

Fogging: Adhäsion als primärer Auslöser der „Schwarzstaub“-Ablagerung

Verfasser: Dr. Wigbert Maraun; im November 2016

ARGUK-Umweltlabor GmbH, Oberursel

Korrespondenzautor: Dr. Wigbert Maraun, Krebsmühle 1, 61440 Oberursel, 06171 / 71817, www.arguk.de

Veröffentlicht in:

Umwelt, Gebäude & Gesundheit: Schadstoffe, Gerüche und Sanierung, Ergebnisse des 11. AGÖF-Fachkongresses in Hallstadt bei Bamberg, November 2016, Herausgeber: Arbeitsgemeinschaft Ökologischer Forschungsinstitute e.V., ISBN 978-3-930576-10-4

Einleitung

Als Fogging im Innenraum wird eine Abscheidung von Staub mit einer schmierig-ölgigen Konsistenz an Raumbooberflächen bezeichnet. Hierbei handelt es sich um ein vergleichsweise neues Phänomen, das dem Umweltbundesamt nach eigener Aussage Mitte der 1990er Jahre erstmalig bekannt gemacht wurde (Umweltbundesamt 2006).

Beobachtete Faktoren

Durch die Ablagerungen entsteht je nach Schichtdicke eine graue bis schwarze Belegung. Nach den bisherigen Beobachtungen und Untersuchungen (z.B.: Wensing 1998, Moriske 2001, eigene Untersuchungen) haben sich folgende Faktoren gezeigt, für die eine Beteiligung an der Entstehung des Fogging diskutiert wird.

a.) vorausgegangene Renovierungsarbeiten bzw. Neubau:

In ca. 86% der beobachteten "Fogging"-Fälle handelte es sich um renovierte Wohnungen bzw. um einen Neubau. Die Art der durchgeführten Arbeiten steht dabei hingegen in einem weniger deutlichen Zusammenhang: In 52% der Fälle wurden Malerarbeiten vorgenommen, in 34% Fußbodenarbeiten, in 23% Dichtungsmaßnahmen.

b.) Zeitlicher Verlauf

Das Auftreten des Fogging findet in 41% der Fälle innerhalb von 12 Monaten nach der letzten Renovierung bzw. nach dem Einzug statt. Häufig wird das Fogging aber auch innerhalb eines Tages festgestellt oder nach längerer Abwesenheit der Bewohner (z.B. durch Urlaub).

c.) Heizphase

In 92% der Fälle trat das Staubphänomen in der Heizphase auf. Dies wird dem Einfluss der verringerten rel. Luftfeuchte in den Wintermonaten zugeschrieben.

d.) Wohnungsnutzung

Auffallend häufig wird die Vergrauung der Wohnung nach der Rückkehr von einer längeren Abwesenheit oder seltener Nutzung der Wohnung festgestellt. Auffallend ist auch, dass überdurchschnittlich Wohnungen ohne Kinder betroffen sind. Am häufigsten findet sich der Niederschlag auf Oberflächen im Wohnzimmer.

e.) Bauphysikalische Gegebenheiten:

Kalte Außenwände mit Wärmebrücken stellen eine bevorzugte Kondensationsfläche dar. Dachschrägen dienen als Prallwand für den mit der warmen Heizungs-Luft aufsteigenden Staub.

Beobachtete Faktoren (Fortsetzung)

f.) Raumbedingungen:

Isolierende Oberflächen wie Vinyltapeten, Laminatfußboden oder Kunststoffe können ebenfalls zu elektrostatischen Effekten durch Staubabscheidung führen. Daher sind insbesondere PVC-Fensterrahmen, Türen oder Möbel in besonderem Maße betroffen. Latexanstriche von Wand- und Deckenflächen können ebenfalls zu einem deutlichen Fogging-Effekt führen.

g.) Ruß- und Staubquellen:

Wohnungsintern können verschiedene Quellen eine verstärkte Freisetzung von Staub- und Rußquellen bedeuten: Zigarettenrauch, Kerzen, Essenszubereitung, Teppichböden mit Faserfreisetzung, intensive Wohnungspflege mit dem Ausbringen von Tensiden (oberflächenaktive Substanzen); Beseitigung einer Staubsenke durch Austausch einer offenen Gastherme gegen ein raumluft-unabhängiges System (Brennwerttherme).

extern: rußbeladene Außenluft (durch verkehrsreiche Straßen, Industrieemissionen, Wohngebiete mit Kleinf Feuerungsanlagen)

