

AiF-Forschungsvorhaben-Nr.: 14747 N  
 Bewilligungszeitraum: 01.04.2006 – 31.07.2007  
 Forschungsthema: **Kontinuierliche Messung von Quecksilber-Emissionen im Abgas von Drehofenanlagen der Zementindustrie**

## 1 Einleitung

Drehofenanlagen der Zementindustrie, die Abfälle als Brennstoffe einsetzen, unterliegen den Anforderungen der 17. Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes (17. BImSchV). Eine der dort genannten Forderungen ist die kontinuierliche Messung der Quecksilberemissionen.

In der deutschen Zementindustrie sind derzeit (Stand April 2007) 33 kontinuierlich arbeitende Quecksilbermessgeräte von verschiedenen Herstellern im Einsatz. Beim Betrieb der Geräte stellte sich in vielen Fällen heraus, dass die Geräte trotz einer Eignungsprüfung nicht zuverlässig zur Überwachung der Emissionen eingesetzt werden konnten. Die Ursachen hierfür sind insbesondere in der komplexen Abgasmatrix von Drehofenanlagen der Zementindustrie zu suchen, die sich teilweise deutlich von den Anlagen unterscheidet, an denen die ursprüngliche Eignungsprüfung durchgeführt wurde.

Die zuverlässige Betriebsweise der kontinuierlich arbeitenden Quecksilbermessgeräte ist an Drehofenanlagen der Zementindustrie unerlässlich. Dies ist einerseits eine zwingende Voraussetzung für die kontinuierliche Überwachung der geltenden Emissionsgrenzwerte und damit für den dauerhaften Einsatz von Ersatzbrennstoffen. Andererseits wird auf Grundlage der Messergebnisse des kontinuierlich arbeitenden Quecksilbermessgerätes die Wirksamkeit von Maßnahmen zur Minderung der Quecksilberemissionen im Dauerbetrieb beurteilt.

Die folgende Tafel gibt einen Überblick über alle an deutschen Zementdrehofenanlagen derzeit eingesetzten kontinuierlich arbeitenden Quecksilbermessgeräte.

**Tafel 1:** Eignungsgeprüfte Quecksilbermessgeräte, die in der deutschen Zementindustrie im Einsatz sind (Stand April 2007)

Typ	Hersteller	Anzahl der eingesetzten Geräte
SM 3	Mercury Instruments	21
Mercem 136	Sick/Maihak	7
HM 1400 TR	Durag/VEREWA	5

Die oben genannten Geräte arbeiten alle extraktiv, d.h. ein Teilstrom des Abgases wird im Kamin kontinuierlich entnommen, zu einem Analysator gefördert und dort die Quecksilberkonzentration bestimmt. Als Analysator wird bei den drei Geräten jeweils ein Photometer verwendet, das nach dem Verfahren der Atomabsorptionsspektroskopie (AAS) arbeitet. Zur Bestimmung der Quecksilberkonzentration dient die Resonanzabsorption der Hg-Atome bei 253,7 nm.

Mit den Photometern kann allerdings nur elementares Quecksilber [Hg(0)] gemessen werden. Um die im Abgas vorliegende Gesamtquecksilberkonzentration bestimmen zu können, ist es erforderlich, gasförmige Quecksilberverbindungen in einem Aufbereitungsschritt in

elementares Quecksilber zu überführen. Demzufolge besteht jedes kontinuierlich arbeitende Quecksilberemissionsmessgerät aus zwei Komponenten: einer Aufbereitungs-/Reduktionseinheit und einer Analyseneinheit. Während die Messung der Quecksilberkonzentration mittels Photometrie eine anerkannte und unumstrittene Methode darstellt, unterliegt die Reduktionseinheit nach wie vor einer ständigen Weiterentwicklung und Optimierung.

## **2 Forschungsziel und Lösungsweg**

Vorrangiges Ziel des Forschungsvorhabens war es, die im Abgas von Drehofenanlagen auftretenden Störkomponenten zu ermitteln und ihre Relevanz für die Funktionsfähigkeit der kontinuierlich arbeitenden Quecksilbermessgeräte aufzuzeigen. Darüber hinaus sollten mögliche Optimierungsmaßnahmen zur Verbesserung der Betriebsweise der Geräte aufgezeigt werden.

Eine zuverlässige Quecksilbermesstechnik ist insbesondere vor dem Hintergrund der niedrigen Emissionsgrenzwerte der 17. BImSchV notwendig, um die Messgenauigkeit auch bei geringen Emissionskonzentrationen sicherzustellen. Hierzu müssen die Ursachen für die an Drehofenanlagen der Zementindustrie beobachteten Abweichungen zwischen den kontinuierlich arbeitenden Quecksilbermessgeräten und dem nasschemischen Referenzverfahren aufgeklärt werden. Die zur Erreichung dieses Zieles durchgeführten Arbeitsschritte werden nachfolgend kurz beschrieben.

