

Inhalt

Inhalt	2
Vorwort	3
1 Zementherstellung	4
2 Produktions- und Strukturdaten	6
3 Einsatzstoffe	8
3.1 Rohstoffe	8
3.2 Brennstoffe	10
4 Energie	12
5 Emissionen	14
5.1 Klimarelevante Gase / Kohlenstoffdioxid	16
5.2 Staub	17
5.3 Stickstoffoxide	18
5.4 Schwefeldioxid	20
5.5 Kohlenstoffmonoxid und organischer Gesamtkohlenstoff	21
5.6 Dioxine und Furane	22
5.7 Polychlorierte Biphenyle	23
5.8 Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe	24
5.9 Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol	25
5.10 Gasförmige anorganische Chlorverbindungen	26
5.11 Gasförmige anorganische Fluorverbindungen	27
5.12 Spurenelemente	28
Literatur	38
Ergänzende Literatur	38
Impressum	39

Im September 2000 legte der Verein Deutscher Zementwerke e. V. erstmals eine umfassende Dokumentation umweltrelevanter Daten vor. Die Reaktionen aus der Zementindustrie, aus Behörden und aus der Öffentlichkeit waren äußerst positiv und führten zu einer großen Nachfrage aus dem In- und Ausland. Mit der vorliegenden zweiten Ausgabe werden die Daten aktualisiert und der Bericht fortgeschrieben.

Umfang, Darstellung und Inhalt bleiben im Wesentlichen unverändert. Die Angaben zu Einsatzstoffen und Emissionen basieren auf einer Umfrage, an der sich sämtliche klinkerproduzierenden Werke in Deutschland beteiligt haben. Sowohl die Ergebnisse der kontinuierlichen Emissionsüberwachung als auch der Einzelmessungen von Spurenelementen und organischen Abgasbestandteilen können somit für das Jahr 1999 vollständig dokumentiert werden. Auf die Untersuchung der Spurenelementgehalte in Zementen wurde in dieser Ausgabe verzichtet. Der hiermit verbundene Aufwand lässt eine Aktualisierung nur in größeren Zeitabständen zu.

Düsseldorf, im Mai 2001

VEREIN DEUTSCHER ZEMENTWERKE E. V.

1 Zementherstellung

Zement ist ein Baustoff, der infolge chemischer Reaktionen mit Wasser selbständig erhärtet und danach sowohl an der Luft als auch unter Wasser fest und raumbeständig bleibt.

Zement besteht aus fein gemahlenem Portlandzementklinker und Calciumsulfat (natürlicher Gips, Anhydrit oder Gips aus Rauchgasentschwefelungsanlagen). Darüber hinaus kann Zement andere Hauptbestandteile wie Hüttensand, natürliche Puzzolane (z. B. Trass), Flugasche, Ölschieferabbrand oder Kalkstein enthalten. Eine schematische Darstellung des Herstellungsprozesses zeigt Bild 1-1.

Der so genannte Portlandzementklinker entsteht aus einem Rohstoffgemisch, das hauptsächlich Calciumoxid (CaO), Siliciumdioxid (SiO_2), Aluminiumoxid (Tonerde (Al_2O_3)) und Eisenoxid (Fe_2O_3) enthält. Kalkstein, Kreide und Ton oder deren natürlich vorkommendes Gemisch, der Kalksteinmergel, liefern diese chemischen Bestandteile. Kalkstein und Kreide bestehen aus Calciumcarbonat (CaCO_3). Wesentliche Bestandteile des natürlichen Verwitterungsprodukts Ton sind feinkörnige und glimmerartige Minerale sowie in geringer Menge Quarz und Feldspat als Reste des Ausgangsmaterials. Tonminerale und Feldspat sind Verbindungen von Aluminiumoxid und Siliciumdioxid (Alumosilicate) und Alkalien wie Natrium und Kalium. Das für die Bildung der Schmelze erforderliche Eisenoxid ist als Eisenhydroxid Bestandteil der Tonminerale oder wird als Eisenerz zugesetzt. Damit der Zement die vorgegebenen Qualitätsanforderungen erfüllt, ist eine exakt definierte Rohmaterialzusammensetzung erforderlich. Abweichungen können nur in geringem Umfang toleriert werden.

Das Rohstoffgemisch wird in einem Drehrohrofen bei einer Temperatur von etwa $1.450\text{ }^\circ\text{C}$ bis zum Sintern erhitzt. Aus den Ausgangsstoffen bilden sich dabei neue Verbindungen, die so genannten Klinkerphasen. Das sind bestimmte Calciumsilicate und Calciumalu-

minate, die dem Zement seine charakteristischen Eigenschaften der Erhärtung in Gegenwart von Wasser verleihen.

Der im Drehrohfen gebrannte Klinker wird anschließend in Zementmühlen unter Zusatz von Calciumsulfat und ggf. weiteren Hauptbestandteilen zu Zement gemahlen. Mit Hilfe des Calciumsulfats wird das Erstarrungsverhalten des Zements gesteuert, damit das Produkt bei der Betonherstellung optimal verarbeitet werden kann.

