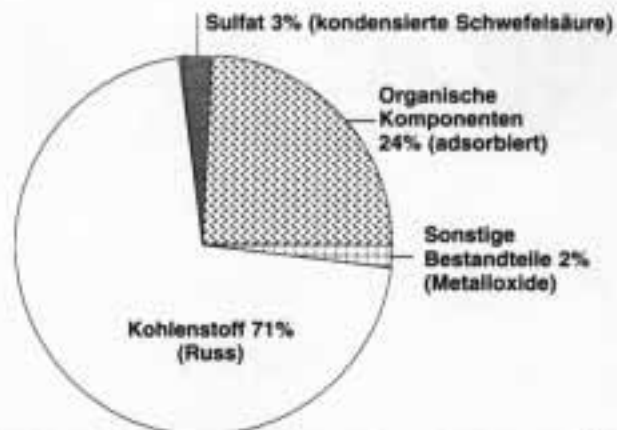


Bild 3: Typische Zusammensetzung von Dieselpartikeln bei PKW-Motoren nach Messungen der Volkswagen AG [5]

Obwohl Dieselpartikel im wesentlichen aus brennbarer Substanz bestehen, gelingt es wegen unzureichender Verweilzeit und niedrigen Temperaturen in der Regel nicht, im Auspuffrohr bis zum Austritt ins Freie noch eine wesentliche Nachreaktion zu erzeugen.

3. Methoden der Filtration

Um zu verhindern, dass die gesundheitsgefährdenden Dieselpartikel in die Atemluft der Beschäftigten gelangen, bleibt somit nur die Möglichkeit der Filtration. Aufgrund ihrer geringen Grösse entziehen sich die Dieselpartikel vielen technisch üblichen Entstaubungsverfahren; wie Bild 4 zeigt, sind Zykclone, Wäscher, Venturi und übliche Elektrofilter für diese feinen Fraktionen fast wirkungslos.

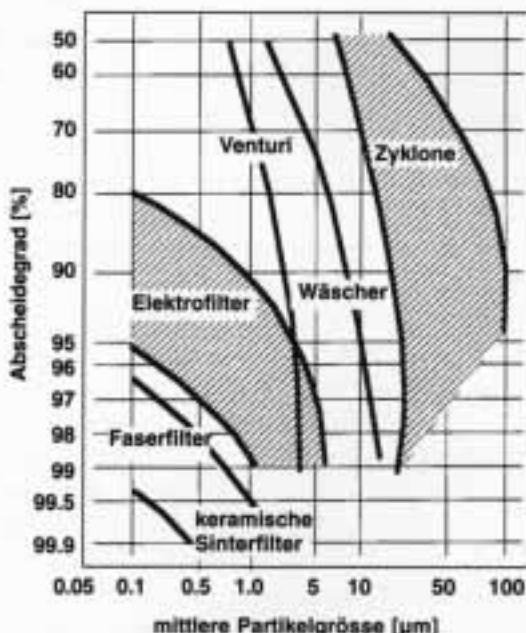


Bild 4: Abscheidegrad in Funktion der Partikelgrösse für technische Filtersysteme (nach ZIEVERS, CERAMIC-Bulletin 1/1991).

Da beim Russabbrand lokal Temperaturen über 1000° C auftreten können, werden meist keramische Materialien eingesetzt, als oberflächenreiche Strukturen monoli-

thisch offenporig oder in Mikrofaserform. Es sind allerdings auch hochporöse metallische Sinterstrukturen auf dem Markt, die dank ihrer hohen Wärmeleitfähigkeit das Problem der lokalen Überhitzung mildern.

Die heute gebräuchlichen Dieselpartikelfilter lassen sich aufgrund ihres Aufbaus und ihrer Eigenschaften in zwei Gruppen mit unterschiedlichen Eigenschaften aufteilen, in sogenannte Oberflächenfilter und Tiefenfilter [6].

Oberflächenfilter wirken siebartig durch sogenannte Sperreffekte, d.h. die Porosität muss kleiner sein als die zu filtrierende Korngrösse. Im Grössenbereich der Dieselpartikel ist die übliche Porosität keramischer Filterwände ($10\text{--}30\mu$) dazu nicht in der Lage. Es muss sich deshalb zuerst ein Russkuchen bilden, der mit zunehmender Dicke immer effizienter auch feinere Partikel zurückhält.

Ein typischer Vertreter der Oberflächenfilter ist der weit verbreitete sogenannte monolithisch keramische Zellenfilter (Bild 5), dessen wechselseitig geschlossene Zellen in der Regel einen Querschnitt von $2\times 2\text{ mm}$ aufweisen. Die für die Filtration zur Verfügung stehende Oberfläche ist damit sehr gross, bei einem Liter Filtervolumen etwa 1 m^2 . Grosse Oberfläche ist eine Bedingung für Filter dieser Art, da mit Rücksicht auf den Gegendruck die Strömungsgeschwindigkeit durch die filtrierenden Wände nur $3\text{--}5\text{ cm/s}$ erreichen darf. Der Abscheidegrad ist beim neuwertigen, noch völlig unbelegten Filter zunächst gering, der Gegendruck relativ niedrig. Mit zunehmender Russbelegung verbessert sich der Abscheidegrad rasch und kann sehr hohe Werte erreichen. Filter dieser Art können grosse Mengen an Russ speichern, schliesslich füllen sich die Zellen aber, und der Gegendruck steigt stark an - dieser Zustand muss im praktischen Einsatz vermieden werden.

