

# Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft

## Air Quality Control

Herausgeber: BGIA – Institut für Arbeitsschutz und Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN – Normenausschuss KRdL

## Entwicklung eines Filters für Laserdrucker, Fax- und Kopiergeräte als wirkungsvoller Schutz vor Fein- und Tonerstaub in Innenräumen

T. Caesar, T. Schmitt

**Zusammenfassung** Die Diskussion über Emissionen aus tonerbasierten Büromaschinen wie Laserdruckern, Fax- und Kopiergeräten sorgt derzeit bei Anwendern für berechtigte Verunsicherung. So konnten beispielsweise bei Messungen hohe Feinstaubemissionen aus Laserdruckern während des Druckvorgangs nachgewiesen werden. Geeignete Filterlösungen, die aktuell für tonerbasierte Ausgabegeräte mit gerichtetem Abluftstrom entwickelt wurden (dies sind die meisten der derzeit verfügbaren Gerätetypen), können diese Emissionen wirkungsvoll reduzieren. Wichtige Kriterien neben einer hohen Abscheideleistung sind die Betriebssicherheit der Geräte sowie das Druckbild, das durch den Filter nicht beeinträchtigt werden darf. Weiterhin soll der Nachweis geführt werden, dass die Emissionen aus den Druckern tatsächlich auf Toner zurückzuführen sind.

### Development of a filter for laser printers, fax and copy machines as an effective protection against fine dust and toner dust indoors

**Abstract** The discussion about emissions from office equipment based on toner such as laser printers, fax and copy machines currently provide users with legitimate insecurities. For example, in measurements high fine dust emissions from laser printers during the printing process could be demonstrated. Appropriate filter solutions which have been currently developed for output devices based on toner with directional exhaust flow (this includes most of the currently available types of devices), can effectively reduce these emissions. Important criteria in addition to a high separation were here that the operational safety of the devices as well as the print image would not be affected through the filter. Furthermore, it should be demonstrated that emissions from the printers are really attributable to toner.

### 1 Einleitung

Deutschlandweit werden täglich mehrere Millionen Papierseiten ausgedruckt. Sinkende Anschaffungskosten bei La-

serdruckern und günstige Seitenpreise führen dazu, dass sich der Anteil der als Arbeitsplatzdrucker genutzten Laserdrucker kontinuierlich erhöht. Die aktuelle oftmals kontrovers geführte Diskussion um mögliche Gesundheitsschäden durch die Emission von Feinstaub aus Laserdruckern und Kopiergeräten sorgt jedoch derzeit bei vielen Anwendern für berechtigte Verunsicherung, zumal noch nicht einwandfrei bewiesen ist, welche Auswirkungen Fein- und Tonerstaub auf den menschlichen Organismus haben. Zumindest steht Tonerpulver in Verdacht, zelltoxisch zu wirken und kann somit möglicherweise zum Zelltod führen [1].

Der TÜV Nord/DMT stellte im Auftrag der Freudenberg Filtration Technologies bei Prüfkammertests erhebliche Feinstaubemissionen bei tonerbasierten Geräten fest, die die Raumluft in Büro- und Innenräumen belasten. Für diese Tests wurde eine repräsentative Auswahl an Laserdruckern verschiedener Hersteller ausgewählt, an denen ein Filter aufgrund des gerichteten Abluft-Volumenstroms wirkungsvoll installiert werden kann.

Im Nachgang wurden Partikelmessungen mit und ohne einem für diese Anwendung entwickelten Feinstaubfilter an den Geräten durchgeführt, um die Abscheideleistung des Filters zu ermitteln.

Um sicherzustellen, dass die Betriebssicherheit und das Druckbild der Geräte durch das Aufbringen der Filter am Drucker nicht beeinträchtigt werden, wurde an den verschiedenen Druckertypen die Temperaturerhöhung im Gerät unter extremen Belastungen ermittelt.

Um schließlich einen Zusammenhang zwischen den emittierten Partikeln und dem vermeintlichen Verursacher herzustellen, wurden in verschiedenen Verfahren die Inhaltsstoffe einer Tonerkartusche mit den Substanzen in einem nach dem Druckvorgang beladenen Filter verglichen.

### 2 Prüfungen und Testaufbauten

#### 2.1 Prüfungen der Druckdifferenz und der Abscheideleistung der Filter

Zur Überprüfung der Druckdifferenz sowie der Abscheideleistung wurden zwei Filter in verschiedenen Abmessungen

Dr. Thomas Caesar, Thorsten Schmitt,  
Freudenberg Filtration Technologies, Weinheim.

