

„Quecksilberemissionen aus Kohlekraftwerken in Deutschland – Stand der Technik der Emissionsminderung“

Dr. Barbara Zeschmar-Lahl

Inhaltsverzeichnis

Executive Summary	3
1. Toxikologie von Quecksilber und Methyl-Quecksilber	6
2. Internationales Quecksilberabkommen	8
3. Begrenzung von Quecksilberemissionen aus Kohlekraftwerken in den USA (Stand der Technik).....	8
3.1. Hintergrund	8
3.2. Die Regelung im Detail	9
3.3. Übertragbarkeit auf Deutschland	9
3.4. Einhaltung des US-amerikanischen Grenzwertes	11
3.5. Bedeutung für Europa und Deutschland.....	12
4. Beitrag der Kohlekraftwerke in Deutschland zur nationalen Quecksilberemissionsbilanz	15
5. Anwendung des Standes der Technik auf den deutschen Kohlekraftwerkspark – Konsequenzen und Regelungsbedarf.....	15
6. Quellennachweise.....	25

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1: Karte der 50 Kohlekraftwerke (16 Braunkohle- und 34 Steinkohlekraftwerke) in Deutschland mit einer Quecksilberemission von 10 kg oder mehr im Jahr 2012 (rot: Braunkohlekraftwerke, blau: Steinkohlekraftwerke; türkis: Anlage hielt US-Grenzwert (Betriebswert = 60 % des Grenzwertes) ein)	17
---	----

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1: Betriebswerte deutscher Kohlekraftwerke (Jahresmittelwert) verglichen mit den US-Grenzwerten für Kohlekraftwerke (30 Tage-Mittelwert).....	4
Tabelle 2: Neue US-Grenzwerte für existierende Kohlekraftwerke (Altanlagen) und die Umrechnung auf die in Deutschland üblichen Emissionskonzentrationen (lb/TBtu = US-pound/Trillion British thermal unit)	9
Tabelle 3: Quecksilberemissionen in die Luft nach Sektoren für Deutschland im Jahre 2011 gemäß PRTR [eigene Auswertung].....	15
Tabelle 4: Emissionen von Quecksilber in kg in <u>2012</u> in Betrieben der Energiewirtschaft – hier: <u>Braunkohle</u> kraftwerke – nach PRTR sowie Emissionskonzentration und Emissionsfracht p.a. bei Einhaltung des US-Grenzwertes (Betriebswert = 2,46 µg Hg/Nm ³ entsprechend 60 % des Grenzwertes i.H.v. 4,1 µg Hg/Nm ³) Gelb: Kraftwerk erfüllt US-Betriebsgrenzwert, (eigene Berechnungen).....	18
Tabelle 5: Emissionen von Quecksilber in kg in <u>2011</u> in Betrieben der Energiewirtschaft – hier: <u>Braunkohle</u> kraftwerke – nach PRTR sowie Emissionskonzentration und Emissionsfracht p.a. bei Einhaltung des US-Grenzwertes (Betriebswert = 2,46 µg Hg/Nm ³ entsprechend 60 % des Grenzwertes i.H.v. 4,1 µg Hg/Nm ³), Gelb: Kraftwerk erfüllt US-Betriebsgrenzwert, (eigene Berechnungen).....	19
Tabelle 6: Emissionen von Quecksilber in kg in <u>2012</u> in Betrieben der Energiewirtschaft – hier: <u>Steinkohle</u> kraftwerke – nach PRTR sowie Emissionskonzentration und Emissionsfracht p.a. bei Einhaltung des US-Grenzwertes (Betriebswert = 0,84 µg Hg/Nm ³ entsprechend 60 % des Grenzwertes i.H.v. 1,4 µg Hg/Nm ³), Gelb: Kraftwerk erfüllt US-Betriebsgrenzwert, (eigene Berechnungen).....	20
Tabelle 7: Emissionen von Quecksilber in kg in <u>2011</u> in Betrieben der Energiewirtschaft – hier: <u>Steinkohle</u> kraftwerke – nach PRTR sowie Emissionskonzentration und Emissionsfracht p.a. bei Einhaltung des US-Grenzwertes (Betriebswert = 0,84 µg Hg/Nm ³ entsprechend 60 % des Grenzwertes i.H.v. 1,4 µg Hg/Nm ³), Gelb: Kraftwerk erfüllt US-Betriebsgrenzwert (eigene Berechnungen).....	22

Executive Summary

Die Kurzstudie zeigt, dass von den heutigen Quecksilber-Emissionen in die Umwelt erhebliche Gesundheitsrisiken ausgehen. Betroffen sind insbesondere schwangere Frauen und in weiterer Folge Föten, Säuglinge und Kleinkinder. Die Aufnahme des besonders problematischen Methyl-Quecksilbers (MeHg) findet hauptsächlich über den Fischverzehr statt. MeHg wird in der Biosphäre durch (mikro-)biologische Prozesse aus Quecksilber gebildet und reichert sich in den Nahrungsnetzen an. An deren Endpunkten – Raubfische, marine Raubsäugetiere und auch der Mensch – sind dann die höchsten Konzentrationen im Körper nachzuweisen. Um die Belastung des Menschen mit Methylquecksilber zu minimieren, wäre eine Verringerung des Konsums von Fischen [und in betroffenen Bevölkerungsgruppen auch von marinen Säugetieren] eine mögliche Maßnahme. Dies ist aber aus verschiedenen Gründen wenig praktikabel. Zudem ist auch die positive Seite des Fischverzehrs für die menschliche Ernährung einzubeziehen [1]. Nicht zuletzt auch aus diesem Grund muss dringend der Eintrag von Quecksilber in jedweder Form in die Umwelt beendet bzw. zumindest erheblich minimiert werden.

In Deutschland stammte die Hauptemissionsfracht an Quecksilber (rund 70 %) in den Jahren 2010 bis 2012 aus dem Energiesektor, vor allem von den mit Braun- oder Steinkohle befeuerten Kraftwerken. In Deutschland waren in 2012 insgesamt 69 große Kraftwerke (> 100 MW) in Betrieb, die entweder nur mit Kohle (Steinkohle: n = 46, Braunkohle: n = 15) oder zusätzlich mit Erdgas, Heizöl und/oder Abfall (n = 8) befeuert wurden. **Acht (2012) bzw. neun (2011) Braunkohle-Großkraftwerke** mit Jahresemissionen von jeweils mehreren Hundert Kilogramm Quecksilber **waren für mehr als 60 % der Quecksilberemissionen des Energiebereichs (2012: 61%; 2011: 64%) bzw. gut 40 % der Gesamtemissionen an Quecksilber in Deutschland verantwortlich.**

Dabei dürften die Emissionsmengen des Energiebereichs eher zu niedrig angesetzt sein. So werden die jährlichen Emissionen an Quecksilber im Schadstofffreisetzung- und -verbringungsregister veröffentlicht. Die daraus errechneten Quecksilberemissionen aus Kraftwerken in die Luft stellen eher die Untergrenze dar, denn es gibt eine ganze Reihe von Kohlekraftwerken (und anderen Verbrennungsanlagen im Energiesektor), deren Jahresemissionen an Quecksilber unter der Meldeschwelle von 10 kg Hg/a liegen¹. Für 2012 etwa führt das PRTR 136 Verbrennungsanlagen > 50 MW mit der Haupttätigkeit Elektrizitätserzeugung. Bei 44 von ihnen lagen die Quecksilberemissionen in die Luft oberhalb der Deklarationsschwelle, d.h. die 92 anderen Anlagen haben jeweils weniger als 10 kg Hg im Jahr in die Luft emittiert.

In den USA hat der Gesetzgeber 2012 aufgrund der beschriebenen Gesundheitsrisiken und den daraus resultierenden drohenden volkswirtschaftlichen Schäden gehandelt und die zulässigen Emissionsgrenzwerte für Quecksilber für Kohlekraftwerke drastisch abgesenkt. Diese US-amerikanischen Grenzwerte für Kraftwerke betragen – auf die in Deutschland verwendeten Einheiten umgerechnet – 1,4 µg/Nm³ (N = Normzustand, trocken, 6 % O₂) für

¹ Dazu zählen auch Großanlagen wie z.B. in 2012 das HKW Altbach/Deizisau oder das Kohlekraftwerk Ibbenbüren.

Steinkohle- und $4,1 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ für Braunkohlekraftwerke (jeweils Mittelwert über 30 Tage). Sie liegen damit deutlich unter den deutschen Grenzwerten von $30 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ im Tagesmittel und (ab 2019 für bestehende Anlagen geltend) von $10 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ im Jahresmittel.

Die Studie zeigt, dass diese niedrigen US-Grenzwerte bereits heute von über 100 US-Kohlekraftwerken im Routinebetrieb eingehalten werden. Bis 2016 werden alle Kohlekraftwerke der USA diese Grenzwerte einhalten müssen. Die Technologie zur Quecksilberabscheidung, die in Deutschland entwickelt und patentiert wurde, ist daher Stand der Technik und wird auch als wirtschaftlich zumutbar angesehen.

Die Studie zeigt außerdem, dass von den 52 deutschen Kohlekraftwerken mit meldepflichtiger Quecksilberemission (d.h. 10 kg Hg/a und mehr) in 2011 lediglich zwei (ein Braunkohle- und ein Steinkohlekraftwerk) die US-Grenzwerte sicher eingehalten hätten. In 2012 wäre dies sogar nur einem einzigen Kohlekraftwerk (Steinkohle) von 50 meldepflichtigen Kohlekraftwerken gelungen (siehe Tabelle 1). Um einen Grenzwert sicher einzuhalten, werden Anlagen mit einem Betriebswert gefahren, der in der Regel mit einem ausreichenden Sicherheitsabstand unter dem Grenzwert liegt. Setzt man jeweils 60 % des US-Grenzwertes als langfristigen mittleren Betriebswert an und vergleicht diese Werte mit den realen Emissionen (berechnet aus PRTR-Angaben), so hätten hierzulande – **würde der deutsche Gesetzgeber die strengen US-Grenzwerte auch bei uns einführen – rund 50 Kohlekraftwerke unmittelbar (2012: 49, 2011: 50) vom Netz gehen müssen**, sofern sie ihre Abgasreinigung nicht anpassen und/oder auf Quecksilber-arme Kohle umsteigen würden.

