

Praxisbeispiele zu erhöhten und verbreiteten Quecksilberbelastungen in Innenräumen

**Jörg Mertens, Jutta Mertens, Michael Köhler, Norbert Weis
(Bremer Umweltinstitut GmbH)**

Einführung

Erhöhte Belastungen der Innenraumluft mit Quecksilber prägen heutzutage im Vergleich zu anderen Gebäudeschadstoffen wie z.B. Asbest PAK, Formaldehyd, VOC oder Schimmelpilzsporen deutlich seltener den Arbeitsalltag der Sachverständigen für Gebäudeschadstoffe. Entsprechend selten wird das Thema auch auf Fachkongressen thematisiert. Nach unseren Erfahrungen ergeben sich Untersuchungsanlässe sporadisch und dann in der Regel eher nach Freisetzungen metallischen Quecksilbers aus zerbrochenen älteren Thermometern oder Barometern. Die beauftragten Untersuchungen sind dann häufig auf den Freisetzungsort begrenzt.

Dieser Beitrag soll anhand zweier Praxisbeispiele mit deutlich umfangreicheren Untersuchungen auf Quecksilberproblematiken in Innenräumen aufmerksam machen und hierbei gewonnene Erkenntnisse darlegen. Die Beispiele zeigen anhand von Untersuchungsergebnissen der Raumluft, welche Ausbreitung einzelne Freisetzungen annehmen können und wie sich scheinbar jahreszeitlich bedingte Temperatureinflüsse auf Quecksilber-Raumluftkonzentrationen auswirken können. Weiterhin wird auf den Einsatz eines Online-Messgerätes eingegangen und erste Erfahrungen hieraus gegenüber dem ansonsten hier für Luftuntersuchungen genutzten BGIA-Messverfahren präsentiert. Aus Ergebnissen von Baumaterialuntersuchungen auf Quecksilber wird zudem eine Klassifizierung in Kontaminationsgrade vorgenommen, die für die Ableitung von Sanierungsmaßnahmen orientierend herangezogen werden kann.

Quecksilber (chemische Abkürzung: Hg) ist ein silberweißes, wasserunlösliches Metall mit hoher Oberflächenspannung und das einzige Metall, das bei Raumtemperatur im flüssigen Zustand auftritt. Bei Freisetzung flüssigen Quecksilbers z.B. aus einem zerbrochenen Quecksilberthermometer bilden sich aufgrund der hohen Oberflächenspannung des Metalls linsenförmige Tropfen, die sich im Bodenbereich des Raumes verteilen und sich je nach Beschaffenheit des Bodenaufbaus auch in Rillen (z.B. von Parkettböden) und Randfugen setzen. Der relativ hohe Dampfdruck bewirkt einen leichten Übergang des flüssigen Metalls in die Dampfphase, was zur Anreicherung in der Raumluft führt.

Auch aus anderen Anwendungen werden erhöhte Quecksilber- Raumluftkonzentrationen benannt. *Gebhardt et al.* beschreiben auf Basis eigener Untersuchungsergebnisse diese z.B. aus Verwendungen wie dem Einsatz als Holzschutz- und Desinfektionsmittel oder in Folge einer medizinischen Vornutzung eines Gebäudes. Hier ist insbesondere die Verwendung von Quecksilber als Amalgam in der Zahnmedizin aufzuführen. So sind auch laut *Zwiener et al.* hohe nutzerbedingte Quecksilberbelastungen in ehemaligen Zahnarztpraxen zu finden. Zudem werden hohe Belastungen in Wohnungen und Produktionsstätten beschrieben, die zur Spiegelherstellung genutzt wurden (*Zwiener / Pluschke / Gebhardt*). Weitere Anwendungsfelder waren u.a. quecksilberhaltige Zusätze in Farben sowie in der Chloralkali- und Elektroindustrie. Mit dem Ablösen der klassischen Glühlampe durch Kompaktleuchtstofflampen (KLL, Energiesparlampen) in den letzten zwei Dekaden wurde der Einsatz von Quecksilber in Leuchtmitteln stark thematisiert. Zerbrechen diese Lampen kann laut Umweltbundesamt (UBA) abhängig von der eingesetzten Technik und den Randbedingungen ebenfalls Quecksilber in

solchen Mengen in den Innenraum freigesetzt werden, dass gesundheitlich bedeutsame Luftkonzentrationen erreicht werden können. Ein sofortiges Lüften und Beseitigen der Scherben führe jedoch in diesen Fällen auch wieder zu einer raschen Reduktion der Raumluftkonzentrationen (*UBA*).

Akute gesundheitliche Vergiftungssymptome durch Quecksilberdämpfe sind unterhalb einer Konzentration von $100 \mu\text{g Hg}/\text{m}^3$ unwahrscheinlich (*Marquardt*) und sind daher nach *Link* im nicht-gewerblichen Bereich i.d.R. nicht zu erwarten. Sie werden jedoch besonders bei Konzentrationen von 1000 bis $3000 \mu\text{g Hg}/\text{m}^3$ mit gefährlichen Auswirkungen auf die Lungen beschrieben. Innerhalb einiger Stunden treten neben Atemnot auch Fieber und Kopfschmerzen auf (*Marquardt*).

Chronische Exposition führt in erster Linie zu Auswirkungen am zentralen Nervensystem (Tremor mercurialis, Erregbarkeit, Reizbarkeit) und der Niere (Erhöhung der Proteinausscheidung, tubuläre Schädigung). Daneben treten z.B. Entzündungen der Mundhöhle und des Zahnfleisches sowie allergische Erscheinungen an der Haut und der Mundschleimhaut auf (*Marquardt / Link*).

Die *TRGS 900* führt als Arbeitsplatzgrenzwert für elementares Quecksilber eine Luftkonzentration von $20 \mu\text{g Hg}/\text{m}^3$ (Überschreitungsfaktor 8 (II)) auf. Die World Health Organisation (*WHO*) nennt als Richtwert für die Luft eine Konzentration von $1 \mu\text{g Hg}/\text{m}^3$ (Jahresmittelwert). Als tolerable Konzentration für eine lang andauernde Exposition mit elementarem Quecksilberdampf wurde ein Wert von $0,2 \mu\text{g Hg}/\text{m}^3$ benannt. Unter Anwendung des Basisschemas zur Ableitung von Richtwerten für die Innenraumluft (*UBA2*) veröffentlichte das Sozialministerium Baden-Württemberg 1999 Richtwerte für die Innenraumluft für metallisches Quecksilber bzw. Quecksilberdampf als Empfehlung. Hier wurde ein Richtwert II (RWII) von $0,35 \mu\text{g Hg}/\text{m}^3$ festgelegt. Es wird dabei darauf hingewiesen, dass dieser RWII jedoch nicht als Eingreifswert im sonst verstandenen Sinne zu betrachten ist. Seine Überschreitung weist darauf hin, dass relevante Quellen im betroffenen Raum vorhanden sind, die unter Beachtung der Verhältnismäßigkeit entfernt werden sollen. Zur Vermeidung von Zusatzbelastungen sei auch bei einer Quecksilber-Konzentration unterhalb des RWII eine Entfernung von Quellen im Rahmen der Verhältnismäßigkeit sinnvoll. Bei Raumluftkonzentrationen unterhalb des Richtwertes I (RWI) von $0,035 \mu\text{g Hg}/\text{m}^3$ liefere die Raumluft keinen nennenswerten Beitrag zur Gesamtbelastung wie sie durch andere Aufnahmepfade z.B. aus Amalgamfüllungen verursacht werden können. Die Hintergrundkonzentration in der Außenluft liegt in Deutschland etwa bei $0,002$ bis $0,005 \mu\text{g Hg}/\text{m}^3$, in Ballungsgebieten bei $0,01 \mu\text{g Hg}/\text{m}^3$. (*Link, 1999*)

Materialien und Methoden

Die Probenahmen der Luftproben auf elementares Quecksilber erfolgten analog BGIA-Verfahren 8530 auf Glasröhrchen, gefüllt mit 500 mg Anasorb C300. Das Probenahmenvolumen betrug bedarfsorientiert ca. 200 bis 1.500 Liter bei einer Luftdurchflussrate von ca. 1,5 -2,0 L/min. Die führt zu Bestimmungsgrenzen von ca. $0,002$ bis $0,010 \mu\text{g Hg}/\text{m}^3$.