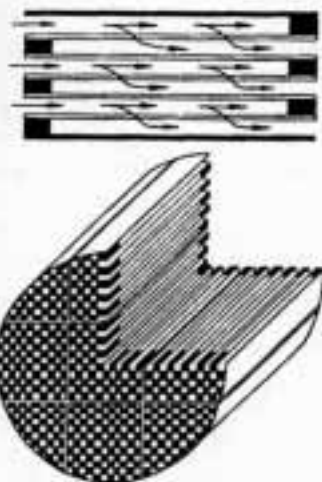
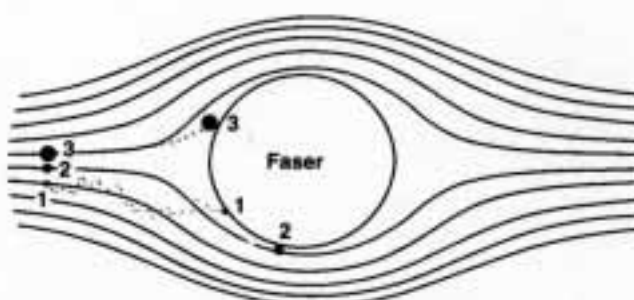


Bild 5: Monolithisch-keramische Zellenfilter, sogenannte „wall flow“-Filter (Bild nach CORNING)

Tiefenfilter, die üblicherweise aus Faserstrukturen aufgebaut werden und als Papierfilter oder Faservliese in der Reinraumtechnik höchste Abscheidegrade erreichen, können unter Verwendung keramischer Fasern auch für die Russfiltration eingesetzt werden. Die Poren typischer Tiefenfilterstrukturen sind so gross, dass Sperreffekte nicht auftreten, ein Russkuchen bildet sich nicht. Die Fasern bieten in ihrer Gesamtheit aber eine sehr grosse

Oberfläche dar (typischerweise 250 m^2 pro Liter Filtervolumen), auf der sich die winzigen Partikel infolge von Trägheitseffekten oder Diffusionseffekten abscheiden können. Bild 6 zeigt, dass auf diesen Fasern dann auch Agglomerate wachsen, die die Filteroberfläche noch erheblich vergrössern.



1. Diffusion 2. Abfangen 3. Trägheitsabscheidung

Bild 6: Filtermechanismen an einer Einzelfaser (aus Firmenunterlagen 3M)

Die Porosität dieser Tiefenfilter-Strukturen ist gross, typischerweise 65% und mehr. Die Durchströmungsgeschwindigkeit liegt dementsprechend wesentlich höher als bei Oberflächenfiltern (bis ca. $20\text{--}60\text{ cm/s}$).

Der Abscheidegrad von Tiefenfiltern ist beim unbelegten resp. vollständig abgereinigten Filter am besten. Gleichzeitig ist der Gegendruck dort am niedrigsten. Mit zunehmender Belegung sinkt der Abscheidegrad, bis schliesslich eine Sättigung erreicht wird. Der Gegendruck steigt degressiv bis zu einem Grenzwert - der Filter verstopft nie vollständig.

In der technischen Ausführung werden die Filter üblicherweise in Kerzenform aufgebaut, Lochblechrohre übernehmen die Tragfunktion, wobei beim sogenannten Wickelfilter das Garn in einer besonderen, die Oberfläche erhöhenden Technik auf das innere Lochblech straff aufgewickelt wird. Beim sogenannten Strickfilter wird der zylindrische Hohlraum durch ein plissiertes Rundgestrick relativ locker gefüllt [7].

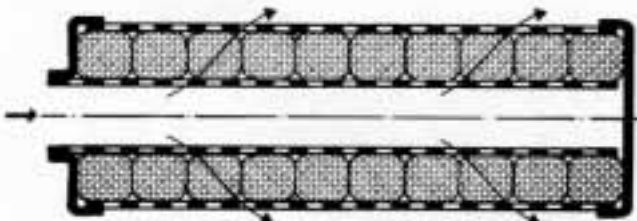


Bild 7: Fasergestrick-Filterkerze

Viele technische Filter sind Mischtypen. Sowohl Tiefenfilter als auch Oberflächenfilter erreichen bei geeigneter Auslegung Abscheidegrade weit über 90% . Während die Filtrationsqualität nur schwach von der Durchströmungsgeschwindigkeit und damit von der Grösse abhängt, steigt der Gegendruck mit abnehmender Baugrösse rasch an. Gleichzeitig sinkt die Speicherfähigkeit.

Der Druckverlust des Filters beeinflusst den Brennstoffverbrauch des Motors, bei 100 mbar ist mit einer Wir-

kungsgrad-Einbuße von etwa 2% zu rechnen, bei turboaufgeladenen Motoren eventuell etwas mehr. Das Gegendruckverhalten ist daher häufig bestimmend für die Auslegung der Filter.

Alle diese Filtermedien haben die Eigenschaft, den Luftschall des Auspuffstromes wirkungsvoll zu dämpfen.