Tabelle 1: Betriebswerte deutscher Kohlekraftwerke (Jahresmittelwert) verglichen mit den US-Grenzwerten für Kohlekraftwerke (30 Tage-Mittelwert)

	Braunkohlekraftwerke		Steinkohlekraftwerke	
Emissionsgrenzwert USA (umgerechnet)	$4,1 \mu\text{g Hg}/\text{Nm}^3$		$1,4 \mu\text{g Hg}/\text{Nm}^3$	
Mittlerer Betriebswert von 60 % zwecks sicherer Einhaltung des Grenzwertes	$2,46 \mu\text{g Hg}/\text{Nm}^3$		$0,84 \mu\text{g Hg}/\text{Nm}^3$	
	2012	2011	2012	2011
Kraftwerke in Deutschland in Betrieb ¹	16	16	34	36 (+2) ²
davon				
• Einhaltung des Betriebswertes von 60 % des Grenzwertes	0	1	1	1

¹ Mit einer Quecksilberemission in die Luft von 10 kg oder mehr pro Jahr laut PRTR

² Zwei Werke ohne Angaben zur CO_2 -Emission, Umrechnung auf Emissionskonzentration daher nicht möglich

Durch Einführung und Einhaltung der US-Grenzwerte für Kohlekraftwerke ($4,1 \mu\text{g Hg}/\text{Nm}^3$ für Braunkohle- und $1,4 \mu\text{g Hg}/\text{Nm}^3$ für Steinkohlekraftwerke; Betriebswert = 60 % des Grenzwertes) **in Deutschland würden sich die Quecksilberemissionen hier aus dieser Quelle um über die Hälfte (2012: -52 %, 2011: -51 %) reduzieren lassen.**

Die Bundesregierung verweigert bisher die Konkretisierung des Standes der Technik und die erforderliche Vorsorge gegenüber den genannten Risikogruppen. Sie begründet ihre

Untätigkeit mit Verweis auf die EU und stützt sich toxikologisch auf unzureichende Grundlagen. Gerade als Kohleland wäre für Deutschland eine Vorreiterrolle angezeigt.

Die Untersuchung zeigt tabellarisch für jedes Kohlekraftwerk, das im Jahr mindestens 10 kg Quecksilber emittiert hat, welche Quecksilbermengen jeweils in den Jahren 2011 und 2012 in die Luft emittiert worden sind. Die Werte für 2012 sind zudem auf einer Karte grafisch dargestellt.

1. Toxikologie von Quecksilber und Methyl-Quecksilber

Quecksilber (Hg) ist ein Metall und kann, da es ein Element ist, weder chemisch oder biologisch abgebaut noch anderweitig zerstört werden. Es ist persistent und ändert lediglich seine Erscheinungs- oder Bindungsform. Es gelangt über natürliche, aber mehr noch über anthropogene Quellen in die Umwelt. Dort hat sich – wie bei anderen Metallen auch – im Laufe der Zeit ein „globaler Pool“ an Quecksilber aufgebaut, aus dem es kontinuierlich mobilisiert, verstoffwechselt (metabolisiert), abgelagert und wieder remobilisiert wird [2].

Quecksilber kann – insbesondere in Form bestimmter organischer Quecksilberverbindungen – beim Menschen auch schon in geringen Konzentrationen zu physischen Schädigungen führen. Organische Quecksilberverbindungen werden zum einen synthetisch hergestellt. Sie wurden und werden teilweise noch u.a. als Konservierungsmittel in Impfstoffen, Arzneimitteln, Pflanzemitteln und Kosmetika oder als Wirkstoff (Fungizid) gegen Schimmelpilze in Holzschutz- und Saatgutbehandlungsmitteln („Beizen“) eingesetzt. Über den Abgas-, Abwasser- oder Abfallpfad gelangen diese Verbindungen dann in die Umwelt.

Zum anderen werden organische Quecksilberverbindungen auch auf „natürlichem“ (biologischen) Weg gebildet. Viele in Böden und Sedimenten vorkommende Mikroorganismen sind zur sogenannten Biomethylierung in der Lage. D.h. sie können eine oder mehrere Methylgruppen ($-CH_3$) mit Quecksilber (und anderen Metallen und Halbmetallen) chemisch verknüpfen. Die gebildeten Methylquecksilberverbindungen – vor allem Monomethylquecksilber (CH_3Hg^+ , MeHg) und Dimethylquecksilber ($CH_3-Hg-CH_3$) – sind gut fettlöslich. Sie können so leicht über die Membranen der Mikroorganismen in die Umwelt abgegeben werden, wo sie dann von anderen Organismen aufgenommen und größtenteils gespeichert werden. Innerhalb des marinen Nahrungsnetzes findet dann eine schrittweise weitere Anreicherung der organischen Quecksilberverbindungen in Lebewesen statt. Vor allem die Endglieder der Nahrungsnetze wie ältere, größere Raubfische (Hai, Schwertfisch, Thunfisch, Hecht) und marine Säugetiere können besonders hohe Quecksilberbelastungen erreichen. Nach Bunke (2007) [3] erhöht sich der Anteil von Monomethylquecksilber am Gesamtquecksilber von $< 1\%$ bis zu etwa 10% auf der Ebene des Phytoplanktons und erreicht annähernd 100% auf der Ebene der Fische und marinen Säugetiere.

Am Ende des marinen Nahrungsnetzes steht auch der Mensch. So erfolgt die Belastung des Menschen mit MeHg hauptsächlich (60 bis 80%) über den Verzehr von Fischen. Menschen, die häufig Fisch verzehren, weisen sehr hohe MeHg-Werte im Körper auf. MeHg wirkt beim Menschen auf das Nervensystem und schädigt insbesondere das sich entwickelnde menschliche Gehirn. Daher sind insbesondere Föten, Säuglinge und Kleinkinder besonders gefährdet. Nach UNEP [4] kann eine erhöhte MeHg-Belastung in der frühkindlichen Entwicklungsphase zu verschiedenen neurologischen Schäden führen, die sich in Symptomen wie geistiger Behinderung, Krampfanfällen, Seh- und Hörverlust, verzögerter Entwicklung, Sprachstörungen und Gedächtnisverlust äußern.

Vor dem Hintergrund dieser Erkenntnisse wurden in der letzten Dekade die Grenzwerte für die zulässige Aufnahme an Quecksilber gesenkt, insbesondere um die Föten zu schützen. Die

wichtigste Kenngröße ist die tägliche Aufnahmemenge, oberhalb derer man von einem Gesundheitsrisiko für Schwangere bzw. Föten ausgehen muss. Der Wert selbst markiert die Grenze, unterhalb der man von keinem oder einem vertretbar geringen Risiko ausgehen muss. Die Einheit dieses Wertes ist Mikrogramm (μg) MeHg, die pro Kilogramm Körpergewicht (kg) und Tag (d) neu aufgenommen wird. In Deutschland bzw. Europa wurde dieser Wert auf $0,23 \mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{d})$ ² festgelegt, während er in den USA bei $0,10 \mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{d})$ Tag liegt (oral Reference Dosis (RfD)). Begründet wird der US-amerikanische Wert wie folgt: „This value is based on human epidemiological studies that identified mercury-induced neuropsychological impairment as the critical effect“ [5].

Nun darf man diese Unterschiede der vertretbaren täglichen Aufnahmemengen nicht überbewerten. Die Werte wurden von wissenschaftlichen Gremien auf der Basis der gleichen wissenschaftlichen Primärdaten (epidemiologische Studien) abgeleitet, spiegeln aber einen unterschiedlichen Umgang mit Risiken wider. Die Konsequenz dieses numerischen Unterschiedes ist in der Praxis durchaus bedeutsam. So greift die Bundesregierung für ihre Bewertung auf eine Ausarbeitung des Bundesinstituts für Risikoforschung (BfR) zurück, nach der für die Allgemeinbevölkerung („Durchschnittsverzehrer“) der Wert für die tolerierbare tägliche Aufnahmemenge von $0,23 \mu\text{g MeHg}/(\text{kg}\cdot\text{d})$ nur zu 11 % ausgeschöpft würde (6). Für Vielverzehrer ergäbe sich eine Ausschöpfung von 34 %. Würde man den US-Wert zugrunde legen, käme man auf andere Werte (24 bzw. 79 %). Auch sollte berücksichtigt werden, wie die Werte berechnet werden. So wird bei den Vielverzellern für die beiden Lebensmittelgruppen, die am stärksten zur Aufnahme des betreffenden Schadstoffs beitragen, das 95-Perzentil des Verzehrs herangezogen, für die übrigen Lebensmittelgruppen dagegen der durchschnittliche Verzehr. Somit gibt es in der Gruppe der Vielverzehrer einzelne, die mehr des belasteten Lebensmittels verzehren als für die Risikoabschätzung herangezogen. Wie viel mehr das ist, ist offen, denn das 95-Perzentil ist ein Lageparameter, der nur besagt, dass 95 von 100 Werten unter diesem Wert liegen. Wendete man den US-Wert für die tolerierbare tägliche Aufnahmemenge von MeHg an, dürfte die Anzahl der Menschen, die sich im Risikobereich befinden, deutlich höher ausfallen.

Neben den Unterschieden bei der Auswahl des Risiko-Wertes sieht die Bundesregierung auch Unterschiede zwischen den USA und Deutschland, was die Bedeutung von Risikogruppen anbelangt. Mit Hinweis auf die Binnenfischer, die um die Großen Seen leben und sich schwerpunktmäßig von Fisch ernähren, hätte die US-Regierung Risikoszenarien konstruiert, die auf Europa nicht übertragbar seien.

Nun ist die Risikoanalyse in den USA nicht ausschließlich, noch nicht einmal schwerpunktmäßig, auf Binnenfischer um die Großen Seen ausgerichtet (siehe u.a. [7]). Und darüber hinaus sind in Europa bzw. Deutschland durchaus vergleichbare Risikogruppen mit Vielverzehrsgewohnheiten vorhanden (Nord- und Ostseeküste, Sport- und Berufsfischer, Pescetarier).

² PWTI-Wert (provisional tolerable weekly intake): $1,6 \mu\text{g}/\text{kg KG}$ und Woche entsprechend $0,23 \mu\text{g}/(\text{kg KG}\cdot\text{d})$

2. Internationales Quecksilberabkommen

Auf internationaler Ebene ist die im Oktober 2013 beschlossene Minamata-Konvention ein entscheidender Baustein, um die von Quecksilber ausgehenden Gesundheitsrisiken zu verringern. Gerade weil Quecksilber und auch Methyl-Quecksilber persistente Schadstoffe sind, können die Probleme nicht nur national gelöst werden. Grenzüberschreitende Prozesse spielen daher eine wichtige Rolle.

Quecksilberemissionen haben unterschiedliche Ursachen. Die mengenmäßig dominierende Ursache stellen auch international die Emissionen aus Kohlekraftwerken dar. Ziel der Minamata-Konvention ist die Reduzierung der weltweiten Emissionen. Und im Falle der Emissionen aus Punktquellen wie Kohlekraftwerken heißt es: „[...] controlling and, where feasible, reducing emissions of mercury and mercury compounds, often expressed as “total mercury”, to the atmosphere through measures to control emissions from the point sources“ [8].

