

Gute Luftqualität – ein Aspekt eines ergonomisch gestalteten Klassenzimmers

S. Peters

1 Einleitung

Die Ergonomie des Klassenzimmers ist neben anderen Faktoren für erfolgreiches Lernen und Lehren sowie für die Gesundheit von Schülern und Lehrern von entscheidender Bedeutung. In vielen Schulen entsprechen die Lehr- und Lernbedingungen allerdings nicht den Standards, die für ein lern- und lehrförderliches Klima notwendig sind. Insbesondere ergonomische und physikalische Parameter weisen Defizite auf.

Die Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV) hat im Jahr 2010 das Projekt „Das ergonomische Klassenzimmer – Ein Beitrag zur guten und gesunden Schule“ gestartet. In zwei typischen Schulen, einer Hauptschule in Nordrhein-Westfalen und einer Grundschule in Sachsen, wurde jeweils ein Klassenzimmer beispielhaft im Hinblick auf die Aspekte Mobiliar, Belüftung, Beleuchtung und Akustik optimiert. Das Konzept für die Umgestaltung wurde von einem interdisziplinären Team aus zwei Instituten der DGUV, dem Institut für Arbeitsschutz (IFA) und dem Institut für Arbeit und Gesundheit (IAG), und den beiden zuständigen Unfallkassen in Nordrhein-Westfalen und Sachsen in enger Zusammenarbeit mit den jeweiligen Schulen erarbeitet.

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Projekts im Hinblick auf die Belüftung vorgestellt.

2 Lüftungssituation in Klassenzimmern

Schüler und Lehrer verbringen einen großen Teil des Tages im Klassenzimmer. Daher ist eine gute Luftqualität in Klassenzimmern sehr wichtig. Die Luftqualität in einem Klassenzimmer wird durch die Belastung der Innenraumluft z. B. durch Kohlenstoffdioxid (CO₂) oder flüchtige organische Verbindungen (VOC, volatile organic compounds) bestimmt. Um eine gute Luftqualität zu erreichen, ist ein ausreichender Luftaustausch in den Klassenzimmern notwendig. Da Gebäude heutzutage immer dichter gebaut werden, ist eine gezielte Lüftung, sei es über Fenster oder über eine technische Lüftung, unabdingbar.

In Innenräumen ist der Mensch die Hauptquelle für CO₂, da er mit jedem Atemzug CO₂ ausatmet. Somit ist die Konzentration von CO₂ in Innenräumen von der Anzahl der Personen in einem Raum abhängig. Daher wird als Indikator für eine gute Luftqualität in Innenräumen häufig die CO₂-Konzentration verwendet. Gerade in Klassenzimmern, in denen sich eine große Anzahl von Personen aufhält, hat die CO₂-Konzentration einen wesentlichen Einfluss auf die Luftqualität. Das Umweltbundesamt hat im „Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden“ [1] Leitwerte für die



Bild 1. Eingebaute dezentrale Lüftungsgeräte im Klassenzimmer in der Schule in Nordrhein-Westfalen (oben) und in Sachsen (unten).

CO₂-Konzentration festgelegt. Danach gelten CO₂-Konzentrationen bis 1 000 ppm als hygienisch unbedenklich, zwischen 1 000 und 2 000 ppm als hygienisch bedenklich und Konzentrationen über 2 000 ppm als hygienisch inakzeptabel. Diese Einstufung für CO₂-Konzentrationen ist auch in der ASR A3.6 „Lüftung“ [2] zu finden. In der Norm DIN EN 15251 [3] werden für Innenräume der Kategorie III CO₂-Konzentrationen bis 800 ppm oberhalb der Außenluftkonzentration (ca. 400 ppm) als Kriterium für das Raumklima empfohlen. Die Kategorie III wird für ein moderates Maß an Erwartungen bei bestehenden Gebäuden angewandt. Allgemein gilt eine CO₂-Konzentration von 1 500 ppm in Klassenräumen noch als akzeptabel.

Untersuchungen in Klassenzimmern haben gezeigt, dass bei reiner Fensterlüftung während der Unterrichtszeit häufig zu wenig gelüftet wird und somit eine schlechte Luftqualität mit CO₂-Konzentrationen z. T. weit über 2 000 ppm in den Klassenzimmern vorliegt [4 bis 6]. Wird über Fensterlüftung für gute Luftqualität gesorgt, geht dadurch insbesondere in

Dr. rer. nat. Simone Peters,

Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), Sankt Augustin.

den Wintermonaten viel Wärmeenergie verloren. Eine Alternative ist der Einbau einer technischen Lüftung in Form einer zentralen oder dezentralen Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung.

3 Auswahl der Lüftungsgeräte

Für Klassenzimmer im Bestand bietet sich der Einbau von dezentralen Lüftungsgeräten an, da diese ohne viel Aufwand installiert werden können. Die größte bauliche Maßnahme ist die Einrichtung der Außenluft- und Fortluftöffnung in der Außenfassade. Je nach Klassengröße und Leistung des Lüftungsgeräts sind ein Gerät oder mehrere in einem Klassenzimmer notwendig. Es gibt verschiedene Bauformen, wie z. B. Brüstungs-, Stand- und Deckengeräte. Bei der Auswahl der Lüftungsgeräte sind die Anzahl der Personen im Klassenzimmer, die Leistung der Geräte und die räumlichen Möglichkeiten, die Geräte im Klassenzimmer aufzustellen, zu berücksichtigen.

Im Rahmen des Projekts wurden in den beiden Klassenzimmern jeweils zwei dezentrale Lüftungsgeräte unterhalb der Fenster installiert (**Bild 1**). Die Fensterseite war in beiden Klassenzimmern die einzige Außenfassade, sodass hier der Durchbruch für die Außenluft- und Fortluftöffnungen unterhalb der Fenster erfolgte. Die Möglichkeit, die Außenluft- und Fortluftöffnungen in die Fensterfront zu integrieren, wurde nicht in Betracht gezogen, da die häufig genutzten Außenjalousien die Öffnungen verdecken würden.

Die Lüftungsgeräte sind so ausgelegt, dass sie als Unterstützung der Fensterlüftung dienen und einen übermäßigen Anstieg der CO₂-Konzentration verhindern, wenn die Fenster nicht geöffnet werden können. Der Volumenstrom der eingebauten Lüftungsgeräte wird in drei Stufen automatisch über einen CO₂-Sensor geregelt. Zusätzlich kann von Hand für 15 Minuten ein sogenannter Boost-Modus mit einem hohen Volumenstrom eingeschaltet werden, um das Klassenzimmer in den Pausen verstärkt mit Frischluft zu spülen.

Damit an kälteren Tagen die warme Raumluft nicht ungenutzt nach außen abgeführt wird, besitzen die Lüftungsgeräte eine Wärmerückgewinnung. Außerhalb der Unterrichtszeiten arbeiten die Lüftungsgeräte im Standby-Betrieb.

4 Messungen und Diskussion

Vor und nach dem Umbau der Klassenzimmer wurde die CO₂-Konzentration während des Unterrichts über einen Zeitraum von mindestens einer Schulstunde gemessen. Für die Messungen wurde ein Almemo-Datenlogger mit dem CO₂-Sensor FY A600 der Fa. Ahlborn verwendet. Der Datenlogger registrierte die Messwerte mit einem Zeitintervall von einer Minute.

