

**Einfluss der Mitverbrennung von Abfällen in deutschen Zementwerken
auf die Abgasemission**
Harald Schönberger, Josef Waltisberg

Seite 871 bis 927
Abgegebene Version

Intern JW-14-02A-ARTIKEL2014

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

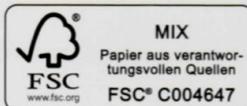
Energie aus Abfall – Band 11

Karl J. Thomé-Kozmiensky, Michael Beckmann.

– Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2014

ISBN 978-3-944310-06-0

ISBN 978-3-944310-06-0 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky



Copyright: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky
Alle Rechte vorbehalten

Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky • Neuruppin 2014

Redaktion und Lektorat: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky,

Dr.-Ing. Stephanie Thiel, M.Sc. Elisabeth Thomé-Kozmiensky

Erfassung und Layout: Ginette Teske, Fabian Thiel, Cordula Müller, Ina Böhme,

Janin Burbott

Druck: Mediengruppe Universal Grafische Betriebe München GmbH, München

Einfluss der Mitverbrennung von Abfällen in deutschen Zementwerken auf die Abgasemission

Harald Schönberger, Josef Waltisberg

1. Einleitung

Die Weltwirtschaft basiert auf riesigen Massenströmen. Die dabei hergestellten Produkte werden als erwünschte Massenströme, während die Emissionsmassenströme in die Luft, ins Wasser, in den Boden (durch Abfälle) und die Abwärme als unerwünschte Massenströme betrachtet werden. Die Herstellung von Zement ist dafür ein anschauliches Beispiel. Seine Produktion erfordert einen beträchtlichen Materialinput für den Klinkerbrennprozess. Der Klinker wird mit bestimmten Additiven gemischt wird, wodurch das Endprodukt, der Zement, erhalten wird (Abbildung 1).

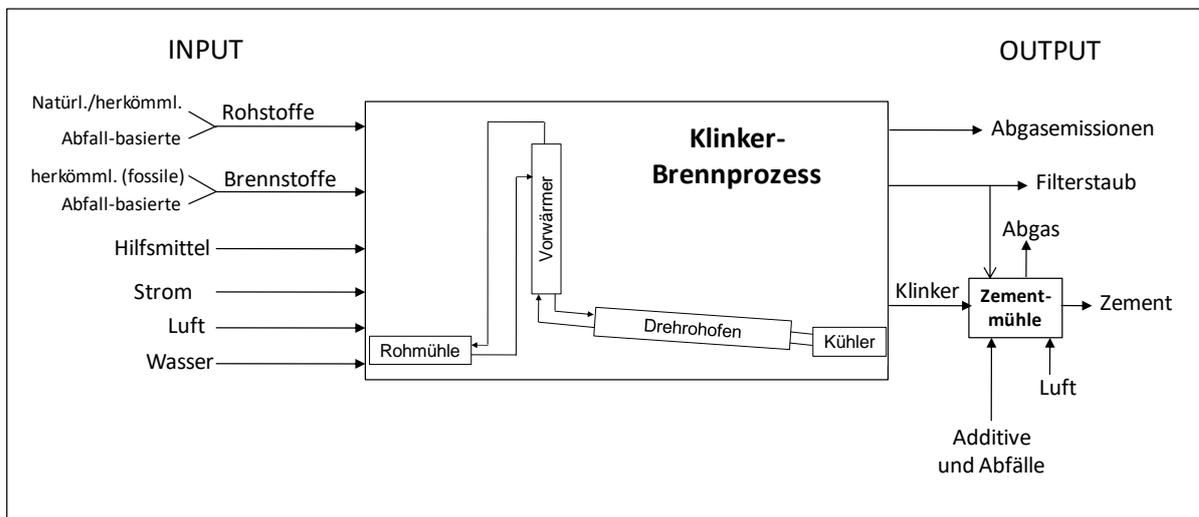


Abbildung 1: Schema zum Input und Output von Anlagen zur Herstellung von Zement

Zement wurde unverzichtbarer Bestandteil für den Bau von Gebäuden und Infrastrukturelementen (Brücken, Tunnels, Dämme, Abwassersysteme, Kraftwerke etc.). Derzeit ist für ihn noch kein Ersatzstoff in Sicht.

Über die vergangenen Jahrzehnte hinweg war der Klinkerbrennprozess Gegenstand von Optimierungsbemühungen. Bezüglich des Umweltschutzes betraf das vor allem die Reduzierung des Energiebedarfs und die Minimierung der Abgasemissionen. Mit Blick auf die Wirtschaftlichkeit lag der Fokus auf dem Ersatz von herkömmlichen, fossilen Brennstoffen durch billigere Alternativen, was vor allem den Einsatz Abfall-basierter Brennstoffen bedeutet, die einen hinreichend hohen Brennwert aufweisen. Die Verbesserung des Umweltschutzes und die Erhöhung der Wirtschaftlichkeit kann Hand in Hand gehen. Allerdings gibt es auch Fälle, bei denen in Abhängigkeit von den herrschenden Prozessbedingungen der Einsatz von Abfall-basierter Brennstoffen mit erhöhten Emissionen, vor allem Abgasemissionen, verbunden ist. Der Einsatz von Abfall-basierter Brennstoffen wird auch als Abfallmitverbrennung bezeichnet. Dies schließt auch den Einsatz von Abfall-basierter Rohstoffen ein.

In diesem Papier werden die Abfall-basierten Rohstoffe kurz und die mengenmäßig weitaus bedeutenderen Abfall-basierten Brennstoffe etwas ausführlicher behandelt. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die Abgasemissionen gelegt, da diese die Emissionssituation von Zementwerken deutlich dominieren. Mitte des Jahres 2013 sind die Emissionsdaten für die Jahre 2008-2010 aller 34 deutscher Zementwerke veröffentlicht worden¹, die die Grundlage bilden zur Klärung der Frage, welche Auswirkungen die Abfallmitverbrennung auf die Abgasemissionen hat. Dazu wurden die veröffentlichten Emissionsdaten für die einzelnen Zementwerke ausgewertet. Wenn im Folgenden mehrfach auf die publizierten Emissionsdaten Bezug genommen wird, sind dabei stets die ausgewerteten Daten gemeint.

2. Abfall-basierte Rohstoffe

Natürliche Rohstoffe können durch geeignete, ggfs. aufbereitete, Abfälle substituiert werden. In diesen Fällen spricht man von Abfall-basierten Rohstoffen, die wie folgt definiert werden können: „Ausgewählte Abfälle und Nebenprodukte, die brauchbare Mineralien wie Calcium, Aluminium oder Eisen enthalten, können in Klinkeröfen zum Einsatz kommen und natürliche Rohstoffe wie Kalkstein, Ton, Mergel, Kreide und andere ersetzen“ (basierend auf (WBCSD Cement, 2005)).

Die chemische Eignung von Abfall-basierten Rohstoffen ist wichtig, da sie den für die Klinkerherstellung erforderlichen Inhaltsstoffen entsprechen müssen. Die an erster Stelle stehenden Elemente sind Calcium (üblicherweise als Calciumcarbonat), Silicium, Aluminium und Eisen, aber auch Schwefel, Alkalien und weitere, die entsprechend ihrer chemischen Zusammensetzung in verschiedene Gruppen eingeteilt werden können. Der Einsatz von Abfall-basierten Rohstoffen kann auch die Substitution von Schwefel und seinen Verbindungen beinhalten (BREF CLM, 2010). Das Verhältnis von natürlichen zu Abfall-basierten Rohstoffen liegt seit langem auf niedrigem Niveau. Im Jahre 1998 betrug es 11,8 % und steigerte sich bis 2010 auf 14,1 % (VDZ, 2011); dabei machte davon allein granuliertem Hochofenschlacke 80 % aus. Die Details zu dieser Entwicklung ergeben sich aus Tabelle 1.

¹Der Bundesverband Bürgerinitiativen Umweltschutz e.V. (BBU) mit Sitz in Bonn hat im Sommer 2013 die Emissionsdaten aller 34 deutschen Zementwerke für die Jahre 2008-2010, für einige wenige Werke auch für 2011, unter <http://www.bbu-online.de/Arbeitsbereiche/Umweltinformationsrecht/Arbeitsbereiche%20Umweltinformationsrecht.html> veröffentlicht. Bei diesen Daten handelt es sich um die Emissionsdaten, die von den deutschen Zementwerken kontinuierlich gemessen wurden und bei den zuständigen Behörden mittels des Instrumentes des Umweltinformationsrechts erhoben wurden. Sie wurden für die einzelnen Zementwerke ausgewertet. Sofern in diesem Beitrag auf die publizierten Emissionsdaten Bezug genommen wird, sind dabei stets die ausgewerteten Daten gemeint.

Tabelle 1: Mengen an Abfall-basierten Rohstoffen, die in deutschen Zementwerken von 1998 – 2011 zum Einsatz kamen, nach (VDZ, 1999; VDZ, 2000; VDZ 2001; ... ; VDZ, 2012)

Klasse	Abfall-basierte Rohstoffe - relevante Beispiele	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Ca	Calcium-haltige Abfälle • Kalkschlämme aus der Trink- und Abwasseraufbereitung • Kalkhydrat • Porenbetongranulat • Calciumfluorid	180	117	264	396	267	283	101	97	95	118	82	64	62	51
Si	Silicium-haltige Abfälle Gießereialtsand	100	140	137	111	135	148	151	117	149	164	151	101	148	159
Si-Al	Calcium- oder Aluminium-haltige Abfälle Bentonit / Kaolinit Rückstände aus der Kohleverarbeitung	44	40	47	41	36	41	49	41	43	48	35	47	41	39
Fe	Eisen-haltige Abfälle aus der Eisen- und Stahlindustrie, wie • Kiesabbrand • Verunreinigtes Erz • Eisenoxid/Flugasche-Gemisch • Stahlwerksstäube • Walzzunder	170	170	321	198	152	131	93	111	137	128	149	110	92	106
Si-Al-Ca	Silicium/Aluminium/Calcium-haltige Abfälle Hüttensand Flugasche Ölschiefer Trass Andere Abfall-basierte Si-Al-Ca-haltige Stoffe wie: • Papierreste • Aschen aus Verbrennungsprozessen • Mineralische Reststoffe, z.B. ölverunreinigte Böden	4600	4900	5200	4650	4650	4760	5110	5001	6400	6602	6430	4480	5365	5844
Al	Aluminium-haltige Abfälle aus der Metallindustrie wie: • Aufbereitungsrückstände von Salzschlacken • Aluminiumhydroxid	22	43	40	43	66	76	60	70	57	62	51	47	55	75
S	Schwefel-haltige Abfälle Gips aus der Rauchgasentschwefelung Anderer Gips aus der chemischen und Keramikindustrie	420	420	420	391	390	426	428	398	415	389	345	310	313	350
F	Fluor-haltige Abfälle CaF ₂ - / Fluor-haltige Rückstände	43													

Die Abfall-basierten Rohstoffe gelangen in den Drehrohrofen oder Kalzinator über den Rohmehlpfad, den Ofeneinlauf und/oder den Kalzinator direkt. Im Zuge der Aufheizung im Vorwärmer können daraus organische Stoffe freigesetzt werden, da diese aufgrund der anfangs noch niedrigeren Temperaturen nicht vollständig zersetzt werden (BREF CLM, 2010). Der Einsatz von Abfall-basierten Rohstoffen muss dahingehend überprüft und die geeignete Aufgabestelle ermittelt werden. Dies erfolgt am besten mit dem sog. Austreibungsversuch (Waltisberg, 1998; Zunzer, 2002). Dabei ist es für bestimmte Anfälle wie Industrieschlämme, Aschen aus Feuerungsanlagen, Gießereialtsande oder Straßenreinigungsgut bedeutsam, neben dem Summenparameter TOC auch organische Einzelstoffe, wie z.B. Benzol (z.B. mittels GC/MS) zu bestimmen. Beispielsweise sollten die vergleichsweise hohe Gehalte an organischen Stoffen aufweisenden Gießereialtsande in den Ofeneinlauf dosiert werden und nicht mit dem Rohmehl dem Ofensystem zugeführt werden.

Zusammenfassend sollten bei der Auswahl und Einsatz von Abfall-basierten Rohstoffen folgendes beachtet werden:

- Die Abfall-basierten Rohstoffe sollten primär aus den Klinkerelementen bestehen
- Die Konzentration an flüchtigen und hoch-flüchtigen Schwermetallen (Thallium und Quecksilber) ist zwingend zu berücksichtigen
- Die regelmäßige Überprüfung der Abfall-basierten Rohstoffe mittels repräsentativer Probenahme und Analytik (einschließlich Durchführung des Austrei-

bungsversuchs und Bestimmung von organischen Einzelstoffen zusätzlich zum Summenparameter TOC.

3. Abfall-basierte Brennstoffe

3.1 Definition

Abfall-basierte Brennstoffe sind solche, die nicht fossile oder Primärbrennstoffe sind. Eine genauere Definition wurde vom World Business Council formuliert: "Ausgewählte Abfälle oder Nebenprodukte mit einem verwertbaren Heizwert können in Drehrohröfen zum Brennen von Klinker zum Ersatz von fossilen Brennstoffen, wie z.B. Kohle, dann zum Einsatz kommen, wenn sie strenge Spezifikationen einhalten. In einigen Fällen können sie nur nach einer auf den Klinkerbrennprozess zugeschnittenen Vorbehandlung eingesetzt werden" (WBCSD Cement, 2005). Bezüglich Abfall-basierter Brennstoffe gibt es im Deutschen und Englischen eine Vielzahl von Begriffen, die in englischer Sprache in Abbildung 2 zusammengestellt sind. Diese Zusammenstellung ist ein Vorschlag für eine geeignete Zuordnung der im In- und Ausland verwendeten Begriffe und soll zur terminologischen Klarheit beitragen.

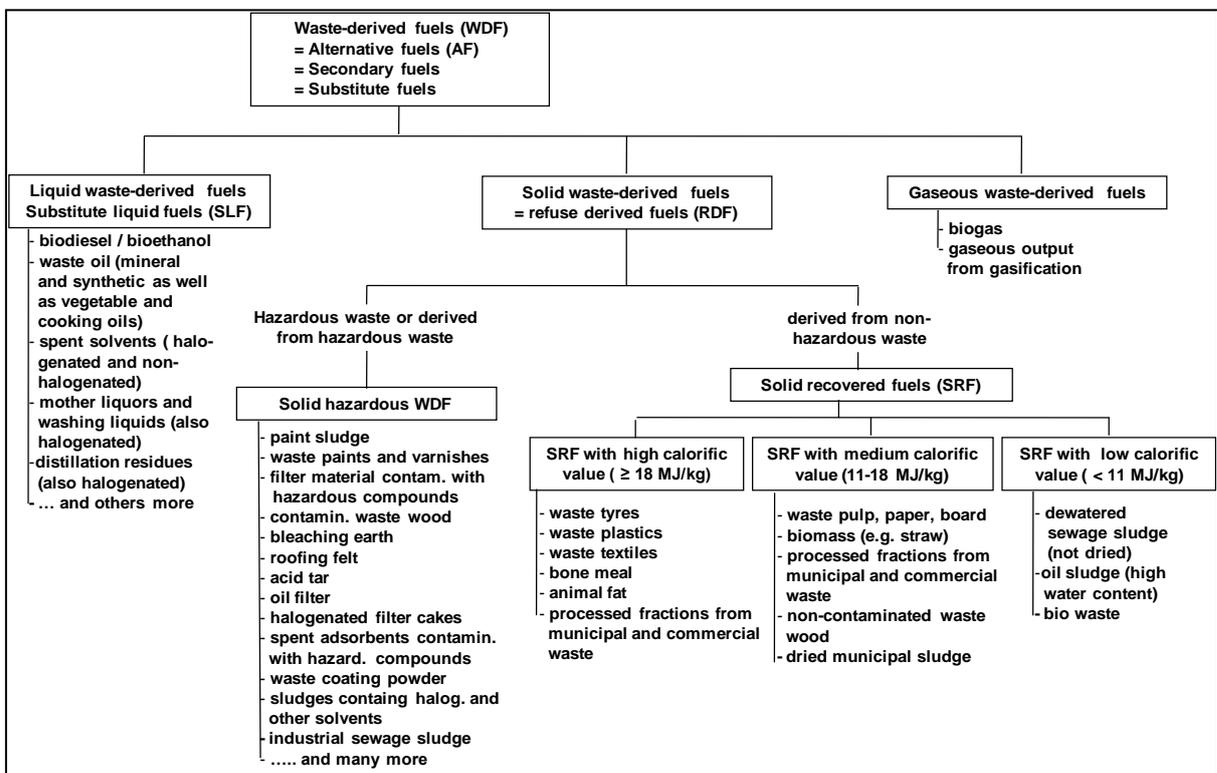


Abbildung 2: Zusammenstellung und Zuordnung der im Zusammenhang mit Abfall-basierten Stoffen verwendeten Begriffe

Nach dem vorstehenden Schema sind die Begriffe Abfall-basierte Brennstoffe, Sekundärbrennstoffe (im Gegensatz zu Primärbrennstoffen) und Ersatzbrennstoffe (zum Ersatz von Primärbrennstoffen) synonym. 'Refuse derived fuels (RDF)' ist ein im Englischen vielfach verwendeter Terminus, für den allerdings keine rechtliche Definition besteht und für den unterschiedliche Interpretationen innerhalb Europa bestehen (EC RDF, 2003).

3.2 Rechtliche Gesichtspunkte

Abfall-basierte Brennstoffe werden aus Abfällen gewonnen. Sie verlieren dabei ihren Abfallstatus nicht, d.h. sie bleiben Abfälle. Werden sie verbrannt oder mitverbrannt fallen sie unter die Abfallverbrennungsrichtlinie (WID) (EU WID, 2000)². Allerdings wurde mit der europäischen Abfallrahmenrichtlinie im Jahre 2008 (WFD) (EU WFD, 2008)³ ein neuer rechtlicher Rahmen eingeführt, nach dem ein Abfall (z.B. ein Abfallbrennstoff oder irgendein anderer Abfall), der für eine mögliche Wiederverwertung zurückgewonnen wurde oder zur Verfügung steht, seine Abfalleigenschaft verlieren kann⁴. Würden danach Abfall-basierte Brennstoffe die Abfalleigenschaft verlieren, würden die Anlagen zu ihrer Verbrennung oder Mitverbrennung, wie beispielsweise Zementwerke, Großfeuerungsanlagen oder Hochöfen nicht mehr unter den Geltungsbereich der Abfallverbrennungsrichtlinie fallen. Allerdings fallen die erwähnten Anlagen in Abhängigkeit von ihrer Kapazität unter die Großfeuerungsanlagenrichtlinie (nun integriert in die IED als Kapitel III), die IVU-Richtlinie (nun integriert in die IED als Kapitel II) oder unter die nationale Gesetzgebung der Mitgliedsstaaten. Bislang hat noch kein Abfall seine Abfalleigenschaften verloren und so sind Abfall-basierte Brennstoffe nach wie vor Abfälle (EU WFD, 2008; EC Guidelines, 2011).

Nach einer Studie zur Implementierung des vorgenannten Artikels 6 Abs. 1 der Abfallrahmenrichtlinie erscheint es möglich, für folgende Abfall-basierte Brennstoffe, Kriterien für das Ende der Abfalleigenschaft zu definieren:

- Tierisches Fett
- Speiseöl und -fett
- Altholz
- Kunststoffabfall
- Altreifen und Gummiabfälle
- Altpapier
- Altkleider und Textilabfälle
- "Clean refuse-derived fuel (RDF)" sind Abfall-basierte Brennstoffe, die aus nicht gefährlichen, sauberen und getrennt gesammelten Abfällen und Produktionsrückständen bestehen (UBA AT, 2012). In einer von einem Forschungsinstitut der Europäischen Kommission finanzierten Studie wurden Abfall-basierte Brennstoffe als potenzielle Kandidaten für Anfälle, für den das Ende der Abfalleigenschaft definiert werden kann (JRC-IPTS EoW, 2009).

² Die Abfallverbrennungsrichtlinie ist zum 7. Januar 2014 aufgehoben, da sie als Kapitel IV in die Industrieemissionsrichtlinie (IED) integriert wurde (EU IED, 2010). Das gleiche gilt sowohl für die IVU-Richtlinie (EU IPPC, 2008) als auch für die Großfeuerungsanlagenrichtlinie, die als Kapitel II bzw. als Kapitel III in die IED integriert wurde.

³ Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien, Amtsblatt der Europäischen Union, Nr. L 312 vom 22.11.2008, S. 3-30

⁴ Der Wortlaut von Artikel 6 Abs. 1 der Europäischen Abfallrahmenrichtlinie lautet: „Bestimmte festgelegte Abfälle sind nicht mehr als Abfälle im Sinne von Artikel 3 Buchstabe a anzusehen, wenn sie ein Verwertungsverfahren, wozu auch ein Recyclingverfahren zu rechnen ist, durchlaufen haben und spezifische Kriterien erfüllen, die gemäß den folgenden Bedingungen festzulegen sind: a) Der Stoff oder Gegenstand wird gemeinhin für bestimmte Zwecke verwendet; b) es besteht ein Markt für diesen Stoff oder Gegenstand oder eine Nachfrage danach; c) der Stoff oder Gegenstand erfüllt die technischen Anforderungen für die bestimmten Zwecke und genügt den bestehenden Rechtsvorschriften und Normen für Erzeugnisse und d) die Verwendung des Stoffs oder Gegenstands führt insgesamt nicht zu schädlichen Umwelt- oder Gesundheitsfolgen. Die Kriterien enthalten erforderlichenfalls Grenzwerte für Schadstoffe und tragen möglichen nachteiligen Umweltauswirkungen des Stoffes oder Gegenstands Rechnung“.

Österreich hat bereits Kriterien für das Ende der Abfalleigenschaft von Abfall-basierten Brennstoffen festgelegt. Dafür hat das österreichische Bundesministerium für Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft zunächst unverbindliche Regelungen getroffen (AT Richtlinie, 2008). Sie enthalten Kriterien für die Mitverbrennung von Abfällen. Durch die Integrierung in die österreichische Abfallverbrennungsverordnung wurden die Regelungen Ende 2010 rechtlich verbindlich (AT AVV, 2010). Diese Verordnung enthält Grenzwerte als Mediane und 80-Perzentilwerte für die Beurteilung des Endes der Abfalleigenschaft für folgende Parameter: Antimon, Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Nickel, Quecksilber, Schwefel und Chlor.

Portugal beabsichtigt ebenfalls (oder hat es schon getan), für "high quality refuse-derived fuel" (RDF) die Abfalleigenschaft zu beenden (PT RDF, 2010). Italien hat gleiches für "high quality solid recovered fuels" vor (IT SRF, 2012). Zwei Umwelt-Nichtregierungsorganisationen (European Environment Bureau, EEB und European Environmental Citizens Organisation for Standardisation, ECOS) haben diese Absichten stark kritisiert und die Europäische Kommission aufgefordert, die italienische Gesetzesinitiative abzulehnen (EEB/ECOS, 2012). Es ist nicht bekannt, ob weitere Mitgliedsstaaten mittlerweile Regelungen für das Ende der Abfalleigenschaft für bestimmte Abfälle eingeführt haben.

3.3 Art und Mengen eingesetzter alternativer Brennstoffe

3.3.1 Entwicklung

Der Einsatz von Abfall-basierten Brennstoffen ist vor allem in Mittel- und Nordeuropa vorangetrieben worden. Dies ergibt sich auch aus Abbildung 3, die die Anteile Abfall-basierter Brennstoffe am thermischen Input als Mittelwerte für verschiedene Industrieländer weltweit für das Jahr 2007 wiedergibt.

