

Neue Untersuchungsergebnisse zum Phänomen „Schwarze Wohnungen“

H.-J. Moriske, T. Salthammer, M. Wensing, A. Klar, P. Meinschmidt, J. Pardemann, A. Riemann und W. Schwampe

1 Einleitung und Problemstellung

Mitte der 90er Jahre wurden zum ersten Mal Anfragen an das Umweltbundesamt gerichtet, in denen über plötzlich während der Heizperiode entstandene schwarze, ölig-schmierige Beläge an Wand- und Deckenflächen und auf Oberflächen des Mobiliars in Wohnungen berichtet wurde [1]. Ähnliche Fälle wurden bei anderen Institutionen [2; 3] und auch außerhalb von Deutschland bekannt [4; 5]. Das Umweltbundesamt nahm diese Anfragen zum Anlass, 1997/98 eine erste Fragebogenaktion zum Phänomen „Schwarze Wohnungen“¹⁾ durchzuführen, mit der die Gemeinsamkeiten, aber auch die Unterschiede beim Auftreten der Ablagerungen in den betroffenen Wohnungen abgefragt wurden [6 bis 9].

Mit einer erweiterten Fragebogenaktion ab 1999 wurde versucht, weitere Einzelheiten zu ergründen, die für das Auftreten der Ablagerungen von Belang sein könnten [12]. Übereinstimmend ergibt sich aus den vorliegenden Fragebögen, dass das Phänomen „Schwarze Wohnungen“, fast ausschließlich während der Heizperiode plötzlich, meist innerhalb von Tagen bis wenigen Wochen, auftritt (über 90 % aller Fälle) und in etwa der Hälfte der Fälle innerhalb derselben oder darauf folgenden Heizperioden erneut auftreten kann, nachdem die Ablagerungen zuvor entfernt wurden [7 bis 9]. Es können dabei verschiedene Räume der Wohnung betroffen sein, wobei die Intensität der Ablagerungen oftmals im Wohnzimmer am größten war (vgl. **Bild 1**).

Die Ablagerungen wurden des Öfteren in solchen Wohnungen beobachtet, die tagsüber von den Bewohnern wenig genutzt wurden (zeitweise Abwesenheit) und bei denen nur bei Anwesenheit der Bewohner die Heizkörperthermostatventile auf normale Raumtemperaturen eingestellt worden waren, ansonsten jedoch gedrosselt blieben. Fast allen Fällen gemeinsam ist, dass die Wohnungen zuvor renoviert wurden oder die Ablagerungen erstmals nach Neuerrichtung der Gebäude auftraten. Die Auswertung der über 300 eingegangenen Fragebögen ist inzwischen abgeschlossen und wird ausführlich an anderer Stelle publiziert werden [13].

Bislang wurden in weniger als ein Drittel der Fälle Messungen und Analysen, meist mit uneinheitlichen Methoden und Vorgehensweisen, durchgeführt, so dass die ermittelten Messergebnisse nur schwer miteinander vergleichbar sind. Das Umweltbundesamt nahm dies zum Anlass, in einem eigenen umfangreichen Messprogramm gezielt verschiedene, für die Aufklärung des Phänomens möglicherweise wichtige Parameter (Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Luftwechsel-

Zusammenfassung Der in den letzten Jahren zunehmend beobachtete Effekt von plötzlichen großflächig auftretenden schwarzen Ablagerungen in Wohnräumen (Phänomen der „Schwarzen Wohnungen,“) wurde in einem umfangreichen Messprogramm systematisch untersucht. Acht betroffene Wohnungen wurden hierfür ausgewählt. Neben der Analyse chemischer und biologischer Parameter wurde besonderer Wert auf die Erfassung und Charakterisierung der luftgetragenen Stäube sowie auf thermografische Messungen gelegt. Zur Interpretation der Ergebnisse ist es von Bedeutung, ob das Phänomen zum Zeitpunkt der Messungen noch „aktiv,“ oder bereits „inaktiv,“ ist. Die optisch sichtbaren Schwärzungen werden im Wesentlichen durch (Fein)staubpartikeln verursacht. Das Vorhandensein von SVOC an Wandoberflächen begünstigt die Adsorption von luftgetragenen Partikeln. Es ist also zwischen einem „Klebefilmereffekt“ und einem „luftgetragenen Effekt“ (Fogging) zu unterscheiden. Bisher konnte nicht abschließend geklärt werden, ob diese Effekte immer zur Bildung des Phänomens „als erster Schritt“ notwendig sind. Durch zeitaufgelöste Thermografie wurden kältere Wandbereiche, Wärmebrücken und insbesondere die Art der Luftströmung als entscheidende Faktoren zur Auslösung des Phänomens nachgewiesen. Darüber hinaus hängt die Intensität der Schwarzfärbungen auch vom individuellen Wohnverhalten ab. Ein Zusammenhang des Phänomens mit Außenluft einflüssen und VOC-Emissionen war nicht erkennbar, ebenso wenig wie eine Verbindung mit mikrobiellen Innenraumkontaminationen.

Recent results of investigating the Phenomenon of “Black Magic Dust”

Abstract The effect of suddenly appearing large-surface black deposits in living spaces (Phenomenon of „Black Magic Dust“) which has been increasingly observed in recent years has been examined systematically in an extensive program of measurements. Eight housings concerned were selected. In addition to chemical analysis already applied in the past, particular emphasis was laid on the recording and characterization of airborne dust and on thermographic measurements. For investigations, it is important to know if the phenomenon is still „active“ at the time of measurement or if it is already „inactive“. As claimed in the past, the visible black surfaces are essentially caused by (fine) dust particles. The presence of semi-volatile organic compounds (SVOC) on wall surface supports particle absorption. In this context, a distinction must be made between an „Adhesive film effect“ and an „Airborne effect“ (Fogging). However, no final answer to the question if these effects are always required „as a first step“ for creating these phenomena could be obtained. Time-resolved thermography provided proof for colder wall areas, thermal bridges and especially the type of air flow being the decisive factors starting this phenomenon. Besides, the intensity of black precipitations also depends on individual living behaviour. No relation between the phenomenon and outside air influences and VOC emissions could be discerned, the same applies to the simultaneous occurrence with microbial indoor contaminations.

Dr.-Ing. Heinz-Jörn Moriske,
Umweltbundesamt, FG Gesundheitsbezogene Exposition, Innenraumhygiene, Berlin.

Dr. Tunga Salthammer, Anke Klar, Dipl.-Phys. Peter Meinschmidt,
Fraunhofer Institut für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut (WKI), Braunschweig.

Dr. Michael Wensing, Dipl.-Ing. Jörn Pardemann, Dipl.-Ing. Andrea Riemann,
Dipl.-Ing. Wilfried Schwampe,
Gesellschaft für Umweltschutz TÜV Nord mbH, Hamburg.

¹⁾ Aus dem Angelsächsischen abgeleitet wird manchmal auch der Begriff „Black Magic Dust“ [3] verwendet. Geläufig, wenn auch nur ein Bestandteil des gesamten Reaktionsvorgangs, der das Entstehen der schwarzen Ablagerungen in Wohnungen beschreibt (vgl. Abschn. 4) ist auch der Begriff „Fogging-Phänomen“, der sich u. a. aus dem Entstehen schmieriger Beläge an der Innenseite von Windschutzscheiben neu ausgelieferter Kfz ableitet; ein Phänomen, für das ähnliche Entstehungsursachen wie in den beschriebenen Wohnungen verantwortlich gemacht werden [10; 11].