Einsammeln, Transport und Lagerung von Materialproben erfolgte in Glasfläschchen.

Die Quantifizierungen erfolgten jeweils nach Totalaufschluss mittels Atomfluoreszenzspektrometrie.

Beim Vorgang des Beispiels 2 kam kundenseits mit dem *Mercury Tracker 3000 IP* (Firma: Mercury Instruments GmbH) auch ein direktanzeigendes Online-Messgerät für Quecksilber zum Einsatz. Bestimmungsgrenze und Auflösung liegen bei 100 ng Hg/m³. Dem Gerät liegt die Bestimmung der Resonanzabsorption der Hg-Atome bei einer Wellenlänge von 253,7 nm zu Grunde (Ansaugung Probengas über Filtermembrane in eine optische Zelle aus Quarzglas / Durchstrahlung mittels Quecksilberlampe / Messung der Abschwächung der Lichtmenge, welche von den im Probengas anwesenden Quecksilberatomen verursacht wird) (*Mercury Instruments*).

Die Ergebnisse von Quecksilberaumluftkonzentrationen werden nachfolgend aufgrund einer besseren Lesbarkeit in der Einheit ng Hg/m³ statt in µg Hg/m³ aufgeführt.

Beispiel 1: Wohngebäude mit 5 Wohneinheiten

Schadensereignis: Ende August 2016 kam es bei Außentemperaturen um 30 °C in der linken, unbewohnten Obergeschosswohnung bei beginnenden Renovierungsarbeiten an der Strohputzdecke (Holzdeckenkonstruktion) zur Freisetzung eines in der Decke eingeschlossenen flüssigen Quecksilberreservoirs unbekannter Herkunft. Es wurde berichtet, dass die silbrige Flüssigkeit aus der Decke auf den Boden tropfte. Der durchführende Handwerker hatte das Quecksilber als solches erkannt, und daraufhin seine Arbeiten eingestellt und den Eigentümer informiert. Der Eigentümer quartierte die Bewohner der vier weiteren Wohneinheiten vorsorglich aus dem Gebäude aus, da Quecksilberkontaminationen in angrenzenden Bereichen, u.a. in dem von allen Bewohnern genutzten Treppenhausbereich wahrscheinlich erschienen. Es erfolgten keine Quecksilber-bindenden oder Quecksilber-entfernenden Erstmaßnahmen sowie keine dauerhafte Fensterlüftung.

Durchführung Luftuntersuchungen: Die Mitte September 2016 durch den Eigentümer beauftragten Statusuntersuchungen umfassten achtzehn Raumlufmessungen in den fünf Wohneinheiten und im Treppenhaus sowie eine parallele Außenluftmessung. Die Durchführung erfolgte in zwei Messserien nach einer Anreicherungsdauer der Raumluf über mindestens acht Stunden (zzgl. der Probenahmedauer von ca. zehn Stunden). Um Probenahme-bedingte Kontaminationen möglichst zu minimieren, wurden zuerst die Messungen in der rechten, schadensferneren Gebäudehälfte und erst zuletzt die Probenahme im Schadensbereich durchgeführt. Eine Nutzungssimulation erfolgte, da die Wohnungen zu dem Zeitpunkt nicht mehr bewohnt wurden. Es wurden Raumtemperaturen von 22,6°C bis 26,1°C festgehalten.

Ergebnisse Luftuntersuchungen: An jedem Messpunkt konnte Quecksilber in der Raumluf nachgewiesen werden. Die niedrigsten drei Messwerte von 20 bis 35 ng Hg/m³ konnten alle in der rechtsseitig gelegenen und schadensfernen Erdgeschosswohnung ermittelt werden. Fünf weitere Ergebnisse in zwei weiteren Wohnungen sowie die Ergebnisse der beiden Treppenhausmessungen (43 und 62 ng Hg/m³) ergaben Konzentrationen zwischen RWI und RWII. Alle weiteren Messungen ergaben Konzentrationen oberhalb des RWII von 450 ng Hg/m³ bis zu 22.000 ng Hg/m³ außerhalb des Schadensraumes. Davon betroffen waren alle weiteren vier Wohnungen. Im Schadensraum konnte die höchste Raumlufkonzentration mit 470.000 ng Hg/m³ und damit vier Größenordnungen oberhalb des RWII ermittelt werden. Insgesamt zeigten damit die Statusuntersuchungen bereits erhöhte und verbreitete Quecksilberaumluftkonzentrationen in dem Gebäude auf.

Zur Veranschaulichung fasst Abbildung 1 alle Messergebnisse noch einmal in räumlicher Anordnung zusammen:

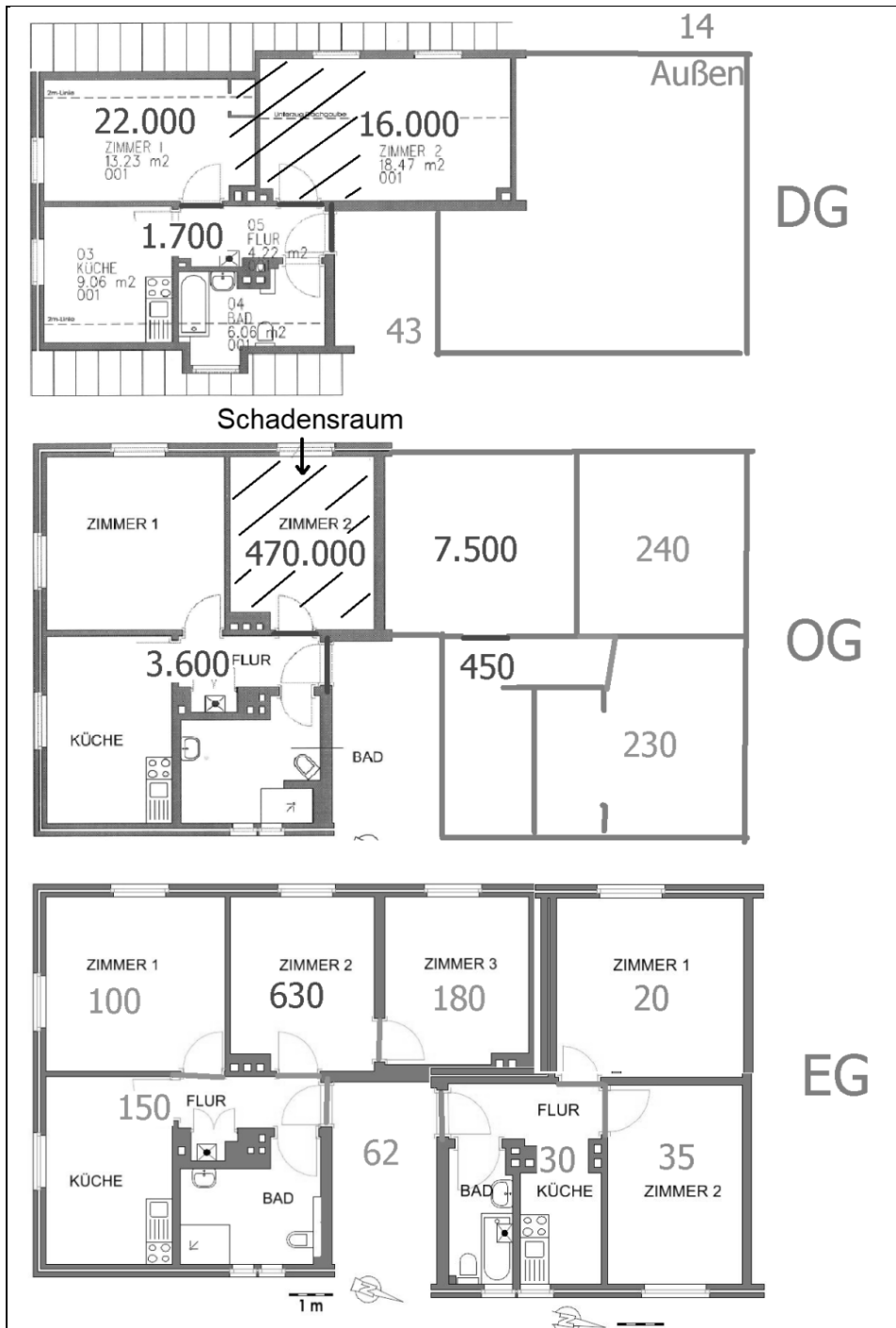


Abb. 1: räumliche Verteilung der ermittelten Quecksilberkonzentrationen in ng Hg/m³

Erste Empfehlungen und Maßnahmen: Aus den Messergebnissen resultierte die überwiegende Aufrechterhaltung der getroffenen Schutzmaßnahmen, d.h. für die meisten Wohnungen eine Nutzungsaussetzung für den Daueraufenthalt. Für die Dachgeschosswohnung sowie auch für die Schadenswohnung sollte auch ein kurzfristiger Aufenthalt (ohne sachgerechte Schutzausrüstung) unterbleiben. Da die ermittelten Luftkonzentrationen in der Wohnung EG rechts insgesamt im geringen Konzentrationsbereich und nicht oberhalb des RWI lagen, brauchte für diesen Wohnbereich keine Nutzungseinschränkung erfolgen. Kontaminationspfade von höher konzentrierten Raumbereichen in geringer konzentrierte Raumbereiche (Unterschiede von bis zu 5 Größenordnungen) sollten vermieden werden.

Für die ausquartierten Bewohner erging die Empfehlung sich fachärztlich untersuchen zu lassen. Der Gebäudeeigentümer meldete hier zurück, dass diese der Empfehlung nachkamen und dass die medizinischen Untersuchungen keine Auffälligkeiten ergaben.

Sanierungserfahrungen mit Quecksilber-belasteten Raumbereichen oberhalb von 20.000 ng Hg/m³, wie sie i.T. festgestellt wurden, lagen nicht vor. Hierin bestand eine wesentliche Herausforderung für die Wiedernutzbarmachung der Räume. Für die Erstellung eines Sicherungs-, Dekontaminations- und Entsorgungskonzeptes wurde seitens des Gebäudeeigentümers ein Sanierungsfachplaner hinzugezogen, der bis Ende September kurzfristig ein erstes Leistungsverzeichnis hierzu erstellte. Dieses war ausgerichtet auf Sicherungsmaßnahmen, den Umgang mit dem Inventar, dauerhafter technischer Luftwechsel, Ausbaumaßnahmen der Primärquellen und Primärquellenkontaminationen sowie Reinigungsmaßnahmen inkl. Entsorgung. Eine Erkundung und Sanierung von Sekundärbelastungen sollte vorerst nicht erfolgen, um Kosten zu sparen. Für die Durchführung der Arbeiten wurden die Standards der TRGS 524 in Verbindung mit den DGUV-Regeln 101-004 für kontaminierte Bereiche (u.a. hier Atemschutz-Vollmaske mit Filter ABEK 2-P3-Hg) vorgegeben. Circa zwei Monate nach Schadenseintritt wurde Mitte Oktober eine Fachfirma für Schadstoffsanierungen mit der Umsetzung der Maßnahmen beauftragt, die hierzu die weitestgehend unbelastete Wohnung im Erdgeschoss rechts bezog.

Zielwertvorgabe: Nach zusätzlicher Abstimmung mit dem Gesundheitsamt strebte der Gebäudeeigentümer als Sanierungszielwert eine Unterschreitung der RWI-Konzentration von 35 ng Hg/m³ vor Rücküberführung an die Nutzer an.

Dekontamination und Sanierung: Mobiliar und Inventar wurden soweit möglich feucht gereinigt und so von anhaftenden Stäuben befreit und aus den Wohnungen geschafft. Die Kleidung der Bewohner wurde vorübergehend ins Kellergeschoss gebracht und dort stichpunktartig durch Luftuntersuchungen messtechnisch kontrolliert.

Im Schadensbereich erfolgte unter technischem Luftwechsel der Ausbau der Holzdecke bis auf die tragende Balkenkonstruktion. Dabei wurde weiteres Quecksilber, ohne neuere Erkenntnisse auf die Ursache, aus der Decke (etwa 50 ml) aufgefangen. Aus den beiden Dachgeschossräumen und dem Schadensraum entstand durch die Baumaßnahmen ein größerer Sanierungsbereich in einem Luftverbund. Im benachbarten Raum der Nebenwohnung erfolgten separat ein technischer Luftwechsel sowie eine feuchte Feinreinigung, vorerst ohne Rückbaumaßnahmen.

Die **ersten Kontrolluntersuchungen** erfolgten Mitte Januar 2017. Es wurden Heizlüfter zum Aufheizen der Räume eingesetzt. Die Anreicherungsdauer bis zum Messbeginn betrug erneut mindestens 8 Stunden. Gegenüber den Ergebnissen der Statusmessungen konnte ein starker Rückgang auf 1.800 bis 2.500 ng Hg/m³ bei circa 21°C festgestellt werden.

Trotz der starken Reduktion wurde für diese Raumbereiche das Sanierungsziel noch um ca. 2 Größenordnungen verfehlt. Daher wurde ein zweites Leistungsverzeichnis (weitergehende Sanierungsmaßnahmen) durch den Fachplaner erstellt. Als Grundlage hierzu wurden **Materialerkundungen** zur Ermittlung der Quecksilberkontaminationen in einzelnen Baumaterialien durchgeführt, siehe Tabelle 1.

Probe	Entnahmeort / Material	Quecksilber [mg/kg TS]	Einordnung im relativen Vergleich
4b	OG links, Schadensraum, Deckenputz an Schadensstelle (quellennah)	6.200	sehr stark kontaminiert (ab 50 mg/kg TS)
4	DG links, beide Wohnräume, Wandputz	6,5	stark kontaminiert (zw. 5 und <50 mg/kg TS)
6	DG links, beide Wohnräume, Deckenputz	3,9	deutlich kontaminiert (zw. 0,5 und <5 mg/kg TS)
16	OG links, beide Wohnräume, Dielenholz	3,8	
9	DG links, Wohnraum hinten, ehemaliger Einbauschränk, Stroh	3,4	
2	DG links, beide Wohnräume, Fußboden Abseite, Trageholz	1,2	
17	OG links, beide Wohnräume, Wandputz	1,2	
22	OG links, Wohnraum vorne, Dielenholz	1,1	
8	DG links, beide Wohnräume, Abseite, Mauerwerk/Mörtel	1,1	
5	DG links, beide Wohnräume, Abseite, Heraklith	0,44	gering kontaminiert (zw. 0,1 und <0,5 mg/kg TS)
11	DG links, Flur, Wandputz	0,20	
19	OG links, Flur, Wandputz	0,12	
7	DG links, Wohnraum vorne, Abseite, Boden, Sandschüttung	0,12	
3	DG links, beide Wohnräume, Tapete	0,10	
18	OG links, Wohnraum hinten, Boden, Sandschüttung	0,08	sehr gering kontaminiert (<0,10 mg/kg TS) oder ohne Nachweis (<0,02 mg/kg TS)
21	OG links, Wohnraum hinten, Stroh	0,06	
10	DG links, Flur, Tapete	0,04	
20	OG links, Wohnraum hinten, Deckenputz	0,04	
13	OG rechts, Wohnraum vorne, Deckenputz	0,02	
1	DG links, beide Wohnräume, Dielenholz	<0,02	
12	OG rechts, vorderer Raum, Wandputz	<0,02	
14	EG rechts, Küche, Tapete (Referenz)	<0,02	Referenzen hier ohne Nachweis
15	EG rechts, Küche, Wandputz (Referenz)	<0,02	

