

IGF-Forschungsvorhaben Nr.: 20514 N  
Bewilligungszeitraum: 01.02.2019 – 31.01.2021  
Forschungsthema: **Optimierung der sorbensunterstützten Staubausschleusung zur weiteren Minimierung der Hg-Frachten von Zementdrehrohrofenanlagen**

## 1 Ausgangssituation

Quecksilber ist aus toxikologischer Sicht ein sehr wichtiges Element für Mensch und Umwelt und gelangte in den letzten Jahren zunehmend in den Fokus auch internationaler Diskussionen. So wurde im Jahr 2013 auf UN-Ebene das Minamata-Abkommen mit dem Ziel einer Minderung der globalen anthropogenen Quecksilberemissionen verabschiedet. Es ist im August 2017 in Kraft getreten, nachdem es durch mehr als 50 Unterzeichnerstaaten ratifiziert wurde.

Die deutsche Zementindustrie ist daher weiterhin bestrebt, ihre Quecksilberfrachten zukünftig weiter zu senken. Im IGF-Vorgängervorhaben 18023 N wurden umfangreiche Untersuchungen zur Eignung einer sorbensunterstützten Staubausschleusung zur Minderung von Quecksilberkreisläufen und -emissionen angestellt. Es wurde gezeigt, dass eine gezielte Eindüsung von Sorbentien in den Abgasweg von Zementdrehrohrofenanlagen im Direktbetrieb eine Möglichkeit sein kann, die in vielen deutschen Werken praktizierte Staubausschleusung im Direktbetrieb bei Bedarf zu unterstützen.

## 2 Ziel des Forschungsvorhabens

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens bestand darin, die technisch-wissenschaftlichen Grundlagen einer Minderung der Quecksilberfrachten im Abgasweg von Zementdrehrohrofenanlagen durch eine sorbensunterstützte Staubausschleusung zu erweitern und Möglichkeiten der Optimierung aufzuzeigen. Hierbei sollte gezeigt werden, dass durch eine bessere Verteilung eingedüster Sorbentien im Abgasstrom in Abhängigkeit von den anlagenspezifischen Gegebenheiten ein größtmöglicher Nutzen aus der Maßnahme gezogen werden kann.

Im ersten Schritt wurde dazu in zwei Werken, in denen die Installation einer optimierten Sorbenseindüsung geplant bzw. die Optimierung einer bereits bestehenden Sorbenseindüsung vorgesehen war, eine umfangreiche Aufnahme des Ist-Zustands durchgeführt. Hierzu wurden Betriebsversuche vor Ort an beiden Drehofenanlagen durchgeführt. An beiden Anlagen wurden Messungen der relevanten Prozessparameter entlang des Abgaswegs während des Betriebs unter üblichen Bedingungen vorgenommen und im Rahmen der Auswertung eine vollständige Bilanzierung des Abgaswegs im Hinblick auf Quecksilber durchgeführt. Gleichzeitig wurden Strömungsprofile zur modelltechnischen Betrachtung aufgenommen.

Auf Grundlage der erfassten Daten wurde, ergänzt durch weitere Daten des jeweiligen Werkes (Prozessparameter, Anlagengeometrien, etc.), in einem zweiten Schritt Möglichkeiten einer Optimierung des Strömungsprofils untersucht. Hierzu wurde auf Grundlage der tatsächlichen Gegebenheiten des Abgasstrangs (Geschwindigkeitsprofile, Abgaszusammen-