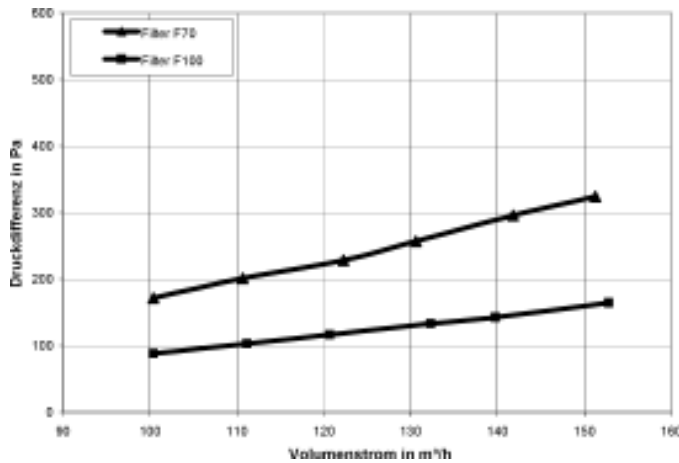


Bild 1. Druckdifferenz in Abhängigkeit vom Volumenstrom. Prüfstand in Anlehnung an DIN 71460-1 bei einem Volumenstrom von 100 bis 150 m³/h.

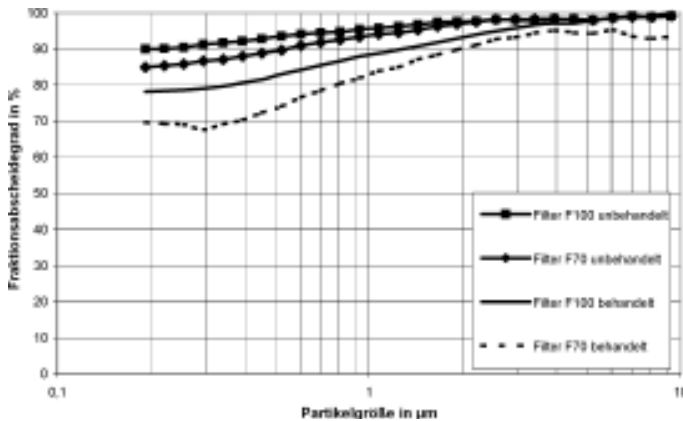


Bild 2. Fraktionsabscheidegrad Filter F70 und Filter F100 gegenüber AC fein, Partikelgröße im Bereich von 0,2 bis 9 µm im unbehandelten Zustand der Filter und nach Behandlung mit Isopropanol.

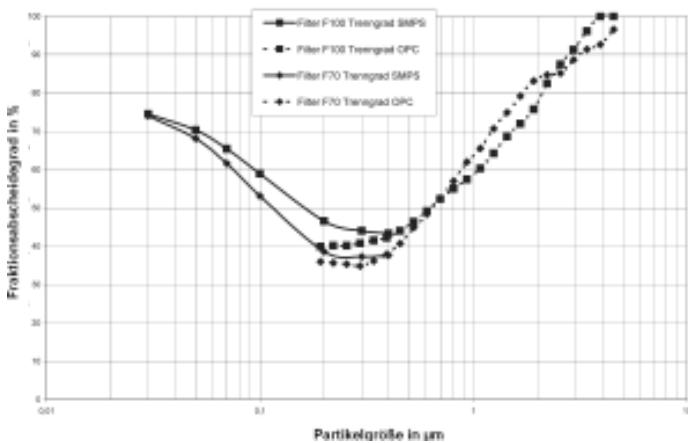


Bild 3. Fraktionsabscheidegrade am Prüfstand, Filter gegenüber NaCl (1%ige Lösung, nicht neutralisiert), Partikelgröße im Bereich von 0,03 bis 9 µm.

bewertet. Die Abmessungen der Filter ergeben sich durch die Geometrie der Abluftschlitze gängiger Druckermodelle. Bei den Filtern handelt es sich um plissierte Elemente, deren Filtermedium sich durch einen dreilagig progressiven Aufbau aus synthetisch organischen Fasern auszeichnet. Zwischen einem Vorfiltermedium und einem Träger-Vliesstoff

befinden sich elektrostatisch geladene Mikrofasern zur Abscheidung feinsten Partikeln. Im Einzelnen handelt es sich um Filter in folgenden Ausführungen:

- Filter F70: Abmessungen: (140 x 70 x 35) mm; Anströmfläche: (130 x 65) mm,
- Filter F100 : Abmessungen: (140 x 100 x 35) mm; Anströmfläche: (130 x 95) mm

Die Filter wurden auf einem Prüfstand in Anlehnung an DIN 71460-1 [2] einzeln getestet. Dabei wird der Filter mit einem vorgegebenen Luftvolumenstrom beaufschlagt, dem Prüfaerosole in definierter Konzentration zugegeben werden können.