mg/kg TS = Milligramm pro Kilogramm Trockensubstanz

Bestimmungsgrenze = 0,02 mg/kg TS

Tab. 1: Quecksilberkontaminationen verschiedener Baumaterialien

Da keine bewertenden Vergleichsdaten vorlagen, wurde orientierend die in der Tabelle 1 dargestellte Einordnung in Kontaminationsgruppen vorgenommen. Sie beruht aufgrund der noch geringen Anzahl an Materialuntersuchungen nicht auf einer statistischen Auswertung sondern basiert orientierend auf der Einordnung der ermittelten Quecksilberkonzentrationen nach verschiedenen Größenordnungen.

Die Ergebnisse zeigten deutliche (bis starke) Quecksilberkontaminationen besonders in einigen Putz- und Holzproben der schadensnahen Räume. Tendenziell nahmen die Kontaminationen zu den angrenzenden Flurbereichen ab. Überraschend unauffällig blieben die beiden Putzmischproben im Raum rechts vom Schadensraum, was aufgrund einer vergleichbar hohen Raumluftkonzentration (auch 2.500 ng Hg/m^3 nach erster Kontrolluntersuchung) eher nicht zu erwarten war.

Sanierungsfortführung: Daher wurde für diesen Raum vorerst keine weitere bauliche Sanierung veranlasst, ähnlich verhielt es sich auch für die Flurbereiche im OG und DG vor dem Schadensbereich. Auf Basis der Materialerkundungen wurde jedoch der komplette Rückbau der oberen Wand- und Deckenschichten für den Schadensraum, den Raum links daneben (beide OG) sowie für die beiden darüber befindlichen Raumbereiche (DG) bis auf das Tragholz seitens des Sanierungsfachplaners vorgegeben. (In diesen Bereichen konnte nach stichpunktartigen Mischprobenuntersuchungen kein Asbest in oberen Wand- und Deckenschichten festgestellt werden.) Auch die weiteren Dielenhölzer sollten nun ausgebaut werden. Die Umsetzungen erfolgten im Februar bis April 2017 unter Beibehaltung der Schutzmaßnahmen und des technischen Luftwechsels.



Abb. 2 und 3: Ansichten aus dem Schadensbereich nach Rückbau der Sekundärquellen

Durch diese Maßnahmen konnte eine Reduktion der Quecksilberkonzentrationen bei Umgebungstemperaturen um 20°C auf 180 ng Hg/m^3 im Schadensbereich erzielt werden, womit der RWII erstmals wieder unterschritten wurde. Für den „Raum rechts davon“ (OG) wurde ein Messwert von 6 ng Hg/m^3 und damit unterhalb des RWI ermittelt, der sich in ähnlicher Größenordnung bei einer späteren Kontrolluntersuchung bestätigte. Der starke Rückgang hier erstaunte erneut, da hier keine direkten Rückbaumaßnahmen im Raum erfolgten. Vergleicht man jedoch die Raumanordnung in Abbildung 1, so erkennt man, dass der eigentliche Sanierungsbereich auch oberhalb der halben Decke dieses Raumes liegt. Die Rückbaumaßnahmen in der Zwischendecke schienen für diesen Raum die sehr starke Reduktion der Quecksilber-Raumluftkonzentrationen mit bewirkt zu haben.

Nicht immer, wie für diesen Raum, führen Kontrolluntersuchungen zu überraschend positiven Ergebnissen. Denn für die Räume der linksliegenden Erdgeschosswohnung, die bisher nicht saniert wurde, wurde circa 10 Monate nach der Stuserhebung bei ersten Kontrolluntersuchungen im Sommer bei 23 bis 24°C ein Anstieg auf bis zu 2.600 ng Hg/m^3 auf (vgl. Abbildung 4) festgestellt.

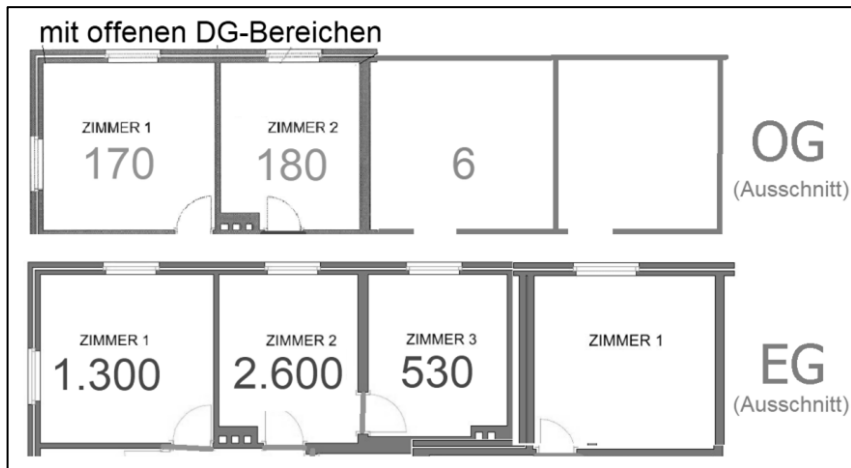


Abb. 4: Anstieg der Hg-Konzentrationen (in ng Hg/m^3) im EG infolge unzureichender Umgebungsschutzmaßnahmen während der Sanierung darüber sowie temperaturbedingt.

Eintragungen während der Sanierungstätigkeiten in den Bereichen darüber (Zwischendecke) haben wahrscheinlich zu dem Anstieg beigetragen, da vergessen wurde die Decken der Erdgeschosswohnung vor Beginn der Tätigkeiten darüber luftdicht mit Folien abzukleben. Zudem werden sich jahreszeitlich bedingte Temperatureinflüsse, wie sie im 2. Beispiel deutlicher herausgestellt werden, hier bemerkbar gemacht haben.

Es schloss sich daher auch für diese Erdgeschosswohnung der Rückbau der Wand- und Deckenputze an. Ohne weitere Materialuntersuchungen auf Quecksilber wurde hier auf die vorliegenden Erfahrungen des Schadensbereiches zurückgegriffen. Allerdings führte der mehrfache Nachweis von Amphibolasbest in einigen Wandbereichen (in nachträglich eingebrachtem Spachtel) und das Vorfinden zweier lokaler PAK-Primärquellen zu einem höheren Sanierungsumfang (u.a. Asbestschutzmaßnahmen nach TRGS 519 inkl. Kontrolluntersuchungen) für diese Wohnung und zu weiteren Kosten. Zusammenfassend ließen sich nach den Rückbaumaßnahmen überwiegend Quecksilber-Raumluftkonzentrationen zwischen 100 ng Hg/m^3 und RWII feststellen. Die Fortführung des Luftwechsels und der Wiederaufbau führten zu weiteren Reduktionen. Allerdings musste noch in einigen Räumen der Wohnungen DG und OG links auch danach noch über mehrere Monate eine verstärkte Lüftung (in Kombination mit dem Aufheizen der Wohnung) praktiziert werden, um die Quecksilberbelastung unterhalb des RWI zu senken. Erst danach folgte eine komplette Nutzungsübergabe.