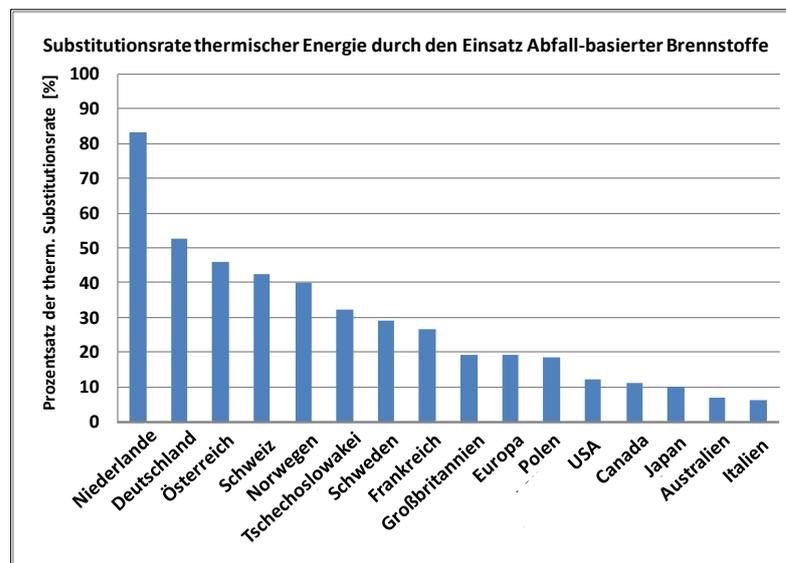


Abbildung 3: Anteile an Abfall-basierten Brennstoffen am thermischen Input von Anlagen zur Herstellung von Klinker in verschiedenen Industrieländern weltweit für das Jahr 2007, nach (CAC, 2011; AT VÖZ, 2011; Cemsuisse, 2012; HDC, 2012; VDZ, 2008)

Nach Abbildung 3 weist die Niederlande den höchsten Substitutionsgrad auf. Allerdings gibt es dort nur ein Zementwerk; insofern ist dieser Prozentsatz nicht repräsentativ. In Deutschland liegt der Mittelwert für alle 34 Standorte mit Klinkerproduktion für das Jahr 2007 bei 52 %. Dabei gibt es mehrere Werke mit einer Substitutionsrate von 100 %, d.h. diese setzen ausschließlich Abfall-basierte Brennstoffe ein. Vor diesem Hintergrund können aus den in Deutschland gemachten Erfahrungen und den gewonnenen Erkenntnissen wichtige Schlüsse gezogen werden. Die Substitutionsrate hat sich in Deutschland in den vergangenen 25 Jahren kontinuierlich erhöht (Abbildung 4). Dabei wurde in den Jahren 2010 bis 2011 erstmals eine Stagnation registriert.

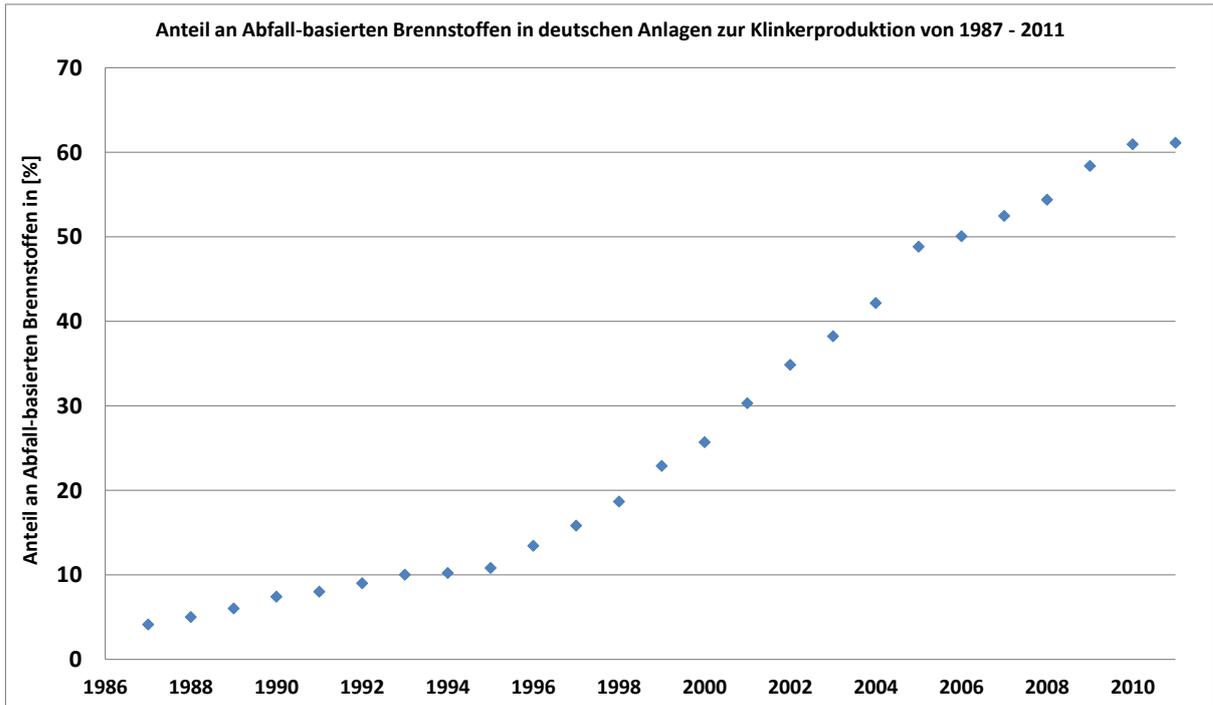


Abbildung 4: Anteil an Abfall-basierten Brennstoffen am thermischen Input der deutschen Anlagen zur Klinkerherstellung von 1987-2011, nach (VDZ, 1998, ...,VDZ, 2012; Scheuer, 2003; Wirthwein/Hoenig, 2010)

Die wichtigsten dabei eingesetzten Abfall-basierten Brennstoffe sind in Tabelle 2 zusammengestellt und in Abbildung 5 visualisiert.

Tabelle 2: Art und Menge der Abfall-basierten Brennstoffe, die in deutschen Anlagen zur Klinkerherstellung im Zeitraum 1998 – 2011 eingesetzt wurden, nach (VDZ, 1999; ... ;VDZ, 2012)

Abfall-basierte Brennstoffe [t/a]	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Altreifen	229	236	248	237	225	247	290	288	265	289	266	245	253	286
Altöl	168	181	140	128	125	116	100	92	69	85	80	73	61	66
Fraktionen aus Industrie-/Gewerbeabfällen, wie Kunststoffe, Papier, Textilien etc.	176	290	372											
Zellstoff, Papier und Pappe				84	43	156	218	237	244	236	150	175	133	63
Kunststoffe				67	128	177	229	309	363	452	460	556	527	474
Verpackungen				12	64	9	13	3				1		
Abfälle aus der Textilindustrie				5	5	15	2		9		2	9	11	10
Sonstige				250	231	269	410	567	754	907	936	911	931	1096
Tiermehle und -fette				245	380	452	439	355	317	293	231	204	182	187
Aufbereitete Fraktionen aus Siedlungsabfällen				102	106	155	157	198	212	186	220	188	287	336
Altholz	76	77	79	72	63	48	42	42	14	13	12	13	8	8
Abfalllösemittel	18	24	31	33	41	48	72	101	93	100	102	81	98	104
Bleicherde	13	13	23	29	15	20	11	11	4					
Klärschlamm						4	48	157	238	254	267	263	276	304
Teppichabfälle	18	20												
Sonstige, wie Ölschlamm	84	82	176	8	12	17	20	28	32	90	175	78	146	125
Organische Destillationsrückstände														

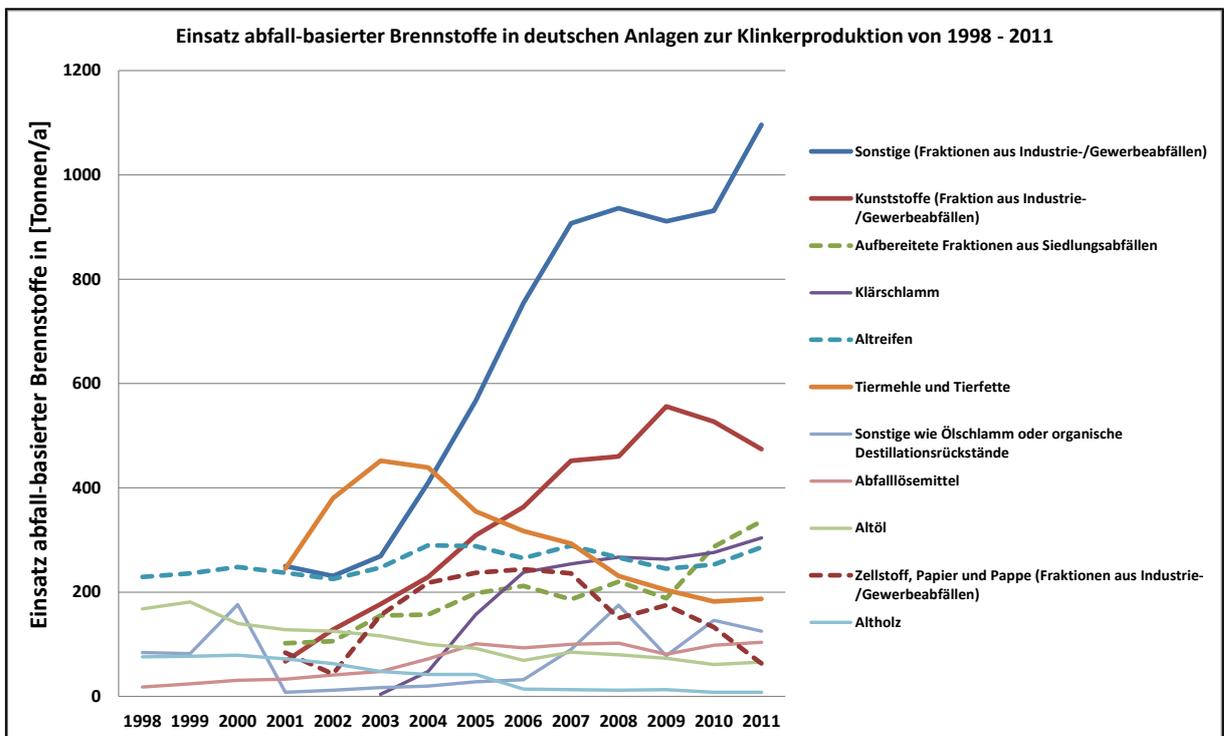


Abbildung 5: Entwicklung des Einsatzes von Abfall-basierten Brennstoffen in deutschen Anlagen zur Klinkerherstellung von 1998 – 2011, nach (VDZ, 1999; ... ;VDZ, 2012); die in Tabelle 2 aufgeführten weniger bedeutsamen Abfall-basierten Brennstoffe, wie z.B. Verpackungen, Abfälle aus der Textilindustrie, Teppichabfälle und Bleicherde, sind in der Graphik nicht berücksichtigt.

Aus Tabelle 2 und Abbildung 5 ergibt sich, dass die Einsatzmengen einiger Abfall-basierter Brennstoffe recht konstant ist, wie für Altreifen und Abfalllösemittel, während die Mengen für andere, insbesondere für "Sonstige Fraktionen aus Industrie-/Gewerbeabfällen", "Kunststoffe als Fraktion von Industrie-/Gewerbeabfällen" und Klärschlämme in den vergangenen Jahren stark angestiegen sind.

Im Gegensatz dazu sind die Einsatzmengen anderer Abfall-basierter Brennstoffe, wie Tiermehle und –fette, Altöl, Altholz und Zellstoff/Papier/Pappe deutlich gesunken.

3.3.2 Einsatz von Abfall-basierten Brennstoffen und seine Regulierung

Die Zusammensetzung der in Tabelle 2 und Abbildung 4 genannten Abfall-basierten Brennstoffe ist unterschiedlich genau. Während für Altreifen, Altholz, Altöl und Klärschlamm die Zusammensetzung ziemlich genau angegeben werden kann und diese recht stabil ist, kann sie für Abfallkunststoffe und aufbereitete Fraktionen aus Siedlungsabfällen beträchtlich schwanken; besonders die sonstigen Fraktionen aus Industrie- und Gewerbeabfällen setzen sich aus einem großen Spektrum unterschiedlicher Abfälle zusammen.

In Tabelle 3 sind als Übersicht die Abfall-basierten Brennstoffe zusammengestellt, die in den 34 deutschen Standorten zur Klinkerherstellung eingesetzt werden. Diese Zusammenstellung erfolgte auf der Grundlage der verfügbaren immissionsschutzrechtlichen Genehmigungen, die zusammen mit den Emissionsdaten im Sommer 2013 veröffentlicht wurden⁵. Auf dieser Grundlage sind in Tabelle 3 die öffentlich verfügbaren Informationen nach Bundesländern, zuständigen Behörden und den Betreibern zusammengestellt. Die Auswertung dieser Tabelle ergibt, dass:

- a) für 7 Anlagen zur Klinkerherstellung die verfügbaren Genehmigungen keine Angaben oder Auflagen bezüglich Abfall-basierten Brennstoffen enthalten.
- b) für 21 Anlagen zur Klinkerherstellung nur der Einsatz weniger Abfall-basierter Brennstoffe genehmigt ist. Dabei stammen alle genehmigten Brennstoffe aus nicht gefährlichen Abfällen.
- c) in 6 Anlagen zur Klinkerherstellung der Einsatz einer Vielzahl von Abfall-basierten Brennstoffen genehmigt ist. Sie sind alle im Europäischen Abfallkatalog enthalten (EC Waste List, 2000) und enthalten vor allem organische Verbindungen. In einem extremen Fall (siehe Lafarge Karlsdorf GmbH) ist der Einsatz von Abfällen mit mehr als 300 Abfallschlüsselnummern gestattet. Für 5 der 6 Anlagen ist auch der Einsatz von gefährlichen Abfällen genehmigt, besonders solche aus der chemischen Industrie. Es besteht die Auffassung, dass der Einsatz einer Vielzahl von unterschiedlichen Abfällen in Zementanlagen vertretbar ist, d.h. er ist nicht beschränkt auf wenige ausgewählte Abfälle (Holcim/GTZ, 2006; Lechtenberg/Diller, 2012). Allerdings entspricht diese Position nicht dem Leitfaden von Nordrhein-Westfalen, der mangels einer nationalen Regelung auch von den zuständigen Behörden in anderen Bundesländern angewandt wird (NRW MUNLV, 2005). Dieser Leitfaden führt in einer Positivliste „Abfälle auf, über die im Rahmen der energetischen Verwertung bereits umfassende Erfahrungen der Genehmigungs- und Überwachungsbehörden in Nordrhein-Westfalen vorliegen“ (NRW MUNLV, 2005). Diese Positivliste ist in Tabelle 4 wiedergegeben.

⁵ Der Bundesverband Bürgerinitiativen Umweltschutz e.V. (BBU) mit Sitz in Bonn hat im Sommer 2013 die bis 2010 verfügbaren immissionsschutzrechtlichen Genehmigungen aller 34 deutschen Zementwerke unter <http://www.bbu-online.de/Arbeitsbereiche/Umweltinformationsrecht/Arbeitsbereiche%20Umweltinformationsrecht.html> veröffentlicht.

Tabelle 3: Informationen und Anforderungen zu den Abfall-basierten Brennstoffen und Rohstoffen, die in den 34 deutschen Anlagen zur Klinkerherstellung eingesetzt werden; diese Angaben sind mittels der verfügbaren Genehmigungen zusammengestellt

Legend: RP = Regierungspräsidium, LRA = Landratsamt, LUA = Landesumweltamt, SGAA = Staatliches Gewerbeaufsichtsamt, BZR = Bezirksregierung, SGD = Struktur- und Genehmigungsdirektion, LVA = Landesverwaltungsamt, StUA = Staatliches Umweltamt

Laufende Nummer der Bundesländer	der	Laufende Nummer der zuständigen Behörden	Bundesland und zuständige Behörde	Laufende Nummer der Standorte mit Klinkerproduktion	Deutsche Anlagen zur Klinkerherstellung und der Einsatz von Abfall-basierten Brennstoffen und Rohstoffen		
					Name des Betreibers	Standort	Art der genehmigten Abfälle
1			BADEN-WÜRTTEMBERG				
	1	RP Karlsruhe	1	HeidelbergCement AG	Leimen	Keine Information in den verfügbaren Genehmigungen	Keine Anforderungen in den verfügbaren Genehmigungen
			2	Lafarge Zement Wössingen GmbH	Walzbachtal	Altreifen, Gummiabfälle, Fluff, Tiermehl.	Keine Anforderungen in den verfügbaren Genehmigungen
	2	RP Stuttgart	3	Schwenk Zement KG	Mergelstetten	Brennstoffe aus Gewerbeabfall und Kommunalabfall, Klärschlamm, Altholz, Knochen-, Tier- und Blutmehl, Dinkelspelzen	2009 wurde ein Überwachungs- und Qualitätsmanagementkonzept vorgeschrieben. Es enthält Grenzwerte für Schwermetalle und die maximale Dosiermenge.
	3	RP Tübingen	4	HeidelbergCement AG	Schelklingen	Brennstoffe aus Gewerbeabfall, Klärschlamm, Tiermehl.	2001 wurde ein Überwachungs- und Qualitätsmanagementkonzept vorgeschrieben. Es enthält Grenzwerte für Schwermetalle und Begrenzung der maximalen Dosiermenge.
			5	Holcim GmbH	Dotternhausen	Keine Information in den verfügbaren Genehmigungen	Keine Anforderungen in den verfügbaren Genehmigungen

der Bundes- zustän- digen	Bundesland und zuständi-	Standor- te mit Klinker-	Deutsche Anlagen zur Klinkerherstellung und der Einsatz von Abfall-basierten Brennstoffen und Rohstoffen			
6	Schwenk Zement KG	Allmendingen	Altreifen, Brennstoff aus Gewerbe- und Kommunalabfall, Garten- und Parkabfall, Sperrmüll	2009 wurde ein Überwachungs- und Qualitätsmanagementkonzept vorgeschrieben. Es enthält Grenzwerte für Schwermetalle und Begrenzung der maximalen Dosiermenge.		
2	BAYERN					
4	LRA Donau-Ries	7 Märker Zement GmbH	Harburg	Altreifen, Abfalllösemittel, Altöl, fester Brennstoff aus der Leder- und Textilverarbeitung, aus Kunststoff- und Verpackungsabfall, Altholz, Klärschlamm, mineralölverunreinigte Hilfsmittel	Grenzwerte für den Gehalt an Schwermetallen, Chlor und Schwefel und Begrenzung der maximalen Dosiermenge für verschiedene Abfälle, Festlegung der durchzuführenden Überwachung.	
5	LRA Main-Spessart	8 Schwenk Zement KG	Karlstadt	Altreifen, Brennstoff aus Gewerbeabfall, Klärschlamm, Tiermehl.	Grenzwerte für den Gehalt an Schwermetallen, Chlor und Schwefel und Begrenzung der maximalen Dosiermenge für verschiedene Abfälle, Festlegung der durchzuführenden Überwachung.	
		9 HeidelbergCement AG	Triefenstein	Altreifen, Abfalllösemittel ohne halogenier- te Verbindungen, Altöl, zerkleinerte bi- tuminöse Dachpappe, Kunststoffabfall, Teppichabfälle, Abfall aus der Papierindust- rie, Tiermehl.	Begrenzung der maximalen Dosiermenge; keine Anforderungen an den Schadstoffgehalt in den verfügbaren Genehmigungen.	
6	LRA Rosenheim	10 Südbayrisches Portland-Zementwerk Gebr. Wieshöck & Co. GmbH	Rohrdorf	Altreifen, Brennstoff aus Gewerbeabfall, Nebenprodukte aus der Verpackungs- produktion, flüssige Abfall-basierte Brennstoffe (nicht spezifiziert).	Begrenzung der maximalen Dosiermenge; keine Anforderungen an den Schadstoffgehalt in den verfügbaren Genehmigungen.	
7	LRA Schwandorf	11 HeidelbergCement AG	Burglengenfeld	Altreifen, zerkleinerter Gummiabfall, Brennstoff aus Gewerbeabfall, Altholz, mit Steinkohleteeröl imprägniertes Holz, Klär- schlamm, CaF ₂ -haltige Kohleelektroden.	Grenzwerte für den Gehalt an Schwermetallen, Chlor und Schwefel im Klärschlamm, der über den Hauptbrenner dosiert werden muss, Begrenzung der maximalen Dosiermenge für verschiedene Abfälle, Festlegung der durchzu- führenden Überwachung.	

der Bundes- zustän- digen	Bundesland und zuständi-	Standor- te mit Klinker-	Deutsche Anlagen zur Klinkerherstellung und der Einsatz von Abfall-basierten Brennstoffen und Rohstoffen			
8	LRA Weißenburg- Gunzenhausen	12	Portland-Zementwerke GmbH & Co. KG	Solnhofen	Altreifen, Brennstoff aus Gewerbeabfall, Tiermehl und -fett.	Grenzwerte für den Gehalt an Schwermetallen, Chlor und Schwefel und Begrenzung der maxi- malen Dosiermenge für verschiedene Abfälle, Festlegung der durchzuführenden Überwa- chung.
3 BRANDENBURG						
9	LUA Branden- burg	13	Cemex Ost-Zement GmbH	Rüdersdorf	Große Vielfalt unterschiedlicher Abfälle, wie Fluff, Abfall aus der Papierproduktion, Kunststoffabfall, auch von Verpackungen aus dem Recycling, Altholz und viele mehr.	Grenzwerte für den Gehalt an Schwermetallen, Chlor und Schwefel (PCB und PCP für Brenn- stoff aus Kommunalabfall, Begrenzung der maximalen Dosiermenge für verschiedene Abfälle, Festlegung der durchzuführenden Überwachung.
4 HESSEN						
10	RP Darmstadt	14	Dyckerhoff AG	Amöneburg	Abfalllösemittel, Brennstoff aus Abfall (Fluff)	Keine Anforderungen in den verfügbaren Genehmigungen
12	RP Kassel	15	Zement- und Kalkwerke Otterbein GmbH & Co. KG	Großenlüders- Müs	Fluff, Klärschlamm, Tier- und Blutmehl, öhlhaltige Bleicherde, Flugasche, Gießereial- tsand.	Grenzwerte für den Gehalt an Schwermetallen, Chlor, Fluor und Schwefel, Begrenzung der maximalen Dosiermenge für verschiedene Abfälle, Festlegung der durchzuführenden Überwachung.
5 NIEDERSACHSEN						
13	SGAA Hannover	16	Holcim AG	Höver	Große Vielfalt unterschiedlicher Abfälle (136 Abfallschlüsselnummern), wie Abfall- lösemittel (auch halogenierte), Altreifen, Tiermehl, Ruß, flüssige chemische Abfälle (auch mit halogenierten Verbindungen).	Grenzwerte für den Gehalt an Schwermetallen, Chlor und PCB, PCDD/F, EOX; Begrenzung der maximalen Dosiermenge für verschiedene Abfälle, Festlegung der durchzuführenden Überwachung.