Bei dem Verfahren nach DIN 71460-1 handelt es sich um ein Standardprüfverfahren für Luftfilter, die in Kfz-Innenräumen eingesetzt werden. Damit erlaubt das Verfahren einen guten Vergleich der Laserdruckerfilter mit verschiedenen Filterelementen für den Kfz-Innenraumbereich in ähnlicher Bauweise als Referenz hinsichtlich Druckdifferenz und Fraktionsabscheidegrad.

Im Prüfstand können vor und hinter dem Filter der statische Druck, die daraus resultierende Druckdifferenz des Filterelements sowie die Partikelkonzentration vor und hinter dem Filter und dessen sich daraus ergebender Abscheidegrad gemessen werden.

Der Luftvolumenstrom kann im Prüfstand in gewissen Grenzen variiert werden, wobei die untere Grenze, bei der noch Messwerte mit ausreichender Genauigkeit erfasst werden können, bei 100 m³/h liegt.

Damit liegt der Volumenstrom am Prüfstand deutlich höher als bei den tonerbasierten Druckern, wo die Filter üblicherweise mit Volumenströmen im Bereich von 10 bis 20 m³/h beaufschlagt werden. Daher ergeben sich nach diesem Prüfverfahren deutlich höhere Druckverluste bzw. deutlich niedrigere Abscheidegrade als es im Einsatz am Drucker der Fall ist. In Bild 1 ist der Verlauf der Druckdifferenz in Abhängigkeit vom Volumenstrom für die beiden o. g. Filtertypen dargestellt.

### 2.1.1 Bestimmung des Fraktionsabscheidegrads

Zur Bestimmung der Fraktionsabscheidegrade beider Filtertypen wurden diese auf einem Prüfstand in Anlehnung an DIN 71460-1 mit dem Prüfstaub AC fein (ISO 12103-1 [3], A2 fein, nicht neutralisiert) bzw. NaCl (Feststoff-Aerosol, erzeugt durch Verdüsen einer wässrigen Lösung, nicht neutralisiert) als Prüfaerosol beaufschlagt, die an- und abströmseitigen Partikelanzahlkonzentrationen gemessen und daraus der Abscheidegrad berechnet. Die Filterelemente wurden dazu sowohl im unbehandelten (entspricht Anlieferungszustand) sowie im behandelten Zustand (Behandlung des Filterelements nach EN 779, Anhang A mit Isopropanol) bei einem Volumenstrom von 120 m³/h gemessen. Die Norm EN 779, Anhang A beschreibt ein Verfahren, das zur Bewertung des Einflusses elektrostatischer Ladungen des Filtermediums auf den Abscheidegrad dienen soll. Dazu wird der Filter für 5 min in Isopropanol getaucht, an Raumluft getrocknet und erneut der Abscheidegrad gemessen. Dieses Verfahren hat keine Relevanz für die Praxis und bewertet streng genommen nur den Einfluss der Behandlung mit Isopropanol auf den Abscheidegrad. Durch die Festschreibung dieses Verfahrens in EN 779 findet es jedoch mittlerweile häufig Anwendung und daher werden auch hier die nach diesem Verfahren bestimmten Abscheidegrade der Vollständigkeit halber angegeben.

Für die Bestimmung des Abscheidegrads mit AC fein als Prüfaerosol wurden die an- und abströmseitigen Partikelzahlen mit einem optischen Partikelzähler (OPC = optical particle counter) gemessen. In **Bild 2** sind die Fraktionsabscheidegrade als Funktion der Partikelgröße dargestellt. Der Fraktionsabscheidegrad der Filter F70 und F100 gegenüber NaCl wurde im Partikelgrößenbereich von 0,2 bis 9 µm mithilfe eines Optischen Partikelzählers und im Bereich von 30 nm bis 0,4 µm mit einem SMPS(Scanning Mobility Particle Sizer)-Messgerät ermittelt. Die Ergebnisse sind in **Bild 3** dargestellt. Die im Abscheidegradminimum mit beiden Messverfahren bestimmten Abscheidegrade zeigen eine gute Übereinstimmung. Die Partikelgröße und der Abscheidegrad im Abscheidegradminimum hängen vom eingesetzten Filtermedium, dem Ladungszustand des Prüfaerosols und von der Luftgeschwindigkeit ab. Im dargestellten Fall liegt das Abscheidegradminimum bei 0,3 µm für den Filter F70 und bei 0,4 µm für den Filter F100. Durch eine Erhöhung des Luftvolumenstroms wird die Partikelgröße im Abscheidegradminimum (MPPS = Most Penetrating Particle Size) zu kleineren Werten hin verschoben. Es ist daher damit zu rechnen, dass in der realen Anwendung der Filter an Laserdruckern mit deutlich kleineren Volumenströmen im Vergleich zur Prüfung in Anlehnung an DIN 71460-1 das Abscheidegradminimum in der Praxis bei größeren Partikeldurchmessern liegt.