Abschlussbetrachtungen Beispiel 1: Die Kosten für Maßnahmen zur Dekontamination von im Gebäude freigesetztem Quecksilber werden anders als bei Bränden oder Feuchteschäden i.d.R. nicht durch die üblichen Versicherungen abgedeckt. Für die Kosten kam daher hier der Wohneigentümer auf. Diese lagen schätzungsweise im Größenbereich um 150.000 €. Ein zweigestuftes Sanierungsvorgehen, Kontaminationen in die Erdgeschosswohnung während der Sanierung, und zusätzliche Schadstoffsanierungen wie Asbest und PAK haben die Sanierungszeit bis zu Wiederherstellung aller Wohnbereiche mit Hg-Raumluftbelastungen unterhalb des RWI auf knapp 2 Jahre ansteigen lassen.

Beispiel 2: Bildungseinrichtung

Schadensereignis: Im Kellerbereich K03 unterhalb der Maschinenhalle E03 einer Bildungseinrichtung kam es Ende April 2017 bei Aufräumarbeiten durch zwei Personen zur Beschädigung eines quecksilberhalten U-Rohr-Manometers in Folge dessen es zur Freisetzung von circa $\frac{1}{4}$ Liter Quecksilber kam. Nachdem das Gebäudemanagement, die Arbeitssicherheit, die Gift-Notrufzentrale und die Feuerwehr informiert bzw. alarmiert wurden, erfolgte eine Gebäudeevakuierung und die vorübergehende Gebäudesperrung. Mit dem Eintreffen der Feuerwehr wurden beginnende Erstmaßnahmen zum Einfangen des Quecksilbers vorgenommen. Eine seitens der Bildungseinrichtung beauftragte Reinigungsfirma führte wenige Tage später eine Bodenreinigung des Kellerbereiches durch. Zudem wurde der Bereich durch Öffnen der Fenster gelüftet.

Luftuntersuchungen: Statusuntersuchungen der Raumluft erfolgten dann circa $2\frac{1}{2}$ Wochen nach Eintreten des Schadens und nach abgeschlossener Bodenreinigung. Die Anreicherungsdauer vor Messbeginn betrug 8 Stunden (zzgl. circa 9 Stunden Messdauer). Die Raumtemperaturen lagen bei 20 bis 21°C, es erfolgte eine Nutzungssimulation durch Anblasen analog der Vorgaben der VDI 3492. Die Messstelle am Schadensbereich im Keller lieferte 340 ng Hg/m³, ein weiterer Messpunkt, circa 10 Meter entfernt, 230 ng Hg/m³, ein angrenzender aber durch eine Tür abgetrennter Treppenhausbereich wies ähnlich wie die darüber befindliche Maschinenhalle E03 circa 80 ng Hg/m³ auf.

Entwicklung zu einem Großprojekt: Aufgrund der vergleichsweise geringen Konzentrationen unterhalb des RWII und der lokalen Begrenzung auf den Schadensbereich erschien die Kontaminationen in einem ersten Schritt eingrenzbar. Dennoch traten Ereignisse ein, die vermutlich Einfluss auf eine Verstärkung der Problematiken hatten bzw. weitere Untersuchungen nach sich zogen:

1. Zur Vermeidung von Zusatzbelastungen erfolgte auch in der regelmäßig genutzten Maschinenhalle E03 eine Bodenreinigung. Hier, so stellte sich im Nachgang heraus, kam es vermutlich durch die ausführlichere Grundreinigung zu einer Mobilisierung älterer Quecksilberreservoirs.
2. Zur weiteren Reduktion der Belastungen im Schadensbereich wurde der Luftwechsel technisch erhöht. Statt einer Handhabung mit Unterdruck bzw. Absaugung wurde jedoch Luft in den Bereich hineingeführt, die dann über die offenen gegenüberliegenden Fenster wieder entweichen sollte. Es bestand daher mehrere Tage die Möglichkeit, dass Quecksilber aufgrund eines Überdrucks im Schadenbereich einen Kontaminationsbeitrag in angrenzende Raumbereiche (hier z.B. E03) liefern konnte.
3. Im Schadensbereich befand sich ein Kompressor, der aus K03 zeitweise Luft ansaugte und zwei Laborbereiche im Erdgeschoss damit versorgte. Eine Verfrachtung der Quecksilberkontaminationen war daher möglich. Eine stichpunktartige Kontrolle der Laborräume ergab jedoch keine Auffälligkeit oberhalb des RWI.

Parallel begann der Sommer, der einen Anstieg der Umgebungstemperaturen mit sich brachte. Eine Zwischenmessung in der Maschinenhalle E03 Anfang Juni bei 22°C, ebenfalls nach Anreicherung, ergab bereits einen Messwert von 540 ng Hg/m³, der nach einer weiteren Reinigungsmaßnahme im Hochsommer bei einer Dreifachmessung noch auf jeweils über 2.000 ng Hg/m³, in K03 auf ca. 1.000 ng Hg/m³ anstieg.

Die Fachkraft für Arbeitssicherheit und die Leitung der Bildungseinrichtung stimmten daraufhin u.a. folgende **Maßnahmen** ab:

1. Auf die oben aufgeführten Punkte 2 und 3 wurde in sofern reagiert, dass eine Überdruckführung in den Schadensbereich und die zweitweise Ansaugung der Luft durch den Kompressor aus dem Schadensbereich für Laborräume unterbunden wurde.

2. Der Raum E03 wurde aus der Nutzung genommen. Beim zuständigen Arbeitsmediziner und beim Gesundheitsamt wurde jeweils eine Stellungnahme eingeholt, welche Raumlufkonzentrationen für eine dauerhafte Nutzung der Räume langfristig vorliegen sollten. Als Zielwert wurde jeweils die RWI – Konzentration von 35 ng Hg/m³ genannt.

3. Die letzten Messergebnisse aus E03 und K03 mit Werten oberhalb von 1.000 ng Hg/m³ sollten durch ein zweites Messinstitut abgesichert werden. Die ermittelten Größenordnungen bestätigten sich.

4. Zu weiteren, früheren und aktuellen Quecksilberanwendungen in der Bildungseinrichtung wurde recherchiert. Für E03 wurde man so auf Versuchsapparaturen, die mit Quecksilber betrieben wurden, aufmerksam. Man beschloss alle quecksilberhaltigen Apparaturen aus den Gebäuden zu entfernen.

5. Die Bildungseinrichtung lieh mit dem *Mercury Tracker 3000 IP* ein direktanzeigendes Messgerät zur Bestimmung von Quecksilber-Raumlufkonzentrationen aus. Mit diesem Gerät wurden kundenseitig eigenständig und arbeitstäglich Überwachungen vorgenommen. Besonders in E03 half das Gerät zudem zwischen den Maschinen und Anlagen der Halle Quecksilberreservoirs ausfindig zu machen, die aus früheren Freisetzungen stammen mussten.

Am 05.10.2017 erfolgten zeitlich leicht versetzt in 6 Raumbereichen Hg-Raumlufkonzentrationen mit beiden (Online und BGIA) Messverfahren, wobei die Onlinemessung nur wenige Minuten, die Probenahme auf den Sammelröhrchen hingegen 2 bis 3 Stunden dauerte. Die nachfolgende Abbildung stellt die Ergebnisse raumweise gegenüber.