Bild 1 Massive Schwarzstaubablagerungen im Wand- und Deckenbereich eines Wohnzimmers.

zahl, Staubkonzentrationen, verschiedene chemische und biologische Parameter) zu untersuchen. Das Messprogramm wurde gemeinsam mit dem TÜV Nord in Hamburg und dem WKI in Braunschweig durchgeführt. Im Folgenden wird erstmals über die Ergebnisse dieser Studie berichtet, wobei auf die Darstellung der in früheren Veröffentlichungen weniger ausführlich dokumentierten Einflussgrößen besonderer Wert gelegt wurde.

2 Methodik

Von Oktober 2000 bis April 2001 wurden acht von plötzlichen Schwarzstaubablagerungen betroffene Wohnungen in Berlin, Hamburg und Braunschweig (Wohnungen A bis H) untersucht. Die Ablagerungen waren entweder mit Beginn der laufenden Heizperiode entstanden (Wohnungen D, E, F, G und H) oder bereits in vorherigen Heizperioden schon einmal aufgetreten (Wohnungen A, B und C). In einem Fall (Wohnung E) deutete sich an, dass die Ablagerungen sich zum Zeitpunkt der Messungen weiter bildeten. Die Messungen erfolgten während der Heizperiode, die sich im Jahr 2001 aufgrund der kühlen Witterung bis in den April hinein zog, unter Zugrundelegung normaler Lebens- und Wohnverhältnisse.

Während der Messungen sollten keine Veränderungen in der Wohnsituation und im Nutzerverhalten der Bewohner gegenüber dem Zeitpunkt des Entstehens der Ablagerungen vorgenommen werden. Das Untersuchungsprogramm war unterteilt in physikalische, chemische und biologische Messungen. In **Tabelle 1** sind die untersuchten Parameter und die dahinter stehende Fragestellung, welchem Zweck die einzelnen Messungen dienen, zusammengefasst.

Mittels Fragebögen wurden die Wohnsituationen und die Randbedingungen der Messungen (Art und Auftreten des Phänomens, Ausstattung der Wohnung, Heiz- und Lüftungsverhalten etc.) dokumentiert. Einzelne Wohnungen waren Raucherhaushalte (Wohnung A und D = regelmäßiger Tabakkonsum; Wohnung G = gelegentlicher Tabakkonsum). Alle übrigen Wohnungen waren den Fragebogenangaben zufolge Nichtraucherhaushalte.

2.1 Tupf- und Wischproben

An zwei bis drei Stellen in der Wohnung wurden mit Hilfe eines Klebefilms Tupfproben von geschwärzten Flächen entnommen, die anschließend im Labor mittels Licht- und Rasterelektronenmikroskopie (REM) analysiert und ausgewertet wurden. Zusätzlich wurde eine qualitative Elementanalyse mittels energiedispersiver Röntgenmikroanalyse (EDXA) vorgenommen.

Weiterhin wurden jeweils drei bis vier Wischproben von geschwärzten Wandoberflächen sowie von einer Referenzstelle im gleichen Raum ohne erkennbare Ablagerungen genommen. Die Wischproben wurden anschließend im Full-Scan-Modus mit Hilfe eines Gaschromatographen, gekoppelt mit einem Massenspektrometer (GC/MS), untersucht. Diese Methode diente dem Nachweis von schwerflüchtigen organischen Verbindungen (engl.: SVOC) in der Probenmatrix. Für die quantitative Bestimmung speziell von polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK oder engl. PAH) als Indikator für das Vorhandensein von Verbrennungsrückständen (Ruß) in

Tabelle 1 Durchgeführte Messungen im Überblick.

Einzeluntersuchung/Parameter	Fragestellung
Oberflächenuntersuchung (Tupfprobe)	Partikelgrößenspektrum Zusammensetzung von Partikeln
Wischprobe	Vorhandensein von Ruß (PAK), Zusammensetzung (SVOC) an Oberflächen (Schwärzungen, Referenzprobe)
Fogging-Probe	Luftgetragene SVOC (Langzeitmessung 14 Tage)
VOC-Bestimmung	VOC- und TVOC-Belastung der Raumluft
Schwebstaub-Messung	Schwebstaubkonzentration (PM ₁₀) und Korngrößenverteilung (Vergleich Innen-/Außenluft)
Stickstoffdioxid-Messung	Einfluss von Verkehrsemissionen und Verbrennungsprozessen in der Wohnung (Vergleich Innen-/Außenluft)
Luftkeim-Messung	Mikrobiologische Belastungen (Schimmelpilze) (Vergleich Innen-/Außenluft)
Thermografie	Aufspüren von baulichen Mängeln (Wärmebrücken, Kondensationsflächen)
Lufttemperatur, relative Luftfeuchte und Luftströmung, Luftwechselzahl	Dokumentation der raumklimatischen Bedingungen (bei Temperatur und Feuchte z. T. Langzeitmessung über 14 Tage)

den Ablagerungen wurde zusätzlich die SIM-Methode (SIM = Selected Ion Monitoring) eingesetzt. Es wurden 14 PAK gemäß EPA-Richtlinie 610 gemessen, Naphthalin und Acenaphthylen wurden nicht bestimmt.

2.2 Fogging-Probenahme, Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit

Die Fogging-Probenahme erfolgte mit einer vom TÜV Nord bereits für frühere Messungen in Pkw [10; 11] entwickelten speziellen Probenahmetechnik, bei der die luftgetragenen SVOC über einen definierten Messzeitraum an einer gekühlten Glasoberfläche adsorbiert werden. Über einen Zeitraum von 14 Tagen wurden in jeder Wohnung Messungen mit dieser Fogging-Apparatur durchgeführt (zum Messaufbau vgl. [8]). Im Labor wurden die an der Glasplatte kondensierten SVOC mit einem organischen Lösemittel desorbiert und anschließend wie die Wischproben mittels GC/MS untersucht. Über deuterierte n-Alkane ($C_{20}/C_{24}/C_{30}$), die der Analysenlösung als interne Standards zugesetzt wurden, erfolgte eine mengenmäßige Bestimmung der an der Glasplatte abgeschiedenen SVOC.

Zeitlich parallel zur Fogging-Probenahme wurden mit Hilfe eines Temperatur- und Feuchtemessgeräts (Hygrolog, Fa. Rotronic) die Raumlufttemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit kontinuierlich über 14 Tage mit einer zeitlichen Auflösung von 5 min gemessen und mit einem Datenlogger aufgezeichnet.

2.3 VOC-Bestimmung

Die Probenahme flüchtiger organischer Verbindungen (engl.: VOC) erfolgte über eine Anreicherung an TENAX-TA-Passivprobenahmeröhrchen (Fa. Perkin-Elmer) mit anschließender Thermodesorption und GC/MS-Analyse. Die einzelnen identifizierten VOC wurden zum TVOC-Wert (engl. TVOC = Total Volatile Organic Compounds) [14] aufsummiert, um auf diese Weise Vergleichsmöglichkeiten der TVOC-Belastungen mit anderen, nicht von schwarzen Ablagerungen betroffenen Wohnungen (z. B. aus den Umweltsurveys des Bundesgesundheitsamtes/Umweltbundesamtes) schaffen zu können. Pro Wohnung wurden jeweils über 14 Tage zwei Tenaxröhrchen in etwa 1 bis 1,5 m Höhe neben der Fogging-Apparatur aufgehängt.