### 1. Bau eines transportablen Hg(0)-Generators

Zur Durchführung des Forschungsprojekts wurde ein für die Labor- und Betriebsuntersuchungen tauglicher Hg(0)-Generator im Eigenbau erstellt. Mittels Hg(0)-Generator kann ein trockenes Prüfgas hergestellt werden, das ausschließlich elementares Quecksilber in Stickstoff in genau definierter Konzentration enthält. Der Hg(0)-Generator wurde bei den Betriebsversuchen zur -über die grundlegenden Anforderungen hinaus gehenden- Justierung der kontinuierlich arbeitenden Quecksilbermessgeräte eingesetzt. Die Genauigkeit der Prüfgaserzeugung mittels Hg(0)-Generator wurde zunächst im Rahmen einer Validierung geprüft. Darüber hinaus wurde der Hg(0)-Generator bei den Laborversuchen zur Herstellung von Gasgemischen eingesetzt, die elementares Quecksilber enthalten.

### 2. Laboruntersuchungen

Im Rahmen von Laboruntersuchungen wurden Gasgemische erzeugt, die in ihrer Zusammensetzung näherungsweise der Abgasmatrix entsprechen, die üblicherweise an Drehofenanlagen der Zementindustrie vorgefunden wird. Berücksichtigte Bestandteile waren neben den Komponenten H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub> und SO<sub>2</sub> die Gehalte an elementarem und gebundenem Quecksilber. Mit Hilfe der Laboruntersuchungen sollte systematisch aufgezeigt werden, welche der genannten Komponenten die Funktionsfähigkeit des kontinuierlich arbeitenden Quecksilbermessgerätes möglicherweise ungünstig beeinflussen.

### 3. Betriebsuntersuchungen

Die im Labor gewonnenen Erkenntnisse wurden an Industrieanlagen angewendet bzw. überprüft. Hierzu wurden der Hg(0)-Generator und der HOVACAL<sup>1</sup> zur Justierung von am Kamin installierten Messgeräten eingesetzt. Im Gegensatz zum Hg(0)-Generator wird vom HOVACAL ein feuchtes Prüfgas erzeugt, das sowohl elementares als auch gebundenes

---

<sup>1</sup> Eignungsgeprüfter Prüfgasgenerator zur Erzeugung quecksilberhaltiger Prüfgasgemische

Quecksilber in nicht genau bekannten Anteilen enthält. Die Untersuchungen fanden an verschiedenen Drehofenanlagen der Zementindustrie statt, die Hg-Analysatoren unterschiedlicher Hersteller einsetzen. Durch Eichaddition mit elementarem Quecksilber wurde die Wirkungsweise der kontinuierlich arbeitenden Quecksilbermessgeräte unter tatsächlichen Abgasrandbedingungen überprüft. Die Konzentrationen anderer Abgasbestandteile wie HCl, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, NO, NO<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub> wurden parallel miterfasst.

### 3 Ergebnisse

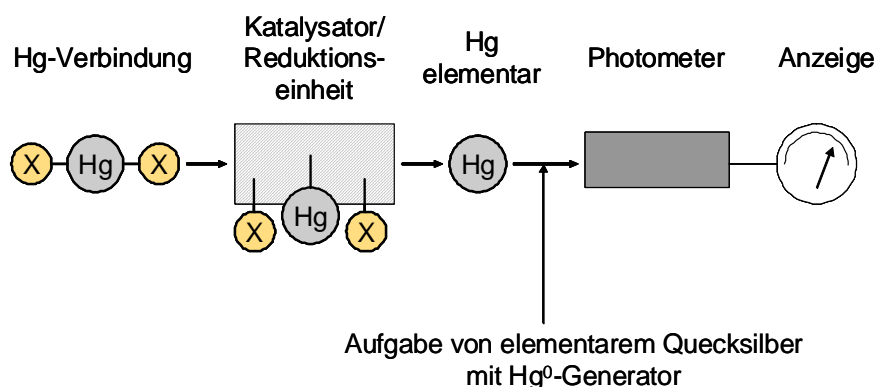
#### 3.1 Verwendung des Hg(0)-Generators bei der Funktionsprüfung

Bei Verwendung des Hg(0)-Generators im Rahmen der Funktionsprüfung können über die Vorgaben der Eignungsprüfung hinaus gehende Überprüfungen der kontinuierlich arbeitenden Quecksilbermessgeräte durchgeführt werden. Diese zusätzlichen Maßnahmen sind aufgrund der komplexen Bauweise der Geräte häufig erforderlich.