Einfluss der Mitverbrennung von Abfällen in deutschen Zementwerken auf die Abgasemission

		17	HeidelbergCement AG (former Teutonia Zement AG)	Hannover	Brennstoffe aus Holz, Papier und Pappe, Rinden- und Korkabfall, Textilabfälle, Kunststoffabfall. Farb- und Lackschlamm, Abfall vom Beschichten und Drucken, beladene Aktivkohle, verbrauchtes Ionenaustauschharz, Einwegkameras, organischer Abfall, Klärschlamm, Tiermehl.	Grenzwerte für den Gehalt an Schwermetallen, Festlegung eines Qualitätsmanagementsystems und der durchzuführenden Überwachung.	
6	NORDRHEIN- WESTFALEN						
	14	18	BZR Arnsberg	Wittekind Hugo Miebach & Söhne	Ewitte	Keine Anforderungen in der verfügbaren Genehmigung	Keine Anforderungen in der verfügbaren Genehmigung
		19		Seibel & Söhne GmbH & Co. KG	Ewitte	Brennstoff aus Abfall, Kunststoffabfall, Abfall aus der Papierproduktion, Papier- und Pappeverpackungen, gemischte Verpackungen, Gummiabfälle	Grenzwerte für den Gehalt an Schwermetallen, Festlegung des Mindest-Heizwertes und der durchzuführenden Überwachung.
		20		Gebr. Seibel GmbH & Co. KG	Ewitte	Große Vielfalt unterschiedlicher Abfälle, wie Abfalllösemittel, Kunststoffabfall, Rinden- und Korkabfall, tierischer und pflanzlicher Abfall, Klärschlamm, Reaktions- und Destillationsrückstände, kohleteerhaltige Bitumenmischungen, beladene Aktivkohle; Ruß und weitere.	Limits for the content of heavy metals, chlorine, fluorine and sulphur, PCB in spent solvents, prescribed monitoring
		21		Spenner Zement GmbH & Co. KG	Ewitte	Keine Anforderungen in den verfügbaren Genehmigungen	Keine Anforderungen in den verfügbaren Genehmigungen

Einfluss der Mitverbrennung von Abfällen in deutschen Zementwerken auf die Abgasemission

	22	Dyckerhoff AG	Geseke	Große Vielfalt unterschiedlicher Abfälle, wie Abfalllösemittel (die auch organische Halogenverbindungen enthalten), Brennstoff aus Abfall (Fluff), Kunststoff-abfall, Holz- und Rindenabfall, Alttextilien, Verbundverpackungen, Gummiabfälle, Farb- und Lackabfall, Pulverbeschichtungsabfall, Brennstoff aus Kommunalabfall, Reaktions- und Destillationsrückstände (auch mit halogenierten organischen Verbindungen) und viele weitere Abfälle aus der chemischen Industrie, Tiermehl und weitere Abfälle.	Grenzwerte für den Gehalt an Schwermetallen, Chlor, Fluor und PCDD/F in Abfalllösemitteln, Festlegung der durchzuführenden Überwachung und des Qualitätsmanagements.
	23	HeidelbergCement AG	Geseke	Keine Anforderungen in den verfügbaren Genehmigungen	Keine Anforderungen in den verfügbaren Genehmigungen
15	24	BZR Detmold HeidelbergCement AG	Paderborn	Altreifen, Altholz, Brennstoff aus Abfall (Fluff), Klärschlamm, Tiermehl und -fett, Papierschlamm, Schweröl.	Grenzwerte für den Gehalt an Schwermetallen im Schweröl, Begrenzung der maximalen Dosiermenge für die verschiedenen Abfälle, keine weiteren Anforderungen in der verfügbaren Genehmigung.
17	25	BZR Münster HeidelbergCement AG	Ennigerloh	Altreifen, Altholz, Brennstoff aus Abfall (Fluff), Tiermehl	Begrenzung der maximalen Dosiermenge für die verschiedenen Abfälle, keine weiteren Anforderungen in der verfügbaren Genehmigung.
	26	Dyckerhoff AG	Lengerich	Abfalllösemittel (die auch organische Halogenverbindungen enthalten), Brennstoff aus Abfall (Fluff), Kunststoff-abfall, Rinden- und Korkabfall, Papierschlamm, Alttextilien, Farb- und Lackabfall, Altholz, Tiermehl	Grenzwerte für den Gehalt an Schwermetallen, Chlor und PCDD/F in Abfalllösemitteln, Festlegung der durchzuführenden Überwachung.
	27	Cemex West-Zement GmbH	Beckum	Altreifen, Kunststoffabfall, Brennstoff aus Abfall, Rinden- und Korkabfall, Altholz, Schlamm aus der Papierproduktion, Alttextilien, Farb- und Lackabfall, Pulverbeschichtungsabfall, Papier-, Pappe- und Kunststoffverpackung, Gummiabfälle.	Grenzwerte für den Gehalt an Schwermetallen, Festlegung der durchzuführenden Überwachung und des Qualitätsmanagements.

Einfluss der Mitverbrennung von Abfällen in deutschen Zementwerken auf die Abgasemission

		28	Phoenix Zementwerke Krogbeumker GmbH & Co. KG	Beckum	Altöl, Produktionsabfall (nicht spezifiziert), Tiermehl; keine zusätzliche Information	Keine Anforderungen in den verfügbaren Genehmigungen		
7	RHEINLAND-PFALZ	18	SGD Nord	29	Portlandzementwerk Wotan H. Schneider KG	Üxheim-Ahütte	Keine Anforderungen in den verfügbaren Genehmigungen	Keine Anforderungen in den verfügbaren Genehmigungen
		19	SGD Süd	30	Dyckerhoff AG	Göllheim	Große Vielfalt unterschiedlicher Abfälle, wie Altreifen, Abfalllösemittel (die auch organische Halogenverbindungen enthalten), Brennstoff aus Abfall (Fluff), Kunststoffabfall, Holz- und Rindenabfall, Alttextilien, Verbundverpackungen, Gummiabfälle, Farb- und Lackabfall, Pulverbeschichtungsabfall, Brennstoff aus Kommunalabfall, Reaktions- und Destillationsrückstände (auch mit halogenierten organischen Verbindungen) und viele weitere Abfälle aus der chemischen Industrie, Klärschlamm, Tiermehl, Gießereialsand, und weitere Abfälle	Grenzwerte für den Gehalt an Schwermetallen, Chlor, Fluor, Schwefel, PCB und PCP, Begrenzung der maximalen Dosiermenge für die verschiedenen Abfälle, Festlegung der durchzuführenden Überwachung.
		8	SACHSEN-ANHALT	20	LVA Halle	31	Lafarge Zement Karlsdorf GmbH	Karlsdorf

Einfluss der Mitverbrennung von Abfällen in deutschen Zementwerken auf die Abgasemission

		32	Schwenk Zement AG	Bernburg	Große Vielfalt unterschiedlicher Abfälle (mehr als 300 Abfallschlüsselnummern), wie Altreifen, Abfalllösemittel (die auch organische Halogenverbindungen enthalten), Brennstoff aus Abfall (Fluff), Kunststoffabfall, Holz- und Rindenabfall, Alttextilien, Verbundverpackungen, Gummiabfälle, Farb- und Lackabfall, Pulverbeschichtungsabfall, Brennstoff aus Kommunalabfall, Reaktions- und Destillationsrückstände (auch mit halogenierten organischen Verbindungen) und viele weitere Abfälle aus der chemischen Industrie, Klärschlamm, Tiermehl, Gießereialtsand, und weitere Abfälle.	Grenzwerte für den Gehalt an PCB und PCP im Altöl und an anderen persistenten organischen Schadstoffen in allen gefährlichen Abfällen, Festlegung der durchzuführenden Überwachung.		
9	SCHLESWIG-HOLSTEIN							
		21	StUA Itzehoe	33	Holcim AG	Lägerdorf	Brennstoff aus Abfall, Klärschlamm, Altdachpappe (die Teer oder Bitumen enthält), feste und flüssige nicht gefährliche und gefährliche Abfälle (nicht spezifiziert).	Grenzwerte für den Gehalt an Hg, Cd, Tl und Cr sowie zusätzlich an Chlor für gefährliche Abfälle, Festlegung der durchzuführenden Überwachung.
10	THÜRINGEN							
		22	LUA Weimar	34	Dyckerhoff AG - Deuna Zement GmbH	Deuna	Keine Anforderungen in den verfügbaren Genehmigungen	Keine Anforderungen in den verfügbaren Genehmigungen

Tabelle 4: Positivliste von Abfällen, die in Anlagen zur Zement- oder Kalkherstellung sowie in Großfeuerungsanlagen eingesetzt werden können/dürfen (NRW MUNLV, 2005)

AVV-Schlüssel	AVV-Bezeichnung	Exemplarische Erläuterung
02 01 04	Kunststoffabfälle ohne Verpackungen	PUR-Schaum, PE-Verbundstoffe
02 01 07	Abfälle aus der Forstwirtschaft	
03 01 01	Rinden und Korkabfälle	
03 01 05	Sägemehl, Späne, Abschnitte, Holz, Spanplatten und Furniere mit Ausnahme derjenigen, die unter 03 01 04 fallen	
03 03 01	Rinden und Holzabfälle	
03 03 02	Sulfitschlämme (aus der Rückgewinnung von Kochlaugen)	nur entwässert
03 03 07	mechanisch abgetrennte Abfälle aus der Auflösung von Papier- und Pappabfällen	Spuckstoffe
03 03 08	Abfälle aus dem Sortieren von Papier und Pappe für das Recycling	Ungeeignete Papierqualitäten, sonstige hochkalorische Störstoffe
04 02 09	Abfälle aus Verbundmaterialien (imprägnierte Textilien, Elastomer, Plastomer)	Textilien, Teppiche, Vliese und Dämmstoffe aus der Autoinnenausstattung, Hygieneprodukte (jeweils Rohmaterial und Ausschussware)
04 02 21	Abfälle aus unbehandelten Textilfasern	Rohmaterial, Ausschussware etc. aus der Textilindustrie
04 02 22	Abfälle aus verarbeiteten Textilfasern	Teppichreste, Autotextilien, (jeweils Rohmaterial und Ausschussware, Randabschnitte),
07 02 13	Kunststoffabfälle	Kunststoff- und Gummiabfälle
08 01 12	Farb- und Lackabfälle mit Ausnahme derjenigen, die unter 08 01 11 fallen	nur ausgehärtete Farben und Lacke
08 02 01	Abfälle von Beschichtungspulver	
09 01 07	Filme und fotografische Papiere, die Silber oder Silberverbindungen enthalten	
09 01 08	Filme und fotografische Papiere, die kein Silber und keine Silberverbindungen enthalten	
12 01 05	Kunststoffspäne und Drehspäne	Automobilkunststoffe, PU-Verbunde, Spritz-gussteile, Schaumstoffe
15 01 01	Verpackungen aus Papier- und Pappe	Dekor-, Verpackungs- und Etikettenpapier (Reste aus der Herstellung) auch wachsgetränktes Papier
15 01 02	Verpackungen aus Kunststoff	Verpackungsfolien (Rohmaterial und Ausschussware), Schaumstoffe, Polystyrol
15 01 03	Verpackungen aus Holz	Defekte Paletten, Kisten etc.
15 01 05	Verbundverpackungen	Kunststoff- / Papierverbunde
15 01 06	gemischte Verpackungen	Verpackungen der Gruppe 15 01
15 02 03	Aufsaug- und Filtermaterialien, Wischtücher und Schutzkleidung mit Ausnahme derjenigen, die unter 15 02 02 fallen	Aufsaug- und Filtermaterialien, Wischtücher und Schutzkleidung
17 02 01	Holz	
17 02 03	Kunststoff	
19 05 01	nicht kompostierte Fraktion von Siedlungs- und ähnlichen Abfällen	
19 12 01	Papier und Pappe	
19 12 04	Kunststoff und Gummi	
19 12 07	Holz mit Ausnahme desjenigen, das unter 19 12 06 fällt	
19 12 08	Textilien	
19 12 10	„Brennbare Abfälle (Brennstoffe aus Abfall)* 1)	heizwertreiche Fraktion aus der mech. bzw. mech.- biolog. Aufbereitung von Abfällen (90 – 95 % der Brennstoffmischungsbestandteile sind aus der Positivliste und/oder aus den Abfallgruppen 20 02 und/oder 20 03 und/oder aus ASN 170904 bekannt)
	1) auch als 19 12 12 deklarierte Abfälle	
16 01 03	Altreifen	Altreifen, Reifenschnitzel
03 03 05	De-inking-Schlämme aus dem Papierrecycling	Beide Schlämme werden im Kraftwerk dauerhaft eingesetzt. Aufgrund der Besonderheiten (niedriger Heizwert, pastöse Eigenschaften) werden diese Abfälle gesondert aufgeführt.
03 03 10	Faserabfälle, Faser-, Füller- und Überzugsschlämme aus mechanischer Abtrennung	ASN 03 03 05 und/oder ASN 03 03 10 kann im Sinne eines Abfalls der Positivliste im Kraftwerk eingesetzt werden.

3.4 Ökobilanz-Betrachtungen

Aus Platzgründen werden hier nur die Schlussfolgerungen zusammenfassend dargestellt, die als Ergebnis einer ausführlichen Untersuchung gezogen wurden (Galvez Martos/Schönberger, 2013).

Es gibt eine Vielzahl von Ökobilanzstudien zur Mitverbrennung von Abfall-basierten Brennstoffen in Zementwerken. Die Ergebnisse hängen von einer Reihe von Faktoren ab, insbesondere von der gewählten funktionellen Einheit, der gewählten Methodik, den Systemgrenzen, den berücksichtigten Parametern, den getroffenen Annahmen, den Datenquellen und dem verwendeten Allokationsansatz. Die übliche Ökobilanz folgt einem vereinfachten Ansatz zur Berechnung des Treibhauspotenzials. Üblicherweise wird die Vermeidung von fossilen Brennstoffen als Hauptvorteil bei Abfallszenarios für Zementöfen gesehen, obwohl die Ergebnisse stark von den gemachten Annahmen abhängen und eine nicht unerhebliche Unsicherheit aufweisen.

In den meisten Studien über die Emission von Treibhausgasen aus Zementwerken wird übersehen, dass die Mitverbrennung von Abfall-basierten Brennstoffen in Zementwerken mit einem Rückgang der Energieeffizienz verbunden ist, der den Vorteil der aus den Abfällen freigesetzten biogenen Kohlendioxidemissionen egalisiert. Als Beispiel wird die Entwicklung in Deutschland herangezogen. In den 34 deutschen Anlagen zur Klinkerherstellung stieg die Substitution von fossilen durch Abfall-basierte Brennstoffen in den vergangenen 10 Jahren kontinuierlich an (Abbildungen 4 und 6). Abbildung 6 zeigt diesen Anstieg, der mit dem spezifischen Energieverbrauch korreliert. D.h. die Zunahme der Substitution geht mit einem Rückgang der Energieeffizienz einher. Die Energieeffizienz nimmt möglicherweise als Folge inhärenter Eigenschaften der Abfall-Basierten Brennstoffe ab, die durch Vorbehandlungstechniken beeinflusst werden können. Vor diesem Hintergrund spielt bei der Bewertung der Zementherstellung die Mitverbrennung von Abfall-basierten Brennstoffen hinsichtlich des Treibhauseffektes nur eine untergeordnete Rolle, die statistisch nicht signifikant ist. Die viel wirkungsvollere Maßnahme ist die Reduzierung des Klinkergehaltes im Zement.

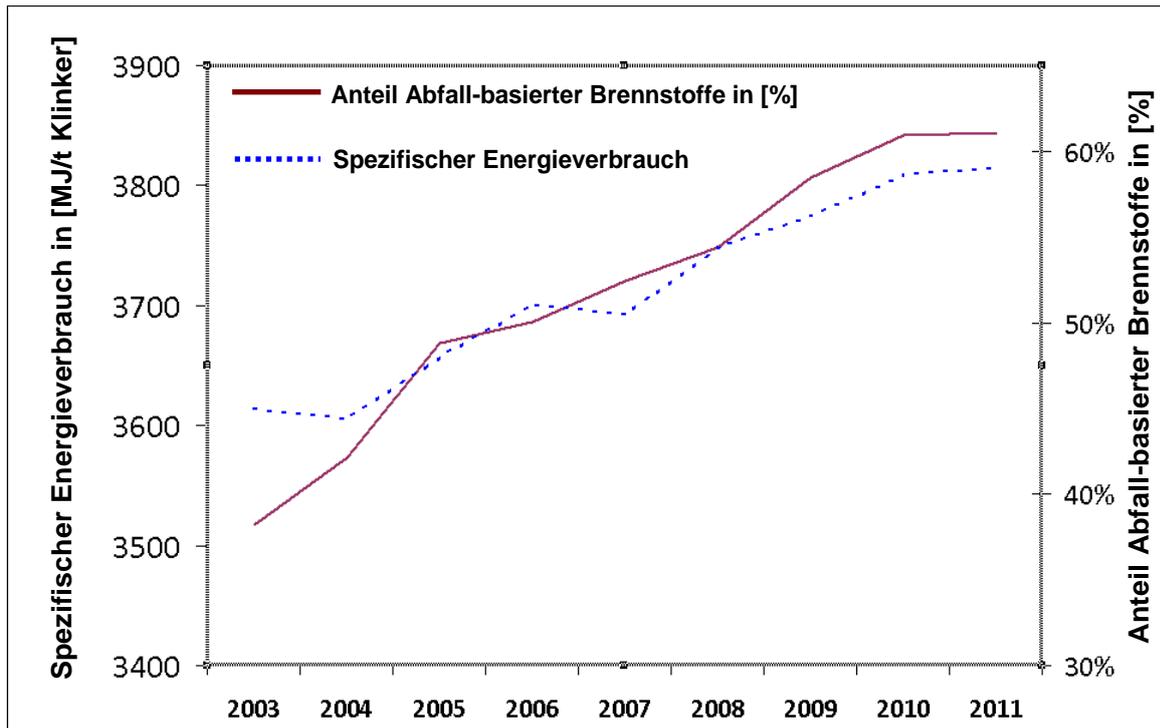


Abbildung 6: Korrelation zwischen dem spezifischen Bedarf an thermischer Energie der 34 deutschen Zementwerke und dem Substitutionsgrad von fossilen durch Abfall-basierte Brennstoffe (Mittelwerte von 2003 - 2010), (Galvez Martos/Schönberger, 2013)

4. Auswirkungen der Abfallmitverbrennung auf die Abgasemissionen

4.1 TOC, CO und Benzol

4.1.1 Rechtliche Regelung und Umsetzung

Grundlage der deutschen Regelung zur Mitverbrennung von Abfällen ist die europäische Abfallverbrennungsrichtlinie (EU WID, 2000), die in Anhang VI der IED (EU IED, 2010) integriert wurde. Die spezifischen Regelungen zur Mitverbrennung in Zementwerken sind bezüglich der Parameter TOC und CO in Anhang VI, TEIL 4, Nrn. 2.3 und 2.4 IED enthalten⁶.

Für Zementwerke gilt nach Nr. 2.3 für organische Stoffe, bezeichnet als organisch gebundener Gesamtkohlenstoff (TOC), der Grenzwert von 10 mg/Nm³ mit folgender Ausnahmeregelung: „Die zuständigen Behörden können Ausnahmen genehmigen, wenn der vorhandene organisch gebundene Gesamtkohlenstoff nicht durch die Verbrennung von Abfällen entstehen.“ Und nach Nr. 2.4 können die zuständigen Behörden für CO Emissionsgrenzwerte festlegen, d.h. die Richtlinie enthält für CO keinen Grenzwert.

⁶ Die genaue Bezeichnung lautet: Anhang VI (Technische Bestimmungen für Abfallverbrennungs- und Abfallmitverbrennungsanlagen), TEIL 4 (Bestimmung der Emissionsgrenzwerte für die Mitverbrennung von Abfällen) Nr. 2 (Besondere Vorschriften für Zementöfen, in denen Abfälle mitverbrannt werden), Nr. 2.3 (Gesamtemissionsgrenzwerte (in mg/Nm³) für SO₂ und organisch gebundenen Gesamtkohlenstoff (TOC)), Nr. 2.4 Gesamtemissionsgrenzwerte für CO

In Deutschland wurde die Abfallverbrennungsrichtlinie im Wesentlichen durch Änderung der seinerzeit bestehenden Verordnung über Verbrennungsanlagen für Abfälle und ähnliche brennbare Stoffe umgesetzt. Dabei enthielt schon der erste Entwurf (DE 17. BImSchV-Entwurf, 2002) die rohstoffbedingte Ausnahmemöglichkeit für TOC und SO₂, die im Vergleich zur europäischen Formulierung präzisiert wurde. *„Die zuständige Behörde kann auf Antrag des Betreibers Ausnahmen für Schwefeldioxid und Gesamtkohlenstoff genehmigen, sofern diese Ausnahmen auf Grund der Zusammensetzung der natürlichen Rohstoffe erforderlich sind und ausgeschlossen werden kann, dass durch die Verbrennung von Abfällen oder Stoffen nach § 1 Absatz 1 zusätzliche Emissionen an Gesamtkohlenstoff und Schwefeldioxid entstehen.“* Diese Ausnahmeregelung ging im Wesentlichen aus Untersuchungen der deutschen Zementindustrie hervor, die z.B. in (Zunzer, 2002) veröffentlicht wurden. In der weiteren Diskussion wurde mehrfach betont, insbesondere in (DE 17. BImSchV-Entwurf, 2003), dass die *„Die Kohlenmonoxid und Gesamt-C-Emissionen von Zementwerken im Wesentlichen rohmaterialbedingt sind“*.

Bezüglich CO verlangte die novellierte 17. BImSchV (DE 17. BImSchV, 2003) ausdrücklich die Festlegung eines Grenzwertes und ging damit über die o.g. Kann-Bestimmung der Abfallverbrennungsrichtlinie hinaus.

Bei der Novellierung der 17. BImSchV im Zuge der IED-Implementierung wurden die vorgenannten Ausnahmeregelungen für TOC und CO beibehalten (Ziffern 2.4.1 und 2.4.2 der Anlage 3 der 17. BImSchV (DE IndEmissRLUVuaÄndV, 2013).

Wie vorerwähnt basiert die Ausnahmeregelung auf Untersuchungen der deutschen Zementindustrie. In den letzten 14 verfügbaren Ausgaben der vom Verband der deutschen Zementindustrie (VDZ) jährlich herausgegebenen „Umweltdaten der Deutschen Zementindustrie“ heißt es: *„Die Abgaskonzentrationen von CO und organisch gebundenem Kohlenstoff sind bei Energieumwandlungsanlagen, wie z. B. Kraftwerken, ein Maß für den Ausbrand der eingesetzten Brennstoffe. Der Klinkerbrennprozess ist dagegen ein Stoffumwandlungsprozess, der aus Gründen der Klinkerqualität stets mit Luftüberschuss betrieben werden muss. In Verbindung mit langen Verweilzeiten im Hochtemperaturbereich führt dies zu einem vollständigen Brennstoffausbrand. Die auftretenden Emissionen von Kohlenstoffmonoxid und organischem Gesamtkohlenstoff stammen daher nicht aus der Verbrennung, sondern aus der thermischen Zersetzung organischer Bestandteile des Rohmaterials im Vorwärmer.“* (VDZ, 1998, ..., VDZ, 2012). Allerdings ist diese Aussage ebenso wie die Begründung der vorgenannten Ausnahmeregelung nur bedingt richtig. Sie gilt in dieser pauschalen Art nur für den Hauptbrenner und übersieht die Sekundärfeuerung, d.h. die Wirkung der Verbrennung am Ofeneinlauf bzw. im Kalzinator. Dies wird nachfolgend aufgezeigt.

Zuvor wird ein Überblick über die gegenwärtige Genehmigungssituation in den 34 Zementwerken gegeben. Die Informationen dazu sind in Tabelle 5 zusammengestellt.