4.1 Klassenzimmer in Nordrhein-Westfalen

Das 56 m² große Klassenzimmer in der Hauptschule in Nordrhein-Westfalen hat eine Fensterfront mit vier kippbaren Oberlichtern und sechs Fenstern, die vollständig geöffnet werden können.

Bei der Messung vor dem Umbau des Klassenzimmers befanden sich 22 Personen im Raum. Während der Messung waren drei Oberlichter ständig geöffnet. Die drei Fenster im

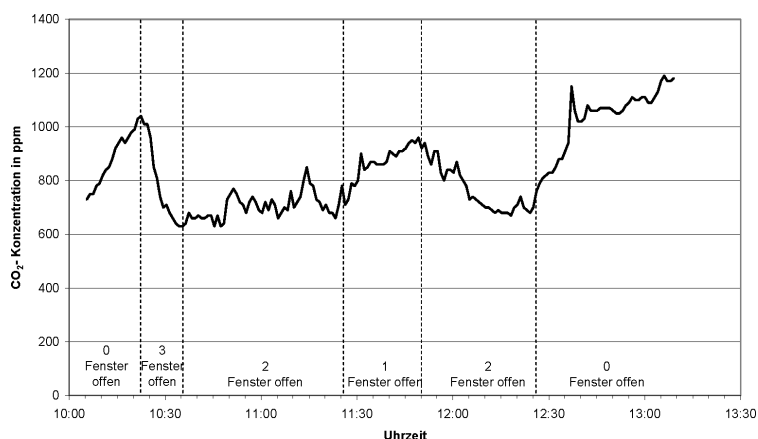


Bild 2. Verlauf der CO₂-Konzentration vor Umbau des Klassenzimmers an der Schule in Nordrhein-Westfalen.

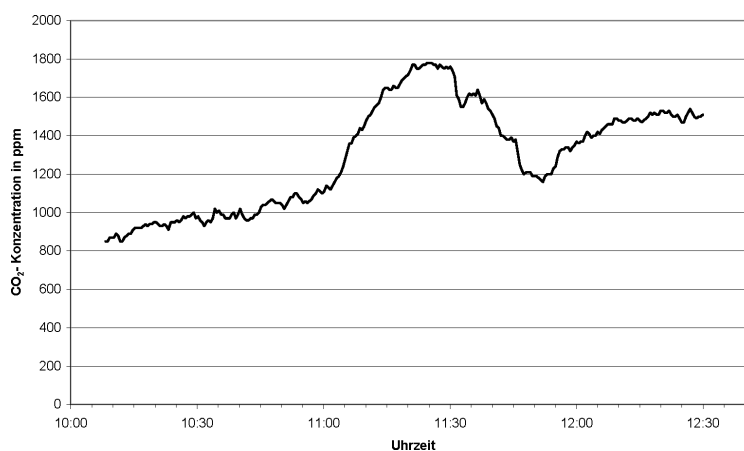


Bild 3. Verlauf der CO₂-Konzentration nach Einbau von zwei dezentralen Lüftungsgeräten im Klassenzimmer an der Schule in Nordrhein-Westfalen.

hinteren Bereich des Klassenzimmers wurden je nach Bedarf geöffnet oder geschlossen. In **Bild 2** ist zu erkennen, dass die CO₂-Konzentration bei zwei bis drei geöffneten Fenstern unter 1 000 ppm lag. War kein oder nur ein Fenster geöffnet, nahm die CO₂-Konzentration stetig zu. Dies ist insbesondere im Zeitraum von 12:25 Uhr bis 13:05 Uhr zu erkennen. Aufgrund der gekippten Oberlichter und der geöffneten Fenster ist in dem Klassenzimmer eine sehr gute Luftqualität vorhanden. Ist allerdings kein Fenster geöffnet, steigt die CO₂-Konzentration an und dieser Anstieg kann ohne erneutes Öffnen der Fenster nicht rückgängig gemacht werden.

Bei der Messung nach dem Einbau von zwei dezentralen Lüftungsgeräten befanden sich 25 Personen im Klassenzimmer. Von 10:00 Uhr bis 11:00 Uhr waren die vier Oberlichter und ein Fenster gekippt und die CO₂-Konzentration stieg nur allmählich an (**Bild 3**). Danach wurden die Oberlichter und das Fenster geschlossen und es war eine deutliche Zunahme der CO₂-Konzentration innerhalb von 20 min auf ca. 1 800 ppm zu verzeichnen. Der starke Anstieg kann dadurch erklärt werden, dass der CO₂-Sensor der Lüftungsgeräte noch nicht aktiv war. Die Lüftungsgeräte müssen morgens bei Unterrichtsbeginn einmal in den aktiven Modus versetzt werden, damit der CO₂-Sensor auf die CO₂-Konzentration im Klassenzimmer anspricht. Dies ist am Morgen des Mess-tages nicht erfolgt. In der Pause von 11:30 Uhr bis 11:50 Uhr wurden die beiden Lüftungsgeräte in den Boost-Modus geschaltet, wodurch die CO₂-Konzentration auf ca. 1 200 ppm

absank. Mit dem Einschalten des Boost-Modus wurde nachträglich der CO₂-Sensor aktiviert und die CO₂-Konzentration wurde anschließend auf einem Niveau von ca. 1 500 ppm gehalten. Durch den Einbau der Lüftungsgeräte kann man auch bei geschlossenen Fenstern eine gute bis akzeptable Luftqualität in dem Klassenzimmer erreichen.

4.2 Klassenzimmer in Sachsen

Das 50 m² große Klassenzimmer in der Grundschule in Sachsen hat eine Fensterfront mit sechs zu öffnenden Fenstern.

Bei der Messung vor dem Umbau waren 28 Personen im Klassenzimmer. Vor und während der Messung wurde nicht über die Fenster gelüftet. **Bild 4** zeigt, dass die CO₂-Konzentration schon zu Beginn der Unterrichtsstunde mit ungefähr 2 200 ppm im hygienisch inakzeptablen Bereich lag. Im Verlauf der Messung stieg die CO₂-Konzentration auf 3 500 ppm an. Dies zeigt, dass eine ungenügende Lüftung zu einer schlechten Luftqualität in dem Klassenzimmer führt. Bei der Messung nach dem Einbau der zwei dezentralen Lüftungsgeräte befanden sich 29 Personen im Klassenzimmer. Vor der Messung erfolgte keine Lüftung über die Fenster und auch während der Messung wurde nur um 11:25 Uhr für die Dauer von fünf Minuten ein Fenster gekippt. Die CO₂-Konzentration nahm im Laufe des Unterrichts von ca. 700 ppm auf ca. 1 600 ppm zu und hielt sich auf diesem Niveau (**Bild 5**). Mit dem Einbau der Lüftungsgeräte kann auch hier bei geschlossenen Fenstern eine gute bis akzeptable Luftqualität erreicht werden.