Die insgesamt höheren Abscheidegrade, die mit AC fein als Prüfaerosol gemessen werden, sind auf die stärkere elektrostatische Ladung des Prüfaerosols im Vergleich zu NaCl zurückzuführen. AC fein wird mit einem Bürstendosierer dosiert, der durch die mechanische Reibung elektrostatische Ladungen erzeugt, während das NaCl-Aerosol aus einem verdünnten Tröpfchenaerosol durch Verdunsten der Flüssigkeit entsteht und damit vergleichsweise wenig geladen ist. Die stärker elektrostatisch geladenen Partikeln haben eine höhere Attraktion zu den Filterfasern und werden damit besser abgeschieden.

Zur Bewertung der Filterleistung unter praktischen Einsatzbedingungen wurde beim TÜV Nord/DMT in Essen ein Filter am Abluftschlitz eines Laserdruckers installiert und in

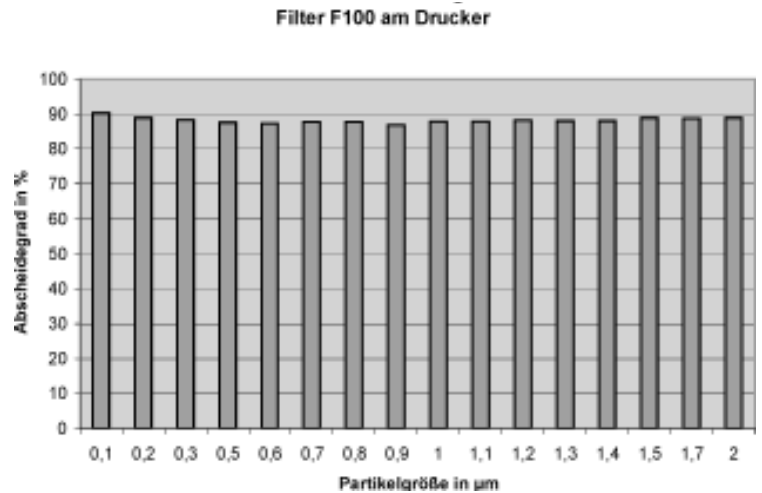


Bild 4. Fraktionsabscheidegrad im Partikelgrößenbereich von 0,1 bis 2 µm unter realen Druckbedingungen.

einer Prüfkammer betrieben. Anschließend wurden die Partikelanzahlkonzentrationen für den Größenbereich 0,1 bis 2 µm anströmseitig vor dem Lüfter im Druckergehäuse sowie abströmseitig hinter dem Filter während des Druckvorgangs ermittelt.

In **Bild 4** ist der Fraktionsabscheidegrad (ermittelt aus den Gesamtmittelwerten der Rohgas- zu Reingasparkelanzahlen) dargestellt. Wie zu erwarten, werden bei dem deutlich kleineren Luftvolumenstrom unter praktischen Einsatzbedingungen im Vergleich zur Prüfung in Anlehnung an DIN 71460 am Prüfstand deutlich höhere Abscheidegrade gemessen. Unter realen Einsatzbedingungen scheiden die Filter im Größenbereich von 0,1 bis 2 µm rund 88 % der Partikeln ab, wobei hier die Filtermediumgeschwindigkeit < 2 m/min beträgt.