Deutschland und die EU haben die Minamata-Konvention unterzeichnet. Gegenwärtig laufen die Bemühungen zur Ratifizierung der Konvention. Als erstes Land überhaupt haben die USA die Konvention ratifiziert. Dies macht deutlich, welche Bedeutung die USA, die ansonsten eher zögerlich beim Abschluss internationaler Konventionen sind, dem Thema Quecksilber beimessen.

Im Rahmen der Umsetzung der Konvention sind die Vertragsparteien dann verpflichtet, Minderungspläne zu erstellen und durchzuführen. Deutschland bzw. die EU werden daher, ähnlich wie andere Länder, einen Minderungsplan für die Emissionen aus Kohlekraftwerken vorlegen müssen. Dies wird zu einem Zeitpunkt der Fall sein, wo die Emissionsbegrenzungen in den USA deutlich unter denen Europas liegen (s.u.). Da beispielsweise China kürzlich sein Emissionsniveau auf jenes von Deutschland abgesenkt hat, wird es für Europa bzw. Deutschland sehr schwierig, international eine Vorreiterrolle zu spielen.

3. Begrenzung von Quecksilberemissionen aus Kohlekraftwerken in den USA (Stand der Technik)

3.1. Hintergrund

Die volkswirtschaftlichen Kosten der schleichenden Quecksilberbelastung sind erheblich und gefährden die US-amerikanische Wirtschaftskraft. Trasande et al. (2005) bezifferten die verminderte Produktivität der US-Wirtschaft, die aus dem Verlust der Intelligenz bei mehreren 100.000 Kindern jedes Jahr aus der MeHg-Belastung resultiert, auf 8,7 Milliarden US-\$. Davon entfallen allein rund 1,3 Milliarden US-\$ auf die US-amerikanischen Kraftwerke [9]: „Using national blood mercury prevalence data from the Centers for Disease Control and Prevention, we found that between 316,588 and 637,233 children each year have cord blood mercury levels > 5.8 µg/L, a level associated with loss of IQ. The resulting loss of intelligence causes diminished economic productivity that persists over the entire lifetime of these children. This lost productivity is the major cost of methyl mercury toxicity, and it amounts to \$8.7 billion annually (range, \$2.2–43.8 billion; all costs are in 2000 US\$). Of this total, \$1.3

billion (range, \$0.1–6.5 billion) each year is attributable to mercury emissions from American power plants. This significant toll threatens the economic health and security of the United States and should be considered in the debate on mercury pollution controls.“

Nicht zuletzt die drohenden ökonomischen Konsequenzen dürften dazu geführt haben, dass in den USA die zuständigen Behörden das gesundheitliche Risikopotenzial von Quecksilber bzw. Methyl-Quecksilber höher gewichteten als zuvor. So wurde in den letzten Jahren eine Reihe von Gesetzen erlassen, um die Emissionen an Quecksilber zu verringern. Da die Hauptquelle der Quecksilberemissionen (> 60 %) aus der Kohleverbrennung stammt, leistet die Reduzierung der Emissionen aus Kraftwerken einen wesentlichen Beitrag für diese Bemühungen.

3.2. Die Regelung im Detail

In den USA werden derzeit an 600 verschiedenen Standorten rund 1.100 Kraftwerksblöcke auf Kohlebasis betrieben. Hauptsächlich wird Steinkohle eingesetzt, Braunkohle spielt in den USA (im Unterschied zu Deutschland) nur eine untergeordnete Rolle. Der US-Gesetzgeber hat in 2012 mit dem Mercury and Air Toxics Standards (MATS) die einzuhaltenden Grenzwerte für Quecksilber und weitere Schadstoffe für alle Kohlekraftwerke drastisch verschärft, um die politisch gewollten Reduktionsziele zu erreichen (Emissionsminderung um 90%) [10]. Tabelle 2 zeigt diese Grenzwerte. Diese Grenzwerte sind bis 2016 einzuhalten. Gegenwärtig laufen in den USA auf allen Ebenen die Vorbereitungen, dieses Ziel auch zu erreichen.

Tabelle 2: Neue US-Grenzwerte für existierende Kohlekraftwerke (Altanlagen) und die Umrechnung auf die in Deutschland üblichen Emissionskonzentrationen (lb/TBtu = US-pound/Trillion British thermal unit³)

	US-Grenzwert (30 Tage-Mittelwert)	Umrechnung in einen Emissionskonzentrationsgrenzwert
Steinkohle	1,2 lb/TBtu (1,3 E-2 lb/GWh)	1,4 µg/m ³ i. N. tr. bei 6 Vol.-% O ₂
Braunkohle	4,0 lb/TBtu (4,0 E-2 lb/GWh)	4,1 µg/m ³ i. N. tr. bei 6 Vol.-% O ₂

3.3. Übertragbarkeit auf Deutschland

Im politischen Raum ist eine Diskussion darüber entstanden, ob die US-Grenzwerte überhaupt auf Deutschland übertragbar seien [11]. Dabei ist festzustellen, dass sich ein US-Quecksilber-Grenzwert vom deutschen Grenzwert nur durch die Art der Umrechnung unterscheidet.

In Deutschland wird die emittierte Quecksilbermenge auf das Abgasvolumen bezogen, d.h. die deutschen Emissionsgrenzwerte werden in Mikrogramm je Normkubikmeter (µg/Nm³)

³ BTU is the amount of heat required to increase the temperature of a pint of water (which weighs exactly 16 ounces) by one degree Fahrenheit. Since BTUs are measurements of energy consumption, they can be converted directly to kilowatt-hours (3412 BTUs = 1 kWh) or joules (1 BTU = 1,055.06 joules).

an trockenem Abgas angegeben (Abgasvolumen bei festgelegtem Standarddruck von 1 atm, Standardtemperatur von 0 °C und einem Sauerstoffgehalt von beispielsweise 6 Vol.-%). So beträgt der deutsche Emissionsgrenzwert bei Kohlekraftwerken für Quecksilber 30 µg/Nm³ im Tagesmittel und (ab 2019 für Altanlagen) 10 µg/Nm³ im Jahresmittel.

In den USA werden, wie Tabelle 2 zu entnehmen ist, andere Einheiten für die Begrenzung der Quecksilberemissionen verwendet, nämlich US-pound per Trillion British thermal unit (lb/TBtu). Hier wird die emittierte Quecksilberemissionsmenge nicht auf das Abgasvolumen bezogen, sondern auf den „Energie-Eintrag“ mit der Kohle, beschrieben durch ihren Brennwert (oberer Heizwert). Dieses US-amerikanische Grenzwertkonzept hat den Vorteil, dass die Emissionsbegrenzung unabhängig von der wechselnden Zusammensetzung der Kohlen ist.

Sowohl deutsche als auch US-amerikanische Messgeräte zur Überwachung der Emissionen messen zunächst die Quecksilberkonzentration im aktuellen Abgasvolumen. Während man in Deutschland dann von hier aus auf das Abgasvolumen im Normzustand (bei einem vorgegebenen Bezugssauerstoffgehalt) umrechnet, rechnet man in den USA auf die oben genannten energetischen Bezugsgrößen um; für letzteres benötigt man die Kohlezusammensetzung („Elementaranalyse“) und den am Messort vorliegenden Sauerstoffgehalt. Ein US-Grenzwert unterscheidet sich von einem deutschen Grenzwert nur durch die Art der Umrechnung; beides sind vergleichbare Rechengrößen, die hier wie dort auf Konzentrationsmessungen im Reingas zurückgehen (in Mikrogramm je Kubikmeter). Daher kann der US-Grenzwert mit den bekannten Grundrechenarten auch in Konzentrationswerte des Reingases umgerechnet und mit den in Deutschland vorhandenen Grenzwerten verglichen werden. Man muss den Brennwert und die Zusammensetzung der verfeuerten Kohlen ermitteln, daraus dann die Abgasmenge ermitteln, die bei der Verbrennung der Kohle entsteht, und bei der weiteren Umrechnung auch den Sauerstoffgehalt am Messort (Kamin) sowie den Bezugssauerstoffgehalt des deutschen Grenzwerts beachten.

Auf diesem Weg kommt für existierende Kraftwerke bei Verfeuerung von Steinkohlen am Ende ein US-Grenzwert von 1,4 Mikrogramm je Normkubikmeter und für Braunkohle ein höherer Grenzwert von 4,1 Mikrogramm je Normkubikmeter heraus – beides bei 6 Vol.-% Sauerstoff.

Der US-Grenzwert ist als Monatsmittelwert festgelegt, der über einen Zeitraum von 30 Tagen fortlaufend ermittelt wird („rolling average“) und nicht überschritten werden darf. Auch hier macht der Vergleich mit Deutschland kein Problem, denn ein Monatsmittelwert von 1,4 bzw. 4,1 µg/Nm³ ist ambitionierter als ein Jahresgrenzwert von 1,4 bzw. 4,1 µg/Nm³ und erst recht als ein Jahresgrenzwert von 10 µg/Nm³. Dieser ist in Deutschland gemäß Großfeuerungsanlagenverordnung (13. BImSchV § 30 (1) Pkt. 2) von bestehenden Anlagen erst ab dem 1. Januar 2019 einzuhalten.

Die Umrechnung des US-Grenzwertes wurde in der wissenschaftlichen Literatur mehrfach veröffentlicht [12, 13, 14], auch von den Sachverständigen des Umweltbundesamtes [15]

und vom Wissenschaftlichen Dienst des Deutschen Bundestages [16]. An der Richtigkeit dieser Berechnung kann daher nicht gezweifelt werden.

Während die Bundesregierung ursprünglich die US-Werte für nicht übertragbar hielt, weil die Einheiten verschieden seien, ist die neue Begründung messtechnischer Art: „Die Vergleichbarkeit emissionsbegrenzender Vorgaben erfordert die Kenntnis der messtechnischen Randbedingungen (insbesondere zulässige oder vorgeschriebene Messverfahren) sowie die Kenntnis der Konventionen, die der Beurteilung des gemessenen Wertes im Verhältnis zum einzuhaltenden Emissionsgrenzwert zugrunde liegen. Emissionsbegrenzende Vorgaben sind nicht durch bloße Gegenüberstellung der numerischen Werte vergleichbar“ [1]. Nun ist in der Tat die Kenntnis dieser eher messtechnischen Aspekte für eine Vergleichbarkeit von Bedeutung. Allerdings sind die Unterschiede zwischen den USA und Deutschland bezüglich der verwendeten Messgeräte nicht vorhanden. Zudem sind die Messgeräte in Deutschland ebenso zu kalibrieren, wie dies in den USA vorgeschrieben ist. Und der Vollzug der Luftreinhaltegesetze in den USA kann sich durchaus sehen lassen. Hier ist in den letzten Jahren in Deutschland eher eine gewisse Nachlässigkeit eingetreten [17].