4. Periodische Reinigung der Filter

Innerhalb einer Stunde kann ein [100-kW-Motor] mehr als 50 g Russ liefern. Dies entspricht in der lockeren Schüttung der Agglomerate einem Volumen von etwa 1 l. Die Filter müssen also entweder sehr gross dimensioniert oder recht häufig gereinigt werden. Vereinzelt wird versucht, den anfallenden Russ ähnlich wie bei einem Staubsauger zu entsorgen. Dies gelingt unter Verwendung von speziellen Papierfiltern, jedoch nur bei sehr kalten Auspuffgasen (< 250° C) und geringem Russanfall. Es bleibt die Gefahr einer plötzlichen Entzündung. Andere Entwicklungen versuchen, in Anlehnung an industrielle Entstaubungstechniken den Russkuchen periodisch durch Rückblasen und Austrag über Schleusen zu lösen [8].

Die Mehrheit der heute angebotenen Verfahren nutzt jedoch die Tatsache, dass der Russ mit dem im Abgas vorhandenen Restsauerstoff verbrannt werden kann. Die Filter werden daher auch als Russabbrand-Filter (RAF) bezeichnet. Das vollständige Abbrennen des Russes erfordert allerdings Temperaturen über 600° C, die im durchschnittlichen Betrieb einer Baumaschine nach der Entspannung des Gases durch den Turbolader nur selten auftreten. Gleichzeitig ist ein Sauerstoffgehalt von mindestens 6 - 8% erforderlich. Wird eine solche Selbstregeneration doch einmal ausgelöst, so geschieht dies in der Regel bei hochbelastetem Filter. Die Entzündung des Russkuchens setzt dann eine grosse zusätzliche Wärmemenge frei, die die Temperatur im Filterbereich um weitere 500-700° C steigern kann und damit zu Thermoschockbelastungen führt, denen das keramische Material der Zellenfilter häufig nicht gewachsen ist.

Um zuverlässig zu regenerieren, die Filtermaterialien zu schonen und den Gegendruck unter Kontrolle zu halten, werden daher die folgenden Regenerationsverfahren angeboten:

Aktive Regenerationsverfahren: Sie überwachen die Russbelastung des Filters mittels Drucksensoren und steigern bei Erreichen eines Grenzwertes die Temperatur im Filter bis zum Einsetzen des Russabbrandes durch unterschiedliche Mittel.

Die Beheizung kann, wie in Bild 9 gezeigt, durch einen vorgeschalteten Brenner erfolgen, der unter Verwendung von Dieselöl und zusätzlicher Verbrennungsluft (Gebläse) den Abgasstrom entsprechend aufwärmt (Vollstrombrenner). Die Heizleistung wird so dosiert, dass der Russ relativ langsam abbrennt, die entstehende Wärme also ständig abgeführt werden kann und somit die Thermoschockbelastung des Materials vermieden wird.

Soll der Filter bei beliebigen Betriebszuständen des Motors regeneriert werden, so liegt die Brennerleistung in der Grössenordnung der Motorleistung. Eine sehr sorg-

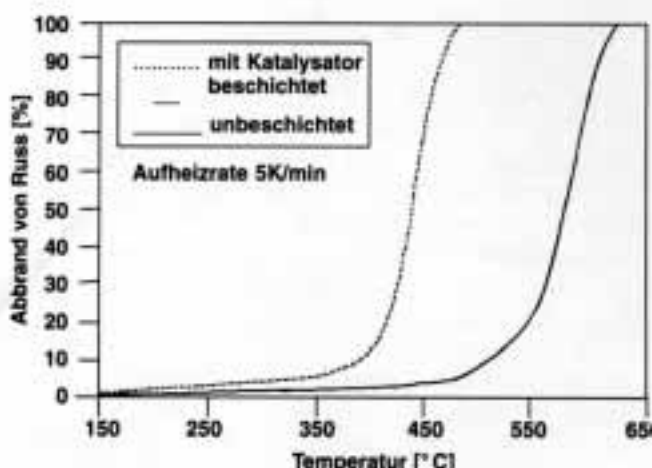


Bild 8: Abbildungsverhalten von Russ auf unbeschichteten und katalytisch beschichteten Mikrofaserstrukturen (Firmenangabe BUCK)

fältige Regelung ist Voraussetzung für die zuverlässige Funktion.

Weniger Brennerleistung ist erforderlich, wenn ein Zwillingsfiltersystem verwendet wird, wobei der jeweils zu regenerierende Filter nicht vom Abgas durchströmt wird, sondern lediglich vom Brennergas (Teilstrombrenner). Die Regeneration erfolgt dann langsamer, kann leichter kontrolliert werden - der Gesamtaufwand des Systems wird allerdings weiter vergrößert.

Das Verfahren kann wesentlich vereinfacht werden, wenn man sich darauf beschränkt, die Regeneration im Fahrzeugstillstand bei Motorleerlauf oder sogar bei Motorstillstand durchzuführen. Die erforderliche Energie für eine elektrische Beheizung kann dann aus dem Netz bezogen werden. Solche Regenerationen benötigen eine wesentlich längere Zeit, sie können in der Regel nur periodisch zwischen Arbeitsschichten durchgeführt werden. Die Filter müssen daher so gross dimensioniert werden, dass sie während 8 - 16 Stunden allen anfallenden Russ ohne unzulässig hohen Gegendruck speichern können. Andere Systeme behalten auch für diesen periodischen Regenerationsvorgang im Stillstand die Brennerbeheizung bei, die Regenerationszeit wird dann etwas kürzer. Wechselfiltersysteme, wie sie für Gabelstapler angeboten werden, sind für den Einsatz im Tunnelbau kaum praktikabel.