Physikalische Erklärungsversuche

a.) Thermophorese

Thermophorese bezeichnet den Vorgang eines Stofftransportes als resultierende Kraft der unterschiedlichen thermischen Bewegung von Luftmolekülen. An einer gegenüber der Raumtemperatur kälteren Wandfläche werden Luftpartikel, vergleichbar der Brown'schen Molekularbewegung, von „wärmerer“ Luft, also von Molekülen mit größerer kinetischer Energie („Temperatur“) stärker in Richtung der kalten Wand bewegt als die Partikel von den Molekülen geringerer kinetischer Energie von dort fortbewegt werden. Die Resultante ist die Bewegung der Partikel gegen die kältere Wand. „Wärmebrücken“ erscheinen daher vordergründig als Auslöser des Foggings.

b.) Feinstaub

Da die Ablagerungen mikroskopisch als Ansammlung von Feinstaub-Partikeln erscheinen, wird dem Aufkommen von Feinstaub per se eine fogging-auslösende Wirkung zugeschrieben.

c.) Wärmedämmung

Der eingeschränkte Luftaustausch führt in Verbindung mit vermehrt in die Innenraumluft abgegebenen schwerflüchtigen organischen Verbindungen zum „Fogging“.

d.) Klebefilm-Effekt

Luftgetragene Staubpartikel strömen an weichmacherhaltigen Oberflächen vorbei und bilden dann den schmierigen Belag.

Die für die Auslösung des Phänomens vermuteten Faktoren sind wahrscheinlich nicht spezifisch. Die durch Renovierungen oder Errichtung der Wohnung eingebrachten Materialien werden auch sonst verwendet, gegenüber der Raumluft kühlere Außenwände sind i.d.R. vorhanden, damit existieren auch Wärmebrücken. Diese zeigen sich bei einer Fogging-Situation deutlich dadurch, dass dort verstärkt Vergrauung durch erhöhte Staubanlagerung auftritt. Auch Kerzenabbrand oder Zigarettenrauch sind üblich bei einer Wohnungsnutzung, führen in anderen Wohnungen jedoch nicht innerhalb kurzer Zeit zu sichtbaren Wandbeaufschlagungen. Das Vorliegen dieser einzelnen Faktoren ist somit nicht zwingend für das Entstehen des Fogging.

Erklärungsmodell

Als wahrscheinliche Erklärung lässt sich nach heutigem Kenntnisstand folgende zusammenfassende Beschreibung abgeben:

Durch Renovierung, Neubau oder Neuanschaffungen von Einrichtungsgegenständen werden eine Vielzahl schwerer flüchtige organische Verbindungen (SVOC) in Farben, Lacken, Versiegelungen, Teppichböden u.ä. in den Innenraum eingetragen. Mit Beginn der folgenden Herbst- und Wintermonate wird die Lüftung verringert, die Gebäudewände, insbesondere die Außenwände, werden kälter, die Kondensationsneigung der in der Luft befindlichen schwerer flüchtigen organischen Verbindungen nimmt zu. Die stets in der Raumluft vorkommenden Feinstpartikel erhalten durch Kondensation der SVOC auf deren Oberflächen eine chemisch modifizierte Oberflächeneigenschaft. Diese trägt zu einer Zusammenlagerung (Aggregation) unter Bildung größerer Partikel bei. Bei Kontakt mit den Raumbooberflächen kommt es zu einer erhöhten Anlagerung, insbesondere dort, wo sich Temperaturunterschiede an den Wandoberflächen zeigen. Hierbei können aber auch elektrostatische Aufladungen von Kunststoffoberflächen, wie sie gehäuft in den Wintermonaten unter Einfluss der verringerten Luftfeuchte entstehen, zu einer erhöhten Anziehung unterschiedlich geladener Partikel und Flächen führen. Turbulente Strömungen der Luftzirkulation im Raum (z.B. an Bilderrahmen, Wandleuchten, Deckendosen u.ä.) können durch Aufpralleffekte sichtbare Muster einer erhöhten Oberflächenbelegung erzeugen. Elektrostatische Effekte können im Einzelfall zur verstärkten Ablagerung an Wandoberflächen oder auch in elektrischen Geräten wie Fernseher (insbesondere alte Röhrenfernseher) zur Ablagerung beitragen.