2.4 Schwebstaub-Messung

Um zu untersuchen, wie hoch die Schwebstaubkonzentrationen in den betroffenen Wohnungen auch im Vergleich zur Außenluft waren und welche Korngrößenverteilung die Stäube aufwiesen, erfolgten Staubmessungen mit Kleinfiltergeräten (Low Vol-Verfahren, Luftdurchsatz 2,1 bis 2,3 m³/h; Fa. Derenda) jeweils über 24 Stunden, parallel innerhalb (Wohnzimmer) und außerhalb (Balkon, Terrasse) einer jeden Wohnung. Zur Vorabscheidung größerer Partikeln wurde zunächst eine Messung mit einem PM₁₀-Messkopf (Fa. Derenda) zur Erfassung von Partikeln mit einem Korngrößendurchmesser bis 10 µm durchgeführt. In der zweiten Untersuchungswoche wurde die Schwebstaubmessung mit einem neunstufigen Kaskadenimpaktor (Fa. Andersen, Nachbau Fa. Derenda) wiederholt, der eine Korngrößenauftrennung der gesammelten Staubpartikeln mit einem aerodynamischen Durchmesser von > 16,5 bis 0,4 µm (angegeben als Cut-Off-Durchmesser) erlaubt.

2.5 Stickstoffdioxid-Messung

Stickstoffdioxid(NO₂)-Messungen erfolgten parallel zu den übrigen Messungen ebenfalls innerhalb (Wohnzimmer, z. T. auch Arbeitszimmer und Schlafzimmer) und außerhalb (Terrasse, Balkon) jeder Wohnung. Es wurden Passivsammlerröhrchen nach *Palmes* eingesetzt, die sich in früheren Studien als valide erwiesen hatten [15; 16]. Die NO₂-Röhrchen wurden in etwa 1 bis 1,5 m Höhe in verschiedenen Räumen und auf dem Balkon bzw. der Terrasse platziert. Die Expositionsdauer betrug je Messung eine Woche (168 Stunden). Die Messungen wurden zweimal pro Wohnung wiederholt. Es sollte damit ein möglicher Einfluss von Verbrennungsgasen außerhalb (Kfz) und innerhalb der Wohnung (Gasthermen, Kerosinöfen etc.) erfasst werden.

2.6 Luftkeim-Messung

Um einzugrenzen, ob in einzelnen Wohnungen auch mikrobielle Verunreinigungen insbesondere von Schimmelpilzen auftreten, die ebenfalls zu schwärzlichen Verfärbungen an Wand- und Deckenflächen führen können, wurden Luftkeimmessungen durchgeführt. Dazu wurden sechsstufige Kaskadenimpaktoren (Fa. Andersen) mit einem Luftdurchsatz von 23,8 l/min bei einer Sammelzeit von 5 min eingesetzt. Es erfolgten jeweils drei Messungen unmittelbar hintereinander in verschiedenen Räumen innerhalb und parallel außerhalb der Wohnung. Bestimmt wurden die Gesamtkoloniezahlen (auf Trypton-Soja-Agar bei 37 °C und zwei Tagen Inkubation) sowie die Pilzkeimzahlen (auf Malzextraktagar bei 25 °C und zwei bzw. sieben Tagen Inkubationsdauer).

2.7 Thermografie, Strömungsprofile, Luftwechselzahlbestimmung

Zur Aufklärung der Verfärbungsmuster an Wänden und Decken in „Schwarzen Wohnungen“ wurde die Methode der zeit aufgelösten Thermografie eingesetzt [17; 18]. Dabei ging es vor allem darum, die Transportvorgänge zu klären, die bewirken, dass einige Wand- und Deckenbereiche starke Ablagerungen zeigen und andere wiederum fast gar keine. Dazu wurden kontinuierlich Serien von Wärmebildern aufgezeichnet, die entweder die Erwärmung der betrachteten Oberfläche, z. B. nach dem Anschalten von Heizungen oder Leuchten, oder einen Abkühlungsvorgang dokumentieren, wobei bereits Wärmeunterschiede auf Objektoberflächen von ca. 0,01 °C gemessen werden können. Warme Bereiche werden in der Regel mit roten, und kalte Stellen mit blauen Farben dargestellt, wie das Beispiel der Aufnahme in Wohnung C zeigt (vgl. **Bild 2**).

Parallel zu den thermografischen Untersuchungen erfolgte die Bestimmung der Luftwechselzahl nach der Tracergas-methode [19]. Hierzu wurde die Luft mit Distickstoffmonoxid (N₂O) dotiert und die Konzentrationsabnahme von N₂O kontinuierlich mit einem nach dem NDIR-Prinzip arbeitenden Monitor (BINOS, Fa. Leybold-Heraeus) aufgezeichnet. Luftströmungen wurden in den Wohnungen an ausgewählten Stellen jeweils in 60 cm, 120 cm, 180 cm und 230 cm Raumhöhe mit Hot-Wire-Anemometern (Fa. Schiltknecht) gemessen.

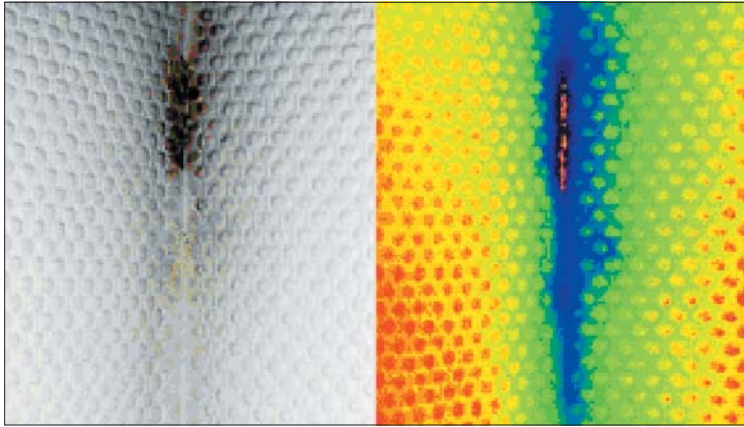


Bild 2 | Thermografieaufnahme einer innenliegenden Außenwand mit Wärmebrücken (Wohnung C).

3 Ergebnisse

Tabelle 2 zeigt eine Zusammenstellung der Ergebnisse einzelner Untersuchungsparameter für die untersuchten Wohnungen A bis H. Einige der Messungen wurden wie beschrieben in der Innenraum- und Außenluft durchgeführt. Darüber hinaus wurden in den Wohnungen teilweise mehrere Räume beprobt. Aus Gründen der Übersicht sind diese Ergebnisse zusammengefasst und lediglich Innenraum- und Außenluftproben einander gegenübergestellt worden.

3.1 Tupf- und Wischproben

An den geschwärzten Stellen, an denen mit einem Klebefilm eine Tupfprobe entnommen wurde, war in der Regel nach

der Probenahme eine deutliche Aufhellung erkennbar. Die Auswertung dieser Tupfproben mit dem Lichtmikroskop zeigte für alle Wohnungen jeweils eine Vielzahl von Partikeln, die offensichtlich für den optischen Eindruck der Schwarzfärbung verantwortlich sind. Neben sehr kleinen Partikeln mit einer Größe von ca. 1 µm waren auch größere Partikeln von bis zu ca. 20 µm an den geschwärzten Flächen vorhanden. In **Bild 3** ist das typische Ergebnis einer Tupfprobe einer geschwärzten Wand dargestellt. Die Analyse der Tupfproben mittels REM ergab, dass die Partikeln zum Großteil aus organischem Staubmaterial bestehen. Darüber hinaus wurden folgende Elemente in den Ablagerungen identifiziert: Aluminium (in drei Wohnungen), Calcium (5), Chlor (5), Eisen (1), Kalium (2), Magnesium (1), Schwefel (2), Silizium (4) und Titan (3).

