



MARTIN-LUTHER-UNIVERSITÄT  
HALLE-WITTENBERG  
Zentrum für Ingenieurwissenschaften

## **Dissertation**

zur Erlangung des Akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

# **Durch Quecksilberbromierung verbesserte Quecksilberabscheidung aus den Abgasen von Kohlekraftwerken und Abfallverbrennungsanlagen**

vorgelegt von

**Rico Kanefke**

geb. 27.Dezember 1977 in Zwenkau

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Heinz Köser

Prof. Dr.-Ing. Bernhard W. Vosteen

Prof. Dr. techn. Günter Scheffknecht

Datum der öffentlichen Verteidigung: 15.04.2008



Beiträge zum Umweltschutz

Band 5/2008

**Rico Kanefke**

**Durch Quecksilberbromierung verbesserte  
Quecksilberabscheidung aus den Abgasen von  
Kohlekraftwerken und Abfallverbrennungsanlagen**

Shaker Verlag  
Aachen 2008

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Halle, Univ., Diss., 2008

Copyright Shaker Verlag 2008

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-7241-8

ISSN 1611-8057

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Vorwort / Danksagung

„Keine Schuld ist dringender, als die, Dank zu sagen.“

Marcus Tullius Cicero, (106 - 43 v. Chr.)

Aus diesem Grund möchte ich auch direkt diese Schuld begleichen.

Mein herzlicher Dank gilt Prof. Dr.-Ing. habil. Heinz Köser und Prof. Dr.-Ing. Bernhard W. Vosteen für die Möglichkeit, das Thema meiner Diplomarbeit im Rahmen dieser Dissertation weiter zu verfolgen und zu vertiefen. Die vorliegende Arbeit wäre ohne sie nicht möglich gewesen, denn mit den vielen weiterführenden fachlichen Diskussionen, Hilfestellungen bei Vorträgen und Veröffentlichungen und der angenehmen Zusammenarbeit haben sie maßgeblich zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen. Ich danke auch Prof. Dr. techn. Günter Scheffknecht für die Übernahme eines Gutachtens zu dieser Arbeit.

Mein Dank gilt der Bayer Industry Services GmbH & Co. oHG, Leverkusen, die die aufwendigen experimentellen Untersuchungen finanziell ermöglicht haben.

Die Vielzahl der experimentellen Untersuchungen im Rahmen dieser Dissertation wäre ohne die engagierten wissenschaftlichen Hilfskräfte, Projektanten und Diplomanden für mich nicht zu schaffen gewesen. Insbesondere möchte ich mich bei Frank Bergmann, Kristina Fehre, Stephan Kohnert, Alexander Koller und Raik Stolle bedanken.

Große Unterstützung bei den Laboruntersuchungen hatte ich außerdem von Anja Witte, die zudem einige Monate den Zustand meines Schreibtisches ertragen musste.

Weitere Unterstützung erfuhr ich durch meine immer sehr hilfsbereiten Kollegen: Heike Jakob, Dr. rer. nat. Manfred Jank, Marlis Porobin, Birgit Schubert, Sandra Straube und Martin Ziegler. Ich danke weiterhin allen Mitarbeitern der Werkstatt, die mich bei allen Arbeiten im Labor, bei den Versuchsapparaturen, Analysegeräten und mit der einen oder anderen unkonventionellen technischen Meisterleistung unterstützten. Ich danke ihnen außerdem für das tolle Arbeitsklima während der vier Jahre.

Für die Unterstützung bei den Versuchen mit der Laser-Massenspektrometrie danke ich Prof. Dr. Ulrich Boesl-von Grafenstein und seiner Arbeitsgruppe an der TU München.

Außerdem danke ich Dr. Walter Leidinger, Joachim Beyer und Klaus-Dieter Herrmann, die mir für die Fertigstellung der Arbeit beruflich das ein oder andere Mal den Rücken freihielten.

Einen großen Dank möchte ich schließlich auch meiner Frau Ewa für ihre Geduld bei der Suche nach Fehlern, für ihre Toleranz mit meiner Person, insbesondere bei hin und wieder auf der Strecke gebliebenen häuslichen Arbeiten und für den Rückhalt, den sie mir dadurch gegeben hat, aussprechen.

Ganz besonders aber bedanke ich mich bei ihr für ihre Motivationskünste bei Tiefpunkten und dafür, dass sie mir am 27.12.2006 das schönste Präsent der Welt, nämlich meine Tochter Catelyn, geschenkt hat.

Meinen Eltern bin ich dankbar für die Unterstützung, ihre Kraft und ihre Liebe, die mich all die Jahre durch Schule und Studium begleitet haben. Ihnen, meinen Schwiegereltern und meinem Schwager danke ich dafür, dass sie während meiner doch recht langen Arbeitszeit meiner Frau und meiner Tochter in allen Belangen beistehen.

