



# Schimmelpilze in Kabinenfiltern

Dr. R. Rabe und Dipl.-Umweltwiss. B. Vogt, Essen  
Prof. Dipl.-Ing. Univ. R. Scholbeck, München

## Vorbemerkung

Können Schimmelpilze Schwebstofffilter in Kabinenluftfiltern durchwachsen und auf der Reinfluftseite neue Sporen bilden?

Im Auftrag der Tiefbau-Berufsgenossenschaft wurde in den Jahren 1999/2000 vom Labor Dr. Rabe ein Forschungsprojekt durchgeführt, das klären sollte, inwieweit und unter welchen Bedingungen Schimmelpilze in der Lage sind, Schwebstofffilter, die in Schutzbelüftungsanlagen von Erdbaumaschinen eingesetzt werden, zu durchwachsen.

Im Folgenden wird eine Zusammenfassung des Abschlussberichtes dargestellt.

## Einleitung

Schimmelpilze können auf praktisch allen festen Medien wachsen, wenn sie nur ein Minimum an Nährstoffen zur Verfügung und eine ausreichende Wasserversorgung haben. Daher liegt der Gedanke nahe, dass Schimmelpilzsporen, die auf Schwebstofffiltern zur Luftreinigung abgeschieden wurden, bei genügend hoher Luftfeuchtigkeit auskeimen können und bei dem auf den Filtern in Folge der Staubablagerungen meist vorhandenen guten Nährstoffangebot zu neuen Pilzgeflechten heranwachsen. Die Pilzfäden sind dünn genug, um das Fasergeflecht eines HEPA-Filters zu durchwachsen. Auf der Reinfluftseite könnten sie zu Pilzkolonien heranwachsen, neue Sporenträger bilden und große Mengen von Pilzsporen mit dem Luftstrom in die gefilterte Reinfluft abgeben. Hierdurch würde der Zweck der Schwebstofffilter zumindest teilweise konterkariert werden. In der Vergangenheit wurde durch Studien mehrfach nachgewiesen, dass unter besonders günstigen, zumeist künstlich geschaffenen Nährstoffbedingungen sowie lang anhaltender extrem hoher Luftfeuchtigkeit Schimmelpilze und andere Mikroorganismen auf Filtern von Lüftungsanlagen in Gebäuden wachsen und sich vermehren können [1 bis 7]. Ob dies unter Praxisbedingungen auch an den Schwebstofffiltern der Lüftungsanlagen für die Fahrerkabinen von Radladern und anderen Fahrzeugen, die in der Abfallwirtschaft eingesetzt werden, möglich ist, sollte in einem Forschungsvorhaben untersucht werden.

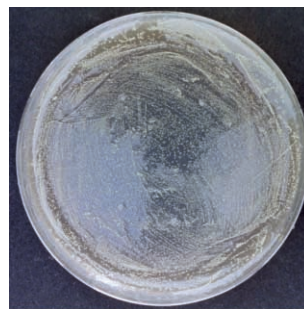
Hierbei wurde schrittweise vorgegangen: Zunächst wurde ermittelt, ob Schimmelpilze prinzipiell in der Lage sind, den Staub in Abfallwirtschaftsanlagen, wie er sich auf den Schwebstofffiltern niederschlägt, als Quelle für den organischen Kohlenstoff zu nutzen. Der zweite Schritt war die Klärung der Frage, bei welcher Luftfeuchtigkeit Schimmelpilze unter Laborbedingungen Schwebstofffilter durchwachsen können. Realitätsnäher war der dritte Schritt, wo in einem Windkanal Schwebstofffiltermaterialien mit Schwebstaub und Schimmelpilzsporen beaufschlagt worden waren und anschließend mehrere Wochen lang mit Luft durchströmt wurden. Hierbei wurde beobachtet, ob auf der Rohluftseite Pilzsporen auskeimten und auf die Reinfluftseite durchwachsen. Diese Versuchsserien wurden mehrfach bei unterschiedlichen klimatischen Gegebenheiten wiederholt. Die Erfassung der Pilze unmittelbar auf den Filtermedien wurde ergänzt durch Messungen der Abgabe von Pilzsporen in die Reinfluft. Unmittelbar praxisbezogen war die letzte Versuchsreihe: In 4 Fahrzeugen, die unter unterschiedlichen klimatischen

Bedingungen im Einsatz waren, wurden jeweils neue Schwebstofffilter und Datenlogger für Temperatur und Luftfeuchtigkeit eingebaut. 3 Monate lang wurde im monatlichen Abstand die Pilzdurchwachsung geprüft und außerdem die Freisetzung von Pilzsporen aus dem Filter in die Reinfluft gemessen.