In den Wischproben von geschwärzten Wandoberflächen wurden in den acht Wohnungen ca. 150 verschiedene SVOC nachgewiesen. Dabei wurden im Wesentlichen die Verbindungen bzw. Verbindungsklassen gefunden, wie sie bereits in früheren Mitteilungen beschrieben wurden [3; 8]. **Bild 4** zeigt exemplarisch das SVOC-Chromatogramm der Wischprobe einer geschwärzten Oberfläche (PVC-Tapete im Bereich des Fenstersturzes) aus Wohnung D. Das Chromatogramm ist in seiner Erscheinungsform besonders auffällig und wird im Wesentlichen von einer Substanz (Bis(2-ethylhexyl)phthalat = DEHP) geprägt. Die entsprechende Referenzprobe enthielt auch DEHP, aber bei weitem nicht in dieser Konzentration. Bei den übrigen Wohnungen ergab ein Vergleich der SVOC-Zusammensetzungen (anhand der entsprechenden Chromatogramme) zwischen geschwärzten Oberflächen und ungeschwärzten Referenzoberflächen qualitativ kaum Unterschiede. Im Einzelfall wurden auch auf Fensterscheiben und anderen inerten Oberflächen (z. B. Kacheln, Fliesen) SVOC nachgewiesen.

Tabelle 2 | Ergebniszusammenstellung verschiedener Einflussparameter für die Wohnungen A bis H.

Untersuchte Parameter	Wohnung							
	A	B	C	D	E	F	G	H
PAK-Gehalt (Σ EPA-PAH) Wischproben in mg/m ² 1)	0,5	2,7	2,2	*)	28,5	9,6	7,3	9,8
TVOC-Gehalt Raumluft in µg/m ³ 2)	310	450	870	1030	360	300	700	590
Fogging-Wert in µg (14 d)	5	4	2	7	14	2	2	4
Schwebstaub (PM ₁₀) Raumluft in µg/m ³ (24 h)	247	93	22	269	43	14	76	84
Schwebstaub (PM ₁₀) Außenluft in µg/m ³ (24 h)	15	11	21	22	44	25	26	29
NO ₂ Raumluft in µg/m ³ 3)	11 - 19	10 - 24	8 - 20	17 - 25	12 - 23	15 - 21	13 - 20	13 - 15
NO ₂ Außenluft in µg/m ³ 3)	17 - 23	23 - 24	26 - 30	38 - 41	39 - 51	20 - 23	20 - 30	22 - 35
Luftkeime (Pilze) Raumluft in KBE/m ³ 4)	1-2,8 · 10 ³	2,5 · 10 ²	0,9-1,7 · 10 ²	0,7-0,8 · 10 ²	0,8-1,2 · 10 ²	1,7-4,1 · 10 ²	0,6-0,8 · 10 ²	0,4-1,3 · 10 ²
Luftkeime (Pilze) Außenluft in KBE/m ³ 4)	2,5 · 10 ³	3,2 · 10 ²	4 · 10 ²	0,3 · 10 ²	1,2 · 10 ²	8,2 · 10 ²	0,9 · 10 ²	2,2 · 10 ²
Raumlufttemperatur in °C 5)	22 - 24	22 - 24	22 - 24	22 - 24	22 - 25	20 - 22**)	22 - 25	18 - 22
relative Luftfeuchte in % 5)	30 - 60	32 - 55	30 - 48	28 - 42	25 - 40	31 - 33**)	22 - 40	30 - 55
Luftwechselzahl in h ⁻¹ 6)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5	n.b.	0,2	0,2

1) Stellen mit Ablagerungen gemittelt

2) Mittelwerte über 14 Tage (gerundet)

3) Wochendurchschnittswerte aus Doppelprobenbestimmung

4) Keimzahlen (koloniebildende Einheiten) nach zwei Tagen Inkubationszeit, Raumluft = Konzentrationsbereiche in verschiedenen Räumen, Mittelwerte aus drei Einzelmessungen

5) Schwankungsbereich über 14 Tage, bei Raumlufttemperatur ohne Lüftungsphasen

6) bei geschlossenen Fenstern und Türen (natürlicher Luftwechsel); n.b. = nicht bestimmt

*) Auswertung aufgrund von Störsignalen unsicher

**) Schwankungsbereich über 1 Tag ohne Lüftungsphasen

Die quantitative Bestimmung der PAK auf geschwärzten Oberflächen ergab in den verschiedenen Wohnungen als Summenwert Flächenbelastungen zwischen 0,5 mg/m² (Wohnung A) und 28,5 mg/m² (Wohnung E), wobei der Durchschnittswert bei 9,2 mg/m² lag.

3.2 Luftmessungen

Die TVOC-Werte in den acht untersuchten Wohnungen variierten von ca. 310 µg/m³ (Wohnung F) bis ca. 1030 µg/m³ (Wohnung D). Aufgrund eines nicht zu vermeidenden Quereinflusses durch das Toluol der Wischprobenahme sind die „wahren“ TVOC-Konzentrationen allerdings im Einzelfall möglicherweise um einige Prozent geringer (errechnet aus TVOC-Werten nach Abzug des Toluolgehalts).

In allen Wohnungen wurden mit Hilfe der Fogging-Messung luftgetragene SVOC nachgewiesen. Die Fogging-Werte (Summenwerte) für die an der gekühlten Glasoberfläche abgeschiedenen SVOC erstreckten sich von 2 µg/(14 Tage) (Wohnungen C, F und G) bis hin zu 14 µg/(14 Tage) (Wohnung E). Werte im Bereich von 2 µg/(14 Tage) wurden bei vergleichbaren Messungen des TÜV Nord auch in Wohnungen ohne schwarze Ablagerungen nachgewiesen. In sieben der acht untersuchten Wohnungen war die Substanz DEHP die Hauptkomponente in der Fogging-Probe. In Wohnung A wurde Nikotin als Hauptkomponente im Fogging nachgewiesen (Raucherhaushalt).

In einigen Wohnungen (Wohnungen A, B, D, G und H) wurden in der Raumluft mit 76 bis 269 µg/m³ deutlich höhere PM₁₀-Konzentrationen gemessen als in der parallel untersuchten Außenluft vor den Wohnungen (11 bis 29 µg/m³). Die höchsten Schwebstaubkonzentrationen ergaben sich in den Raucherhaushalten A und D (247 bis 269 µg/m³). Bei den Wohnungen Nr. C, E und F ergaben sich mit 14 bis 43 µg/m³ innen und 21 bis 44 µg/m³ außen ähnlich hohe PM₁₀-Konzentrationen. Betrachtet man die Korngrößenverteilung der Staubpartikeln in der In-

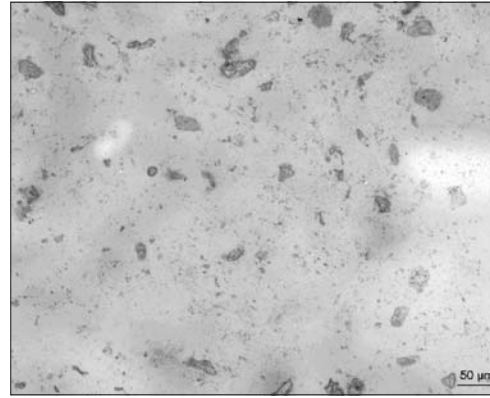


Bild 3 | Partikeln an einer geschwärzten Wand (Wohnung C). Auswertung einer Tupfprobe mit dem Lichtmikroskop (200-fache Vergrößerung).