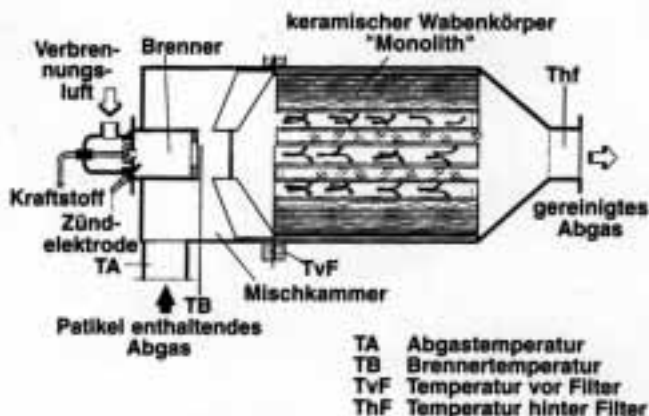


Bild 9: Partikelfiltersystem mit Vollstrom-Dieselmotor (DSI/GILLET)

Demgegenüber stehen die sogenannten passiven Regenerationsverfahren.

Additiv-Regeneration: Gewisse Metalloxide haben die Eigenschaft, die Zündtemperatur des Russes durch katalytische Wirkung abzusinken. Bei Kupfer ist dies seit langem bekannt (Reinigen von Kaminen), aber auch Eisen- und Ceroxide sind sehr aktiv. Die Metalle werden in organischen Komplexen in geringen Mengen (20 - 50 ppm) dem Kraftstoff zugemischt, finden sich dann in äusserst feiner Verteilung im Russ wieder und können nach Bild 10 den Russabbrand bei tieferen Temperaturen auslösen. Neben stochastischen Regenerationen, die dank Zündung durch angelagerte Kohlenwasserstoffe schon bei 200 - 300° C auftreten können, finden sich Regenerationsgleichgewichte etwa ab 400° C [9].

Voraussetzung für das Einsetzen der Regeneration ist eine Mindestbelastung, die den Gegendruck etwa auf das 2-4fache des abgereinigten Filters steigert. Je niedriger

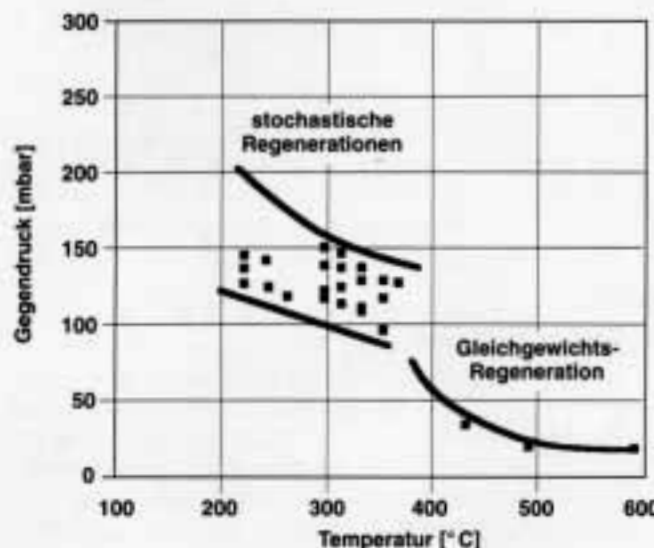


Bild 10: Regeneration durch Brennstoff-Additive (nach RHÔNE POULENC)

die Beladung, umso höher ist die Regenerationstemperatur. Die Metalloxide bleiben fast vollständig im Filter zurück, und, da sie ja nicht verbrennen können, führen sie zusammen mit den unbrennbaren Bestandteilen der Partikel selbst (Öl-Asche, Abrieb) allmählich zu einer irreversiblen Verstopfung der Poren. Der Filter muss dann ausgetauscht oder durch Waschen und Ausblasen gereinigt werden.

Katalytische Beschichtung: Eine sehr wirkungsvolle Absenkung der Russzündtemperatur gelingt durch eine hochdisperse Beschichtung des Filtermaterials mit katalytisch wirksamen Substanzen wie Vanadiumpentoxid. Bild 8 zeigt eine Absenkung der Russ-Abbrandtemperatur um nahezu 200° C. Der Effekt ist bei Faserstrukturen dank ihrer grossen Oberfläche besonders ausgeprägt. Auch andere Metalle und Metalloxide kommen in Frage, und die Methode ist natürlich nicht auf die Anwendung von Faserfiltern beschränkt.

Passive Regenerationsverfahren durch Brennstoff-Additivierung und katalytische Beschichtung des Filtermaterials reduzieren den Systemaufwand erheblich, sind aber in ihrer Anwendung begrenzt auf Fälle, in denen die Abgastemperatur häufig genug Werte von 400° C über längere Perioden erreicht - bei vielen Baumaschineneinsätzen ist diese Bedingung erfüllt.

Kurzzeitig kann eine solche Temperaturspitze auch durch einfache Eingriffe ausgelöst werden wie Drosselung des Motors, Erhöhung der Abgasrückführung oder Veränderung des Förderbeginns. Entsprechende Verfahren sind in Entwicklung, setzen aber eine elektronische Regelung voraus.