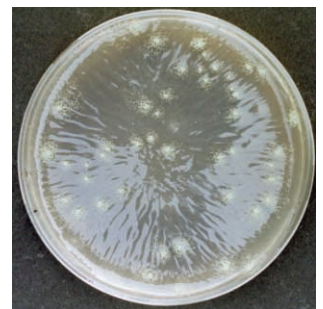
Sollte sich bei den verschiedenen Versuchsserien herausstellen, dass auch unter „normalen“ Umweltbedingungen Pilze die Schwebstofffilter zur Kabinenluftfilterung von Erdbaumaschinen und Flurförderzeugen in der Abfallwirtschaft durchwachsen können und auf der Reinfluftseite zu nennenswerten Sporenfreisetzungen führen, müssten Maßnahmen überlegt werden, die das Schimmelpilzwachstum unterdrücken bzw. abstoppen.

## Pilzwachstum bei Staub als einzige Nährstoffquelle für organischen Kohlenstoff

Für Untersuchungen des Pilzwachstums mit Staub als Nahrungsquelle wurde sterilisierter Agar mit standardisiertem Hausstaub bzw. Kompoststaub in unterschiedlichen Konzentrationen als Nährmedium verwendet, auf dem jeweils 0,1 ml einer Suspension mit Sporen verschiedener Pilzarten aufgebracht worden waren. Während auf Hausstaub-Agar das Pilzwachstum stark eingeschränkt war, ermöglichte Kompoststaub-Agar den Pilzen der Gattung *Penicillium* ein gutes Wachstum, und das sogar bei Konzentrationen von lediglich 0,03 g je Nährboden-Platte. *Eurotium*-Arten entwickelten sich auf diesem Staub-Nährboden allerdings wesentlich schlechter als auf DG 18-Agar (Abb. 1).



Nährboden mit 0,03 g Kompoststaub



Nährboden mit 0,03 g Kompoststaub



Nährboden mit 0,20 g Kompoststaub



Nährboden mit 0,20 g Kompoststaub

**Abb. 1: Wachstum von *Penicillium chrysogenum* (links) und *Eurotium amstelodami* (rechts) auf Nährböden mit unterschiedlichen Kompoststaub-Konzentrationen**

## Pilzwachstum auf beaufschlagten Filtermedien bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchtigkeiten

Materialstücke von Glasfaser- bzw. Kunstfaserfiltern der HEPA-Filterklasse H 13 wurden im Strömungskanal während eines Zeitraumes von 5 Tagen mit Pilzsporen und mit geringen Mengen von standardisiertem Hausstaub bzw. Kompoststaub beaufschlagt. Die Staubmengen betragen insgesamt 0,05 g bzw. 0,5 g je Filterprüfstück von ca. 270 cm<sup>2</sup> Fläche. Die Filterprüfstücke wurden anschließend in einem abgeschlossenen Luftraum bei definierter Luftfeuchtigkeit von 100 % bzw. 86 % 5 bis 7 Wochen lang ruhen gelassen. Während dieses Zeitraumes konnten die abgeschiedenen Pilzsporen bei 100 % relativer Luftfeuchtigkeit auskeimen und zu Pilzgeflechten heranwachsen, die auch auf die Reinfluftseite durchwuchsen. Je höher die aufgegebene Staubmenge und je höher die Luftfeuchtigkeit während des Versuchszeitraumes waren, desto schneller und intensiver wuchsen die Pilzgeflechte durch die Filtermaterialien hindurch. In unterschiedlichen Zeitabständen wurden auf den Reinfluftseiten der Filter sogenannte Abdruckproben genommen. Hierbei wird ein Nährboden leicht gegen die Oberfläche des Filters gedrückt, wobei die Pilzfäden und Pilzsporen auf der klebrigen Oberfläche des Nährbodens haften bleiben. Aus ihnen wachsen jeweils Pilzkolonien heran, die mit bloßem Auge zählbar sind. Die Anzahl der gebildeten Pilzkolonien ist ein Maß für die Dichte des Pilzbewuchses auf der Reinfluftseite.

Abbildung 2 zeigt die Entwicklung der Pilzbesiedlung auf der Reinfluftseite in Abhängigkeit von der Zeit bei einem Kunstfaserfilter bei 100 % relativer Feuchte. Die bei den Beprobungen gemessenen koloniebildenden Einheiten (KBE) waren nicht nur auf sterile Pilzgeflechte zurückzuführen. Vielmehr zeigten Klebefilmproben, dass sich aus diesen Pilzgeflechten bereits wieder Sporenträger gebildet hatten, die in der Lage waren, beträchtliche Sporenmengen zu bilden. Bei den Klebefilmproben wird ein Stück transparenter Klebefilm auf die Oberfläche des Filters gedrückt und wieder abgezogen, wobei Teile des Pilzgeflechtes an dem Klebefilm haften bleiben. Die Klebefilmstücke können dann direkt unter dem Mikroskop ausgewertet und fotografiert werden (Abb. 3).

Nach 7 Wochen Standzeit war auf der Reinfluftseite des Filtermaterials bei günstigen Bedingungen (100 % Luftfeuchte und 0,5 g Staub je 270 cm<sup>2</sup> Filterfläche) bereits mit bloßem Auge ein dichter Pilzbewuchs feststellbar. Abbildung 4 zeigt den Pilzbewuchs bei unterschiedlicher schwacher Vergrößerung unter dem Auflicht-Mikroskop.

