

# Nutzen und Grenzen von Hausstaubuntersuchungen in Innenräumen

J. Hurraß, T. Salthammer, B. Heinzow, W. Birmili, W. Butte, M. Debiak, M. Kolossa-Gehring, M. Kraft, H.-J. Moriske, G. Walker

**ZUSAMMENFASSUNG** Hausstaub, der vor allem auf dem Boden sedimentierte Staub in Gebäuden, ist ein bedeutender Marker für bestimmte Innenraumverunreinigungen. In ihm reichern sich unter anderem schwerflüchtige organische Verbindungen wie Biozide, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) und Weichmacher an. Daneben finden sich im Hausstaub Milben, Pollen und andere mikrobielle Verunreinigungen. Die Komplexität des Hausstaubs hinsichtlich seiner Zusammensetzung ist aber auch ein Grund, warum es keine einheitliche Messtechnik gibt und die Beurteilung des Ergebnisses so schwierig ist. Das beginnt mit der Frage der Siebung und Abtrennung grobkörniger Bestandteile, mit der Bestimmung des Alters des Staubs vor der Analyse und endet mit der Bewertung der Inhaltstoffe nach der Analyse. Der vorliegende Beitrag liefert eine aktuelle Bestandsaufnahme zur generellen Aussagekraft von Hausstaubuntersuchungen. Die Autorinnen und Autoren zeigen auf, dass die quantitative Bestimmung chemischer Substanzen im Hausstaub durchaus sinnvoll sein kann, um bestimmte Substanzen im Innenraum nachzuweisen und deren Konzentration nach statistischen Kriterien zu beurteilen. Ebenso deutlich wird aber auch dargelegt, dass hinsichtlich der Exposition im Innenraum eine gesundheitliche Bewertung anhand von Hausstaub und dessen Inhaltsstoffen nicht möglich ist.

## 1 Einführung

Bei der Exposition des Menschen in Innenräumen gegenüber Umwelttoxinen sind drei Aufnahmepfade relevant: der inhalative, der dermale und der orale. Für eine definierte Substanz lässt sich der inhalative Pfad über die Bestimmung der Luftkonzentration, der menschlichen Atemfrequenz, des Atemzugvolumens und der Resorptionsrate der Substanz im respiratorischen Trakt vergleichsweise gut abschätzen. Deutlich schwieriger ist dagegen die realistische Abschätzung von dermaler und oraler Aufnahme aus den Innenraumkompartimenten. Zur Fragestellung, ob im Innenraum eine auffällige Kontamination mit schwerer flüchtigen Fremdstoffen (z. B. mit bestimmten Holzschutzmitteln) vorliegt, hat sich seit den 1980er-Jahren die Hausstaubanalytik etabliert. Seitdem hat die Methode einen festen Platz in der Innenraumanalytik, auch durch die Publikation von statistisch basierten Referenzwerten.

Genau betrachtet ist die Analyse von Hausstaub keine Erfindung der Neuzeit. Bereits im Jahr 1894 hat *Miller* Tuberkuloseerreger im Hausstaub identifiziert [1]. Im Jahr 1927 veröffentlichte

## Benefits and limitations of house dust examinations indoors

**ABSTRACT** House dust, the dust that sediments on the floor in buildings, is a significant marker for certain indoor pollutants. Among other things, it accumulates semi volatile organic compounds such as biocides, polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and plasticizers. In addition, mites, pollen and other microbial contaminants are found in house dust. The complexity of house dust in terms of its composition is also a reason why there is no uniform measurement technology and why it is so difficult to assess the result. This begins with the question of sieving and separating coarse-grained components, with the determination of the age of the dust before the analysis and ends with the evaluation of the ingredients after the analysis. This article provides an up-to-date review of the general significance of house dust examinations. The authors show that the quantitative determination of chemical substances in house dust can be very useful to detect certain substances in the indoor environment and to assess their concentration according to statistical criteria. However, it is equally clearly stated that a health assessment based on house dust and its ingredients is not possible with regard to indoor related exposure.

die Zeitschrift *Lancet* einen Artikel zum möglichen Zusammenhang zwischen Hausstaub und Asthma [2]. Nach wie vor wird bis heute diskutiert, welche Aussagekraft die Ergebnisse von Hausstaubuntersuchungen für gesundheitliche Risiken beim Aufenthalt in Innenräumen haben. In Deutschland wurde das Thema intensiv im Jahr 1994 anlässlich einer VDI-Tagung behandelt [3; 4]. *Seifert* (1998) stellte in einem Artikel kritisch fest, dass Expositionsabschätzungen mithilfe von Informationen über Hausstaub eine Reihe von Unsicherheiten beinhalten, die eine Nutzung für die gesundheitliche Bewertung begrenzen [5].