Tabelle 5: Grenzwerte für die Abgasemissionen und die durchzuführende kontinuierliche Eigenüberwachung der 34 deutschen Zementwerke entsprechend der verfügbaren immissionsschutzrechtlichen Genehmigungen, Stand 2011⁵

Bundesland	Zuständige Behörde	Lfd. Nr.	Name des Betreibers	Standort	Staub	SO _x	NO _x	TOC	CO	Ben-zol	HCl	HF	NH ₃	Hg	O ₂	p	T	F	V
1 BADEN-WÜRTTEMBERG																			
	RP Karlsruhe	1	HeidelbergCement AG	Leimen	20	350	500	kein GW	kein GW		10	1		30					
		2	Lafarge Zement Wössingen GmbH	Walzbachtal	20	295	500	kein GW	kein GW	5	10	1		28					
	RP Stuttgart	3	Schwenk Zement AG	Mergelstetten	10	100	200	20	1000	5	10	1	30	30					
	RP Tübingen	4	HeidelbergCement AG	Schelklingen	20	300	500	kein GW	2500		10	1		30					
		5	Holcim GmbH	Dotternhausen	20	175	500	50	kein GW		10	1		30					
		6	Schwenk Zement AG	Allmendingen	20	350	350	kein GW	kein GW		10	1		30					
2 BAYERN																			
	LRA Donau-Ries	7	Märker Zement GmbH	Harburg	10	50	500	kein GW	kein GW	5	10	1 HSM		30/50					
	LRA Main-Spessart	8	Schwenk Zement AG	Karlstadt	10	kein GW	200	kein GW	6250		10	1		30					
		9	HeidelbergCement AG	Triefenstein	10	?	200	50	?		?	?		?					
	LRA Rosenheim	10	Südbayr. Portland-Zementwerk Gebr. Wieshöck	Rohrdorf	10	200	475	100	2500	5 HSM	10	1		30					
	LRA Schwandorf	11	HeidelbergCement AG	Burglengenfeld	14	50	333	kein GW	kein GW		10	1		30					
	LRA Weißenburg-Gunzenhausen	12	Portland-Zementwerke GmbH & Co.KG	Solnhofen	20	50	500	kein GW	kein GW	5	10	1		30					
3 BRANDENBURG																			
	LUA Brandenburg	13	Cemex Ost-Zement GmbH	Rüdersdorf	20	350	500	30	kein GW		10	1		30					
4 HESSEN																			
	RP Darmstadt	14	Dyckerhoff AG	Amöneburg	20	50	500	kein GW	2000		10	1		30					
	RP Kassel	15	Zement- und Kalkwerke Otterbein GmbH & Co.KG	Großenlüders-Müs	20	200	500	10	3000		10	1		30					
5 NIEDERSACHSEN																			
	SGAA Hannover	16	Holcim AG	Höver	14	400	317	70	3000		10	1		30					
		17	HeidelbergCement AG	Hannover	13.9	400	318	kein GW	3000		10	1		50					
6 NORDRHEIN-WESTFALEN																			
	BZR Arnsberg	18	Wittekind Hugo Miebach & Söhne	Ewitte	10	50	230	10	50		10	1		30					
		19	Seibel & Söhne GmbH & Co.KG	Ewitte	20	350	200	50	kein GW		10	1		30					
		20	Gebr. Seibel GmbH & Co.KG	Ewitte	10	200	200	100	kein GW		10	1		30					
		21	Spenner Zement GmbH & Co.KG	Ewitte	20	225	500	100	kein GW		10	1		50					
		22	Dyckerhoff AG	Geseke	12.5	200	245	100	50		10	1		30					
		23	HeidelbergCement AG	Geseke	20	350	500	kein GW	kein GW	5	30	3		50					
	BZR Detmold	24	HeidelbergCement AG	Paderborn	10	200	350	100	kein GW		10	1		30					
	BZR Münster	25	HeidelbergCement AG	Ennigerloh	11	kein GW	230	kein GW	kein GW					kein GW					
		26	Dyckerhoff AG	Lengerich	20	350	500	20	kein GW		10	1		30					
					13	350	275	20	kein GW		10	1		30					
		27	Cemex West-Zement GmbH	Beckum	12	kein GW	260	kein GW	kein GW					kein GW					
		28	Phoenix Zementwerke Krogbeumker GmbH & Co.KG	Beckum	12	kein GW	260	kein GW	kein GW					kein GW					
7 RHEINLAND-PFALZ																			
	SGD Nord	29	Portlandzementwerk Wotan H. Schneider KG	Üxheim-Ahütte	?	?	?	?	?					?					
	SGD Süd	30	Dyckerhoff AG	Göllheim	12	50	260	50 HSM	2000		10	1		30					
8 Sachsen-Anhalt																			
	LVA Halle	31	Lafarge Zement Karlsdorf GmbH	Karlsdorf	10	400	200	50	2000		10	1	30	50					
		32	Schwenk Zement AG	Bernburg	15	350	335	kein GW	kein GW	5	10	1		30					
9 SCHLESWIG-HOLSTEIN																			
	StUA Itzehoe	33	Holcim AG	Lägerdorf	20	285	500	kein GW	kein GW	5	10	1		50					
10 THÜRINGEN																			
	LUA Weimar	34	Dyckerhoff - Deuna Zement GmbH	Deuna	16	?	400	?	?	?				?					

Legende zu Tabelle 5

	Grenzwerte (GW) entsprechend den verfügbaren immissionsschutzrechtlichen Genehmigungen, die von der 17. BImSchV abweichen
	Kontinuierliche Eigenüberwachung, die nach den verfügbaren Genehmigungen durchzuführen ist
	Information liegt nicht vor
	x Daten zur Eigenüberwachung liegen vor
	HSM Halbstundenmittelwert

Es fällt auf, dass bezüglich dem Parameter TOC

- die Hälfte der Werke gar keinen TOC-Grenzwert haben, was weder mit den europäischen noch mit den deutschen Regelungen konform sein dürfte,
- bei den Werken mit Grenzwert nur ein Werk den Wert 10 mg/Nm^3 einhalten muss, während bei den anderen von der Ausnahmeregelung Gebrauch gemacht wurde; dabei wurden zum Teil 10-fach, in einem Fall sogar 20-fach höhere TOC-Werte festgelegt. Nachstehend wird gezeigt, dass dies nicht gerechtfertigt sein dürfte.

Bezüglich CO ist das Bild ähnlich. 19 Werke haben keinen CO-Grenzwert, wobei bei weiteren 3 Werken keine Informationen vorliegen, obwohl die 17. BImSchV die Festlegung eines Grenzwertes ausdrücklich verlangt (siehe oben). In den Fällen mit Grenzwert besteht wie für den TOC ein sehr uneinheitliches Bild; die Grenzwerte schwanken zwischen 50 und 6250 mg/Nm^3 .

Es ist nicht klar, wie es zu diesem erheblichen Vollzugsdefizit kommen konnte und weshalb die festgelegten Grenzwerte so stark schwanken. Wie nachfolgend dargestellt können die zum Teil hohen Grenzwerte für TOC und CO nicht nur auf die Freisetzung von organischen Stoffen und Kohlenmonoxid aus den Rohstoffen zurückgeführt werden.

4.1.2 Emissionen aus den Rohmaterialien

Rohmaterialien, die für die Zementproduktion verwendet werden, besitzen eine mehr oder weniger hohe Konzentration an organischen Verbindungen, die zum Teil in ziemlich komplizierten Strukturen im Rohmaterial eingebettet sind. Wird ein Rohmaterial in einem Zementofen erhitzt, so verdampfen diese organischen Bestandteile nicht einfach aus dem Grundmaterial, sondern es spalten sich im Temperaturbereich zwischen 300 und 600 °C einfachere organische Verbindungen und Kohlenmonoxid (CO) ab („Cracken“), die schließlich im Hauptkamin emittiert werden (Waltisberg, 1998). Die nachfolgenden beiden Abbildungen zeigen den mit dem sog. Austreibungsversuch (Waltisberg, 1998) gemessenen Verlauf einer solchen Freisetzung (Austreibung) aus einem Rohmaterial. In Abbildung 7 sind die Parameter TOC und CO und in Abbildung 8 die Ausschlüsselung des TOC in die Komponenten Methan, C_2 - und C_3 -Verbindungen sowie Benzol für ein typisches Rohmaterial eines Zementwerks dargestellt.

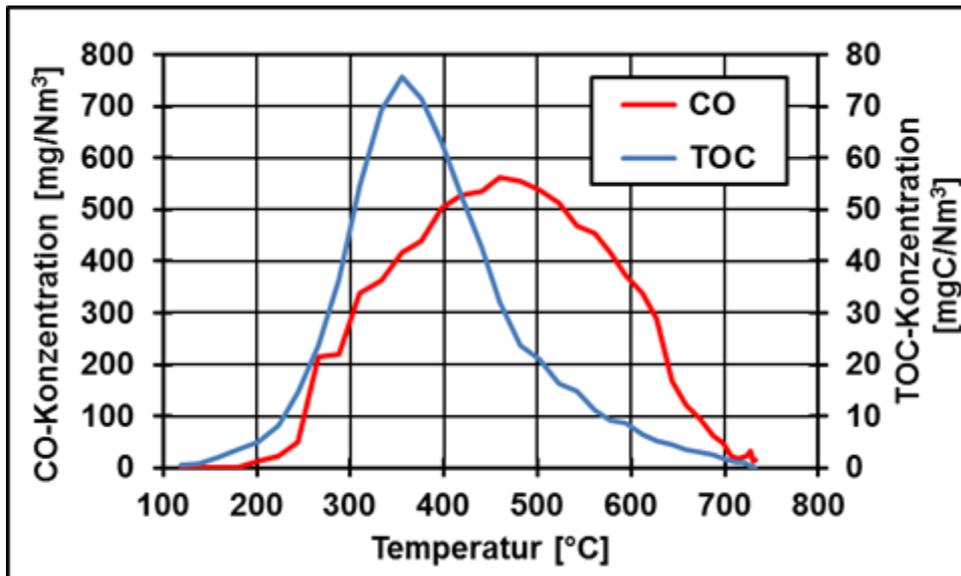


Abbildung 7: Austreibungsversuch (Laborversuch) an einem Rohmaterial

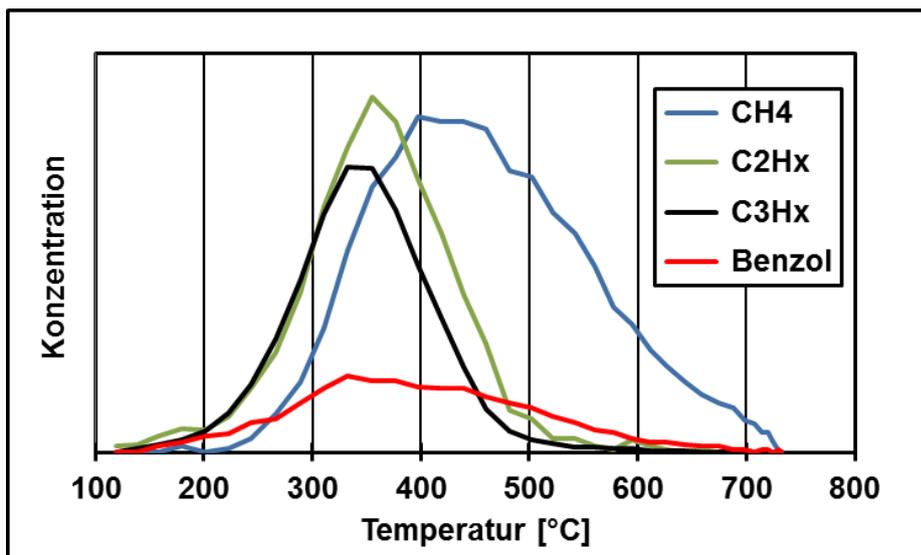


Abbildung 8: Austreibungsversuch (Laborversuch) an einem Rohmaterial

Benzol ist eine der Komponenten, die sich direkt aus den Rohmaterialien entwickelt. Ihr Anteil liegt, abhängig von der erdgeschichtlichen Entwicklung der Rohmaterialien, bei einem Anteil von „vernachlässigbar“ bis etwa 10 [%] der TOC-Emission (Tabelle 6).

Tabelle 6: Anteil bestimmter Verbindungen an der TOC-Emission

Komponente	Bereich [%]	Mittel [%]
Methan	15 – 35	20
C ₂ -Komponenten	25 – 35	30
C ₃ -Komponenten	25 - 35	30
Andere Aliphaten		< 10
Benzol	3 – 8	
BETX	4 - 12	

BETX = Benzol, Ethylbenzol, Toluol, Xylol

Werden nur natürliche Rohmaterialkomponenten, wie Kalkstein, Mergel, Sand, usw. eingesetzt, so variiert die Kohlenmonoxid-Emission je nach Werk zwischen „vernachlässigbar und maximal etwa 1500 [mg/Nm³] und die TOC-Emission im Bereich zwischen "vernachlässigbar" und etwa 30 [mgC/Nm³] in Extremfällen bis 80 [mgC/Nm³] (Normbedingungen, trockenes Abgas, 10 Vol.-% Bezugssauerstoff). Typisch ist auch, dass sowohl die CO- wie auch die TOC-Emissionen in einem bestimmten Werk relativ stabil ist und nicht von der Temperatur und/oder dem Sauerstoffgehalt in den obersten Zyklonstufen des Vorwärmers beeinflusst werden, vorausgesetzt die Emissionen werden nicht durch die Sekundärfeuerung beeinflusst.

4.1.3 Emissionen aus Abfall-basierten Rohmaterialkomponenten

In Rohmaterialkomponenten, die aus Abfällen stammen und über den Rohmaterialweg (Rohmehlweg) ins Ofensystem eingetragen werden, können Verbindungen zum Teil gefährliche Verbindungen entstehen. Mit dem Austreibungsversuch wurden bei bestimmten Abfällen unter anderem organische Verbindungen wie etwa chlorierte Benzole, chlorierte Phenole, Furane und Biphenyle, nachgewiesen. Bestimmte Materialien können sogar PCDD/F enthalten. Es ist daher notwendig, dass Abfall-basierte Rohstoffe vor ihrem Einsatz in einem Zementwerk genau überprüft werden.

4.1.4 Einfluss einer Sekundärfeuerung

Der Klinkerbrennprozess ist ein Stoffumwandlungsprozess, der aus Gründen der Klinkerqualität stets mit Luftüberschuss betrieben werden muss. Das stimmt, aber nur für den eigentlichen Umwandlungsprozess zu Klinkermineralien. Das heißt: in der Sinterzone des Drehteils, also im Bereich der Hauptflamme des Ofens, müssen oxidierende Verhältnisse vorhanden sein. In einer Sekundärfeuerung kann aber durchaus reduzierend gefahren werden. Dies ist

energetisch nicht unbedingt sinnvoll und hat keinen Einfluss auf die Klinkerqualität. Man stellt nun fest, dass Sekundärfeuerungen, sei es eine einfache Zugabe in die Steigleitung bzw. in den Ofeneinlauf oder ein spezieller Kalzinator, sehr oft reduzierend oder wenigstens in gewissen Teilen (z.B. gestufte Verbrennung zur NO_x-Reduktion) reduzierend gefahren werden. Zu beachten ist auch, dass in modernen Zementanlagen bis maximal 60 % der Brennstoffenergie sekundär ins Ofensystem eingebracht werden.

Die in Sekundärfeuerungen verwendeten Brennstoffe sind oft grobkörnig oder sogar stückig und verbrennen reduzierend oder mindestens lokal reduzierend, wobei das entstandene Kohlenmonoxid sowie die entstandenen organischen Verbindungen im Wärmetauscher nicht vollständig abgebaut, d.h. oxidiert werden.

4.1.5 TOC- und CO-Emissionen der Deutschen Zementindustrie in den Jahren 2008, 2009 und 2010

Die im Sommer 2013 publizierten Tagesmittelwerte der Deutschen Zementwerke für die Jahre 2008, 2009 und 2010¹ wurden ausgewertet. Zum Vergleich wurde aus den veröffentlichten Umweltdaten der Deutschen Zementindustrie (VDZ, 2009; VDZ, 2010; VDZ, 2011) die entsprechenden Daten herausgelesen. Alle nachfolgend angegebenen Konzentrationen beziehen sich auf den trockenen Gaszustand bei Normbedingungen (1013 mbar, 0 °C) und auf einen Referenzsauerstoffgehalt von 10 Vol.-%.

4.1.5.1 Kohlenmonoxid (CO) und organischer Gesamtkohlenstoff (TOC)

Die Emission von Kohlenmonoxid wurde nur an 20 der 40 Zementöfen kontinuierlich gemessen bzw. aufgezeichnet. Aus den errechneten Jahresmittelwerten der einzelnen Werke wurde ein Jahresmittelwert für die deutsche Zementindustrie ermittelt (arithmetisches Mittel) (Tabelle 7). Der VDZ dokumentiert in seinen jährlich veröffentlichten Umweltdaten die Ergebnisse der jährlich durchgeführten wiederkehrenden Messungen. Dies sind zwar keine Jahresmittelwerte, sondern Mittelwerte über eine bestimmte Messdauer (im Bereich Stunden). Gleichwohl werden sie zum orientierenden Vergleich mit den für die Jahre 2008 – 2010 publizierten und ausgewerteten Tagesmittelwerten (Abbildung 9) herangezogen und als „Mittelwert VDZ“ bezeichnet. Dies erscheint möglich, da es sich für die Jahre 2008 – 2010 um Mittelwerte vieler Messungen handelt.

Tabelle 7: Ermittelte CO-Jahresmittelwerte aus den ausgewerteten publizierten Tagesmittelwerten für die Jahre 2008 – 2010¹ und VDZ-Mittelwerte

	CO-Emission [mg/Nm ³]		
	2008	2009	2010
Anzahl Öfen	20	20	20
Jahresmittelwert	1071	895	965
Mittelwert VDZ	955	1175	1044
Minimum	117	158	161
Maximum	3341	2522	3344

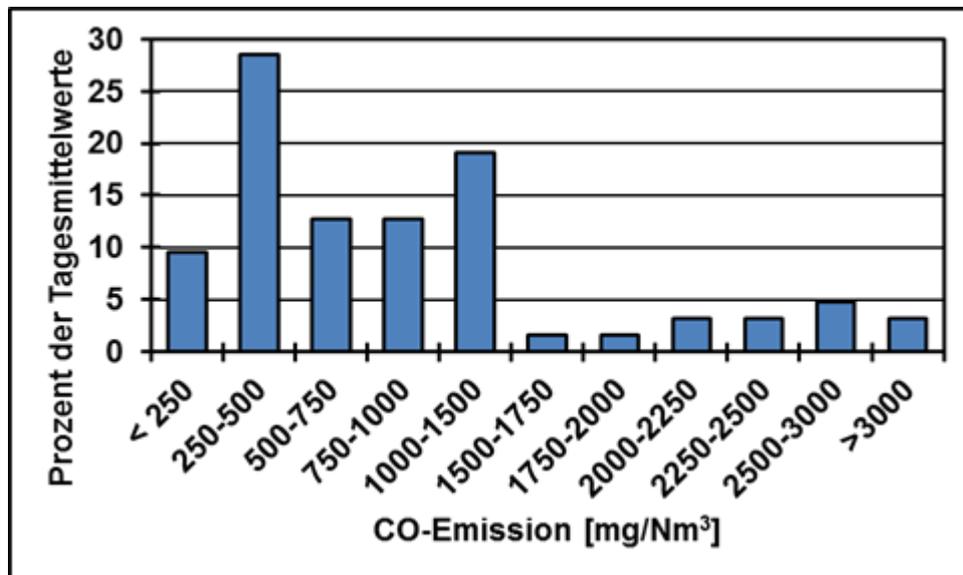


Abbildung 9: Häufigkeitsverteilung der CO-Tagesmittelwerte (2008 - 2010), unterteilt in 11 Emissionsklassen

Entsprechend wurde auch die TOC-Emission ausgewertet. Die Jahresmittelwerte und die Mittelwerte VDZ sind in der nachfolgenden Tabelle 8 zusammengestellt. Die Verteilung der Emissionen in 7 Klassen gibt Abbildung 10 wieder.

Tabelle 8: Ermittelte TOC-Jahresmittelwerte aus den ausgewerteten publizierten Tagesmittelwerten¹ für die Jahre 2008 – 2010 und VDZ-Mittelwerte

	TOC-Emission [mgC/Nm ³]		
	2008	2009	2010
Anzahl Öfen	17	16	16
Jahresmittelwert	21,9	19,8	20,5
Mittelwert VDZ	24,3	21,2	24,0
Minimum	5,6	6,2	3,6
Maximum	50,6	54,8	81,3

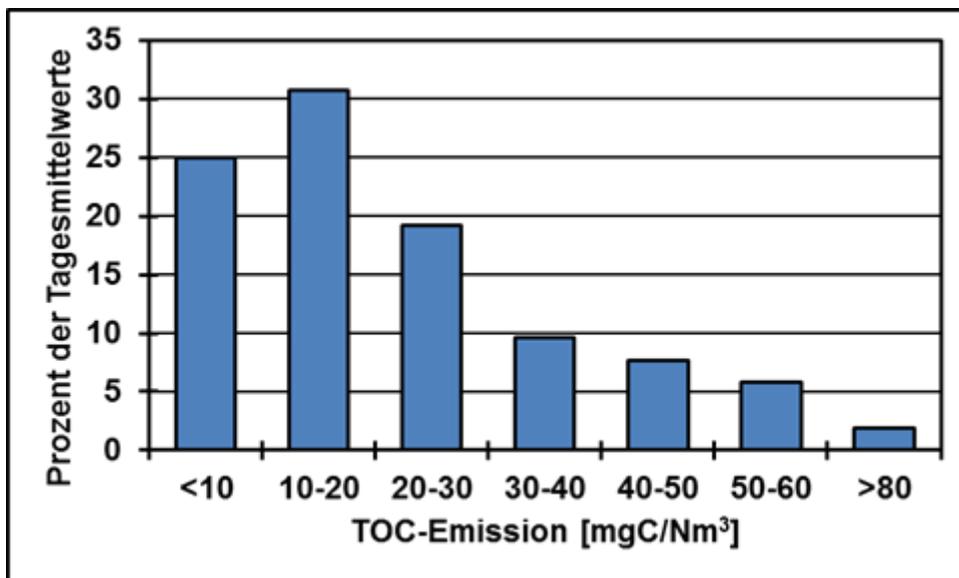


Abbildung 10: Häufigkeitsverteilung der TOC-Tagesmittelwerte (2008 - 2010), unterteilt in 11 Emissionsklassen

Betrachtet man alle gemessenen Tagesmittelwerte der CO- und TOC-Emissionen, so fallen die teilweise sehr hohen Werte auf, die nicht mehr nur mit der Freisetzung aus den Rohmaterialien erklärt werden können.

4.1.5.2 Zusammenhang zwischen CO- und TOC-Emission

Werden die CO- und die TOC-Emission nur von den natürlichen Rohmaterialien (Kalkstein, Mergel, Ton, Sand) verursacht und wird die Rohmischung nicht verändert (d.h. keine Abfälle zugeführt), so schwanken beide Emissionen in einem sehr engen Bereich, in der Regel maximal etwa um $\pm 20\%$ (Standardabweichung zum Mittelwert). Es ergibt sich auch keine Korrelation zwischen der CO- und der TOC-Emission.

Anders ist es bei einem Einfluss der Sekundärfeuerung. Wird hier mehr Kohlenmonoxid gebildet, so entstehen auch mehr flüchtige organische Verbindungen (TOC), die schlussendlich emittiert werden. Dann wäre auch eine Abhängigkeit zwischen der CO- und der TOC-Emission zu erwarten. Dies soll anhand von Auswertungsbeispielen der vom Bundesverband Bürgerinitiativen Umweltschutz (BBU) veröffentlichten und ausgewerteten Daten¹ aufgezeigt werden. Zuvor wird aber ein Fall aus dem Ausland präsentiert, der in Deutschland nicht mehr existiert, nämlich der Betrieb eines Zementwerks, bei dem keine Abfall-basierten Brennstoffe eingesetzt werden und bei dem der fossile Brennstoff ausschließlich über den Hauptbrenner zugeführt werden (keine Sekundärfeuerung).

Beispiel #1:

Ein Zementwerk (nicht in Deutschland) mit einem 4-stufigen Wärmetauscher setzt nur Kohle als Brennstoff ein. Sekundär wird kein Brennstoff aufgegeben. Im Ofeneinlauf ist eine Gasentnahmesonde montiert, über die der Ofen mit einem möglichst konstanten Sauerstoffgehalt von etwa 2,5 bis 3 Vol.-% gefahren wird. Am Kamin werden unter anderen Komponenten auch Kohlenmonoxid und organische Verbindungen kontinuierlich gemessen. Aus den ermittelten Tagesmittelwerten werden Wochenmittelwerte bezogen auf einen Referenzsauerstoffgehalt von 10 Vol.-% berechnet (Abbildung 11).