5. Auswahl von Partikelfiltersystemen für das VERT-Evaluationsprogramm

Über 30 Firmen*) bieten Russfiltersysteme für die Nachrüstung an. Es hätte den Rahmen dieser Untersuchung weit überschritten, alle diese Systeme parallel testen zu wollen. Tatsächlich aber unterscheiden sich diese Systeme in ihren Grundprinzipien zum Teil nur wenig, häufig werden die gleichen Filtermedien verwendet und mit unterschiedlichen Regenerationsverfahren kombiniert.

Um einen Überblick zu erhalten, genügt es, die wichtigsten Filtermedien zu untersuchen und an typisch unterschiedlichen Filtermedien die wichtigsten Regenerationsverfahren zu überprüfen. Es wurde daher die folgende Auswahl getroffen:

Filtermedien

- Keramische Zellenfilter (NGK und CORNING)
- Metall-Sinterfilter in Zellaufbau (SHW)
- Faser-Wickelfilter (3M)
- Faser-Strickfilter (BUCK)

Regenerationsverfahren:

- Dieselmotor (DSI)
- Elektrische Beheizung (HUSS, UNIKAT)
- Additive (PLUTO, RHONE POULENC, LUBRIZOL)
- Katalytische Beschichtung (BUCK)

Einige dieser Filter verfügen über eine zusätzliche Edelmetall-Beschichtung, die jedoch nicht dem Abbrand des gefilterten Russes dient, sondern der Nachoxidation gasförmiger Schadstoffe wie HC und CO, die zuweilen während der Regeneration vermehrt auftreten (Abdampfen von HC und unvollständige Verbrennung).

*) Liste kann bei der Projektleitung angefordert werden

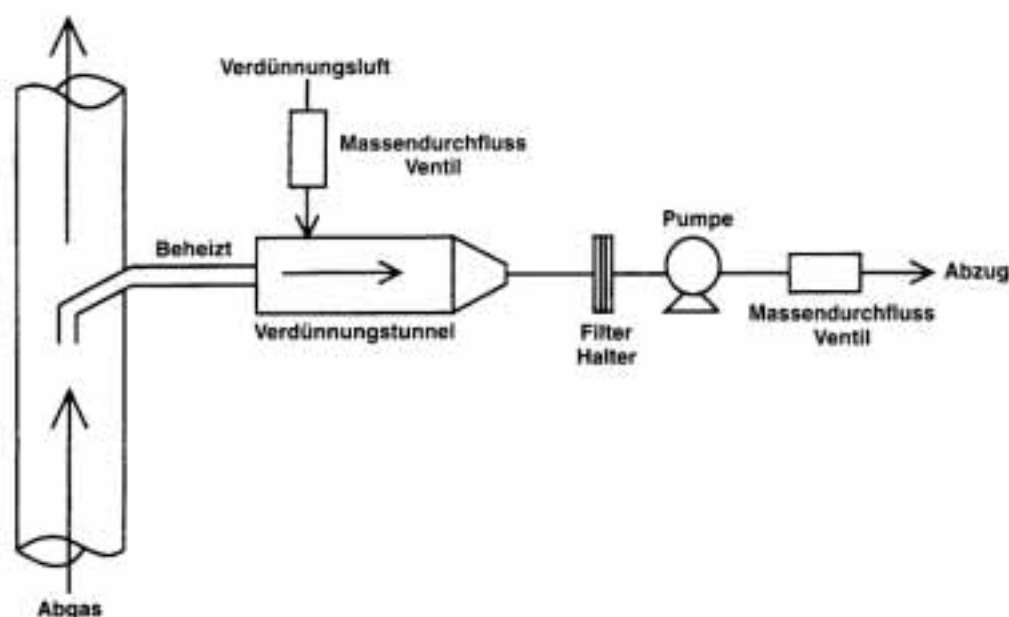


Bild 11: Teilstromverdünnungstunnel AVL

6. Testmethoden

Alle Versuche wurden auf den Motorprüfständen der Abgasprüfstelle der Ingenieurschule Biel/Schweiz durchgeführt [10], und zwar sowohl unter stationären als auch unter transienten Bedingungen. Als typische Transientfälle für Baumaschinen wurden die "freie Beschleunigung" von Tieflerlauf bis Abregeldrehzahl sowie die sogenannte „Wandlerbeschleunigung“ von Tieflerlauf bis zum Wandlerfestbremspunkt gewählt.

Es kamen die folgenden Messverfahren zum Einsatz:

Gravimetrie mit Verdünnungstunnel-Technik

Gemäss Bild 11 wurde entsprechend der Norm eine Abgasprobe isokinetisch entnommen und in einem Verdünnungstunnel mit Umgebungsluft auf weniger als 52° C abgekühlt. Das gekühlte und verdünnte Gas wurde einem Messfilter zugeführt, der vor und nach dem Versuch konditioniert gewogen wurde. Das Gesamtgewicht dieses Filtrates ist nach den international gültigen Normen im Fahrzeugbereich als „Partikelemission“ definiert.

Filtratanalysen

Eine zweistufige thermische Analyse nach dem Verfahren der Coulometrie erlaubte, auf den Gesamt-Kohlenstoffgehalt des Filtrates zurückzuschliessen und damit eine Aussage über die DME gemäss der MAK-Definition zu machen. Eine chemische Analyse des Filtrates nach dem Extraktionsverfahren ermöglichte zudem eine Bestimmung der Anteile angelagerter Kohlenwasserstoffe und Sulfate. Auf eine weiterführende analytische Untersuchung zur Frage der Herkunft der Partikel aus Treibstoff oder Schmieröl wurde verzichtet.