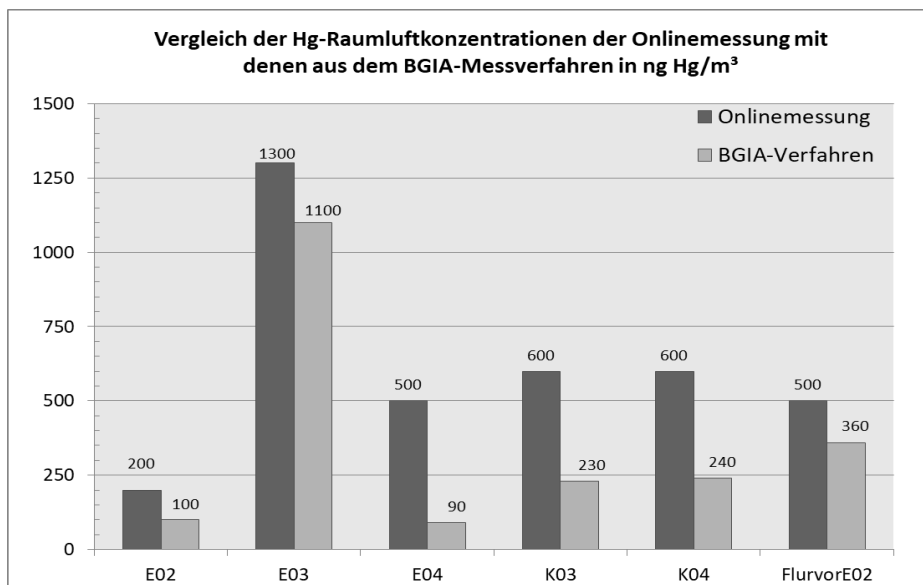


Abb. 5: Vergleich der Messergebnisse zwischen Online- und BGIA-Messverfahren

Erste Erfahrungen zeigen damit, dass die Größenordnung der Hg-Raumluftkonzentrationen zwischen beiden Messverfahren übereinstimmen, allerdings fielen die Ergebnisse der Onlinemessung stets höher aus als bei der stationären Luftuntersuchung nach BGIA-Verfahren.

6. Auch aus den Überlegungen aus Punkt 4 heraus wurde eine Ausweitung der Luftmessungen beauftragt. Hierzu erfolgten überwiegend Ende Oktober 2017 dreißig weitere Luftuntersuchungen (letzte Lüftung am Vortag / 15 bis 22°C / Nutzungssimulation oder vereinzelt nach Nutzung), bei denen es sich zum Teil um Kontrolluntersuchungen und zum Teil um weitere Statusmessungen handelte. Zusätzlich sollte der Außenlufteinfluss durch ergänzende Messungen mit überprüft werden.

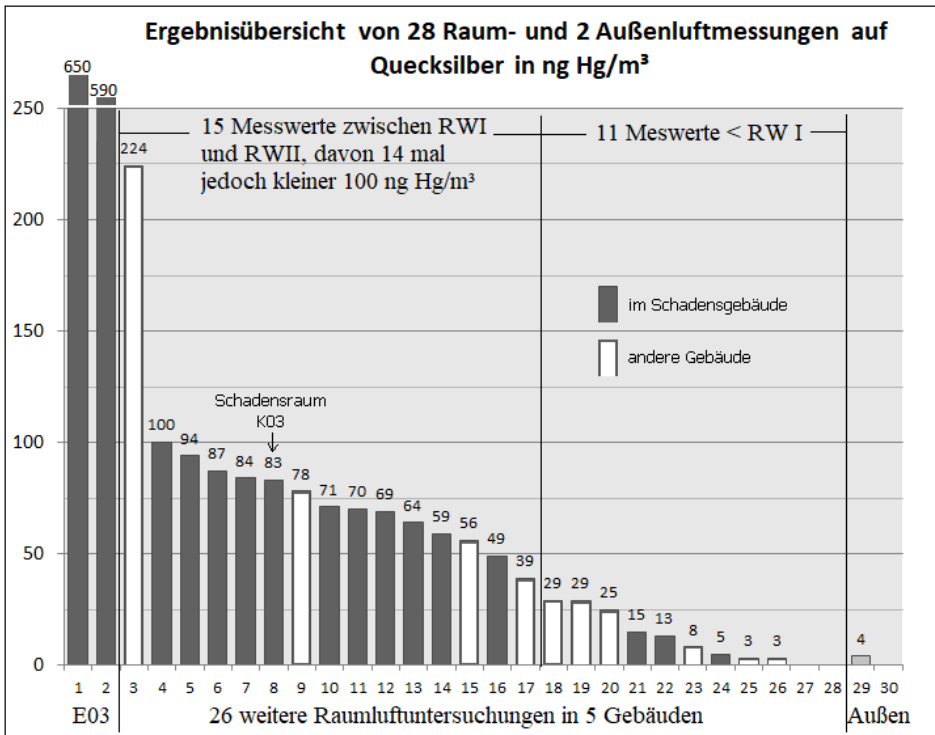


Abb. 6: Darstellung der Messergebnisse von Überwachungs- und Statusmessungen der Raumluft an circa 30 Stellen in 5 Gebäuden und der Außenluft auf Quecksilber.

Mit Ausnahme der beiden Messpunkte in E03, ließen sich durch die Luftuntersuchungen keine Raumluftkonzentrationen an Quecksilber oberhalb des RWII feststellen. Auffällig war jedoch, dass knapp 58 % (15/26) der weiteren Innenraummesswerte noch Raumluftkonzentrationen oberhalb des RWI aufwiesen. Darin enthalten waren jedoch auch der Schadensraum K03 sowie Flurbereiche u.a. vor E03 (abgeschottet) und vor K03. Von den fünfzehn Messwerten mit Konzentrationen zwischen RWI und RWII entfielen elf auf das Gebäude mit dem Schadensereignis. Die Ursache schien hier überwiegend durch Kontaminationen aus E03 und dem Schadensbereich in Folge der Gebäudenutzung begründet zu sein. Ein halbes Jahr nach dem Schadenseintritt lagen damit verbreitete Quecksilberkontaminationen mit Konzentrationen oberhalb des RWI (Zielwert) in dem betroffenen Gebäude vor.

Vier weitere Messwerte zwischen RWI und RWII wurden in einem angeschlossenen Nachbargebäude festgestellt, wobei es sich bei drei Räumen um Flurbereiche handelte. Der vierte Raum (Messwert mit 224 ng Hg/m³) wurde genutzt um Inventar aus E03 bis zur Entsorgung zwischenzulagern. Eine Einschleppung des Quecksilbers mit kontaminiertem Inventar wird als wahrscheinliche Ursache hier angesehen. Dieser Raum ist bis Sommer 2019 noch nicht wieder für die Nutzung freigegeben, da erneute Kontrollwerte in der wärmeren Jahreszeit oberhalb des RW II lagen. Für die anderen Raumbereiche mit RWI-Überschreitungen wurde i.d.R. ein individuelles Vorgehen erarbeitet (z.B. Kontrollen während Nutzungsphasen mit zeitweiser Lüftung / Reinigung / weitere messtechnische Überwachungen).

Lediglich 4 Messergebnisse aus dem Schadensgebäude lagen unterhalb des RWI. Durch die Luftuntersuchungen in drei weiteren, stichpunktartig überprüften und vom Schadensbereich entfernteren Gebäuden ließ sich keine RWI-Überschreitung feststellen. Die Außenluftergebnisse lagen im Bereich der in der Literatur beschriebenen Hintergrundwerte (s. Einführung), so dass ein relevanter Außenlufteinfluss auf die Innenraumkonzentrationen nicht zu erkennen war.

7. Die hohen Quecksilber-Raumluftkonzentrationen nach zweifacher Bodenreinigung und dem Erkennen und Entfernen weiterer Quecksilberreservoirs machten für den **Maschinenraum E03** Reduktionsmaßnahmen notwendig. Hierfür wurde vom Betreiber ein Sanierungsfachplaner sowie für die Umsetzung erstmals eine schadstoffferne Sanierungsfachfirma hinzugezogen.