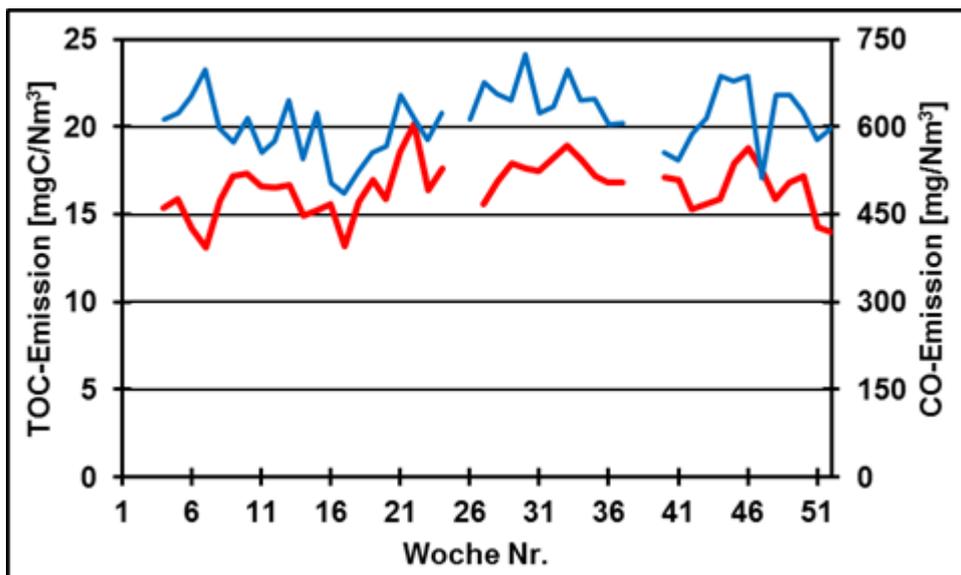


Abbildung 11: TOC-Konzentrationsverlauf über ein Jahr (Wochenmittelwerte) eines deutschen Zementwerkes auf der Basis der publizierten und ausgewerteten Emissionsdaten¹ für 2008 - 2010

Aus Abbildung 12 ist ersichtlich, dass keine Abhängigkeit der beiden Emissionsparameter besteht. Dies bedeutet, dass sich aus dem Rohmehl im Bereich der obersten Zyklone CO und TOC entwickeln. Die Schwankungen der beiden Emissionen sind reine zufällige Schwankungen auf Grund schwankender Gehalte an organischen Verbindungen im aufgegebenen Rohmaterial.

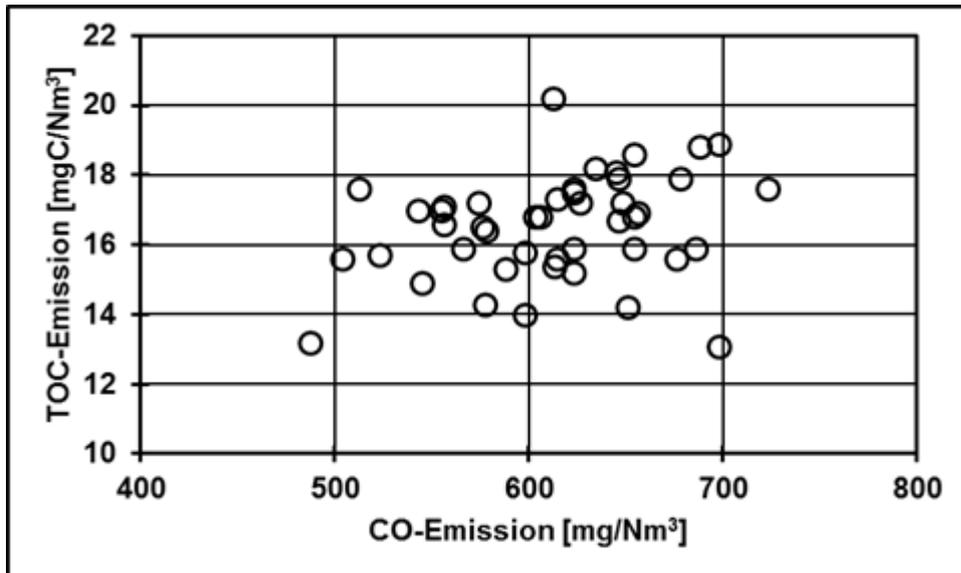


Abbildung 12: Korrelation zwischen CO- und TOC mittels klassierten Tagesmittelwerten

Beispiel #2:

Dieses deutsche Zementwerk setzt recht unterschiedliche Mengen an Abfällen ein, ein Teil wird über die Hauptfeuerung und ein anderer als Reifen am Ofeneinlauf aufgegeben. Verbrennen diese Reifen mit viel Sauerstoff, so sind die CO-Emissionen am Kamin im Bereich von 100 bis 300 [mg/Nm³] und die TOC-Emissionen im Bereich von 15 [mgC/Nm³]. Die CO- und die TOC-Emissionen stammen dabei fast ausschließlich aus dem Rohmaterial. Die Reifen steuern keinen oder einen vernachlässigbaren Anteil bei. Wird nun die Reifenmenge erhöht, so ist (lokal) nicht mehr genug Sauerstoff vorhanden, um eine „saubere“, d.h. vollständige, Verbrennung zu gewährleisten. Es kommt zu einem Anstieg der CO- und der TOC-Emissionen. Dieser Anstieg beider Emissionen wird durch die Reifen verursacht (Abbildung 13).

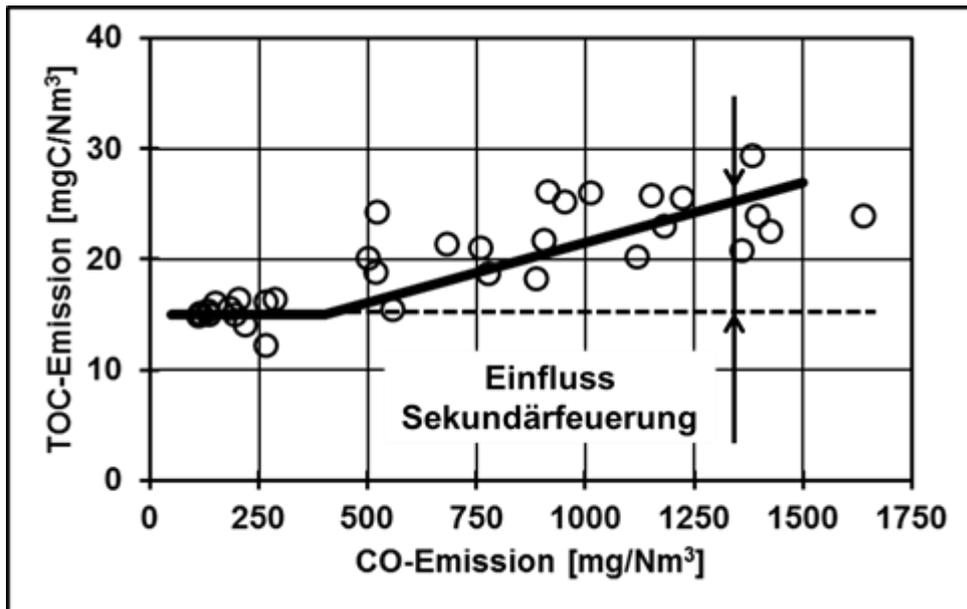


Abbildung 13: Korrelation zwischen der CO- und der TOC-Emission mittels klassierten Tagesmittelwerten

Beispiel #3:

In einem Zementwerk mit Reifenverbrennung am Ofeneinlauf und einer Abfallverbrennung über die Hauptflamme steigt sowohl die CO- wie auch die TOC-Emission im Laufe der drastisch Zeit an, wie die Jahres-(Tabelle 9) und die Monatsmittelwerte (Bild 14) zeigen.

Tabelle 9: Jahresmittewerte der für die Jahre 2008 – 2010 publizierten Tagesmittelwerte¹

Jahr	CO [mg/Nm ³]	TOC [mgC/Nm ³]
2008	1301	32,5
2009	1983	50,7
2010	2240	81,3

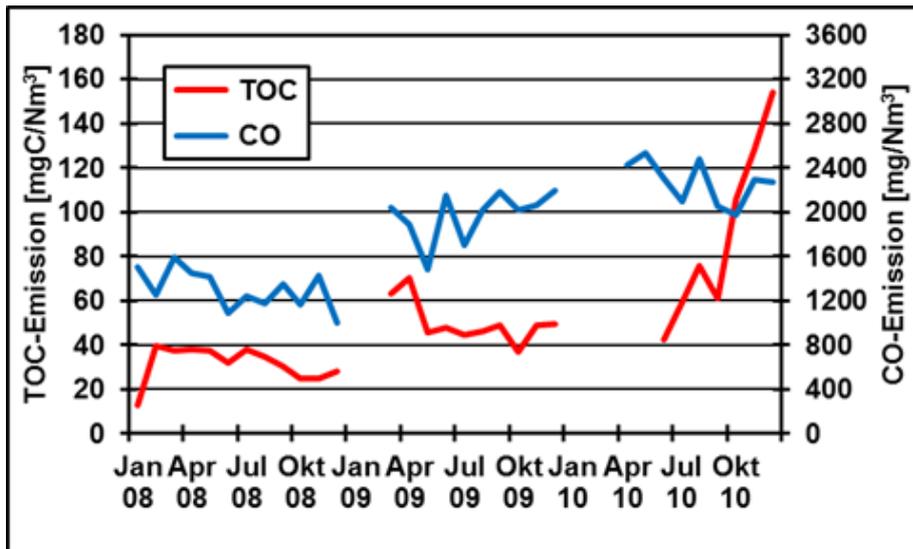


Abbildung 14: Verlauf der Monatsmittelwerte der für die Jahre 2008 – 2010 publizierten und ausgewerteten Tagesmittelwerte¹

Die Tagesmittelwerte wurden zu 5-Tagesmittelwerten zusammengefasst. Die nachfolgende Abbildung 15 zeigt die Korrelation zwischen der CO- und der TOC-Emission. Die CO-Emission dieser 5-Tagesmittelwerte schwankt zwischen etwa 600 und etwa 3000 [mg/Nm³], die TOC-Emission zwischen etwa 15 und 85 [mgC/Nm³]. Solche Schwankungsbreiten können nicht mit Veränderungen im Rohmaterial begründet werden. Sie haben ihre Ursache in reduzierenden Bedingungen in der Sekundärfeuerung. Der Anstieg der Emissionswerte deutet auch darauf hin, dass vermehrt Abfall-basierte Brennstoffe eingesetzt wurden. Das heißt, die Zunahme der Emissionen ist wahrscheinlich mit der ansteigenden Abfallmenge der Sekundärfeuerung zu begründen.

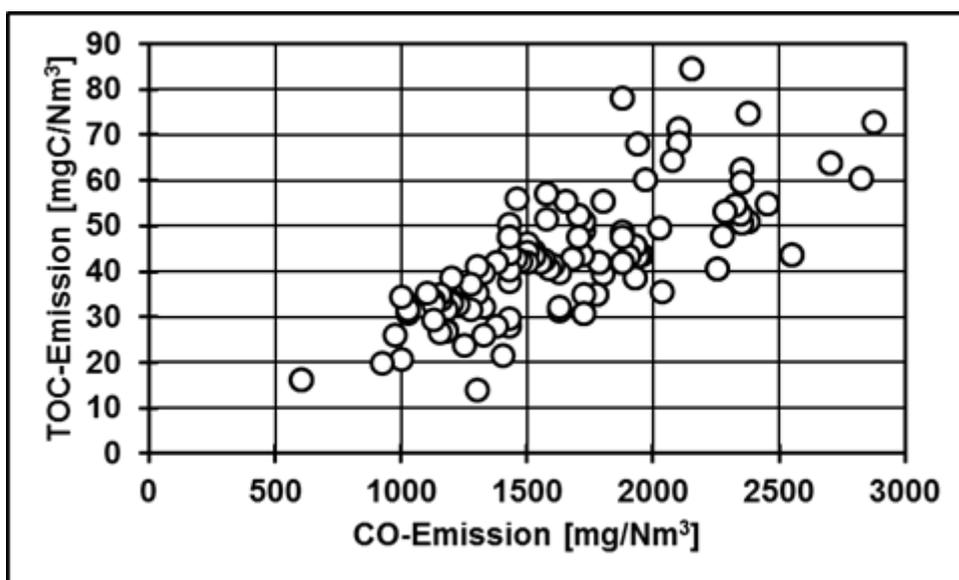


Abbildung 15: Korrelation zwischen der CO- und der TOC-Emission (5-Tagesmittelwerte) mittels klassierten Tagesmittelwerten

Wie oben dargelegt hat ca. die Hälfte der deutschen Zementwerke keinen TOC-Grenzwert und ca. zwei Drittel keinen CO-Grenzwert, obwohl solche seit der europäischen Abfallverbrennungsrichtlinie aus dem Jahre 2000, die 2003 mit der Änderung der 17. BImSchV in deutsches Recht umgesetzt wurde, festzulegen sind. Es ist nicht erklärlich, wie es zu diesem Vollzugsdefizit kommen konnte. Von der Hälfte der Zementwerke, für die ein TOC-Grenzwert in der entsprechenden immissionsschutzrechtlichen Genehmigung festgelegt wurde, haben ca. 90 % die vorbeschriebene Ausnahmemöglichkeit in Anspruch genommen (Schönberger/Teibert/Lahl, 2012). Die Ausnahme kann aber nur zugelassen werden, wenn die erhöhten TOC-Frachten aus den natürlichen Rohmaterialien stammen. Dieser Anteil kann bestimmt werden. Mit dem Austreibungsversuch (Waltisberg, 1998; Zunzer, 2002) steht ein Messverfahren zur Verfügung, mit der sowohl der TOC- als auch der CO-Anteil aus den natürlichen Rohmaterialien bestimmt und damit von dem Anteil aus der Mitverbrennung unterschieden werden kann. Bislang wurden die Ausnahmen aber nicht an einen konkreten messtechnischen Nachweis gekoppelt. Dies wurde kürzlich vorgeschlagen (Lahl/Schönberger/Zeschmar-Lahl; Schönberger/Teibert/Lahl, 2012). Der messtechnische Nachweis sollte angesichts der dargelegten Problematik umgehend in die Praxis eingeführt werden.

Beispiel #4:

Das Zementwerk setzt eine große Zahl an unterschiedlichen Abfällen ein. Sekundärseitig besitzt das Werk einen Kalzinator, in dem unter anderem aufbereiteter Brennstoff aus Abfällen („Fluff“), Kunststoffabfälle, Altholz und Rinde, Textilien, Verbundverpackungen, Gummiabfälle, Farb- und Lackabfälle, usw. eingesetzt werden.

Die nachfolgende Abbildung 16 zeigt zwei unterschiedliche Messperioden der publizierten und ausgewerteten Tagesmittelwerte¹. In beiden Perioden ergibt sich eine Abhängigkeit zwischen der CO- und TOC-Emission. Die Verbrennung im Kalzinator trägt also zur Emission von CO und TOC bei. Allerdings entstehen in der ersten Periode (Kreise) mehr flüchtige organische Verbindungen aus dem Brennstoff als in der zweiten Periode (Quadrate), was auf unterschiedliche Brennstoffmischungen hindeutet.

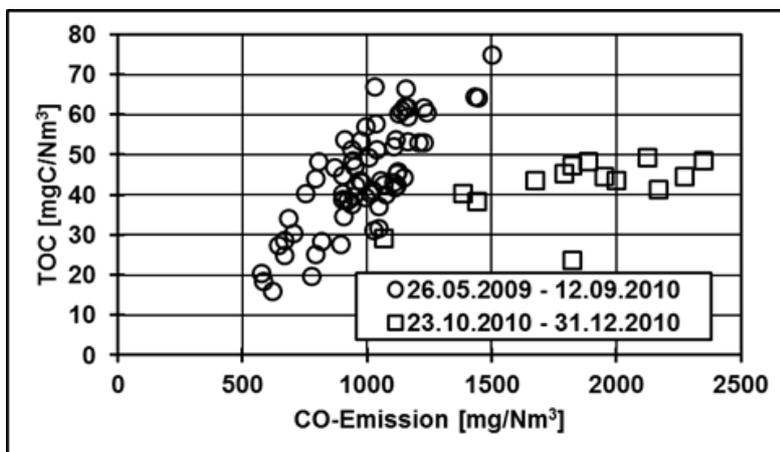


Abbildung 16: Korrelation zwischen der CO- und der TOC-Emission mittels klassierten Tagesmittelwerten

4.1.6 Benzol

Nach den publizierten Tagesmittelwerten wurde die Emission von Benzol in keinem Zementwerk kontinuierlich gemessen, kann aber regelmäßig diskontinuierlich bestimmt werden. Die Emissionen wurden aus den vom VDZ jährlich veröffentlichten Umweltdaten für die Jahre 2008 - 2010 (VDZ 2009; VDZ, 2010; VDZ 2011) entnommen (Tabelle 10). Dabei handelt es sich um Einzelmessungen über eine kurze Messperiode und nicht um Tagesmittelwerte.

Tabelle 10: Emission von Benzol

	Benzol [$\text{mgC}_6\text{H}_6/\text{Nm}^3$]		
	2008	2009	2010
Anzahl Messwerte	84	79	82
Anzahl Ofenanlagen	27	28	26
Mittelwert	1,89	1,77	1,83
Maximum	7,6	13,2	8,1

Rechnet man die Emissionskonzentrationen auf die Benzolemission auf eine organische Emission von Kohlenstoff um und vergleicht man sie mit den Mittelwerten der TOC-Emissionen, so ergibt sich die folgende Tabelle 11.

Tabelle 11: Benzolemission im Vergleich mit der TOC-Emission

	Unit	2008	2009	2010
Mittelwert	$[\text{mgC}_6\text{H}_6/\text{Nm}^3]$	1,89	1,77	1,83
Benzol	$[\text{mgC}/\text{Nm}^3]$	1,74	1,63	1,69
TOC Mittelwert	$[\text{mgC}/\text{Nm}^3]$	21,9	19,8	20,5
Anteil Benzol am TOC Signal	[%]	7,9	8,2	8,2

Der Benzol-Anteil von rund 8 % liegt im normalen Emissionsbereich von europäischen Rohmaterialien. Allerdings können die sehr hohen Maximalwerte nicht mehr mit der Emission aus den Rohmaterialien begründet werden. Hier zeigt sich entweder der Einfluss einer Ab-

fall-Rohmehlkomponente oder der Einfluss von reduzierenden Bedingungen in einer Sekundärfeuerung.

4.1.7 Zusammenhang zwischen der CO- und der SO₂-Emission

In den Umweltdaten für das Jahr 2011 (VDZ 2012) schreibt der VDZ: „Schwefel wird dem Klinkerprozess über die Roh- und Brennstoffe zugeführt. In den Rohstoffen kann der Schwefel lagerstättenbedingt als Sulfid und als Sulfat gebunden vorliegen. Ursache für höhere SO₂-Emissionen von den Drehofenanlagen der Zementindustrie können die im Rohmaterial enthaltenen Sulfide sein, die bei der Vorwärmung des Brennguts bei Temperaturen zwischen 370 °C und ca. 420 °C zu SO₂ oxidiert werden. Die Sulfide kommen überwiegend in Form von Pyrit oder Markasit in den Rohstoffen vor.“

Diese Aussage ist zutreffend; allerdings wird die Wirkung einer Sekundärfeuerung nicht erwähnt. Die Zusammensetzung der Ofenatmosphäre im Bereich der untersten Zyklone und des Ofeneinlaufs ist ein wesentlicher Faktor für die Schwefelflüchtigkeit. Ein zu kleiner Luftüberschuss oder sogar reduzierende Bedingungen in dieser Zone erhöhen die Flüchtigkeit des Schwefels. Es kommt zu einer Emission von Schwefeldioxid aus dieser Zone. Typisch ist eine steigende SO₂-Emission in Abhängigkeit von der CO-Emission. Dies wird mittels Beispiel #5 näher erläutert.

Beispiel #5:

In einem Werk mit Chlorbypass-System zeigt sich eine deutliche Korrelation zwischen der CO- und der SO₂-Emission. Es sind keine TOC-Messungen vorhanden. In der Sekundärfeuerung wird ein Teil des Schwefels verflüchtigt und gelangt wahrscheinlich zum größten Teil über den Bypass in die Emission. Auch bei Werken ohne Bypass-Systeme wird durch reduzierende Bedingungen im Bereich Ofeneinlauf der Schwefel verflüchtigt und es kommt zu höheren SO₂-Emissionen. Dies ergibt sich unmittelbar aus der Korrelation von CO und SO₂ (Abbildung 17).

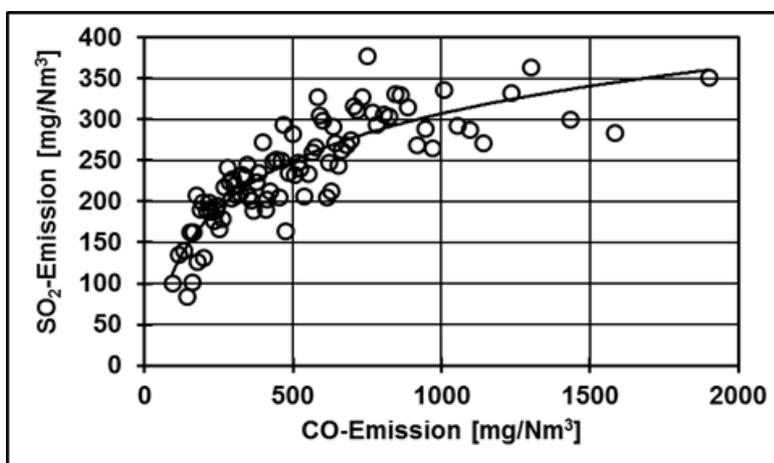
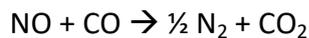


Abbildung 17: Korrelation zwischen der CO- und der SO₂-Emission mittels klassierten Tagesmittelwerten

4.1.8 Zusammenhang zwischen der CO-, der SO₂-Emission und der NO_x-Emission

Um das Rohstoffgemisch in Portlandzementklinker umzuwandeln sind Brennguttemperaturen von 1450°C und Flammentemperaturen von ca. 2000°C erforderlich. Dabei wird der molekulare Stickstoff der Verbrennungsluft zu Stickstoffmonoxid oxidiert (thermische NO-Bildung). Die thermische NO-Bildung ist bei den niedrigeren Temperaturen in einer Zweitfeuerung hingegen kaum von Bedeutung. Hier wird der im Brennstoff gebundene Stickstoff zum sogenannten Brennstoff-NO oxidiert. In diesem Bereich kann durch reduzierende Bedingungen, zum Beispiel durch eine gestufte Verbrennung, Stickstoffmonoxid, das in der Hauptflamme gebildet wurde, wieder reduziert werden (siehe nachstehende Reaktion).



Allerdings können diese reduzierenden Bedingungen auch zu einer erhöhten TOC- und SO₂-Emission führen, wie das nachfolgende Beispiel #6 zeigt.

Beispiel #6:

Ein Zementwerk besitzt einen 4-stufigen Wärmetauscher und bringt Brennstoff sekundär in den Bereich des Ofeneinlaufs, wobei die Art des Brennstoffs nicht bekannt ist. Wie nachfolgende Abbildung 18 zeigt, werden die NO_x-Emissionen mit dieser Maßnahme deutlich reduziert.

