

Staub-, Endotoxin- und Antigenkonzentrationen bei der Abfallsammlung

H.-D. Neumann, M. Buxtrup, V. Liebers, M. Raulf, I. Sander

Zusammenfassung Um Erkenntnisse über Antigenkonzentrationen an Arbeitsplätzen im Bereich der Abfallsammlung zu gewinnen und Rückschlüsse auf das Verhältnis zu den kultivierbaren Schimmelpilzen zu ziehen, wurden durch Messungen am Lader und im Bereich der Schüttung parallel zu den kultivierbaren Schimmelpilzen der einatembare Staub, Endotoxin sowie diverse Schimmelpilz- und Milbenantigene quantifiziert. Der Arbeitsplatzgrenzwert für einatembaren Staub wurde deutlich unterschritten. Einige Schimmelpilze, die häufig und teilweise in hoher Konzentration nach Kultivierung nachgewiesen wurden, wie z. B. *Aspergillus fumigatus* oder *Penicillium* spp., lagen deutlich seltener oberhalb der Nachweisgrenze der immunologischen Testverfahren. Demgegenüber wurden Antigene der Gattungen *Cladosporium* und *Eurotium* häufiger nachgewiesen, als diese Schimmelpilzgattungen nach Kultivierung bestimmt werden konnten. Insgesamt waren die Korrelationen zwischen Antigenbestimmung und Kultivierung gleicher Schimmelpilzgattungen gering. β -1,3-Glukan und Endotoxin wurden in allen Proben nachgewiesen und korrelierten signifikant mit der Gesamtschimmelpilzbelastung. Die Konzentration von Milbenantigenen lag bei der Abfallsammlung ähnlich hoch wie im häuslichen Lebensumfeld.

Dust, endotoxin and antigen concentrations arising during refuse collection

Abstract In order for information to be obtained on antigen concentrations at refuse collection workplaces and to permit conclusions regarding the relationship to the cultivatable fungi, the inhalable dust, endotoxin and various fungi and mite antigens were quantified by measurements conducted on the collection personnel and in the vicinity of the refuse vehicle's loading equipment, parallel to quantification of the cultivatable fungi. The inhalable dust value lay substantially below the occupational exposure limit. Certain fungi that were detected frequently and in some cases in high concentrations following cultivation, such as *Aspergillus fumigatus* and *Penicillium* spp., exceeded the detection limits of the immunological assays substantially less frequently. By contrast, antigens of the genera *Cladosporium* and *Eurotium* were detected more frequently than were these genera of fungi following cultivation. Altogether, antigen detection correlated poorly with cultivation of the same genera of fungi. β -1,3-Glucan and endotoxin were detected in all samples and correlated significantly with the overall fungal load. The concentration of mite antigens during refuse collection approximated that in the domestic environment.

Dr.-Ing. Heinz-Dieter Neumann, Martin Buxtrup,
Unfallkasse Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf.

Dr. rer. nat. Verena Liebers, Prof. Dr. rer. nat. Monika
Raulf, Dr. phil. nat. Ingrid Sander,
Institut für Prävention und Arbeitsmedizin der
Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IPA),
Bochum.

1 Einleitung

Die Sammlung und Kultivierung von Schimmelpilzen ist ein bewährtes und seit Langem praktiziertes Verfahren zur Beurteilung der Schimmelpilzbelastung und der Wirkung von Schutzmaßnahmen an Arbeitsplätzen (siehe auch [1]). Unter dem Aspekt der sensibilisierenden Wirkung von Schimmelpilzen ist die Methode jedoch nur bedingt aussagekräftig, da nur kultivierbare Schimmelpilze in das Ergebnis eingehen. Abgestorbene Schimmelpilze finden keinen Eingang in die Beurteilung und ein Rückschluss auf die Belastungshöhe durch das sensibilisierende Antigen ist so nicht möglich. Es ist somit von Interesse, mehr über Antigene an Arbeitsplätzen in Erfahrung zu bringen und Rückschlüsse auf das Verhältnis zu den kultivierbaren Schimmelpilzen zu ziehen. In einer Studie der Unfallkasse Nordrhein-Westfalen und des Instituts für Prävention und Arbeitsmedizin der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IPA) wurden an Arbeitsplätzen in der Abfallsammlung parallel zu den kultivierbaren Schimmelpilzen Staub, Endotoxin und diverse Antigene in schimmelpilzhaltigem Staub ermittelt. Untersucht wurden zum einen Schimmelpilzantigene, die häufig in organischen Stäuben anzutreffen sind und für die Immunoassays verfügbar sind, sowie β -1,3-Glukan, das als Zellwandbestandteil vieler Pilze als Summenparameter für eine Schimmelpilzbelastung dienen kann. Zum anderen wurden Milbenallergene mit einem Immunoassay erfasst, der Allergene zahlreicher Hausstaub- und Vorratsmilben erkennt, die in Symbiose mit Schimmelpilzen organische Reste verdauen.

2 Methoden

Die Messungen bei der Müllladung fanden im Juni, Juli und Oktober 2012 sowie im Juli 2013 personengetragen und stationär im Bereich der Schüttung statt. Parallel zu den kultivierbaren Schimmelpilzen wurden die Konzentrationen von einatembaren Staub, Endotoxinen und die Antigene diverser Schimmelpilzspezies sowie von β -1,3-Glukan und Milbenantigenen (Domestic mites) ermittelt.

Die Probenahmepumpen und -köpfe waren zu diesem Zweck an einem Tragegeschirr befestigt, wobei die Probenahmeköpfe in Schulter- und Brusthöhe des Laders positioniert waren. Zusätzlich wurden die Konzentrationen jeweils am Emissionsort im Bereich der Schüttung bestimmt. Die Probenahmezeiten lagen im Mittel bei 2 h (23 bis 160 min).

Parallel dazu wurden mit dem gleichen Probenahmesystem im Bereich des Untersuchungsgebietes auf dem jeweiligen Betriebshof die Referenz-Außenluftwerte bestimmt. Die Probenträger und Pumpen waren zu diesem Zweck stationär an einem Stativ befestigt. Die Ansaugpunkte für die Außenluft befanden sich in einer Höhe von etwa 1,6 m über dem Erdboden. Die Probenahmezeiten lagen zwischen 2,4 und 7,5 h (im Mittel bei 4,5 h).



Bild 1. Messaufbau.

Der Messaufbau (Bild 1) und die Methode der Schimmelpilzkultivierung sind bereits dargestellt und beschrieben [1].

Die Probenahme des einatembaren Staubes und der enthaltenen Antigene erfolgte mittels Probenahmepumpen bei einem Luftvolumenstrom von 3,5 l/h am Lader und von 10 l/h im Bereich der Schüttung sowie in der Umladehalle. Abgeschieden wurde der Staub auf Teflonfiltern mit 37 mm Durchmesser und einer Porenweite von 1,0 µm (Millipore, FALP03700). Gewogen wurden die Filter in einem klimatisierten Raum auf einer Präzisionswaage (Sartorius ME 235). Das Verfahren ist in [2] beschrieben.

Nach dem gleichen Sammelprinzip wurden auch die Endotoxine gesammelt. Die Abscheidung erfolgte auf depyrogenisierten Glasfaserfiltern mit 37 mm Durchmesser mit einer Porenweite von 0,5 µm (Macherey & Nagel, MN 85/90 BF). Der Luftvolumenstrom betrug 3,5 l/h.

Die genommenen Proben wurden noch am Tag der Probenahme bei Umgebungstemperaturen in das Labor des IPA in Bochum geliefert.

Der Nachweis der Endotoxinaktivität erfolgte mit dem chromogen-kinetischen Limulus-Amöbozyten-Lysat (LAL)-Test (Charles River, Sulzfeld) [3]. Alle Proben wurden in Doppelbestimmung eingesetzt und mindestens 1 : 10 verdünnt. Zusätzlich wurden zu jeder Probe zwei Kontrollwerte mitgeführt, jeweils mit 5 EU/ml versetzte Messproben. Eine Wiederfindungsrate (Recovery) von 50 bis 200 % gilt laut Hersteller als akzeptabel.