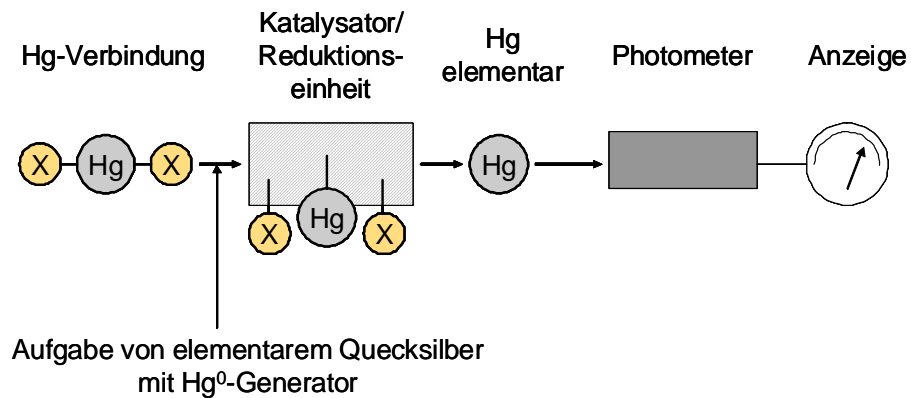
Die in der Eignungsbekanntgabe ausschließlich geforderte Prüfgasaufgabe mittels HOVACAL, d. h. die gleichzeitige Aufgabe von elementarem Quecksilber und Quecksilberverbindungen reicht nicht aus um alle grundlegenden Gerätestörungen feststellen zu können. Ohne die zusätzliche Verwendung des Hg(0)-Generators wird die Gerätekennlinie u. U. falsch justiert und darüber hinaus Mängel an der Funktionsfähigkeit der Reduktionseinheit oder störende Verschmutzungen in den Leitungswegen nicht erkannt.

Bei Aufgabe von elementarem Quecksilber unmittelbar vor dem Photometer wird im 1. Schritt zunächst nur die Gerätekennlinie des Photometers überprüft. Auf diese Weise kann die Steigung der Gerätekennlinie korrigiert werden. Im 2. Schritt wird dann elementares Quecksilber vor der Reduktionseinheit aufgegeben. Anhand dieser Prüfung kann aufgezeigt werden, ob im Gerät eine unerwünschte Adsorption von Quecksilber stattfindet. Hierfür können in Einzelfällen eine Verunreinigung des Katalysators oder Ablagerungen in den geräteinternen Gaswegen verantwortlich sein. Erst der dritte Schritt der Funktionsprüfung ist dann die auf Grundlage der Eignungsprüfung ausschließlich geforderte Aufgabe von Quecksilberverbindungen auf das gesamte Messgerät. Bei diesem abschließendem Test wird der Reduktionswirkungsgrad des Katalysators bzw. des nasschemischen Reaktors bestimmt.

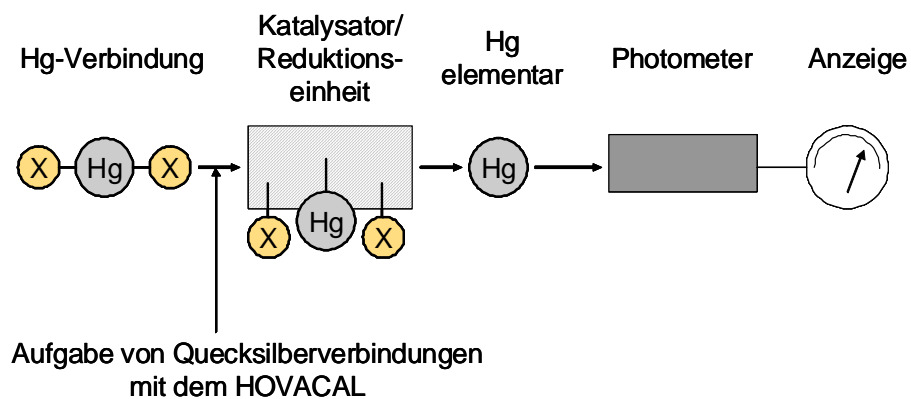
Die folgenden Bilder zeigen schematisch den Ablauf einer erweiterten Funktionsprüfung.