5 Fazit

Eine gute Luftqualität ist für ein gutes Lernen und Lehren in Klassenzimmern unerlässlich. Um die Anforderung des Umweltbundesamtes und des Arbeitsstättenrechts für eine gute Luftqualität erfüllen zu können, muss für eine ausreichende Lüftung gesorgt werden. Erfolgt die Lüftung allein über die Fenster, geht insbesondere in den Wintermonaten viel Wärmeenergie verloren, was der Energieeinsparverordnung widerspricht. Eine Alternative besteht im Einbau von Lüftungsanlagen als Ergänzung zur Fensterlüftung. Bei Schulgebäuden im Bestand, die nicht umfassend saniert werden sollen, bietet sich der Einbau von dezentralen Lüftungsgeräten in den Klassenzimmern an. Dies wurde auch in dem DGUV-Projekt zur Optimierung von Klassenzimmern nach den Aspekten Belüftung, Beleuchtung, Akustik und Ergonomie realisiert. Hier wurden in einem Klassenzimmer in einer Schule in Nordrhein-Westfalen und in Sachsen zur Unterstützung der Fensterlüftung jeweils zwei dezentrale Lüftungsgeräte unterhalb der Fenster installiert. CO₂-Messungen vor und nach dem Einbau der Lüftungsgeräte haben gezeigt, dass mit den Lüftungsgeräten – in Abhängigkeit von der Personenzahl im Klassenzimmer und der Raumgröße – auch bei geschlossenen Fenstern eine gute bis akzeptable Luftqualität gewährleistet werden kann.

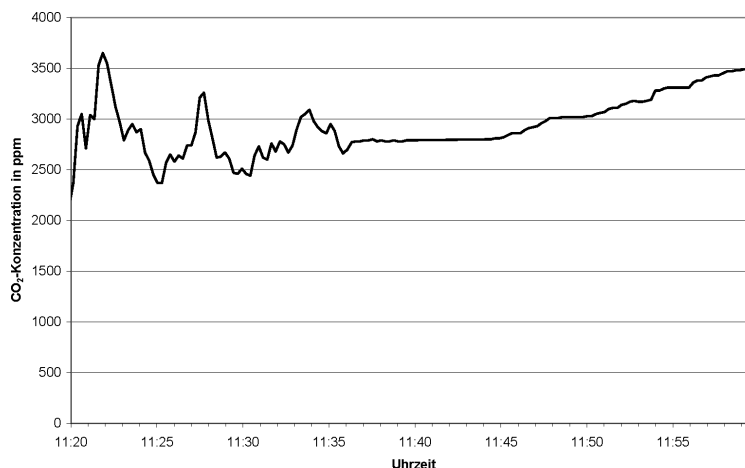


Bild 4. Verlauf der CO₂-Konzentration vor Umbau des Klassenzimmers an der Schule in Sachsen.

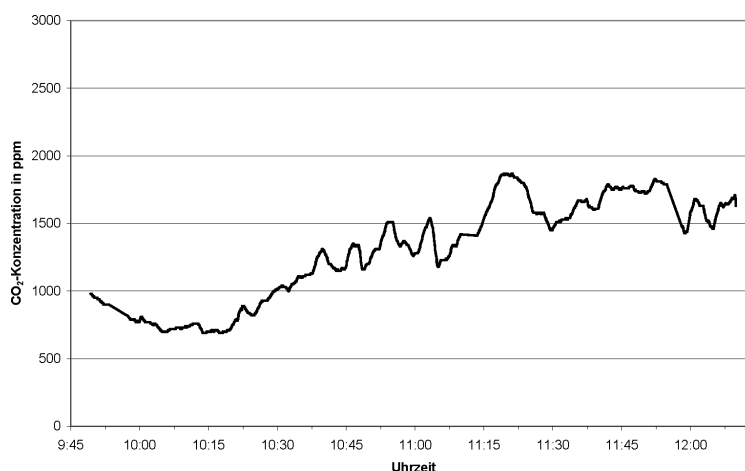


Bild 5. Verlauf der CO₂-Konzentration nach Einbau von zwei dezentralen Lüftungsgeräten im Klassenzimmer an der Schule in Sachsen.

Literatur

- [1] Innenraumhygiene-Kommission des Umweltbundesamtes: Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden. Hrsg.: Umweltbundesamt. Berlin 2008.
- [2] Technische Regel für Arbeitsstätten: Lüftung (ASR A3.6). GMBI. (2012) Nr. 6, S. 92-97.
- [3] DIN EN 15251: Eingangsparemeter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik. Berlin: Beuth 2007.
- [4] Neumann, H.-D.: Luftqualität und Lüftung in Schulen. Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 71 (2011) Nr. 11/12, S. 495-497.
- [5] Fromme, H.; Heitmann, D.; Dietrich, S.; Schierl, R.; Körner, W.; Kiranoglu, M.; Zapf, A.; Twardella, D.: Raumluftqualität in Schulen – Belastung von Klassenräumen mit Kohlendioxid (CO₂), flüchtigen organischen Verbindungen (VOC), Aldehyden, Endotoxinen und Katzenallergenen. Gesundheitswesen 70 (2008), S. 88-97.
- [6] Grams, H.; Hehl, O.; Dreesmann, J.: Niedersächsisches Schulmessprogramm: Untersuchung von Einflussfaktoren auf die Raumluftqualität in Klassenräumen sowie Modellierung von Kohlendioxid-Verläufen. Hrsg.: Niedersächsisches Landesgesundheitsamt. Bericht 2002 und Ergänzungen 2004.

Erfassung der Exposition gegenüber biologischen Arbeitsstoffen über die Arbeitsschicht mithilfe der Gesamtzellzahlbestimmung

K. Klug, U. Jäckel

Zusammenfassung Die Erfassung der Belastung der Beschäftigten gegenüber luftgetragenen biologischen Arbeitsstoffen wird neben der schwierigen arbeitsmedizinischen Einschätzung auch als ein methodisches Problem angesehen. Dies ist vor allem auf die nachzuweisenden Analyten zurückzuführen, die bei Arbeitsplatzmessungen die „kultivierbaren Mikroorganismen“ darstellen. Einige physikalische Faktoren bei der Bioaerosolsammlung wie der Austrocknungsstress führen in diesem Zusammenhang zum Absterben oder zum Übergang sensibler Mikroorganismengruppen in ein „Viable but not culturable“-Stadium. Personentragene Sammlungen über die gesamte Arbeitsschicht und anschließende kultivierungsabhängige Quantifizierungen sind somit kaum realisierbar. Die verwendeten selektiven Kultivierungsbedingungen vergrößern zusätzlich den Effekt, dass die tatsächliche Belastungshöhe bei diesem Vorgehen deutlich unterschätzt werden kann. Um diesen methodischen Schwierigkeiten zu begegnen, wurden im Rahmen von intensiven Arbeitsplatzmessungen die fluoreszenzmikroskopische Analyse nach einer DAPI-Färbung angewendet, um die Belastungssituation der Beschäftigten abzubilden und diese Methode auf ihre Eignung zur Erfassung einer Arbeitsschichtdosis zu ermitteln. Aufgrund aller Ergebnisse werden insgesamt vier Expositions-kategorien gegenüber mikrobiologischer Belastung (B-EK 1 bis 4) vorgeschlagen. Ein Vergleich von kultivierungsabhängiger und -unabhängiger Erfassung luftgetragener Mikroorganismen zeigte einmal mehr, dass mittels Kultivierung die tatsächliche Belastungshöhe z. T. erheblich unterschätzt wird, die Unterschätzung jedoch an verschiedenen Arbeitsplätzen unterschiedlich ausgeprägt ist.

1 Einleitung

Alle Arbeitgeber sind nach dem Arbeitsschutzgesetz [1] und der Unfallverhütungsvorschrift „Grundsätze der Prävention“ [2] verpflichtet, im Rahmen einer Gefährdungsbeurteilung [3] alle Gefährdungen für Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer zu ermitteln und zu beurteilen. Im Ergebnis werden Arbeitsschutzmaßnahmen festgelegt und das Ergebnis ihrer Überprüfung dokumentiert.