Aus dem einatembaren Staub wurden unter Berücksichtigung der als sensibilisierend eingestuften Schimmelpilzgattungen [4] folgende Antigene bestimmt:

- Aspergillus-fumigatus-Antigene,
- Aspergillus-versicolor-Antigene,
- Penicillium-chrysogenum-Antigene,
- Cladosporium-Antigene,
- Eurotium-amstelodami-Antigene,
- Wallemia-sebi-Antigene.

Die Schimmelpilzantigene wurden mit Immunoassays auf der Basis von Kaninchenantikörpern quantifiziert [5; 6].

Zusätzlich wurden β-1,3-Glukan, das ein typischer Zellwandbestandteil von Pilzen, aber auch einiger Pflanzen ist,

und Antigene von allergologisch relevanten Milben aus der häuslichen Umgebung (Domestic mites) bestimmt [7; 8].

Für die Korrelationen und Abbildungen wurden Antigen- und Staubwerte unterhalb der Bestimmungsgrenze (Level of Detection, LOD) mit zwei Drittel LOD angegeben. Da die Werte nicht normalverteilt waren, wurden Rangkorrelationen (Spearman) mit dem Programm GraphPad Prism berechnet.

3 Ergebnisse

Eine Übersicht der ermittelten Staub-, Endotoxin- und Antigen-Konzentrationen ist in **Tabelle 1** dargestellt. Die Konzentrationen der parallel ermittelten Schimmelpilzkonzentrationen sind **Tabelle 2** zu entnehmen. Wegen der Vielzahl der einzelnen Arten für die Gattungen *Penicillium*, *Cladosporium* und *Eurotium* konnten im Detail keine einzelnen Arten bestimmt werden, sodass die Höhe der Konzentrationen für die jeweilige Gattung angegeben ist.

3.1 Staub

In der Außenluft konnte einatembare Staub nur in fünf von 20 Fällen nachgewiesen werden. Die Konzentration betrug maximal 0,8 mg/m³. Auf leicht höherem Niveau lagen die Werte bei der personengetragenen Probenahme am Lader. Der Nachweis gelang hier in zehn von 25 Fällen mit einem Maximalwert von 1,1 mg/m³. Erwartungsgemäß sind die Staubwerte am Emissionsort im Bereich der Schüttung und in der Umladehalle deutlich höher. Hier wurde Staub in 50 von 51 Fällen nachgewiesen. Der Bereich liegt zwischen 0,2 und 5,5 mg/m³ bei einem Medianwert von 0,8 mg/m³. Bei der Korrelation der Staubwerte mit Endotoxin, β-1,3-Glukan und den Milbenantigenen zeigte sich eine moderate, aber signifikante Korrelation (**Bild 2**).

3.2 Gesamtschimmelpilze

Mit Ausnahme einer Referenzprobe enthielten alle Proben kultivierbare Schimmelpilze. Die niedrigsten Konzentrationen fanden sich in der Außenluft (Median der 19 messbaren Proben: 564 KBE/m³), gefolgt von den Werten der personengetragenen Probenahme am Lader (Median: 76 190 KBE/m³, Maximum: 357 142 KBE/m³). Um fast eine Zehnerpotenz höher lagen die Werte an der Schüttung (Median: 501 978 KBE/m³, Maximum 3 048 079 KBE/m³). Eine Abhängigkeit zwischen der Gesamtschimmelpilzkonzentration und der parallel ermittelten Staubkonzentration war jedoch nur tendenziell erkennbar (**Bild 3**). Lediglich, wenn die Proben mit Staubkonzentrationen unterhalb der Bestimmungsgrenze (LOD) miteinbezogen wurden, gab es eine signifikante Korrelation. Deutlich dagegen war ein Zusammenhang der Gesamtschimmelpilzkonzentration mit Endotoxinen und insbesondere mit β-1,3-Glukan.

3.3 Endotoxine

Endotoxinaktivität wurde in allen Staubproben mit einem chromogen-kinetischen LAL-Test bestimmt. In der Außenluft erreichte die Endotoxinkonzentration maximal 1,6 EU/m³ bei einem Medianwert von 0,7 EU/m³. Am Lader konnte maximal eine Endotoxinkonzentration von 7,4 EU/m³ bei einem Medianwert von 6,3 EU/m³ ermittelt werden. Deutlich höher war die Konzentration im Bereich der Schüttung mit maximal 176,6 EU/m³ und einem Medianwert von 15,1 EU/m³. Zwischen der Endotoxin- und

Tabelle 1. Ermittelte Staub-, Endotoxin- und Antigen-Konzentrationen.

		Staub in mg/m ³	Endo- toxin, LAL-Test (Charles- River) in EU/m ³	Asper- gillus- fumi- gatus- Antigen in ng/m ³	Asper- gillus- versi- color- Antigen in ng/m ³	Peni- cillium- chryso- genum- Antigen in ng/m ³	Clados- porium- Antigen in ng/m ³	Eurotium- amstelo- dami- Antigen in ng/m ³	Walle- mia- sebi- Antigen in ng/m ³	β-1,3- Glukan- Antigen in ng/m ³	Domes- tic-mite- Antigen in ng/m ³
Referenz	n = 19										
Anzahl		5	19	0	0	0	9	0	0	19	1
Mittel- wert		0,3	0,8				0,5			6,8	1,8
Median		0,2	0,7				0,4			5,4	1,8
95-Per- zentil		0,7	1,6				1,0			14,1	1,8
Minimal- wert		0,1	0,3				0,1			3,1	1,8
Maximal- wert		0,8	1,6				1,1			14,8	1,8
Lader	n = 25										
Anzahl		10	25	2	1	1	18	22	0	25	15
Mittel- wert		0,7	9,9	12,6	1,4	1,9	4,3	2,4		42,2	3,4
Median		0,6	6,3	12,6	1,4	1,9	1,3	2,0		38,8	1,0
95- Perzentil		0,9	33,1	12,6	1,4	1,9	10,9	4,5		62,2	12,4
Minimal- wert		0,5	1,8	12,5	1,4	1,9	0,6	1,2		9,7	0,4
Maximal- wert		1,1	57,4	12,6	1,4	1,9	51,3	5,2		243,9	30,7
Schüttung	n = 50										
Anzahl		49	50	10	24	32	49	50	8	50	47
Mittel- wert		1,3	27,4	10,4	1,2	2,9	4,0	8,3	12,5	154,4	5,4
Median		0,8	15,1	7,9	1,0	1,7	3,0	5,5	8,9	107,0	3,4
95- Perzentil		3,1	142,1	25,8	2,6	8,4	9,8	26,8	29,0	502,1	18,4
Minimal- wert		0,2	3,0	2,0	0,4	0,7	0,3	1,3	4,3	3,2	0,3
Maximal- wert		5,5	176,6	35,8	4,9	23,1	18,5	51,9	35,3	663,8	33,1
Umlade- halle	n = 1	4,7	33,7	4,6	1,0	3,7	3,9	10,3		251,0	16,1
Gesamt	n = 95										
Anzahl		65	95	13	26	34	77	73	8	95	64
Mittel- wert		1,1	17,4	10,2	1,2	2,9	3,7	6,6	12,5	95,4	5,1
Median		0,7	8,4	10,2	1,0	1,7	2,0	4,1	8,9	41,5	2,6
95- Perzentil		3,1	60,9	22,5	2,4	8,3	9,6	22,5	29,0	362,8	18,9
Minimal- wert		0,1	0,3	2,0	0,4	0,7	0,1	1,2	4,3	3,1	0,3
Maximal- wert		5,5	176,6	35,8	4,9	23,1	51,3	51,9	35,3	663,8	33,1

der Staubkonzentration gab es eine signifikante Korrelation (Bild 2).