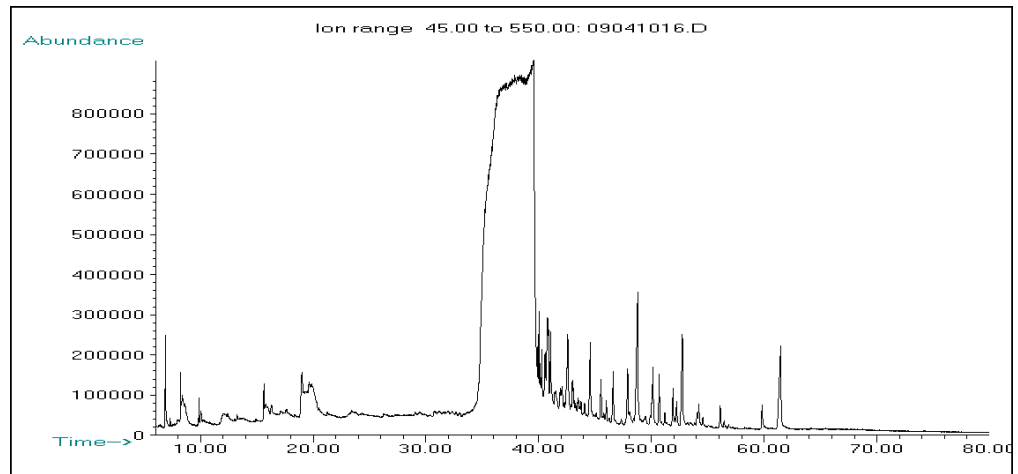


Bild 4 | Totalionenstromchromatogramm Wischprobe, geschwärzte Tapetenoberfläche aus Wohnung D, Hauptpeak DEHP.

nenraum- und Außenluft, so ergab sich in einigen Wohnungen (A, D und G) ein hoher Anteil kleiner Partikelkorngrößen (< 1 µm) (siehe Bild 5). In den übrigen Wohnungen wurden dagegen ähnliche, bimodale Verteilungen der Partikelkorngrößen in Innen- und Außenluft gemessen (vgl. Bild 6).

Die gemessenen NO₂-Konzentrationen lagen in allen Wohnungen mit 8 bis 24 µg/m³ im Bereich oder unterhalb der Außenluftkonzentrationen (17 bis 41 µg/m³). Absolut betrach-

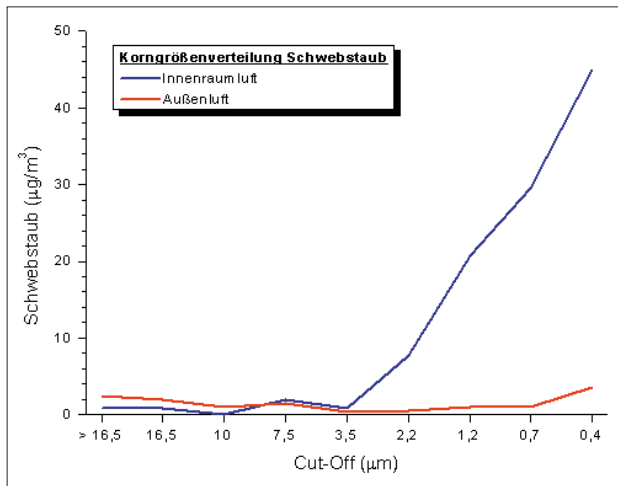


Bild 5 | Partikelkorngrößenverteilung und -konzentrationen in µg/m³ in Wohnung A.

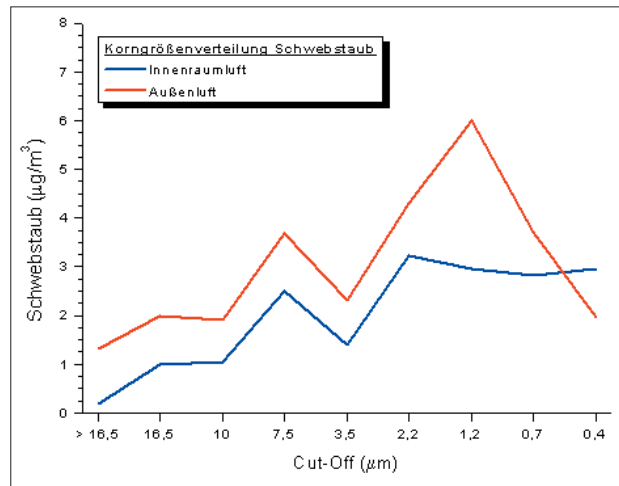


Bild 6 | Partikelkorngrößenverteilung und -konzentrationen in µg/m³ in Wohnung C.

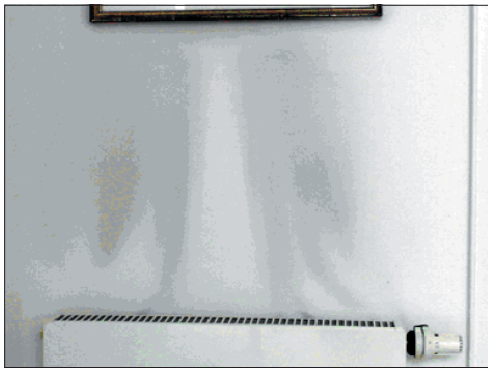


Bild 7 | Wand mit deutlich verfärbten Tapeten (Wohnung E).

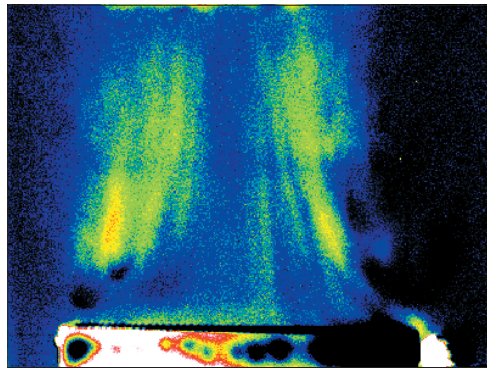


Bild 8 | Thermografiebild der Wandoberfläche (Bild 7) kurz nach Beginn des Heizens (Wohnung F).

(30 bis 2500 KBE/m³). Im Bereich der Wohnung A wurden dabei die höchsten Keimzahlen gemessen (Raumluft: 1000 bis 2800 KBE/m³, Außenluft: 2500 KBE/m³).

3.3 Raumklimatische Parameter

In den meisten Wohnungen wurden sehr geringe Luftwechselzahlen im Bereich 0,1 bis 0,2 h⁻¹ gemessen. Nur in Wohnung Nr. E war der natürliche Luftwechsel mit 0,5 h⁻¹ etwas höher. Die Raumlufttemperaturen (ohne Lüftungsphase) lagen im Mittel zwischen 18 °C und 24 °C. Die relativen Luftfeuchtigkeiten variierten von 22 % bis 60 %.