Da die Diskussion um die Bewertung von Hausstaub in Innenräumen regelmäßig neu auflebt, möchten die Autorinnen und Autoren diese Arbeit zum Anlass nehmen, die generelle Aussagekraft der Ergebnisse von Hausstaubuntersuchungen einer kritischen Betrachtung zu unterziehen.

## 2 Was ist Hausstaub?

Im normalen Sprachgebrauch wird unter „Staub“ in Innenräumen vielfach nur der sichtbare, auf Oberflächen abgelagerte Staub

verstanden, der vor allem aus optischen und hygienischen Gründen regelmäßig entfernt werden soll. Dieser sedimentierte Staub, im Allgemeinen als „Hausstaub“ bezeichnet, ist vom suspendierten Schwebstaub in der Innenraumluft zu unterscheiden. Beide Staubarten variieren in ihren physikalischen Eigenschaften (Teilchengröße und -form) und der chemischen Zusammensetzung und tragen in unterschiedlichem Maße und auf unterschiedliche Weise zur Exposition des Menschen bei [6].

Für den Begriff „Hausstaub“ gibt es keine allgemein verbindliche Definition. Zur Abgrenzung gegenüber Schwebstaub werden darunter alle Arten von Partikeln verstanden, die sich in abgelagerter Form im Innenraum (indoor settled dust) antreffen lassen. Hausstaub umfasst Partikel, Fasern und Fragmente, deren Durchmesser von wenigen Mikrometern bis in den Bereich mehrerer Millimeter reichen und oft aus chemisch sehr unterschiedlichen Komponenten bestehen. Dabei kann es sich um Feststoffe aus den verschiedensten anorganischen oder organischen Materialien natürlichen oder synthetischen Ursprungs handeln. Der Anteil an organischer Substanz kann stark variieren und zwischen wenigen Prozent und fast der gesamten Masse liegen [7]. Der Hausstaub von Kindergärten weist oft hohe Anteile an Sand, Lehm und Ton auf. In Wohnungen mit Haustieren kann der Hausstaub zum überwiegenden Teil aus organischem Material bestehen [8]. Zu den biologisch wirksamen Bestandteilen zählen Allergene und Endotoxine, unter anderem auch die Exkremente der Hausstaubmilbe.

Neben der Fraktion der inhalierbaren Partikel (Durchmesser  $<10\ \mu\text{m}$ ) des Schwebstaubs, die somit für den inhalativen Pfad von Bedeutung sind, kann bei Hausstaub bzw. bei den darin enthaltenen Fremdstoffen prinzipiell die dermale oder orale Exposition eine Rolle spielen. Diese Aufnahmepfade sind jedoch bei Erwachsenen oft von untergeordneter Bedeutung und im Wesentlichen für Kleinkinder beim Spielen auf dem Fußboden, wo sie in direkten Hautkontakt mit Hausstaub kommen und ihn durch Hand-Mund-Kontakt (Mouthing) oral aufnehmen können, als relevant anzusehen. Der überwiegende Anteil des Hausstaubs ist aufgrund der Partikelgröße nicht inhalierbar. Auch der in den oberen Atemwegen deponierte Staub unterliegt durch die mukoziliäre Clearance letztlich der oralen Aufnahme.

### 3 Probenahme und Analytik von Hausstaub

In der Praxis steht man bei der Untersuchung von Hausstaub vor der Aufgabe, einerseits geeignetes Probenmaterial zu gewinnen und andererseits geeignete Probenaufbereitungs- und Analyseverfahren zu finden, die der komplexen Zusammensetzung und Struktur der Matrix Hausstaub gerecht werden. Für das Ergebnis einer Stoffbestimmung im Hausstaub sind Angaben über das Alter des Staubs (Altstaub (per Konvention älter als eine Woche) oder Frischstaub (nicht älter als eine Woche)) sowie Probenahmetechnik und Probenaufbereitung von entscheidender Bedeutung. Die Probenahme erfolgt durch das Absaugen mit einem Planfilter, durch Wischen, durch die Passivprobenahme mithilfe von Auffanggefäßen oder aktiv mit einem handelsüblichen Staubsauger. Je nach Art der Probenahme wird das Ergebnis einer Analyse der Inhaltsstoffe massenbezogen pro g oder pro kg flächenbezogen pro  $\text{m}^2$  angegeben.