3.4 β-1,3-Glukan

Der Nachweis von β-1,3-Glukan gelang in allen Proben. In der Außenluft betrug die Konzentration als Median

5,4 ng/m³ und als 95-Perzentil 14,1 ng/m³. Am Lader betrug der Medianwert 38,8 ng/m³ und der 95-Perzentilwert 62,2 ng/m³, im Bereich der Schüttung 107,0 ng/m³ als Median und 502,1 ng/m³ als 95-Perzentil. Bild 2 zeigt ein heterogenes Verteilungsmuster mit leicht ansteigender Tendenz des Antigens im Vergleich zur Staubmenge. Eine

Tabelle 2. Konzentrationen der parallel ermittelten kultivierbaren Schimmelpilze.

		Staub in mg/m ³	Gesamt- schimmel- pilze in KBE/m ³	<i>Aspergillus fumigatus</i> in KBE/m ³	<i>Aspergillus versicolor</i> in KBE/m ³	<i>Penicillium spp.</i> in KBE/m ³	<i>Clados- porium spp.</i> in KBE/m ³	<i>Eurotium spp.</i> in KBE/m ³	<i>Wallemia sebi</i> in KBE/m ³
Referenz	n = 20								
Anzahl		5,0	19	6	2	16	16	2	0
Mittelwert		0,3	2 653	671	53	1 636	495	71	
Median		0,2	564	202	53	167	296	71	
95- Perzentil		0,7	7 089	2 416	70	6 237	1 509	99	
Minimal- wert		0,1	41	46	34	40	23	39	
Maximal- wert		0,8	34 215	3 104	72	22 927	2 813	102	
Lader	n = 25								
Anzahl		10	25	17	0	25	16	5	2
Mittelwert		0,7	99 043	48 813		73 485	2 250	1 390	784
Median		0,6	76 190	3 581		71 428	1 957	1 523	784
95- Perzentil		0,9	271 884	200 978		147 425	4 915	1 971	805
Minimal- wert		0,5	14 707	238		12 899	226	807	761
Maximal- wert		1,1	357 142	317 460		186 179	7 160	2 057	807
Schüttung	n = 50								
Anzahl		49	50	37	1	49	22	14	3
Mittelwert		1,3	644 102	152 105	7 527	481 054	14 431	32 533	8 103
Median		0,8	501 978	24 603	7 527	433 996	8 053	7 839	924
95- Perzentil		3,1	1 390 494	602 112	7 527	939 475	40 296	146 533	20 998
Minimal- wert		0,2	16 746	90	7 527	6 296	79	821	158
Maximal- wert		5,5	3 048 079	902 406	7 527	2 875 546	48 221	273 163	23 228
Umlade- halle	n = 1	4,7	818 342			768 959	28 218		
Gesamt	n = 96								
Anzahl		65	95	60	3	91	55	21	5
Mittelwert		1,1	374 210	107 696	2 544	287 955	7 084	22 026	5 176
Median		0,7	149 176	8 792	72	117 216	2 258	6 493	807
95- Perzentil		3,1	1 136 464	510 706	6 782	860 585	30 827	78 347	18 767
Minimal- wert		0,1	41	46	34	40	23	39	158
Maximal- wert		5,5	3 048 079	902 406	7 527	2 875 546	48 221	273 163	23 228

deutliche Korrelation zeigt sich im Verhältnis zu den Gesamtschimmelpilzen (Bild 3).

3.5 *Aspergillus-fumigatus*-Antigene

Antigene von *Aspergillus fumigatus* konnten nur in zwölf von 95 Fällen nachgewiesen werden (Tabelle 1). In der Außenluft lagen die Werte unter der Bestimmungsgrenze und auch am Lader wurden nur zwei Werte in Höhe von 12,5 ng/m³ bestimmt. In 23 von 25 Fällen lag die Konzentration für *Aspergillus-fumigatus*-Antigene am Lader somit unter der Bestimmungsgrenze von im Mittel 12 ng/m³ (bei zwei Stunden Sammelzeit mit Flussraten von 3,5 l/min). Bei

der stationären Sammlung an der Schüttung mit einer mittleren Bestimmungsgrenze von 4,2 ng/m³ (bei zwei Stunden Sammelzeit mit Flussraten von 10 l/min) wurde das Antigen siebenmal bei der Sammlung von Bioabfall in einer Größenordnung von mehr als 10 ng/m³ und sechsmal bei der Haus-/Restmüllsammung ermittelt, wobei die Konzentration hier fünfmal unter 10 ng/m³ lag.

Wie man Tabelle 2 entnehmen kann, konnte *Aspergillus fumigatus* deutlich häufiger kultiviert werden. Insgesamt gelang der Nachweis in 60 von 96 Fällen, die ermittelten Schimmelpilzkonzentrationen lagen zwischen 46 und 902 406 KBE/m³. Hierbei ist jedoch anzumerken, dass die

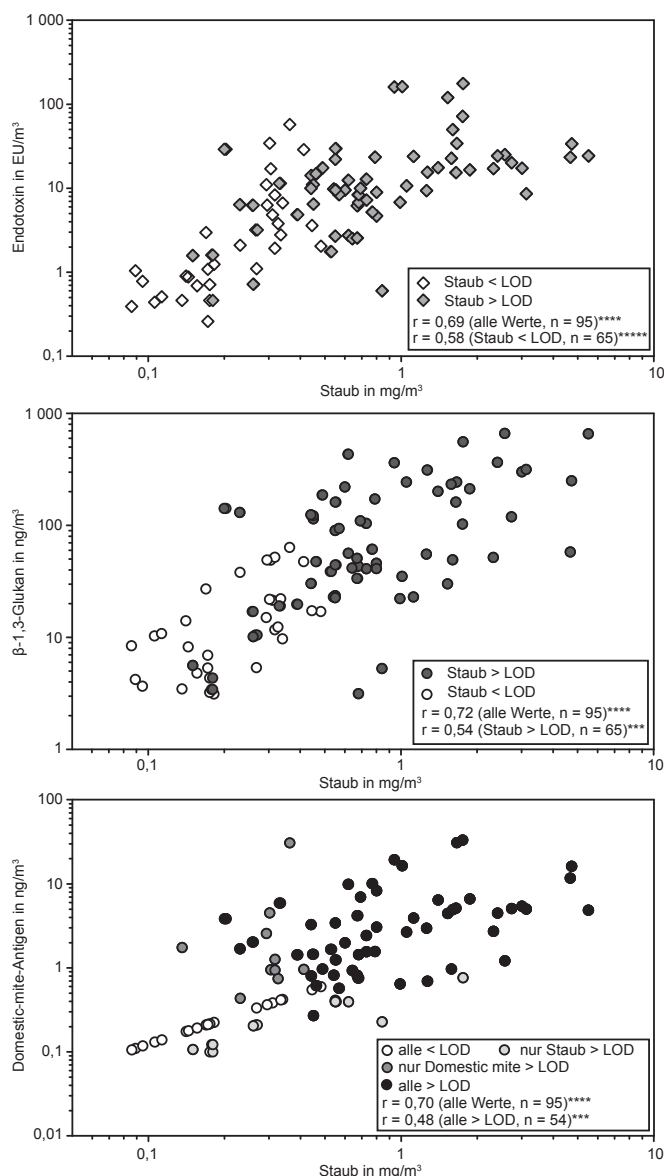


Bild 2. Endotoxin-, β -1,3-Glucan- und Domestic-mite-Antigene im Vergleich zu einatembarem Staub.