Neben der Arbeit war es ganz besonders wichtig, dass in meiner Freizeit jederzeit gute Laune herrschte. Dafür danke ich meiner Familie und meinen Freunden.

Viele Personen, die mir bei dieser Arbeit ebenfalls behilflich waren, sind ungenannt geblieben. Auch ihnen sei an dieser Stelle Dank gesagt. Ich freue mich, dass mich eine so erstaunlich große Anzahl von Menschen unterstützt.

## Kurzfassung

Die bromgestützte Quecksilberabscheidung ist eine kostengünstige Technologie zur Verringerung der Quecksilberemissionen von Kohlekraftwerken und anderen Verbrennungsanlagen. Das in 2000 erfundene Verfahren wurde von Bayer Industry Services GmbH & Co. oHG (BIS) in 2002 weltweit zum Patent angemeldet. In der vorliegenden Arbeit werden einige dem Verfahren zugrundeliegende Mechanismen näher untersucht.

Der erste Teil beschäftigt sich mit den Vorgängen im Kesselrohgas. Grundlage der verbesserten Quecksilberabscheidung ist die Bromierung des elementaren Quecksilbers im Rohgas ( $\text{Hg}^{\text{el}} + \text{Br}_2 \leftrightarrow \text{HgBr}_2$ ), da die oxidierte Form effizienter in der Abgasreinigung abscheidbar ist. Es wird gezeigt, dass im Fall  $\text{Br}_2$  das  $\text{SO}_2$  im Abgas – anders als beim  $\text{Cl}_2$  – die Quecksilberoxidation nicht beeinflusst. Somit steht alles  $\text{Br}_2$  für die Quecksilberoxidation zur Verfügung. Damit werden im Vergleich zum Chlor geringere Bromüberschüsse benötigt, um das elementare Quecksilber zu oxidieren.

Der zweite Teil der Arbeit beschäftigt sich mit den Vorgängen der Quecksilberabscheidung in der nassen Rauchgasreinigung, die durch den Quecksilber-(II)-Dampfdruck begrenzt ist. Außerdem kann im Wäscher abgeschiedenes zweiwertiges Quecksilber wieder zu elementarem Quecksilber umgewandelt und ins Reingas freigesetzt werden. Es wird der Einfluss der Parameter Wäscher Temperatur, pH-Wert, Quecksilber-(II)-Konzentration, Chlorid- und Bromidkonzentration und Redoxpotential auf den Quecksilberdampfdruck über quecksilberhaltigen Wäscherlösungen untersucht und ihr Einfluss auf die Reduktionsstabilität dargelegt. Durch das Bromid (Quecksilberkomplexierung) in der Wäscherlösung wird der Quecksilberdampfdruck erheblich gesenkt und die Reduktionsstabilität gegenüber Sulfid bzw. Hydrogensulfid deutlich erhöht.

Im dritten Teil der Arbeit werden Minderbefunde bei der kontinuierlichen Gesamtquecksilbermessung in Gegenwart von Brom und HCl aufgedeckt. Dieses Problem wird behoben, indem Brom und HCl an Metallspänen bei 170 bis 200°C adsorbiert werden, ohne die  $\text{Hg}^{\text{ges}}$ -Konzentration zu beeinflussen. Besonders geeignet ist das Rotguss RG7, z.B. als Schüttung in einer kompakten Vorschaltadsorptionseinheit vor den kontinuierlichen  $\text{Hg}^{\text{ges}}$ -Messgeräten, um auftretenden brom- bzw. HCl-bedingte Messfehler zu verhindern.

## Abstract

The bromine-enhanced mercury abatement process is a low cost technology for reducing mercury emissions from coal fired power plants and other incinerators. The process was developed in 2000 by Bayer Industry Services, Germany. Worldwide patents are pending. This dissertation investigates some mechanisms of the bromine-enhanced mercury abatement process.

Part one of this dissertation is concerned with the chemical reactions in raw gases. The bromination of elemental mercury ( $\text{Hg}^{\text{el}} + \text{Br}_2 \leftrightarrow \text{HgBr}_2$ ) is the basis for better mercury abatement, because oxidized mercury can be removed more efficiently by existing flue gas cleaning devices. It is shown that  $\text{SO}_2$  is not affecting the mercury oxidation by bromine, as it does in the case of chlorine. Therefore the total amount of bromine is available for the oxidation of elemental mercury.

The second part of this dissertation looks behind the mercury abatement process in wet scrubbers, which is limited by the vapor pressure of divalent mercury. This divalent mercury could also be reduced by sulfite or hydrogensulfite to the elemental form, which then re-emitted to the stack gas. The influence of the temperature and pH-value of the mercury-solution, dissolved mercury- and halogenide-concentrations and redox-potential on the mercury vapour pressure and the reduction stability is investigated. The complexation of dissolved mercury by bromides is reducing the vapor pressure and raising the stability against reduction caused by sulfites and hydrogensulfites.