Eine besondere Bedeutung kommt dem Auftreten von Fein- (Partikelgröße $< 2,5 \mu\text{m}$) und Ultrafeinstaub (Partikelgröße $< 0,1 \mu\text{m}$) zu. Derartige Partikel können sich auf Grund ihrer geringen Größe nicht mehr ablagern (sedimentieren), sondern verbleiben als Schwebstaub in der Luft. Ein üblicher Auswaschvorgang (Senke) ist jedoch die Anlagerung dieser Feinstpartikel an größere Teilchen (Koagulation). Größere Partikel sedimentieren und entfernen dadurch auch die Feinstpartikel aus der Raumluft. Je weniger Grobpartikel sich in der Luft befinden, umso länger können die kleinen Partikel bestehen bleiben. Unterbleibt in einem Raum die Luftbewegung durch Heizung oder menschliche Aktivität, dann lagern sich die größeren Partikel schnell ab und entfallen somit als Abscheideoberfläche für die Feinststäube. Dies kann erklären, warum das Fogging häufig nach Zeiten einer geringeren oder unterbliebenen Wohnungsnutzung (z.B. durch einen Winterurlaub) auftritt. Auch die auffällige Beobachtung, dass das Fogging ganz überwiegend in Wohnungen festzustellen ist, in denen keine Kinder leben, kann in einem Zusammenhang mit einer verminderten Aufwirbelung von (größerem) Staub und der damit verbundenen geringeren Auswaschung von Feinstaub stehen.

Als Quelle für Fein- und Feinststäube in der Umgebungsluft kommen vor: Verbrennungsprozesse aller Art, Straßenverkehr (mit Dieselruß, Reifen-, Kupplungs- und Bremsabrieb, Abgas-Katalysator) und speziell im Innenraum: Rauchen, Kerzenabbrand, Küchentätigkeit, Imprägniersprays.

Eine neue und bislang wenig untersuchte Feinststaubquelle stellen Produkte dar, denen sog. Nanopartikel beigegeben werden. Dies können sein: Cremes/Pasten/Kosmetika, Drucker/Kopierer, Sonnenschutz und Farben/Lacke/Kleber (Krug 2003).

Der chemisch entscheidende Vorgang ist somit die Anlagerung von schwerflüchtigen organischen Verbindungen (SVOC) an die Feinstpartikel in der Raumluft (Abb. 1).



Abb. 1: Primäre Kondensation von schwerflüchtigen organischen Verbindungen an einem Kondensationskern

Durch diese primäre Kondensations-Anlagerung von SVOC auf der Partikeloberfläche erhält diese neue chemische Eigenschaften. Es kann nun aus diesen Kondensationskernen durch weitere Anlagerung ein Wachstum des Kerns erfolgen. Mit dem Kernwachstum vergrößert sich auch die Oberfläche des Partikels, was eine weitere Anlagerung von SVOC begünstigt (sekundäre Kondensation) (Abb. 2).

Die An- und Ablagerung wird bestimmt durch schwache Bindungskräfte wie Wasserstoffbrückenbindungen, elektrostatische, schwache hydrophobe Wechselwirkungen oder van der Waals-Kräfte. Van der Waals-Kräfte stellen einen Dipol-basierten Bindungstyp dar (gegenüber z.B. einer kovalenten Atombindung). Schwerflüchtige organische Verbindungen enthalten in der Regel Sauerstoff-Atome (z.B. Fettalkohole, Fettsäuren, Ester der Fettsäuren, Phthalate, Adipate, Glykolester) und stellen daher permanente Dipole dar. Es können aber auch Dipole in unpolaren Molekülen (wie Alkane/Paraffine) induziert werden. Dies erfolgt durch die Bewegung der Elektronen im Molekül, die zu Ladungsverschiebungen und somit zu einer Polarisierung des Moleküls führt. Für die van der Waals-Kräfte wurde bisher nur eine geringe Reichweite angenommen. Eine neue quantenmechanische Arbeit (Ambrosetti et al 2016) zeigt jedoch, dass diese Kräfte bis zu 100 nm weit wirken. Nach quantenmechanisch berechneten wellenähnlichen Ladungsdichteschwankungen kommt es bei unpolaren Substanzen zu wechselwirkenden Vorgängen. Die Ergebnisse legen nahe, dass komplexe Kraft-Gesetze eine wichtige Rolle in einer Vielzahl niedrig-dimensionaler Systeme wie den Phospholipid-Aggregaten oder der Ausbildung von Doppelschichten spielen oder sogar auch bei den Haftkräften von Gecko-Füßen mitwirken.