Nach erfolgter Probenahme stellt sich die Frage nach der Aufarbeitung des Staubs. Hier bietet sich speziell bei der Analyse von Staub aus Staubsaugerbeuteln das Sieben an, wobei verschiedene

Autorinnen und Autoren unterschiedliche Siebfraktionen zur weiteren Analyse verwenden. Dies erschwert den Vergleich veröffentlichter Daten, da damit gerechnet werden muss, dass der Massenanteil eines Stoffs im Staub mit der Korngröße variiert. Die zur weiteren Untersuchung verwendeten Korngrößenfraktionen reichen von  $\leq 2\ \text{mm}$  bis zu  $\leq 63\ \mu\text{m}$ . In der ersten (1985 bis 1986) und zweiten (1990 bis 1992) Deutschen Umweltstudie zur Gesundheit (GerES; vormals 1. und 2. Umweltsurvey genannt) wurden Hausstaubbecherproben und Staubsaugerbeutelinhaltspalten analysiert, Letztere ohne vorher zu sieben [9]. In späteren GerES-Studien wurde dann die Fraktion  $\leq 63\ \mu\text{m}$  des Staubsaugerbeutelinhaltspalten untersucht. Für die Gewinnung der Staubproben gab es keine Vorgaben; es wurden die im Haushalt vorhandenen Staubsaugerbeutel eingesammelt. Bis heute gibt es für das Sieben einer Hausstaubprobe keine international akzeptierte Konvention. In den USA ist z. B. die Analyse der  $\leq 150\text{-}\mu\text{m}$ -Fraktion üblich.

Im Jahr 2001 wurde mit der Richtlinie VDI 4300 Blatt 8 „Messen von Innenraumluftverunreinigungen – Probenahme von Hausstaub“ der Versuch unternommen, eine Hilfestellung für Hausstaubuntersuchungen zu geben. Dabei wurde insbesondere auf die mögliche Rolle des Hausstaubs als Indikator für Stoffe und Quellen hingewiesen. Allerdings wurde die VDI 4300 Blatt 8 im Jahr 2012 zurückgezogen, da Hausstaubanalysen unter Verweis auf die Richtlinie in unsachgemäßer Weise durchgeführt und die Ergebnisse unterschiedlich interpretiert wurden [10].

### 4 Beurteilungskriterien und Referenzwerte aus Hausstaubuntersuchungen

Butte et al. analysierten Tausende von Staubsaugerbeuteln auf ihre Inhaltstoffe, um Referenzwerte im Sinne von üblicherweise in Hausstäuben anzutreffenden Inhaltsstoffen zu ermitteln [11]. Die Beutel stammten dabei aber nur teilweise aus repräsentativen Erhebungen. In vielen Fällen haben Privatpersonen dem Labor die Beutel zugeschickt („anlassbezogene Proben“). Allein für die an Hausstaub bindende Substanz Pentachlorphenol (PCP) wurden zwischen 1985 und 2001 insgesamt 4 848 Messdaten generiert. Butte konnte damit nicht nur einen zeitlich abnehmenden Trend der PCP-Konzentration in Hausstaub aufzeigen. Er konnte auch feststellen, dass die PCP-Konzentration in der  $\leq 63\text{-}\mu\text{m}$ -Fraktion höher war als in der  $\leq 2\text{-mm}$ -Fraktion [11]. Höhere Konzentrationen in der  $\leq 63\text{-}\mu\text{m}$ -Fraktion als in der  $\leq 2\text{-mm}$ -Fraktion konnten aber auch bei anderen Stoffen (z. B. Permethrin) nachgewiesen werden [12].

Zeitliche Trends konnten für die Belastung von Hausstaub mit PCP nicht nur in den o. g. anlassbezogenen Kollektiven, sondern auch für andere Stoffe in den Proben aus bevölkerungsrepräsentativen Studien wie GerES gezeigt werden. So belegt z. B. der Vergleich der Daten aus Studien von Walker et al. [12] mit denen von GerES 2003 bis 2006 (vormals Kinderumweltsurvey (KUS) genannt) [13] für die inzwischen nicht mehr verwendeten Biozide PCP, Lindan und DDT ebenso einen deutlich abnehmenden zeitlichen Trend. Als Beitrag zur Substitutionsdiskussion um die verbotenen Phthalat-Weichmacher konnten Nagorka et al. [14] durch die Nachanalyse älterer Proben aus der Umweltprobenbank des Bundes die nach Markteinführung über die Zeit kontinuierlich ansteigenden Konzentrationen der Ersatzstoffe belegen. Die deutliche Zunahme der Hausstaubbelastung, beispielsweise mit Hexamoll® DINCH, war Anlass, auch die körperliche Belas-



von Hausstaub jedoch sehr unsicher [23] und individuell hoch variabel. So liegen bisher keine veröffentlichten Studien vor, die spezifisch die Höhe der Hausstaubaufnahme untersucht haben. Die Aufnahme hängt u. a. mit der Staublast in den Räumen, der Partikelgrößenzusammensetzung [24], der Staubkomposition, der Aufenthaltszeit und den Aktivitäten in den Räumen, der persönlichen Hygiene sowie kulturellen und klimabedingten Gegebenheiten und regionalen und sozioökonomischen Faktoren zusammen.