False low readings of continuous total mercury measuring devices in the presence of bromine and HCl are the topic of the third part of this dissertation. This problem is solved by adsorption of bromine and HCl on a red brass based sorption unit at  $170^\circ\text{C}$ , without changing the gas-phase mercury concentration. A upstream sorption unit was developed, which prevents the bromine and HCl-caused false low readings of continuous total mercury measuring devices.



1	Einführung.....	1
1.1	Quecksilber – Vorkommen, Verbindungsformen, Toxizität .....	1
1.2	Natürliche und anthropogene Quecksilberemissionen .....	3
1.3	Quecksilberkreislauf zwischen Erdoberfläche und Atmosphäre.....	5
1.4	Quecksilberanreicherung im Fisch – wachsende arktische Quecksilberbelastung.....	7
1.5	Gesetzliche Maßnahmen zum Umgang mit Quecksilber – Begrenzung der Quecksilberemissionen in Deutschland / Europa und den USA.....	11
1.6	Stand der Technik in Deutschland / Europa.....	17
1.7	Stand der Technik in den USA.....	22
1.7.1	Trockene Rauchgasreinigung in den USA.....	22
1.7.2	Nasse Rauchgasreinigung in den USA .....	28
1.8	Zielsetzung der vorliegenden Arbeit.....	33
2	Quecksilberoxidation im Kesselrohgas .....	35
2.1	Thermodynamik und Reaktionskinetik .....	35
2.2	Chlorgestützte Quecksilberoxidation.....	38
2.3	Bromgestützte Quecksilberoxidation.....	46
2.4	Experimente zur Klärung des Bromrätsels .....	48
2.4.1	Laborversuchsstand zum Nachweis von SO <sub>2</sub> im bromhaltigen Gas.....	48
2.4.2	Brom-Schwefelbilanz.....	50
2.4.3	Klärung des Reaktionsgeschehens zwischen SO <sub>2</sub> und Br <sub>2</sub> .....	54
2.4.3.1	Die Laser-Massenspektrometrie .....	55
2.4.3.2	Versuche zum Reaktionsgeschehen zwischen SO <sub>2</sub> und Br <sub>2</sub> in der Gasphase .....	57
2.4.3.3	Bestimmung der Messgeräteparameter für die simultane Messung von SO <sub>2</sub> , Br <sub>2</sub> und HBr - Massenspektren der Einzelsubstanzen.....	59
2.4.3.4	Bestimmung der Messgeräteparameter für die simultane Messung von SO <sub>2</sub> , Br <sub>2</sub> und HBr - Wahl der geeigneten Wellenlänge .....	63
2.4.3.5	Bestimmung der Messgeräteparameter für die simultane Messung von SO <sub>2</sub> , Br <sub>2</sub> und HBr - Korrektur der Messfehler	

	aufgrund von sich verringernder Laserintensität während des Versuches .....	66
2.4.4	Versuchsergebnisse zum Reaktionsgeschehen zwischen Brom und SO <sub>2</sub> .....	67
2.4.5	Update der Erkenntnisse früherer Arbeiten zum Reaktionsgeschehen zwischen Br <sub>2</sub> und SO <sub>2</sub> mit Blick auf deren Verhalten im Wäscher .....	71
2.4.6	Auswirkungen der neuen Erkenntnisse zum Reaktionsgeschehen im Kessel auf die Quecksilberoxidation .....	75
2.4.7	Ausblick auf weiterführende Möglichkeiten zur Erforschung der Quecksilberoxidationsreaktionen in Gegenwart von Chlor und Brom im Kesselrohgas .....	76
<b>3</b>	<b>Der Dampfdruck des gelösten zweiwertigen Quecksilbers .....</b>	<b>81</b>
3.1	Thermodynamische Betrachtungen zum Quecksilber-(II)-Dampfdruck .....	81
3.1.1	Quecksilber-(II)-Dampfdruck von Quecksilber-(II)-Salzlösungen in Abhängigkeit von Temperatur und Konzentration .....	81
3.1.2	Absenkung des Dampfdruckes von Quecksilber-(II)-Salzlösungen durch Komplexierung .....	85
3.2	Thermodynamische Modellierung der Flüssigspeziesverteilung von HgBr <sub>2</sub> /Br-Lösungen .....	88
3.2.1	Grundlagen der thermodynamischen Modellierung .....	88
3.2.2	Berechnung der temperaturabhängigen Gleichgewichtskonstanten der Komplexierungsreaktionen .....	91
3.2.3	Berechnung der Speziesverteilung in wässrigen Quecksilberhalogenid /Halogenid-Systemen .....	92
3.2.4	Abhängigkeit der Speziesverteilung in wässrigen Quecksilberhalogenid/Halogenid-Systemen von der Quecksilber-(II)-Konzentration .....	96
3.2.5	Abhängigkeit der Flüssigspeziesverteilung in Quecksilberhalogenid/Halogenid-Systemen von der Wäschertemperatur .....	99