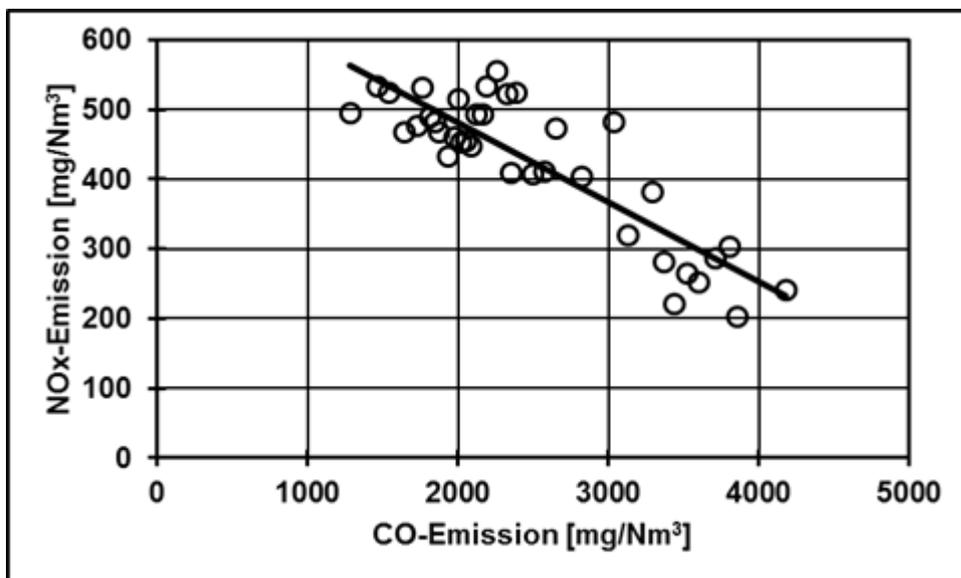


Abbildung 18: Reduktion von NO_x durch gebildetes CO mittels klassierten Tagesmittelwerten

Diese Verminderung der NO_x -Emissionen hat aber auf der Seite der TOC- und der SO_2 -Emissionen einen negativen Einfluss. Diese Emissionen steigen deutlich an, wie die nachfolgenden Abbildungen 19 und 20 zeigen.

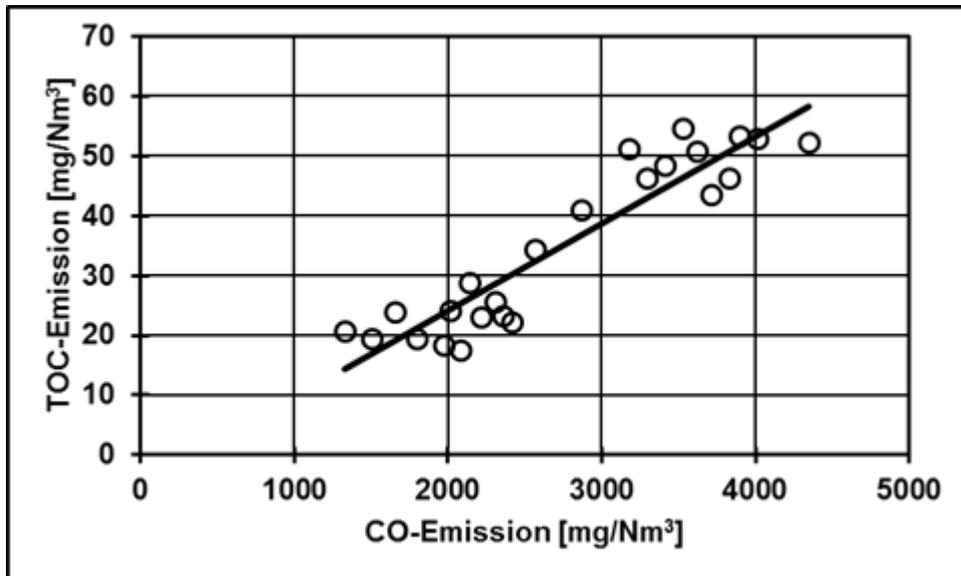


Abbildung 19: Korrelation der CO- mit der TOC-Emission mittels klassierten Tagesmittelwerten

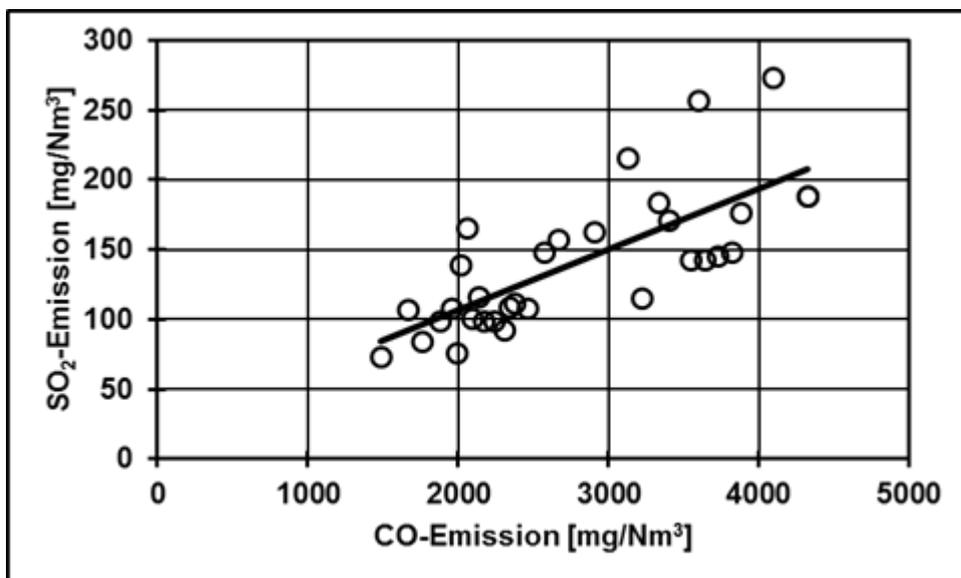


Abbildung 20: Korrelation der CO- mit der SO_2 -Emission mittels klassierten Tagesmittelwerten

4.1.9 Schlussfolgerungen

Bei den TOC- und CO-Emissionen bestehen erhebliche Vollzugsdefizite, die sehr zeitnah abgebaut werden sollten. Alle Zementwerke sollten einen Grenzwert für TOC und CO erhalten. Dabei ist darauf zu achten, dass die Ausnahmemöglichkeit an einen messtechnischen Nachweis zu knüpfen ist, mit dem zuverlässig die Anteile aus den natürlichen Rohmaterialien bestimmt werden können. Mit dem Austreibungsversuch ist dafür ein erprobtes Messverfahren entwickelt worden. Die Auswertung der Emissionsdaten der deutschen Zementwerke hat gezeigt, dass die Sekundärfeuerungen einen wesentlichen Beitrag zu den Emissionen von Kohlenmonoxid (CO) und organischen Verbindungen (TOC) und unter Umständen auch von SO₂-Emissionen bedingen. Der Grund liegt im unvollständigen Ausbrand der Brennstoffe, insbesondere bestimmter Abfall-basierter Brennstoffe, die grobkörnig oder sogar stückig aufgegeben werden. Dies bedeutet, dass die seit langem von der Zementindustrie vertretene Position, dass die TOC- und CO-Emissionen primär aus den natürlichen Rohmaterialien herühren, zu revidieren ist. Sie gilt nur für die Hauptfeuerung, trifft aber in vielen Fällen nicht für die Sekundärfeuerung zu. Insofern besteht konkreter Handlungsbedarf der Vollzugsbehörden. Zudem sind, wie bei Abfallverbrennungsanlagen, die aus der unvollständigen Abfallmitverbrennung resultierenden organischen Verbindungen als toxikologisch relevant einzustufen. Dies hat dazu geführt, dass der niedrige TOC-Grenzwert bei Abfallverbrennungsanlagen zwingend einzuhalten ist. Gleiches wäre auch für die Abfallmitverbrennung zu fordern.

Mit den publizierten Emissionsdaten¹, die für die einzelnen Zementwerken ausgewertet wurden, ist eine genauere Quantifizierung des Einflusses der Abfallmitverbrennung nicht möglich, da nur die reinen Emissionsdaten und keine Produktionsdaten (Temperaturen, Drücke, Massen- und Volumenströme, usw.) zur Verfügung stehen.

4.2 Quecksilber

4.2.1 Generelle Erkenntnisse

Die Quecksilberemissionen aus Anlagen zur Klinkerherstellung stellen nach wie vor ein Problem dar. Weltweit stehen die Zementwerke bei den anthropogenen Quecksilberquellen an vierter Stelle. Durch die kürzlich verabschiedete Minamata Convention on Mercury (Minamata Convention 2013) steht zu erwarten, dass diese zu weiteren Anstrengungen zur Verringerung von Quecksilberemissionen führen wird. In den USA haben in den vergangenen Jahren bereits Initiativen in diese Richtung stattgefunden, die zu strengeren Anforderungen geführt haben (USA Cement, 2013). Dabei handelt es sich um Monatsmittelwerte, die nicht unmittelbar mit den in Deutschland üblichen Halbstunden- und Tagesmittelwerten vergleichbar sind. Umrechnungen zeigen, dass die neuen amerikanischen Grenzwerte für die Mitverbrennung von nicht gefährlichen Abfällen in Zementwerken etwa doppelt so streng wie die derzeit in Deutschland üblichen (30 µg/Nm³ als Tagesmittelwert und 50 µg/Nm³ als Halbstundenmittelwert) sind.

Nicht ausreichend diskutiert und gewürdigt wird die Tatsache, dass Quecksilber ein reproduktionstoxischer Stoffe ist und damit unter das Emissionsminimierungsgebot nach Nr. 5.2.7 der TA-Luft (TA Luft, 2002) fällt, denn dort heißt es: *“Die im Abgas enthaltenen Emissionen krebserzeugender, erbgutverändernder oder reproduktionstoxischer Stoffe oder Emissionen*

schwer abbaubarer, leicht anreicherbarer und hochtoxischer organischer Stoffe sind unter Beachtung des Grundsatzes der Verhältnismäßigkeit so weit wie möglich zu begrenzen (Emissionsminimierungsgebot)“ (Nr. 5.2.7 TA Luft). Dies kann so verstanden werden, dass zum Beispiel Klärschlamm nicht mitverbrannt werden darf, da er zu zusätzlichen Quecksilberemissionen führt, soweit nicht zusätzliche Minderungstechniken eingesetzt werden, was in den allermeisten Fällen bislang nicht der Fall ist.

Zur weiteren Reduzierung der Quecksilberemissionen ist zunächst die tiefere Kenntnis des Verhaltens dieses hochflüchtigen Schwermetalls erforderlich. Zunächst ist festzuhalten, dass die in Anlagen zur Klinkerherstellung wichtigsten Quecksilberspezies elementares Quecksilber und Quecksilberchlorid sind. Beide haben einen beträchtlichen Dampfdruck, der mit der Temperatur exponentiell ansteigt. Die Temperaturabhängigkeit des Dampfdrucks ist für den für Staubfilter in der Zementindustrie relevanten Temperaturbereich in Abbildung 21 dargestellt. Diese Abbildung macht deutlich, dass die Werte für die beiden genannten Spezies praktisch identisch sind.

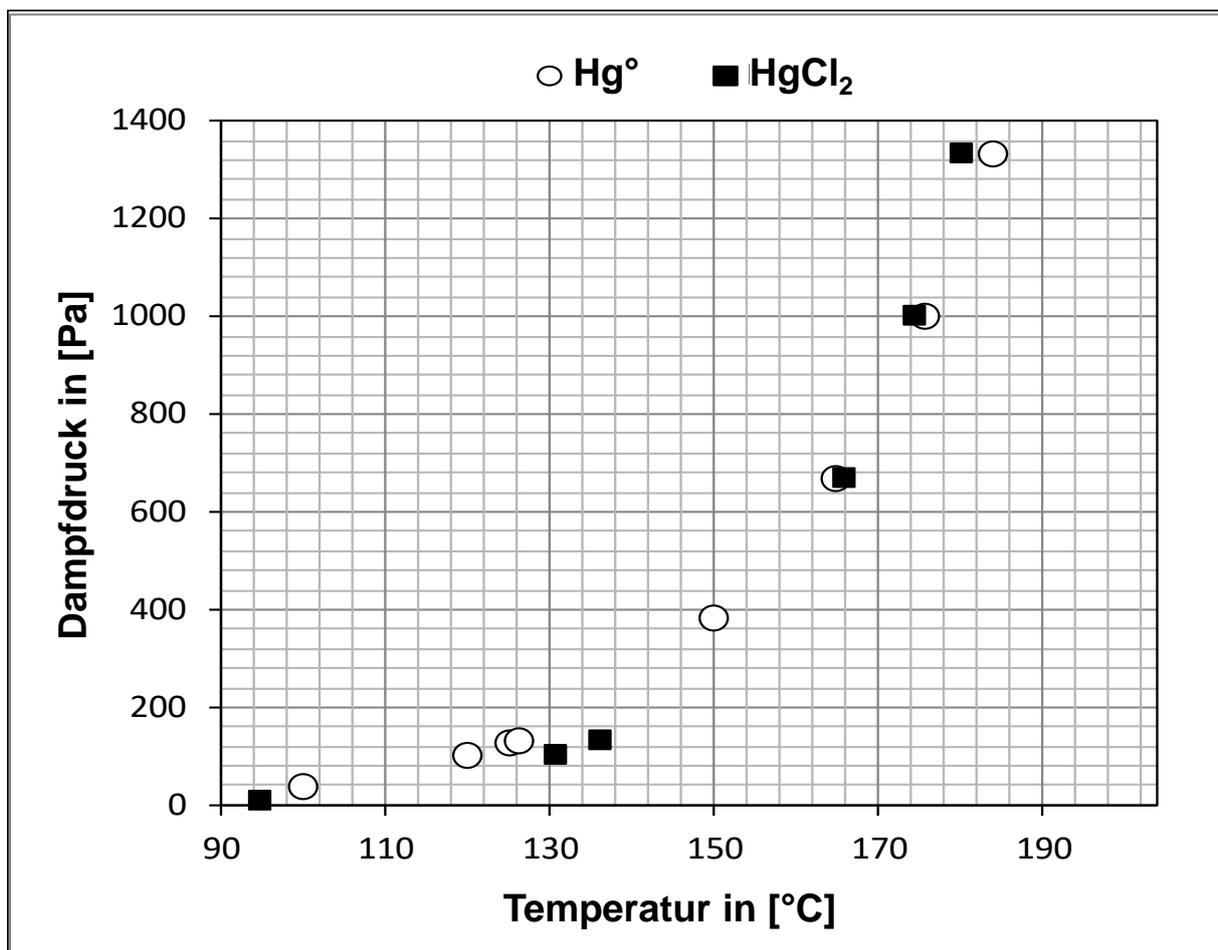


Abbildung 21: Dampfdruck von elementarem Quecksilber und Quecksilberchlorid als Funktion der Temperatur, Daten aus (CRC Handbook, 1995; CRC Handbook, 2012; Hill, 1922; Stull, 1947)

Bei den sehr hohen Temperaturen im Drehrohrföfen und Zyklonvorwärmer verdampfen die in den Rohstoffen und Brennstoffen enthaltenen Quecksilberspezies praktisch vollständig

und gelangen über den Kühlturm (insbesondere zur Abgaskühlung) und Rohmehlmühle (bei Verbundbetrieb, bei Direktbetrieb gelangt das Abgas direkt zum Staubfilter) zum Staubfilter und werden danach schließlich über den Abgaskamin emittiert. Das Abgas verlässt den Wärmetauscher mit einer Temperatur von 280 – 350°C und wird in deutschen Anlagen mit einer Temperatur zwischen 120 und 200°C emittiert. Im Zuge der Abgaskühlung adsorbieren die Quecksilberverbindungen teilweise an den Staub und an das im Gegenstrom geführte Rohmehl, sodass ein Teil wieder ins Ofensystem zurückgeführt wird. Ebenso gelangt der in der Rohmehlmühle absorbierte Teil in das Rohmehlsilo und wird von dort auch wieder dem Ofensystem zugeführt. Auf diese Weise bildet sich ein sog. äußerer Kreislauf aus, der zu einer Anreicherung von Quecksilber bis zu einem gewissen Grad führt. Nach dem Drehrohröfen liegt das Quecksilber praktisch quantitativ als elementares Quecksilber vor, das im Weiteren teilweise in Abhängigkeit von den herrschenden Reaktionsbedingungen (Reaktionspartner, Konzentrationen, Gleichgewichtsreaktionen etc.) zu weiteren Quecksilberspezies reagieren kann. Die mit dem Rohmehl zugeführten Spezies können schon im Vorwärmer verdampfen. Ebenso können verschiedene Quecksilberspezies über die Sekundärfeuerung (Ofeneinlauf oder Kalzinator oder Vorverbrennung) in den Abgasstrom gelangen. Abbildung 22 zeigt den Eintrag über die Roh- und Brennstoffe, die möglichen Reaktionsprodukte und schließlich die Emission in stark schematischer Weise.

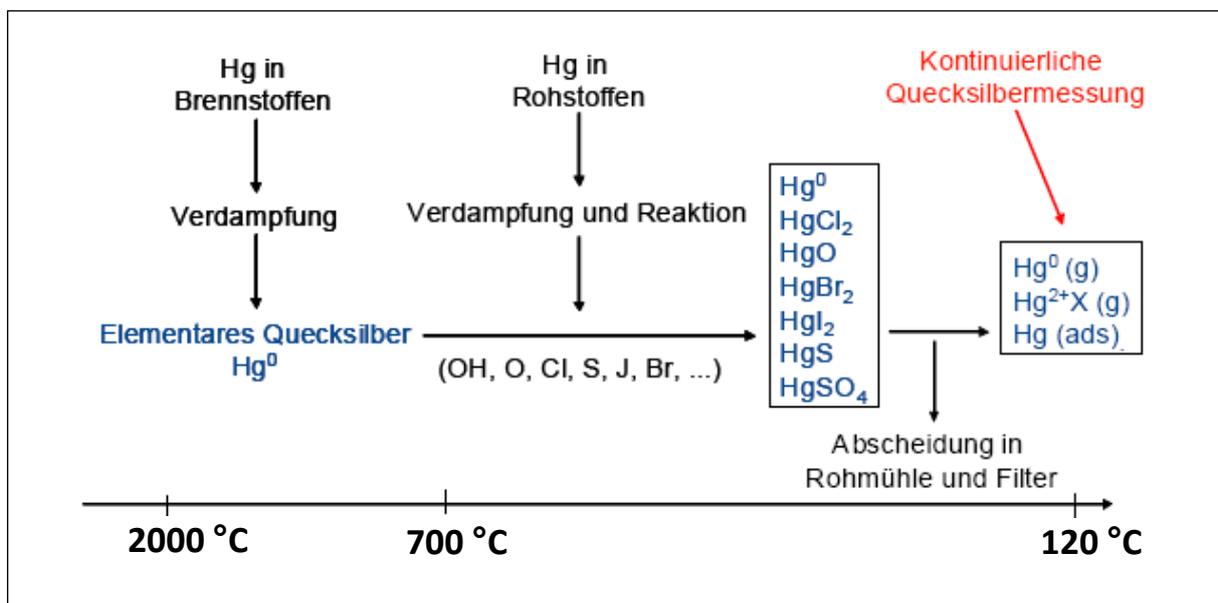


Abbildung 22: Verhalten des Quecksilbers beim Klinkerbrennprozess (Oerter/Zunzer, 2011; Renzoni et al., 2010)

Beim Direktbetrieb, d.h. das Abgas wird nicht über die Rohmehlmühle, sondern direkt dem Staubfilter zugeführt, gelangt der Staubanteil des Abgases direkt zum Staubfilter und wird zuvor nicht mit dem Rohmehl vermischt (verdünnt). Zudem ist dann die Abgastemperatur höher, da die Abkühlung in der Rohmehlmühle fehlt. Die dann höhere Temperatur führt wegen der vorgenannten starken Abhängigkeit des Dampfdruckes von der Temperatur zu unmittelbar höheren Quecksilberemissionen. Dies wird aus Abbildung 23 deutlich. Darin sind auch die Quecksilbergehalte im Kühlturmstaub und im Filterstaub eingetragen. Zu Beginn des Direktbetriebes steigen darin die Quecksilberkonzentrationen an, da die Vermischung

mit dem Rohmehl nicht stattfindet. Umgekehrt sinken die Konzentrationen zu Beginn des Verbundbetriebes. Im Beispiel in Abbildung 23 erreicht der Quecksilbergehalt im Filterstaub Werte bis 3,5 mg/kg. Bei niedrigen Abgastemperaturen und hocheffektiven Gewebefiltern mit Reststaubgehalten unter 5 mg/Nm³ kann die Konzentration infolge der starken Anreicherung im äußeren Kreislauf noch deutlich höher sein. So wurden schon Konzentrationen zwischen 20 und 40 mg/kg bestimmt.

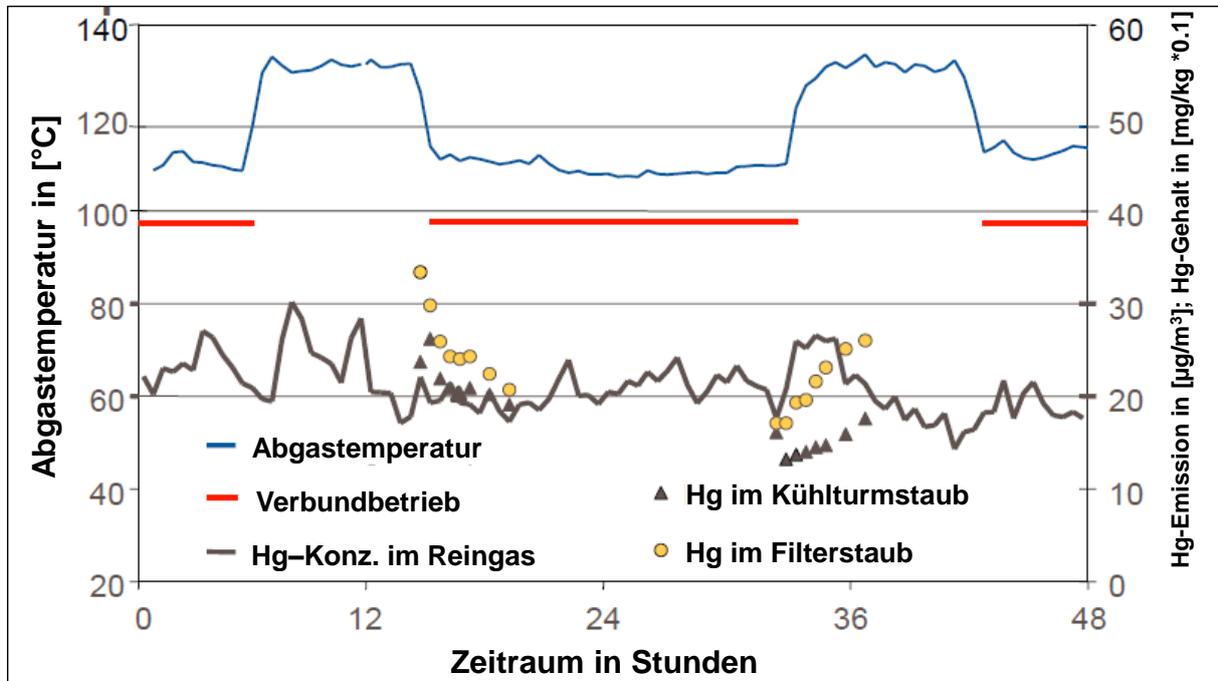


Abbildung 23: Quecksilberkonzentrationen im emittierten Abgas (Reingas) sowie im Kühler- und Filterstaub in Abhängigkeit von der Betriebsweise (Direkt- und Verbundbetrieb), was mit Temperaturschwankungen einhergeht, (Oerter, 2007)

Schon früh wurde berichtet, dass das Quecksilber bei Abgastemperaturen von unter 130 °C zu mehr als 90 % partikulär gebundener Form vorliegt (Kirchartz, 1994, pp 78-79). Allerdings bedeutet die Aussage, dass 90 % des Quecksilbers in partikulärer Form vorliegt nicht, dass auch 90 % des Quecksilbers zurückgehalten und nicht mit dem Abgas emittiert werden. Das mit dem Filterstaub aus dem Abgasentfernte Quecksilber wird zum Teil ausgeschleust (so weit diese Maßnahme konkret im Einzelfall tatsächlich praktiziert wird) und zum anderen Teil ins System zurückgeführt wird (mit dem Staub im Verbundbetrieb), was zu der beschriebenen Anreicherung führt. Wird der Filterstaub nicht ausgeschleust, wird in erster Näherung letztlich das gesamte mit den Roh- und Brennstoffen zugeführte Quecksilber mit dem Abgas emittiert (Linero, 2011). Im Falle der systematischen Staubausschleusung zeigt die langfristige Bilanzierung, dass nur ca. 30 bis maximal 50 % des eingetragenen Quecksilbers dem Abgas ferngehalten werden können. Dies bedeutet, dass selbst bei niedriger Abgastemperatur und hoher adsorptiver Elimination mit dem Filterstaub von 90 % die tatsächliche Rückhaltung nicht den gleichen Wert erreicht, da über höhere Konzentrationen im Kreislauf höhere Quecksilbermengen emittiert werden. Gleichwohl scheinen diese Zusammenhänge noch der detaillierten Evaluierung zu bedürfen. Die weitergehendere Quecksilberelimination kann nur durch die Minimierung des Inputs sowie durch zusätzliche end-of-the-pipe-Maßnahmen, wie

den Einsatz von Aktivkohle im Flugstromverfahren oder in Schüttschichtfilter, erreicht werden.