Kultivierung von *Aspergillus fumigatus* nicht immer gelang, da die Kulturen häufig von *Chrysomya sitophila* überwuchert wurden [1]. Die Konzentrationen der 17 positiven Proben am Lader betrugen als Median 3 581 KBE/m⁵ und als 95-Perzentil 200 978 KBE/m⁵ sowie im Bereich der Schüttung als Median der 37 positiven Proben 24 603 KBE/m⁵ und als 95-Perzentil 602 112 KBE/m⁵.

Wie Bild 4 zeigt, ist ein Rückschluss auf die auftretenden Antigenkonzentrationen in Abhängigkeit von der Konzentration kultivierbarer Schimmelpilze nicht möglich.

3.6 *Aspergillus-versicolor*-Antigene

In der Außenluft wurden Antigene von *Aspergillus versicolor* nicht nachgewiesen und auch am Lader nur einmal. Im Bereich der Schüttung lag die Konzentration in 24 von 50 Fällen zwischen 0,4 und 4,9 ng/m⁵ bei einem Medianwert von 1,0 ng/m⁵. Zu deutlich weniger Ergebnissen führte dagegen die Kultivierung. Hier gelang der Nachweis von *Aspergillus versicolor* nur zweimal in der Außenluft mit 34 und 72 KBE/m⁵ und einmal im Bereich der Schüttung mit 7 527 KBE/m⁵.

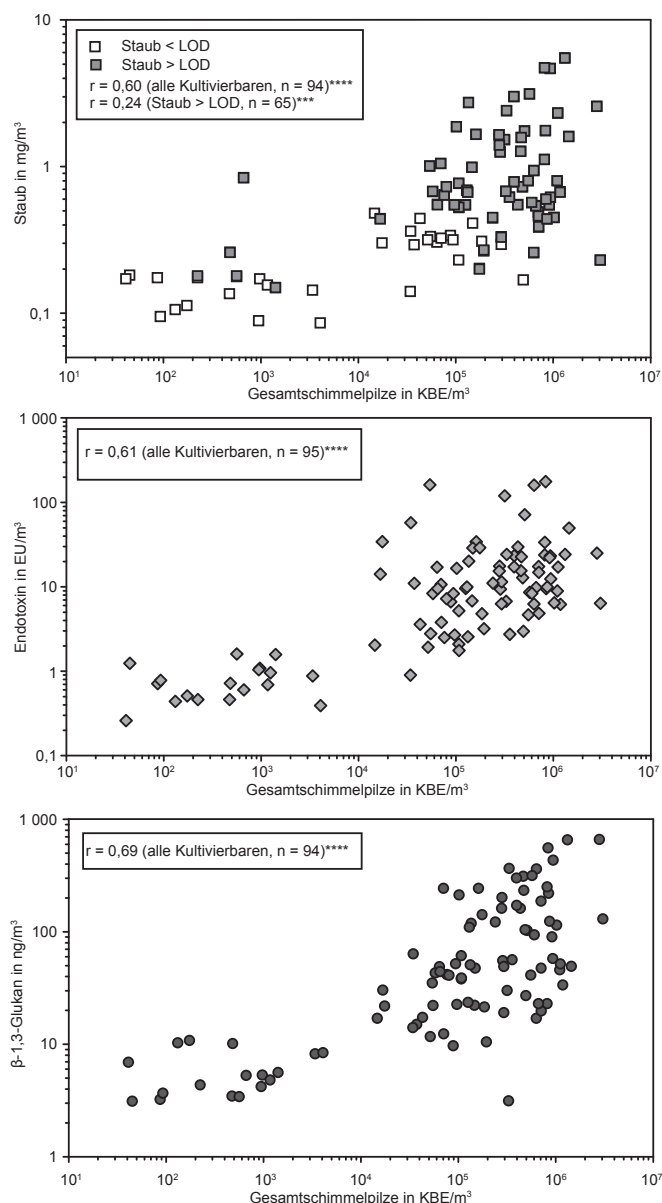


Bild 3. Einatembare Staub, Endotoxin und β -1,3-Glucan im Vergleich zur Konzentration der kultivierbaren Gesamtschimmelpilze.

3.7 *Penicillium-chrysogenum*-Antigene

Auch *Penicillium-chrysogenum*-Antigene wurden nur einmal am Lader mit 1,9 mg/m⁵ nachgewiesen. In 24 Fällen lag die Konzentration demnach unter der Bestimmungsgrenze von im Mittel 1,8 ng/m⁵ (bei zwei Stunden Sammelzeit mit 3,5 l/min). Dagegen konnten *Penicillium*-Spezies in jeder der Proben kultivierbarer Schimmelpilze nachgewiesen werden. Die Konzentration am Lader betrug 71 428 KBE/m⁵ als Median und 147 425 KBE/m⁵ als 95-Perzentil.

Häufiger gelang der Antigennachweis mit 32 von 50 Fällen dagegen im Bereich der Schüttung. Die mittlere Bestimmungsgrenze bei zwei Stunden Sammelzeit mit 10 l/min betrug hier 0,67 ng/m⁵. Der Median der messbaren Proben lag bei 1,7 ng/m⁵ und das 95-Perzentil bei 8,4 ng/m⁵. Hier wurden *Penicillium*-Arten in 49 von 50 Proben kultiviert. Die Konzentrationen betrugen 433 996 KBE/m⁵ als Median und 939 475 KBE/m⁵ als 95-Perzentilwert.

Insgesamt konnten *Penicillium-chrysogenum*-Antigene zehnmal bei der Sammlung von Bioabfall mit einem