**Bild 1:** 1. Schritt der erweiterten Funktionsprüfung: Aufgabe von elementarem Quecksilber vor dem Photometer



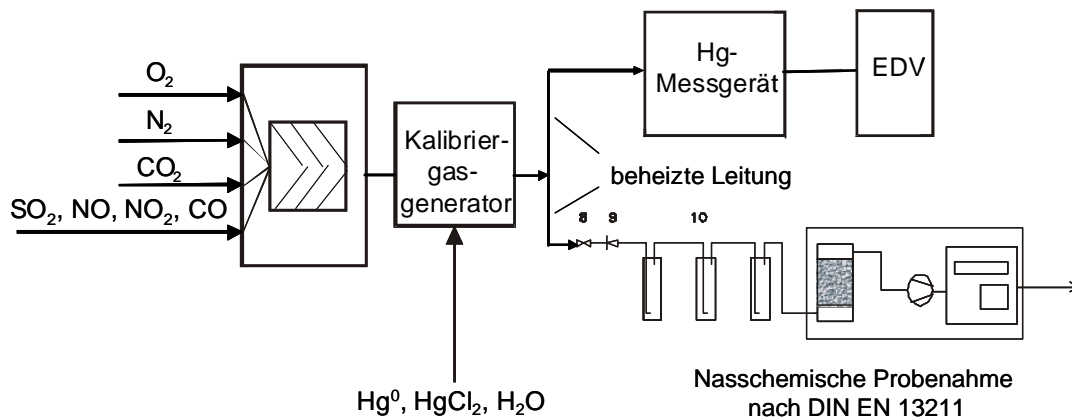
**Bild 2:** 2. Schritt der erweiterten Funktionsprüfung: Aufgabe von elementarem Quecksilber vor der Reduktionseinheit



**Bild 3:** 3. Schritt der erweiterten Funktionsprüfung: Aufgabe von Quecksilberverbindungen vor der Reduktionseinheit

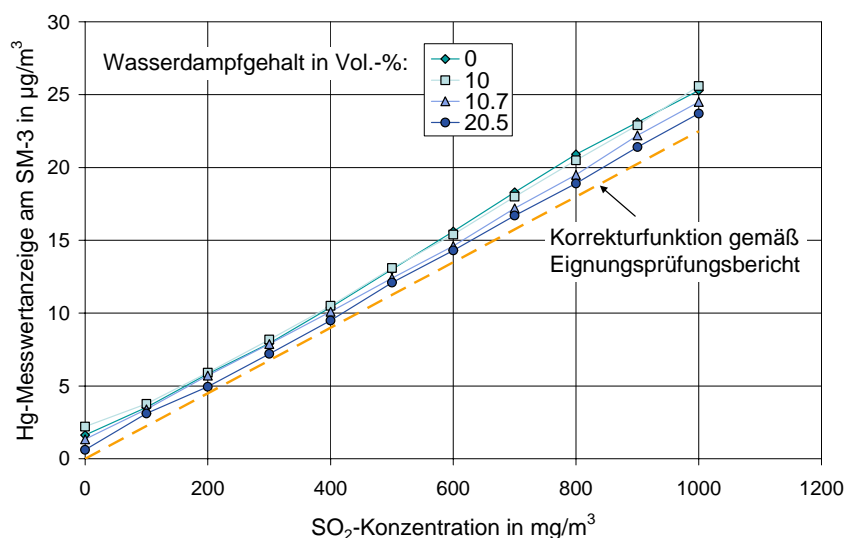
### 3.2 Durchführung von Labor- und Betriebsversuchen

Bei den Laborversuchen wurden mit Hilfe eines Gasmischers Gasmische erzeugt, die aus den Komponenten Sauerstoff, Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, Wasserdampf, Schwefeldioxid, Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid bestanden und in ihrer Zusammensetzung dem Abgas von Drehofenanlagen der Zementindustrie vergleichbar waren. Die Quecksilberprüfgaskonzentrationen wurden sowohl mittels Hg(0)-Generator als auch mittels HOVACAL erzeugt. Auf diese Weise konnten sowohl elementares Quecksilber als auch Quecksilberverbindungen zugemischt werden.



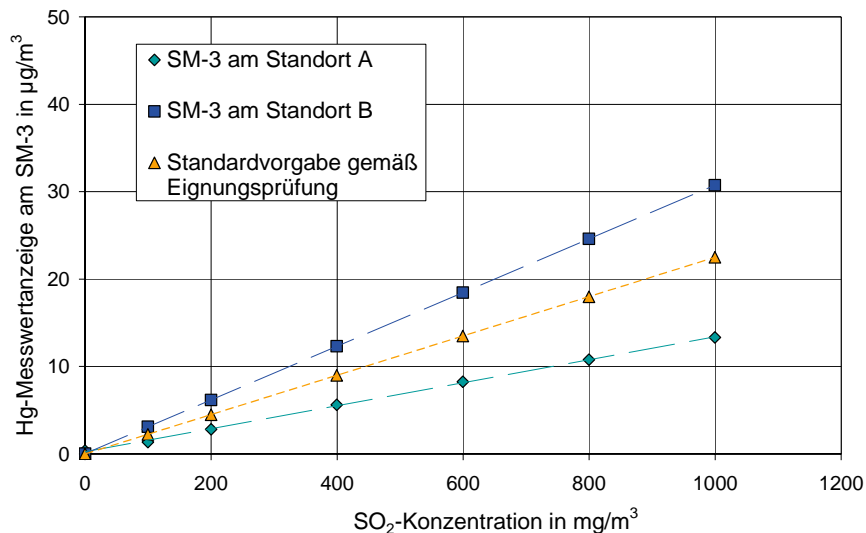
**Bild 4:** Laborapparatur zur Bestimmung von Störkomponenten bei der kontinuierlichen Messung von Quecksilber