## 2.2 Prüfungen der Betriebssicherheit

Die neu entwickelten Filter zeichnen sich durch eine äußerst niedrige Druckdifferenz aus. Trotzdem kann der

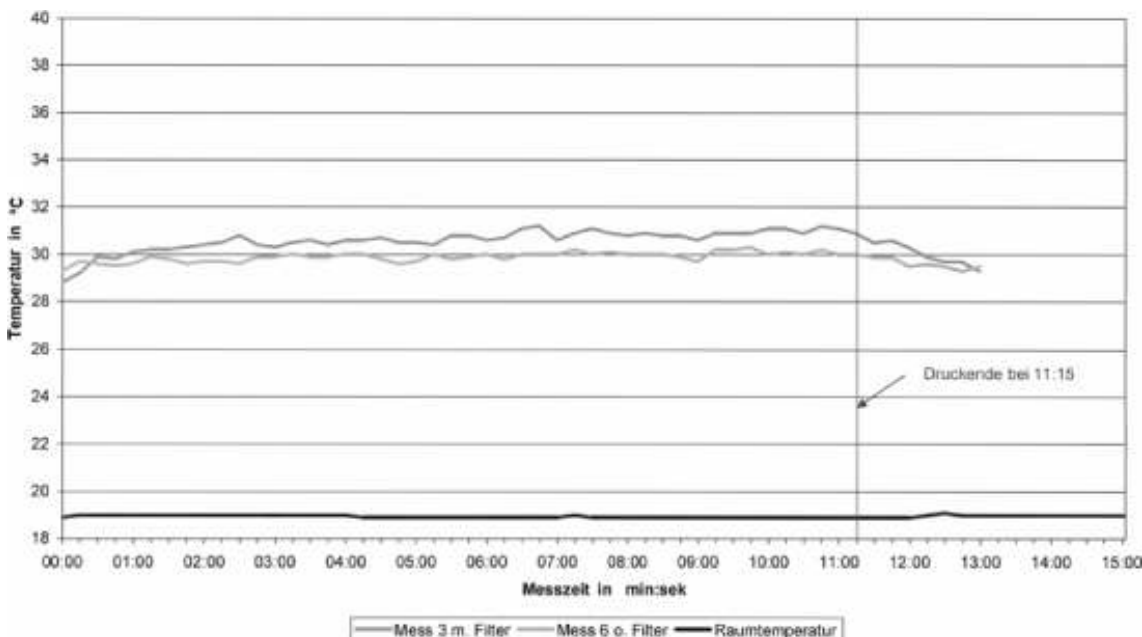


Bild 5. Temperaturerhöhung am Drucker mit und ohne Filter, Druckdauer 11 min und 15 s, Druckauftrag 220 Blatt.

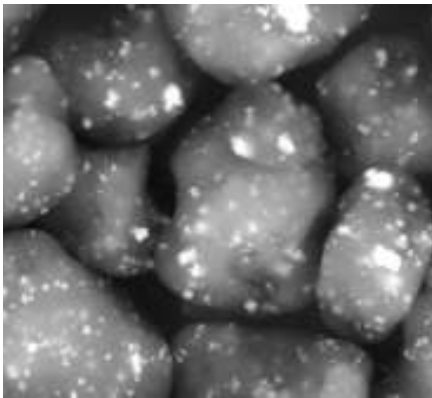


Bild 6. Tonerpartikeln, aus Tonerkartusche entnommen, 3 000-fache Vergrößerung.

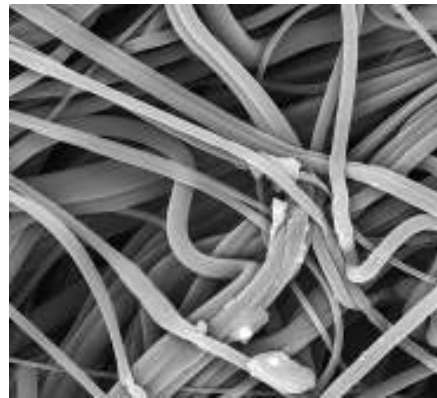


Bild 7. Unbeladenes Filtervlies. 500-fache Vergrößerung.

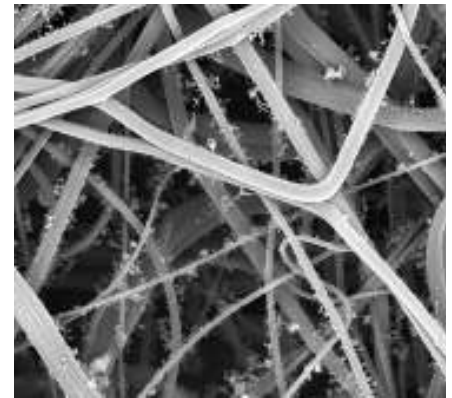


Bild 8. Beladenes Filtervlies, 500-fache Vergrößerung.