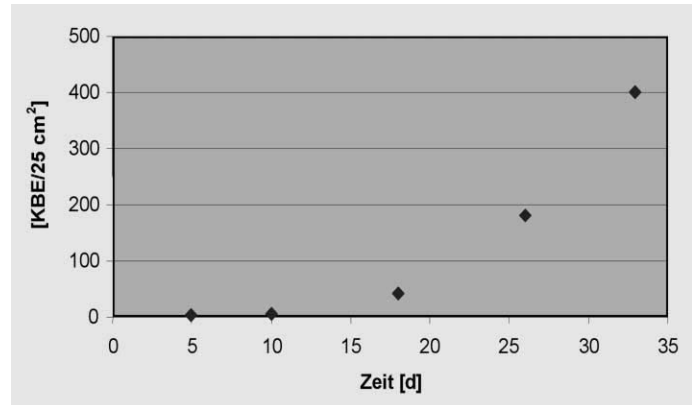
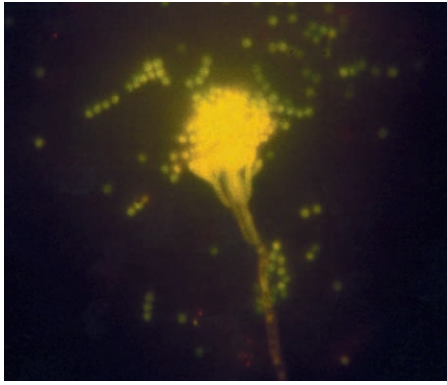


Abb. 2: Pilzdichte auf der Reinfluftseite des mit Hausstaub und Pilzsporen beaufschlagten Kunstfaserfilters bei 100 % relativer Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit von der Versuchsdauer

Anzeige  
Komatsu

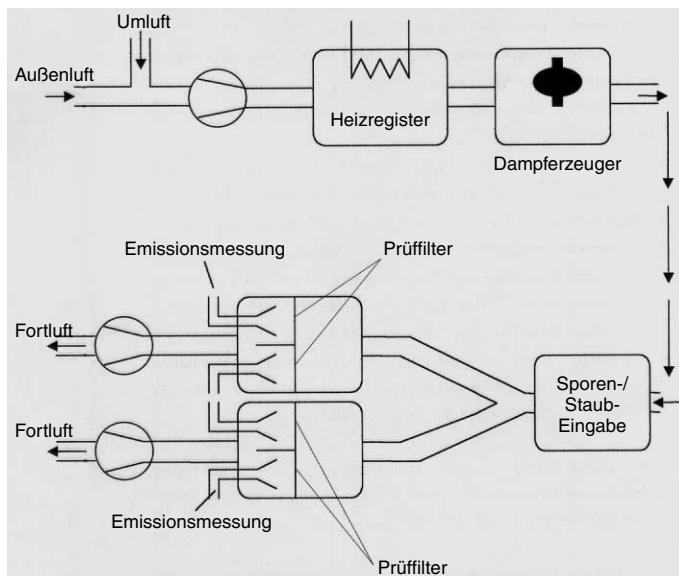


**Abb. 3:**  
**Penicillium-**  
**Sporenträger auf**  
**der Reinluftseite**  
**eines bei**  
**100 % relativer**  
**Luftfeuchtigkeit**  
**inkubierten**  
**Kunstfaserfilters**  
**(Präparat gefärbt**  
**mit Fluoreszenz-**  
**farbstoff).**  
**Original-**  
**Vergrößerung:**  
**1000-fach**

## Versuche im klimatisierten Windkanal

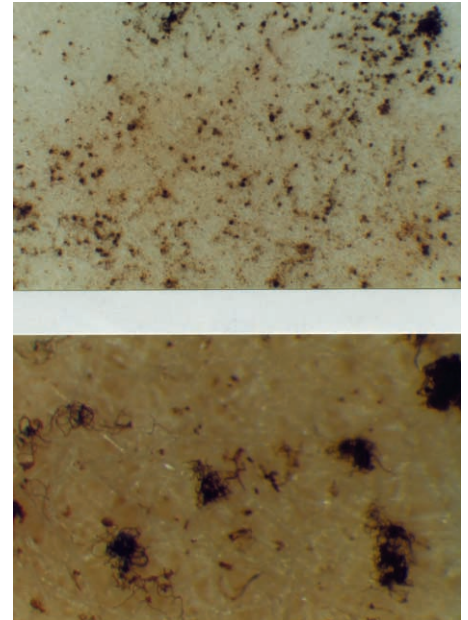
In der nächsten Stufe von Versuchen wurden Bedingungen geschaffen, die den Einsatzbedingungen von Kabinenluftfiltern von Fahrzeugen der Abfallwirtschaft näher kommen. Die Luftfeuchtigkeit wurde auf einem bestimmten Niveau, aber nicht mehr so streng konstant gehalten. Außerdem waren die Filter während der gesamten Versuchsdauer von etwa 3 bis 6 Wochen in einem Tag-Nacht-Rhythmus durchströmt. Hierbei wurde der Einsatzrhythmus der Fahrzeuge bzw. Filter nachempfunden: 8 Stunden Durchströmung wechselten ab mit 16 Stunden Stillstand. Während der Stillstandsphase erfolgte allerdings aus methodischen Gründen eine sehr schwache Durchströmung der Filter. Die Versuche wurden in einem klimatisierbaren Filterprüfstand der Firma DMT Protec in Essen durchgeführt<sup>1)</sup>. Der klimatisierbare Filterprüfstand besteht aus einem geschlossenen Raum, in den Frischluft eingesaugt wird und über ein Heizregister und einen Dampferzeuger fakultativ konditioniert werden kann.