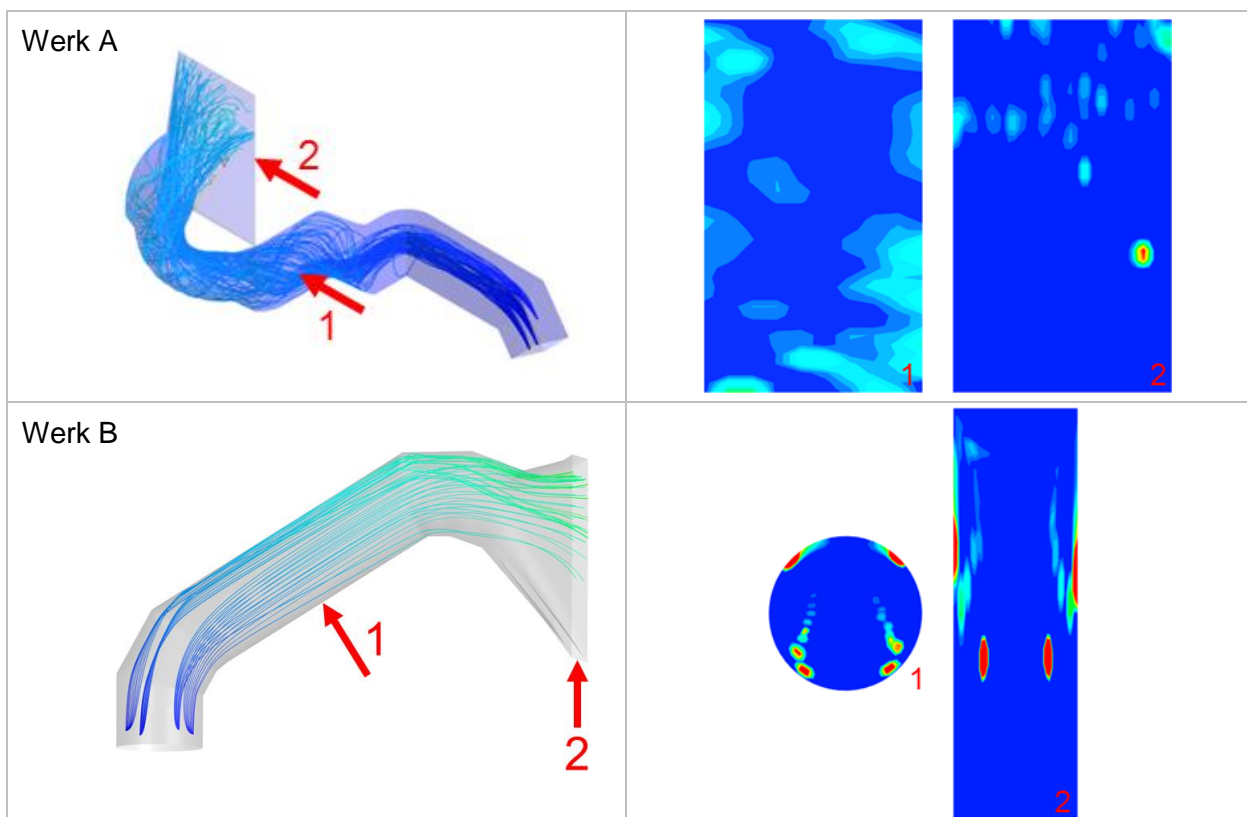
setzungen) zuerst der Ist-Zustand des Strömungsprofils an der jeweiligen Eindüsenstelle des Werks abgebildet. Darauf aufbauend wurden Variationen von Sorbens-Eindüseposition und Randbedingungen (Eindüsemenge, -geschwindigkeit) betrachtet und untersucht, wie sich die geänderten Randbedingungen auf eine Verteilung des Sorbens im Rohgasstrom auswirken und unter welchen Bedingungen die Sorbenseindüsung voraussichtlich am effektivsten ist.

Im dritten und vierten Schritt wurden die jeweils vielversprechendsten Variationen in einer weiteren umfangreichen Messkampagne unter Variation verschiedener Parameter (Eindüsemenge, -dauer, Abgastemperatur) erneut untersucht.

Im Anschluss wurden die Ergebnisse bewertet und es wurden allgemeingültige Handlungsempfehlungen erarbeitet, die eine einfache Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Abgasrandbedingungen und Anlagenkonfigurationen für eine bestmögliche Ausnutzung der sorbensunterstützten Staubausschleusung ermöglichen sollen.

### 3 Erzielte Ergebnisse

Die ersten beiden Betriebsversuche zur Aufnahme des Ist-Zustands und darauf aufbauende Bilanzrechnungen zeigten an beiden Anlagen ein typisches Verhalten des Quecksilbers in Drehofenanlagen auf. Der überwiegende Anteil der Quecksilberabscheidung aus der Gasphase findet entlang des Abgasstrangs über den Filterstaub statt. Die Abscheidung ist effektiver, je geringer die Abgastemperatur ist. Somit bestätigen die hier durchgeführten Untersuchungen zunächst die bisherigen Erkenntnisse aus vorherigen Forschungsvorhaben [1].



**Bild 1** Trajektorien der Sorbenspartikel (links, eingefärbt nach Verweilzeit) und Konturdiagramme der Oberflächenverteilungen in Schnittebenen (rechts, eingefärbt nach Oberflächenkonzentration)

Auf Basis der im Rahmen der beiden ersten Betriebsversuche aufgenommenen Strömungsprofile vor dem Staubfilter wurden jeweils CFD-Simulationen der Abgasstränge erstellt. Zur Untersuchung der Eindüservorrichtungen wurden die Aufgabemenge, Aufgabegeschwindigkeit, Aufgaberichtung der Sorbentien sowie die Ausrichtung und Anzahl der Aufgabelenzen variiert. Beispielhafte Trajektorien und Konturdiagramme der Oberflächenverteilungen sind für jeweils eine Variation von beiden Werken in **Bild 1** dargestellt.