In Deutschland kommen rund 5 Mio. Beschäftigte bei ihrer Tätigkeit in unterschiedlichen Branchen mit biologischen Arbeitsstoffen in Kontakt [4]. In einigen Arbeitsbereichen liegt ein mangelndes Bewusstsein für die Belastung durch Mikroorganismen und das damit verbundene Risiko vor, da sie als Einzelwesen mit dem bloßen Auge nicht wahrnehmbar sind.

Entsprechend der EU-Richtlinie 2000/54 [5] müsste für jede Tätigkeit, bei der eine Exposition gegenüber biologischen

Detection of exposure to biological agents over the working shift by total cell count analyses

Abstract Based on the presently used measuring methods at workplaces the exposures to airborne biological agents are hard to characterize. In particular this fact can be drawn back to the analytes which are in case of biological agents "culturable microorganisms". Several physical effects at the sampling like the "drying stress" may result either in a change of the physiological state (to viable but not culturable) or to cells' death. Therefore, personal sampling over a complete working shift followed by culture based quantification is nearly impossible. Additionally, the used selective cultivation conditions increase the underestimation of the real existing exposure. For prevention of the mentioned methodological difficulties in the present study the exposure to biological agents were investigated intensively at different workplaces by fluorescence microscopic analyses after DAPI-staining. Considering all obtained results, four different biological exposure categories can be suggested. Additionally, the comparison of cultivation and microscopic based quantification in this study indicated once more a clear underestimation of exposure by the cultivation based approach. However, depending on the investigated workplace, the level of underestimation varies clearly.

Arbeitsstoffen auftreten kann, die Art, das Ausmaß und die Dauer der Exposition der Arbeitnehmer ermittelt werden, damit alle Risiken für die Sicherheit und die Gesundheit der Arbeitnehmer abgeschätzt und entsprechende Maßnahmen festgelegt werden können. Die Informationsbeschaffung ist jedoch nicht mit einer Messverpflichtung verbunden, obwohl Messungen für die Einschätzung der Exposition hilfreich sind. Die Technische Regel für Biologische Arbeitsstoffe (TRBA) 405 [6] enthält Empfehlungen für die Messstrategie zur Ermittlung der Konzentrationen von luftgetragenen Bakterien und Pilzen, wobei die standardisierten Messverfahren zum Nachweis von Schimmelpilzen und Bakterien in der Luft am Arbeitsplatz in der IFA-Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffen unter den Kennziffern 9420 und 9430 [7] aufgeführt sind. Diese Verfahren beruhen auf kultivierungsabhängigen Methoden, die grundsätzlich die Vermehrungsfähigkeit der Mikroorganismen auf den angebotenen Nährmedien voraussetzen. Die Expositionshöhe wird in Anzahl Kolonie bildender Einheiten (KBE) pro m³ Luft angegeben.

Die Detektion luftgetragener Bakterien kann allerdings problematisch sein, da einige physikalische Faktoren bei der Bioaerosolsammlung wie der Austrocknungsstress zum Absterben oder zum Übergang sensibler Bakteriengruppen in

Kerstin Klug, Dr. Udo Jäckel,

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin,
Berlin.

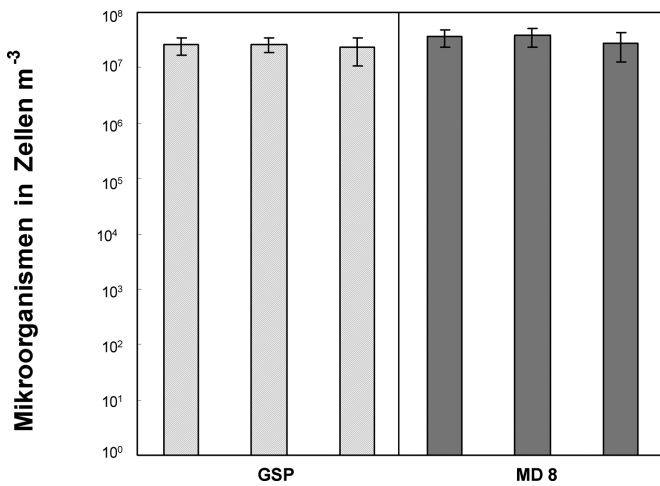


Bild 1. Vergleich der Konzentrationen der in der Luft vorhandenen Gesamtzellzahl in einem Stall der Entenmast bei Sammlung mit dem Gesamtstaub-Probenahmesystem (GSP) und dem Filtrationsluftkeimsammler MD 8 auf Polycarbonatfilter. Die Balken entsprechen der ermittelten Konzentration aus jeweils einer Probenahme je Sammelsystem (die Fehlerbalken repräsentieren die Standardabweichung von 30 ausgewerteten Teilfeldern).

ein „Viable but not culturable“-Stadium führen können. Mit der kultivierungsabhängigen Methodik sind viele Kurzzeitmessungen mit hohem materiellem, personellem und zeitlichem Aufwand erforderlich, um eine Aussage zur Exposition über die gesamte Arbeitsschicht abzuleiten. Die selektiven Kultivierungsbedingungen wie Nährmedium, Temperatur usw. können jedoch zu einer Unterschätzung der tatsächlichen Belastungshöhe führen. Mit der fluoreszenzmikroskopischen Gesamtzellzahlbestimmung nach Anfärben mit DAPI (4',6-Diamidino-2-phenylindol) steht eine gut beschriebene Methode zur „nahezu“ vollständigen Erfassung der in einer Bioaerosolprobe vorhandenen Mikroorganismen (außer Viren) zur Verfügung [8; 9]. Die Belastung mit biologischen Arbeitsstoffen kann somit als mittlere Exposition über die Arbeitsschicht in Zellen/m³ Luft angegeben werden.

Ziel der hier vorgestellten Untersuchungen war es, aufgrund ausgewählter Arbeitsplatzmessungen die Messunsicherheit von zwei unterschiedlichen Filtrationssammlungen zu erfassen und zu vergleichen. Durch umfangreiche

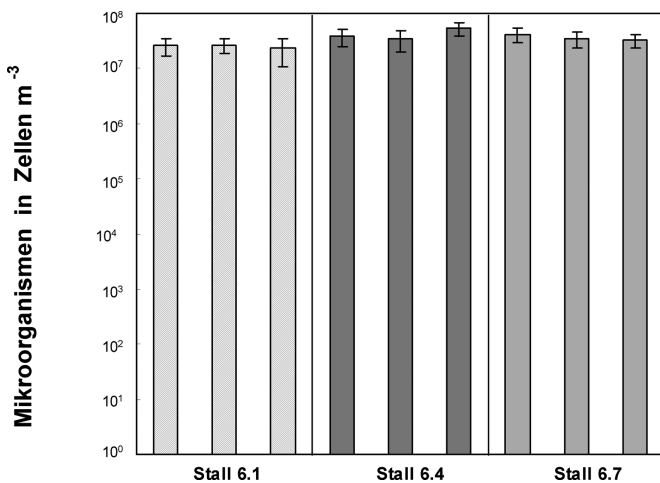


Bild 2. Vergleich der Konzentrationen der in der Luft vorhandenen Gesamtzellzahl in drei Ställen der Entenmast bei Sammlung mit dem Gesamtstaub-Probenahmesystem (GSP). Die Balken entsprechen der ermittelten Konzentration aus jeweils einer Probenahme je Stall (die Fehlerbalken repräsentieren die Standardabweichung von 30 ausgewerteten Teilfeldern).