Luftvolumenstrom, der durch den Lüfter eines Laserdruckers gefördert wird, durch den installierten Filter als Strömungswiderstand reduziert werden. Um sicherzustellen, dass dadurch die Betriebssicherheit von Laserdruckern mit Partikelfiltern nicht beeinträchtigt wird, wurde die Beharrungstemperatur am Lüftungsauslass unter extremer Belastung gemessen. Hierzu wurden verschiedene Druckermodelle bei einer Hintergrundtemperatur von etwa 19 °C bei einem quasikontinuierlichem Druckvorgang so lange belastet, bis der Temperaturfühler im Lüfterauslassbereich des Druckers im Rahmen der Bestimmungsgenauigkeit einen konstanten Maximalwert zeigte. Je nach Kapazität der

Papierbehälter wurden zwischen 2 000 bis 3 000 Blatt Papier in diversen Druckintervallen ohne Pause (außer der notwendigen Nachfüllzeit) bedruckt. Parallel dazu wurde die Kammerhintergrundtemperatur kontinuierlich dokumentiert.

Alle Drucker produzierten durchgängig ein sehr gutes Druckbild und liefen dabei störungsfrei während des gesamten Prüfzyklus durch. Die Temperaturerhöhungen am Drucker selbst waren nur gering. In Bild 5 ist exemplarisch der Temperaturverlauf als Funktion der Zeit am Luftauslass eines Druckers während eines Druckjobs von 220 Seiten und einer Druckdauer von 11 min und 15 s mit und ohne Filter dargestellt.

### 2.3 Prüfung der emittierten Inhaltstoffe

Um Rückschlüsse über Inhaltsstoffe der emittierten Partikeln zu ziehen,

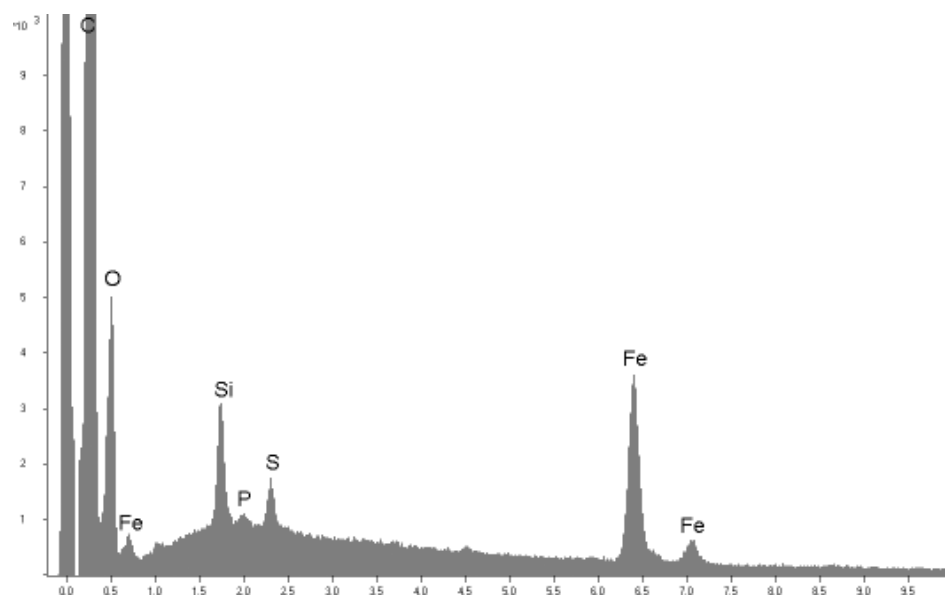


Bild 9. EDX-Analyse der Tonerpartikeln; Vergrößerung 1 000 : 1 bei 30 kV.