Aus den Simulationen lässt sich zusammengefasst ableiten, dass bei langen Abgassträngen mit ggf. mehreren Richtungs- und Querschnittsänderungen der Leitung grundsätzlich von einer hohen Durchmischung von Sorbens und Gasstrom ausgegangen werden kann (**Bild 1**, links). Die Gestaltung der Eindüsung spielt in diesem Fall nur eine untergeordnete Rolle und Variationen haben nur vergleichsweise geringe Auswirkungen auf die Verteilung. Unter diesen Bedingungen stellte sich die Erhöhung der Aufgabemenge als wesentliche Einflussgröße auf die Abscheideleistung heraus. Bei einem kurzen Abgasstrang ohne wesentliche Richtungsänderungen hingegen zeigte sich, dass die Gestaltung der Sorbensaufgabe hinsichtlich Lanzenzahl, Position und Aufgabegeschwindigkeit die Verteilung des Sorbens im Abgasstrom stark beeinflussen kann und somit eine simulationstechnische Betrachtung des Abgasstrangs mit Blick auf eine Neuinstallation oder Optimierung einer Anlage vorteilhaft sein kann (**Bild 1**, rechts).

Während der anschließend durchgeführten Betriebsversuche wurden die Sorbentien an beiden Anlagen mit einer unterschiedlichen Aufgabedauer bzw. in variierenden Mengen aufgegeben. Dadurch konnte einerseits gezeigt werden, dass die Effektivität der Staubabscheidung durch eine höhere Menge an Sorbens steigt, es aber abhängig vom eingesetzten Sorbens andererseits bei Temperaturen oberhalb von 140 °C zu einer Abnahme der Effektivität kommen kann.

Zudem konnten an beiden Anlagen Potenziale aufgezeigt werden, die eine Optimierung der sorbensunterstützten Staubausschleusung bewirken. Eine gezielte Erhöhung der Temperatur verschiebt die Quecksilberfracht hin zur letzten Staubfiltereinrichtung. In Verbindung mit einer Sorbenseindüsung kann dies die Möglichkeit bieten, einen Abbau des Quecksilberkreislaufs und damit eine langfristige Vermeidung von Quecksilberemissionen zu erreichen.

Ausgehend von den durchgeführten Messungen, Bilanzierungen und den strömungstechnischen Simulationen lassen sich die folgenden Handlungsempfehlungen ableiten. Sie sollen es Zementwerksbetreibern, die die Installation einer Sorbens-Eindüseanlage erwägen, planen oder Optimierungsbedarf sehen, erleichtern, mögliche Eindüsepositionen und andere Voraussetzungen im Vorfeld zu identifizieren und abzuwägen. Dadurch wird ggf. ebenso die Hemmschwelle zur Installation einer solchen Anlage gesenkt, was im Betrieb zu einer langfristigen Entlastung der Quecksilberkreisläufe im Klinkerherstellungsprozess und langfristigen Vermeidung von Quecksilberemissionen führen kann.

1. Eine Eindüsung von aktivkohlehaltigen Sorbentien kann die Abscheidung von Quecksilber deutlich erhöhen. Es gilt, dass dies nur in Verbindung mit einer Staubausschleusung im Direktbetrieb zu einer langfristigen Verringerung der Emissionsfracht führen kann. Eine Eindüsung im Verbundbetrieb kann zwar kurzfristig zu einer Minderung von Emissionspitzen beitragen, verstärkt aber durch die Rückführung des Filterstaubs in den Herstellungsprozess die Ausbildung eines Quecksilberkreislaufs.

2. Es hat sich gezeigt, dass die Simulation des Abgasstranges und der jeweiligen Eindüseposition ein hilfreiches Mittel ist, um die richtige Eindüseposition und Randbedingungen festzulegen und somit Lösungen aufzeigen, wie eine möglichst gute Durchmischung von Gasstrom und Sorbens entlang des Abgaswegs und bei Eintritt in das Filter erreicht werden kann.
3. Bei geraden und kurzen Abgassträngen kann dies helfen, die bestmöglichen Randbedingungen zur Aufgabe zu identifizieren. Neben einer einfach zu realisierenden Erhöhung der Aufgabemenge oder -geschwindigkeit sind auch eine gleichmäßige Erhöhung der Anzahl der Eindüselanzen über den Querschnitt und eine Änderung der Aufgaberichtung mögliche Ansatzpunkte. Im Betriebsversuch konnte im Reingas eine Minderung des Quecksilbers von bis zu 90 % auch bei hohen Temperaturen erreicht werden. Die Abscheidung (basierend auf der in das Rohgas eingetragenen Quecksilberfracht) konnte von 86 % bei 120 °C bzw. 79 % bei 150 °C auf jeweils etwa 95 % gesteigert werden. Hier hat sich zudem gezeigt, dass sich eine Verweilzeit von unter 1 Sekunde in der Leitung durch eine anschließende längere Verweilzeit auf den Filteroberflächen positiv auf die Abscheiderate auswirkt.

Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass bei einer Positionierung der Eindüselanzen möglichst weit vor dem Abscheidefilter nicht nur die Kontaktzeit zwischen Sorbens und Gasphase erhöht, sondern auch die Abscheideleistung merklich höher ist. Sind zusätzlich Richtungsänderungen entlang des Gaswegs vorhanden, wird eine hohe Durchmischung erreicht (im Betriebsversuch mit etwa 4 Sekunden Verweilzeit). Es ist anzunehmen, dass diese Gegebenheiten nur in einer eingeschränkten Anzahl von Werken umsetzbar sind, da entweder der Abgasweg relativ kurz ist, bauliche Einschränkungen die Installation einer Anlage behindern oder eine entsprechende Stelle nicht ohne erheblichen Aufwand erreichbar ist. Darum könnte die Installation vor einem vorhandenen Gebläse entlang des Abgaswegs eine Alternative sein. Sofern die vorliegenden Temperaturen eine sichere Eindüsung zulassen, wäre von einer hohen, homogenen Durchmischung auszugehen.

Bei sehr geringen Staubgehalten, wurde mit einer geringen Menge eines Mischadsorbens eine effektive Verringerung der Quecksilberemission um mehr als 83 % erreicht. Es zeigte sich jedoch, dass das Potenzial einer Simulation deutlich kleiner ist, wenn aufgrund der baulichen Gestaltung grundsätzlich eine gute Durchmischung vorliegt. Hier ist eine Erhöhung der Aufgabemenge der erste Ansatzpunkt für eine Optimierung. Dabei ist jedoch mit Blick auf eine spätere Verwendung der ausgeschleusten Filterstäube im Zement darauf zu achten, dass keine negativen Beeinflussungen des Produktes auftreten können.

4. Entsprechend der Erkenntnisse bei alleiniger Staubausschleusung ohne Sorbenszugabe spielt die Abgastemperatur auch in Verbindung mit der Eindüsung von Sorbentien eine wesentliche Rolle hinsichtlich der Effektivität. So zeigte sich, dass die Abscheidung beim Einsatz eines Mischadsorbens bei Temperaturen oberhalb von 140 °C deutlich weniger effektiv ist. In diesen Fällen sollte ein anderes Adsorbens eingesetzt werden. Hierzu haben die Untersuchungen im Vorgängervorhaben [1] gezeigt, dass beispielsweise reine Aktivkohle deutlich höhere Adsorptionseigenschaften bei höheren Abgastemperaturen hat. In Fällen, in denen elementares Quecksilber überwiegt, sollte geprüft werden, ob ein

Einsatz von anderen Sorbentien, wie z. B. bromierter Aktivkohle eine Erhöhung der Minderungseffektivität erreicht.

5. Individuelle Gegebenheiten des Abgasstrangs können darüber hinaus Möglichkeiten bieten, eine effektivere Staubausschleusung zu erreichen. Sind beispielsweise mehrere Filteranlagen hintereinandergeschaltet oder werden große Mengen an Abwärme in weiteren Trocknungsprozessen entlang des Abgaswegs genutzt, die über die gewöhnliche Mahltrocknung hinausgehen, kann durch eine gezielte Einstellung der Temperatur eine Verschiebung der Quecksilberfracht erreicht werden. In Verbindung mit einer Sorbenseindüsung kann so eine Erhöhung des Quecksilberaustrags aus dem Kreislauf des Ofensystem über die Filterstaubausschleusung zu einer langfristigen Minderung der Quecksilberemissionen führen.
6. Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass niedrige Rohgasstaubgehalte im Direktbetrieb vorteilhaft für die Quecksilberabscheidung in Verbindung mit einer Sorbenseindüsung sein können. Die niedrigere Staublast, auch in Verbindung mit längeren Verweilzeiten im Staubfilter, führt im Allgemeinen zu einer höheren spezifischen Quecksilberkonzentration im Staub sofern die Temperatur möglichst weit unterhalb von 140 °C gehalten wird. In Verbindung damit kann ein effektiver Einsatz von Sorbentien zur Quecksilberabscheidung die notwendige Menge an Sorbens verringern und gleichzeitig die Entlastung des Quecksilberkreislaufs über den Filterstaub weiter erhöhen, wodurch langfristig Emissionen gemindert werden.

**Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.**

#### 4 Literaturverzeichnis

- [1] Forschungsinstitut der Zementindustrie (Hg.): *Senkung der Hg-Frachten in Zementdrehofenanlagen durch den Einsatz von Sorbentien – Emissionsminderung bei gleichzeitiger Beibehaltung der Produktqualität*. Düsseldorf, 2016. – Forschungsbericht. IGF-Forschungsvorhaben Nr. 18023 N (Schlussbericht)

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Das IGF-Vorhaben 20514 N der Forschungsvereinigung VDZ Technology gGmbH wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.