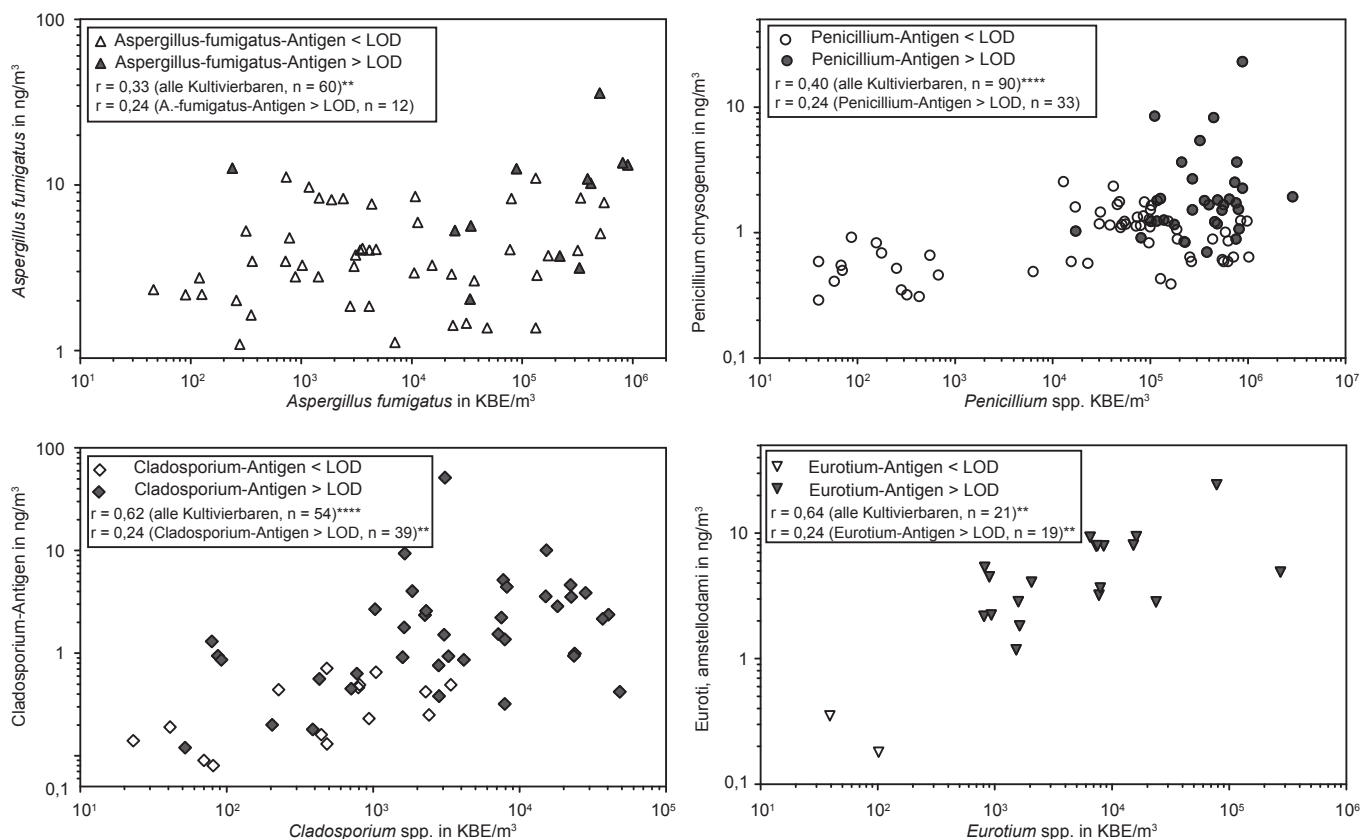


Bild 4. Antigenkonzentrationen der Schimmelpilze *Aspergillus fumigatus*, *Penicillium*, *Cladosporium* und *Eurotium amstelodami* im Vergleich zu den parallel ermittelten kultivierbaren Schimmelpilzen der gleichen Spezies oder Gattungen.

Medianwert von 3,2 ng/m³ und 23-mal bei der Haus- und Restmüllsammlung mit einem Medianwert von 1,9 ng/m³ nachgewiesen werden. In 33 Fällen gelang der parallele Nachweis von Antigen und kultivierbaren Schimmelpilzen. Nachweisbares Antigen konnte nur in Proben mit mindestens 10⁴ KBE/m³ gefunden werden. Eine steigende Tendenz der Antigene im Verhältnis zu den kultivierbaren Schimmelpilzen ist bei Berücksichtigung der Proben unterhalb der Bestimmungsgrenze für Antigene zu finden, für die doppelt Positiven jedoch nicht signifikant (Bild 4).

3.8 Cladosporium-Antigene

Vergleichsweise häufig wurden Antigene der Gattung *Cladosporium* nachgewiesen. In der Außenluft wurde es in neun von 20 Fällen mit einem Medianwert der positiven Werte von 0,4 ng/m³ und einem 95-Perzentilwert von 1,0 ng/m³ gefunden. In 16 von 20 Fällen gelang hier der Nachweis durch Kultivierung. Der Medianwert lag bei 296 KBE/m³ und das 95-Perzentil bei 1 509 KBE/m³.

Die Konzentration der Antigene am Lader betrug in 18 von 25 Fällen 1,3 ng/m³ als Median und 10,9 ng/m³ als 95-Perzentilwert. Hier konnten *Cladosporium*-Arten in 16 von 20 Fällen in vergleichsweise geringer Konzentration kultiviert werden. Der Medianwert betrug 1 957 KBE/m³ und das 95-Perzentil 4 915 KBE/m³.

An der Schüttung lag der Medianwert des Antigens bei 2,0 ng/m³ und das 95-Perzentil bei 9,6 ng/m³, wobei der Nachweis in 49 von 50 Probenahmen gelang. Kultiviert wurde es jedoch nur in 22 von 50 Fällen mit einem Medianwert von 8 053 KBE/m³ und 40 296 KBE/m³ als 95-Perzentil. Die Korrelation zwischen den Antigenen und den kultivierbaren *Cladosporien* war signifikant und der Korrelations-

koeffizient für die 39 doppelt positiven Proben lag bei 0,5 (Bild 4).

3.9 Eurotium-amstelodami-Antigene

Die Antigene von *Eurotium amstelodami* wurden in 22 von 25 Fällen am Lader nachgewiesen. Der Medianwert betrug 2,0 ng/m³ und das 95-Perzentil 4,5 ng/m³. Im Bereich der Schüttung gelang der Nachweis in allen Proben. Der Medianwert betrug 5,5 ng/m³ und 26,8 ng/m³ als 95-Perzentil.

Vergleichsweise gering sind dagegen die Nachweise aus den Proben kultivierbarer Schimmelpilze. Hier gelang der Nachweis der Gattung *Eurotium* nur fünfmal am Lader in einem niedrigen Konzentrationsbereich zwischen 807 und 2 057 KBE/m³ sowie in 14 von 50 Fällen im Bereich der Schüttung mit einem Medianwert von 7 839 und 146 533 KBE/m³ als 95-Perzentilwert. Die parallel gewonnenen Werte zeigen eine signifikante Korrelation zwischen den Antigenen und den kultivierbaren Eurotien (Bild 4).

3.10 Wallemia-sebi-Antigene

Das Antigen von *Wallemia sebi* konnte nur in geringer Zahl mit acht von 50 Proben im Bereich der Schüttung nachgewiesen werden. Der Medianwert der acht positiven Proben betrug 8,9 ng/m³ und das 95-Perzentil 29,0 ng/m³. Bei der Kultivierung wurde *Wallemia sebi* nur in drei von 50 Fällen zwischen 158 und 23 228 KBE/m³ identifiziert. Darüber hinaus gelang zweimal der Nachweis am Lader in einer Konzentration von ca. 800 KBE/m³. Zwischen den Proben mit *Wallemia-sebi*-Antigen und den kultivierbaren Proben gab es keine Übereinstimmung.

3.11 Domestic-mite-Antigen

Domestic-mite-Antigene wurden einmal in der Außenluft, 15-mal am Lader und 47-mal im Bereich der Schüttung nachgewiesen. Der Median der 15 positiven Proben am Lader betrug $1,0 \text{ ng/m}^3$, das 95-Perzentil $12,4 \text{ ng/m}^3$. Im Bereich der Schüttung lag der Median bei $3,4 \text{ ng/m}^3$ und das 95-Perzentil bei $18,4 \text{ ng/m}^3$. In 54 von 96 Fällen konnte das Antigen mit der Staubmenge verglichen werden. In der Tendenz ist eine steigende Antigenkonzentration mit Anstieg der Staubkonzentration erkennbar, wenngleich ein eindeutiger Zusammenhang nicht zu verzeichnen ist (Bild 2). Ein Vergleich mit Gesamtschimmelpilzen war in 64 von 96 Fällen möglich, wobei keine tendenzielle Abhängigkeit erkennbar war (Daten nicht gezeigt).

4 Diskussion

4.1 Einatembare Staub

Die Ergebnisse der Messungen von einatembarem Staub können mit einer Studie aus dem Jahr 2000 verglichen werden. Seinerzeit wurden Maximalwerte am Lader von $0,78$ und $2,6 \text{ mg/m}^3$ im Bereich der Schüttung ermittelt [9]. Der Vergleich mit den Werten dieser Studie zeigt, dass sich die Staubkonzentrationen an den Arbeitsplätzen in der Abfallsammlung nicht verändert haben. Eine Überschreitung des Arbeitsplatzgrenzwertes in Höhe von 10 mg/m^3 ist jedoch nicht zu befürchten [10]. Auch Feinstaubbelastungen und Belastungen durch Metallstäube wurden in einer weiteren Studie der damaligen Zeit nicht als problematisch angesehen [11].

Entsprechend sind auch die Ergebnisse einer niederländischen Studie [12]. Hier wurden von Juli bis September 1997 in vier niederländischen Städten an 78 Müllladern bei der Sammlung verschiedener Abfallarten im Bereich der Hausmüllentsorgung personengetragene Messungen durchgeführt. Die Verfahrensweise war mit der eigenen Studie vergleichbar, allerdings wurden die Proben über die gesamte Arbeitsschicht gesammelt. Insgesamt wurden 85 Proben genommen. Die geometrischen Mittelwerte lagen je nach Abfallart zwischen $0,6$ und $0,8 \text{ mg/m}^3$. Die Maximalwerte waren zum Teil deutlich höher: je nach Abfallart zwischen $5,2$ und $9,1 \text{ mg/m}^3$. Dies mag an Unterschieden in der technischen Ausstattung der Sammelfahrzeuge liegen, die im Detail nicht beschrieben ist.