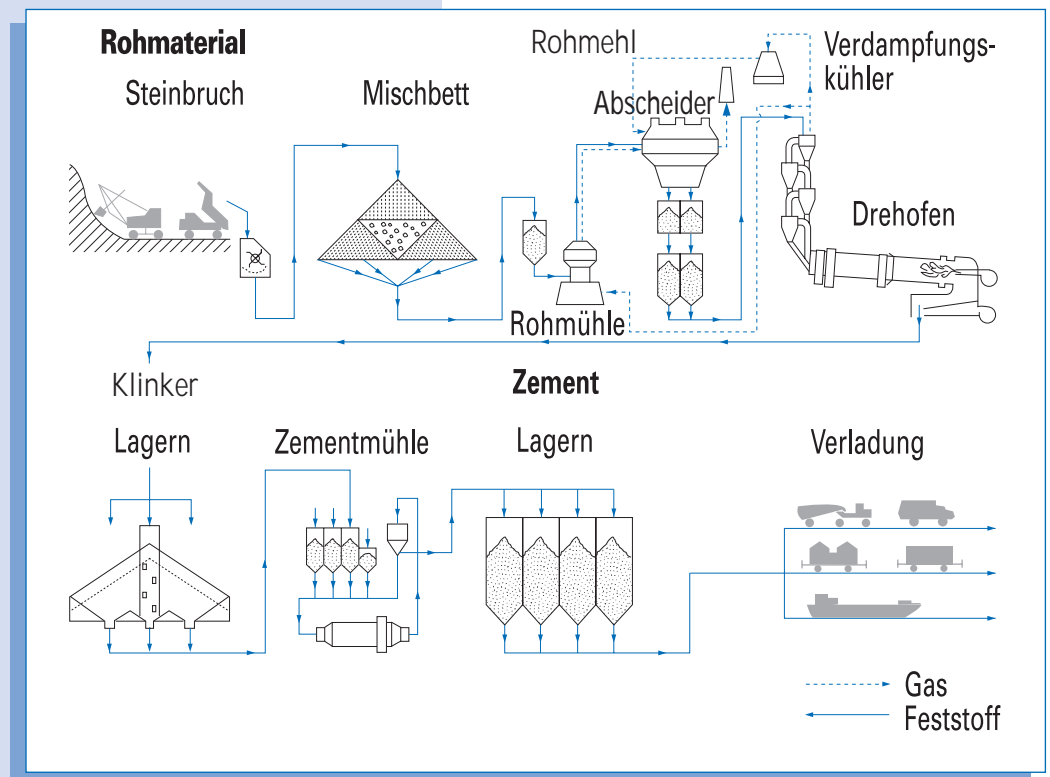


Bild 1-1: Schematische Darstellung des Zementherstellungsprozesses vom Steinbruch bis zum Versand.

Die weiteren Hauptbestandteile neben Zementklinker sind silicatische, aluminatische oder kalkhaltige Stoffe. Sie tragen zur Erhärtung des Zements bei oder wirken sich günstig auf die physikalischen Eigenschaften des Betons aus.

2 Produktions- und Strukturdaten

Zement ist ein homogenes, transportkostenintensives Massengut, das fast ausschließlich zu lokalen Absatzmärkten geliefert wird. Die Produktionsstandorte der deutschen Zementindustrie sind gleichmäßig über das Bundesgebiet verteilt und befinden sich in unmittelbarer Nähe zu den jeweiligen Kalksteinvorkommen. Im Jahr 1999 produzierten bundesweit 38 Unternehmen in 66 Werken ca. 36,7 Mio. t Zement (Bild 2-1).

Die Tafeln 2-1 und 2-2 geben einen Überblick über die Klinkerproduktion in Deutschland sowie den daraus hergestellten Zement. Zu den Hauptabnehmern gehören die Transportbetonindustrie (53 % der Zementproduktion) sowie die Hersteller von Betonbauteilen (25 % der Zementproduktion). 12 % des Zements wird als Sackzement versandt.

Zementklinker wird heute in Deutschland zum überwiegenden Teil nach dem Trockenverfahren in Drehrohröfen mit Zyklonvorwärmer hergestellt. Einen deutlich geringeren Anteil an der Produktion haben Öfen mit Rostvorwärmer (Tafel 2-3).



Bild 2-1: Zementwerke in der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 1999.

	Einheit	1997	1998	1999
Klinkerproduktion	1.000 t	26.493	27.520	27.739
Zementabsatz (einschl. Klinkerexport)*	1.000 t	31.753	34.944	37.143
davon: Inlandsabsatz*	1.000 t	28.803	32.010	33.776
Export einschl. Klinker	1.000 t	3.015	2.934	3.367
Zementimport (einschl. Saar)	1.000 t	5.474	4.241	3.759

Tafel 2-1: Produktion, Absatz und Import [1].

* Ab 1998 Änderung des Berichtskreises
- mit Vorjahr nicht vergleichbar.

Zementart	Gruppe	Einheit	1997	1998	1999
Portlandzement	CEM I	1.000 t	21.623	21.925	22.131
Portlandhüttenzement	CEM II	1.000 t	1.023	3.436	4.417
Portlandpuzzolanzement		1.000 t	103	86	143
Portlandflugaschezement		1.000 t	2	0	0
Portlandölschieferzement		1.000 t	355	406	412
Portlandkalksteinzement		1.000 t	1.602	1.504	1.852
Portlandflugaschehüttenzement		1.000 t	97	0	0
Hochofenzement	CEM III	1.000 t	3.916	4.524	4.651
Sonstige Zemente		1.000 t	82	129	170
Gesamt		1.000 t	28.803	32.010	33.776

Tafel 2-2: Inlandsabsatz nach Zementarten [1].

Ab 1998 Änderung des Berichtskreises
- mit Vorjahr nicht vergleichbar.

	Stand: 01.01.1998			Stand: 01.01.1999			Stand: 01.01.2000		
	Anzahl	Kapazität t/d	%	Anzahl	Kapazität t/d	%	Anzahl	Kapazität t/d	%
Öfen mit Zyklonvorwärmer	50	118.500	85,4	47	113.700	84,9	46	112.500	84,8
Öfen mit Rostvorwärmer	19	17.770	12,8	19	17.770	13,3	19	17.970	13,5
Trockenöfen	1	1.050	0,7	1	1.050	0,7	1	1.050	0,8
Schachtöfen	8	1.200	0,9	8	1.200	0,9	8	1.200	0,9
Schwefelsäure- Zement-Verfahren	2	280	0,2	2	280	0,2	-	-	-
Summe	80	138.800	100	77	134.000	100	74	132.720	100
mittlere Drehöfen		1.962			1.980			1.993	
Ofen- kapazität in t/d	Schachtöfen	150			150			150	
	Schwefelsäure- Zement- Verfahren	140			140			-	
Klinkerproduktion (Jahr)		(1997)			(1998)			(1999)	
Mio. t/a		26,5			27,5			27,7	
Auslastung %		60			64			65	

Tafel 2-3: Anzahl und Kapazität der Öfen mit Betriebsgenehmigungen in der Bundesrepublik Deutschland in den Jahren 1997 bis 1999. Die Auslastung ist auf eine angenommene Anlagenverfügbarkeit von 320 Tagen im Jahr bezogen [1, 2].