Die Raumluft wird in eine Kammer eingesaugt, wo der Staub und die Pilzsporen zudosiert werden. Die Luft gelangt von dort in einen Kanal, der sich teilt und in eine obere und eine untere Prüfkammer führt. Die Prüfkammern sind durch Wände quer geteilt. Sie haben runde Aussparungen, in die die insgesamt 4 Prüffilter eingesetzt werden. Auf der Reinluftseite befinden sich hinter den Prüffiltern die Ansaugöffnungen von Probenahme-systemen, mit denen Proben aus der Reinluft gezogen werden, um festzustellen, ob von den beaufschlagten Filtern Pilzsporen



**Abb. 5: Schema des Klimakanals der Firma DMT Protec mit erster Strömungsstrecke (oben) und zweiter Strömungsstrecke (unten) (Pfeile symbolisieren Strömungsrichtung)**

<sup>1)</sup> Wir danken Herrn Stockmann und Herrn Dr. Lange, DMT Protec, dass sie uns diese Versuchsreihen an dem Filterprüfstand ermöglicht haben, sowie für die Unterstützung während der Durchführung der Arbeiten



**Abb. 4:**  
**Reinluftseite des**  
**mit Kompoststaub**  
**und Pilzsporen**  
**beaufschlagten**  
**Kunstfaserfilters**  
**nach 50 Tagen**  
**Versuchsdauer**  
**(100 % relative**  
**Luftfeuchtigkeit)**  
**bei ca. 6-facher**  
**(oben) und ca.**  
**50-facher (unten)**  
**auflicht-**  
**mikroskopischer**  
**Original-**  
**Vergrößerung**

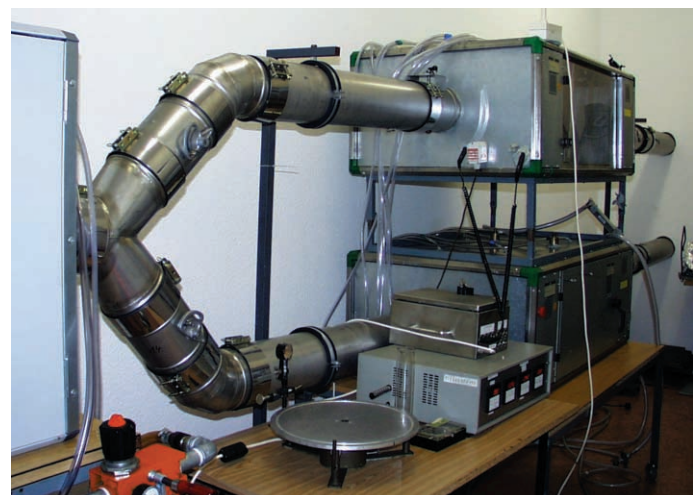
auf der Reinluftseite abgegeben werden. Die Abluft aus den Prüfkammern wird über ein Gebläse an die Außenluft abgegeben.

In dem Filterprüfstand wurden 3 Versuchsserien bei unterschiedlicher Luftfeuchtigkeit durchgeführt. Bei der ersten Versuchsserie betrug der Luftfeuchte-Zielwert 100 %, bei der zweiten Serie 85 %, und bei der dritten Serie herrschten Außenluftbedingungen, wobei die Luft mit einer konstanten Wasserdampfmenge geringfügig angereichert wurde.

Nachstehend wird aus den 3 Versuchsserien jeweils 1 Versuch exemplarisch beschrieben.

Während der Durchführung des ersten Versuchs aus der ersten Serie wurde nur selten eine Wasserdampfsättigung erreicht, und durch Ausfälle der Feuchteregelung gab es 5 stärkere Einbrüche der Luftfeuchtigkeit. Diese schädeten aber offensichtlich der Durchwachsung der Prüffilter mit Pilzfäden nicht. Auf der Reinluftseite waren bereits nach 8 Tagen die ersten Pilze nachweisbar, und nach 19 Tagen Versuchsdauer wurde eine große Dichte koloniebildender Einheiten auf der Reinluftseite festgestellt (Abb. 7).