3.4. Einhaltung des US-amerikanischen Grenzwertes

Kann der Grenzwert in den USA eingehalten werden? Aktuell (März 2014) werden in den USA über 100 Kraftwerke betrieben, die mit Hilfe von nachgerüsteter Abgasreinigungstechnologie den Grenzwert bereits heute einhalten. Rund zwei Drittel erreichen dies über Zugabe von Bromidsalzen und anschließender Abtrennung der erzeugten Quecksilberverbindungen [18]. Das letzte Drittel arbeitet mit der Eindosierung von Aktivkohle bzw. bromierter Aktivkohle und anschließender Abtrennung der Kohle. Das Verfahrensprinzip all dieser Techniken wurde in Deutschland erfunden [19]. An der termingerechten Umsetzung der gesetzlichen Anforderung bis 2016 wird nicht ernsthaft gezweifelt. Somit gilt der genannte Grenzwert für die USA für Altanlagen schon heute als Stand der Technik.

Die Bundesregierung weist zu recht darauf hin, dass mit der Abscheidung des Quecksilbers aus dem Abgasstrom die Gefahr einer Verlagerung in die Rückstände der Abgasreinigung verbunden ist [1]. Nun muss man abwägen. Das Emittieren in die Luft ist sicherlich das größte Übel. Wenn die Rückstände, angereichert mit Quecksilber, anschließend als Baustoff verwendet würden, so wäre dies, wenn Quecksilber im Gips fest eingebunden ist, schon eine gewisse Verbesserung der Gesamtsituation, aber man kann und sollte es noch besser machen. Als Stand der Technik wird in der Fachliteratur angesehen, dass persistente Schadstoffe wie Quecksilber aus dem Abgas abgeschieden, in Rückständen konzentriert, abgetrennt und in sichere letzte Senken überführt werden [20, 21, 22, 23, 24]. So werden auch in Deutschland in Feuerungsanlagen Verfahren eingesetzt, wo Quecksilbersalze mit Hilfe in die nasse Rauchgasreinigung eingebrachter Adsorptionsmittel gebunden und ausgeschleust werden [14, 25, 26, 27].

3.5. Bedeutung für Europa und Deutschland

Was bedeuten die niedrigen US-amerikanischen Grenzwerte nun für die deutsche bzw. europäische Situation? Bei einer so klaren Ausgangslage bezüglich

- gesundheitlicher Risiken,
- internationaler Verpflichtungen zur Emissionsreduzierung,
- der Kohlekraftwerke als Hauptenergie- und emissionsquelle sowie
- der bereits verfügbaren Minderungstechnologie

muss zunächst gefragt werden, ob es für den Gesetzgeber nicht eine Verpflichtung gibt, auch in Deutschland die Emissionen zu verringern.

Das deutsche Gesetz (BImSchG) definiert den Stand der Technik wie folgt: „*Stand der Technik* ist der Entwicklungsstand fortschrittlicher Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen, der die praktische Eignung einer Maßnahme zur Begrenzung von Emissionen in Luft, Wasser und Boden, zur Gewährleistung der Anlagensicherheit, zur Gewährleistung einer umweltverträglichen Abfallentsorgung oder sonst zur Vermeidung oder Verminderung von Auswirkungen auf die Umwelt zur Erreichung eines allgemein hohen Schutzniveaus für die Umwelt insgesamt gesichert erscheinen lässt.“ Man wird davon ausgehen müssen, dass die Technologie (Bromideinsatz, separates Ausschleusen der Hg-Salze) zur Reduzierung der Quecksilberemissionen auch für Deutschland verfügbar ist, nicht zuletzt auch, weil sie hier erfunden und eingeführt wurde. So wird das Verfahren in Deutschland bereits „an mehreren Abfallverbrennungsanlagen kommerziell genutzt, nämlich an vier Sonderabfall-Verbrennungsanlagen der CURRENTA GmbH & Co oHG sowie – unter Lizenz der Vosteen Consulting GmbH – an zwei Klärschlamm-Verbrennungsanlagen der Emschergenossenschaft GmbH (Zentrale Schlamm Entsorgung im Werk Bottrop, seit August 2004) und an zwei ähnlichen Anlagen des Tiefbauamts Karlsruhe (Klärwerk Neureut, seit November 2007).“ [19]

Zur Festlegung des „Standes der Technik“ gehört auch für den Gesetzgeber die Beachtung der Verhältnismäßigkeit. Kann die Technik rein faktisch eingesetzt werden? Dies ist unbedingt zu bejahen, weil die Kohlekraftwerkstechnik in den USA für die allermeisten Konfigurationen mit denen in Deutschland vergleichbar ist [28]. Dies schließt auch einzelne Fälle ein, bei denen eine Nutzung der beschriebenen Technologie auf Probleme stoßen kann.

Verbleibt die Frage der Kosten. Hier muss festgestellt werden, dass die Reduktion der Quecksilberemissionen auf das US-Niveau zwar Kosten verursacht, dass diese aber vermutlich vergleichsweise niedrig ausfallen dürften. So weisen Kohlekraftwerke in Deutschland – im Unterschied zu den USA – in der Regel eine hochwertigere Abgasreinigung für Staub und saure Schadgase auf. Daher können diese Techniken mit genutzt werden (co-benefit), um Quecksilber abzuscheiden. Damit dürften die Kosten für die Quecksilberabscheidung in den USA die möglichen Kosten in Deutschland übersteigen. Dies allein relativiert bereits das Kostenargument. Die Investitionskosten liegen, je nach Kraftwerksgröße und gewählter Technologie, bei unter einer oder wenigen Millionen Euro. Hierbei geht es um technische Geräte, die Stoffe der Kohle zumischen oder in den Abgasstrom eindüsen, und solche, die Quecksilber aus dem Wäscherwasser der Abgasreinigung abtrennen. Zusätzliche Betriebskosten fallen für die benötigten Chemikalien und das Deponieren des herausgefilterten Quecksilbers in Untertagedeponien an.

Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), welches innerhalb der Bundesregierung federführend für eine gesetzliche Absenkung der Grenzwerte wäre, hat jedoch trotz der vergleichsweise geringen Kosten bisher keine Bereitschaft erkennen lassen, aktiv zu werden.

Der abstrakte Begriff „Stand der Technik“ wird über Festlegungen des Gesetzgebers in Verwaltungsvorschriften und Verordnungen konkretisiert. Was sind die Rechtsfolgen, wenn der Gesetzgeber es versäumt, aktiv zu werden und eine augenscheinliche Lücke zwischen Stand der Technik im Gesetz und der technischen Wirklichkeit entsteht? Hat eine Genehmigungsbehörde oder hat der Nachbar eines Kraftwerkes oder hat die Allgemeinheit rechtlich die Möglichkeit, eine Reduzierung der Emissionen über die in der 13. BImSchV für Kohlekraftwerke festgelegten Grenzwerte (s.o.) hinausgehend zu erwirken?

Da diese Option vor den Gerichten landen wird, ist die Frage von Bedeutung, was die laufende Rechtsprechung zum Vorsorgegebot des § 5 Nr. 2 BImSchG entschieden hat. Das Vorsorgeprinzip stellt in gewisser Weise ein gesetzliches Korrektiv zu den eher auf Duldung von Beeinträchtigungen ausgelegten sonstigen Anforderungen des Immissionsschutzrechts dar. Die hier in Rede stehende Emission stellt hauptsächlich ein Risiko über den Ferntransport und die anschließende Aufnahme über die oben beschriebene Nahrungsnetze dar. Diesen Risiken kann „nur mit Maßnahme[n] der Vorsorge begegnet werden; sie sollen unabhängig von den geltenden Schädlichkeitsgrenzen das an Umweltqualität durchsetzen, was im Hinblick auf ein vorhandenes Potential an **Vermeidungstechnologie** realisierbar erscheint (§ 5 Nr. 2 i. V. mit § 3 Abs. 6).“ – so das Bundesverwaltungsgericht in einem Urteil von 1984 [29, 30].

Sind aber die US-Grenzwerte (1,4 bzw. 4,1 µg Hg/Nm³ Abgas im Monatsmittel) von einem deutschen Gericht überhaupt zu beachten? Zu ausländischen Grenzwerten bzw. Technologien urteilte das Bayerische Oberverwaltungsgericht [31] im Jahr 2012: „Ob sich die Maßnahme in demselben Fachbereich oder unter vergleichbaren Verhältnissen in einer anderen Branche bewährt hat, beurteilt sich nicht ausschließlich nach dem inländischen Entwicklungsstand. Unter dem Aspekt der praktischen Eignung sind auch im Ausland gewonnene Erfahrungen selbstverständlich zu berücksichtigen (BVerwG vom 4.8.1992, Az. 4 B 150/92 RdNr. 4; auch NdsOVG vom 3.5.2000, NVwZ 2000, 1194/1195). Eine funktionsadäquate Übertragung von praktisch bewährten Minderungstechnologien darf lediglich nicht durch betriebstechnische Besonderheiten ausgeschlossen sein (BVerwG vom 30.8.1996 Az. 7 VR 2/96 RdNr. 20).“

Die nächste, entscheidende Frage lautet: Sind Technologien zur Quecksilberabscheidung verfügbar? Ein wichtiges Indiz dafür, dass die praktische Eignung gesichert ist, dürfte der Nachweis sein, dass die Maßnahme bereits mit Erfolg in einem Betrieb erprobt worden ist [32]. Da dies in den USA aktuell für viele Kraftwerke mit mehr oder weniger identischer Kraftwerks- und Abgasreinigungstechnologie der Fall ist, kann man diesen Aspekt auch klar mit „Ja“ beantworten.

Aber wäre es verhältnismäßig, einem Kohlekraftwerk aufzugeben, den US-Grenzwert einzuhalten? Denn es reicht nicht aus, dass die Behörde darauf verweist, dass im Kraftwerk A eine Minderungstechnik erfolgreich eingesetzt wird. Es müsse zugleich die wirtschaftliche Eignung für den durchschnittlichen Betreiber solcher Anlagen feststehen [33].

Vorsorgemaßnahmen haben ihre Begrenzung im Grundsatz der Verhältnismäßigkeit. Je größer das Besorgnispotenzial ist, das von den Emissionen ausgeht, umso eher sind Vorsorgemaßnahmen durchsetzbar. Entscheidend hierbei ist der wissenschaftliche Erkenntnisstand, der das Besorgnispotenzial erfasst [34]. Daher sind die im Abschnitt 1 dargestellten Defizite bei der Beschreibung der toxikologischen Erkenntnisse in Deutschland bzw. Europa gegenüber den Erkenntnissen in den USA von Bedeutung.