3 Einsatzstoffe

Gruppe	Rohstoff	Einsatz [1.000 t/a]
Ca	Kalkstein / Mergel / Kreide	46.600
	Sonstige, wie: - Kalkschlämme aus der Trink- und Abwasseraufbereitung - Kalkhydrat - Porenbetongranulat - Calciumfluorid	117
Si	Sand	1.240
	Gießereialtsand	140
Si-Al	Ton	1.945
	Bentonit / Kaolinit	40
	Rückstände aus der Kohleaufbereitung	24
Fe	Eisenerz	117
	Sonstige Einsatzstoffe aus der Eisen- und Stahlindustrie, wie: - Kiesabbrand - verunreinigtes Erz - Eisenoxid/Flugasche- Gemisch - Stahlwerksstäube - Walzzunder	170
	Hüttensand	4.900
	Flugasche	300
	Ölschiefer	356
Si-Al-Ca	Trass	97
	Sonstige, wie: - Papierreststoffe - Aschen aus Verbren- nungsprozessen - Mineralische Reststoffe, z. B. ölverunreinigte Böden	443
	Natürlicher Gips	700
	Natürlicher Anhydrit	605
	Gips aus der Rauchgas- entschwefelung	420
	Sonstige Gipse aus der chemischen oder kera- mischen Industrie	34
	S	Einsatzstoffe aus der Metall-Industrie, wie: - Aluminium-Werksstäube - Aufbereitungsrückstände von Salzschlacken - Aluminiumhydroxid

Tafel 3-1: Rohstoffeinsatz 1999 [3].

3.1 Rohstoffe

Die wichtigsten Ausgangsstoffe zur Herstellung des Portlandzementklinkers sind Kalkstein oder Kreide und Ton oder deren natürlich vorkommendes Gemisch, der Kalksteinmergel. In Abhängigkeit von der Rohstoffsituation am Standort des Zementwerks kann es erforderlich sein, der Rohstoffmischung reinen Kalkstein, Eisenerz, Sand oder andere Korrekturstoffe zuzusetzen, um fehlende chemische Bestandteile auszugleichen.

Neben natürlichen Rohstoffen können auch sekundäre Rohstoffe, wie z. B. Kalkschlämme, Gießereialtsande und Flugaschen eingesetzt werden. Sie enthalten als Hauptbestandteile ebenfalls Siliciumdioxid, Aluminiumoxid, Eisenoxid und/oder Calciumoxid und werden mit den Rohstoffen mengenmäßig so kombiniert, dass die Anforderungen an die vorgegebene Klinkerzusammensetzung erfüllt werden. Die Voraussetzungen, die die stoffliche Zusammensetzung eines Sekundärrohstoffs erfüllen muss, hängen in erster Linie von der vorgegebenen Rohstoffsituation eines Zementwerks, d. h. der Zusammensetzung des Kalkstein- bzw. Mergelvorkommens ab.

In Tafel 3-1 werden die im Jahr 1999 eingesetzten Rohstoffe aufgeführt. Ihrer chemischen Zusammensetzung entsprechend lassen sie sich in unterschiedliche Gruppen einteilen. Der Einsatz erfolgt hauptsächlich als Rohmaterialkomponente beim Klinkerbrennprozess. Hüttensand, ein geringer Teil des Kalksteins, Ölschiefer (in gebrannter Form) sowie Trass werden als Hauptbestandteil im Zement verwendet.

Die Zementindustrie bemüht sich, den Anteil anderer Bestandteile neben Klinker im Zement zu erhöhen. So können die Qualität des Produkts gezielt verändert, die Wirtschaftlichkeit der Herstellung verbessert, natürliche Ressourcen geschont sowie Stoffe aus anderen Prozessen im Sinne des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes sinnvoll verwertet werden.

Als Stoffe, die Zementklinker im Zement ersetzen können, sind in Deutschland in erster Linie Hüttensand (granulierte Hochofenschlacke) und daneben Kalkstein von technischer Bedeutung. Hüttensand ist ein Produkt der Roheisenherstellung und wird zur Herstellung von Portlandhütten- und Hochofenzementen verwendet.

Der Bedarf an Sulfatträgern, mit denen die Verarbeitungseigenschaften der Zemente gesteuert werden, wird zu ca. 70 % durch natürlichen Gips und/oder Anhydrit gedeckt. Bei dem restlichen Anteil handelt es sich um Gips aus Rauchgasentschwefelungsanlagen.

3.2 Brennstoffe

Brennstoffenergie wird bei der Zementherstellung im Wesentlichen für das Brennen des Zementklinkers aufgewendet. In geringem Umfang wird thermische Energie auch für die Trocknung von Rohstoffen und weiteren Zement-Hauptbestandteilen, wie z. B. Hütensand eingesetzt. Die traditionellen Brennstoffe in der Zementindustrie sind seit Mitte der 70er-Jahre Steinkohle und Braunkohle, in geringem Umfang auch schweres Heizöl. Seit den 90er-Jahren wird ein nennenswerter Teil der Kohle durch Petrolkoks ersetzt. Petrolkoks ist eine kohleähnliche Fraktion des Mineralöls, die bei der Rohölaufbereitung entsteht. Zum Anfahren des Ofens sowie für Trocknungsprozesse werden darüber hinaus leichtes und schweres Heizöl sowie Gas verwendet. Die Gesamtaufstellung der in der Zementindustrie eingesetzten Energieträger zeigt Tafel 3-2.