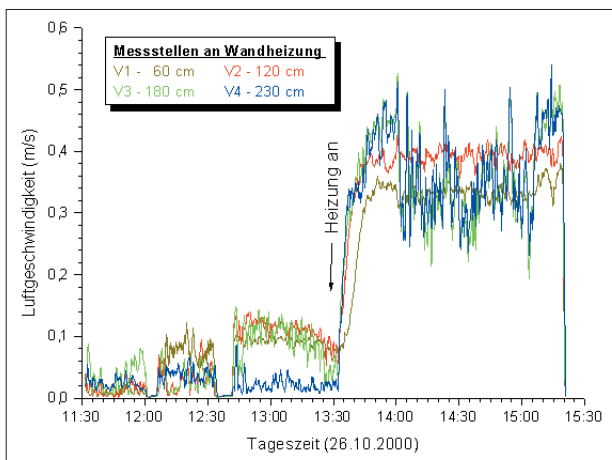


Bild 9 | Strömungsprofile an einem Heizkörper (Wohnung A) vor und nach der Inbetriebnahme.

tet lagen die NO₂-Werte innerhalb und außerhalb der Wohnungen auf einem geringen bis mittleren Belastungsniveau (gemessen als Wochendurchschnittswerte).

In Tabelle 2 sind auch die gemessenen Pilzkeimkonzentrationen (nach zwei Tagen Inkubationszeit) dargestellt (eine ausführliche Darstellung der übrigen Luftkeimwerte erfolgt an anderer Stelle [13]). Die gemessenen Pilzkeimzahlen (nach zwei Tagen) variierten von ca. 60 bis 2500 KBE/m³ und lagen in allen Wohnungen im Konzentrationsbereich der Außenluft

3.4 Thermografie, Strömungsprofile

Ein typisches Beispiel eines thermografischen „Musters“ der hier betrachteten schwarzen Ablagerungen, wie man es in sehr vielen „Schwarzen Wohnungen“ wiederfindet, ist in **Bild 7** zu sehen. Die Wärmebilder zeigen, dass es starke Turbulenzen in der aufstrebenden warmen Luft über diesem Heizkörper gibt, die u. a. durch die Halterungen hervorgerufen werden und offenbar eine sehr inhomogene Erwärmung der Wandoberfläche bewirken (**Bild 8**).

Die Veränderung des Strömungsverhaltens über einem Heizkörper bei dessen Inbetriebnahme ist aus **Bild 9** ersichtlich. Bei ausgeschalteter Heizung liegen die in verschiedenen Höhen gemessenen Luftgeschwindigkeiten bei 0,1 m/s. Nach Einschalten der Heizung entsteht eine turbulente Strömung mit Luftgeschwindigkeiten von ca. 0,3 bis 0,5 m/s.

Eine komplexere thermische Situation ist in **Bild 10** dargestellt (Wohnung G). Mit den zeitaufgelösten Thermografieaufnahmen ließ sich die aufsteigende Wärme der Heizungsluft vor dem Fenster beobachten, die zunächst die Gardinstange und die Decke oberhalb des Fensters erwärmte (rote und grüne Färbung in **Bild 11**). Dagegen erwärmte sich der direkte Eckbereich zwischen Wand und Decke fast gar nicht (siehe blaue Kante in Bild 11). Ein Teil der aufsteigenden Luft umströmte die Halterung der Gardinstange unter starker Zunahme der Turbulenzen. Genau in diesem Bereich sowie im Übergangsbereich Wand/Decke traten die Ablagerungen verstärkt auf.



Bild 10 | Wand und Decke (Wohnung G) mit deutlichen Verfärbungen im Bereich der Gardinstange (siehe Vergrößerung).

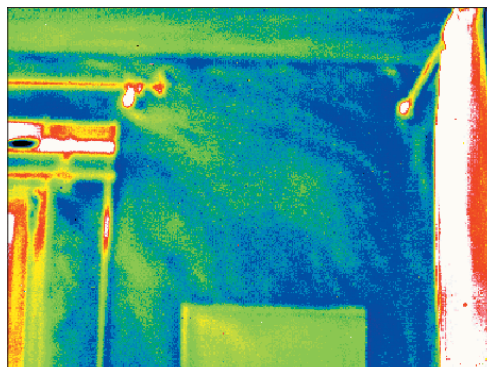


Bild 11 | Thermografiebild (Bild 10) mit deutlich sichtbarer Erwärmung des Deckenbereichs und der Wand unterhalb der Gardinstange (Wohnung G).

Ein weiterer Typ von Schwarzfärbung ist in **Bild 12** im Deckenbereich ca. 0,5 m oberhalb der Halogenstrahler zu erkennen. Auch hier wurden die Bilder zeitaufgelöst aufgezeichnet, nachdem die Strahler eingeschaltet wurden. Neben der direkten Reflexion des Lichts an der Wand sind sowohl die Wärmeentwicklung der Strahler, des Transformators als auch der Kabelverbindung zu erkennen. Deutlich heben sich die warmen Bereiche unter der Decke, oberhalb der Strahler wie auch der Kabelverbindung, von der Umgebung ab (vgl. **Bild 13**). Diese wärmeren Stellen lassen sich sehr gut mit den beobachteten

schwarzen Bereichen im Foto in Übereinstimmung bringen.

4 Diskussion

Alle raumklimatischen Parameter lagen zum Zeitpunkt der Messungen im wohnüblichen Bereich. Die Auswertung der über 14 Tage aufgezeichneten zeitlichen Temperaturverläufe in der Raumluft ergab, dass in drei Wohnungen (C, D und G) offenbar nur sehr wenig gelüftet wurde. Zumindest waren bei diesen Wohnungen, im Gegensatz zu den übrigen Wohnungen, keine plötzlichen Temperatureinbrüche in den aufgezeichneten Daten zu erkennen, die, wie die Erfahrung zeigt, oftmals ein Indiz für eine wirksame Lüftung sind.

Eine der wichtigsten Fragen betraf zunächst die chemisch/physikalische Charakterisierung der schwarzen Ablagerungen. Durch lichtmikroskopische und REM-Aufnahmen konnte nachgewiesen werden, dass es sich vorwiegend um Schwebstaubpartikeln organischer Natur handelt, wobei durch die REM-Analyse nicht differenziert wird, ob es sich um organische Partikeln oder um organische Verbindungen, die an sonstigen Partikeln anhaften, handelt. Neben den organischen Bestandteilen wurde auch eine Reihe von Elementen in den Ablagerungen nachgewiesen, die auf anorganische Anteile hindeuten.

In den Wohnungen A, B, D, G und H wurden in der Raumluft deutlich höhere PM_{10} -Konzentrationen gemessen als in der Außenluft. Die Korngrößenfraktionierung des Staubs zeigte, dass in einigen Fällen Verbrennungsvorgänge in der Wohnung stattgefunden haben (bei Verbrennung fossiler Brennstoffe entstehen zum großen Teil kleine Partikeln mit einem Korngrößendurchmesser $< 1 \mu m$). In den Wohnungen A und D war dabei der Einfluss des Tabakrauchs deutlich erkennbar, in anderen Wohnungen waren offenbar andere Quellen die Ursache. Die deutlich erhöhten PAK-Werte in Wohnung Nr. E, die ebenfalls ein Indiz für Verbrennungsvorgänge sind, sind wahrscheinlich auf den Gebrauch von Öllämpchen zurückzuführen. In Wohnung A ergab sich die Möglichkeit, gezielt eine Oberfläche zu untersuchen, die durch eine an der Wand angeordnete Kerze geschwärzt worden war. Die PAK-Flächenbelastung dieser Probe betrug $5,9 \text{ mg/m}^2$, während die PAK-Gehalte der übrigen geschwärzten Flächen bei $0,5 \text{ mg/m}^2$ lagen.