In der gleichen Größenordnung wie die hier am Lader gemessenen lagen die Staubwerte an verschiedenen Arbeitsplätzen auf Kompostierungsanlagen [13]. Dies betraf insbesondere die Arbeitsplätze in Sortierkabinen (Maximalwert: $0,6 \text{ mg/m}^3$) und Radladerkabinen (Maximalwert: $1,3 \text{ mg/m}^3$). Gleiches gilt für die Referenzwerte (Maximalwert: $0,2 \text{ mg/m}^3$). Höher waren die Werte zum Teil allerdings im Bereich der Anlieferung, der Mieten und beim Schreddern (Mediane zwischen $0,3$ und $2,3 \text{ mg/m}^3$). Hier wurden mit $56,1 \text{ mg/m}^3$ (Mieten) und $39,4 \text{ mg/m}^3$ (Schreddern) auch die höchsten Maximalwerte ermittelt. Die Probenahme war in diesem Fall jedoch nicht personenbezogen und erfolgte mit einem Volumenstrom von 10 l/min . Die Analytik war identisch mit der hier beschriebenen.

4.2 Endotoxine

Neben den Schimmelpilzen ist auch Endotoxin ein wichtiges Agens bei der Entstehung von Atemwegsbeschwerden [14]. Ein Zusammenhang von Atemwegserkrankungen und

Endotoxinexposition konnte in zahlreichen Studien hergeleitet werden (siehe Übersicht in [15]).

Die hier gemessenen Endotoxinkonzentrationen lassen sich mit den unter gleichen Probenahmebedingungen gewonnenen aus den Jahren 1998 und 1999 vergleichen [16; 17]. Die Quantifizierung erfolgte jeweils mit einem chromogen-kinetischen LAL-Assay und die Extraktion erfolgte ohne das Detergens Tween 20. Die Mittelwerte in der Außenluft lagen seinerzeit bei $1,77 \text{ EU/m}^3$ im Sommer und $0,46 \text{ EU/m}^3$ im Winter, insofern in der gleichen Höhe wie die hier ermittelten Außenluftwerte. Auch die Werte am Lader sind vergleichbar. Sie lagen seinerzeit zwischen $10,9$ und 24 EU/m^3 bei Sammlungen in Einfamilienhaus- und Zweifamilienhausgebieten sowie 19 und 44 EU/m^3 bei der Sammlung in Mehrfamilienhausgebieten. Deutlich niedriger waren die Werte im Winter in einem Bereich zwischen $2,3$ und $5,9 \text{ EU/m}^3$. Die Werte in Städten, die auch an dieser Studie beteiligt waren, lagen zwischen $2,9$ und 35 EU/m^3 in Einfamilienhaus- und Zweifamilienhausgebieten sowie zwischen 11 und 61 EU/m^3 in Mehrfamilienhausgebieten. Im Herbst waren die Werte deutlich niedriger mit einer Spanne von $0,46$ und $4,93 \text{ EU/m}^3$. Die Werte liegen insofern in der gleichen Größenordnung wie in dieser Studie mit Werten zwischen $1,8$ und $57,4 \text{ EU/m}^3$ bei einem Medianwert von $6,3 \text{ EU/m}^3$.

Auch zeigt sich, wie seinerzeit beschrieben [9], ein statistischer Zusammenhang zwischen der Endotoxinkonzentration und der Konzentration von einatembarem Staub.

Endotoxinkonzentrationen bei der Abfallsammlung wurden auch in einer niederländischen Studie ermittelt [12]. Hier lagen die Werte von 84 Proben am Lader je nach Abfallart im geometrischen Mittel zwischen 48 und 66 EU/m^3 . Auch die Maximalwerte waren zum Teil sehr hoch und erreichten 7182 EU/m^3 bei der Sammlung von Hausmüll. Die Werte sind jedoch nicht unmittelbar mit den in dieser Studie ermittelten Ergebnissen vergleichbar, da sich die Analytik sowohl hinsichtlich des Assays als auch hinsichtlich der Extraktionsmethode von der hier verwendeten unterscheidet. Wesentlich ist vor allem der Zusatz von Detergens (Tween) zur Extraktion der Filter in der niederländischen Studie. Endotoxinaktivitäten, die nach Extraktion in Gegenwart des Detergens Tween gemessen werden, fallen um ein Vielfaches höher aus als in dessen Abwesenheit [18].

Insgesamt ist festzustellen, dass die hier ermittelten Endotoxinkonzentrationen im Vergleich zu anderen durch Bioaerosole belasteten Arbeitsbereichen vergleichsweise niedrig sind [14]. Darüber hinaus ist feststellbar, dass sich seit den 1990er-Jahren keine wesentlichen Änderungen in der Belastungshöhe ergeben haben – ein Ergebnis, das auch bereits in den Untersuchungen der Gesamtschimmelpilzkonzentration zum Ausdruck kam [1].

4.3 Schimmelpilz-Antigene und kultivierbare Schimmelpilze

Für Schimmelpilze, die in hoher Konzentration in der Kultivierung nachgewiesen wurden, konnten nur geringe Antigenkonzentrationen ermittelt werden. So wurde das Antigen von *Aspergillus fumigatus* am Lader nur zweimal über der Bestimmungsgrenze von im Mittel 12 ng/m^3 nachgewiesen. In der überwiegenden Zahl der Fälle lag die Konzentration des Antigens somit darunter. Gleiches gilt auch für das Antigen von *Penicillium chrysogenum*. Dieses wurde am Lader nur einmal nachgewiesen. Die meisten Werte lagen somit unter $1,8 \text{ ng/m}^3$. Die Konzentrationen für die

kultivierbaren Schimmelpilze lagen für *Aspergillus fumigatus* und die Gattung *Penicillium* im Median in der Größenordnung von 10^5 und 10^5 KBE/m⁵. Demgegenüber sind die Antigene der Gattungen *Cladosporium* und *Eurotium* am Lader im Vergleich zu den anderen Schimmelpilzantigenen häufiger und in höherer Konzentration nachgewiesen, wenngleich sie nur in 16 bzw. fünf Fällen und in niedriger Konzentration (maximal 10^5 KBE/m⁵) kultiviert werden konnten.

Dies mag einerseits darauf zurückzuführen sein, dass *Cladosporium*-Arten recht große Konidien mit entsprechend hohem Gewicht und Antigengehalt aufweisen. Für die Analytik im ELISA (enzyme linked immuno sorbent assay) genügten knapp tausend *Cladosporium*-Zellen, um die Nachweisgrenze des Assays von 0,05 ng Protein pro ml zu überschreiten, während für *Penicillium* und *Aspergillus fumigatus* über 10^5 Zellen pro ml benötigt wurden [6]. Andererseits ist es auch möglich, dass *Penicillium*- und *Aspergillus*-Arten bei der Kultivierung schneller wachsen als andere Arten, sodass sich *Cladosporium*- und *Eurotium*-Arten nicht entsprechend entwickeln können.

Auch in der Studie auf Kompostierungsanlagen [13] waren die Nachweise für die Antigene von *Aspergillus fumigatus*, *Aspergillus versicolor* und *Penicillium chrysogenum* selten und lagen auf niedrigem Niveau. Dies gilt insbesondere für die Sortier- und Radladerkabinen. Hier lagen die Messwerte im Mittel niedriger als die am Lader. Analog zu den Messwerten im Bereich der Schüttung ergaben sich häufigere Nachweise und höhere Werte an den höher belasteten Messstellen im Bereich der Anlieferung, der Mieten und am Schredder. *Cladosporium*-Antigene wurden allerdings auch hier häufig nachgewiesen. Auch dort korrelierten die Antigenkonzentrationen moderat mit den kultivierbaren Schimmelpilzen.