Brennstoff	1997 [Mio. GJ/a]	1998 [Mio. GJ/a]	1999 [Mio. GJ/a]
Steinkohle	38,2	32,0	29,4
Braunkohle	31,4	33,2	32,1
Petrolkoks	9,5	10,2	9,7
Heizöl S	2,2	4,5	5,9
Heizöl EL	0,2	0,3	0,3
Erdgas und andere Gase	1,6	0,6	0,6
Sonstige fossile Brennstoffe	0,5	1,1	0,9
Fossile Brennstoffe insgesamt	83,6	81,9	78,9
Sekundärbrennstoffe insgesamt	15,7	18,8	23,4
Thermischer Energieeinsatz insgesamt	99,3	100,7	102,3

Tafel 3-2: Brennstoffenergieeinsatz nach Energieträgern [4].

Neben den fossilen Brennstoffen werden heutzutage vermehrt Sekundärbrennstoffe beim Klinkerbrennprozess eingesetzt. Ihr Anteil am gesamten Brennstoffenergieeinsatz der deutschen Zementindustrie betrug 1999 etwa 23 %. Eine Aufstellung über die eingesetzten Sekundärbrennstoffe sowie deren durchschnittliche Heizwerte enthält Tafel 3-3.

Sekundärbrennstoff	1.000 t/a	MJ/kg
Reifen	236	26
Altöl	181	35
Fraktionen aus Industrie-/Gewerbeabfällen (wie z. B. Kunststoffe, Papier, Textilien, etc.)	290	22
Altholz	77	13
Lösungsmittel	24	27
Teppichabfälle	20	21
Bleicherde	13	10
Sonstige, wie:	82	14
- Gemischte Fraktionen aus Siedlungsabfällen		
- Ölschlamm		
- Organische Destillationsrückstände		
- Nahrungs- und Futtermittelabfälle		

Tafel 3-3: Einsatz und durchschnittliche Heizwerte von Sekundärbrennstoffen 1999 [3].

4 Energie

Zur Herstellung einer Tonne Zement wurden 1999 durchschnittlich 2.800 MJ Brennstoffenergie und 102,0 kWh elektrische Energie eingesetzt (Tafeln 4-1 und 4-2). Brennstoffenergie wird im Wesentlichen für das Brennen des Klinkers benötigt; elektrische Energie wird vor allem für die Rohmaterialaufbereitung (ca. 35 %), für das Brennen und Kühlen des Klinkers

(ca. 22 %) und für die Zementmahlung (ca. 38 %) verwendet.

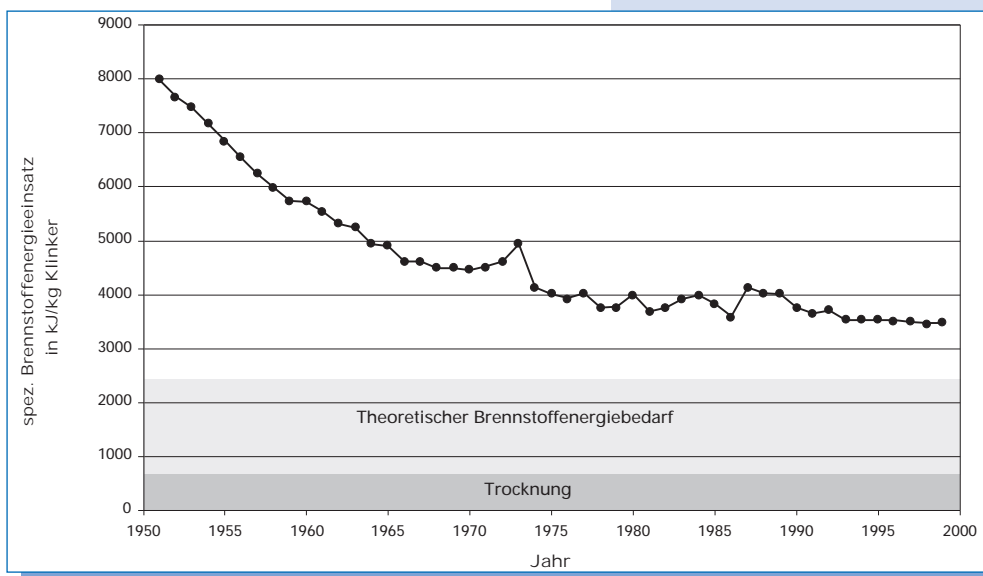


Bild 4-1: Entwicklung des spezifischen Brennstoffenergieeinsatzes (Berücksichtigung der neuen Bundesländer seit 1987) [4]. Anmerkung: In dieser Darstellung wird die Brennstoffenergie auf Klinker bezogen.

Der spezifische thermische Energieeinsatz in der Zementindustrie hat sich in den letzten 50 Jahren deutlich verringert. Dies ist vor allem auf Verbesserungen bei der Anlagen- und Verfahrenstechnik zurückzuführen. Nach 1990 hat u. a. die Modernisierung der Zementwerke in den neuen Bundesländern zu einer

weiteren Abnahme des spezifischen Brennstoffenergieeinsatzes beigetragen.

Jahr	Brennstoffenergieeinsatz	
	absolut [Mio. GJ/a]	spezifisch [kJ/kg Zement]
1997	99,3	2.975
1998	100,7	2.905
1999	102,3	2.800

Tafel 4-1: Absoluter und spezifischer Brennstoffenergieeinsatz [4].