Als wesentliche Störkomponenten bei katalytisch arbeitenden kontinuierlichen Quecksilbermessgeräten konnten im Rahmen der Laborversuche Schwefeldioxid und Stickstoffdioxid ermittelt werden. Der **Störeinfluss des SO<sub>2</sub>** beruht dabei auf einer physikalischen Querempfindlichkeit des Photometers, die bereits im Rahmen der Eignungsprüfung festgestellt wurde. Darüber hinaus zeigte sich allerdings, dass bei gleichzeitiger Zugabe von SO<sub>2</sub> in unterschiedlichen Wasserdampfgehalten ebenfalls gewisse Schwankungen auftraten. Die in der Eignungsprüfung vorgeschlagene allgemeingültige Vorgehensweise stellt eine untere Abschätzung des SO<sub>2</sub>-Störeinflusses dar.



**Bild 5:** Störeinfluss der SO<sub>2</sub>-Konzentration auf das Hg-Messsignal des SM-3 bei unterschiedlichen Wasserdampfgehalten

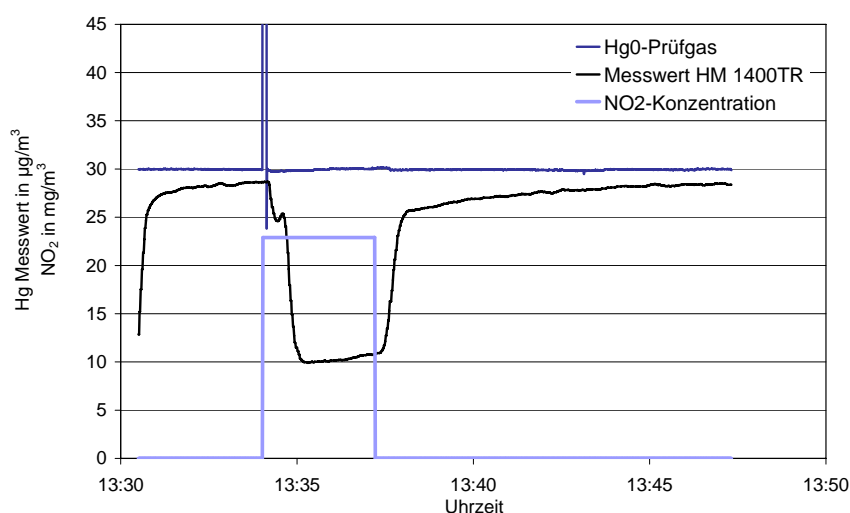
Ein Effekt des SO<sub>2</sub> konnte messprinzipbedingt ausschließlich beim Gerätetyp SM-3 beobachtet werden. Die Störung durch SO<sub>2</sub> steigt praktisch linear mit der SO<sub>2</sub>-Konzentration an. Dieser Einfluss kann daher problemlos über eine entsprechende Korrektur, die im Messwertrechner der Anlage hinterlegt sein muss, korrigiert werden. Insbesondere bei höheren SO<sub>2</sub>-Konzentrationen ist es empfehlenswert, die SO<sub>2</sub>-Querempfindlichkeit standortspezifisch zu ermitteln, da die Besonderheiten des jeweiligen Messgerätes -anders als im Eignungsprüfungsbericht beschrieben- Einfluss auf das Messergebnis haben.



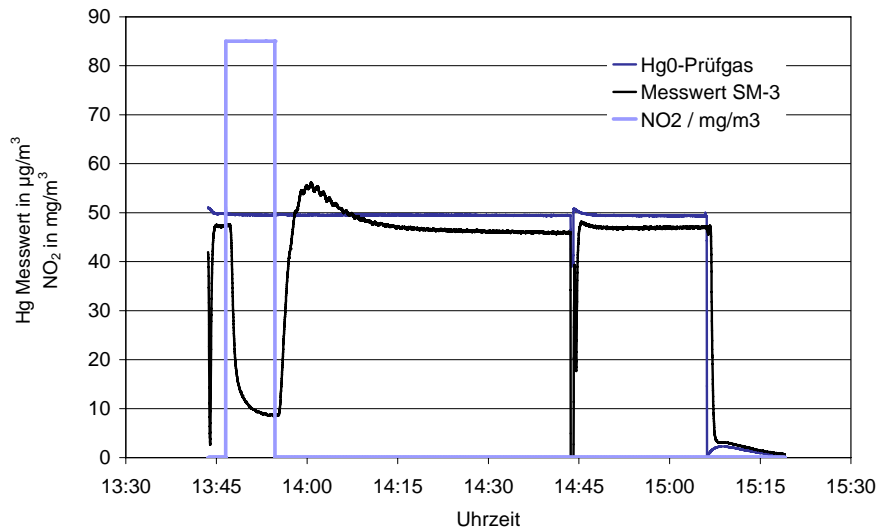
**Bild 6:**  $\text{SO}_2$ -Störeinfluss an zwei Standorten (nur Aufgabe von  $\text{SO}_2$  in  $\text{N}_2$ ; ohne Hg)