3.2.6	Modellierung des Quecksilber-(II)-Dampfdruckes über Halogenidlösungen in Abhängigkeit von Temperatur, Quecksilber-(II)-Konzentration und Halogenidgehalt.....	100
3.3	Experimentelle Untersuchungen zum Dampfdruck von zweiwertigem Quecksilber in Chlorid- und Bromidlösungen .....	103
3.3.1	Laborversuchsstand zur Ermittlung des Dampfdruckes von zweiwertigem Quecksilber über Modellwaschlösungen .....	103
3.3.2	Versuchsdurchführung: Ermittlung des Quecksilberdampfdruckes über Lösungen .....	105
3.3.3	Messergebnisse: Einfluss der Quecksilber-(II)-Konzentrationen in einer verdünnten wässrigen $\text{HgX}_2$ -Waschlösung bei $60^\circ\text{C}$ .....	107
3.3.4	Messergebnisse: Einfluss der Lösungstemperatur auf den Quecksilber-(II)-Dampfdruck über einer verdünnten, wässrigen $\text{HgBr}_2$ -Lösung .....	108
3.3.5	Messergebnisse: Einfluss des pH-Werts der Waschlösung auf den Quecksilberdampfdruck .....	113
3.4	Vergleich der thermodynamischen Modellierung des Quecksilber-(II)-Dampfdruckes mit experimentell ermittelten Daten .....	114
4	Halogenidkomplexe und Reduktionsstabilität von Quecksilber(II) in Wäschern.....	124
4.1	Grundlagen der Reduktion von oxidiertem Quecksilber(II) in halogenidhaltigen wässrigen Lösungen .....	125
4.1.1	Reduktion von gelöstem Quecksilber(II) durch Schwefeldioxid .....	125
4.1.2	Redoxpotentiale von Quecksilber-(II)-Lösungen .....	130
4.2	Experimentelle Untersuchungen zur Reduktion von Quecksilber(II) .....	133
4.2.1	Durchführung der Untersuchungen zur Reduktion von Quecksilber(II) .....	133
4.2.2	Reduktion von gelöstem Quecksilber(II) an metallischen Oberflächen .....	137
4.2.3	Ergebnisse zum Einfluss verschiedener Parameter auf das messbare Redoxpotential von Quecksilber-(II)-Lösungen.....	139
4.2.4	Ergebnisse zur Reduktion von Quecksilber-(II)-Chlorid-Lösungen durch $\text{SO}_2$ .....	142

4.2.5	Reduktion von zweiwertigem Quecksilber im schwachsauren Wäscherbereich (pH-Wert: 5-7) ohne Halogenide.....	144
4.2.6	Ergebnisse zum Einfluss der Komplexbildung auf die sulfid-/hydrogensulfidbedingte Quecksilberreduktion .....	144
4.3	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen .....	149
5	Kontinuierliche Messung von Gesamtquecksilber in Gegenwart von Brom und/oder HCl .....	153
5.1	Stand der Technik .....	153
5.2	Probleme bei der kontinuierlichen Gesamtquecksilbermessung in Gegenwart von freiem Brom .....	154
5.3	Minderbefunde bei der kontinuierlichen Gesamtquecksilbermessung mit dem Hg-CEM der Firma Seefelder Messtechnik GmbH in Gegenwart von HCl.....	157
5.4	Vermeidung Brom und HCl-bedingter Messfehler bei der kontinuierlichen Gesamtquecksilbermessung .....	164
5.4.1	Thermodynamische Betrachtung zur Bromsorption an Nichteisenmetallen .....	165
5.5	Experimentelle Untersuchungen zur Bromabscheidung an Metallen in Messgasen zur kontinuierlichen Quecksilbermessung.....	168
5.5.1	Aufbau und Wirkungsweise der Versuchsanlage .....	168
5.5.2	Diskontinuierliche Messung der Bromkonzentration im Modellabgas .....	169
5.5.3	Ergebnisse: Sorptionsuntersuchungen von Br <sub>2</sub> an Nichteisenmetallschüttungen.....	172
5.5.4	Einfluss der Rotgusschüttung zur Sorption von Brom auf die kontinuierliche Quecksilbermessung .....	176
5.5.5	Einsatz einer tragbaren Prototyp-Bromsorptionseinheit als Vorschaltgerät zur kontinuierlichen Quecksilbermessung in Gegenwart von Brom und HCl.....	178
6	Zusammenfassung .....	184