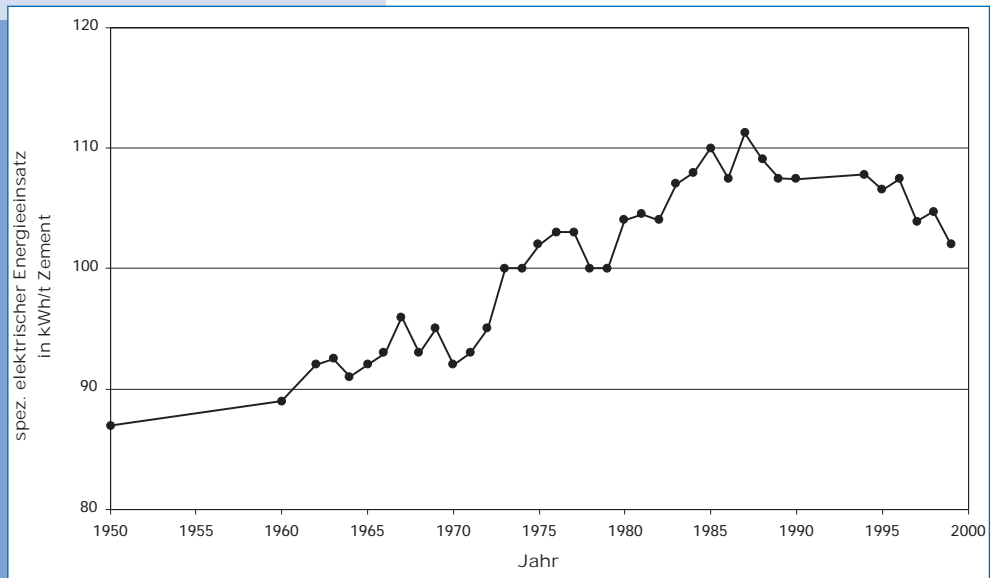


Bild 4-2: Entwicklung des spezifischen elektrischen Energieeinsatzes (Berücksichtigung der neuen Bundesländer seit 1987) [4].

Höhere Anforderungen an die Produktqualität sowie Maßnahmen zur Verbesserung des Umweltschutzes waren die wesentlichen Ursachen für den tendenziell steigenden elektrischen Energieeinsatz der letzten Jahrzehnte (Bild 4-2). In jüngster Zeit trugen u. a. Verbesserungen in der Mahltechnik zu einer Stabilisierung des spezifischen elektrischen Energieeinsatzes bei.

Jahr	Elektrischer Energieeinsatz	
	absolut [Mio. MWh/a]	spezifisch [kWh/t Zement]
1997	3,47	103,9
1998	3,63	104,7
1999	3,73	102,0

Tafel 4-2: Absoluter und spezifischer elektrischer Energieeinsatz [4].

5 Emissionen

Die Errichtung und der Betrieb von Zementwerken unterliegen den Bestimmungen des Bundes-Immissionsschutzgesetzes. Je nach Brennstoffeinsatz werden unterschiedliche Anforderungen an die einzuhaltenen Emissionskonzentrationen gestellt. Falls ausschließlich Regelbrennstoffe eingesetzt werden, sind

Messobjekt	Norm, Richtlinie
Gesamtstaub	ISO 10155 VDI 2066, Blatt 4 VDI 2066, Blatt 6
Schwermetalle - Probenahme - Analyse	VDI 3868, Blatt 1, 2 VDI 2268, Blatt 1 - 4
Schwefeloxide	VDI 2462, Blatt 7
Stickstoffoxide	VDI 2456, Blatt 6
Kohlenstoffmonoxid	VDI 2459, Blatt 6
Gasförmige anorganische Chlorverbindungen	DIN EN 1911, Teil 1 - 3
Gasförmige anorganische Fluorverbindungen	VDI 2470, Blatt 1
Dioxine, Furane - Probenahme - Analyse	DIN EN 1948, Teil 1 DIN EN 1948, Teil 2 - 3
Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe - Probenahme - Analyse	VDI 3499, Blatt 1E, 2E DIN EN 1948, Teil 1 VDI 3873, Blatt 1
Organische Stoffe	DIN EN 12619 E
Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol	VDI 3482, Blatt 4

die Regelungen der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) maßgeblich. Wird ein Teil der Regelbrennstoffe durch Abfälle als Sekundärbrennstoffe ersetzt, so gelten zusätzlich die Bestimmungen der 17. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (17. BImSchV). Auf dieser gesetzlichen Basis kann die zuständige Behörde sowohl Messungen aus beson-

Tafel 5-1: Messverfahren für Emissionen.

derem Anlass als auch erstmalige und wiederkehrende Messungen anordnen, die nur von zugelassenen Messstellen durchgeführt werden dürfen.

Zur Bestimmung der Emissionen von Zementwerken stehen dabei sowohl kontinuierliche als auch diskontinuierliche Messverfahren zur Verfügung, die in entsprechenden VDI-Richtlinien und DIN-Normen beschrieben sind (Tafel 5-1). Kontinuierlich werden hauptsächlich Staub, NO_x und SO₂ gemessen; die anderen immissionsrechtlich relevanten Parameter werden in der Regel diskontinuierlich auf der Basis von Einzelmessungen bestimmt.

In den letzten Jahren bestimmte die Europäische Union in zunehmendem Maße die Umweltstandards. So trat am 28. Dezember 2000 die „Richtlinie 2000/76/EG über die Verbrennung von Abfällen“ in

Kraft. Sie regelt u. a. den Einsatz von Abfällen in Zementwerken und muss bis zum 28. Dezember 2002 in deutsches Recht umgesetzt werden. Tafel 5-2 enthält die für die Zementindustrie gültigen Emissionsgrenzwerte der neuen Richtlinie.

Die in diesem Kapitel dargestellten Messergebnisse [3] beruhen auf den gesetzlich vorgeschriebenen Emissionsmessungen an Drehofenanlagen der deutschen Zementindustrie. Kontinuierlich gemessene Emissionen (Staub, NO_x, SO₂) wurden dabei in Jahresmittelwerte umgerechnet. Im Fall von diskontinuierlich gemessenen Emissionen wurden für jede Ofenanlage Mittelwerte aus den jeweiligen Einzelmessungen bestimmt. Sämtliche Messwerte sind auf 1 m³ trockenes Abgas im Normzustand mit einem Sauerstoffgehalt von 10 % bezogen.