Die Sporenfreisetzung in die Reinluft war jedoch außerordentlich gering: Die Pilzsporenkonzentration der Reinluft lag nur unwesentlich oberhalb der Nachweisgrenze von 16 KBE/m<sup>3</sup> (Tab. 1). Auch konnten mit Klebefilmproben keine Sporenträger der Pilzgeflechte auf den Reinluftseiten nachgewiesen werden.



**Abb. 6: Prüfkammern der zweiten Strömungsstrecke**



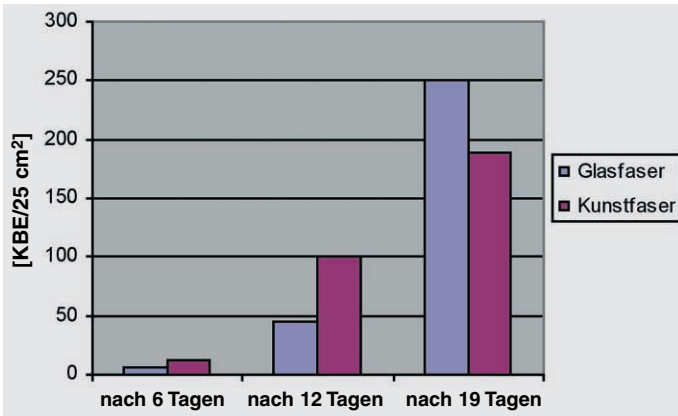


Abb. 7: Mittlere Pilzdichte auf der Reinluftseite der Glas- bzw. Kunstfaserfilter nach unterschiedlicher Versuchsdauer bei 100 % relativer Luftfeuchtigkeit

Filter	Pilzsporenkonzentration Reinluft	
	laufende Durchströmung [KBE/m³]	nach 2 Tagen Ruhepause [KBE/m³]
Glasfaser (1)	48	n.z.
Glasfaser (2)	16	16
Kunstfaser (1)	64	n.z.
Kunstfaser (2)	80	<16

KBE = Kolonien bildende Einheiten      n.z. = nicht zählbar

Tabelle 1: Freigesetzte Pilzsporen bei laufender Durchströmung und nach 2-tägiger Ruhephase zum Abschluss eines Klimakanalversuches bei 100 % relativer Luftfeuchtigkeit (1 = obere Prüfkammer, 2 = untere Prüfkammer)

Ein Beispiel des Temperatur- und Feuchtverlaufs während einer der Prüfungen bei 85 % Luftfeuchtigkeit gibt Abbildung 8 wieder.

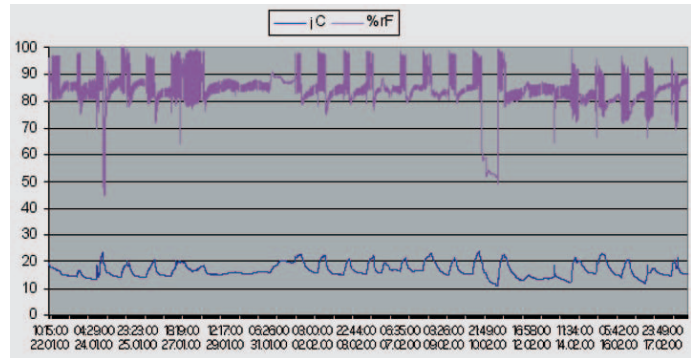


Abb. 8: Relative Luftfeuchtigkeit und Temperatur während eines Klimakanalversuches bei 85 % relativer Luftfeuchtigkeit

Bei dieser Feuchtigkeit, die im Prinzip ein Pilzwachstum nicht ausschließt, war die Durchwachsung der Filter mit Pilzfäden offensichtlich sehr viel geringer als bei den Versuchen mit 100 % Luftfeuchtigkeit. Auch wurden bei dieser Versuchsserie praktisch keine Pilzsporen in die Reinluft abgegeben.

Anders lagen die Verhältnisse bei einem der Versuche mit konditionierter Außenluft. Die Temperatur war im Mittel höher als bei den vorhergehenden Versuchen, während die Luftfeuchtigkeit etwa 85 % betrug wie in dem zuvor beschriebenen Versuch. Allerdings war die Schwankungsbreite wesentlich größer (von 63 % bis 100 % relative Feuchte), und die Schwankungen erfolgten im Tagesrhythmus. Im Vergleich zu den vorangegangenen Versuchen war der Volumenstrom reduziert worden. Ein wesentlicher Unterschied bestand auch in der Versuchsdauer: 6 Wochen statt 4 Wochen.

Bei den geprüften Filterstücken war bereits nach 2 Wochen ein leichter Pilzbewuchs auf der Reinluftseite festzustellen, der im weiteren Verlauf immer stärker wurde, bis nach 6 Wochen auf der Reinluftseite aller Filter ein dichter Rasen gebildet war (Tab. 2) (Glasfaserfilter Nr. 1 hatte wegen eines Filterrisses, der wieder verschlossen wurde, abweichende Werte).