Zur Ausbildung einer Wechselwirkung bedarf es dennoch einer längeren Verweildauer in räumlicher Nähe zwischen den Bindungspartnern. Dies wird durch abnehmende kinetische Energie der luftgetragenen Moleküle, d.h. durch geringere Temperaturen, oder auch durch verringerte Strömung begünstigt.

In der Partikel-Wachstumsphase kommt es über die Oberflächenadhäsion zur Zusammenlagerung (Koagulation) kleinerer Nano-Partikeln zu größeren Feinststaub-Gebilden. Durch das weitere Wachstum entstehen größere Feinstaub-Partikel als sekundäre Kondensation. Diese größeren Partikel bis zu einer Größenordnung von 1-2 µm werden wiederum durch Belegung ihrer großen Oberfläche mit polaren Substanzen selbst zur adhäsiven Anlagerung an stationären Flächen befähigt (Abb. 2).

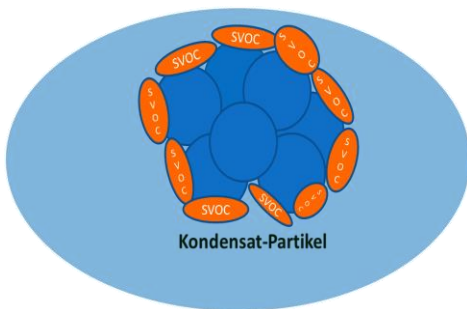
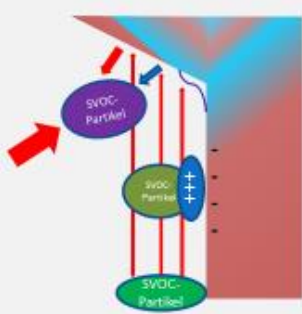


Abb. 2: Sekundäre Kondensation von schwerflüchtigen organischen Verbindungen an der Oberfläche des Kondensat-Partikels

Im makroskopischen Maßstab treten dann überlagernde physikalische Ausprägungsprozesse des Erscheinungsbildes „Fogging“ wie konvektive Strömung, Thermophorese, Kontakt mit Prallflächen, durch Latex-Anstrich geglättete Oberflächen, elektrostatische Aufladung an Kunststoffen, Fehlen von Senken (sedimentierter oder nicht aufgewirbelter Grobstaub) oder Ausbildung unterschiedlicher Schichtdicken hinzu. Diese prägen dann schlussendlich das „Fogging“ (Abb. 3):

Physikalische Ausprägungsprozesse

- Transport der Partikel
 - Konvektion
 - Thermophorese
 - Aufwirbelung
 - Ruhende Grenzschicht
 - Elektrostatische Anziehung



Als wesentlicher initialer Prozess ist jedoch die Ausbildung einer Adhäsion durch die Wechselwirkung und Ablagerung schwerflüchtiger organischer Verbindungen über van der Waals-Kräfte zu sehen. Die durch die Adhäsion entstandene Haftkraft der Partikel an Oberflächen ist demnach das entscheidende Maß. Hier besteht ein Forschungsansatz zur experimentellen Bestimmung der Haftkraft von Partikeln in einer SVOC-Umgebung, vergleichbar der Forschung zur bakteriellen Haftkraft auf Oberflächen (Reimann 2016).

Chemisch stellen daher erhöhte Vorkommen an schwerflüchtigen organischen Verbindungen wie Alkane, Fettalkohole, Fettsäuren, Fettsäureester, Phthalate, Adipate, Trimellitate das wesentliche Risikopotential für die Ausprägung einer „Schwarzstaub-Ablagerung“ in Wohnungen dar.

Analytik

Nach aktuellem Kenntnisstand sollte die Analytik von Fogging-Proben mindestens folgende schwerflüchtigen Substanzen umfassen:

Alkane/Paraffine	Fettsäureester	Andere Weichmacher / Anhydride
C14–C31	Isopropylmyristat (C14-IPE)	Adipinsäurediisobutylester [DIBA]
Fettalkohole	Methylpalmitat (C16-ME)	Adipinsäurediethylhexylester [DEHA]
Dodecanol	Isopropylpalmitat (C16-IPE)	Tri-2-ethylhexyltrimellitat [TEHT]
Tetradecanol	Butylpalmitat (C16-BE)	Tributylcitrat [TBC]
Hexadecanol	Hexadecylpalmitat (C16-HDE)	Tributyl-Acetyl-Citrat [ATBC]
Octadecanol	Methylstearat (C18-ME)	2,2,4-Trimethyl-1,3-Pentandiol-monoisobut. [TXmIB]
Fettsäuren	Butylstearat (C18-BE)	2,2,4-Trimethyl-1,3-Pentandiol-diisobutytrat [TXIB]
Hexan-Säure	Methyloleat (C18en-ME)	Tripropylenglykolmonobutylether [TPGMB]
Heptan-Säure	Ethyleoleat (C18en-EE)	Dipropylenglykoldibenzoat [DPGDB]
Octan-Säure	Methylarachidonat (C20-ME)	Dibutylmaleinat [DBM]
Nonan-Säure	Weichmacher: Phthalate	Di-2-ethylhexylmaleinat [DEHM]
Decan-Säure	Dimethylphthalat [DMP]	Dibutylfumarat [DBF]
Undecan-Säure	Diethylphthalat [DEP]	Di-2-ethylhexylfumarat [DEHF]
Dodecan-Säure	Di-isobutylphthalat [DiBP]	Phthalsäureanhydrid
Tridecan-Säure	Di-n-butylphthalat [DBP]	Hexahydrophthalsäureanhydrid [HHPA]
Tetradecan-Säure (Myristinsäure)	Benzylbutylphthalat [BzBP]	Methylhexahydrophthalsäureanhydrid [MHHPA]
Pentadecan-Säure	Di-2-ethylhexylphthalat [DEHP]	Rauch- u. Verbrennungsprodukte
Hexadecan-Säure (Palmitinsäure)	Di-2-ethylhexyl-terephthalat [DEHtP]	Nikotin
Heptadecan-Säure	Di-i-heptylphthalat [DiHpP]	Fettindikatoren
Octadecan-Säure (Stearinsäure)	Di-2-propylheptylphthalat ([DPHP]	Squalen
Octadecen-9,12-dien-Säure (Linolsäure) /	Di-i-octylphthalat [DiOP]	Cholesterol
Octadecen-9,12,15-trien-Säure (Linolensäure)	Di-i-nonylphthalat [DiNP]	PAK-Leitkomponenten
Octadecen-9-en-Säure (Ölsäure)	Di-i-decylphthalat [DiDP]	Phenanthren
		Benzo[a]pyren (BaP)

Durch das Auffinden von fogging-aktiven Substanzen in erhöhten Konzentrationen (im Flächenbezug) kann dann auch ein erster Schritt für eine Quellenzuordnung und zur Risikominimierung erfolgen.

Fazit

Was ist „Fogging in einer Wohnung“?

Fogging ist im Wesentlichen

- die durch **Transportvorgänge** in der Raumluft gestaltete
 - Abscheidung von Feinstaub und
 - Verbleib der Partikel auf der Oberfläche unter
 - Ausbildung lichtabsorbierender Schichten
 - in Folge der **Adhäsion** von Partikeln durch die
 - chemisch modifizierte Partikeloberfläche
 - durch schwer flüchtige organische Verbindungen (**SVOC**)

„Was wir sehen, ist Physik – und was Fogging bedingt, ist Chemie!“

Literaturverzeichnis

Ambrosetti A, Ferri N, DiStasio Jr RA, Tkatchenko A (2016): Wavelike Charge Density Fluctuations and van der Waals Interactions at the Nanoscale, Science 351, 1171

Umweltbundesamt (Hrsg.) *Attacke des Schwarzen Staubes*, Berlin 2006

Wensing M, Moriske H-J, Salthammer T (1998): Das Phänomen der „Schwarzen Wohnungen“. Gefahrstoffe - Reinhalt. Luft 58, 463-468

Moriske H-J, Salthammer T, Wensing M, Klar A, Meinlschmidt P, Pardemann A, Riemann A, Schwampe W (2001): Neue Untersuchungsergebnisse zum Phänomen „Schwarze Wohnungen“. Gefahrstoffe - Reinhalt. Luft 61 387-394

Krug, H F (2003): Nanopartikel: Gesundheitsrisiko, Therapiechance?, Nachrichten aus der Chemie, 51, 1241-1246

<https://de.wikipedia.org/wiki/Van-der-Waals-Kr%C3%A4fte> (Abruf 25.08.2016)

Reimann, H-A (2016): Bakterielle Haftkraft; Published on GIT-Labor – Portal für Anwender in Wissenschaft und Industrie (<http://www.git-labor.de>)