Bei den Fogging-Untersuchungen der Raumluft wurden in unterschiedlichem Maße luftgetragene SVOC nachgewiesen, die in einigen Wohnungen auch an Fensterscheiben und Fliesenoberflächen zu klebrigen SVOC-haltigen Ablagerungen führten. Da die genannten Flächen selber originär keine SVOC enthalten, müssen die SVOC über den Luftweg dorthin gelangt sein. In allen Wohnungen wurden in den schwarzen Ablagerungen SVOC nachgewiesen. Der Vergleich mit entsprechenden Referenzoberflächen zeigte, dass in sieben der untersuchten acht Wohnungen auch die nicht geschwärzten Oberflächen praktisch in gleichem Maße SVOC enthielten. Bei den vorliegenden Fällen scheint es sich also im Wesentlichen um das sog. „Klebefilmphänomen“ [9] zu handeln, bei dem



Bild 12 | Decke mit Verfärbungen oberhalb der Halogenstrahler (Wohnung F).

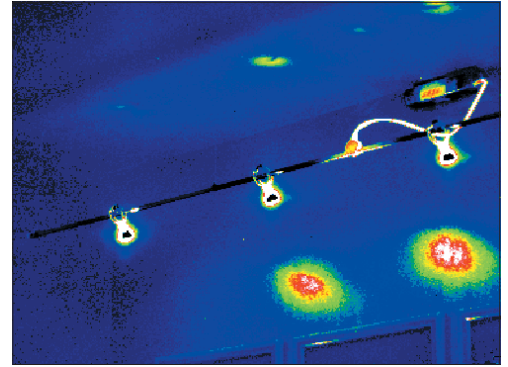


Bild 13 | Thermografiebild mit deutlicher Erwärmung der Deckenbereiche, wo sich auch die schwarzen Flecken befinden (Wohnung F).

SVOC-haltige Untergründe im Zusammenspiel mit anderen Faktoren (z. B. größere Temperaturdifferenzen zwischen Raumluft und Wandoberflächen, verschiedene Luftströmungen) die Ablagerung von Staub begünstigen. Ein besonders ausgeprägtes Beispiel für einen Klebefilm ist die PVC-Tapete in Wohnung D. Die in der Tapete enthaltene Weichmacherverbindung DEHP ist vermutlich durch Migration an die Oberfläche gelangt, was zur Ausbildung eines hochwirksamen Klebefilms geführt hat. Das in der Fogging-Probe aus Wohnung D nachgewiesene DEHP ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf Emissionen der Tapete zurückzuführen [20].

Bzüglich der VOC-Bestimmungen in der Raumluft wurden im Vergleich mit den Ergebnissen von VOC-Untersuchungen in Wohnungen, in denen keine schwarzen Ablagerungen auftraten, keine auffälligen Unterschiede im Hinblick auf die qualitative Zusammensetzung und die Konzentrationen einzelner Verbindungen gefunden. Auch unter Berücksichtigung früherer Messungen in „Schwarzen Wohnungen“ ist ein Zusammenhang zwischen dem Phänomen und VOC-Emissionen eher unwahrscheinlich. Einflüsse der Außenluft und mögliche mikrobielle Belastungen im Innenraum spielen ebenfalls keine Rolle.

Während bei den meisten Wohnungen die erstmalige Entstehung der Ablagerungen zum Zeitpunkt der Messungen bereits zurücklag, handelte es sich in Wohnung E augenscheinlich um ein „aktives“ Phänomen, was durch den deutlich erhöhten Fogging-Wert in der Raumluft bestätigt wird. In Wohnung Nr. F wiesen die Gegebenheiten und Messergebnisse dagegen auf ein „inaktives“ Phänomen hin, das offenbar nur kurzzeitig nach Renovierungsarbeiten (Auftragen einer neuen Wandfarbe in der gesamten Wohnung) aufgetreten war. Bei den übrigen Wohnungen lag der Zeitpunkt des Entstehens der Ablagerungen einige Wochen bis Monate zurück (vgl. Hinweise in Abschn. 2). Durch die Messungen konnte nicht eindeutig geklärt werden, ob das Phänomen zum Zeitpunkt der Messungen noch aktiv war.

Bei den acht untersuchten Wohnungen traten in keinem Fall besonders deutliche Wärmebrücken auf. Es wurden aber Temperaturdifferenzen an Wandoberflächen festgestellt, die möglicherweise für die Auslösung des Phänomens bereits ausreichend sind. Der entscheidende Effekt aus physikalischer Sicht sind offenbar turbulente Luftströmungen, besonders entlang kalter Oberflächen. Damit ist zu erklären, warum die Schwarzfärbungen gehäuft an innenliegenden Außenwänden oberhalb von Heizkörpern und den Übergangsbereichen

Wand/Decke auftreten, an Innenwänden jedoch selten beobachtet wurden. Dies wird aus dem Vergleich der Bilder 7 und 8, 10 und 11 sowie 12 und 13 besonders deutlich. Der Einfluss „kalter“ Wände zusammen mit den thermischen Strömungsbedingungen wird durch das individuelle Wohnverhalten (z. B. durch tagsüber gedrosselte Heizungen bei berufsbedingter Abwesenheit) im Einzelfall verstärkt. Diese experimentellen Befunde stimmen mit den Ergebnissen der jüngsten Fragebogenauswertungen überein.

5 Schlussfolgerungen

Zum Phänomen „Schwarze Wohnungen“ wurden in den letzten Jahren hunderte von Fällen dokumentiert, vielfach Messungen von unterschiedlicher Art und Qualität vorgenommen sowie verschiedene Theorien zur Entstehung entwickelt. Die Komplexität des Themas erfordert zur Aufklärung ein sys-

tematisches und interdisziplinäres Untersuchungsprogramm, das u. a. im Rahmen dieses gemeinsamen Forschungsprojekts realisiert werden konnte. Dabei wurde neben den bereits früher angewandten chemischen Analysen besonderer Wert auf die Erfassung der Stäube sowie auf thermografische Untersuchungen gelegt, um bauliche Mängel (Wärmebrücken) und unterschiedliche Luftströmungen sichtbar zu machen. Bereits mit dem in früheren Mitteilungen veröffentlichten Diagramm [8; 9] wurde eine gute Beschreibung möglicher Einflussfaktoren gegeben. Die jetzt vorliegenden Ergebnisse ermöglichen ein noch detaillierteres Verständnis der Zusammenhänge:

- Die optisch sichtbare Schwärzung der Wände wird wesentlich durch (Fein)staubpartikeln verursacht.
- Das Vorhandensein von SVOC an Wandoberflächen begünstigt die Adsorption von Partikeln. Hierbei ist zwischen einem „Klebefilmeffekt“ und einem „luftgetragenen Effekt“ (Fogging) zu unterscheiden. Es konnte bisher nicht abschließend geklärt werden, ob SVOC grundsätzlich immer zum Auslösen des Phänomens als „erster Schritt“ notwendig sind.
- Kalte Wandbereiche, Wärmebrücken und die Art der Luftströmung wurden als entscheidende Einflussfaktoren zum Auslösen des Phänomens identifiziert.
- Entstehung und Intensität des Phänomens hängen im Einzelfall auch vom individuellen Wohnverhalten ab.
- Einflüsse der Außenluft und VOC-Emissionen spielen im Zusammenhang mit dem Phänomen „Schwarze Wohnungen“ keine Rolle.
- Das Phänomen entsteht im Allgemeinen innerhalb eines kurzen Zeitraums (in Tagen bis wenigen Wochen) und kann im Einzelfall länger (Monate) andauern. Zum Zeitpunkt von Messungen ist zur Interpretation zwischen einem „aktiven“ und einem „inaktiven“ Phänomen zu unterscheiden.