4.4 β -1,3-Glukan

Es existieren zahlreiche Studien über die inhalative Aufnahme von β -1,3-Glukan, die die Vermutung nahelegen, dass es ein wichtiges Agens für die Entwicklung von Atemwegsbeschwerden inflammatorischer und allergischer Natur ist [19]. Als Bestandteil in Zellwänden von Schimmelpilzen und einigen Pflanzen ist es in vielen Bereichen der Abfallwirtschaft anzutreffen. So wurde β -1,3-Glukan-Antigen auch auf Kompostierungsanlagen in jeder Probe nachgewiesen [13]. Die Referenzwerte in der Außenluft entsprechen mit einem Medianwert von 5,2 ng/m⁵ denen bei der Müllsammlung. Die Messwerte in der Sortierkabine, im Radlader, im Bereich der Anlieferung, der Mieten und bei der Weiterverarbeitung sind mit Medianwerten von bis zu 21 ng/m⁵ allerdings niedriger als die am Mülllader in Höhe von 38,8 ng/m⁵. Nur am Schredder wurde dieser Medianwert mit 54,2 ng/m⁵ übertroffen. Die Medianwerte liegen jedoch sämtlich unter denen im Bereich der Schüttung des Müllfahrzeugs. Dies ist ein Indiz dafür, dass die β -1,3-Glukan-Antigen-Konzentration nicht nur vom Schimmelpilzgehalt des Bioaerosols abhängt, sondern auch von anderen organischen Bestandteilen im Abfall.

In einer Studie aus den Niederlanden [14] lagen die Messwerte für β -1,3-Glukan deutlich höher als die nach der hier beschriebenen Methode gewonnenen Messwerte. Die Wertespanne von 84 Proben bei der Sammlung von Haus-, Rest- und Biomüll lag zwischen < 0,26 und 30,75 μ g/m⁵. Die Medianwerte lagen je nach Abfallart zwischen 1,47 und

1,63 μ g/m⁵. Sie waren somit ca. 250-mal höher als der Medianwert am Lader aus dieser Studie. In einer Übersichtsarbeit von Rylander [19] werden Messwertspannen für den Bereich der Abfallsammlung von 10,8 bis 36,4 ng/m⁵ im Limulustest und für den Bereich der Abfallbehandlung von 2,0 bis 16,0 μ g/m⁵ im immunologischen Test angegeben. Die β -Glukan-Werte in der hier vorgestellten Studie liegen damit im Bereich der Bestimmung im Limulustest und differieren zu den Ergebnissen immunologischer Testmethoden anderer Arbeitsgruppen.

Dazu ist anzumerken, dass in einem Ringversuch zur Messung von β -1,3-Glukan mit verschiedenen Methoden in verschiedenen Labors die Werte hohe signifikante Abweichungen voneinander zeigten [20]. Ein Vergleich von β -1,3-Glukan-Messwerten ist daher nur bei einheitlichen Methoden möglich. Eine Abstimmung der Methoden wäre daher wünschenswert.

Wegen der signifikanten Korrelation von β -1,3-Glukan-Messwerten mit denen von Gesamtschimmelpilzen könnte dann auch β -1,3-Glukan neben den Gesamtschimmelpilzen und Endotoxinen als Marker zur Beurteilung der Belastung durch Bioaerosole und somit zur Beurteilung von Schutzmaßnahmen herangezogen werden.

4.5 Milbenantigene

Im Vergleich zu den *Aspergillus*- und *Penicillium*-Antigenen wurden Milbenantigene (Domestic mite) häufig nachgewiesen. Neben den Schimmelpilzantigenen, β -1,3-Glukan und dem Endotoxin ist es somit ein weiteres wichtiges Agens in Verbindung mit Atemwegsbeschwerden, das bei der Abfallsammlung beachtet werden sollte. In der Außenluft von Kompostierungslagen [14] ließen sich Domestic-mite-Antigene ebenso wie in dieser Studie nur einmal in Höhe von 1,3 ng/m⁵ nachweisen. In der Außenluft sind die Staubkonzentrationen allerdings ebenfalls sehr niedrig. Auch an den sonstigen Messstellen wurden sie nur beim Schreddern und bei der Weiterverarbeitung in mehr als 50 % der Proben nachgewiesen. Die Medianwerte erreichten maximal 2,6 ng/m⁵ beim Schreddern, ansonsten lagen sie unter 2 ng/m⁵. In Einzelfällen wurden jedoch hohe Konzentrationen ermittelt: So lag der Maximalwert beim Schreddern bei 1 976 ng/m⁵. Bei Arbeiten im Haushalt wurden Domestic-mite-Antigene mit einem Medianwert aus 16 personengetragenen Probenahmen in Höhe von 1,4 ng/m⁵ ermittelt [21]. Der Maximalwert betrug 34,6 ng/m⁵. Probenahme und Analytik waren identisch mit den hier beschriebenen. Die Werte bei der Abfallsammlung lagen mit einem Maximalwert von 33,1 ng/m⁵ und Medianen von 1 ng/m⁵ am Lader und 3,4 ng/m⁵ im Bereich der Schüttung ähnlich wie im häuslichen Lebensumfeld.

5 Zusammenfassung

Die Sammlung und Kultivierung von Schimmelpilzen ist ein bewährtes und lang praktiziertes Verfahren zur Beurteilung der Schimmelpilzbelastung und der Wirkung von Schutzmaßnahmen an Arbeitsplätzen. Unter dem Aspekt der sensibilisierenden Wirkung von Schimmelpilzen ist die Methode jedoch nur bedingt aussagekräftig, da nur kultivierbare Schimmelpilze in das Ergebnis eingehen. Abgestorbene Schimmelpilze finden keinen Eingang in die Beurteilung und ein Rückschluss auf die Belastungshöhe durch das sensibilisierende Antigen ist so nicht möglich. Es ist

somit von Interesse, mehr über Antigene an Arbeitsplätzen in Erfahrung zu bringen und Rückschlüsse auf das Verhältnis zu den kultivierbaren Schimmelpilzen zu ziehen. Im Rahmen dieser Studie wurden bei der Müllsammlung personengetragene und stationäre Messungen im Bereich der Schüttung durchgeführt. Parallel zu den kultivierbaren Schimmelpilzen wurden die Konzentrationen von einatembarem Staub, Endotoxinen und die Antigene diverser Schimmelpilz- und Milbenspezies (*Domestic mites*) sowie β -1,3-Glukan ermittelt. Der Arbeitsplatzgrenzwert für einatembaren Staub wurde nicht überschritten. Die nachweisbare Endotoxinaktivität ist in anderen bioaerosolbelasteten Arbeitsbereichen deutlich höher. Ferner ist festzustellen, dass für die Schimmelpilze, die häufig und in teilweise hoher Konzentration in der Kultivierung nachgewiesen wurden, wie z. B. *Aspergillus fumigatus* oder *Penicillium* spp., die Antigenkonzentrationen häufig unter der Nachweisgrenze der Verfahren lag. Demgegenüber wurden die Antigene der Gattungen *Cladosporium* und *Eurotium* am Lader im Vergleich zu den anderen Schimmelpilzantigenen häufiger und in höherer Konzentration nachgewiesen,

wenngleich sie seltener und in niedriger Konzentration kultiviert werden konnten. Insgesamt ist der Konzentrationsbereich für Schimmelpilzantigene in der Größenordnung ng/m³ jedoch als niedrig anzusehen.