Zum baulichen Hintergrund: Der Maschinenraum hat eine Grundfläche von etwa 230 m² bei einer Raumhöhe von circa 12 Metern. Eingelassen ist ein Bürocontainer mit zwei Räumen (je etwa 21 m²). Die Wände von E03 bestehen überwiegend aus Sichtmauerwerk und Fensterfronten, der Hallenboden aus Beton mit gefliester Oberfläche. Oberhalb von Metalllamellen befindet sich in der Decke ältere, d.h. vor 1996 eingebaute, Isolierwolle (KMF – Künstliche Mineralfasern). In der Halle sind zudem zu Forschungszwecken mehrere stationäre Großgeräte und Werkbänke montiert.

Der Betreiber beauftragte nach Abstimmung mit dem Sanierungsfachplaner die Untersuchung der Isolierwolle aus dem Deckenaufbau auf Quecksilber. Im Material wurde ein Quecksilberanteil von 5,8 mg/kg ermittelt. Bezogen auf die eigenen Erfahrungswerte aus dem ersten Beispiel (vgl. Tabelle 1) entspricht dies einer starken Kontamination, für die aufgrund der großen Fläche der Decke ein Einfluss auf die Raumluftkonzentration besonders bei heißer Sonneneinstrahlung auf das Dach zu unterstellen war. Der sachgerechte Ausbau (TRGS 521 in Kombination mit den Standards der TRGS 524 und DGVU-Regeln 101-004 / technischer Luftwechsel) mit anschließender Feinreinigung wurde daher beauftragt.

Es schlossen sich im Februar 2018 und damit circa ein ¾ Jahr nach dem Schadensereignis Kontrolluntersuchungen der Raumluft auf KMF und auf Quecksilber (Anreicherungsdauer von mindestens 8 Stunden / Nutzungssimulation / circa 19 bis 20°C) an drei Stellen der Maschinenhalle an. Hierdurch ließ sich ein Rückgang auf 75 bis 88 ng Hg/m³ und somit erstmals wieder Konzentrationen unterhalb des RWII feststellen. Eine weitere Reduktion unterhalb des RWI blieb weiterhin die Zielvorgabe. Die Maschinenhalle konnte unter bestimmten Vorgaben (z.B. einer häufigen Fensterlüftung, Begrenzung der Aufenthaltsdauer, arbeitsmedizinische Vorsorge, Unterweisungen) wieder in Nutzung überführt werden, wobei quartalsmäßige Kontrollen der Raumluftkonzentrationen an drei Stellen (ohne Lüftung) folgten.

Die Ergebnisse hierzu sind dem folgenden Diagramm zu entnehmen. Sie zeigen Raumluftkonzentrationen zwischen circa 40 ng Hg/m³ (im Winter) und 250 ng Hg/m³, mit einem Einzelwert von 420 ng Hg/m³ (im Sommer) auf. Bis August 2019 ließ sich hier noch keine RWI-Unterschreitung feststellen.

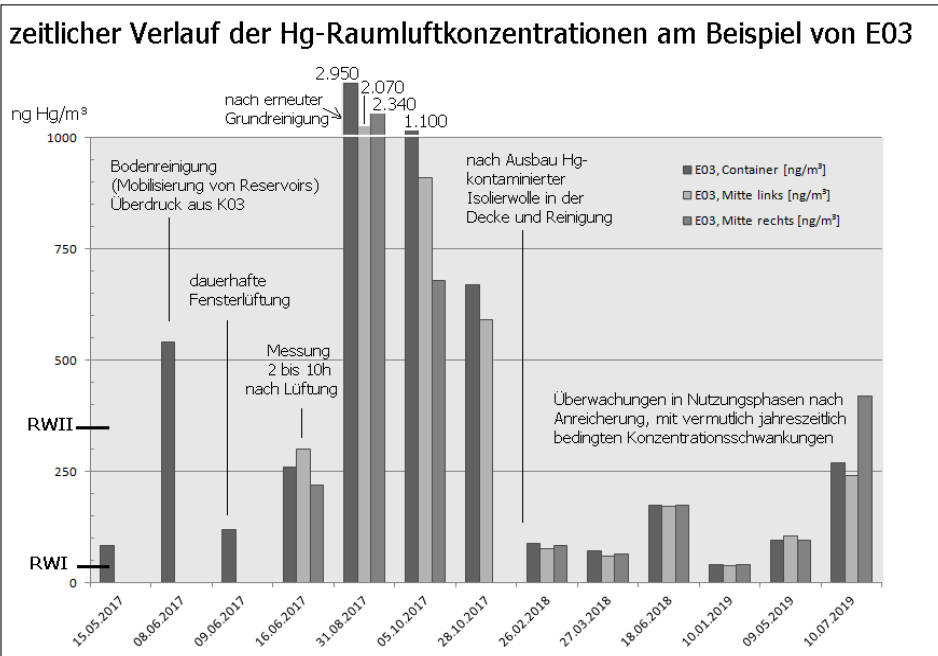


Abb. 7: Ergebnisse der Hg-Raumluftuntersuchungen in E03 über mehr als 2 Jahre

Aus dieser Überwachung lassen sich besonders zwei Beobachtungen machen, die sich mit unseren Erfahrungen aus anderen Quecksilberfällen decken:

- Quecksilberraumluftbelastungen sind langanhaltend. Alleine durch eine nutzerbedingte Lüftung ist i.d.R. auch nach Jahren keine relevante Konzentrationsreduktion in der Größenordnung zwischen RWI und RWII zu erkennen/erwarten.
- Quecksilberraumluftbelastungen unterliegen stark jahreszeitlich bedingten Temperatureinflüssen. Aus den drei Zeiträumen (31.08.-28.10.17 / 26.02.-18.06.18 / 10.01.-10.07.19) lassen sich zwischen kalten und warmen Jahreszeiten Unterschiede der Raumluftkonzentrationen um Faktoren von etwa 2,5 bis 6 erkennen. Hier werden weniger die Unterschiede der Raumtemperaturen zu den Messzeitpunkten als vielmehr die Unterschiede von Oberflächentemperaturen sekundärbelasteter Materialien in den Zeiträumen weniger Tage vor der Messung bis zur Probenahme als relevant erachtet.

Abschlussbetrachtungen Beispiel 2: Knapp 2 ½ Jahre nach Schadenseintritt liegen in dem Gebäude weiterhin noch Quecksilberbelastungen oberhalb des RWI vor. Für E03 und zwei weitere Räume des Gebäudes wird nun (Stand 08.2019) die Nachrüstung einer technischen Lüftung seitens des Gebäudenutzers favorisiert, um für die Nutzer die Raumluftkonzentrationen unterhalb des RWI abzusenken. Positive Erfahrungen hierzu liegen bereits aus einem anderen Raum vor.

Der Schadensraum K03 wies bei den letzten Kontrollen im Herbst 2017 Raumluftkonzentrationen bei 100 ng Hg/m³ auf. Im davorliegenden Flur ohne dichtschießende Abschottung zu K03 wurden im Januar 2019 nur noch 20 ng Hg/m³ festgestellt. Aktive Maßnahmen für diesen Lagerraum K03 mit geringen Aufenthaltszeiten wurden nicht mehr umgesetzt.

Zwei weitere Kellerräume bleiben vorerst noch aus der Nutzung, da hier bei den jeweiligen letzten Messungen RWII-Überschreitungen vorlagen.