Analyse der Grössenverteilung der Partikel

In einigen wichtigen Betriebspunkten wurde die Grössenverteilung der Partikel im Bereich 10-200 nm untersucht. Zu diesem Zweck wurde ein sogenannter differentieller Mobilitätsanalysator der Firma TSI eingesetzt. In

diesem Gerät wurden die Partikel in zeitlicher Sequenz in etwa 30 Grössenklassen aufgeteilt und die Partikelzahl jeder Klasse in einem nachgeschalteten Kondensationskern-Zähler ermittelt. Grössenverteilungsspektren mit 30 Klassen können so innerhalb von etwa 20 Minuten vermessen werden.

Transientemissionen

Lediglich die Rauchentwicklung wurde unter transienten Bedingungen opazimetrisch erfasst. Dies erlaubte sowohl die Aufzeichnung des Verlaufs der Abgastrübung als auch die Integration des gesamten Rauchstosses. Eine physikalisch korrekte Korrelation dieser Messung zur gravimetrischen Bewertung ist allerdings nicht möglich.

Sowohl die stationären als auch die transienten Messungen wurden vergleichend durchgeführt, d.h. zunächst wurde der Motor nach all diesen Verfahren ohne Partikelfilter gemessen, jedoch bei dem Gegendruck, den die Filter erzeugen, anschliessend dann im gleichen Betriebspunkt mit dem nachgeschalteten Filter. Aus dem Vergleich mit/ohne Filter lassen sich die folgenden Bewertungskriterien ableiten:

$$\text{Abscheidegrad: } \frac{\text{PM ohne Filter} - \text{PM mit Filter}}{\text{PM ohne Filter}}$$

$$\text{Penetration: } \frac{\text{PZ mit Filter}}{\text{PZ ohne Filter}}$$

$$\text{Umsatzgrad: } \frac{\text{SK ohne Filter} - \text{SK mit Filter}}{\text{SK ohne Filter}}$$

wobei: PM = Partikelmasse
PZ = Partikelzahl
SK = Schadstoffkonzentration

7. Ergebnisse

In der folgenden Tabelle werden auszugsweise Ergebnisse eines typischen Betriebspunktes, nämlich bei Vollast und maximalem Drehmoment, wiedergegeben.

Filtermedium		keram. Zellen- Filter	Faser- Strick- Filter	Faser- Wickel- Filter	Metall- Sinter- Filter
Abscheidegrad grav.	%	92.4	88.8	87.5	95.3
Abscheidegrad DME	%	99.0	90.8	93.4	99.0
Penetration gesamt in	%	7.7	9.8	9.5	14.4
Umsatzgrad SOF	%	66	55.4	72	79
Druckverlust	mbar	12	61	41	56
Bauvolumen	l/kW	1.25	0.3	0.67	0.26

Wegen kurzfristiger Verfügbarkeit für die Versuchsdurchführung waren die Filter nicht optimiert, unterschiedlich gross und haben daher auch sehr unterschiedliche Druckverluste erzeugt. Im Fall des keramischen Zellenfilters war der Unterschied auch dadurch begründet, dass dieses Filtersystem für die periodische Regeneration mittels elektrischer Heizleistung, somit für Speicherung über mindestens eine Arbeitsschicht, ausgelegt ist.

Bezüglich der Abscheidegrade zeigte sich eine weitgehende Einheitlichkeit: gravimetrisch wurden überall nahezu 90% erreicht, bezüglich der DME wurden 90% überschritten, einige Filter erreichten sogar 99%, und auch bezüglich der zahlenmässigen Penetration, die die Abscheidung der Feinpartikel berücksichtigt, erreichte die Mehrzahl der Filter gute Werte. Wie zu erwarten, erzielten alle Filter auch eine deutliche Verminderung der angelagerten Kohlenwasserstoffe SOF.

Die gasförmigen Kohlenwasserstoffe und CO wurden nur beim keramischen Zellenfilter vermindert, der mit einer zusätzlichen katalytisch wirksamen Edelmetall-Beschichtung ausgerüstet war. Diese Massnahme liesse sich auf die anderen Filter übertragen.

Die Stickoxide änderten sich nur unwesentlich, sie wurden in der Regel durch den etwas erhöhten Gegendruck geringfügig vermindert.

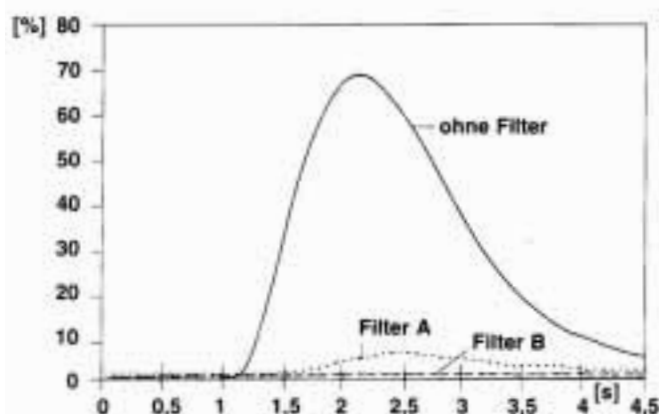


Bild 12: Opazität nach Filter im Vergleich zur Opazität ohne Filter bei der freien Beschleunigung

Auch die transienten Messungen während der freien Beschleunigung und der Wandlerbeschleunigung zeigen nach Bild 12 die hohe Qualität der Filter bezüglich der Partikelabscheidung. Diesem Ergebnis kommt eine besondere Bedeutung zu, da sich die Methode der Rauchstossmessung während Beschleunigungsphasen - in Anlehnung an die Schweizerische Verordnung zur Wartung von Dieselfahrzeugen [12] - besonders gut zur Überprüfung der Filterqualität im Feld eignet.