„Die immissionsschutzrechtliche Schutzpflicht als Instrument der Gefahrenabwehr greift ein, wenn die hinreichende Wahrscheinlichkeit eines Schadenseintritts besteht. Sie dient der Abwehr erkannter Gefahren und der Vorbeugung gegenüber künftigen Schäden, die durch solche Gefahren hervorgerufen werden können. Ob Umwelteinwirkungen im Einzelfall geeignet sind, Gefahren herbeizuführen, unterliegt der verwaltungsgerichtlichen Prüfung (BVerwGE 55, 250 <253>). Eine Gefahr liegt nach der klassischen Begriffsdefinition dort vor, wo „aus gewissen gegenwärtigen Zuständen nach dem Gesetz der Kausalität gewisse andere Schaden bringende Zustände und Ereignisse erwachsen werden (PrOVG, Urteil vom 15. Oktober 1894, PrVBl 16, 125 <126>)“ [35]– so bereits Ende des 19. Jahrhunderts das Königlich-Preußische Oberverwaltungsgericht. Man wird diesen Umstand allein schon deshalb bejahen können, wenn man sich auf die Begründungstexte zur kürzlich auch von Deutschland unterzeichneten Minamata-Konvention beruft (Kapitel 2). So gibt es laut UNEP [4] auch Hinweise darauf, dass bei erhöhter MeHg-Belastung bei Kindern eher ein Aufmerksamkeitsdefizitsyndrom (ADHS) diagnostiziert wird: „Mercury can seriously harm human health, and is a particular threat to the development of fetuses and young children. ... Scientists recently concluded that children with higher levels of contamination are more likely to be diagnosed with attention deficit hyperactivity disorder (Boucher et al., 2012 [36]).

Insgesamt ist es daher sowohl rechtlich als auch tatsächlich geboten (siehe auch § 27 Abs. 1 der 13. BImSchV), den deutschen Kraftwerkspark an der Einhaltung der US-Grenzwerte für Kohlekraftwerke zu messen.

Politisch fühlt man sich in Europa ob der Diskrepanz der Quecksilberemissionen zu den USA wohl doch nicht so ganz wohl. Dies legt der aktuelle Vorstoß der EU-Kommission nahe, die Quecksilberemissionen von Kohlekraftwerken im Rahmen der Aktualisierung des BVT-Merkblattes für Großfeuerungsanlagen von 2006 stärker zu begrenzen [37]. Neue Kraftwerke sollen dann $2 \mu\text{g Hg}/\text{m}^3$ (Steinkohle) bzw. $5 \mu\text{g Hg}/\text{m}^3$ (Braunkohle) im Jahresmittel einhalten. Für bestehende Anlagen will die EU allerdings lediglich Emissionsbandbreiten festlegen. Für Steinkohlekraftwerke mit über 300 MW Feuerungswärmeleistung sollen die Betriebswerte zwischen $0,2 \mu\text{g}$ und $6 \mu\text{g Hg}/\text{m}^3$ und für kleinere Anlagen zwischen 1 und $10 \mu\text{g Hg}/\text{m}^3$ im Jahresmittel liegen. Die Betriebswerte der Braunkohlekraftwerke sollen hingegen 1 bis $10 (> 300 \text{ MW FWL})$ bzw. 2 bis $20 \mu\text{g Hg}/\text{m}^3 (<$

300 MW FWL) betragen dürfen [38, dort Tabelle 10.8]. Ein Betriebswert von $6 \mu\text{g Hg}/\text{m}^3$ würde grob einem Grenzwert von $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ entsprechen (wenn Betriebswert = 60 % vom Grenzwert), ein Betriebswert von $20 \mu\text{g Hg}/\text{m}^3$ sogar einem Grenzwert von $33 \mu\text{g Hg}/\text{m}^3$.

Wenn schon ein Grenzwert von $10 \mu\text{g Hg}/\text{m}^3$ im Jahresmittel völlig unzureichend ist, dann sind es Betriebswerte in dieser Höhe umso mehr. Dieser Vorstoß der EU eröffnet der Bundesregierung aber die Chance, für eine Absenkung der Emissionen auf das US-Niveau einzutreten.

4. Beitrag der Kohlekraftwerke in Deutschland zur nationalen Quecksilberemissionsbilanz

Tabelle 3 zeigt den Beitrag verschiedener industrieller Branchen zu den bundesweiten Quecksilberemissionen in den letzten drei Jahren. Demnach war der Energiesektor mit rund 70 % aller Quecksilberemissionen in die Luft in Deutschland mit Abstand dominierend.

Tabelle 3: Quecksilberemissionen in die Luft nach Sektoren für Deutschland im Jahre 2011 gemäß PRTR [eigene Auswertung]

Haupttätigkeit (Sektor)	Hg-Emissionsfracht in die Luft [kg]			Anteil		
	2010 [39]	2011	2012	2010	2011	2012
Energie	5.280	4.952	5.195	70%	70%	71%
Stahl/Eisen/Metalle	711	745	877	9%	11%	12%
Mineralische Industrie	668	788	779	9%	11%	11%
Chemische Industrie	578	496	441	8%	7%	6%
Abfallverbrennungsanlagen	237	40	35	3%	1%	0%
Papier- und Zellstoffherstellung	67	33	0	1%	0%	0%
Summe	7.541	7.055	7.327	100%	100%	100%

5. Anwendung des Standes der Technik auf den deutschen Kohlekraftwerkspark – Konsequenzen und Regelungsbedarf

Laut europäischer PRTR-Verordnung (Pollutant Release and Transfer Register) müssen Energieerzeuger und andere größere Schadstoffemittenten ihre Emissionen an Quecksilber und anderen Schadstoffen, sofern diese definierte Schwellen übersteigen, jährlich den Behörden melden. Diese Daten werden dann im Schadstofffreisetzungs- und -verbringungsregister (online für Deutschland: <http://www.thru.de>) veröffentlicht. Quecksilberemissionen in die Luft sind dabei erst ab einem Schwellenwert von 10 kg pro Jahr und Betrieb anzugeben.

Die deutschen PRTR-Daten für 2011 wurden am 31.3.2013 veröffentlicht, die Daten für 2012 wurden Anfang April 2014 publiziert.

Für 2012 (in Klammern: Werte für 2011) weist das deutsche PRTR eine Freisetzung aus dem Energiesektor (Haupttätigkeit) von 50 (54) Anlagen in die Luft von 5.195 (4.952) kg

Quecksilber aus. Die acht (neun) größten Emittenten der Energiewirtschaft 2012 (2011) – alles Braunkohlekraftwerke – haben in Summe 3.184 (3.174) kg Quecksilber freigesetzt, was 61 (64) % der Emissionen des Energiesektors und 43 (45) % der Gesamtemission des Jahres 2012 (2011) entspricht.

Die angegebenen Quecksilberemissionen aus Kraftwerken in die Luft stellen eher die Untergrenze dar, denn es gibt eine ganze Reihe von Kohlekraftwerken (und anderen Verbrennungsanlagen im Energiesektor), deren Jahresemissionen an Quecksilber unter der Meldeschwelle von 10 kg Hg/a liegt. Für 2012 etwa führt das PRTR 122 Verbrennungsanlagen > 50 MW mit der Haupttätigkeit Elektrizitätserzeugung. Bei 44 von ihnen lagen die Quecksilberemissionen in die Luft oberhalb der Deklarationsschwelle, d.h. die 78 anderen Anlagen haben jeweils weniger als 10 kg Hg in die Luft emittiert.

Angaben im PRTR zu den Emissionsfrachten für 2013 werden erst im März 2015 zur Verfügung stehen. Laut Umweltbundesamt waren im Jahr 2013 bundesweit 71 Kraftwerke ab 100 MW elektrische Leistung mit insgesamt 122 Kraftwerksblöcken in Betrieb, die entweder nur mit Kohle (Steinkohle: n = 48, Braunkohle: n = 15) oder zusätzlich mit Erdgas, Heizöl und/oder Abfall (n = 8) befeuert wurden [40]. Davon gingen zwei mit Steinkohle befeuerte Anlagen – Duisburg-Walsum 10 und Lünen-Stummhafen – erst in 2013 in Betrieb. Zehn dieser 71 Anlagen waren keine konventionellen Kohlekraftwerke, sondern Industriekraftwerke und sogenannte Sammelschienenanlagen⁴ sowie ein Restmüll-Heizkraftwerk und ein Chemiewerk mit Verbrennungsanlage im Nebenbetrieb.

Die folgenden Tabellen zeigen die Jahresemissionen an Quecksilber laut PRTR in den Jahren 2011 und 2012. Aus den im PRTR ebenfalls angegebenen CO₂-Emissionen wurde der Abgasvolumenstrom mit 6 % O₂ (unter Berücksichtigung eines Luftüberschuss-Wertes Lambda von rund 1,4 nach Günther [41]) bestimmt. Daraus wurde dann die mittlere Konzentration an Quecksilber im Abgas des jeweiligen Kohlekraftwerks berechnet.

Die gesamte Jahresemissionsfracht lag in 2012 (2011) bei rund 5.200 kg (5.000 kg). Man erkennt hier, welche Bedeutung insbesondere die Braunkohlekraftwerke für die Quecksilbergesamtemission haben.

Bei Einhaltung der US-Grenzwerte würden sich diese Emissionen deutlich verringern. Setzt man jeweils 60 % des US-Grenzwertes als Betriebswert an, so ergibt sich für Braunkohlekraftwerke (Betriebswert 2,46 µg Hg/Nm³) in 2012 (2011) eine Reduktion um 41 % (42 %). Für Steinkohlekraftwerke (Betriebswert 0,84 µg Hg/Nm³) würde sich in 2012 (2011) eine Reduzierung um 77 % (75 %) ergeben.

Durch eine Senkung der Emissionsgrenzwerte nach US-amerikanischem Vorbild würde sich der jährliche Quecksilbereintrag aus Kohlekraftwerken in Summe etwa halbieren lassen (2012: -52 %, 2011: -51 %).

⁴ Hier speisen mehrere Kessel ihren Dampf in eine Dampf-Sammelschiene ein, aus der wiederum mehrere Turbinen versorgt werden können.

Abbildung 1: Karte der 50 Kohlekraftwerke (16 Braunkohle- und 34 Steinkohlekraftwerke) in Deutschland mit einer Quecksilberemission von 10 kg oder mehr im Jahr 2012 (rot: Braunkohlekraftwerke, blau: Steinkohlekraftwerke; türkis: Anlage hielt US-Grenzwert (Betriebswert = 60 % des Grenzwertes) ein).