---

---

A	Gemeinsame gerätetechnische Ausrüstung für die experimentellen Untersuchungen .....	A-1
A.1	Kontinuierliche Quecksilbermessgeräte .....	A-1
A.1.1	HM1400 wet der Firma DURAG/Verewa .....	A-1
A.1.1.1	Messprinzip des Photometers des HM 1400 wet .....	A-2
A.1.2	Seefelder Hg-CEM .....	A-4
A.1.2.1	Funktionsweise des SEEFELDER HG-CEM® .....	A-5
A.1.3	SICK MERCEM .....	A-7
A.2	Datenerfassung an den Konti-Quecksilbermessgeräten .....	A-9
A.3	Hilfsanlagen zur Erzeugung von Modell-Abgasen für Versuche bzw. Kalibriergasen für die Messgeräte .....	A-10
A.3.1	Hovacal – Kalibriergasgenerator zur Bereitstellung von HgCl <sub>2</sub> .....	A-10
A.3.2	MKal – Permeationsgerät zur Bereitstellung von Hg <sup>el</sup> .....	A-12
A.3.3	Gas-Misch-Station .....	A-14
A.3.4	Anlage zur Zudosierung von freiem Brom (Br <sub>2</sub> ) .....	A-15
B	Redoxpotential – Theorie und messbare Größe .....	A-19
B.1	Mischpotential .....	A-21
B.2	Messung von Redoxpotentialen in realen Lösungen .....	A-23



AGW	Arbeitsplatzgrenzwert
BAT	Best Available Technologies
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
BREF	Best Available Techniques Reference Documents
BVT	Beste Verfügbare Technik
CAIR	Clean Air Interstate Rule
CAMR	Clean Air Mercury Rule
CEM	Continuous Emission Monitor
CI	Chemische Ionisation
DOE	Department Of Energy
EI	Elektronenstoßionisation
EPA	Environmental Protection Agency
EPRI	Electric Power Research Institute
ESP	Electrostatic Precipitator (= EGR)
FDA	Food and Drug Administration
FEP	Perfluorethylenpropylen
FGD	Flue Gas Desulphurisation (=REA)
GefStoffV	Gefahrstoffverordnung
GGW	Gleichgewicht
HOK	Herdofenkoks
HoVaCal	Hot Vapour Calibration
IP	Ionisierungspotential
IPPC	Integrated Pollution Prevention and Control
LUVO	Luftvorwärmer
MAK	Maximale Arbeitsplatz-Konzentration (alte Bezeichnung des AGW)
MFC	Mass-Flow-Controller (Massendurchflussregler)
MFM	Mass-Flow-Measuring (Massendurchflussmesser)
NWE	Normalwasserstoffelektrode
PAC	pulvrige Aktivkohle
PCDD	Polychlorierte Dibenzodioxine
PCDF	Polychlorierte Dibenzofurane
PFA	Perfluoralkoxy-Copolymer
PPJF	Pulse Jet Fabric Filter
ppm	parts per million

---

PRB	Powder River Basin
PTFE	Polytetrafluorethylen
REA	Rauchgasentschwefelungsanlage
SBS	Sekundärbrennstoffe
SCR	Selective Catalytic Reduction
SEA	Sorption Enhancing Agent
SVA	Sonderabfallverbrennungsanlage
TMT 15	15%-ige Lösung von Trimercapto-s-triazin, Natriumsalz
TOF	Time Of Flight (Laser-Massenspektrometer)
UNEP	United Nations Environment Programme
UV	Ultraviolett
VA1	Verbrennungsanlage 1 (der Firma Currenta in Leverkusen)



## Chemische Symbole

Ag	Silber	Hg <sup>ges</sup>	Gesamtquecksilber
AgCl	Silber-(I)-chlorid	Hg <sup>kompl</sup>	komplexiertes Quecksilber
Al	Aluminium	Hg <sup>ion</sup>	ionisches Quecksilber
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Aluminium-(III)-oxid	Hg <sup>org</sup>	organischgebundenes Quecksilber
Br	Brom		
Br <sup>ges</sup>	Gesamt brom	Hg <sup>ox</sup>	oxidiertes Quecksilber
Br <sub>2</sub>	freies Brom (Brommolekül)	Hg <sup>p</sup>	partikelgebundenes Quecksilber
CaBr <sub>2</sub>	Calciumbromid	HgBr <sub>2</sub>	Quecksilberbromid
CaCO <sub>3</sub>	Calciumcarbonat (Kalkstein)	HgBr <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Tribromomercurat-Ion
Ca(OH) <sub>2</sub>	Calciumhydroxid	HgBr <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Tetrabromomercurat-Ion
CaCl <sub>2</sub>	Calciumchlorid	HgCl <sub>2</sub>	Quecksilber-(II)-Chlorid
CaX <sub>2</sub>	Calciumhalogenid	Hg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Quecksilber-(II)-Nitrat
CO	Kohlenmonoxid	HgI <sub>2</sub>	Quecksilber-(II)-Jodid
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid	HgS	Quecksilber-(II)-sulfid (Zinnober)
CH <sub>3</sub> Hg	Methylquecksilber	HgSe	Quecksilber-(II)-Selenid
Cl	Chlor	Hg <sub>2</sub> Se	Quecksilber-(I)-Selenid
Cl <sup>ges</sup>	Gesamtchlor	HgX <sub>2</sub>	Quecksilber-(II)-Halogenid
Cl <sub>2</sub>	freies Chlor (Chlormolekül)	HgX <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Trihalogenomercurat-Ion
Cr	elementares Chrom	HgX <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Tetrahalogenomercurat-Ion
Cu	elementares Kupfer	Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	Quecksilber-(I)-Chlorid (Kalomel)
CuO	Kupfer-(II)-oxid	I	Jod (Iod)
HBr	Bromwasserstoff	KCl	Kaliumchlorid
HCl	Chlorwasserstoff	Me <sup>0</sup>	elementares Metall
HF	Flourwasserstoff	MeO	Metall-(II)-oxid
HNO <sub>3</sub>	Salpetersäure	Me <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Metall-(III)-oxid
HX	Halogenwasserstoff	MeHg	Methylquecksilber
H <sub>2</sub> O	Wasser	MeX <sub>2</sub>	Metall-(II)-halogenid
H <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	schwefelige Säure	MeX <sub>3</sub>	Metall-(II)-halogenid
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Schwefelsäure	N <sub>2</sub>	Stickstoff
Hg	Quecksilber	Na	Natrium
Hg <sup>+</sup>	einwertiges Quecksilber	NaBH <sub>4</sub>	Natriumborhydrid
Hg <sup>2+</sup> / Hg(II)	zweiwertiges Quecksilber	NaBO <sub>2</sub>	Natriummetaborat
Hg <sup>el</sup>	elementares Quecksilber (auch Hg <sup>met</sup> , Hg <sup>0</sup> )	NaBr	Natriumbromid