Mit Klebefilmproben war die Durchwachsung erst später festzustellen (Tab. 3): nach 4 Wochen waren nur vereinzelt Sporen

Filter	Reinluftseite nach 7 Tagen [KBE/25 cm²]	Reinluftseite nach 14 Tagen [KBE/25 cm²]	Reinluftseite nach 21 Tagen [KBE/25 cm²]	Reinluftseite nach 28 Tagen [KBE/25 cm²]	Reinluftseite nach 35 Tagen [KBE/25 cm²]	Reinluftseite nach 42 Tagen [KBE/25 cm²]
Glasfaser (1)	0*)	44*)	> 250*)	> 250*)	> 250*)	> 250*)
Glasfaser (2)	0	8	86	14	32	> 250
Kunstfaser (1)	0	4	220	186	52	> 250
Kunstfaser (2)	2	14	105	93	38	> 250

\*) Glasfaserfilter gerissen

Tabelle 2: Pilzdichte auf der Reinluftseite der Glas- bzw. Kunstfaserfilter einer Versuchsreihe mit befeuchteter Außenluft (1 = obere Prüfkammer, 2 = untere Prüfkammer)

Filter	Reinluftseite nach 7 Tagen		Reinluftseite nach 14 Tagen		Reinluftseite nach 21 Tagen		Reinluftseite nach 28 Tagen		Reinluftseite nach 35 Tagen		Reinluftseite nach 42 Tagen	
	Sporen	Myzel	Sporen	Myzel	Sporen	Myzel	Sporen	Myzel	Sporen	Myzel	Sporen	Myzel
Glasfaser (1)*	-	-	-	-	-	-	-	-	++	+	+	+
Glasfaser (2)	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	++	++
Kunstfaser (1)	-	-	-	-	-	-	+	-	+	-	+	-
Kunstfaser (2)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+++	+++

\* Glasfaserfilter gerissen      - = nicht vorhanden      + = vereinzelt, wenige      ++ = mehrere      +++ = viele

Tabelle 3: Sporen- und Myzeldichte auf der Reinluftseite der Glas- bzw. Kunstfaserfilter einer Versuchsreihe mit befeuchteter Außenluft (1 = obere Prüfkammer, 2 = untere Prüfkammer) nach mikroskopischer Betrachtung (1000-fach) von Klebefilmproben

Filter	Pilzsporenkonzentration Reinluft [KBE/m <sup>3</sup> ]
Glasfaser (1)	351*)
Glasfaser (2)	835
Kunstfaser (1)	33
Kunstfaser (2)	585
*) Filter gerissen	

**Tabelle 4: Freigesetzte Pilzsporen nach 2-tägiger Ruhephase nach Abschluss eines Klimakanalversuches mit befeuchteter Außenluft (1 = obere Prüfkammer, 2 = untere Prüfkammer)**

und noch keine Teile von Pilzgeflechten zu erkennen, aber nach 6 Wochen zeigten sich fast überall auf den Filtern neben den Pilzsporen Teile von Pilzgeflechten. Die Pilzgeflechte sind ein Beweis für die Durchwachsung der Filter durch die Pilze. Der Nachweis von Pilzsporen allein hätte auch dadurch möglich sein können, dass einzelne Pilzsporen die Filter passieren. Von den auch mikroskopisch zu beobachtenden auf der Reinluftseite neu gebildeten Sporenträgern wurden nennenswerte Mengen von Sporen in die Reinluft abgegeben. Tabelle 4 zeigt, dass die Pilzsporenkonzentration in der Reinluft hinter dem Filter zwischen 33 und 835 KBE/m<sup>3</sup> Luft betrug. Der Median lag bei 467 KBE/m<sup>3</sup> Luft.

Aus den Ergebnissen der Laborversuche muss der Schluss abgeleitet werden, dass unter Bedingungen, die die Praxisverhältnisse mehr oder weniger gut abbilden, Schimmelpilze in der Lage sind, HEPA-Filter zu durchwachsen und auf der Reinluftseite neue Sporen zu bilden, die in die Reinluft abgegeben werden.

### Filterdurchwachsung bei in der Praxis eingesetzten Fahrzeugen

Ob auch in der betrieblichen Praxis die Kabinenluftfilter von Fahrzeugen von Schimmelpilzen durchwachsen werden können, sollten die Praxisuntersuchungen an 4 Fahrzeugen (2 Radlader, 1 Gabelstapler und 1 Verdichter) zeigen. Der Verdichter war auf einer Deponie im Einsatz, die übrigen Fahrzeuge in geschlossenen bzw. offenen Kompostierungsanlagen<sup>2)</sup>. Zu Versuchsbeginn wurden jeweils in die Belüftungsanlagen neue Schwebstofffilter (HEPA H 13) für ca. 12 Wochen eingesetzt und in Abständen von ca. 4 Wochen im Labor untersucht. Zugleich wurde mit Mini-Datenloggern Temperatur und Luftfeuchtigkeit während der Versuchsdauer erfasst. Nach jeweils etwa 4, 8 bzw. 12 Wochen Betriebszeit wurden auf der Roh- und der Reinluftseite der Filter Klebefilmproben sowie Abstrichproben genommen. Außerdem wurden die Filter in einen Strömungskanal der Firma DMT Protec eingebaut und kurzzeitig mit einem praxisrelevanten Volumenstrom durchströmt. Hierbei wurde gleichzeitig auf der Reinluftseite die Pilzsporenkonzentration der Luft erfasst.