In einigen Bildern sind als Beurteilungshilfe Bereiche für Nachweisgrenzen grau hinterlegt. Nachweisgrenzen sind von Probenahme, Probeaufbereitung und Analyseverfahren abhängig und somit nicht für alle Messungen gleich. Die in den Diagrammen angegebenen Bereiche wurden u. a. in Anlehnung an Verfahrenskenngrößen der jeweiligen Fachnormen bestimmt. Zwar werden in Messberichten z. T. auch deutlich niedrigere Nachweisgrenzen genannt; sie beziehen sich dann jedoch i. allg. nur auf den analytischen Teil des Prüfverfahrens.

Stoff	Grenzwert
Staub	30 mg/m ³
NO _x	500 mg/m ³ (*) 800 mg/m ³ (**)
SO ₂	50 mg/m ³ (***)
Chlorwasserstoff	10 mg/m ³
Fluorwasserstoff	1 mg/m ³
Cadmium und Thallium	0,05 mg/m ³
Quecksilber	0,05 mg/m ³
Sb+As+Pb+Cr+	
Co+Cu+Mn+Ni+V	0,5 mg/m ³
Dioxine und Furane	0,1 ng ITEQ/m ³
TOC	10 mg/m ³ (***)
CO	–

Tafel 5-2: Emissionsgrenzwerte der Europäischen Richtlinie 2000/76/EG für Drehofenanlagen der Zementindustrie.

(*) Neue Anlagen

(**) Bestehende Anlagen

(***) gilt nicht für rohmaterialbedingte Emissionen

5.1 Klimarelevante Gase / Kohlenstoffdioxid (CO₂)

Beim Klinkerbrennprozess werden klimarelevante Gase emittiert. Zum weit überwiegenden Teil ist dies CO₂. Andere klimarelevante Gase, wie z. B. Distickstoffmonoxid (N₂O) oder Methan (CH₄), werden nur in sehr geringem Maße emittiert.

CO₂-Emissionen sind sowohl rohstoff- als auch energiebedingt. Rohstoffbedingte CO₂-Emissionen entstehen bei der Entsäuerung des Kalksteins (CaCO₃) und haben einen Anteil von etwa 60 % an den CO₂-Gesamtemissionen. Energiebedingte Emissionen entstehen sowohl direkt bei der Verbrennung der Brennstoffe als auch indirekt durch den Einsatz von elektrischer Energie. In Tafel 5-3 werden die CO₂-Emissionen diesen Anteilen entsprechend aufgeführt.

spezifische CO ₂ -Emissionen					
Jahr	thermisch bedingt	elektrisch bedingt	rohstoffbedingt	Summe	Einheit
1997	0,231	0,070	0,453	0,754	t CO ₂ /t Zement
1998	0,218	0,070	0,443	0,731	t CO ₂ /t Zement
1999	0,199	0,068	0,427	0,694	t CO ₂ /t Zement

Im Jahr 1995 hat sich die deutsche Zementindustrie gemeinsam mit anderen energieintensiven Industriebranchen verpflichtet, ihren

Tafel 5-3: CO₂-Emissionen der Zementindustrie [4].

Beitrag zum Klimaschutz zu leisten und den spezifischen Brennstoffenergiebedarf von 1987 bis 2005 um 20 % zu senken. Diese Verpflichtung wurde weiterentwickelt und sieht seit dem 9. November 2000 eine 28 %ige Minderung der energiebedingten spezifischen CO₂-Emissionen im Zeitraum von 1990 bis 2008/2012 vor. Unter der Voraussetzung gleicher Produktionsmengen wie 1990 wird die Zementindustrie die energiebedingten CO₂-Emissionen in diesem Zeitraum somit um etwa 3,4 Mio. t/a reduzieren. Werden auch die rohstoffbedingten CO₂-Emissionen berücksichtigt, beträgt die Minderung sogar 4,4 Mio. t/a.

Um dieses Ziel zu erreichen, wird die Zementindustrie ihre Anstrengungen fortsetzen, vermehrt Sekundärbrennstoffe einzusetzen, den Anteil ungebrannter Bestandteile im Zement zu erhöhen und die noch verbleibenden Potenziale der verfahrenstechnischen Optimierung auszuschöpfen.

Für die Erzeugung von 1 t Portlandzement müssen während der Produktion ca. 1,5 bis 1,7 t Rohmaterialien, 0,1 t Kohle sowie 1 t Klinker (abzüglich der weiteren Hauptbestandteile und Sulfatträger) staubfein gemahlen werden. Wesentliche Emissionsquellen für die staubförmigen Komponenten liegen dabei in den Bereichen Rohmaterialaufbereitung, Brennstoffaufbereitung, Klinkerbrennprozess sowie Zementmahlung. Während es in den 50er-Jahren am Kamin von Drehofenanlagen der Zementindustrie noch zu Staubemissionen von bis zu 3.000 mg/m³ kam, ist es heute möglich, sie auf 30 mg/m³ zu begrenzen (Bild 5-1).

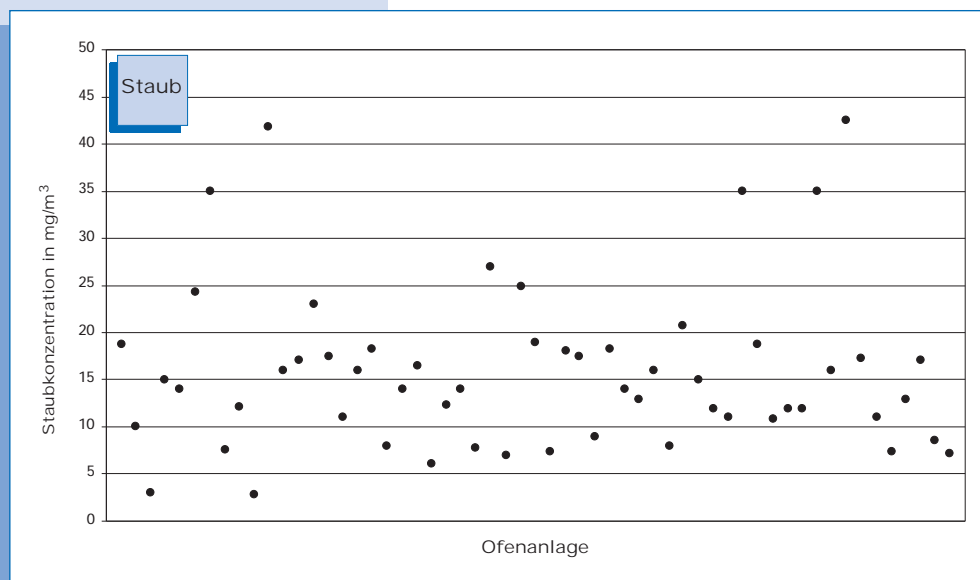


Bild 5-1: Mittelwerte (Jahr 1999) der Staubkonzentration im Reingas von 57 Drehofenanlagen.