β -1,3-Glukan wurde in allen Proben nachgewiesen. Die Messwerte sind höher als in vielen Bereichen von Kompostierungsanlagen. Eine erhöhte Konzentration der *Domestic mite*-Antigene im Vergleich zum häuslichen Lebensumfeld wurde bei der Abfallsammlung nicht festgestellt. Abschließend ist festzustellen, dass β -1,3-Glukan auch neben den Gesamtschimmelpilzen und Endotoxinen als Marker zur Beurteilung der Belastung durch Bioaerosole und somit zur Beurteilung von Schutzmaßnahmen herangezogen werden kann. Durch Bestimmung der Antigene von Schimmelpilzen lassen sich zukünftig ggf. Informationen zum sensibilisierenden Potenzial der Schimmelpilze und somit zur Sensibilisierungsgefahr bei Tätigkeiten mit Schimmelpilzen erhalten. Hier besteht jedoch noch weiterer Forschungsbedarf, insbesondere unter dem Aspekt der Harmonisierung der Methoden.

Literatur

- [1] Neumann, H.-D.; Buxtrup, M.; Klus, K.: Schimmelpilzbelastungen bei der Abfallsammlung – Eine stichprobenhafte Bestandsaufnahme und Rückblick. *Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft* 74 (2014) Nr. 11-12, S. 483-491.
- [2] Mattenklott, M.: Einatembare Fraktion (Kennzahl 7284). In: IFA-Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffen. 31. Lfg. X/2003. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin. Berlin: Erich Schmidt – Losebl.-Ausg. 1989.
- [3] Liebers, V.; Stubel, H.; Düser, M.; Brüning, T.; Raulf-Heimsoth, M.: Standardization of whole blood assay for determination of pyrogenic activity in organic dust samples. *Int. J. Hyg. Environ. Health* 212 (2009), S. 547-556.
- [4] Technische Regel für Biologische Arbeitsstoffe/Technische Regel für Gefahrstoffe: Sensibilisierende Stoffe für die Atemwege (TRBA/TRGS 406). Ausg. 6/2008. GMBL (2008) Nr. 40/41, S. 845-855; zul. geänd. GMBL (2009) Nr. 12-14, S. 254.
- [5] Sander, I.; Zahradnik, E.; van Kampen, V.; Kespohl, S.; Stubel, H.; Fischer, G.; Brüning, T.; Bünger, J.; Raulf-Heimsoth, M.: Development and application of mold antigen-specific enzyme-linked immunosorbent assays (ELISA) to quantify airborne antigen exposure. *J. Toxicol. Environ. Health A* 75 (2012) Nr. 19-20, S. 1185-1193.
- [6] Zahradnik, E.; Kespohl, S.; Sander, I.; Schies, U.; Khosravie-Hohn, J.; Lorenz, W.; Engelhart, S.; Kolk, A.; Schneider, G.; Brüning, T.; Raulf-Heimsoth, M.: A new immunoassay to quantify fungal antigens from the indoor mould *Aspergillus versicolor*. *Sci. Process. Impacts* 15 (2013) Nr. 6, S. 1162-1171.
- [7] Sander, I.; Fleischer, C.; Borowitzki, G.; Brüning, T.; Raulf-Heimsoth, M.: Development of a two-site enzyme immunoassay based on monoclonal antibodies to measure airborne exposure to (1 $\rightarrow$ 3)-beta-D-glucan. *J. Immunol. Methods* 337 (2008) Nr. 1, S. 55-62.
- [8] Sander, I.; Zahradnik, E.; Kraus, G.; Mayer, S.; Neumann, H.-D.; Fleischer, C.; Brüning, T.; Raulf-Heimsoth, M.: Neues Messverfahren zum Nachweis von Hausmilbenantigenen auch in Luftstaubproben aus Innenräumen von Wohnungen und Arbeitsplätzen. *Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft* 73 (2013) Nr. 6, S. 281-284.
- [9] Neumann, H.-D.; Becker, G.; Lohmeyer, M.; Mathys, W.: Preventive measures to reduce bioaerosol exposure during refuse collection – Results of field studies in the real-life situation. *Sci. Total Environ.* 342 (2005) Nr. 1-3, S.1-13.
- [10] Technische Regel für Gefahrstoffe: Arbeitsplatzgrenzwerte (TRGS 900). Ausg. 1/2006. BARbBl. (2006) Nr. 1, S. 41-55; zul. geänd. GMBL (2014) Nr. 64, S. 1312-1313.
- [11] Neumann, H.-D.; Hornig, B.; Buxtrup, M.; Balfanz, J.: Schimmelpilz- und Gefahrstoffbelastungen bei der Müllsammlung. *Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft* 58 (1998) Nr. 6, S. 249-255.
- [12] Wouters, I. M.; Spaan, S.; Douwes, J.; Doekes, G.; Heederik, D.: Overview of personal occupational exposure levels to inhalable dust, Endotoxin, β -(1,3)-glucan and fungal extracellular polysaccharides in the waste management chain. *Ann. Occup. Hyg.* 50 (2006) Nr. 1, S. 39-53.
- [13] Van Kampen, V.; Sander, I.; Liebers, V.; Deckert, A.; Neumann, H.-D.; Buxtrup, M.; Willer, E.; Felten, C.; Jäkel, U.; Klug, K.; Brüning, T.; Raulf, M.; Bünger, J.: Concentration of bioaerosols in composting plants using different quantification methods. *Ann. Occup. Hyg.* 58 (2014) Nr. 6, S. 693-706.
- [14] Irritativ-toxische Wirkungen von luftgetragenen biologischen Arbeitsstoffen am Beispiel der Endotoxine. Hrsg.: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund. www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Biologische-Arbeitsstoffe/ABAS/aus-dem-ABAS/pdf/Endotoxinpapier.pdf?__blob=publicationFile
- [15] Liebers, V.; Brüning, T.; Raulf-Heimsoth, M.: Occupational endotoxin-exposure and possible health effects on humans. *Am. J. Ind. Med.* 49 (2006) Nr. 6, S.474-491.
- [16] Neumann, H.-D.; Balfanz, J.; Becker, G.; Mathys, W.: Raulf-Heimsoth, M.: Bioaerosol exposure during refuse collection – Results of field studies in the real-life situation. *Sci. Total Environ.* 293 (2002) Nr. 1-3, S. 219-231.
- [17] Neumann, H.-D.; Mathys, W.; Raulf-Heimsoth, M.; Becker, G.; Balfanz, J.: Gefährdung von Beschäftigten bei der Abfallsammlung und -abfuhr durch Keimexpositionen. In: *Schriften-*

reihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Dortmund), Forschungsbericht FB 920. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW 2001.

- [18] *Liebers, V.; Raulf-Heimsoth, M.; Linsel, G.; Goldscheid, N.; Düser, M.; Stubel, H.; Brüning, T.*: Evaluation of quantification methods of occupational endotoxin exposure. *J. Toxicol. Environ. Health A* 70 (2007) Nr. 21, S. 1798-1805.
- [19] *Rylander, R.*: Organic dust induced pulmonary disease – The role of mould derived β -glucan. *Ann. Agric. Environ. Med.* 17 (2010), S. 9-13.
- [20] *Brooks, C. R.; Siebers, R.; Crane, J.; Noss, I.; Wouters, I. M.; Sander, I.; Raulf-Heimsoth, M.; Thorne, P. S.; Metwali, N.; Douwes, J.*: Measurement of β -(1,3)-glucan in household dust samples using *Limulus* amoebocyte assay and enzyme immunoassays: an inter-laboratory comparison. *Environ. Sci. Process. Impacts* 15 (2013) Nr. 2, S. 405-411.
- [21] *Sander, I.; Zahradnik, E.; Brüning, T.; Raulf, M.*: Quantifizierung der Milbenallergenexposition in Haushalten mit verschiedenen Immunoassays und Luftstaubsammelmethoden. *Allergologie* 38 (2015), S. 64-69.