<sup>2)</sup> Wir danken den Betrieben, dass sie uns die Messungen an ihren Fahrzeugen ermöglicht haben

Parameter	Betriebsdauer	Rohluftseite [KBE/25 cm <sup>2</sup> ]	Reinluftseite [KBE/25 cm <sup>2</sup> ]
mesophile Pilze	4 Wochen	sehr hoch (48.000)	hoch (1.400)
	8 Wochen	sehr hoch (45.000)	sehr hoch (3.600)
	12 Wochen	sehr hoch (41.000)	sehr hoch (2.700)
mesophile Aktinomyzeten	4 Wochen	n.b.	n.b.
	8 Wochen	sehr gering (0)	sehr gering (0)
	12 Wochen	hoch (15.000)	mittel (230)
thermophile Aktinomyzeten	4 Wochen	sehr hoch (40.000)	hoch (940)
	8 Wochen	sehr hoch (34.000)	sehr hoch (5.000)
	12 Wochen	sehr hoch (120.000)	hoch (1.600)
n.b. = nicht bestimmbar			

**Tabelle 5: Einstufung der Keimdichten auf dem Schwebstofffilter der Belüftungsanlage des Radladers der offenen Kompostierungsanlage nach 4-, 8- und 12-wöchiger Betriebsdauer (ermittelt an Hand von Abstrichproben)**

Parameter	Betriebsdauer	Emission Sporen [KBE/m <sup>3</sup> ]	
		Parallele I	Parallele II
mesophile Pilze	4 Wochen	0	n.b.
	8 Wochen	26	28
	12 Wochen	120	37
mesophile Aktinomyzeten	4 Wochen	16	n.b.
	8 Wochen	10	4
	12 Wochen	70	27
thermophile Aktinomyzeten	4 Wochen	84	n.b.
	8 Wochen	76	0
	12 Wochen	140	93
KBE = Kolonien bildende Einheiten      n.b. = nicht bestimmbar			

**Tabelle 6: Konzentration von Sporen verschiedener Mikroorganismen-Gruppen in der Abluft des Schwebstofffilters der Belüftungsanlage des Radladers der offenen Kompostierungsanlage nach 4-, 8- und 12-wöchiger Betriebsdauer**

Als ein Beispiel für die 4 untersuchten Fahrzeuge werden hier die Ergebnisse von dem Radlader der offenen Kompostierungsanlage vorgestellt. Die Aufzeichnung der Temperatur- und Feuchtegehalte der Luft unmittelbar am Schwebstofffilter der Belüftungsanlage zeigte große Tagesschwankungen. Insgesamt war die Feuchtigkeit der Luft geringer als bei den Laborversuchen.

In Tabelle 5 sind die Ergebnisse der Abstrichproben von Roh- und Reinluftseite der Filter nach jeweils 4, 8 und 12 Wochen Betriebszeit dargestellt. Erwartungsgemäß fanden wir auf der Rohluftseite sehr hohe Keimzahlen, aber auch auf der Reinluftseite fielen die Keimdichten relativ hoch bis sehr hoch aus. Außer auf Pilze waren diese Proben auch auf mesophile und thermophile Aktinomyzeten untersucht worden. Dies sind zu den Bakterien gehörende Mikroorganismen, die in Kompostwerken sehr hohe Konzentrationen in der Luft erreichen können und wegen ihres allergischen Potenzials eine gewisse hygienische Bedeutung haben. Insbesondere thermophile Aktinomyzeten waren auf der Reinluftseite in hohen Dichten nachweisbar. Mit Klebefilmproben waren auf der Reinluftseite keine Sporenträger der Pilze nachzuweisen. Von daher war eine Freisetzung von Pilzsporen eher nicht zu erwarten. Die Tabelle 6 zeigt, dass die Sporenfreisetzung sowohl von Pilzen als auch von Aktinomyzeten relativ gering war. Es ist allerdings ein Trend zu höheren

Freisetzungsraten mit zunehmender Betriebsdauer des Filters zu erkennen. Die Freisetzungsraten bei den übrigen Fahrzeugen waren jedoch uneinheitlich.

## Zusammenfassende Bewertung und Ausblick

Die Ergebnisse der Laborversuche zeigen eindeutig, dass Schimmelpilze in der Lage sind, Staub mit einem hohen Anteil organischer Substanz als Kohlenstoffquelle für ihr Wachstum zu nutzen. Ist dieser Staub auf einem HEPA-Filter abgeschieden, können die Pilze auch durch das HEPA-Filter hindurchwachsen – vorausgesetzt, die Luft- und Substratfeuchtigkeit ist hoch genug. Allerdings ist bei konstanter Luftfeuchtigkeit von 86 % (was einer Wasseraktivität des staubimprägnierten Filtermaterials von 0,86 entspricht) das Wachstum bereits stark eingeschränkt.