Damit konnte unter Beweis gestellt werden, dass gute Filter auch während rascher Last- und Drehzahlwechsel die Partikel ebenso effizient zurückhalten wie im stationären Betriebspunkt.

Das Verfahren der Gravimetrie gewichtet grosse Partikel stärker. Mit der Opazimetrie werden nur Partikel erfasst, die sichtbares Licht streuen. Um Aussagen zur Filtercharakteristik im Bereich der Feinpartikel kleiner als 300 nm zu gewinnen, musste daher die differenzielle Mobilitätsanalyse eingesetzt werden, die zuverlässige Aussagen bis in den Bereich von ca. 20 nm macht. Das Ergebnis ist, wiederum für den Betriebspunkt des maximalen Drehmomentes, im nachstehenden Bild 13 in Form der Penetration wiedergegeben: Die Abscheidecharakteristiken sind recht unterschiedlich: Nur ein Filter zeigte eine durchgehend flache Charakteristik, d.h. es wurden sehr feine Partikel mit gleicher Effizienz wie grössere zurückgehalten.

Die meisten wiesen eine tendenzielle Verschlechterung des Abscheidegrades bei Partikeln unter 30 - 40 nm auf, in zwei Fällen sogar beginnend bei ca. 70 nm. Die toxische Relevanz dieser Aussage ist noch umstritten. Es scheint uns jedoch aufgrund dieser Erkenntnis wichtig, Filtermedien zu favorisieren, die auch die Feinstpartikel, denen das grössere toxische Potential zugemessen wird, zuverlässig zurückhalten.

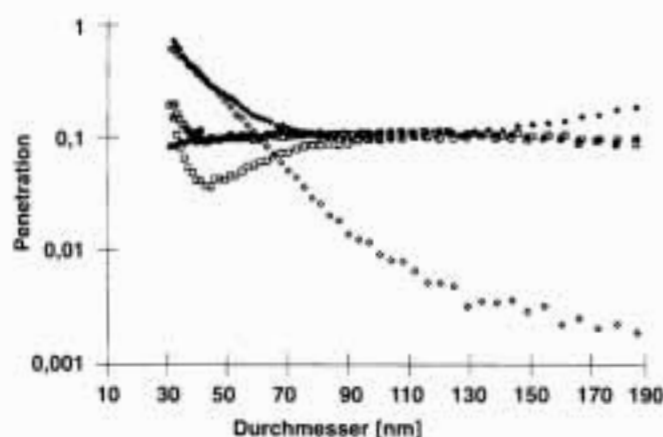


Bild 13: Partikelpenetration in Abhängigkeit des Bewegungsdurchmessers der Teilchen für 5 verschiedene Partikelfilter

Die Untersuchung der Regenerationsverfahren ist noch nicht abgeschlossen. Über sie wird in einem weiteren Bulletin berichtet

8. Erfahrungen mit Partikelfiltern im Feldeinsatz

Im Rahmen des Evaluationsprogrammes VERT werden Feldeinsätze ab Mitte 1995 durchgeführt.

Umfangreiche Erfahrungen liegen aus dem Partikelfilter-Grossversuch der Bundesrepublik Deutschland vor, der während 2 Jahren unter Teilnahme zahlreicher Filter- und Fahrzeughersteller durchgeführt wurde. Die Applikationen lagen meist im LKW- und Busbereich. Im Zwischenbericht und Schlussbericht [11] werden die Resultate positiv bewertet.

Bei einigen Filtertypen war zwar gemäss Bild 14 eine leichte systematische Verschlechterung im Verlauf der 2-jährigen Betriebszeit zu erkennen, insgesamt aber war die Wirksamkeit der Filtersysteme gut, und die Zuverlässigkeit - gemessen am Prototyp-Charakter dieser Einrichtungen - befriedigend.

Die meisten Hersteller haben die Erfahrungen dieses Versuchs benutzt, um ihre Filtersysteme weiter zu entwickeln, so dass heute erheblich verbesserte Systeme verfügbar sind, auf die wir uns für die Nachrüstung von Baumaschinen im Tunnelbau stützen können.