Veröffentlichte Empfehlungen, von welchen Aufnahmemengen auszugehen ist, beruhen auf Tracer-Methoden, biokinetischen Modellierungen und Modellierungen über Aktivitätsmuster ([25; 26], Angaben des Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), basierend auf [27 bis 29]) und sind mit großen Unsicherheiten behaftet. Dies ist u. a. dadurch begründet, dass in vielen der zugrundeliegenden Studien eine Definition der Matrix Hausstaub im Kontext einer oralen Hausstaubaufnahme fehlt. Des Weiteren fehlen vielfach Überlegungen über Szenarien der Hausstaubaufnahme, die über das In-den-Mund-Nehmen von Fingern (Mouthing) bei auf dem Boden krabbelnden Kindern hinausgehen. Modellierungen der Staubaufnahmen [30 bis 32] beziehen Faktoren wie die Staublast, die Häufigkeit der Hand-Mund-Kontakte und die Transferrate von Partikeln von Oberflächen auf die Hände ein und führen aufgrund der hohen Unsicherheiten dieser Faktoren teilweise zu stark abweichenden Ergebnissen. Für theoretische Betrachtungen zu Risikobewertungen von Fremdstoffen im Hausstaub [33] können die von der United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA) veröffentlichten Empfehlungen zu altersbezogenen Expositionsfaktoren herangezogen werden [34]. Das obere Perzentil beträgt für die Altersgruppen >6 Monate bis 12 Jahre 100 mg/Tag, und der Median liegt für diese Altersgruppe zwischen 30 und 50 mg/Tag. Die theoretischen Annahmen der U.S. EPA konnten bisher auf der Grundlage von Schadstoffgehalten in Hausstaub und korrespondierender innerer Belastung (Humanbiomonitoring) in der Praxis nicht bestätigt werden.

Noch größer werden die Unsicherheiten, wenn quantitative Abschätzungen zur Aufnahme bestimmter Stoffe über den Hausstaub gemacht werden, weil in diese Modellierungen repräsentative und verlässliche Angaben zu den Stoffkonzentrationen im Staub, zu den relevanten Staubfraktionen sowie zur Bioverfügbarkeit eingehen müssen. Für eine Schätzung der inneren Exposition mittels Hausstaubuntersuchungen müssten zudem detaillierte Informationen zur Toxikokinetik bekannt sein. Informationen, z. B. zum Anteil der Aufnahme des Stoffes und zum quantitativen Anteil der einzelnen Metaboliten im Verhältnis zur Aufnahme, die über den Staub erfolgt, liegen aber nur unzureichend und teilweise gar nicht vor. So gibt es keine Studien, in denen all diese Kriterien zufriedenstellend erfüllt wurden. Entscheidend ist insbesondere eine vollständige Erfassung der Ko-Exposition über Lebensmittel, Kosmetika und Verbrauchsgegenstände, da diese Expositionsquellen für viele Stoffe weitaus mehr als die Aufnahme über den Hausstaub zur inneren Belastung des Menschen beitragen.

In verschiedenen Studien wurden die Konzentrationen von Fremdstoffen im Hausstaub und gleichzeitig die durch Humanbiomonitoring als Konzentrationen im Urin oder Blut gemessenen inneren Belastungen untersucht. Die Ergebnisse zeigen ein durchaus gemischtes Bild. So wurden für PCP in manchen Studien positive Korrelationen [35 bis 37] berichtet, in anderen Untersuchungen gab es den Zusammenhang zwischen der PCP-

Hausstaubkonzentration und der inneren Belastung jedoch nicht [38; 39]. Auch für Permethrin konnten zwischen den Konzentrationen im Hausstaub und den Metaboliten im Urin keine Zusammenhänge nachgewiesen werden [40].

Für 2-Diethylhexylphthalat (DEHP) fanden *Becker et al.* [41] bei der Untersuchung von 254 Kindern keinen Zusammenhang zwischen den Konzentrationen im Hausstaub und den Metabolitenkonzentrationen im Urin. Im Gegensatz dazu zeigten sich in der jüngsten GerES V-Studie (2014 bis 2017) statistisch signifikante Zusammenhänge zwischen der Phthalat-Metabolitenbelastung im Urin und dem Gehalt der korrespondierenden Phthalate (DMP, DEP, BBzP, DiBP, DnBP, DEHP, DiNP, DiDP) im Hausstaub [42]. Gleichzeitig ergaben sich zu weiteren Einflussgrößen jedoch zahlreiche weitere statistisch signifikante Zusammenhänge, sodass auf der Grundlage dieser Daten eine Abschätzung, ob und wie der Hausstaub zur gesamten Exposition der Kinder mit Phthalaten beiträgt, derzeit nicht möglich ist.