Bei Filtern, die in Simulation realer Einsatzbedingungen von Kabinenluftfiltern im 8/16-Stunden-Rhythmus in einem Klimakanal durchströmt wurden, wurde bei hoher Luftfeuchtigkeit (Median: 97 % relative Feuchte) bereits nach 6 Tagen eine geringfügige Durchwachsung der Filter festgestellt, nach 19 Tagen war sie erheblich. Jedoch war zu diesem Zeitpunkt die Freisetzung von Pilzsporen nur gering. Deutlich reduziert, wenn auch nicht unterdrückt, war das Pilzwachstum auf den Filtern bei einem Median von 85 % relativer Feuchte. Innerhalb von 4 Wochen waren auf der Reinfluftseite nur in geringem Maße Pilze nachzuweisen, zur Freisetzung von Pilzsporen kam es nicht.

Eine weitere Versuchsserie mit variierender, ziemlich hoher relativer Feuchte wurde über einen Zeitraum von 6 Wochen durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen eine Durchwachsung der Filter mit zunehmender Versuchsdauer unter Bildung von Sporenträgern auf der Reinfluftseite. Bei Versuchsende war die Sporenfreisetzung bemerkenswert. Offensichtlich ist die Entwicklung des Pilzgeflechtes auf dem ungünstigen Substrat bei ungünstigen klimatischen Bedingungen (Durchströmung!) stark verlangsamt, so dass eine nennenswerte Sporenfreisetzung erst nach frühestens 4 bis 6 Wochen erfolgt.

An 4 Fahrzeugen in Abfallwirtschaftsbetrieben wurden Messungen der klimatischen Bedingungen und der Pilzdurchwachsung und der Sporenfreisetzung im HEPA-Filter durchgeführt. Beispielfhaft sind die Ergebnisse an einem Radlader in einem offenen Kompostwerk: Bei einem Median von 66 % relativer Feuchte entwickelten sich auf der Reinfluftseite hohe Pilzdichten. Die Keimfreisetzung war recht gering; sie nahm tendenziell mit zunehmender Betriebsdauer der Filter (4 bis 12 Wochen) zu. Die beobachteten Unterschiede zwischen den einzelnen Filtern bzw. Fahrzeugen in unterschiedlichen Einsatzgebieten lässt vermuten, dass in der Praxis sehr unterschiedliche Keimfreisetzungsraten erfolgen können. Nach dem derzeitigen Kenntnisstand sind jedoch sehr hohe Freisetzungsraten kaum zu erwarten. Diese Frage soll in einem Folgeprojekt an einer großen Zahl von Fahrzeugen geklärt werden, die unter unterschiedlichen klimatischen Bedingungen im Einsatz sind.

## Literatur

- [1] ELIXMANN J. H. (1989): Filter einer lufttechnischen Anlage als Ökosystem und als Verbreiter von Pilzallergenen. Dustri-Verlag Dr. Karl Feistle, München-Deisenhofen
- [2] ELIXMANN J. H. und W. JORDE (1990): Rückhaltefähigkeit von Filtern für Allergenträger (Pilzsporen) und Allergene. FLT-Vorhaben 3/1/70/90, Frankfurt (M.)
- [3] KEMP S. J., T. H. KUEHN, D. Y. H. PUI, D. VESLEY und A. J. STREIFEL (1995a): Growth of microorganisms on HVAC filters under controlled temperature and humidity conditions. ASHRAE transactions part 1, 1–12
- [4] KEMP S. J., T. H. KUEHN, D. Y. H. PUI, D. VESLEY und A. J. STREIFEL (1995b): Filter collection efficiency and growth

## Anzeige Krippner

of microorganisms on filters loaded with outdoor air. ASHRAE transactions part 1, 228–238

- [5] MARTIKAINEN P. J., A. ASIKAINEN, A. NEVALAINEN, M. JANTUNEN, P. PASANEN und P. KALLIOKOSKI (1990): Microbial growth on ventilation filter materials. In: Proceedings of the 5th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Hrsg.: D. W. Walkinshaw, Vol. 3, Toronto, 203–206
- [6] MÖRITZ M. (1996): Verhalten von Mikroorganismen auf Luftfiltern in Raumluftechnischen Anlagen in Abhängigkeit von den klimatischen Bedingungen der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit. VWB, Verl. für Wiss. und Bildung, Berlin
- [7] SCHMIDT-LORENZ W., U. SCHMIDT, M. UEHLINGER und P. BLASER: Untersuchungen über das Durchwachsen von Schimmelpilzen durch Hochleistungs-Schwebstofffilter. Swiss. Med. 3 (5) (1981) 93–108

### Autoren:

Dr. R. Rabe, Dipl.-Umweltwiss. B. Vogt,

Labor Dr. Rabe HygieneConsult

Prof. Dipl.-Ing. Univ. R. Scholbeck,

Leiter des Geschäftsbereiches Prävention der Tiefbau-Berufsgenossenschaft

## Anzeige Rud