Zusammenfassung und Empfehlungen

Bei der Freisetzung von elementarem Quecksilber können schnelle Erstmaßnahmen (Lüftung, Einsammeln, Binden, usw.) die Ausbildung quecksilberhaltiger Dämpfe stark eindämmen. Erfolgt dies nicht wie in Beispiel 1, können sich je nach Ursache bzw. Freisetzungsmenge auch sehr hohe Raumluftkonzentrationen oberhalb von 100.000 ng Hg/m³ ausbilden. Erhöhte Raumluftkonzentrationen mit Quecksilber können sich auf angrenzende Raumbereiche auswirken, sollten Luftübergänge (Türen, oberhalb von Deckenabhängungen, Decken, Böden, technische Anlagen, u.w.) nicht zusätzlich unterbunden werden (z.B. durch Abkleben oder Abschalten technischer Lüftungsanlagen). Im Rahmen von Statusuntersuchungen der Raumluft, die möglichst nur mit geeigneter persönlicher Schutzausrüstung (z.B. Vollmaske mit Filter ABEK 2-P3-Hg) durchgeführt werden sollten, sind daher unbedingt auch die angrenzenden Bereiche mit zu überprüfen. Obgleich es in beiden Beispielen nur in einem Raum zur Quecksilberfreisetzung kam, wurden doch jeweils mehrere Räume mit Raumluftkonzentrationen oberhalb des RWI kontaminiert.

Zum Finden noch flüssigen Quecksilbers und auch zur orientierenden Ermittlung der Raumluftkonzentration kann ein direktanzeigendes Online-Messgerät unterstützen. Erste Erfahrungen mit dem oben beschriebenen Gerät wiesen hierbei jedoch stets höhere Raumluftkonzentrationen aus, als diese parallel mit dem BGIA-Messverfahren ermittelt wurden. Zu bedenken ist hierbei auch die hohe Bestimmungsgrenze des direktanzeigenden Messgerätes, die etwa bei einem Faktor 3 oberhalb des RWI liegt.

Sollten Sanierungsmaßnahmen zur Reduktion der Quecksilber-Raumluftbelastungen notwendig werden, so ermöglicht die nachfolgende **Tabelle 2** (Fortführung der Tabelle 1) eine Orientierung hinsichtlich der Bewertung von Quecksilberkontaminationen in Baumaterialien:

Quecksilberkonzentration in mg/kg TS	Kontaminationsgrad	Sanierungsrelevanz in den Beispielen
< 0,1	sehr gering kontaminiert	nein
0,1 bis < 0,5	gering kontaminiert	wahrscheinlich nein
0,5 bis < 5,0	deutlich kontaminiert	ja, schwerpunktmäßig bei großflächigen Anwendungen
5,0 bis < 50	stark kontaminiert	ja
ab 50	sehr stark kontaminiert	ja

Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Einteilung in verschiedene Kontaminationsgrade durch Unterteilung aller bestimmten Quecksilberkonzentrationen in verschiedene Größenordnungen vorgenommen wurde, da für eine statistische Auswertung zu wenige Messdaten vorliegen. Auch der daraus abgeleitete Ansatz hinsichtlich einer Sanierungsrelevanz hat sich bei den beiden Beispielen bewährt, muss aber nicht zwangswise auf andere Fälle genau übertragbar sein. Eine Betrachtung sollte zudem nicht losgelöst von vorhandenen Raumluftkonzentrationen und den weiteren baulichen Gegebenheiten der untersuchten Baumaterialien vorgenommen werden.

Die beiden Beispiele haben weiterhin gezeigt, dass Quecksilberkontaminationen langandauernd sein können und sich Reduktionsmaßnahmen auch über Jahre hinziehen können, wenn eine Unterschreitung der RWI-Konzentration als Ziel vorgegeben wird.

Aufgrund des langandauernden Prozesses hat sich mit Beginn des Schadensereignisses die Führung eines „Quecksilbertagebuches“ bewährt. Einzelne Maßnahmen, Untersuchungsanlässe, Ergebnisse, Empfehlungen, Beschlüsse, Sanierungsmaßnahmen, usw. können darin zeitlich genau festgehalten werden und später noch mal wichtige Informationen zurückliefern, z.B. bei Mitteilungspflichten gegenüber Dritten (Gesundheitsamt, Unfallkasse, u.w.).

Weiterhin ließen sich in beiden Vorgängen jahreszeitlich bedingte Temperatureinflüsse auf die Quecksilberraumluftkonzentrationen erkennen. Raumluftkonzentrationen aus den Wintermonaten erhöhten sich in den Sommermonaten ohne weitere bekannte Einflussgrößen bis um einen Faktor von 6. Dies ist bei der Interpretation von Messergebnissen bei Quecksilberfällen zu beachten. Eine eigentlich erfolgreiche Sanierungsleistung im Frühjahr kann so, überlagert durch temperaturbedingte Anstiege der Kontrollmesswerte zum Sommer, möglicherweise nicht erkannt werden bzw. wieder oder weiterhin zu RW- Überschreitungen im Sommer führen.

Aufgezeigt wurde auch, dass in der Gebäudehistorie nicht immer jede frühere Quecksilberfreisetzung bekannt ist. Das Quecksilberreservoir im Beispiel 1 sowie die weiteren Funde in E03 aus Beispiel 2 zeigten ältere Hg-Freisetzungen auf, ohne dass dies früher durch kontrollierende Raumluftmessungen begleitet wurde. Entsprechende Untersuchungen sollten daher Sachverständige für Gebäudeschadstoffe bei Beratungen für ältere Räume mit vermutetem (früherem) Umgang mit quecksilberhaltigen Instrumenten oder Anwendungen mit empfehlen. Zu nennen sind beispielhaft naturwissenschaftliche Räume und Labore in Schulen, Universitäten, Krankenhäusern oder Zahnarztpraxen.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei den beiden Kunden der Fallbeispiele, für die Bereitstellung umfangreicher Informationen zu den Vorgängen sowie im zweiten Beispiel für die Bereitstellung der Online-Messergebnisse.

Literatur

Gebhardt et.al.: Almut Gebhardt, Sonja Pfeil, Wigbert Maraun (2018): „Quecksilber: Weiterhin verkannte Gefahr im Innenraum und der Außenluft.“ Umwelt & Gesundheit, 1/2018, Seiten 16-19.

Link, Dr. B. (Sozialministerium Baden-Württemberg, Stuttgart): Empfehlung: Richtwerte für die Innenraumluft – Quecksilber; Bundesgesundheitsblatt, 2-1999, Seiten 168-174

Marquardt, H. und Schäfer, S.G.: Lehrbuch der Toxikologie; BI Wissenschaftsverlag, 1994, ISBN 3-411-6321-6, Seiten 530 bis 535

Mercury Instruments GmbH: Bedienungsanleitung 2016 zum Mercury Tracker 3000 IP, Seite 8

Pluschke, Dr. Peter (1996): Luft-Schadstoffe in Innenräumen – Ein Leitfaden; Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, ISBN 3-540-59310-1, Seite 256

TRGS 900: Technische Regel für Gefahrstoffe 900 - Arbeitsplatzgrenzwerte (Januar 2006): BArBl Heft 1/2006 S. 41-55, zuletzt geändert und ergänzt: GMBI 2019 S. 117-119 [Nr. 7] (v. 29.03.2019)

UBA: Hintergrund: Energiesparlampen in der Diskussion, Umweltbundesamt, 08/ 2011, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/energiesparlampen-in-diskussion>

UBA2: Ad-hoc-Arbeitsgruppe IRK/AGLMB (1996): Richtwerte für die Innenraumluft Basisschema. Bundesgesundheitsblatt 39:422-426

WHO: Preventing Disease through healthy environments – Exposure to Mercury: a major public health concern; world health organisation, 2007; <https://www.who.int/ipcs/features/mercury.pdf>

Zwiener, Dr. Gerd; Lange, Dr. Frank-Michael (2012): Handbuch : Gebäude-Schadstoffe und Gesunde Innenraumluft; Erich Schmidt Verlag GmbH & Co.KG, Berlin 2012, ISBN 978 3 503 12990 4, Seiten 415 und 416