Die Temperaturabhängigkeit der Quecksilberemissionen aus Zementanlagen spiegeln auch die Messdaten realer Anlagen wieder¹. In Abbildung 24 ist ein Beispiel aus zwei Anlagen zusammengestellt.

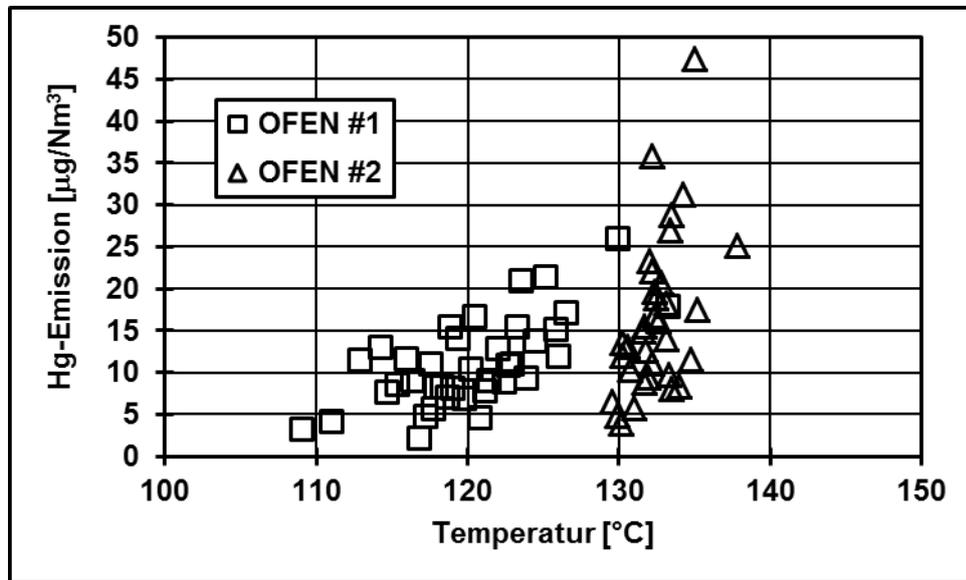


Abbildung 24: Korrelation zwischen Quecksilberemissionen und Abgastemperatur in zwei Zementöfen; Auswertung der publizierten und ausgewerteten Emissionsdaten¹ zweier Zementwerke.

Aus Abbildung 24 wird folgendes deutlich:

- Die Abgastemperaturen können auf sehr unterschiedlichem Niveau liegen. In einem Ofen liegt sie im Bereich von 110 – 140 °C, während sie im anderen deutlich höher liegt, bei 130 – 140 °C; in anderen Werken wird das Abgas mit Temperaturen von bis zu 210°C emittiert.
- Die Differenz der Quecksilberemission für die höchste und niedrigste Temperatur der einzelnen Öfen liegt bei ca. 70 %. Dies bedeutet, dass bei tiefen Abgastemperaturen das Quecksilber in der Größenordnung von 90 % vermindert werden kann. Dies deckt sich mit der oben genannten Aussage aus dem Jahre 1994 (Kirchartz, 1994, pp 78-79). Wie erwähnt ist aber die tatsächlich langfristige, niedrigere, Eliminationsrate maßgeblich.

4.2.2 Quecksilber-Emissionen der Deutschen Zementindustrie in den Jahren 2008, 2009 und 2010

Die publizierten Tagesmittelwerte der Deutschen Zementwerke für die Jahre 2008 - 2010¹ wurden ausgewertet. Zum Vergleich wurde aus den für den gleichen Zeitraum veröffentlichten Umweltdaten der Deutschen Zementindustrie (VDZ, 2009; VDZ, 2010; VDZ, 2011) die entsprechenden Daten herausgelesen. Alle nachfolgend angegebenen Konzentrationen beziehen sich auf den trockenen Gaszustand bei Normbedingungen (1013 mbar, 0 °C) und auf einen Referenzsauerstoffgehalt von 10 Vol.-%.

4.2.2.1 Mittlere Emissionen der deutschen Zementwerke

Die Emission von Quecksilber wurde nur an 32 (2008: 31) der 40 Zementöfen der 34 Zementwerke kontinuierlich gemessen bzw. aufgezeichnet. Aus den publizierten und ausgewerteten Tagesmittelwerten wurden die Jahresmittelwerte der einzelnen Werke und daraus die Jahresmittelwerte der Jahre 2008, 2009 und 2010 für die deutsche Zementindustrie ermittelt (arithmetisches Mittel). Der VDZ hat bei seinen jährlichen Messungen eine bestimmte Anzahl von Messungen aufgeführt. Dabei handelt es sich nicht um Jahresmittelwerte, sondern um Mittelwerte über eine bestimmte Messdauer (im Bereich von Stunden); sie werden als Mittelwert VDZ bezeichnet. Sie wurden dennoch zum orientierenden Vergleich herangezogen. Die so berechneten Werte sind in Tabelle 12 zusammengestellt. Abbildung 25 zeigt die Häufigkeitsverteilung der publizierten und ausgewerteten Tagesmittelwerte.

Tabelle 12: Ermittelte Hg-Jahresmittelwerte aus den publizierten ausgewerteten Tagesmittelwerten¹ und die vom VDZ veröffentlichten diskontinuierlichen Messdaten

	Hg-Emission [$\mu\text{g}/\text{Nm}^3$]		
	2008	2009	2010
Anzahl Öfen	31	32	32
Jahresmittelwert	11,1	10,9	11,6
Maximaler Wert	29,2	23,3	25,7
Mittelwert VDZ	16,2	16,5	18,5
Maximaler Wert	120	92	81

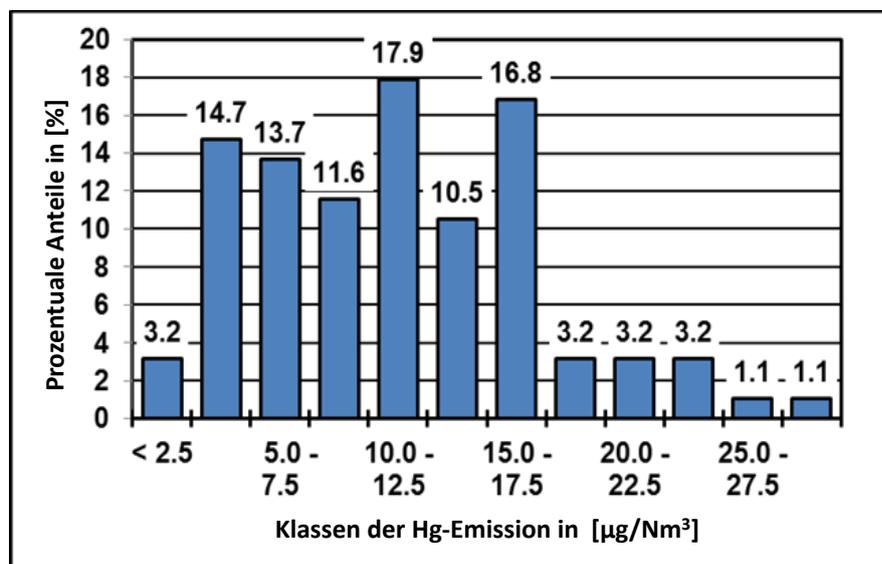


Abbildung 25: Alle gemessenen Hg-Tagesmittelwerte (2008, 2009, 2010), unterteilt in 12 Emissionsklassen

Zwischen den mit den publizierten Tagesmittelwerten berechneten Jahresmittelwerten und dem Mittelwert VDZ besteht eine deutliche Differenz. Die VDZ-Werte wurden zum überwiegenden Teil in Verbund- (laufende Rohmehlmühle) und im Direktbetrieb (ohne Betrieb der Rohmehlmühle) ermittelt. In der Regel ist die zeitliche Dauer des Verbundbetriebes deutlich länger als jene des Direktbetriebes, was natürlich in die gemessenen Tagesmittelwerten richtig berücksichtigt wurde, während bei der Berechnung des Mittelwertes VDZ der Einfluss des Direktbetriebes wohl überbewertet wurde.

Allerdings zeigt die Häufigkeitsverteilung der VDZ-Werte (Abbildung 26), dass hohe Kurzzeitwerte, besonders im Direktbetrieb auftreten können.

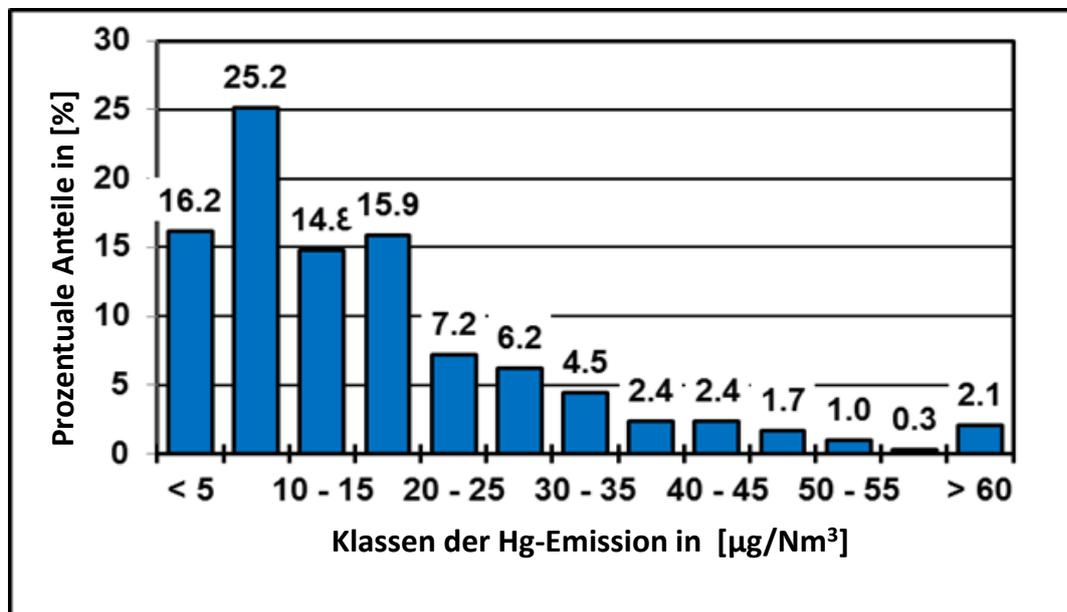


Abbildung 26: Alle VDZ-Werte für den Zeitraum 2008 - 2010, unterteilt in 13 Emissionsklassen, nach (VDZ, 2009; VDZ, 2010; VDZ, 2011)

4.2.2.2 Kommentierung von Ergebnissen kontinuierlicher Quecksilbermessungen

Quecksilber-Emissionen werden primär durch den Quecksilber-Eintrag in das Ofensystem bestimmt. Das heißt, der Quecksilber-Gehalt der Rohmaterialien und der Brennstoffe bestimmt die Höhe der Emissionen. In der Regel ändert sich der Quecksilbergehalt der „natürlichen“ Rohmaterialien (Kalkstein, Mergel, Ton, etc.) und der eingesetzten fossilen Brennstoffe (Kohle) nicht wesentlich. Anders ist es bei den Abfall-basierten Rohmaterialien und Brennstoffen. Daher sollten diese Komponenten regelmäßig überprüft werden.

Es ist sehr schwierig, allein aus den gemessenen Tagesmittelwerten Rückschlüsse auf das Verhalten des Quecksilbers in den einzelnen Öfen zu ziehen oder sogar Empfehlungen für Reduktionsmaßnahmen zu geben. Dafür fehlt die Kenntnis der Betriebsdaten.

Es gibt Hinweise, dass Messgeräte in einzelnen Werken nicht richtig funktionieren und ungenaue oder sogar falsche Werte liefern. Im Folgenden werden drei solche Beispiele gezeigt.

a) Ungenaue Konzentrationsangaben

Verschiedene Werke geben ihre Emissionen in $[\text{mg}/\text{Nm}^3]$ mit zwei Dezimalstellen an. Solche Angaben sind ungeeignet, wie das nachfolgende Beispiel zeigt (Tabelle 13).

Tabelle 13: Beispiel für die ungeeignete Angabe der Quecksilberemissionen

Datum	Tagesmittelwert $[\text{mg}/\text{Nm}^3]$
03.10.2009	0,01
04.10.2009	0,01
05.10.2009	0,03
06.10.2009	0,01
07.10.2009	0,02
08.10.2009	0,02
09.10.2009	0,02
10.10.2009	0,01
11.10.2009	0,01
12.10.2009	0,03
13.10.2009	0,03
14.10.2009	0,02
15.10.2009	0,03
16.10.2009	0,03

b) Probleme mit den Messgeräten

Es ist bekannt, dass bei Quecksilber-Messgeräten einige Probleme auftreten können. Aus Erfahrung weiß man, dass bestimmte Begleitsubstanzen den Konverter, der ionisches zu metallischem Quecksilber reduziert, beeinflussen können. Es kommt dabei zu einem Ausfall bzw. Teilausfall des Konverters und das Messgerät misst nur noch den metallischen Teil der Quecksilber-Emission. In diesem Fall werden zu kleine Quecksilbergehalte gemessen. Im Bereich der UV-Absorptionslinie des Quecksilbers können auch andere Begleitsubstanzen (z.B. SO_2 , bestimmte Kohlenwasserstoffe) stören. Diese werden durch verschiedene Maßnahmen im Messgerät eliminiert. Es ist aber möglich, dass es auch hier zu Störungen kommt. In diesem Fall werden in der Regel zu hohe Konzentrationen gemessen.

Aus den Emissionsdaten kann nicht eindeutig nachgewiesen werden, dass ein bestimmtes Messgerät ungenaue oder sogar falsche Werte liefert. Allerdings deuten die Beispiele #7, #8 und #9 auf solche Probleme hin.

Beispiel #7:

Abbildung zeigt die Emissionskurve der Tagesmittelwerte für 2008 und 2009. Im Jahre 2008 sind Messwerte vorhanden, die wahrscheinlich noch realistisch sind. 2009 zeigt das Messge-

rät unrealistische Werte, zeitweise bleiben die Werte auf einem konstanten Wert stehen. 2010 sind überhaupt keine Messwerte mehr ausgewiesen. Das Messgerät wurde wahrscheinlich außer Betrieb genommen.

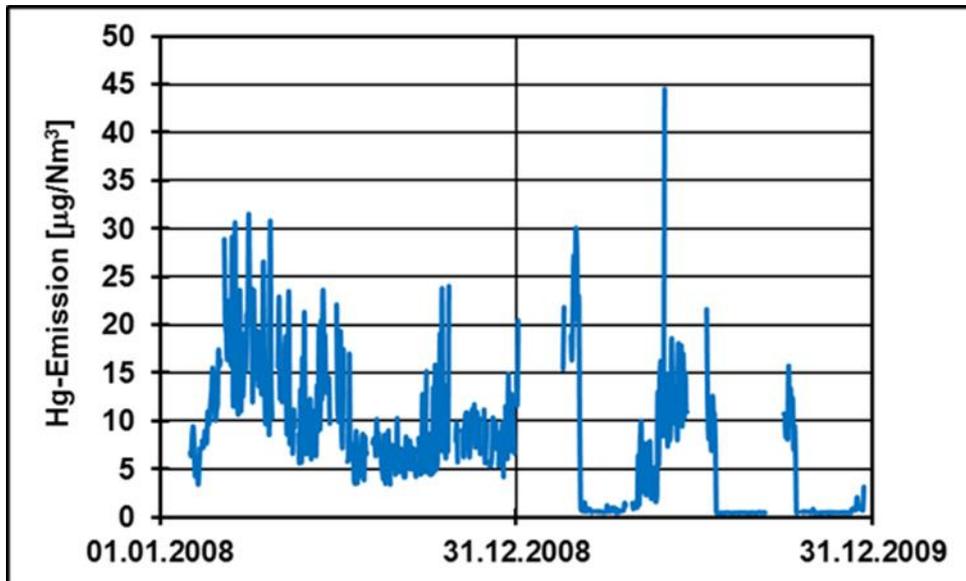


Abbildung 27: Störung des kontinuierlichen Hg-Messgerätes im Jahr 2009 (Tagesmittelwerte)

Beispiel #8:

In diesem Werk wurde festgestellt, dass die Messwerte über drei Jahre (2008 - 2010) sehr stark zu tiefen Konzentrationen abdriften, wie die Darstellung der Wochenmittelwerte in Abbildung 28 zeigen. Eine solche Drift ist über den Quecksilber-Eintrag oder über die Staubausschleusung nur schwer erklärbar. Auch hier muss vermutet werden, dass das Messgerät driftet. Hier könnte durchaus ein Problem mit dem Konverter die Ursache sein.

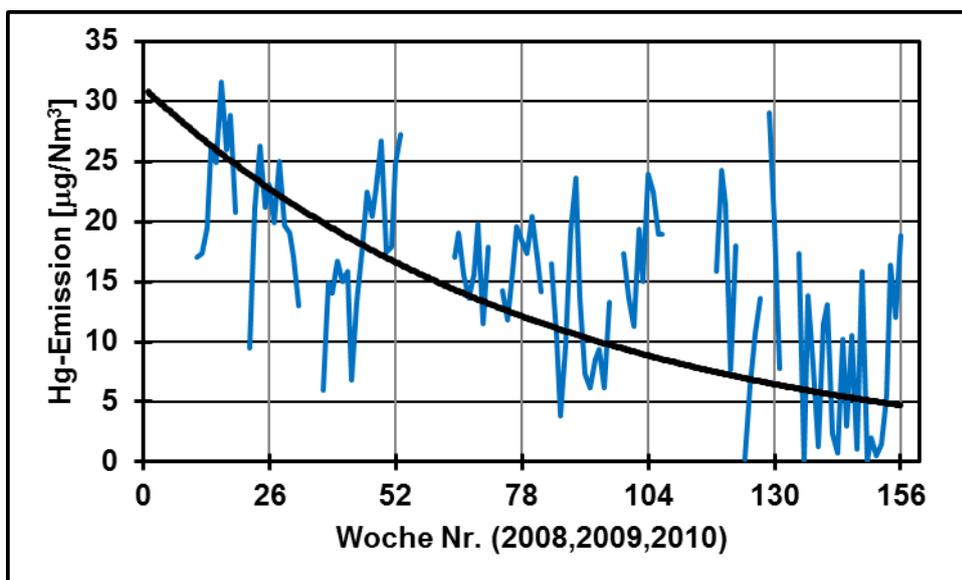


Abbildung 28: Starke Drift der Wochenmittelwerte einer kontinuierlichen Quecksilbermessung

Beispiel #9:

In diesem Werk sind regelmäßig sehr hohe Spitzen in der Quecksilber-Emission erkennbar. Die Tagesmittelwerte übersteigen die „normale Emission“, die im Bereich von 10 bis 20 $[\mu\text{g}/\text{Nm}^3]$ liegt, um ein Vielfaches (Abbildung 29). Ein Tagesmittelwert von 339 $[\mu\text{g}/\text{Nm}^3]$ (siehe Abbildung 29) ist vom Prozess her nicht erklärbar. In diesem Fall ist eine Störung des Messgerätes, aus welchen Gründen auch immer, sehr wahrscheinlich.

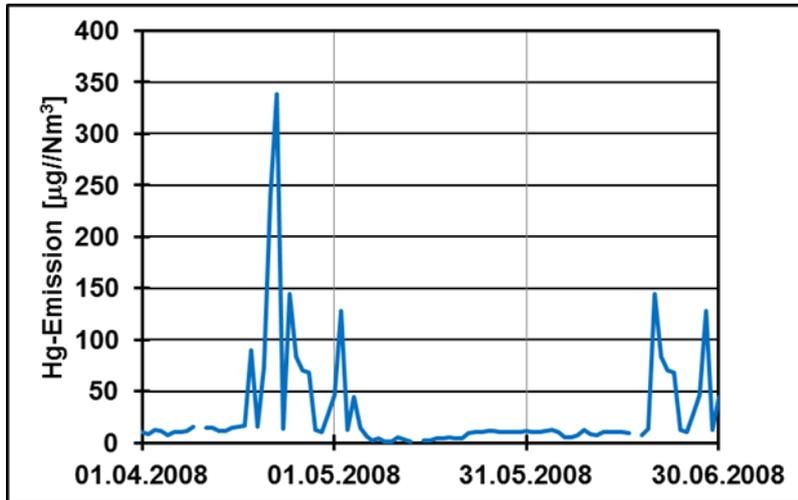


Abbildung 29: Emissionsverlauf mit extremen Spitzen (Tagesmittelwerte im ersten Halbjahr 2008)

4.2.2.3 Weitere Beispiele für die Interpretation kontinuierlicher Quecksilbermessungen

a.) Werke mit relativ konstanten Emissionen

Verschiedene Werke weisen eine über die Beobachtungsperiode von drei Jahren (2008 - 2010) relativ konstante Quecksilber-Emission aus, wie die nachfolgenden beiden Beispiele zeigen (Abbildung 30 und Abbildung 31). Dazu wurden aus den publizierten und ausgewerteten Tagesmittelwerten Wochenmittelwerte gebildet.

In diesen beiden Werken ist der Quecksilber-Eintrag über das Rohmaterial und die Brennstoffe relativ konstant und beim Betrieb der Öfen wurde nichts verändert.

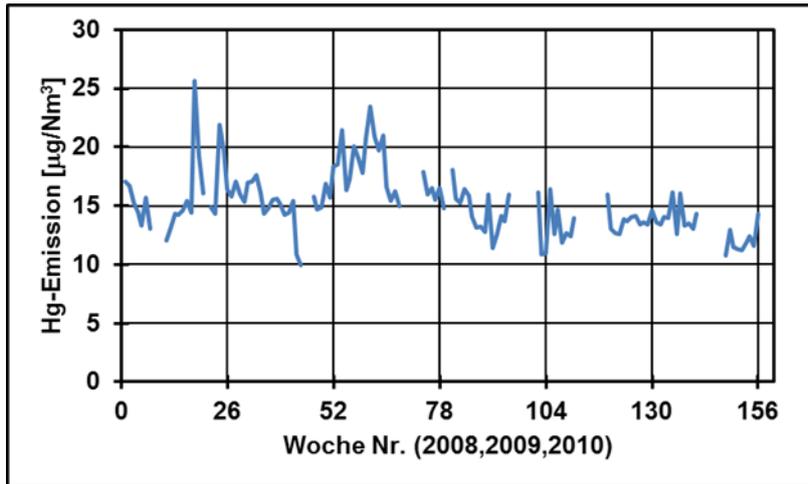


Abbildung 30: Werk mit einer relativ konstanten Hg-Emission (Beispiel #9)

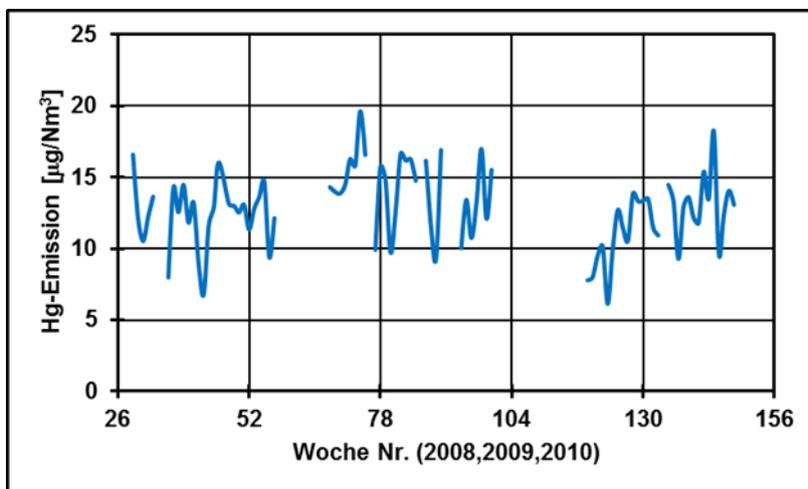


Abbildung 31: Werk mit einer relativ konstanten Hg-Emission (Beispiel #10)

b.) Zementwerke mit variierenden Emissionen

Einige Werke zeigen ein sich über den Beobachtungszeitraum von drei Jahren stark änderndes Emissionsprofil, wobei aus den Messdaten allein kein eindeutiger Grund für diese Änderungen abgeleitet werden kann.