SZ Bosch

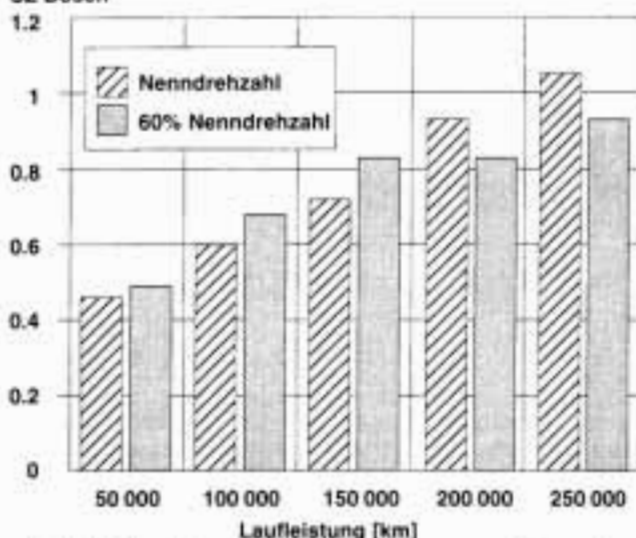


Bild 14: Mittlere Schwärzungszahl aller Fahrzeuge mit Keramik-Wickelfiltern im Verlauf der Versuchszeit des UBA-Grossversuchs

9. Technischer Stand der Partikelfilter

Gestützt auf die im Rahmen des Projektes an zwei Motoren durchgeführten Versuche und die Erfahrungen der beteiligten Filterhersteller kann der heute erreichbare technische Stand von Partikelfiltern wie folgt charakterisiert werden:

- Abscheidegrad gravimetrisch >85%
- Abscheidegrad Gesamt-Kohlenstoff > 90%
- Emission Gesamt-Kohlenstoff < 0.05 g/kWh
- Druckverlust des unbeladenen Filters < 50 mbar
- Druckverlust bei Maximalbelastung < 150 mbar
- Einbauvolumen < 0.6 l/kWh
- Geräuschdämpfung > 25 dB(A)
- Preis und Installationskosten
unter 100 kW: < 125 CHF/kWh
über 100 kW: < 100 CHF/kWh
- Wartungskosten pro Jahr < 15% der Filterkosten

- Lebensdauer > 6000 Betriebsstunden
- Gebrauchsdauer > 2000 Betriebsstunden (Reinigen des Filterelementes)
- Wartungsintervall > 500 Betriebsstunden

Damit sind die für den Einsatz im Tunnelbau wichtigsten Anforderungen abgedeckt, die aus Sicht des VERT-Projektes unverzichtbar sind. Diese Liste kann als ein grobes Pflichtenheft für die Auswahl und gegebenenfalls Anpassung von Filtersystemen zur Anwendung bei Baumaschinen im Tunnelbau dienen.

...

Literatur

1. Krebsrisiko von Diesel- und Benzinmotorabgasen, Schriftenreihe BUWAL/Schweiz Nr. 222
2. VERT-Bulletin 1, Juni 1995
3. TRGS 554: Dieselmotoremissionen (DME)
4. Charakterisierung der partikelförmigen Emissionen von Dieselmotoren, K.H. Zierock, Staub-Reinhaltung der Luft 43(1983)
5. Dieselmotorabgas - Entstehung und Messung, H. Klingenberg, VDI-Berichte Nr. 888, 1991
6. Möglichkeiten der Schadstoff-Minimierung bei Dieselmotoren, K. Obländer, VDI-Berichte Nr. 888, 1991
7. Gestrickte Strukturen aus Endlosfasern für die Abgasreinigung, A. Mayer et al., MTZ 56(1995) 2
8. Diesel Exhaust Aftertreatment 1995, SP-1073, SAE Detroit 1995
9. Verminderung der Abgasemission von Dieselmotoren durch Partikelfilter und Abgaskatalysatoren, G. Lepperhoff, MTZ 55 (1994) 12
10. Particle Size Distribution Downstream Traps of Different Design, SAE 950373, H. Egli et al.
11. Konzept und Ergebnisse des Partikelfilter-Grossversuchs der Bundesrepublik Deutschland, UBA Berlin und TÜV Rheinland, 12/1994
12. Verordnung über Wartung und Nachkontrolle von Motorwagen betreffend Abgas- und Rauchemissionen vom 22.9.1993

Abkürzungen:

DME	Dieselmotor-Emissionen
SUVA	Schweizerische Unfallversicherungsanstalt
AUVA	Allg. Unfallversicherungsanstalt/Österreich
TBG	Tiefbau-Berufsgenossenschaft/Deutschland
BUWAL	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft
MAK	Maximale Arbeitsplatz-Konzentration
RAF	Russ-Abbrand-Filter
TRK	Technische Richtkonzentration
TRGS	Technische Regeln für Gefahrstoffe
SOF	Lösliche organische Fraktion
UBA	Umwelt-Bundesamt Deutschland

Projektleitung:

Ing.Büro TTM, A. Mayer, Fohrhölzlistr. 14b,
CH-5443 Niederrohrdorf
Tel. 0041(56) 951414, Fax 0041(56)951415

Projektausschuss der Auftraggeber:

AUVA: E. Bigga 0043(3842)24317
TBG: Prof. D. Kieser 0049(761)73135
SUVA: W. Scheidegger 0041(41)419 50 60

Bulletin-Bestellungen:

AUVA: Allgemeine Unfallversicherungsanstalt
Abteilung für Unfallverhütung und
Berufskrankheitenbekämpfung
Adalbert-Stifterstr. 65, A-1200 Wien (Frau Radosztics)
Tel. 0222-33111-418 Fax: 0222-33111-347
Bestell-Nr. AUVA-Report 4/2
TBG: Tiefbau-Bauberufsgenossenschaft Am Knie 6,
D-81241 München, Tel. (089)8897 505, Fax. (089)8897494
SUVA: Schweizerische Unfallversicherungsanstalt
Kundendienst, Postfach 6002 Luzern
Tel. (041) 419 58 51, Fax: (041) 419 59 17