Es gibt keine für alle Fälle von „Schwarzen Wohnungen“ allgemein gültige Erklärung. Der Mechanismus einer möglichen Entstehung ist sehr facettenreich. Auch in Zukunft wird man gezielt Untersuchungen in betroffenen Wohnungen durchführen müssen, um im Einzelfall eine Aufklärung zu erreichen. Darüber hinaus könnte es mit den jetzt gewonnenen Erkenntnissen möglich sein, den Schwärzungseffekt gezielt zu simulieren. Die einzelnen Parameter könnten dann systematisch variiert und ihr Einfluss beobachtet werden.

Der SVOC-Gehalt verschiedener Bauprodukte und Ausstattungs-materialien sowie deren Einfluss auf die Freisetzung foggingaktiver Substanzen sollte ebenfalls gezielt untersucht werden. Mit entsprechenden Informationen können Hilfestellungen bei der Auswahl geeigneter Produkte an die Hand gegeben werden. Dazu muss zunächst die Liste der „fogging-aktiven“ Stoffe genau definiert werden.

Die Zahl der betroffenen Wohnungen dürfte in den kommenden Heizperioden weiter zunehmen, solange die Randbedingungen, die das Entstehen des Phänomens begünstigen, auch weiterhin vorhanden sind. Ein Aspekt ist der weiterhin betriebene Ersatz flüchtiger organischer Lösemittel (VOC) durch schwerflüchtige Stoffe (SVOC) in verschiedenen Bauprodukten. Insbesondere betrifft dies jedoch die Abdichtung der Gebäudehülle aus energetischen Gründen, ohne dass gleichzeitig Lüftungsausgleichsmaßnahmen etwa über mechanische Lüftungseinrichtungen geschaffen würden, sowie das Nutzerverhalten, das der neuen „Wohnsituation“ in hochgedämmten Gebäuden oftmals nicht genügend angepasst wird, jedoch z. B. durch konsequenteres Lüften und sachgerechtes Heizen verbessert werden kann.

Literatur

- [1] *Moriske, H.-J.*: (Plötzliches) Auftreten von Staubimmissionen in Wohnungen. Umweltmedizinischer Informationsdienst. Umweltbundesamt. Institut für Wasser-, Boden- und Lufthygiene (1996) Nr. 3, S. 29–32.
- [2] Landeshygieneinstitut Mecklenburg-Vorpommern: Jahresbericht Umwelthygiene, Schwerin (1999).
- [3] *Wensing, M., Salthammer, T.*: The phenomenon of "Black Magic Dust" in housings. In: Proceedings of the 8th International Conference on Indoor and Climate, Vol. 2, S. 824–829. Hrsg.: *Raw, G.; Aizlewood, C.; Warren, P.* Edinburgh 1999.
- [4] *Camuffo, D.*: Microclimate for cultural heritage. In: Developments in Atmospheric Science, 23. European Commission. Environmental and Climate Research Programme. Amsterdam: Elsevier 1998 S. 270–282.
- [5] *Tappler, P.; Damberger, B.; Twrdik, F.*: Ursachenermittlung und analytische Vorgangswesen bei Auftreten von Schwarzstaubbelastungen in Gebäuden. In: Gebäudestandard 2000: Energie & Raumluftqualität. Hrsg.: Arbeitsgemeinschaft Ökologischer Forschungsinstitute (AGÖF). Tagungsband. Springe-Eldagsen (1998) S. 235–241.
- [6] *Moriske, H.-J.*: Plötzliche Staubimmissionen in Wohnungen: Neue Aspekte, Fragebogenaktion. Umweltmedizinischer Informationsdienst. Umweltbundesamt. Institut für Wasser-, Boden- und Lufthygiene (1997) Nr.1, S. 15–19.
- [7] *Moriske, H.-J.*: Auftreten von plötzlichen Staubimmissionen in Wohnungen. In: *Moriske, H.-J.; Turowski, E.* (Hrsg.): Handbuch für Bioklima und Lufthygiene. Kap. III-4.4. 1, S. 1–6. Landsberg: ecomed, 1. Ergänzungslieferung 1999.
- [8] *Wensing, M.; Moriske, H.-J.; Salthammer T.*: Das Phänomen der „Schwarzen Wohnungen“. Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 58 (1998) Nr. 11/12, S. 463–468.
- [9] *Moriske, H.-J.; Rudolphi, A.; Salthammer, T.; Wensing, M.*: Zum Phänomen der „Schwarzen Wohnungen“ – Aktueller Sachstandsbericht. Gesundheits-Ingenieur 121 (2000), S. 305–311.
- [10] *Bauhof, H.; Wensing, M.*: Standard test methods for determination of VOC and SVOC in automobiles. In: *Salthammer, T.* (Hrsg.): Indoor air pollutants, S. 105–115. Wiesbaden: Wiley-VCH 1999.
- [11] *Wensing, M.; Bauhof, H.*: Luftverunreinigungen in Pkw-Innenräumen. In: *Moriske, H.-J.; Turowski, E.* (Hrsg.): Handbuch für Bioklima und Lufthygiene, Kap. III-4.4.2, S. 1–11. Landsberg: ecomed, 1. Ergänzungslieferung 1999.
- [12] *Moriske, H.-J.*: Zum „Phänomen Schwarze Wohnungen“. Umweltmedizinischer Informationsdienst. Umweltbundesamt (2000) Nr. 1, S. 24–30.
- [13] *Moriske, H.-J.; Turowski, E.* (Hrsg.): Handbuch für Bioklima und Lufthygiene. Landsberg: ecomed-Verlag 1998. 1. bis 6. Ergänzungslieferung 1999 bis 2001.
- [14] *Seifert, B.*: Richtwerte für die Innenraumluft. Die Beurteilung der Innenraumluftqualität mit Hilfe der Summe der flüchtigen organischen Verbindungen (TVOC-Wert). Bundesgesundhbl. 42 (1999), S. 270–277.
- [15] *Moriske, H.-J.; Schöndube, M.; Menk, G.; Seifert, B.*: Erfassung von NO₂-Konzentrationen in der Außenluft mittels Passivsammlern nach Palmes. 1. Mitteilung: Laborversuche und Qualitätssicherung. Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 56 (1996)Nr. 4, S. 129–132.
- [16] *Moriske, H.-J.; Schöndube, M.; Ebert, G.; Menk, G.; Seifert, B.; Abraham, H.-J.*: Erfassung von NO₂-Konzentrationen in der Außenluft mittels Passivsammlern nach Palmes. 2. Mitteilung: Feldversuche. Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 56 (1996) Nr. 5, S. 161–164.
- [17] *Meinlschmidt, P.; Mehlhorn, L.*: Stress Screening on repaired mortar surfaces using nondestructive testing methods. Structural Studies, Repairs and Maintenance of Historical Buildings VI, S. 35–44. Hrsg.: *Brebbia, C.A.; Jäger, W.* 1999.
- [18] *Gaussorgues, G.*: Infrared Thermography. Microwave Technology Series 5. London: Chapman & Hall 1994.
- [19] VDI 4300 Bl. 7: Messen von Innenraumluftverunreinigungen. Bestimmung der Luftwechsellzahl in Innenräumen. In: VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft, Bd. 5. Berlin: Beuth 2001.
- [20] *Uhde, E.; Bednarek, M.; Fuhrmann, F.; Salthammer, T.*: Phthalic esters in the indoor environment – test chamber studies on PVC-coated wallcoverings. Indoor Air (2001) im Druck.