*Fromme et al.* [43] ermittelten bei Kindern in bivariater Analyse statistisch signifikante Korrelationen zwischen der Phthalatbelastung in der Innenraumluft bzw. im Hausstaub und den korrespondierenden Metabolitenkonzentrationen im Urin. Die multivariate Auswertung zeigte, dass, wenn gleichzeitig die Konzentrationen in der Innenraumluft mitkontrolliert wurden, die Gehalte im Hausstaub nicht mehr mit der inneren Phthalat-Metabolitenbelastung assoziiert waren. *Larsson et al.* [33] fanden bei Kindern keine statistisch signifikanten Korrelationen zwischen der Belastung von Phthalaten, non-Phthalat-Weichmachern sowie Bisphenolen im Hausstaub und den jeweiligen korrespondierenden Metabolitenkonzentrationen im Urin. Dennoch wurde auf der Basis von Annahmen zur oralen Staubaufnahme berechnet, wie hoch der Anteil des Hausstaubs an der Gesamtbelastung mit den untersuchten Schadstoffen ist. Im Ergebnis überschreitet die berechnete tägliche Aufnahme der am höchsten mit DnBP und DiNP belasteten Hausstaubproben den Beurteilungswert. *Fromme et al.* [44] fanden bei Kindern eine schwache, aber statistisch signifikante Korrelation zwischen dem non-Phthalat-Weichmacher DINCH im Hausstaub und der korrespondierenden inneren Metabolitenbelastung im Urin. Gesundheitsbezogene Beurteilungskriterien für die berechnete orale Aufnahme dieses Weichmachers über Hausstaub wurden deutlich unterschritten.

Auch für weitere Substanzgruppen, wie Organophosphat-Flammenschutzmittel oder polybromierte Diphenylether (PBDE), konnten unterschiedlich stark ausgeprägte statistisch signifikante Korrelationen zwischen dem jeweiligen Gehalt im Hausstaub und der inneren Belastung gefunden werden [45 bis 47].

Bei der Beurteilung der in epidemiologischen Studien ermittelten positiven Korrelationen zwischen Hausstaub- und innerer Belastung ist jedoch zu berücksichtigen, dass sie für sich genommen kein Beweis dafür sind, dass eine Aufnahme von Schadstoffen aus belastetem Hausstaub tatsächlich stattgefunden hat. Sie zeigen lediglich an, dass es einen Zusammenhang zwischen zwei Größen, nämlich der Belastung im Hausstaub und der in einem Körpermedium gibt. Auf welchem Weg und in welchem Ausmaß Schadstoffe aus dem Hausstaub tatsächlich in den Körper gelangt sein könnten, ist nicht bekannt. Darüber hinaus gibt es für viele Stoffe neben dem Hausstaub andere Quellen (Bild). Für einige Stoffe, z. B. DEHP, stellte die Ernährung zum Untersuchungszeitpunkt den wichtigsten Aufnahmepfad dar [41; 48]. Viele Stoffe sind zudem auch ubiquitär verbreitet, sodass mögliche Korrelationen zwischen innerer Belastung und Konzentrationen im Haus-

staub davon überlagert werden können, insbesondere wenn es eine sehr starke Einflussgröße gibt.

## 7 Fazit

Die Untersuchung von Hausstaub im Hinblick auf chemische und biologische Inhaltsstoffe spielt nach wie vor eine wichtige Rolle in der Innenraumdiagnostik. Mit ihm kann z. B. ermittelt werden, ob Stoffe den Menschen und seine Wohnumgebung erreicht haben, ob sie längere Zeit in einem Gebäude vorhanden sind und sich über Jahre im sedimentierten Staub angereichert haben. Hierzu müssen einige Kriterien beachtet werden. Im optimalen Fall sollte ein Hausstaub-Referenzwert aus einem vergleichbaren Zeitraum einbezogen werden. Dabei muss die Vergleichsprobe mit derselben Methodik gewonnen werden. Eine nicht repräsentative Vergleichsprobe kann zu falschen Rückschlüssen führen.

Es ist aber nicht möglich, aus dem Ergebnis einer Hausstaubuntersuchung auf mögliche Konzentrationen in der Innenraumluft zu schließen, geschweige denn Abschätzungen zur inhalativen, dermalen und oralen Innenraumexposition von Bewohnern darüber vorzunehmen. Für eine toxikologisch-gesundheitliche Bewertung im Innenraum, die den Inhalationspfad einschließt, kann aber auf zahlreiche toxikologisch begründete Innenraumluft-Richtwerte zurückgegriffen werden [49]. Ebenso wenig darf eine Hausstaubmessung als alleinige Basis zur Ableitung von Sanierungsmaßnahmen genutzt werden. Eine Korrelation zwischen der Konzentration einer Substanz im Hausstaub und in anderen Matrices kann nur auf statistischer Basis für eine große Anzahl von Messungen erfolgen, nicht aber für den individuellen Einzelfall.

Frühere Arbeiten (siehe Literatur) wie auch die Autorinnen und Autoren dieses Artikels kommen zu dem Schluss, dass Hausstaubuntersuchungen mit einer Vielzahl von experimentellen Unwägbarkeiten behaftet sind, weshalb man unterschiedliche Untersuchungsergebnisse häufig nicht miteinander vergleichen kann. Die Messung von Kontaminanten im Hausstaub kann daher nur zeigen, ob ein bestimmter Stoff im Innenraum nachzuweisen ist und ob dessen Konzentration nach statistischen Kriterien auffällig ist, sodass, wie z. B. bei PCP [16], gegebenenfalls Entscheidungen über Raumluftuntersuchungen, Humanbiomonitoring und Materialuntersuchungen zur Identifizierung möglicher Quellen notwendig werden. Mehr Aussagekraft besitzt eine Hausstaubmessung nicht.