5.3 Stickstoffoxide (NO_x)

Der Klinkerbrennprozess ist ein Hochtemperaturprozess, bei dem Stickstoffoxide (NO_x) entstehen. Im Abgas von Drehofenanlagen liegen sie zu einem Anteil von etwa 95 % in Form von Stickstoffmonoxid (NO) und zu etwa 5 % als Stickstoffdioxid (NO₂) vor. Da NO in der Atmosphäre weitgehend zu NO₂ umgewandelt wird, werden die Emissionen als NO₂ pro m³ Abgas angegeben. Die entsprechenden Emissionen der deutschen Zementindustrie sind in Bild 5-2 aufgeführt.

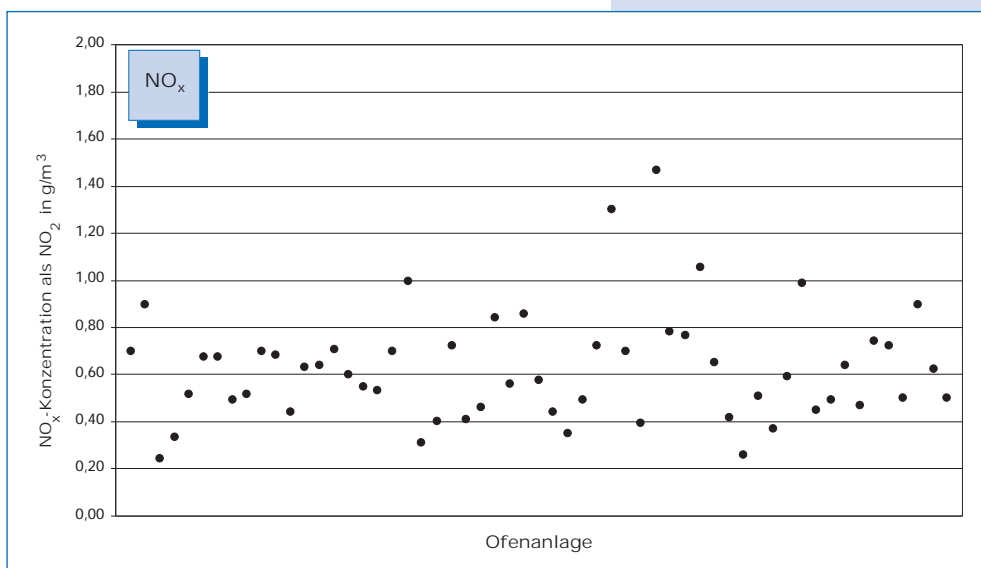


Bild 5-2: Mittelwerte (Jahr 1999) der NO_x-Konzentration im Reingas von 57 Drehofenanlagen.

Anmerkung: Im Jahr 1999 überstiegen die Emissionen mehrerer Anlagen die heute in der TA Luft für Zementwerke vorgesehenen Emissionswerte. Die Betriebsgenehmigungen für diese Werke beruhen noch auf höheren NO_x-Grenzwerten. Einige dieser Anlagen sind bzw. werden in den nächsten Jahren stillgelegt, weitere werden mit einer Anlage zur NO_x-Minderung nachgerüstet.

Die prozessbedingten NO_x-Gehalte im Abgas von Drehofenanlagen würden ohne Minderungsmaßnahmen in den meisten Fällen die heute gültigen Vorgaben der TA Luft (0,50 g/m³ für Neuanlagen sowie 0,80 g/m³ für bestehende Anlagen) deutlich übersteigen. Minderungsmaßnahmen betreffen eine Vergleichmäßigung und Optimierung des Anlagenbetriebs. Darüber hinaus wurden erhebliche Anstrengungen unternommen, um auf verschiedene Weise die anspruchsvollen NO_x-Grenzwerte einhalten zu können: in 1999 wurden sieben Anlagen mit gestufter Verbrennung und ca. 20 Anlagen mit SNCR-Verfahren betrieben.

Um das Rohstoffgemisch in Portlandzementklinker umzuwandeln, sind hohe Prozesstemperaturen erforderlich. In der Sinterzone des Drehofens betragen die Brennguttemperaturen etwa 1.450 °C. Um sie zu erreichen, sind Flammentemperaturen von ca. 2.000 °C erforderlich. Aus Gründen der Klinkerqualität findet der Brennvorgang unter oxidierenden Bedingungen statt. Unter diesen Voraussetzungen überwiegt die partielle Oxidation des molekularen Stickstoffs der Verbrennungsluft zu Stickstoffmonoxid, die auch als thermische NO-Bildung bezeichnet wird.

Die thermische NO-Bildung ist bei den niedrigeren Temperaturen in einer Zweitfeuerung hingegen kaum von Bedeutung: hier kann der im Brennstoff gebundene Stickstoff zum so genannten brennstoffbedingten NO führen.

5.4 Schwefeldioxid (SO₂)

Schwefel wird dem Klinkerbrennprozess über die Roh- und Brennstoffe zugeführt. In den Rohstoffen kann der Schwefel lagerstättenbedingt als Sulfid und als Sulfat gebunden vorliegen.