NaCl	Natriumchlorid	Pb	Blei
NaHS	Natriumhydrogensulfid	Pt	Platin
NaI	Natriumiodid	PtS	Platinsulfat
NaOBr	Natriumhypobromid	PtO	Platinoxid
NaOH	Natriumhydroxid	Sn	Zinn
NaOX	Natriumhypohalogenid	SnCl <sub>2</sub>	Zinn- (II)-Chlorid
Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	Natriumsulfit	SnCl <sub>4</sub>	Zinn- (IV)-Chlorid
Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·5H <sub>2</sub> O	Natriumthiosulfat	SO <sub>2</sub>	Schwefeldioxid
NaX	Natriumhalogenid	SO <sub>3</sub>	Schwefeltrioxid
Ni	elementares Nickel	SO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Sulfit
NO	Stickstoffmonoxid	SO <sub>2</sub> Br <sub>2</sub>	Sulfurylbromid
NO <sub>2</sub>	Stickstoffdioxid	SO <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	Sulfurylchlorid
NO <sub>x</sub>	Stickoxide allgemein	Zn	Zink
O <sub>2</sub>	freier Sauerstoff (Sauerstoffmolekül)		

## Mathematische Symbole

θ	Celsius-Temperatur	[°C]
ς	Anteil	[-]
λ	Wellenlänge	[nm]
λ <sub>Brom</sub>	Bromabschidegrad	[-]
ΔE <sup>0</sup>	Potentialdifferenz	[V]
ΔG <sub>R</sub>	freie Gibbs'sche Reaktionsenthalpie	[kJ/mol]
ΔG <sup>0</sup>	Gibbs'sche freie Standardreaktionsenthalpie	[kJ/mol]
Δh <sub>v</sub>	temperaturabhängige molare Verdampfungsenthalpie des reinen Stoffes	[kJ/mol]
Δh <sub>v</sub>	mittlere partielle molare Desorptionsenthalpie	[kJ/mol]
ΔH	Enthalpieänderung des Systems	[kJ/mol]
ΔS	Entropieänderung	[kJ/(mol·K)]
Δt	Zeitdifferenz	[sec]
ΔV <sub>V</sub>	Differenz des molaren Volumens in der Dampfphase und Flüssigphase	[m <sup>3</sup> ]
A	Anpassungskoeffizient 1 (Gasgleichung, Temperatur, Dampfdruck)	[-]