## Literatur

- [1] Miller, R. S.: A note on tubercle bacilli in house dust. *Brit. Med. J.* 1 (1894), S. 62.
- [2] Anonymus: House dust and asthma. *The Lancet* 209 (1927), S. 1353-1354.
- [3] Wensing, M.: Sinn und Unsinn von Hausstaubuntersuchungen. In: Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN (Ed.), *Luftverunreinigung in Innenräumen*. VDI-Berichte Nr. 1122, S. 527-533, Düsseldorf: VDI-Verlag 1994.
- [4] Butte, W.; Walker, G.: Sinn und Unsinn von Hausstaubuntersuchungen – das Für und Wider. Hausstaub als Messparameter zum Erkennen einer Innenraumbelastung mit Permethrin, Pentachlorphenol und Lindan. In: Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN (Ed.), *Luftverunreinigung in Innenräumen*. VDI-Berichte Nr. 1122, S. 535-546, Düsseldorf: VDI-Verlag 1994.
- [5] Seifert, B.: Die Untersuchung von Hausstaub im Hinblick auf Expositionsabschätzungen. *Bundesgesundheitsbl.* 41 (1998), S. 383-391.
- [6] Lioy, P. J.; Freeman, N. C. G.; Milette, J. R.: Dust: A metric for use in residential and building exposure assessment and source characterization. *Environ. Health Perspect.* 110 (2002), S. 969-983.
- [7] Mølhav, L.; Schneider, T.; Kjærgaard, S. K.; Larsen, L.; Norn, S.; Jørgensen, O.: House dust in seven Danish offices. *Atmos. Environ.* 34 (2000), S. 4767-4779.
- [8] Morawska, L.; Salthammer, T.: Fundamentals of indoor particles and settled dust. In: *Morawska, L.; Salthammer, T.* (Hrsg.), *Indoor Environ. – Airborne Particles and Settled Dust*. S. 3-46, Weinheim: Wiley-VCH 2003.
- [9] Seifert, B.; Becker, K.; Helm, D.; Krause, C.; Schulz, C.; Seiwert, M.: The German Environmental Survey 1990/1992 (GerES II): Reference concentrations of selected environmental pollutants in blood, urine, hair, house dust, drinking water and indoor air. *J. Expo. Anal. Environ. Epidemiol.* 10 (2000), S. 552-565.
- [10] Körner, W.; Walker, G.: Schwer flüchtige organische Stoffe in Innenräumen Möglichkeiten und Grenzen der Analytik von Hausstaub. *Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft* 73 (2013), S. 77-80.
- [11] Butte, W.: Reference values of environmental pollutants in house dust. In: *Morawska, L.; Salthammer, T.* (Eds.), *Indoor Environ. – Airborne Particles and Settled Dust*. S. 407-435, Weinheim: Wiley-VCH 2003.
- [12] Walker, G.; Hostrup, O.; Butte, W.: Biozide im Hausstaub. Ergebnisse eines repräsentativen Monitorings in Innenräumen. *Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft* 59 (1999), S. 33-41.
- [13] Müssig-Zufika, M.; Becker, K.; Conrad, A.; Schulz, C.; Seifert, I.; Seiwert, M. et al.: Kinder-Umwelt-Survey 2003/06 – KUS – Hausstaub-Stoffgehalte im Hausstaub aus Haushalten mit Kindern in Deutschland. *WaBoLu-Hefte 02/08*. Hrsg.: Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau/Berlin 2008.
- [14] Nagorka, R.; Conrad, A.; Scheller, C.; Süßenbach, B.; Moriske, H.-J.: Diisononyl 1,2-cyclohexanedicarboxylic acid (DINCH) and Di(2-ethylhexyl) terephthalate (DEHT) in indoor dust samples: Concentration and analytical problems. *Int. J. Hyg. Environ. Health* 214 (2011), S. 26-35.
- [15] Butte, W.; Heinzow, B.: Pollutants in house dust as indicators of indoor contamination. *Rev. Environ. Contam. Toxicol.* 175 (2002), S. 1-46.
- [16] Richtlinie für die Bewertung und Sanierung Pentachlorphenol (PCP)-belasteter Baustoffe und Bauteile in Gebäuden (PCP-Richtlinie) Hrsg.: Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt). Berlin: Ernst & Sohn 1997.
- [17] Weschler, C. J.; Nazaroff, W. W.: Semivolatile organic compounds in indoor environments. *Atmos. Environ.* 42 (2008), S. 9018-9040.
- [18] Weschler, C. J.; Nazaroff, W. W.: SVOC partitioning between the gas phase and settled dust indoors. *Atmos. Environ.* 44 (2010), S. 3609-3620.
- [19] Weschler, C. J.; Salthammer, T.; Fromme, H.: Partitioning of phthalates among the gas phase, airborne particles and settled dust in indoor environments. *Atmos. Environ.* 42 (2008), S. 1449-1460.
- [20] Uhde, E.; Varol, D.; Mull, B.; Salthammer, T.: Distribution of five SVOCs in a model room: effect of vacuuming and air cleaning measures. *Environ. Sci. Process. Impacts* 21 (2009), S. 1353-1363.
- [21] Salthammer, T.; Zhang, Y.; Mo, J.; Koch, H. M.; Weschler, C. J.: Erfassung der Humanexposition mit organischen Verbindungen in Innenraumumgebungen. *Angew. Chem.* 130 (2018), S. 12406-12443.
- [22] Stapleton, H. M.; Kelly, S. M.; Allen, J. G.; McClean, M. D.; Webster, T. F.: Measurement of polybrominated diphenyl ethers on hand wipes: estimating exposure from hand-to-mouth contact. *Environ. Sci. Technol.* 42 (2008), S. 3329-3334.
- [23] Klenow, S.; Heiland, A.; Heinemeyer, G.: Schadstoffe im Hausstaub: Verbesserung der gesundheitlichen Bewertung durch Ermittlung der tatsächlichen Staubaufnahme von Kindern und Erwachsenen. Abschlussbericht zum Forschungsprojekt FKZ 3712 62 204. Hrsg.: Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau 2016.
- [24] Cao, Z.-G.; Yu, G.; Chen, Y.-S.; Cao, Q.-M.; Fiedler, H.; Deng, S.-B. et al.: Particle size: A missing factor in risk assessment of human exposure to toxic chemicals in settled indoor dust. *Environ. Int.* 49 (2012), S. 24-30.
- [25] Bothe, M.: Quantifizierung der Ingestion von Boden durch Kinder. Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz. BMU – 2004-647. Hrsg.: VKTA, Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik Rossendorf e. V., Bonn 2004.
- [26] Nordic Exposure Group: Existing default values and recommendations for exposure assessment. A Nordic Exposure Group Project 2011. *TemaNord 2012:505*. Hrsg.: Nordic Council of Ministers, Kopenhagen, Dänemark 2012.
- [27] Davis, S.; Mirick, D. K.: Soil ingestion in children and adults in the same family. *J. Expo. Sci. Env. Epid.* 16 (2006), S. 63-75.