Eine Störung der katalytisch arbeitenden kontinuierlichen Quecksilbermessgeräte wurde bei Zugabe von **Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_2$ )** zum Gasgemisch beobachtet. Bei dem Einfluss der Komponente  $\text{NO}_2$  kann es sich im Gegensatz zum  $\text{SO}_2$  nicht um eine physikalische Querempfindlichkeit handeln. Vielmehr ist eine Kontamination des Katalysators durch verschiedene Prozesse zu vermuten, die abschließend zu Fehlbefunden führen kann.

Für die Laborversuche wurden zwei katalytisch arbeitende Messgeräte verschiedener Gerätehersteller mit Gasgemischen beaufschlagt, die neben Quecksilber auch  $\text{NO}_2$  und  $\text{O}_2$  in Stickstoff enthielten. Die Zumischung einer  $\text{NO}_2$ -Konzentration von  $23 \text{ mg}/\text{m}^3$  führte beim Gerät vom Typ HM 1400 TR (DURAG) zu einem Minderbefund von 57 % bei einem Sollwert von  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  Hg. Beim SM-3 (Mercury Instruments) wurde bei einer  $\text{NO}_2$ -Konzentration von  $85 \text{ mg}/\text{m}^3$  und einem Hg-Sollwert von  $48 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ein Minderbefund von 81 % festgestellt.



**Bild 7:** Störeinfluss der  $\text{NO}_2$ -Konzentration auf das Hg-Messsignal des HM 1400 TR (Sollwert Hg(0):  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ;  $23 \text{ mg}/\text{m}^3$   $\text{NO}_2/\text{N}_2$ )

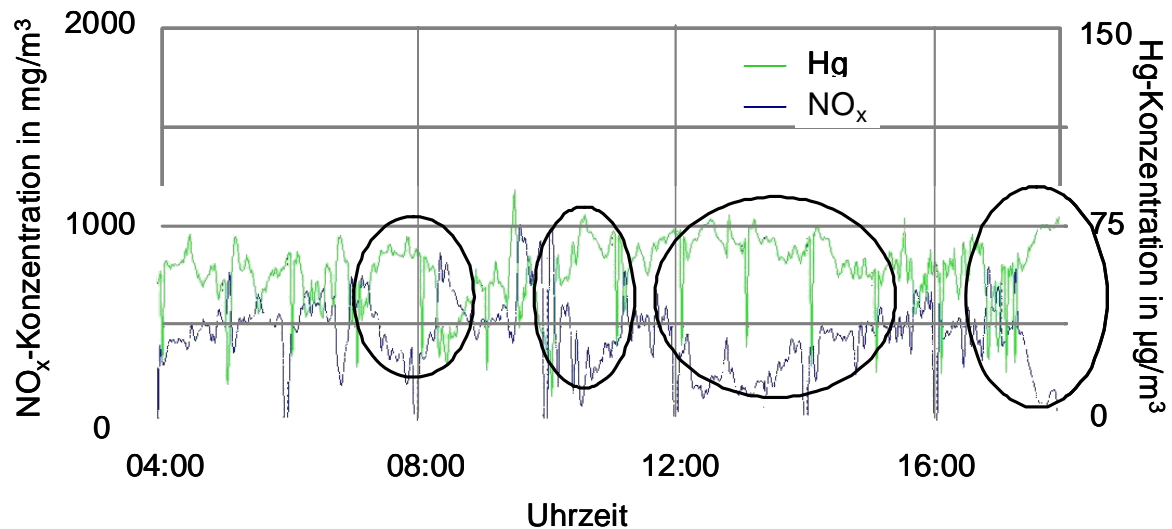


**Bild 8:** Störeinfluss der  $\text{NO}_2$ -Konzentration auf das Hg-Messsignal des SM-3 (Sollwert Hg(0):  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ;  $85 \text{mg}/\text{m}^3 \text{NO}_2/\text{N}_2$ )

Der Einfluss von  $\text{NO}_2$  auf die Reaktionen des Quecksilbers wird in der Literatur vielfach beschrieben. Dies gilt sowohl für homogene Gasphasenreaktionen als auch für heterogene Reaktionen an Katalysatoroberflächen. Eine mögliche Erklärung für den beobachteten Effekt stellt die Bildung nichtflüchtiger Quecksilbernitrate  $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$  dar. Der beschriebene Effekt tritt offenbar insbesondere dann auf, wenn kein  $\text{SO}_2$  im Abgas vorhanden ist.