Arbeitsplatzmessungen an Arbeitsplätzen mit Mischexpositionen im Vergleich zur Kultivierung sollte die Belastung von Arbeitnehmern gegenüber biologischen Arbeitsstoffen abgebildet werden, um „Expositionskategorien“ sowie Werte für die natürliche Hintergrundexposition auf der Basis der Gesamtzellzahlbestimmung zu ermitteln.

2 Material and Methoden

Die in der Studie untersuchten Bioaerosolproben wurden sowohl personengetragen als auch stationär in unterschiedlichen Arbeitsbereichen im Vergleich zur Außenluft der Anlagen gesammelt. Die Probenahmen erfolgten in einem Holzpelletierwerk sowie in Sortieranlagen des Papierrecyclings im Anlieferungsbereich nahe der Ballenpresse und in Sortierkabinen. Die untersuchten Arbeitsplätze in der Entenmast umfassten die Bereiche Brüterei, Tierställe und Schlachthof. In der Brüterei wurde das Sortieren der Entenküken nach dem Schlupf beprobt. Nach dem Einstellen der Tiere wurde in den Ställen der Einstreuschicht kontinuierlich frisches Stroh hinzugefügt. Dabei waren manuelle Tätigkeiten notwendig. Ebenfalls wurden Impfungen der Enten innerhalb der Tierställe durchgeführt. Eine weitere Tätigkeit im Stall war das Eiersammeln. Der Arbeitsbereich Schlachthof wurde am Beginn der Schlachtstraße, bei dem die Enten lebend eingehängt wurden, untersucht.

2.1 Bestimmung der Gesamtzellzahl nach DAPI-Anfärbung

Zur Erfassung der Gesamtzellzahl nach Anfärben mit DAPI wurde sowohl personengetragen als auch ortsgelunden auf Polycarbonatfilter (Durchmesser 37 mm, 0,2 µm Porengröße, Whatman, Deutschland) über die gesamte Arbeitsschicht detektiert. Dabei fand das Gesamtstaub-Probenahmesystem GSP in Verbindung mit einer Universal-Probenpumpe (224-PCTX8, SKC, USA) bei einem Volumenstrom von 3,5 l/min in Anlehnung an die Norm DIN EN 481 [10] Anwendung. Ebenfalls wurden Bioaerosole stationär unter Verwendung eines Filtrationsluftkeimsammler MD8 (aluminium stacks, Sartorius) und einer Membranpumpe (MP 2-39, Umweltanalytik Holbach) bei einem Volumenstrom von 30 l/min auf Polycarbonatfilter (Durchmesser 76 mm, 0,8 µm Porengröße, Whatman) erfasst.

Die fluoreszenzmikroskopische Bestimmung der Gesamtzellzahl erfolgte nach der von Klug et al. beschriebenen Methode [8; 9] und wurde in Zellen/m³ Luft angegeben.

2.2 Ermittlung luftgetragener, kultivierbarer Bakterien

Die Übersichtsmessungen zur Ermittlung der Exposition gegenüber luftgetragenen kultivierbaren Bakterien erfolgten stationär in Anlehnung an die Richtlinie VDI 4252 Blatt 2 [11]. Die Bioaerosole wurden mit einem Filtrationsluftkeimsammler (MD8 aluminium stacks, Sartorius) und einer Membranpumpe (MP 2-39, Umweltanalytik Holbach) auf Gelatinefilter (Durchmesser 78 mm, 3,0 µm Porengröße, Whatman) gesammelt. Die Bakterien wurden nach der Richtlinie VDI 4253 Blatt 3 [12] auf Tryptone Soy Agar (Oxoid, UK) kultiviert und als KBE/m³ Luft quantifiziert.

3 Ergebnisse

Für den Vergleich zweier Bioaerosol-Filtrationssysteme wurden die Gesamtzellzahlen in Bioaerosolproben, die parallel mit dem Gesamtstaub-Probenahmesystem (GSP)

Übersicht der Konzentrationen der in der Luft vorhandenen Gesamtzellzahl in der Außenluft verschiedener Anlagen.

Branche	Anzahl der Betriebe	Anzahl der Messungen	Mittelwert in Zellen/m ³ Luft	Median in Zellen/m ³ Luft	Minimalwert in Zellen/m ³ Luft	Maximalwert in Zellen/m ³ Luft
Entenmast	3	26	4,8 E+04	2,8 E+04	4,7 E+03	1,4 E+05
Papierrecycling	10	21	6,2 E+04	5,5 E+04	5,7 E+03	1,6 E+05
Holzpelletierherstellung	1	2	7,2 E+04	7,2 E+04	6,6 E+04	7,7 E+04

und dem Filtrationsluftkeimsammler (MD8) im Filtrationsverfahren auf Polycarbonatfiltern abgeschieden wurden, bestimmt. Die mittlere Gesamtzellzahl, die mit dem GSP gesammelt wurde, betrug $2,5 \times 10^7$ Zellen/m³ Luft. Mit dem Filtrationssammler MD8 wurden $3,4 \times 10^7$ Zellen/m³ Luft detektiert. Der Vergleich der Ergebnisse, die mit den beiden Sammelsystemen erzielt wurden, zeigte einen Variationskoeffizient (*cv*) von 10 % (Bild 1).

Zur Einschätzung der Variationsbreite bei den Probenahmen mit nur einem Sammelsystem wurden in drei Ställen der Entenmast jeweils drei Polycarbonatfilter parallel mit dem GSP über einen Zeitraum von durchschnittlich vier Stunden beaufschlagt. Die in der Stallluft vorhandenen Gesamtzellzahlen reichten von $2,5 \times 10^7$ Zellen/m³ Luft bis $4,2 \times 10^7$ Zellen/m³ Luft. Der mittlere Variationskoeffizient der Parallelmessungen lag hier bei 15 % (Bild 2).

Zur Ermittlung arbeitsplatzbedingter Belastungen werden die Expositionen mit der natürlichen Hintergrundbelastung verglichen. Als natürliche Hintergrundbelastung wird dabei die Konzentration in der von der Anlage unbelasteten Umgebungsluft angesehen. In der Tabelle sind die Hintergrundbelastungen, die bei Arbeitsplatzmessungen in Betrieben der Entenmast, Anlagen des Papierrecyclings und eines Holzpelletierwerks erfasst wurden, zusammengefasst.

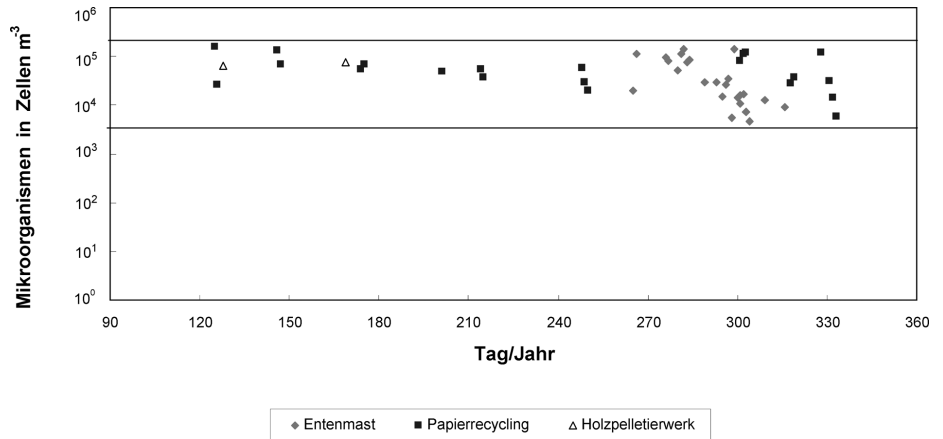


Bild 3. Konzentrationen der in der Außenluft vorhandenen Gesamtzellzahl. Alle Proben wurden im Abstand von mindestens 150 m luvseits der Anlage gesammelt. Die Probenahmen erfolgten innerhalb der Monate Mai bis November. Die Anlagen befanden sich alle in Industrie- oder Gewerbegebieten, die von landwirtschaftlichen Nutzflächen umgeben waren.