Beispiel #11:

Dieses Zementwerk wies in den ersten 7 Wochen sehr hohe Emissionen zwischen 40 und 53 $[\mu\text{g}/\text{Nm}^3]$ (Wochenmittelwerte) auf (Abbildung 32). Dann verringerte sich die Emission deutlich auf 20 bis 30 $[\mu\text{g}/\text{Nm}^3]$. In diesem Fall muss entweder der Quecksilber-Eintrag drastisch verringert worden sein oder es wurde verstärkt Quecksilber über den Staub ausgeschleust. Natürlich kann auch hier eine Störung des Messgerätes nicht gänzlich ausgeschlossen werden.

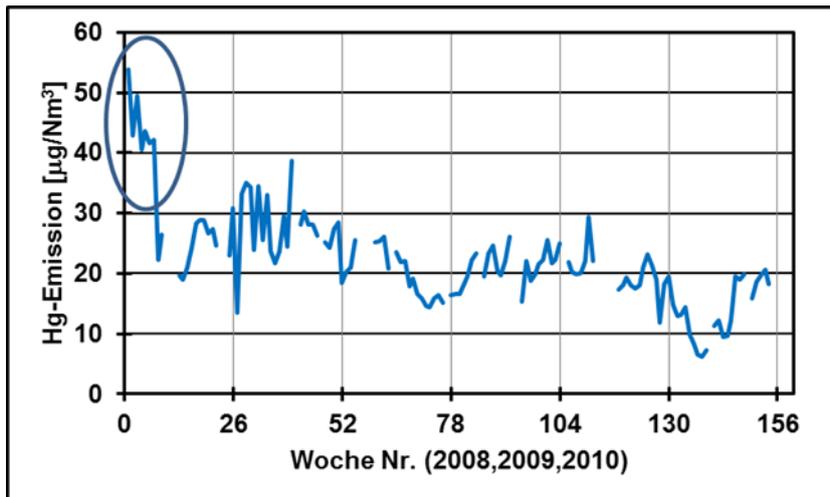


Abbildung 32: Konzentrationssprung (Wochenmittelwerte)

Beispiel #12: In diesem Fall ändert sich die Quecksilber-Emission deutlich, allerdings auf recht tiefem Niveau (Abbildung 33). In diesem Fall muss entweder der Quecksilber-Eintrag erhöht worden sein oder es wurde weniger Quecksilber über den Staub ausgeschleust.

Natürlich kann auch hier ein Einfluss des Messgerätes nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Gerade in diesem tiefen Emissionsbereich wirkt sich zum Beispiel eine Drift des Nullpunktes sehr stark auf das Messergebnis aus. Hier müsste man wissen, wie die Qualität der Messwerte (z.B. QAL2, QAL3) überprüft wurde.

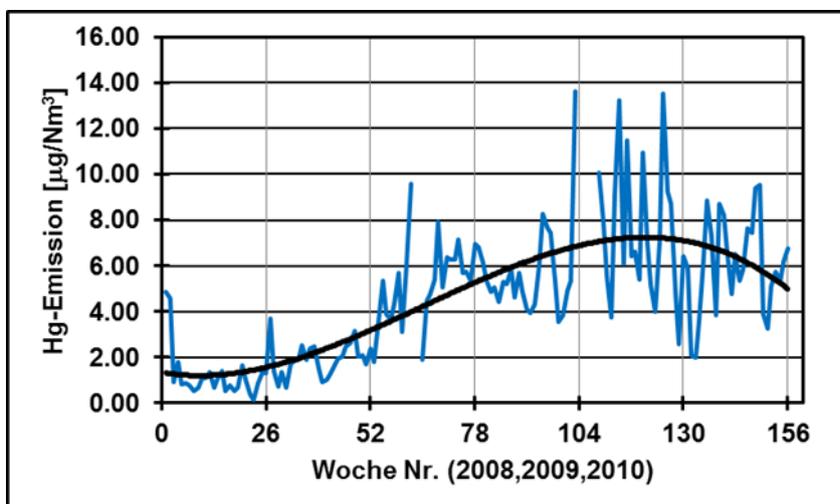


Abbildung 33: Ungewöhnlicher Verlauf der Emissionskurve, der auf Probleme mit dem kontinuierlichen Messgerät zurückgeführt wird

5. Schlussfolgerungen

Der Einsatz Abfall-basierter Brenn- und Rohstoffe in Deutschland wird nachgezeichnet. Er liegt mittlerweile auf einem hohen Niveau. Dabei wird betont, dass dies einen positiven Einfluss auf die Treibhausgasemissionen hat. In den meisten Studien wird aber übersehen, dass die Mitverbrennung von Abfall-basierten Brennstoffen in Zementwerken mit einem Rückgang der Energieeffizienz verbunden ist, der den Vorteil der aus den Abfällen freigesetzten

biogenen Kohlendioxidemissionen weitgehend egalisiert. Als Beispiel wird die Entwicklung in Deutschland herangezogen. In den 34 deutschen Anlagen zur Klinkerherstellung stieg die Substitution von fossilen durch Abfall-basierte Brennstoffe in den vergangenen 10 Jahren ebenso kontinuierlich an wie der spezifische Energieverbrauch. D.h. trotz der unternommenen Anstrengungen zur Minimierung des spezifischen Energiebedarfs ist dieser durch den Einsatz Abfall-basierter Brennstoffe angestiegen und hebt die erzielten Fortschritte, einschließlich der Treibhausgasvorteile auf dem biogenen Anteil des Abfalls wieder auf.

Es wird aufgezeigt, dass die Emissionen von Kohlenmonoxid und organischen Verbindungen stark vom Einsatz Abfall-basierter Brennstoffe beeinflusst sein können, d.h. es resultieren in einer Reihe von Zementwerken mitunter erhebliche zusätzliche CO- und TOC-Emissionen, die durch den Einsatz Abfall-basierter Brennstoff bedingt sind. In diesen Fällen kommt es auch zu zusätzlichen Benzolemissionen. Bei den Abfallverbrennungsanlagen spricht man den organischen Verbindungen aus der unvollständigen Verbrennung toxikologische Relevanz zu. Gleiches hat auch für die Abfallmitverbrennung in Zementwerken zu gelten. Die gegenwärtige Genehmigungs- und Vollzugssituation weist deutliche Vollzugsdefizite auf. So hat nach den vorliegenden immissionsschutzrechtlichen Genehmigungen ungefähr die Hälfte der deutschen Zementwerke keinen TOC-Grenzwert und ca. zwei Drittel keinen CO-Grenzwert, obwohl die Rechtslage dies verlangt. Von den Werken mit TOC-Grenzwert haben ca. 90 % eine Ausnahmeregelung, da davon ausgegangen wird, dass die Überschreitung des TOC-Grenzwertes von 10 mg/Nm^3 ausschließlich rohmaterialbedingt ist. Wie gezeigt, ist dies aber bei einer Reihe von Zementwerken nicht der Fall. Das skizzierte Vollzugsdefizit ist nicht tragbar. Sein Abbau muss umgehend in Angriff genommen werden. Mit dem Austreibungstest steht eine Messverfahren zur Verfügung, mit dem der TOC- und CO-Anteil bestimmt werden kann, der aus den Rohmaterialien stammt und so indirekt der aus dem Abfalleinsatz zusätzlich emittierte TOC- und CO-Anteil bestimmt werden kann.

Auch die Emissionen von Schwefeldioxid können durch den Einsatz Abfall-basierter Brennstoffe im Einzelfall deutlich steigen.

Die Quecksilberemissionen sind stark temperaturabhängig. Bei der Technik der systematischen Ausschleusung Filterstaub zur Reduktion der Quecksilberemissionen muss langfristig bilanziert werden, da die Aufkonzentrierung im äußeren Kreislauf zu berücksichtigen ist. Hier fehlt es noch an klaren Nachweisen und Quantifizierungen der tatsächlich erreichbaren Eliminationsraten, die alle wesentlichen Einflussfaktoren berücksichtigen.

Abfall-basierte Brennstoffe sind regelmäßig auf Schadstoffe, insbesondere auf flüchtige Schwermetalle, zu analysieren. Da Quecksilber unter das Emissionsminimierungsgebot nach Nummer 5.2.7 der TA Luft fällt, kann die Auffassung vertreten werden, dass zusätzliche, abfallbedingte Quecksilberemissionen nicht genehmigungsfähig sind, auch wenn der Emissionsgrenzwert eingehalten wird.

Gegenwärtig müssen die Zementwerke ihre Ergebnisse der kontinuierlichen Überwachung nur in Form von Häufigkeitsverteilungen den zuständigen Behörden übermitteln. Die ist

nicht ausreichend, da damit weder Emissionskurven noch Korrelationen von einzelnen Parametern erstellt werden können, was aber zur Beurteilung der Emissionen von erheblicher Bedeutung ist. Dies belegen die oben dokumentierten Beispiele. Deshalb sollte zukünftig die Übermittlung der Tagesmittelwerte in chronologischer Form als Excel-Dateien verlangt werden. Die Quecksilberwerte sollten stets in $[\mu\text{g}/\text{Nm}^3]$ und nicht in $[\text{mg}/\text{Nm}^3]$ angegeben werden.

6. Literaturnachweis

(AT Richtlinie, 2008)

Österreichisches Lebensministerium, Richtlinie für Ersatzbrennstoffe (2008)

(AT AVV, 2010)

Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und des Bundesministers für Wirtschaft, Familie und Jugend über die Verbrennung von Abfällen (Abfallverbrennungsverordnung – AVV)“. BGBl. II Nr. 389/2002, amended in 2010 BGBl. II Nr. 476/2010

(AT VÖZ, 2011)

Vereinigung der österreichischen Zementindustrie (VÖZ), Emissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie, Berichtsjahr 2010 (2011)

(BREF CLM, 2010)

Anonymous, Reference Document on Best Available Techniques in the Cement, Lime and Magnesium Oxide Manufacturing Industries, (2010), http://eippcb.jrc.es/reference/BREF/clm_bref_0510.pdf

(CAC, 2011)

Cement Association of Canada: Canadian Cement Industry, Sustainability Report 2010 (2011)

(Cemuisse, 2012)

Verband der Schweizerischen Zementindustrie, Zement – Kennzahlen 2011 (2012)

(CRC Handbook, 1995)

Lide, D.R., CRC Handbook of Chemistry and Physics 1995-1996, CRC Press, Inc., 76rd edition (1995), 6-77 and 6-110

(CRC Handbook, 2012)

Haynes, W.M.; Lide, D.R.; Bruno, T.J., CRC Handbook of Chemistry and Physics 2012-2013, CRC Press, Taylor&Francis Group Boca Raton/USA, 93rd edition (2012), 6-88-9-92

(DE 17. BImSchV-Entwurf, 2002)

Anonym, Entwurf der Bundesregierung für die “Verordnung zur Änderung der Verordnung über Verbrennungsanlagen für Abfälle und ähnliche brennbare Stoffe und weitere Verordnungen zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes” , BT-Drs. 15/14 vom 26.10.2002

(DE 17. BImSchV-Entwurf, 2003)

Anonym, Empfehlung der Ausschüsse zum Entwurf der “Verordnung zur Änderung der Verordnung über Verbrennungsanlagen für Abfälle und ähnliche brennbare Stoffe und weitere Verordnungen zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes” , BR-Drs. 5/1/03 vom 04.03.03

(DE 17. BImSchV, 2003)

Anonym, Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen – 17. BImSchV) vom 23.11.1990 in der Fassung der Bekanntmachung vom 14.08.2003, BGBl. I S. 1633

(DE IndEmissRLUVuaÄndV, 2013)

Verordnung zur Umsetzung der Richtlinie über Industrieemissionen, zur Änderung der Verordnung zur Begrenzung der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen beim Umfüllen oder Lagern von Ottokraftstoffen, Kraftstoffgemischen oder Rohbenzin sowie zur Änderung der Verordnung zur Begrenzung der Kohlenwasserstoffemissionen bei der Betankung von Kraftfahrzeugen (IndEmissRLUVuaÄndV) vom 02.05.2013, BGBl. I S. 1021 (Nr. 21), siehe auch den Entwurf in BT-Drs. 17/12411 vom 20.02.2013

(EC Guidelines, 2011)

European Commission Directorate-General Environment, Guidelines on the interpretation of the R1 energy efficiency formula for incineration facilities dedicated to the processing of municipal solid waste according to Annex II of Directive 2008/98/EC on Waste (2011)

(EC RDF, 2003)

European Commission – Directorate General Environment, Refuse derived fuel, current practice and perspectives (B4-3040/2000/306517/MAR/E3), Final Report (2003)

(EEB/ECOS, 2012)

European Environment Bureau (EEB)/European Environmental Citizens Organisation for Standardisation (ECOS), Request to the DG Environment to oppose the adoption of the "Notification of an Italian draft legislation establishing end-of-waste criteria for Solid Recovered Fuel (SRF), letter dated 5 November 2012, accessed on 13 November 2012 (<http://www.eeb.org/EEB/?LinkServID=959E55A5-5056-B741-DBCAE043D7FC9D5D&showMeta=0>)

(EU IPPCD, 2008)

Directive 2008/1/EC of the European Parliament and of the Council of 15 January 2008 concerning integrated pollution prevention and control, OJ L 24, 29.1.2008, p. 8

(EU IED, 2010)

Directive 2010/75/EC of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control), OJ L 334, 17.12.2010, p 17

(EU WFD, 2008)

Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives, OJ L 312, 22.11.2008, p. 3

(EU WID, 2000)

Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council of 4 December 2000 on the incineration of waste, OJ L 332, 28.12.2000, p. 91

(Galvez Martos/Schönberger, 2013)

Ananalysis of the use of life cycle assessment for waste co-incineration in cement kilns, Resources, Conservation & Recycling (zur Publikation angenommen)

(HDC, 2012)

HeidelbergCement Northern Europe, Energy and climate;
http://www.heidelbergcement.com/no/en/country/sustainability/energy_climate.htm, accessed 8 August 2012

(Hill, 1922)

Hill, C.F., Measurement of mercury vapor pressure by means of the Knudsen pressure gauge, *Physical Revue* 20 (1922) 259-267

(Holcim/GTZ, 2006)

Holcim Group Support Ltd/Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), Guidelines on co-processing waste materials in cement production – The GTZ-Holcim Public Private Partnership (2006)

(IT SRF, 2012)

Italian Minister for the Environment and Land and Sea Protection, Draft legislation establishing end-of-waste criteria for Solid Recovered Fuel (SRF) dated 22 August 2012, accessed on 13 November 2012

(<http://ec.europa.eu/enterprise/tris/pisa/app/search/index.cfm?fuseaction=getdraft&inum=1836604>)

(JRC-IPTS EoW, 2009)

Villanueva, A.; Delgado, L.; Luo, Z.; Eder, P.; Catarino, A.; Litten, D.; Study on the selection of waste streams for end-of-waste assessment, Final report commissioned by the Institute for Prospective Technological Studies (IPTS), one of the seven institutes of the Joint Research Centre (JRC) of the European Commission (2009)

(Kirchartz, 1994)

Kirchartz, B., Reaktion und Abscheidung von Spurenelementen beim Brennen des Zementklinkers, *Schriftenreihe der Zementindustrie*, (1994)Heft 56, Verlag Bau + Technik, Düsseldorf

(Lahl/Schönberger/Zeschmar-Lahl, 2012)

Lahl, U.; Schönberger, H.; Zeschmar-Lahl, B., Substanzielle ökologische Verbesserungen möglich: Bei der Umsetzung der Industrieemissions-Richtlinie der EU in nationales Recht können Bundestag und Bundesrat wichtige Anregungen berücksichtigen, *ReSource* (2012), Nr. 2, S. 41-48

(Linero, 2011)

Linero, A.A., Synopsis of Mercury Controls at Florida Cement Plants, Manuscript for the presentation at the 104st Annual Conference and Exhibition of the Air and Waste Management Association in Orlando, Florida/USA on 22 June 2011 (2011)

(Lechtenberg, 2010)

Lechtenberg, D.; Alternative fuels in Ireland – How the Celtic tiger lost its claws, *globalcementMagazine* (December – January 2010) 56-58

(Minamata Convention, 2013)

N.N., Draft Minamata Convention on Mercury,

http://unep.org/hazardoussubstances/Portals/9/Mercury/Documents/INC5/5_7_e_annex_advance.pdf

(NRW MUNLV, 2005)

Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (MUNLV) des Landes Nordrhein-Westfalen (NRW), Leitfaden zur energetischen Verwertung von Abfällen in Zement-, Kalk- und Kraftwerken in Nordrhein-Westfalen, 2. Auflage (2005)

(Oerter, 2007)

Oerter, M., Influence of raw materials on the emissions of mercury, presentation at the seminar of the European cement research academy (ecra) on 26 April 2007

(Oerter/Zunzer, 2011)

Oerter, M.; Zunzer, U., Messung und Minderung von Quecksilber in der Zementindustrie, Manuscript and presentation of/at the VDI Fachkonferenz „Messung und Minderung von Quecksilber-Emissionen“ on 13 April 2011

(PT RDF, 2010)

Council of the European Union, Note from the Portuguese Delegation concerning “Directive 2008/98/EC on waste – Strategic importance of end of waste for high quality refuse-derived fuel in the near future”, 17916/10 (ENV 865 / ENER 364), 15 December 2010

(Renzoni et al., 2010)

Renzoni, R.; Ullrich, C.; Belboom, S.; Germain, A., Mercury in the Cement Industry, Report of the University of Liège independently commissioned by CEMBUREAU (2010)

(Scheuer, 2003)

Scheuer, A., Utilization of alternative fuels and raw materials (AFRs) in the cement industry, Cement International 1 (2003) No. 1, 48-66

(Schönberger/Tebert/Lahl, 2012)

Schönberger, H.; Tebert, C.; Lahl, U., Expertenanhörung im Umweltausschuss – Fachleute nahmen Stellung zum Regierungsentwurf zur Umsetzung der EU-Industrieemissionsrichtlinie in deutsches Recht, ReSource (2012) Nr. 4, S. 4-11

(Stull, 1947)

Stull, D.R., Vapor pressure of pure substances - inorganic compounds, Industrial and Engineering Chemistry 39 (1947) No. 4, 540-550

(TA Luft, 2002)

Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) vom 24.06.2002, GMBL. 2002, Heft 25, S. 511 – 605

(UBA AT, 2012)

Umweltbundesamt / Environment Agency Austria, Study on the suitability of the different waste-derived fuels for end-of-waste status in accordance with Article 6 of the Waste Framework Directive,

Final report of a study commissioned by the Institute for Prospective Technological Studies (IPTS) of the Joint Research Centre (JRC) of the European Commission (2012)

(USA Cement, 2013)

Environmental Protection Agency, National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants for the Portland Cement Manufacturing Industry and Standards of Performance for Portland Cement Plants; Final Rule, 40 CFR Parts 60 and 63
Federal Register, Part II, Vol. 78, No. 29, 12 February 2013

(VDI 2094, 2003)

Verein Deutscher Ingenieure, Emission control cement plants, VDI 2094 (2003)

(VDZ, 1999)

VDZ Verein Deutscher Zementwerke e.V., Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 1998, (1999)

(VDZ, 2000)

VDZ Verein Deutscher Zementwerke e.V., Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 1999, (2000)

(VDZ, 2001)

VDZ Verein Deutscher Zementwerke e.V., Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2000, (2001)

(VDZ, 2002)

VDZ Verein Deutscher Zementwerke e.V., Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2001, (2002)

(VDZ, 2003)

VDZ Verein Deutscher Zementwerke e.V., Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2002, (2003)

(VDZ, 2004)

VDZ Verein Deutscher Zementwerke e.V., Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2003, (2004)

(VDZ, 2005)

VDZ Verein Deutscher Zementwerke e.V., Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2004, (2005)

(VDZ, 2006)

VDZ Verein Deutscher Zementwerke e.V., Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2005, (2006)

(VDZ, 2007)

VDZ Verein Deutscher Zementwerke e.V., Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2006, (2007)

(VDZ, 2008)

VDZ Verein Deutscher Zementwerke e.V., Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2007, (2008)

(VDZ, 2009)

VDZ Verein Deutscher Zementwerke e.V., Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2008, (2009)

(VDZ, 2010)

VDZ Verein Deutscher Zementwerke e.V., Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2009, (2010)

(VDZ, 2011)

VDZ Verein Deutscher Zementwerke e.V., Environmental Data of the German Cement Industry 2010, (2011)

(VDZ, 2012)

VDZ Verein Deutscher Zementwerke e.V., Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2011, (2012)

(Waltisberg, 1998)

Waltisberg, J., Laborversuch zur Bestimmung der Emission von organischen Substanzen aus Zementrohstoffen, Zement-Kalk-Gips 51 (1998) No. 11, 593-599

(WBCSD Cement, 2005)

World Business Council for Sustainable Development, Cement Sustainability Initiative (CSI) - Guidelines for the selection and use of fuels and raw materials in the cement manufacturing industry, (2005)

(Wirthwein/Emberger, 2010)

Wirthwein, R.; Emberger, B., Burners for alternative fuels utilisation – optimisation of kiln firing systems for advanced alternative fuel co-firing, Cement International 8 (2010) No. 4, 42-47

(Zunzer, 2002)

Zunzer, U., Umsetzung der organischen Bestandteile des Rohmaterials beim Klinkerbrennprozess, Schriftenreihe der Zementindustrie, Heft 63 (2002)

7. Verwendete Abkürzungen

AbB	Abfall-basierter Brennstoff
Al	Aluminium
AT	Österreich
BREF	Best Available Techniques Reference Document
BETX	Benzol, Ethylbenzol, Toluol, Xylole
Ca	Calcium
CaF ₂	Calciumfluorid
CH ₄	Methan
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
F	Feuchte (im Abgas)
HF	Fluorwasserstoff
Fluff	Flugfähige Feinfraktion
GC/MS	Gaschromatographie/Massenspektroskopie
HCl	Chlorwasserstoff
Hg	Quecksilber
Hg°	Elementares Quecksilber
H _o	Brennwert
IED	Industrial Emissions Directive = Industrieemissionsrichtlinie
IT	Italien
kg	Kilogramm
kJ	Kilojoule
LCA	Life cycle analysis
mg	Milligramm
µg	Mikrogramm
MJ	Megajoule
NRW	Nordrhein-Westfalen
NH ₃	Ammoniak
Nm ³	Normkubikmeter
NO	Stickstoffmonoxid
NO _x	Stickoxide
O ₂	Sauerstoff (als Gas)
p	Abgasdruck
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PT	Portugal
Si	Silicium
SO ₂	Schwefeldioxid
T	Temperatur
t	trocken
TF	Transferfaktor
TOC	Total organic carbon = gesamter organisch gebundener Kohlenstoff = organischer Gesamtkohlenstoff
TS	Trockensubstanz
UBA	Umweltbundesamt
VDZ	Verein deutscher Zementwerke
Vol.-%	Volumenprozent
WFD	Waste Framework Directive = Abfallrahmenrichtlinie
WID	Waste Incineration Directive = Abfallverbrennungsrichtlinie