Die  $\text{NO}_2$ -Konzentration ist im Abgas von Drehofenanlagen der Zementindustrie prozessbedingt sehr gering (üblicherweise deutlich weniger als 5 % der  $\text{NO}_x$ -Emissionen). Von daher dürfte der hier in Laborversuchen beobachtete Zusammenhang zwischen der  $\text{NO}_2$ -Konzentration und den Signalen der kontinuierlich arbeitenden Emissionsmessgeräte keine Rolle spielen. Allerdings wurde an einer Drehofenanlage eine Korrelation zwischen der  $\text{NO}_x$ - und der Hg-Konzentration beobachtet. Ein Anstieg der  $\text{NO}_x$ -Konzentration führte zur Abnahme der Hg-Konzentration und umgekehrt. Das beobachtete Verhalten kann nicht mit der  $\text{NO}$ -Konzentration in Verbindung gebracht werden, da  $\text{NO}$  im Laborversuch nicht zu einer Störung der kontinuierlichen Hg-Messung führte.

Bei der anschließenden Überprüfung des kontinuierlich arbeitenden Quecksilbermessgerätes vom Typ SM-3 wurde eine erhebliche Kontamination des Katalysators mit Quecksilber festgestellt, d. h. in diesem Fall wirkte der Katalysator als Quecksilberspeicher. Eine Erhöhung der Katalysatortemperatur auf  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  sowie das Spülen des Katalysators mit Wasserdampf führten zur allmählichen Freisetzung erheblicher Quecksilbermengen. Als Gegenmaßnahme ist eine dauerhafte Erhöhung der Katalysatortemperatur von  $400$  auf  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  anzuraten. Unabhängig davon wäre es auch durch eine detaillierte Bestimmung der  $\text{NO}_2$ -Konzentration anders als bei der Störkomponente  $\text{SO}_2$  nicht möglich, die ggf. vorhandene Beeinflussung der Geräteanzeige durch  $\text{NO}_2$  zu quantifizieren.



**Bild 9:** Verlauf der NO<sub>x</sub>- und Hg-Konzentration an einer Drehofenanlage

**Kohlendioxid** tritt lediglich bei dem mit einer nasschemischen Reduktionsstufe versehenen Messgerät der Firma Sick (Mercem 136) als Störkomponente auf. Der Einfluss der CO<sub>2</sub>-Querempfindlichkeit ist linear abhängig von der CO<sub>2</sub>-Konzentration. Da der CO<sub>2</sub>-Gehalt im Abgas von Drehofenanlagen der Zementindustrie nur geringen Schwankungen unterliegt, wird die Störung im Rahmen der Kalibrierung mit erfasst und muss bei der weiteren Auswertung im Messwertrechner nicht mehr berücksichtigt werden.

Erhöhte Konzentrationen an **Ammoniak** haben sich bei den katalytisch arbeitenden kontinuierlichen Quecksilbermessgeräten ebenfalls als problematisch erwiesen. Nach Verlassen des Katalysators wird das Messgas in einen Kühlschrank geleitet, um die Abgasfeuchte zu entfernen. Die Länge der Gasleitung zwischen Katalysator und Kühler beträgt ca. 80 cm. Auf dieser Leitungsstrecke kühlt das Gas bereits ab und es kann zum Auskondensieren von Ammoniumsalzen kommen. Elementares Quecksilber, das den Katalysator verlässt wird von diesen Ablagerungen adsorbiert, so dass sich Minderbefunde ergeben. Als Gegenmaßnahme können die kontinuierlichen Messgeräte mit einer sogenannten Spüloption nachgerüstet werden. Dabei wird in regelmäßigen Zeitabständen Wasser in die Leitungsstrecke nach Katalysator eingespritzt, um die Salze zu lösen und in den Kühler zu fördern. Das im Kühler anfallende Kondensat wird regelmäßig entfernt.





Bild 10: Ablagerungen in der Gasleitung zwischen Katalysator und Kühler

Ein weiterer Störeinfluss kann auf die Gegenwart von **Jod** im Ofenabgas zurückgeführt werden. Im Messgas im Überschuss vorliegendes Jod resublimiert leicht an den (kühlere) Oberflächen der gasführenden Bauteile in den Quecksilbermessgeräten. Dieser dünne Jodbelag dient als Fänger für elementares und gebundenes Quecksilber. Es bildet sich chemisch stabiles Quecksilberjodid.