Aus den insgesamt 49 Außenluftmessungen ergab sich auf der Basis der Gesamtzellzahlbestimmung eine durchschnittliche Hintergrundbelastung von $6,0 \times 10^4$ Zellen/m³ Luft. Über das Jahr verteilt konnte ein Minimum von $4,7 \times 10^3$ Zellen/m³ Luft und ein Maximum von $1,6 \times 10^5$ Zellen/m³ Luft beobachtet werden (Bild 5).

Die Expositionsdaten an unterschiedlichen Arbeitsplätzen in Betrieben des Papierrecyclings und der Entenmast zeigten deutliche Expositionsgruppen. Eine Belastung von bis zu 2×10^5 Zellen/m³ Luft wurde für die Außenluft abgeleitet. Demgegenüber wurde in Arbeitsbereichen des Papierrecyclings eine mikrobiologische Belastung von 2×10^5 bis 5×10^6 Zellen/m³ Luft festgestellt. Innerhalb der Arbeitsplätze der Entenmast waren zwei weitere Expositionskat-

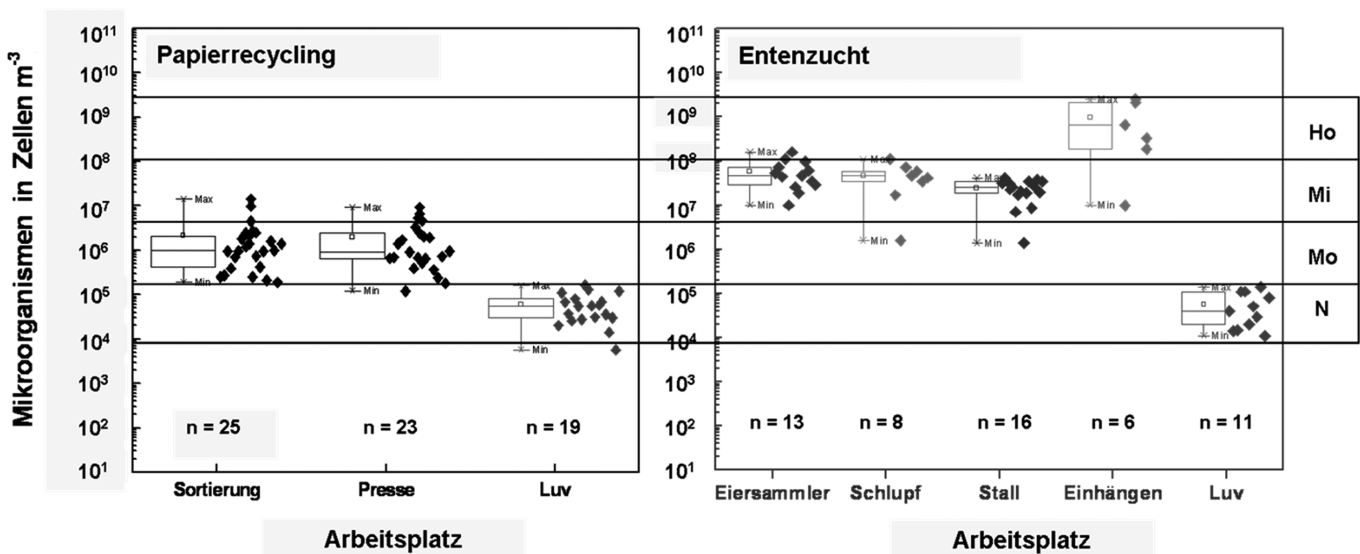


Bild 4. Konzentrationen der in der Luft vorhandenen Gesamtzellzahl in Betrieben der Entenmast und des Papierrecyclings im Vergleich zur Außenluft mit einer einfachen Expositions kategorisierung. N: normal, Mo: moderat, Mi: mittel, Ho: hoch

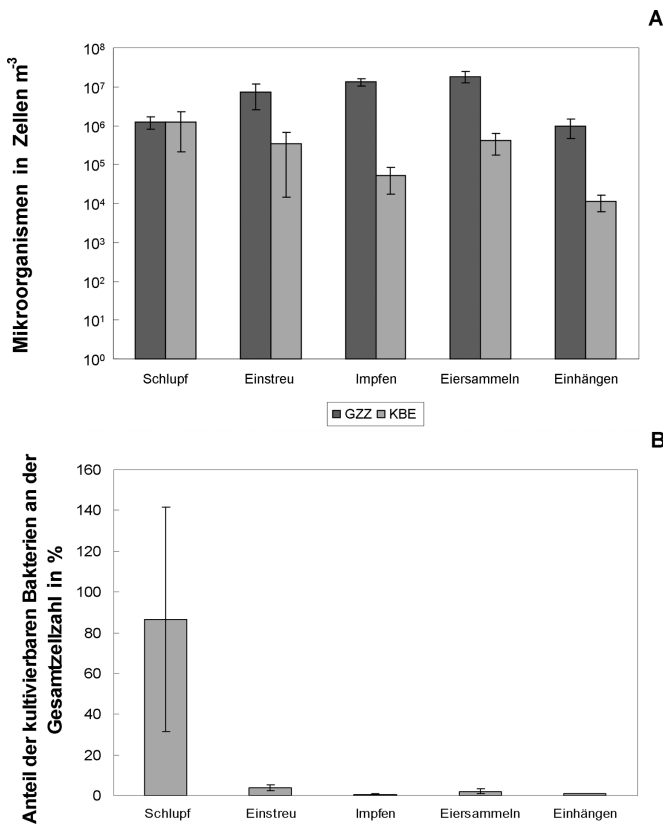


Bild 5. A) Gegenüberstellung der ermittelten Gesamtzellzahl (GZZ) und der kultivierbaren Bakterien (KBE) und B) Anteil der luftgetragenen kultivierbaren Bakterien an den in den Bioaerosolen vorhandenen Zellen an verschiedenen Arbeitsplätzen in der Entenmast.

goren, die sich deutlich von den Arbeitsplätzen im Papierrecycling unterschieden, identifiziert worden. So wurden innerhalb der Tierstallungen (Eiersammler/Stall) und der Brüterei Expositionshöhen zwischen 1×10^6 und 1×10^8 Zellen/m³ beobachtet. Die höchsten Expositionen mit mehr als 1×10^8 Zellen/m³ Luft wurden beim Einhängen der lebenden Enten im Schlachthof detektiert (Bild 4).