- [28] Oomen, A. G.; Janssen, P. J. C. M.; Dusseldorp, A.; Noorlander, C. W.: Exposure to chemicals via house dust. RIVM 609021064. Hrsg.: RIVM, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven, Niederlande 2008.
- [29] Child-specific Exposure Factors Handbook. EPA/600/R-06/096F. Hrsg.: United States Environmental Protection Agency, Washington D.C. USA 2008.
- [30] Özkaynak, H.; Xue, J.; Zartarian, V. G.; Glen, G.; Smith, L.: Modeled estimates of soil and dust ingestion rates for children. *Risk Anal.* 31 (2011), S. 592-608.
- [31] van Holderbeke, M.; Cornelis, C.; Bierkens, J. G.; Torfs, R.: Review of the soil ingestion pathway in human exposure assessment – Final Report. Study in support of the BeNeKempens project, subproject on harmonization of the human health risk assessment methodology. D/2008/5024/122. Hrsg.: Openbare Vlaamse Afvalstoffenmaatschappij, Mechelen, Belgien 2008.
- [32] Wilson, R.; Jones-Otazo, H.; Petrovic, S.; Mitchell, I.; Bonvalot, Y.; Williams, D. et al.: Revisiting dust and soil ingestion rates based on hand-to-mouth transfer. *Hum. Ecol. Risk Assess.* 19 (2013), S. 158-188.
- [33] Larsson, K.; Lindh, C. H.; Jonsson, B. A.; Giovanoulis, G.; Bibi, M.; Bottai, M. et al.: Phthalates, non-phthalate plasticizers and bisphenols in Swedish preschool dust in relation to children's exposure. *Environ. Int.* 102 (2017), S. 114-124.
- [34] Exposure Factors Handbook. EPA/600/R-09/052F, Update for Chapter 5, Soil and Dust Ingestion, 2017. Hrsg.: United States Environmental Protection Agency, Washington D.C. USA 2011.
- [35] Krause, C.; Englert, N.: Zur gesundheitlichen Bewertung pentachlorphenolhaltiger Holzschutzmittel in Wohnräumen. *Holz als Roh- und Werkstoff* 38 (1980), S. 429-432.
- [36] Meißner, T.; Schweinsberg, F.: Pentachlorophenol in the indoor environment: evidence for a correlation between pentachlorophenol in passively deposited suspended particulate and in urine of exposed persons. *Toxicol. Lett.* 88 (1996), S. 237-242.
- [37] Schulz, C.; Butte, W.: Revised reference value for pentachlorophenol in morning urine. *Int. J. Hyg. Environ. Health* 210 (2007), S. 741-744.
- [38] Liebl, B.; Mayer, R.; Kaschube, M.; Wächter, H.: Pentachlorophenol – Ergebnisse aus einem bayerischen Human-Monitoring-Programm. *Gesundheitswesen* 58 (1996), S. 332-338.
- [39] Rehwagen, M.; Rolle-Kampczyk, U.; Herbarth, O.: Pentachlorophenol im Hausstaub und im Urin ostdeutscher Kinder. *Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft* 59 (1999), S. 43-47.
- [40] Butte, W.; Walker, G.; Heinzow, B.: Referenzwerte der Konzentration von Permethrin-Metaboliten Cl2CA [3-(2,2-Dichlorvinyl)-2,2-dimethylcyclopropan-carbonsäure] und 3-PBA [3-Phenoxybenzoesäure] im Urin. *Umweltmed. Forsch. Prax.* 3 (1998), S. 21-26.