$a_{\text{Red}}$	Aktivität des Reduktionsmittels	[-]
$a_{\text{Ox}}$	Aktivität des Oxidationsmittels	[-]
B	Anpassungskoeffizient 2 (Dampfdruck)	[-]
C	Anpassungskoeffizient 3 (Komplexierungsfunktion)	[-]
$c_{0X}$	Starthalogenidkonzentration	[mol/l]
$c_{1X_{\text{eq}}}$	berechnete Konzentration an Halogenid bei der Quecksilberkomplexierung im thermodynamischen Gleichgewicht	[mol/l]
$c_{2X_{\text{eq}}}$	berechnete Konzentration an Halogenid bei der Quecksilberkomplexierung im thermodynamischen Gleichgewicht	[mol/l]
$c''_{\text{H}^+}$	Gleichgewichtskonzentration von $\text{H}^+$	[mol/l]
$c''_{\text{HSO}_3^-}$	Gleichgewichtskonzentration von $\text{HSO}_3^-$	[mol/l]
$c''_{\text{H}_2\text{O}}$	Gleichgewichtskonzentration von $\text{H}_2\text{O}$	[mol/l]
$c''_{\text{H}_2\text{SO}_4}$	Gleichgewichtskonzentration von $\text{H}_2\text{SO}_4$	[mol/l]
$c''_{\text{Hg}}$	Gleichgewichtskonzentration von Hg	[mol/l]
$c''_{\text{HgX}_2}$	Gleichgewichtskonzentration von $\text{HgX}_2$	[mol/l]
$c''_{\text{Hg(II)}_{\text{-gas}}}$	Reingaskonzentration des Hg(II)	$[\mu\text{g}_{\text{Hg}}/\text{m}^3_{\text{i.N.tr.}}]$
$c''_{\text{HgX}_2_{\text{-gas}}}$	Gleichgewichtskonzentration des Quecksilberhalogenids in der Gasphase	$[\mu\text{g}_{\text{HgX}_2}/\text{m}^3_{\text{i.N.tr.}}]$
$c''_{\text{X}^-}$	Gleichgewichtskonzentration von $\text{X}^-$	[mol/l]
$c_{\text{Brom}}$	Bromkonzentration im Gas	[mol/l]
$c_{\text{Bromid}}$	Bromidkonzentration in der Absorptionslösung	[mol/l]
$c_{\text{Br}2.\text{n.S.}}$	Bromkonzentration nach der Metallschüttung	[mol/l]
$c_{\text{Br}2.\text{v.S.}}$	Bromkonzentration vor der Metallschüttung	[mol/l]
$c_{\text{Gas}}$	eindosierte $\text{Hg}^{\text{ges}}$ -Konzentration	[mol/l]
$c_{\text{Hg}}$	Konzentration des Quecksilbers	$[\text{mg}_{\text{Hg}}/\text{l}]$
$c_{\text{Hg,AGW}}$	Arbeitsplatzgrenzwertkonzentration für anorganisch gebundenes Quecksilber	$[\mu\text{g}_{\text{Hg}}/\text{m}^3_{\text{i.N.tr.}}]$
$c_{\text{Hg(II)}_{\text{-fl}}}$	Konzentration an gelösten Hg(II)	$[\text{mg}_{\text{Hg}}/\text{l}]$

$C_{\text{Hg(II)}\_fl\_ges}$	Gesamtkonzentration an Hg(II)	[mg <sub>Hg</sub> /l]
$C_{\text{Hg(II)}\_fl\_mol}$	Konzentration an molekular gelösten Hg(II)	[mg <sub>Hg</sub> /l]
$C_{\text{HgX}_2\_fl}$	Konzentration an gelöstem Quecksilberhalogenid	[mg <sub>HgX<sub>2</sub></sub> /l]
$C_{\text{Hg\_gemessen}}$	gemessene Hg <sup>ges</sup> -Konzentration	[mg <sub>Hg</sub> /l]
$C_{\text{HgX}_2eq}$	berechnete Konzentration an HgX <sub>2</sub> bei der Quecksilberkomplexierung im thermodynamischen Gleichgewicht	[mol/l]
$C_{\text{HgX}_3eq}$	berechnete Konzentration an HgX <sub>3</sub> <sup>-</sup> bei der Quecksilberkomplexierung im thermodynamischen Gleichgewicht	[mol/l]
$C_{\text{HgX}_4eq}$	berechnete Konzentration an HgX <sub>4</sub> <sup>2-</sup> bei der Quecksilberkomplexierung im thermodynamischen Gleichgewicht	[mol/l]
$C_{\text{Kondensat}}$	Quecksilberkonzentration im Kondensat	[mg <sub>Hg</sub> /l]
$C_{\text{MeHg,AGW}}$	Arbeitsplatzgrenzwertkonzentration für organisch gebundenes Quecksilber	[µg <sub>Hg</sub> /m <sup>3</sup> <sub>i.N.tr.</sub> ]
$C_{\text{Ox}}$	Konzentration des Oxidationsmittels	[mol/l]
$C_{\text{Red}}$	Konzentration des Reduktionsmittels	[mol/l]
$C_{\text{Ref}}$	Referenzkonzentration	[mol/l]
$C_{\text{X-}}$	Halogenidkonzentration	[g <sub>x</sub> /l]
D	Anpassungskoeffizient 4 (Komplexierungsfunktion)	[-]
E	Erhöhungsfaktor	[-]
E <sub>0</sub>	Normalpotential bei Standardbedingungen	[V]
E <sub>1</sub>	Einzelnormpotential	[V]
E <sub>2</sub>	Einzelnormpotential	[V]
E <sub>m</sub>	Mischpotential	[V]
E <sup>H</sup>	Redoxpotential gegen NWE gemessen	[V]
E <sub>0</sub> <sup>H</sup>	Normalpotential des Redoxpaares auf NWE bezogen bei Standardbedingungen (ϑ= 25°C und a <sub>Ox</sub> = a <sub>Red</sub> = 1 mol)	[V]
F	Faradaykonstante F = 96 485 A·s/mol	[A·s/mol]
f	Aktivitätskoeffizient	[-]
H	Henry-Koeffizient	[-]
K	Gleichgewichtskonstante	[-]
$\dot{m}_{\text{Hg}}$	Massenstrom an Quecksilber	[mg/h]
M <sub>Hg</sub>	Molare Masse von Quecksilber	[g/mol]
M <sub>HgX<sub>2</sub></sub>	Molare Masse des Quecksilberhalogenids	[g/mol]