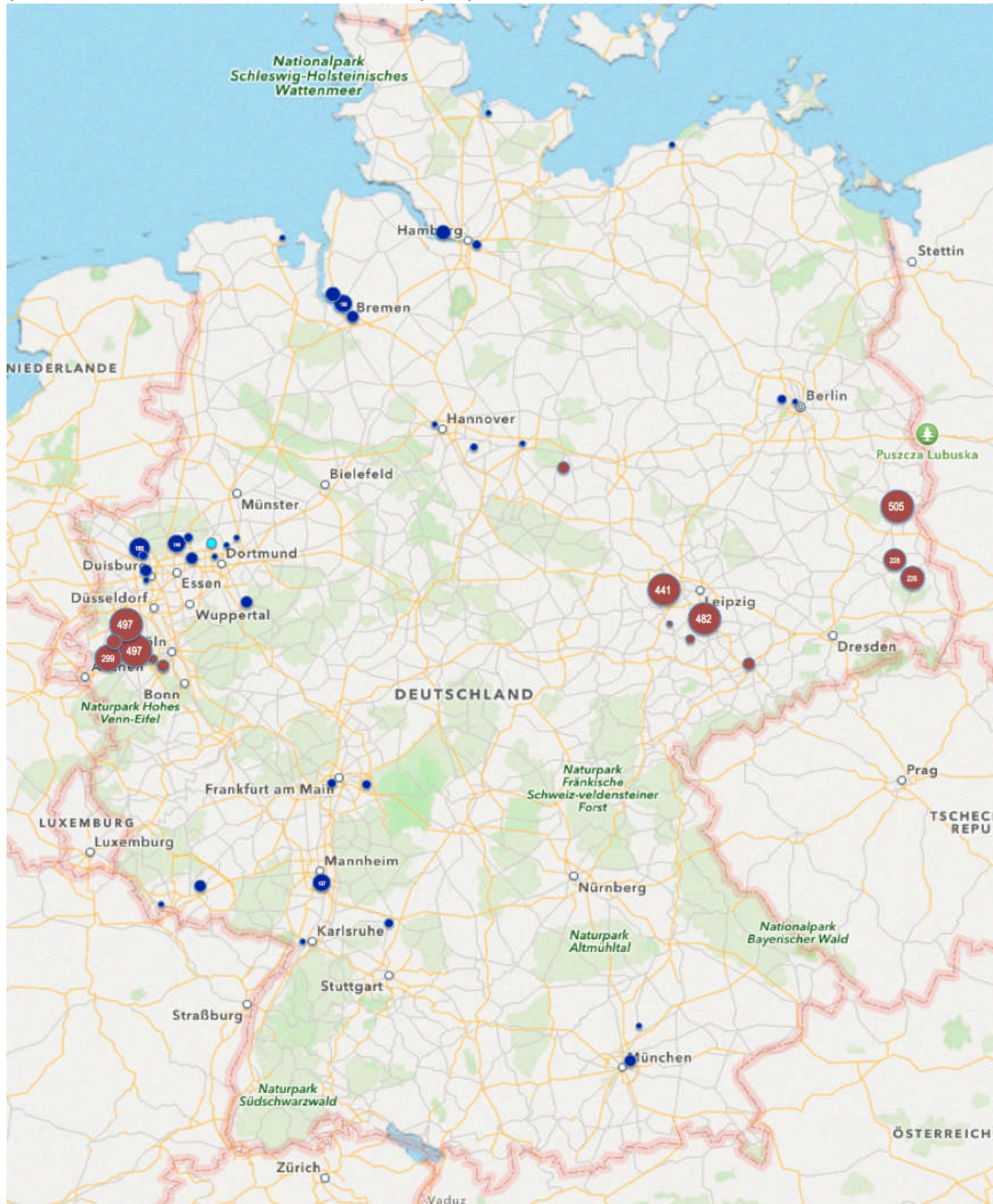


Tabelle 4: Emissionen von Quecksilber in kg in 2012 in Betrieben der Energiewirtschaft – hier: Braunkohlekraftwerke – nach PRTR sowie Emissionskonzentration und Emissionsfracht p.a. bei Einhaltung des US-Grenzwertes (Betriebswert = 2,46 µg Hg/Nm³ entsprechend 60 % des Grenzwertes i.H.v. 4,1 µg Hg/Nm³), Gelb: Kraftwerk erfüllt US-Betriebsgrenzwert, (eigene Berechnungen)

Name des Betriebs	Adresse	Land	Hg in kg lt. PRTR	Hg in µg/Nm ³	Emission (kg Hg/a) bei Einhaltung US-Grenzwert
E.ON Kraftwerke GmbH - Kraftwerk Schkopau	06258 Korbetha	LSA	441	21,25	71,5
Vattenfall Europe Generation AG Kraftwerk Lippendorf	04564 Böhlen	SN	482	12,09	137,3
Heizkraftwerk Nord II	09114 Chemnitz	SN	47,2	10,93	14,9
MIBRAG Mumsdorf ¹	06729 Elsteraue	LSA	36,3	10,85	11,5
RWE Power AG Kraftwerk Goldenberg	50354 Hürth	NRW	49,5	8,18	20,9
E.ON Kraftwerke GmbH Kraftwerk Buschhaus	38364 Schöningen	NS	60,8	7,55	27,7
RWE Power AG-Fabrik Fortuna Nord	50129 Bergheim	BRW	18,7	6,64	3,3
RWE Power AG-Fabrik Frechen	50226 Frechen	NRW	36,1	5,82	21,4
MIBRAG Deuben	06682 Teuchern / OT Deuben	LSA	17,1	5,74	10,3
Vattenfall Europe Generation AG Kraftwerk Jänschwalde	03185 Peitz	BRB	505	5,52	315,3
Kraftwerk Schwarze Pumpe	03130 Spremberg	BRB	228	4,90	160,2
RWE Power AG Kraftwerk Niederaußem	50129 Bergheim	NRW	497	4,83	354,7
RWE Power AG Kraftwerk Neurath	41517 Grevenbroich	NRW	497	4,31	396,7
RWE Power AG	52249 Eschweiler	NRW	299	4,01	256,8
Kraftwerk Boxberg	02943 Boxberg/O.L.	SN	235	4,00	202,2
RWE Power AG Kraftwerk Frimmersdorf	41517 Grevenbroich	NRW	119	3,57	114,9
Σ Braunkohlekraftwerke			3.568,7		2.119,6
¹ Ende Juni 2013 außer Betrieb genommen [42]					

Tabelle 5: Emissionen von Quecksilber in kg in 2011 in Betrieben der Energiewirtschaft – hier: Braunkohlekraftwerke – nach PRTR sowie Emissionskonzentration und Emissionsfracht p.a. bei Einhaltung des US-Grenzwertes (Betriebswert = 2,46 µg Hg/Nm³ entsprechend 60 % des Grenzwertes i.H.v. 4,1 µg Hg/Nm³), Gelb: Kraftwerk erfüllt US-Betriebsgrenzwert, (eigene Berechnungen)

Name des Betriebs	Adresse	Land	Hg in kg lt. PRTR	Hg in µg/Nm ³	Emission (kg Hg/a) bei Einhaltung US-Grenzwert
E.ON Kraftwerke GmbH - Kraftwerk Schkopau	06258 Korbetha	LSA	345	16,99	69,9
Vattenfall Europe Generation AG Kraftwerk Lippendorf	04564 Böhlen	SN	647	16,08	138,6
E.ON Kraftwerke GmbH Kraftwerk Buschhaus	38364 Schöningen	NS	91,7	13,72	23,0
Heizkraftwerk Nord II	09114 Chemnitz	SN	52,5	11,66	15,5
MIBRAG Mumsdorf	06729 Elsteraue	LSA	38,3	11,14	11,8
MIBRAG Deuben	06682 Teuchern / OT Deuben	LSA	24,2	8,88	9,4
RWE Power AG Kraftwerk Goldenberg	50354 Hürth	NRW	48,3	7,65	21,7
RWE Power AG-Fabrik Fortuna Nord	50129 Bergheim	BRW	21,3	7,56	3,3
Kraftwerk Schwarze Pumpe	03130 Spremberg	BRB	271	6,17	151,3
RWE Power AG	52249 Eschweiler	NRW	363	5,09	245,4
RWE Power AG Kraftwerk Niederaußem	50129 Bergheim	NRW	509	4,82	363,6
RWE Power AG-Fabrik Frechen	50226 Frechen	NRW	23,3	4,61	17,4
Kraftwerk Boxberg	02943 Boxberg/O.L.	SN	273	4,56	206,0
Vattenfall Europe Generation AG Kraftwerk Jämschwalde	03185 Peitz	BRB	350	3,90	309,0
RWE Power AG Kraftwerk Frimmersdorf	41517 Grevenbroich	NRW	196	3,49	193,3
RWE Power AG Kraftwerk Neurath	41517 Grevenbroich	NRW	220	2,32	220,0
Σ Braunkohlekraftwerke			3.473,6		1.999,3

Tabelle 6: Emissionen von Quecksilber in kg in 2012 in Betrieben der Energiewirtschaft – hier: Steinkohlekraftwerke – nach PRTR sowie Emissionskonzentration und Emissionsfracht p.a. bei Einhaltung des US-Grenzwertes (Betriebswert = 0,84 µg Hg/Nm³ entsprechend 60 % des Grenzwertes i.H.v. 1,4 µg Hg/Nm³), Gelb: Kraftwerk erfüllt US-Betriebsgrenzwert, (eigene Berechnungen)

Name des Betriebs	Adresse	Land	Hg in kg lt. PRTR	Hg in µg/Nm ³	Emission (kg Hg/a) bei Einhaltung US-Grenzwert
E.ON KRAFTWERK SCHOLVEN	45896 Gelsenkirchen	NRW	144	41,76 ⁵	4,1
swb Erzeugung GmbH & Co KG / Heizkraftwerk Hafen	28237 Bremen	BRE	150	18,38	9,6
GDF SUEZ Energie Deutschland AG	28777 Bremen	BRE	109	18,34	7,0
Vattenfall Europe Wärme AG	22880 Wedel	SH	83	16,41	5,9
swb Erzeugung GmbH & Co KG / Heizkraftwerk Hastedt	28207 Bremen	BRE	51,2	15,92	3,8
Stadwerke Duisburg AG Heizkraftwerk I	47053 Duisburg	NRW	16	11,50	1,6
Vattenfall Europe Wärme HKW Moabit	13353 Berlin	BER	14,9	9,39	1,9
Kraftwerk Voerde OHG der STEAG GmbH und RWE Power AG Gemeinschaftskraftwerk	46562 Voerde	NRW	186	8,67	25,2
Mainova, HKW West	60327 Frankfurt	HES	28	7,86	4,2
Braunschweiger Versorgungs AG, Heizkraftwerk Mitte	38114 Braunschweig	NS	20,1	7,84	3,0
SWM Heizkraftwerk Nord	85774 Unterföhring	BAY	71	7,75	10,8
GbR der STEAG GmbH "Gemeinschaftskraftwerk West" STEAG Kraftwerk West	46562 Voerde	NRW	39,5	7,28	6,4
Mark-E Aktiengesellschaft	58791 Werdohl	NRW	61,3	6,95	10,4
Heizkraftwerk Walsum STEAG GmbH	47179 Duisburg	NRW	44,2	6,47	8,0
Großkraftwerk Mannheim AG/Elektrizitätswerk	68199 Mannheim	BW	137	6,11	26,4
HKW Herne STEAG GmbH	44653 Herne	NRW	50,5	5,85	10,2
Kraftwerk Bexbach	66450 Bexbach	SAAR	55,4	5,58	11,7

⁵ Dieser Wert, der eine Überschreitung des geltenden deutschen Grenzwertes (Tagesmittelwert) impliziert, wurde anhand der im PRTR angegebenen CO₂-Emission errechnet; die Angabe dort ist möglicherweise nicht korrekt.