- [41] Becker, K.; Seiwert, M.; Angerer, J.; Heger, W.; Koch, H. M.; Nagorka, R. et al.: DEHP metabolites in urine of children and DEHP in house dust. *Int. J. Hyg. Environ. Health* 207 (2004), S. 409-417.
- [42] Schwedler, G.; Rucic, E.; Lange, R.; Conrad, A.; Koch, H. M.; Pälme, C. et al.: Phthalate metabolites in urine of children and adolescents in Germany. Human biomonitoring results of the German Environmental Survey GerES V, 2014–2017. *Int. J. Hyg. Environ. Health* 225 (2020) S. 113444.
- [43] Fromme, H.; Lahrz, T.; Kraft, M.; Fembacher, L.; Dietrich, S.; Sievering, S. et al.: Phthalates in German daycare centers: occurrence in air and dust and the excretion of their metabolites by children (LUPE 3). *Environ. Int.* 61 (2013), S. 64-72.
- [44] Fromme, H.; Schütze, A.; Lahrz, T.; Kraft, M.; Fembacher, L.; Sievering, S. et al.: Non-phthalate plasticizers in German daycare centers and human biomonitoring of DINCH metabolites in children attending the centers (LUPE 3). *Int. J. Hyg. Environ. Health* 219 (2016), S. 33-39.
- [45] Johnson, P. I.; Stapleton, H. M.; Sjödin, A.; Meeker, J. D.: Relationships between polybrominated diphenyl ether concentrations in house dust and serum. *Environ. Sci. Technol.* 44 (2010), S. 5627-5632.
- [46] Stapleton, H. M.; Eagle, S.; Sjödin, A.; Webster, T. F.: Serum PBDEs in a North Carolina toddler cohort: associations with handwipes, house dust, and socioeconomic variables. *Environ. Health Perspect.* 12 (2012), S. 1049-1054.
- [47] Fromme, H.; Lahrz, T.; Kraft, M.; Fembacher, L.; Mach, C.; Dietrich, S. et al.: Organophosphate flame retardants and plasticizers in the air and dust in German daycare centers and human biomonitoring in visiting children (LUPE 3). *Environ. Int.* 71 (2014), S. 158-63.
- [48] Den Hond, E.; Govarts, E.; Willems, H.; Smolders, R.; Casteleyn, L.; Kolossa-Gehring, M. et al.: First steps toward harmonized human biomonitoring in Europe: Demonstration project to perform human biomonitoring on a European scale. *Environ. Health Perspect.* 123 (2014), S. 255-263.
- [49] Fromme, H.; Debiak, M.; Sagunski, H.; Röhl, C.; Kraft, M.; Kolossa-Gehring, M.: The German approach to regulate indoor air contaminants. *Int. J. Hyg. Environ. Health* 222 (2019), S. 347-354.



**Dr. Julia Hurraß,**  
**Dr. Wolfram Birmili,**  
**Dr. Malgorzata Debiak,**  
**Dr. Marike Kolossa-Gehring,**  
**Dr. Heinz-Jörn Moriske,**  
 Umweltbundesamt (UBA), Berlin.

Bild: Foto Kotti, Berlin.

**Prof. Dr. Tunga Salthammer,**  
 Fraunhofer-Institut für Holzforschung  
 Wilhelm-Klauditz-Institut WKI, Braunschweig.

**Dr. Birger Heinzow,**  
 Kiel.

**Prof. Dr. Werner Butte,**  
 Oldenburg.

**Dr. Martin Kraft,**  
 Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz  
 Nordrhein-Westfalen (LANUV), Recklinghausen.

**Prof. Dr. Gottfried Walker,**  
 Hochschule Emden/Leer.