Bei den katalytisch arbeitenden kontinuierlichen Quecksilbermessgeräten (SM-3, HM 1400 TR) ist unklar, ob eine katalytische Spaltung des Quecksilberjodids überhaupt stattfinden kann. In jedem Fall tritt bei zu geringem Messgasdurchfluss (SM-3: 60 l/h; HM 1400 TR: 100 l/h) bereits vor dem Katalysator und darüber hinaus in den Gasleitung nach Katalysator bei ausreichender Verweilzeit eine erneute Reaktion von gasförmigem Quecksilber und Jod auf. Daher können die katalytisch arbeitenden Quecksilberemissionsmessgeräte bei einem Vorhandensein von Jodverbindungen im Abgas nicht zur kontinuierlichen Quecksilbermessung eingesetzt werden. Zur Beeinflussung des Geräteverhaltens genügen bereits geringfügige Spuren von Jodiden. Dies kann dann längerfristig, da die Verbindungen in den Geräten akkumuliert werden können, zu Falschmessungen führen.

In diesem Fall weist das Messgerät vom Typ Mercem 136 einige Vorteile auf. Zu nennen ist zunächst der hohe abgesaugte Messgasvolumenstrom von 1 000 l/h, durch den Wandverluste auf dem Weg von der Messgasentnahmestelle bis zum Messgerät weitgehend reduziert werden.

Der Reduktionsreaktor des nasschemisch arbeitenden Gerätes enthält standardmäßig eine Zinn-II-chlorid-Lösung, die zur Umwandlung von Quecksilberchlorid in elementares Quecksilber dient. Bei Anwesenheit von Jodverbindungen wurden allerdings nach kurzer Betriebszeit deutlich sichtbare Ablagerungen aus Zinnstein ( $\text{SnO}_2$ ) festgestellt. Zudem waren die mit dem Reduktionsmittel in Kontakt stehenden Flächen gelblich verfärbt. Ursache für diese Ablagerungen bei Anwesenheit von Jodspuren ist vermutlich eine Reaktion von Zinn-II-chlorid und Jod unter Bildung von Zinnstein und Jodid. Die Zinn-II-Chlorid-Lösung wird bei dieser Reaktion verbraucht. Zudem wird gasförmiges Quecksilber im Zinnstein eingeschlossen und führt bei der kontinuierlichen Quecksilbermessung zu Minderbefunden.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden verschiedenen Modifikationen der Reduktionslösung erprobt. Letztlich hat sich die Zugabe geringer Mengen Ascorbinsäure als erfolg-

reich erwiesen. Ascorbinsäure wirkt in diesem Fall als ein Opferreagenz, das mit Jod reagiert und dieses zu Jodid reduziert. Jod wird auf diese Weise im Reduktionsreaktor zurückgehalten und führt trotzdem nicht zu einem Verbrauch der für die Reduktion der Quecksilberverbindungen notwendigen Zinn-II-chlorid-Lösung.

Das Quecksilbermessgerät vom Typ Mercem 136 kann mit Hilfe der oben beschriebenen Modifizierung auch bei Vorhandensein von Jod im Abgas zur kontinuierlichen Quecksilbermessung eingesetzt werden. Die Modifizierung wurde nachträglich in die Eignungsprüfung aufgenommen und zwischenzeitlich an zwei Drehofenanlagen der Zementindustrie installiert.

Da bislang kein Messverfahren zur Messung gasförmiger Jodverbindungen verfügbar ist, kann eine Abschätzung der Relevanz von Jod am jeweiligen Standort lediglich auf der Grundlage von Filterstaubanalysen erfolgen.

#### **4 Zusammenfassung**

Nachfolgend sind die wesentlichen Ergebnisse des Forschungsvorhabens zusammenfassend dargestellt:

- Im Rahmen des Vorhabens wurde ein Hg(0)-Generator entwickelt, mit dem trockenes Prüfgas hergestellt werden kann, das eine genau definierte Quecksilberkonzentration enthält.
- Im Hinblick auf die kontinuierliche Quecksilbermessung relevante Störkomponenten sind SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, Ammoniak und Ammoniumverbindungen sowie Jodide.
- Zu unterscheiden ist zwischen physikalischen Querempfindlichkeiten/Störeinflüssen und chemischen Störeffekten.
- Durch geeignete Modifikation der unterschiedlichen Gerätetypen konnte das Ausmaß der Störung in vielen Fällen deutlich verringert werden.
- Entscheidend für eine zuverlässige Messung im Langzeitbetrieb ist eine regelmäßige Wartung der Geräte.

Das Forschungsvorhaben (AiF-Vorhaben-Nr.: 14747 N) der Forschungsvereinigung Verein Deutscher Zementwerke e. V. wurde aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMW) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V. (AiF) gefördert.