Name des Betriebs	Adresse	Land	Hg in kg lt. PRTR	Hg in µg/Nm ³	Emission (kg Hg/a) bei Einhal- tung US- Grenzwert
Vattenfall Europe Wärme AG Kraftwerk Tiefstack	22113 Hamburg	HH	25,5	5,53	5,4
E.ON Kraftwerke GmbH Kraftwerk Knepper	44357 Dortmund	NRW	14	3,68	4,5
Kraftwerk Mehrum GmbH	31249 Hohenhameln	NS	33,6	3,46	11,4
Gemeinschaftskraftwerk Kiel GmbH GKK	24149 Kiel	SH	22,7	3,32	8,0
GKH Gemeinschaftskraftwerk Hannover	30419 Hannover	NS	19	2,91	7,7
Infracor GmbH	45772 Marl	NRW	24,6	2,75	10,5
E.ON Kraftwerk Staudinger	63538 Großkrotzenburg	HES	35,1	2,61	15,8
Kraftwerk Fenne	66333 Völklingen	SAAR	16,8	2,59	7,6
Vattenfall Europe Wärme HKW Reuter-West	13599 Berlin	BER	24,4	2,58	11,1
KW Lünen STEAG GmbH	44536 Lünen	NRW	13,2	2,50	6,2
HKW Heilbronn	74076 Heilbronn	B-W	30	2,42	14,6
Rheinhafen-Dampfkraftwerk Karlsruhe	76189 Karlsruhe	B-W	16,2	2,01	9,5
KNG Kraftwerks- und Netzgesellschaft mbH Kraftwerk Rostock	18147 Rostock	MV	17,9	1,70	12,4
GDF SUEZ Kraftwerk Zolling GmbH	85406 Zolling	BAY	11,3	1,52	8,7
E.ON Kraftwerke GmbH	26386 Wilhelmshaven	NS	18,8	1,44	15,4
RWE Power AG Kraftwerk Werne	59368 Werne	NRW	15,6	1,38	13,3
E.ON Kraftwerke GmbH	45711 Datteln	NRW	26	0,45	26
Σ Steinkohlekraftwerke			1.625,8		338,3

Tabelle 7: Emissionen von Quecksilber in kg in 2011 in Betrieben der Energiewirtschaft – hier: Steinkohlekraftwerke – nach PRTR sowie Emissionskonzentration und Emissionsfracht p.a. bei Einhaltung des US-Grenzwertes (Betriebswert = 0,84 µg Hg/Nm³ entsprechend 60 % des Grenzwertes i.H.v. 1,4 µg Hg/Nm³), Gelb: Kraftwerk erfüllt US-Betriebsgrenzwert, (eigene Berechnungen)

Name des Betriebs	Adresse	Land	Hg in kg lt. PRTR	Hg in µg/Nm ³	Emission (kg Hg/a) bei Einhaltung US-Grenzwert
Stadtwerke Duisburg AG Heizkraftwerk I	47053 Duisburg	NRW	43	24,26	2,1
Stadtwerke Duisburg AG Heizkraftwerk II	47053 Duisburg	NRW	40	21,45	2,2
swb Erzeugung GmbH & Co KG / Heizkraftwerk Hafen	28237 Bremen	BRE	158	18,45	10,1
GDF SUEZ Energie Deutschland AG	28777 Bremen	BRE	79,4	18,23	5,1
swb Erzeugung GmbH & Co KG / Heizkraftwerk Hastedt	28207 Bremen	BRE	51,2	16,69	3,6
Vattenfall Europe Wärme HKW Moabit	13353 Berlin	BER	18,7	9,63	2,3
Braunschweiger Versorgungs AG, Heizkraftwerk Mitte	38114 Braunschweig	NS	15,2	8,93	2,0
GDF SUEZ Kraftwerk Zolling GmbH	85406 Zolling	BAY	42	8,43	5,9
Mainova, HKW West	60327 Frankfurt	HES	23,3	6,57	4,2
E.ON Kraftwerke GmbH	45711 Datteln	NRW	40	6,57	7,2
Mark-E Aktiengesellschaft	58791 Werdohl	NRW	44	6,51	7,9
SWM Heizkraftwerk Nord	85774 Unterföhring	BAY	62	6,22	11,7
Grosskraftwerk Mannheim AG/Elektrizitätswerk	68199 Mannheim	BW	134	6,11	25,8
STEAG Gemeinschaftskraftwerk West	46562 Voerde	NRW	23,6	5,16	5,4
KW Lünen STEAG GmbH	44536 Lünen	NRW	28,9	4,89	6,9
Kraftwerk Bexbach	- 66450 Bexbach	SAAR	24	4,09	6,9
E.ON KRAFTWERK SCHOLVEN	45896 Gelsenkirchen	NRW	134	3,97	39,7
Kraftwerk Mehrum GmbH	31249 Hohenhameln	NS	43,1	3,84	13,2
EnBW Kraftwerke AG Kraftwerk Altbach	73776 Altbach	BW	34	3,63	11,0

Name des Betriebs	Adresse	Land	Hg in kg lt. PRTR	Hg in µg/Nm ³	Emission (kg Hg/a) bei Einhal- tung US- Grenzwert
Kraftwerk Voerde OHG der STEAG GmbH und RWPow- er AG Gemeinschaftskraftwerk	46562 Voerde	NRW	73,3	3,50	24,7
HKW Herne STEAG GmbH	44653 Herne	NRW	31,7	3,49	10,7
Vattenfall Europe Wärme AG	22880 Wedel	SH	14,6	3,44	5,0
Vattenfall Europe Wärme AG Kraftwerk Tiefstack	22113 Hamburg	HH	18,4	3,41	6,3
E.ON Kraftwerke GmbH Kraftwerk Knepper	44357 Dortmund	NRW	13	3,09	4,9
Infracor GmbH	45772 Marl	NRW	25,1	3,02	9,8
Kraftwerk Fenne	66333 Völklingen	SAAR	18,6	2,71	8,1
Kraftwerk Weiher	66287 Quierschied	SAAR	16,1	2,69	7,0
Vattenfall Europe Wärme HKW Reuter-West	13599 BER	BER	25,1	2,61	11,3
E.ON Kraftwerke GmbH	26386 Wilhelmshaven	NS	38,9	2,57	17,8
EnBW Kraftwerke AG (RDK)	76189 Karlsruhe	BW	21	2,35	10,5
E.ON Kraftwerk Staudinger	63538 Großkrotzenburg	HES	31,7	2,24	16,7
RWE Power AG Kraftwerk Werne	59368 Werne	NRW	16,3	1,87	10,2
Gemeinschaftskraftwerk Bergkamen A OHG der STEAG GmbH und der RWE Power AG	59192 Bergkamen	NRW	19,2	1,65	13,7
KNG Kraftwerks- und Netzgesellschaft mbH Kraftwerk Rostock	18147 Rostock	MV	15,1	1,60	11,1
EnBW Kraftwerke AG Energie BW	74076 Heilbronn	BW	14	1,30	12,6
RWE Power AG Kraftwerk Ibbenbüren	49479 Ibbenbüren	NRW	13,9	0,75	13,9
Σ Steinkohlekraftwerke (1)			1.444,4		367,5
GKH Gemeinschaftskraftwerk Hannover	30419 Hannover	NS	19	n. ange- geben	
Heizkraftwerk Walsum STEAG GmbH	47179 Duisburg	NRW	15,3	n. ange- geben	