Zum Vergleich von kultivierungsunabhängiger und -abhängiger Erfassung luftgetragener Mikroorganismen wurden Gelatine- und Polycarbonatfilter gleichzeitig stationär während unterschiedlicher Tätigkeiten in ausgewählten Arbeitsbereichen der Entenmast 10 min lang mit dem gleichen Sammelsystem und am gleichen Ort beaufschlagt.

In der Brüterei wurde eine Gesamtzellzahl von $6,4 \times 10^5$ bis $1,0 \times 10^6$ Zellen/m³ Luft ermittelt. Die Konzentration kultivierbarer luftgetragener Bakterien lag hingegen bei $3,1 \times 10^5$ bis $2,6 \times 10^6$ KBE/m³ Luft. Dies entspricht einem durchschnittlichen Anteil von 86 % der Gesamtzellzahl. Im Vergleich wurde die Exposition gegenüber Mikroorganismen bei verschiedenen Tätigkeiten im Stall der Entenmast untersucht. Beim Einstreuen in den Stall reichten die Expositionswerte über die Gesamtzellzahlbestimmung von $3,1 \times 10^6$ bis $1,4 \times 10^7$ Zellen/m³ Luft. Demgegenüber wurde die Konzentration von kultivierbaren Bakterien mit $1,1 \times 10^5$ bis $8,5 \times 10^5$ KBE/m³ Luft ermittelt. Dies entsprach etwa 4 % der DAPI-markierten Zellen aus der Bioaerosolprobe.

Die beim Impfen der Tiere ermittelte Exposition über die Gesamtzellzahlbestimmung ergab durchschnittlich $1,5 \times 10^7$ Zellen/m³ Luft. Die Konzentration kultivierbarer luftgetragener Bakterien betrug im Mittel $5,2 \times 10^4$ KBE/m³ Luft, was

weniger als 0,5 % der mit der Gesamtzellzahlbestimmung ermittelten Mikroorganismen war.

Während der Tätigkeit des Eiersammelns wurde eine mittlere Expositionshöhe – über die Gesamtzellzahlbestimmung – von $1,9 \times 10^7$ Zellen/m³ Luft und eine mittlere Konzentration – kultivierbarer Bakterien – von $4,1 \times 10^5$ KBE/m³ Luft festgestellt. Der Anteil betrug ca. 2 % an der Gesamtzellzahl. Beim Einhängen der Enten in die Schlachtstraße wurde ein ähnliches Verhältnis zwischen den ermittelten Expositionshöhen festgestellt. Über die kultivierungsabhängige Detektion konnten etwa 1 % der Konzentration nachgewiesen werden, die über Gesamtzellzahlbestimmung ermittelt wurde (Bild 5).

4 Diskussion

Für die Sammlung von Mikroorganismen am Arbeitsplatz werden weder national noch international spezifische Sammelgeräte – von denen heute eine Vielzahl unterschiedlicher Systeme zur Verfügung steht – vorgeschrieben. Nahezu alle Systeme sind bis auf wenige Ausnahmen für die Sammlung von „nicht lebenden“ Partikeln konzipiert worden. Aufgrund ihrer Abscheideprinzipien können die luftgetragenen Mikroorganismen in Abhängigkeit vom verwendeten Sammelsystem auf Filtern (Filtration), auf speziellen Oberflächen oder auf festen Nährmedien (Impaktion, Sedimentation und Präzipitation) sowie in Sammelflüssigkeiten (Impingement) ermittelt werden [13]. Daraus ergibt sich eine kaum überschaubare Vielfalt von Sammelsystemen und -medien, mit der Bioaerosole detektiert werden. Die Bewertung von mit unterschiedlichen Systemen erfassten Bakterien ist hierdurch maßgeblich erschwert bis nahezu unmöglich. Aufgrund der besseren Vergleichbarkeit und der unkomplizierten Handhabung erfolgte in unseren Untersuchungen die Sammlung der Bioaerosole ausschließlich mittels Filtration.

Das Gesamtstaub-Probenahmesystem (GSP) kam sowohl personengetragen als auch stationär in Abhängigkeit vom Sammelort bzw. von der Zielstellung zum Einsatz. Der Filtrationsluftkeimsammler MD8 mit Membranpumpe fand wegen seiner Größe und seines Gewichts nur ortsgebunden Anwendung. Der Vergleich der Gesamtzellzahlkonzentrationen zeigte, dass der Unterschied zwischen den beiden Filtrations sammelsystemen im Mittel nur 10 % betrug. Die Ergebnisse der parallelen Probenahmen mittels GSP in Entenmastställen lässt insgesamt eine sehr hohe Reproduzierbarkeit der Ergebnisse mit einer Variation von nur 13 % erkennen. Hierdurch wird deutlich, dass die Bestimmung der Gesamtzellzahl nach DAPI-Anfärbung in Kombination mit einer etablierten Sammlung erstmals die Möglichkeit eröffnet, eine mittlere Arbeitsschichtdosis gegenüber dem Summenparameter aus Prokaryonten und Schimmelpilzen mit der angegebenen Genauigkeit zu ermitteln. Im Rahmen der Studien wurden auch die Konzentrationen luftgetragener Mikroorganismen in der Außenluft ermittelt und eine erste natürliche Hintergrundbelastung abgeleitet. So lagen alle Werte ($n = 49$), die nach einer DAPI-Färbung fluoreszenzmikroskopisch ausgewertet wurden, zwischen 5×10^3 und 2×10^5 Zellen/m³ Luft. Diese Ergebnisse sind grundsätzlich mit den Daten vergleichbar, die in der unteren Atmosphäre festgestellt wurden [14 bis 16]. Auf der Grundlage der erhobenen Daten ist es erstmals möglich, die Belastungshöhe von Beschäftigten an ihren Arbeitsplätzen gegen-

über biologischen Arbeitsstoffen über die Gesamtzellzahlbestimmung und somit die Belastung gegenüber biologischen Arbeitsstoffen am Arbeitsplatz über einen definierten Beurteilungszeitraum einzuordnen. Die Exposition gegenüber biologischen Arbeitsstoffen kann mit vier einfachen Biologischen Expositions-kategorien (B-EK 1 bis 4) beschrieben werden. Eine normale Belastung von bis zu 2×10^5 Zellen/m³ Luft wurde für die Außenluft abgeleitet (B-EK 1). In einigen Arbeitsbereichen mit ungezielten Tätigkeiten, beispielsweise im Papierrecycling, wurde eine moderate mikrobiologische Belastung (B-EK 2) mit 2×10^5 bis 5×10^6 Zellen/m³ Luft festgestellt. Dagegen sind Tätigkeiten an Arbeitsplätzen der Entenmast als mittel (B-EK 3) bis hoch (B-EK 4) mit Mikroorganismen belastet einzuschätzen. Dabei können Gesamtzellzahlen von mehr als 1×10^8 Zellen/m³ Luft auftreten.

So können neben der Hintergrundexposition drei deutlich erkennbare Belastungsgruppen wie folgt definiert werden:

- B-EK 1: Normale Belastung ($< 2 \times 10^5$ Zellen/m³)
- B-EK 2: Moderate Belastung (2×10^5 bis 5×10^6 Zellen/m³)
- B-EK 3: Mittlere Belastung (5×10^6 bis 1×10^8 Zellen/m³)
- B-EK 4: Hohe Belastung ($> 1 \times 10^8$ Zellen pro m³)

Mit dem gut charakterisierten Gesamtstaub-Probenahmesystem (GSP) und einer Universal-Probenpumpe (Sammelvolumenstrom von 3,5 l/min) besteht nun die Möglichkeit, die einatembare Partikelfraktion in Anlehnung an die Norm DIN EN 481 auf Polycarbonatfiltern über die gesamte Arbeitsschicht personengetragen zu sammeln. Dies wurde bislang über den kultivierungsabhängigen Ansatz nicht realisiert, da aufgrund des hohen Sammelstresses Langzeitsammlungen grundsätzlich vermieden werden müssen. Trotzdem wird die Belastung mit Mikroorganismen heute immer noch überwiegend mittels Kultivierung ermittelt. Es existieren jedoch Untersuchungen, die belegen, dass mit dieser Methodik die tatsächliche Belastungshöhe unterschätzt werden kann.