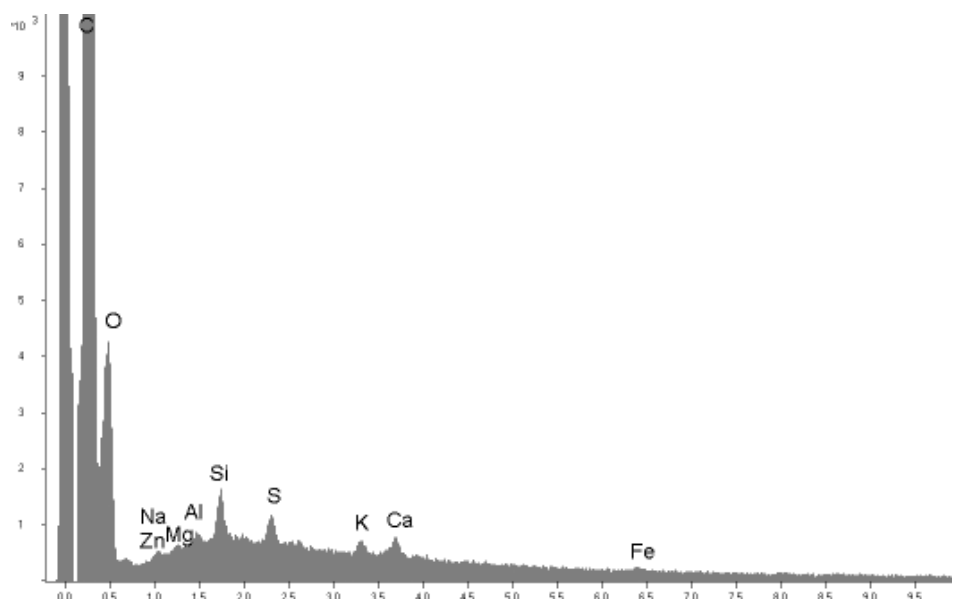


Bild 10. EDX-Analyse des beladenen Filters; Vergrößerung 1 000 : 1 bei 30 kV.

Ergebnisse der ICP-Messungen der unbeladenen und beladenen Filter sowie des Tonerpulvers.

Element	Unbeladener Filter	Beladener Filter	Toner
Al in ppm	20	17	35
Fe in ppm	2	23	24000
Pb in ppm	< 1	< 1	10
Sn in ppm	< 1	< 1	350
Zn in ppm	2	6	540
Cu in ppm	< 1	1	3
Cd in ppm	< 1	< 1	2
Cr in ppm	< 1	< 1	6
Ni in ppm	< 1	< 1	33*)
Sb in ppm	< 1	117	2

\*) Linieninterferenz bei Ni nicht auszuschließen.

wurden die chemische Zusammensetzung eines neuen unbeladenen Filters als Referenz, eines beladenen Filters sowie eines Toners analysiert. Der Toner wurde dazu einer Tonerkartusche des Druckers entnommen, an dem der Filter eingesetzt war.

Bei den Untersuchungen kamen fünf verschiedene Analysenverfahren zum Einsatz:

- Rasterelektronenmikroskopie (REM),
- Energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX),
- Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskopie (FTIR),
- Thermodesorption-GC/MS,
- Atomspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP).

### 2.3.1 Rasterelektronenmikroskopie

In der REM-Analyse wurden Aufnahmen des Tonerpulvers sowie der drei Lagen des Filtermediums des unbeladenen und beladenen Filters erstellt. In den **Bildern 6 bis 8** sind exemplarisch die REM-Aufnahmen des Tonerpulvers und einer Lage des Filtermediums dargestellt.

Die REM-Aufnahmen zeigen, dass nach dem Gebrauch des Filters an einem Laserdrucker feine submikrone Partikeln an den Filterfasern angelagert sind. Zwar zeigen die Aufnahmen des Tonerstaubs im Wesentlichen größere Partikeln im Bereich von ca. 10 µm, jedoch sind auch dort feine submikrone Partikeln erkennbar, die an den größeren Tonerstaubpartikeln anhaften und sich im REM optisch ähnlich darstellen, wie die Partikeln, die an den Fasern des gebrauchten Filters sichtbar sind.

### 2.3.2 Energiedispersive Röntgenspektroskopie

Neben diesen REM-Aufnahmen wurden auch EDX-Analysen zur Elementarzusammensetzung der mikroskopierten Proben durchgeführt. Die Tonerpartikeln zeigen eine Größe von ca. 7 µm x 10 µm. Im Tonerpulver selbst werden Fe, Si, S und O detektiert (**Bild 9**).

Der beladene Filter zeigt feine Partikelablagerungen im Bereich < 1µm. Hier werden in der EDX-Analyse Si, S, K, Ca und O detektiert (**Bild 10**).

### 2.3.3 Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskopie

Die acetonlöslichen Anteile des Toners bestehen hauptsächlich aus Epoxydharz und Polyester auf der Basis von Terephthalsäure (evtl. auch noch mit Isophthalsäure). Das IR-Spektrum der acetonlöslichen Anteile des unbeladenen Filters zeigt hauptsächlich Polypropylen und Stabilisatoren. In den acetonlöslichen Anteilen des beladenen Filters sind neben Polypropylen und Stabilisatoren zusätzlich Silikon,

Paraffin und Polyester auf der Basis von Terephthalsäure nachweisbar. Es konnte nicht ausgeschlossen werden, dass noch geringe Mengen an Epoxydharz enthalten sind.