6. Quellennachweise

- 1 Antwort der Bundesregierung vom 28. März 2014 auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Oliver Krischer, Peter Meiwald, Annalena Baerbock, Dr. Julia Verlinden, Bärbel Höhn, Sylvia Kötting-Uhl, Oliver Krischer, Christian Kühn (Tübingen), Steffi Lemke und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN: Quecksilberemissionen aus Kohlekraftwerken, Bundestagsdrucksache 18/821
- 2 KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN: MITTEILUNG DER KOMMISSION AN DEN RAT UND DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT: Gemeinschaftsstrategie für Quecksilber {SEC(2005) 101}. Brüssel, den 28.01.2005, KOM(2005) 20 endgültig
<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:52005DC0020:DE:HTML>
- 3 Bunke M.: Ausarbeitung, Validierung und Anwendung einer Methode zur simultanen Bestimmung von Methylquecksilber und anorganischem Quecksilber in Fischgewebe und Fischembryonen. Dissertation, Universität Hamburg, Institut für Biochemie und Lebensmittelchemie, 2007
<http://ediss.sub.uni-hamburg.de/volltexte/2007/3499/pdf/DissertationMarkusBunke.pdf>
- 4 UNEP (United Nations Environment Programme): Mercury. Time to act. Geneva, 2013
<http://www.unep.org/PDF/PressReleases/MercuryTimeToActHires.pdf>
- 5 U.S. Environmental Protection Agency (EPA): Hazardous Waste Clean-Up Information (CLU-IN) Web Site, Mercury: Toxicology. Last updated on Wednesday, August 28, 2013
<http://www.clu-in.org/contaminantfocus/default.focus/sec/Mercury/cat/Toxicology/>
- 6 BfR, Fachgruppe Expositionsschätzung und -standardisierung, Abteilung Wissenschaftliche Querschnittsaufgaben (Hrsg.): Aufnahme von Umweltkontaminanten über Lebensmittel. Ergebnisse des Forschungsprojektes LExUKon, 2010
<http://www.bfr.bund.de/cm/350/aufnahmevonumweltkontaminantenueberlebensmittel.pdf>
- 7 EPA: Trends in Blood Mercury Concentrations and Fish Consumption Among U.S. Women of Childbearing Age NHANES, 1999-2010. Final Report, July 2013. EPA-823-R-13-002
<http://water.epa.gov/scitech/swguidance/fishshellfish/fishadvisories/upload/Trends-in-Blood-Mercury-Concentrations-and-Fish-Consumption-Among-U-S-Women-of-Childbearing-Age-NHANES-1999-2010.pdf>
- 8 Minamata-Konvention:
<http://www.mercuryconvention.org/Convention/tabid/3426/Default.aspx>
- 9 Trasande L., Landrigan P.J., Schechter C.: Public Health and Economic Consequences of Methyl Mercury Toxicity to the Developing Brain. Environ Health Perspect 113:590–596 (2005). doi:10.1289/ehp.7743 available via <http://dx.doi.org/> [Online 28 February 2005]
<https://www.researchgate.net/profile/LeonardoTrasande/publication/7871019Publichealthandeconomicconsequencesofmethylmercurytoxicitytothedevelopingbrain/file/32bfe50f5c9f705992.pdf?origin=publicationlist&ev=pubcitxdl>
- 10 Environmental Protection Agency: 40 CFR Parts 60 and 63. National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants From Coal- and Oil-Fired Electric Utility Steam Generating Units and Standards of Performance for Fossil-Fuel-Fired Electric Utility, Industrial-Commercial-Institutional, and Small Industrial-Commercial-Institutional Steam Generating Units; Final Rule announced on December 21, 2011. 77 FR 9304 (Feb. 16, 2012). <http://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2012-02-16/pdf/2012-806.pdf>
- 11 Deutscher Bundestag: Kleine Anfrage der Abgeordneten Dorothea Steiner, Oliver Krischer, Hans-Josef Fell, weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN – Drucksache 17/8650 – Quecksilberbelastung für Mensch und Umwelt. 29. 02. 2012, Drucksache 17/8776
- 12 Federal Register: National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants From Coal- and Oil-Fired Electric Utility Steam Generating Units and Standards of Performance for Fossil-Fuel-Fired Electric Utility, Industrial-Commercial-Institutional, and Small Industrial-Commercial-Institutional Steam Generating Units. A Rule by the Environmental Protection Agency on 02/16/2012.
<https://www.federalregister.gov/articles/2012/02/16/2012-806/national-emission-standards-or-hazardous-air-pollutants-from-coal-and-oil-fired-electric-utility>
- 13 Vosteen B.W.: Bromine-based Mercury Abatement – Experiences in USA and Europe. 9. VDI-Fachkonferenz „REA-, SCR- und Entstaubungsanlagen in Großkraftwerken“, 28./29. November 2013 in

- Düsseldorf <http://www.vosteen-consulting.de/downloads/201311VosteenHeitingDuesseldorf.pdf>
- 14 Vosteen B.W., Tim C. Hartmann T.C., Berry M.S.: Chlor und Brom in Kohlen und ihre Bedeutung für die Quecksilberabscheidung aus Abgasen von Kohlekraftwerken. Berliner Planungs- und Immissionsschutzkonferenz, 19./20. November 2012
http://www.vosteen-consulting.de/downloads/2012_11_Vosteen_Hartmann_Berry_Berlin.pdf
- 15 Beckers R., Heidemeier J., Hilliges F.: Kohlekraftwerke im Fokus der Quecksilberstrategie. 44. Kraftwerktechnisches Kolloquium 2012, 23./24. Oktober 2012, in Beckmann M., Hurtado A. (Hrsg.): Sichere und nachhaltige Energieversorgung – Kraftwerkstechnik Bd. 4, 519-536, 2012
http://www.thru.de/fileadmin/SITE_MASTER/content/Dokumente/Downloads/Kohlekraftwerke_Hq.pdf
- 16 Deutscher Bundestag, Wissenschaftliche Dienste: Sachstand „Immissionsschutzanforderungen für Kohlekraftwerke und Industrieanlagen in den USA und der EU. Fallbeispiel: Quecksilberemissionen“. Aktenzeichen WD 8 - 3000 - 02 2/14, 31.03. 2014
- 17 Schönberger H., Waltisberg J.: Einfluss der Mitverbrennung von Abfällen in deutschen Zementwerken auf die Abgasemission. In: Thomé-Kozmiensky K. J., Beckmann M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Bd. 11, 871-927, 2014
- 18 Dombrowski K., Arambasick K., Srinivasan N.K.: Balance of Plant Impacts of Bromide Addition for Mercury Control. Air Quality IX – An International Conference on Environmental Topics Associated with Energy Production. Arlington, Virginia, 21.-23.10.2013
- 19 Vosteen Consulting. Patente und Lizenzen: <http://www.vosteen-consulting.de/de/patente.htmlb>
- 20 Fehring R., Rechberger H., Pesonen H.-L., Brunner H. P.: Auswirkungen unterschiedlicher Szenarien der thermischen Verwertung von Abfällen in Österreich (ASTRA). TU Wien, 1997
- 21 ÖWAV-Regelblatt 514 – Die Anwendung der Stoffflussanalyse in der Abfallwirtschaft. Wien, September 2003
- 22 Rechberger H.: Über die Verbrennung zur letzten Senke. In: Thomé-Kozmiensky K. J. (Hrsg.): Optimierung der Abfallverbrennung 1, 107-117, 2004
- 23 Zeschmar-Lahl B.: Die Senkenfunktion der Müllverbrennung. In: Thomé-Kozmiensky K. J. (Hrsg.): Optimierung der Abfallverbrennung 1, 119-144, 2004
- 24 Kral U.; Brunner P.H.; Kellner K.: Saubere Kreisläufe und umweltverträgliche Senken. Österreichische Abfallwirtschaftstagung 2011 „Wie viel Abfall braucht Österreich?“, 4.-5.5.2011,
http://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_196905.pdf
- 25 Vosteen B. W., Hartmann T. C., Berry M. S.: Test and Commercial Operating Results of Bromine Based Mercury Control at Coal-Fired Power Stations in USA. 44. Kraftwerkstechnisches Kolloquium 2012, Dresden, 23./24.10.2012
http://www.vosteen-consulting.de/downloads/2012_09_Vosteen_Vortrag_Dresden.pdf
- 26 Vosteen B. W.: Bromine-based Mercury Abatement – Experiences in USA and Europe. 9. VDI-Fachkonferenz "REA-, SCR- und Entstaubungsanlagen in Großkraftwerken". Düsseldorf, 28./29.11.2013
http://www.vosteen-consulting.de/downloads/2013_11_Vosteen_Heiting_Duesseldorf.pdf
- 27 Kramer M., Gruber-Waltl A.: Effective ways to reduce mercury content in FGD by-products. Closing the mercury trap from the flue gas desulphurization downwards. ICMGP – International Conference on Mercury as a Global Pollutant, Edinburgh 2013
- 28 Schönberger H., Tebert C., Lahl U.: Expertenanhörung im Umweltausschuss. Fachleute nahmen Stellung zum Regierungsentwurf zur Umsetzung der EU-Industrieemissionsrichtlinie in deutsches Recht. ReSource 4, 4-11, 2012 http://www.bzl-gmbh.de/de/sites/default/files/ReS_4_2012_4-11.pdf
- 29 Stühler H.-U.: Das Vorsorgegebot gemäß § 5 Abs. 1 Nr. 2 BImSchG. Rechtsprechungsübersicht, April 2013
http://www.jura.uni-konstanz.de/index.php?eID=tx_nawsecuredl&u=0&file=fileadmin/jura/Dokumente_FB_Homepage/Lehrbeauftragte/Honorarprof/Stuehler/Vorsorgegebot_des_5_Abs_1_Nr_2_BImSchG.pdf
- 30 BVerwG, Urteil vom 17.2.1984 – 7 C 8.82 –, DVBl. 1984, 476 = BVerwGE 69, 37, zit. in Stühler, s.o.
- 31 Bayerischer VGH · Beschluss vom 27. Januar 2012 · Az. 22 ZB 10.2333 <http://openjur.de/u/495831.html>
- 32 vgl. BVerwG, Beschl. v. 4.8.1992 - 4 B 150.92 -, Buchholz, BVerwG, 406.25 § 3 BImSchG Nr. 9

-
- 33 vgl. Jarass, BImSchG, 7. Aufl. 2007, § 3 Rdnr. 106 f; Feldhaus, Beste verfügbare Techniken und Stand der Technik, NVwZ 2001, 1, 4
- 34 Jarass, a.a.O., § 5 Rdnr. 60 f m.w.N.
- 35 BVerwG <http://www.bverwg.de/entscheidungen/entscheidung.php?ent=111203U7C19.02.0>
- 36 Boucher O., Jacobson S.W., Plusquellec P., Ayotte P., Forget Dubois N., Jacobson J.L., Muckle G.: Prenatal Methylmercury, Postnatal Lead Exposure, and Evidence of Attention Deficit/Hyperactivity Disorder among Inuit Children in Arctic Québec. Environmental Health Perspectives volume 120, number 10, October 2012 <http://ehp.niehs.nih.gov/wp-content/uploads/120/10/ehp.1204976.pdf>
- 37 Ahrens R. H.: EU will Quecksilberemissionen aus Kohlekraftwerken begrenzen. VDI-Nachrichten, 11. April 2014, Ausgabe 15 <http://www.vdi-nachrichten.com/Technik-Wirtschaft/EU-Quecksilberemissionen-Kohlekraftwerken-begrenzen>
- 38 European IPPC Bureau: Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Large Combustion Plants. Draft 1 (June 2013) http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/LCP_D1_June2013_online.pdf
- 39 Beckers R., Heidemeier J., Hilliges F.: Kohlekraftwerke im Fokus der Quecksilberstrategie. 44. Kraftwerktechnisches Kolloquium 2012, 23./24. Oktober 2012, in Beckmann M., Hurtado A. (Hrsg.): Sichere und nachhaltige Energieversorgung – Kraftwerkstechnik Bd. 4, 519-536, 2012
- 40 Umweltbundesamt: Strom- und Wärmeversorgung in Zahlen. 21.03.2014. <http://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energieversorgung/strom-waermeversorgung-in-zahlen> sowie dort zum Download: Datenbank „Kraftwerke in Deutschland“. Kraftwerke in Deutschland (ab 100 Megawatt elektrischer Leistung). http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/dokumente/kraftwerke_in_deutschland_ab_100_megawatt_elektrischer_leistung.xls; eigene Auswertung der Datenbank
- 41 Günther R. (Hrsg.): Verbrennung und Feuerungen. Springer-Verlag, Berlin 1974
- 42 Mitteldeutsche Zeitung: Stilllegung in Mumsdorf: Mibrag nimmt Kraftwerk außer Betrieb. 29.06.2013 16:03 Uhr | Aktualisiert 30.06.2013 18:54 Uhr <http://www.mz-web.de/weissenfels/stillegung-in-mumsdorf-mibrag-nimmt-kraftwerk-ausser-betrieb,20641108,23545634.html>