$m_{\text{aus\_Kondensat}}$	ausgetragene Menge an Quecksilber im Kondensat	[ $\mu\text{g}_{\text{Hg}}$ ]
$m_{\text{aus\_Messgas}}$	über die Gasphase erfasste Quecksilbermenge	[ $\mu\text{g}_{\text{Hg}}$ ]
$m_{\text{ein\_Messgas}}$	ins Messgerät insgesamt eingetragene Menge an Hg	[ $\mu\text{g}_{\text{Hg}}$ ]
$m_{\text{Hg}}$	Masse des ausgetragenen Quecksilbers	[ $\mu\text{g}_{\text{Hg}}$ ]
$n$	Zahl (Mole) der bei der Redoxreaktion ausgetauschten Elektronen	[-]
$n_{\text{Fl\_HgCl}_2}$	molare $\text{HgCl}_2$ -Konzentration	[mol/l]
$p''$	Gleichgewichtsdampfdruck, allgemein	[bar]
$p_0''$	Gleichgewichtsdampfdruck bei einer Standardtemperatur $T_0$	[bar]
$p_{\text{Hg(II)\_gas}}''$	Gleichgewichtsdampfdruck des Quecksilbers in der Gasphase	[bar]
$p_{\text{HgX}_2\_gas}''$	Gleichgewichtsdampfdruck des Quecksilberhalogenids in der Gasphase	[bar]
$p_{\text{Gasuhr}}$	Druck an der Gasuhr	[bar]
$p_{\text{N}}$	Druck unter Normbedingung = 1013,5 mbar	[bar]
$Q$	Zusammensetzung des Systems	[-]
$R$	ideale Gaskonstante $R = 8,3144 \text{ V}\cdot\text{A}\cdot\text{s}/(\text{K}\cdot\text{mol})$	[ $\text{V}\cdot\text{A}\cdot\text{s}/(\text{K}\cdot\text{mol})$ ]
$S_{\text{X}_2\_H_2O}$	Löslichkeit des Halogens im reinen Wasser	[mg/mg]
$S_{\text{X}_2\_X}$	Löslichkeit des freien Halogens in halogenidhaltigen Lösungen	[mg/mg]
$t$	Zeit	[sec]
$T$	Kelvin-Temperatur	[K]
$T_0$	Standardtemperatur	[K]
$T_{\text{Gasuhr}}$	Temperatur an der Gasuhr	[K]
$T_{\text{N}}$	Temperatur unter Normbedingung = 273,15 K,	[K]
$T_{\text{S}}$	Siedetemperatur	[K]
$U_{\text{B}}$	Bezugspotential	[V]
$U_{\text{G}}$	gemessenen Redoxspannungen	[V]
$U_{\text{NWE}}$	Potential mit dem Bezug NWE	[V]
$\dot{V}$	Volumenstrom	[ $\text{m}^3_{\text{i.N.tr.}}/\text{h}$ ]
$\dot{V}_{\text{Fl}}$	Volumenstrom der eindosierten Flüssigkeit	[ml/min]

---

$\dot{V}_{\text{Messgerät}}$	Messgasstrom (über den Messgerätekühler gezogenen)	$[\text{m}^3_{\text{i.N.tr.}}/\text{h}]$
$\dot{V}_{\text{Modelgas}}$	Volumenstrom des Modelgases	$[\text{m}^3_{\text{i.N.tr.}}/\text{h}]$
$V''$	Gleichgewichtsvolumen	$[\text{m}^3]$
$V$	Volumen	$[\text{ml}]$
$V_{\text{Absorptionslg}}$	Volumen der Absorptionslösung	$[\text{ml}]$
$V_{\text{Kond\_theor}}$	theoretisch anfallende Menge an Kondensat	$[\text{ml}]$
$V_{\text{Kondensat}}$	Kondensatvolumen	$[\text{ml}]$
$V_{\text{Probe}}$	Probegasvolumen	$[\text{ml}]$
$X_{X\_3,4}$	negativer dekadischen Logarithmus der molaren Halogenidkonzentration in der Lösung	$[-]$
$X_{X\_3,5}$	relativer Halogenidüberschuss	$[\text{mol}_X/\text{mol}_{\text{Hg(II)}}]$
$Z$	Ladungszahl	$[-]$