### 2.3.4 Thermodesorption – GC/MS bei 220 °C des Tonerpulvers

Die Aussage, ob es sich beim Polyester des beladenen Filters um den gleichen wie im Toner handelt, konnte IR-spektroskopisch nicht getroffen werden. Deshalb wurden zur detaillierten Bestimmung des in der FTIR-Untersuchung gefundenen Polyesters mittels GC/MS-Untersuchungen die acetonlöslichen Anteile im Toner des beladenen Filters untersucht. Die Untersuchung des acetonlöslichen Anteils im Toner und des beladenen Filters ergaben bei Polyester eine sehr gute Übereinstimmung. Es handelt sich dabei um ein Polymer auf der Basis von Terephthalsäureester. Dieses Ergebnis konnte durch die Pyrolyse-GC/MS der Extrakte bestätigt werden. Für den im Filter gefundenen Anteil gilt, dass eine andere Quelle als das Tonerpulver nahezu ausgeschlossen ist. Zusammen mit den Ergebnissen der EDX-Analyse verdichten sich damit die Hinweise auf signifikante Tonerstaubmengen im Filter.

### 2.3.5 Mikrowellenaufschluss des Toners und der Filter und Untersuchung auf Schwermetalle mit ICP

Die Ergebnisse der Schwermetalluntersuchung mittels ICP (Atomspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma) sind in der **Tabelle** dokumentiert. Mit hoher Wahrscheinlichkeit geht der Ursprung von Ablagerungen, die in signifikanten Mengen auf dem gebrauchten Filter gefundenen wurden, auf das Tonerpulver zurück. In den ICP-Messungen wurde eine Antimon(Sb)-Konzentration von 117 ppm im beladenen Filter festgestellt. Antimon wird häufig als Flammschutzmittel bei Kunststoffteilen (z. B. Druckergehäuse) eingesetzt und steht im Verdacht haut- und schleimhautreizend zu sein .

## 3 Schlussfolgerungen

Der speziell entwickelte Feinstaubfilter reduziert die Partikelemission nachweislich signifikant, auch im besonders kritischen Bereich lungengängiger Partikeln < 5 µm. Selbst Partikeln zwischen 100 nm und 2,0 µm werden, je nach Druckermodell, zu mindestens 85 % und bis zu 94 % abgeschieden. Die Filterdurchströmungsgeschwindigkeit liegt bei den getesteten Laserdruckern bei maximal 2 m/min.

Die Betriebssicherheit der Drucker wurde durch die Filtermodule nicht beeinträchtigt: Weder die Funktion der Geräte noch das Druckbild der Dokumente wurde durch den ge-

ringförmig erhöhten Druckverlust eines Druckers mit Filter gegenüber einem ohne Filter negativ beeinflusst. Die Erhöhung der Druckdifferenz durch Beladung des Filters liegt in einem Bereich, der ebenfalls so einzustufen ist, dass keine Beeinträchtigung der Druckerfunktion bzw. eine Verschlechterung der Druckqualität zu verzeichnen war. Weiterhin konnte in diversen Verfahren der Nachweis erbracht werden, dass die durch Laserdrucker emittierten Partikel mit hoher Wahrscheinlichkeit dem in den Geräten eingesetzten Toner zuzuordnen sind.

#### Literatur

- [1] Roller, M.: Untersuchungen zur krebserzeugenden Wirkung von Nanopartikeln und anderen Stäuben. F 2083. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin 2008.
- [2] DIN 71460-1: Straßenfahrzeuge – Luftfilter für Kraftfahrzeuginnenräume – Teil 1: Prüfverfahren für Partikelfiltration. Berlin: Beuth 2006.
- [3] ISO 12103-1: Straßenfahrzeuge – Prüfstaub zur Bewertung von Filtern – Teil 1: Arizona-Prüfstaub. Berlin: Beuth 1997.

© Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, Düsseldorf 2009

**micronAir**® office

**NEU**

## TÜV-zertifizierter Schutz vor Toner- und Feinstaub im Büro

Der micronAir® office Feinstaubfilter für Laserdrucker, Fax- und Kopiergeräte sorgt für wirksamen Schutz vor Toner- und Feinstaub.

Die Vorteile:

- Einziger TÜV-zertifizierter Feinstaubfilter für Bürogeräte mit Toner
- Bester Druckerfilter bei Feinstaub und Ultrafeinstaub
- Nachweislich bis zu 94% Abscheideleistung
- Hohe Filterleistung: Wechsel erst nach 70.000 Druckseiten oder einem Jahr
- Dauerhafter Rückhalt feinsten Partikel durch dreilagiges Filtermedium und elektrostatisch geladene Mikrofaser

Freudenberg  
Filtration Technologies KG  
69465 Weinheim / Deutschland