Die Zusammensetzung der Bakteriengemeinschaften bezüglich toter/lebender und kultivierbarer/„nicht kultivierbarer“ unterscheidet sich in Abhängigkeit vom Arbeitsplatz. Daher muss beim Vergleich von quantitativen Daten, die kultivierungsabhängig an verschiedenen Arbeitsplätzen erhoben wurden, berücksichtigt werden, dass die Unterschätzung unterschiedlich ausgeprägt sein kann. Dies wird vor allem am Vergleich des Anteils kultivierbarer Bakterien an der fluoreszenzmikroskopisch ermittelten Gesamtzellzahl in Bioaerosolproben aus der Entenmast deutlich. So wurde innerhalb der Brüterei kultivierungsabhängig nahezu die gleiche Belastungshöhe ermittelt wie über die Mikroskopie. Demgegenüber differierten die Ergebnisse an anderen Arbeitsplätzen der Entenmast in Abhängigkeit von der Nachweismethode um das 20- bis 100-Fache. Auf der Basis der Kultivierung kann somit nicht zwangsläufig geschlossen werden, dass gleiche quantitative Ergebnisse, die an unterschiedlichen Arbeitsplätzen ermittelt wurden, einer gleichen Belastungshöhe entsprechen, wie beispielsweise beim Vergleich der kultivierungsabhängigen Ergebnisse an den Arbeitsplätzen im Stall und der Brüterei deutlich wird.

Insgesamt lässt sich daraus ableiten, dass für die Abschätzung der biologischen Belastung am Arbeitsplatz die fluoreszenzmikroskopische Gesamtzellzahlbestimmung aussagekräftiger und realistischer ist. Für vergleichbare Arbeitsplatzmessungen ist zukünftig weiterhin ein einheitliches Probenahmesystem unabdingbar.

Danksagung

Wir danken *Sabine Plitzko*, *Nico Dziurowitz* und *Dr. Gunter Linsel* für die Probenahme in den Entenmastställen und *Gundula Will* für die hervorragende technische Assistenz.

Literatur

- [1] Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit (Arbeitsschutzgesetz – ArbSchG) vom 7. August 1996. BGBl. I, S. 1246, zul. geänd. durch Art. 15 Abs. 89 des Gesetzes vom 5. Februar 2009. BGBl. I, S. 160.
- [2] Unfallverhütungsvorschrift „Grundsätze der Prävention“ vom 1. Januar 2004. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung. <http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/v-a1.pdf>
- [3] Leitlinie Gefährdungsbeurteilung und Dokumentation. Hrsg.: Nationale Arbeitsschutzkonferenz. Berlin 2011. www.gda-portal.de/de/pdf/Leitlinie-Gefaehrdungsbeurteilung.pdf
- [4] *Hofmann, F.*: Biologische Belastungen in der Arbeitswelt. Bundesgesundheitsbl. – Gesundheitsforsch. – Gesundheitsschutz 51 (2008) Nr. 3, S. 313-321.
- [5] Richtlinie 2000/54/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. September 2000 über den Schutz der Arbeitnehmer gegen Gefährdung durch biologische Arbeitsstoffe bei der Arbeit. ABl. EG Nr. L 262 vom 17. Oktober 2000, S. 21-45.
- [6] Technische Regel für Biologische Arbeitsstoffe (TRBA) 405: Anwendung von Messverfahren und technischen Kontrollwerten für luftgetragene biologische Arbeitsstoffe. BArbBl. (2006) Nr. 7, S. 193-194.
- [7] Benutzerhinweise für die Auswahl von Meßverfahren für Biologische Arbeitsstoffe (Kennzahl 9417). In: IFA-Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffen (21. Lfg. X/98). Berlin: Erich Schmidt 1989 (Losebl.-Ausg.). www.ifa-arbeitsmappedigital.de/9417
- [8] *Klug, K.; Martin, E.; Ernst, S.; Jäckel, U.*: Laborinterne Verfahrenskenngrößen der DAPI (4',6-Diamidino-2-phenylindol)-Gesamtzellzahlbestimmung in Bioaerosolproben von Arbeitsplätzen, Teil I: Zählung und Aufarbeitung nach Fixierung. Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 70 (2010) Nr. 10, S. 399-403.
- [9] *Klug, K.; Jäckel, U.*: Laborinterne Verfahrenskenngrößen der DAPI (4',6-Diamidino-2-phenylindol)-Gesamtzellzahlbestimmung in Bioaerosolproben von Arbeitsplätzen, Teil II: Aufarbeitungsvorschrift: Lager-, Fixier-, Färbezeiten. Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 70 (2010) Nr. 10, S. 404-407.
- [10] DIN EN 481: Arbeitsplatzatmosphäre; Festlegung der Teilchengrößenverteilung zur Messung luftgetragener Partikel. Berlin: Beuth 1993.
- [11] VDI 4252 Blatt 2: Erfassen luftgetragener Mikroorganismen und Viren in der Außenluft; Aktive Probenahme von Bioaerosolen – Abscheidung von luftgetragenen Schimmelpilzen auf Gelatine/Polycarbonat-Filtern. Berlin: Beuth 2004.
- [12] VDI 4253 Blatt 3: Erfassen luftgetragener Mikroorganismen und Viren in der Außenluft; Verfahren zum quantitativen kulturellen Nachweis von Bakterien in der Luft – Verfahren nach Abscheidung in Flüssigkeiten. Berlin: Beuth 2008.
- [13] *Kämpfer, P.; Weißenfels, W. D.*: Luftgetragene Mikroorganismen in Abfallbehandlungsanlagen. Lieskau: Vereinigung für Allgemeine und Angewandte Mikrobiologie, Fachgruppe Umweltmikrobiologie, Frankfurt am Main 1997.
- [14] *Bauer, H.; Kasper-Giebl, A.; Löfflund, M.; Giebl, H.; Hitzberger, R.; Zibuschka, F.; Puxbaum H.*: The contribution of bacteria and fungal spores to the organic carbon content of cloud water, precipitation and aerosols. Atmos. Res. 64 (2002), S. 109-119.
- [15] *Harrison, R. M.; Jones, A. M.; Biggins, P. D. E.; Pomeroy, N.; Cox, C. S.; Kidd, S. P., Hobman, J. L.; Brown, N. L.; Beswick, A.*: Climate factors influencing bacterial count in background air samples. Int. J. Biometeorol. 49 (2005), S. 167-178.
- [16] *Maron, P. A.; Lejon, D. P. H.; Carvalho, E.; Bizet, K.; Lemanceau, P.; Ranjard, L.; Mougel, C.*: Assessing genetic structure and diversity of airborne bacterial communities by DNA fingerprinting and 16S rDNA clone library. Atmos. Environ. 39 (2005), S. 3687-3695.