Ursache höherer SO₂-Emissionen von Drehofenanlagen der Zementindustrie können die im Rohmaterial enthaltenen, sulfidischen Schwefelverbindungen sein, die bei der Vorwärmung des Brennguts bei Temperaturen zwischen 370 °C und 420 °C zu SO₂ oxidiert werden. Die Sulfide kommen überwiegend in Form von Pyrit oder Markasit in den Rohstoffen vor.

Aufgrund der in den deutschen Rohstoffvorkommen auftretenden Sulfidgehalte können die SO₂-Emissionskonzentrationen standortabhängig bis zu etwa 1,2 g/m³ betragen. Die Zementindustrie hat erhebliche Anstrengungen zur Reduzierung der SO₂-Emissionen unternommen. So wird beispielsweise an 11

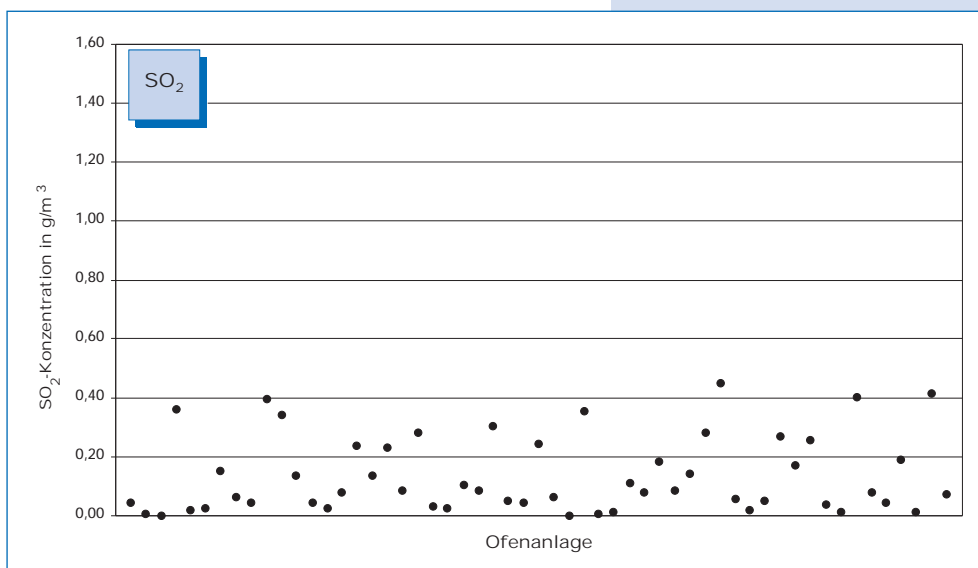


Bild 5-3: Mittelwerte (Jahr 1999) der SO₂-Konzentration im Reingas von 55 Drehofenanlagen.

Ofenanlagen Kalkhydrat zur Minderung der SO₂-Emissionen eingesetzt.

Der mit den Brennstoffen eingetragene Schwefel wird bei der Verbrennung im Drehrohrföfen vollständig zu SO₂ umgewandelt. Dieses SO₂ reagiert im Vorwärmer- und Ofenbereich zu Alkalisulfaten, die im Klinker gebunden werden.

Bild 5-3 zeigt die Jahresmittelwerte der SO₂-Konzentrationen im Reingas von Drehofenanlagen.

5.5 Kohlenstoffmonoxid (CO) und organischer Gesamtkohlenstoff (ΣC)

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.

Ursache der Emissionen von CO und organisch gebundenem Kohlenstoff beim Klinkerbrennprozess sind die mit den natürlichen Rohstoffen in geringen Mengen zugeführten organischen Bestandteile (Überreste von Organismen und Pflanzen, die im Laufe der Erdgeschichte im Gestein eingebaut wurden). Sie werden beim Vorwärmen des Brennguts umgesetzt und zu CO und CO₂ oxidiert. Dabei werden auch geringe Anteile organischer Spurengase (organischer Gesamtkohlenstoff) gebildet. Der im Reingas vorliegende Gehalt an CO und organischen Spurengasen lässt beim Klinkerbrennprozess somit keinen Rückschluss auf die Verbrennungsbedingungen zu.

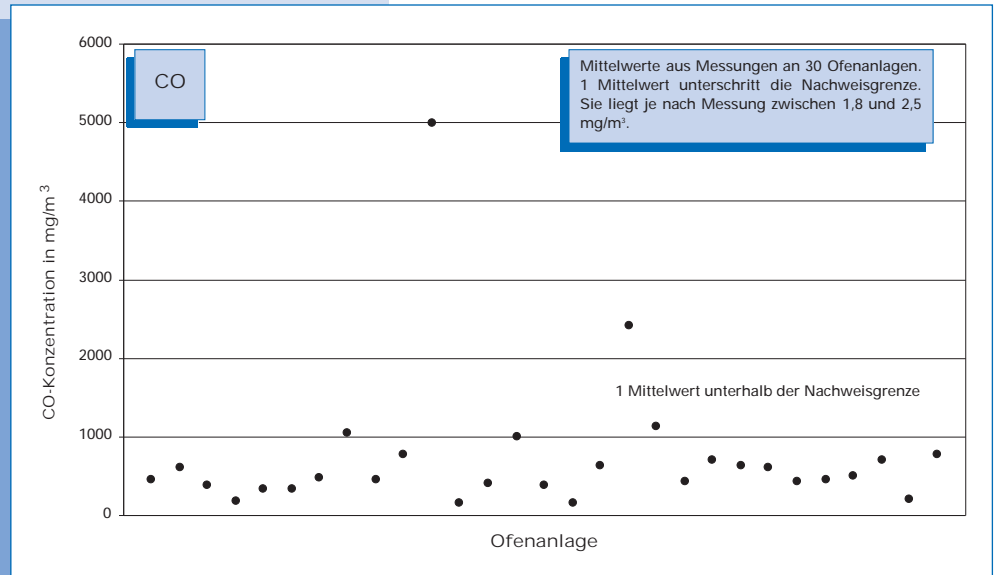


Bild 5-4: Mittelwerte (Jahr 1999) der CO-Konzentration im Reingas von 30 Drehofenanlagen.

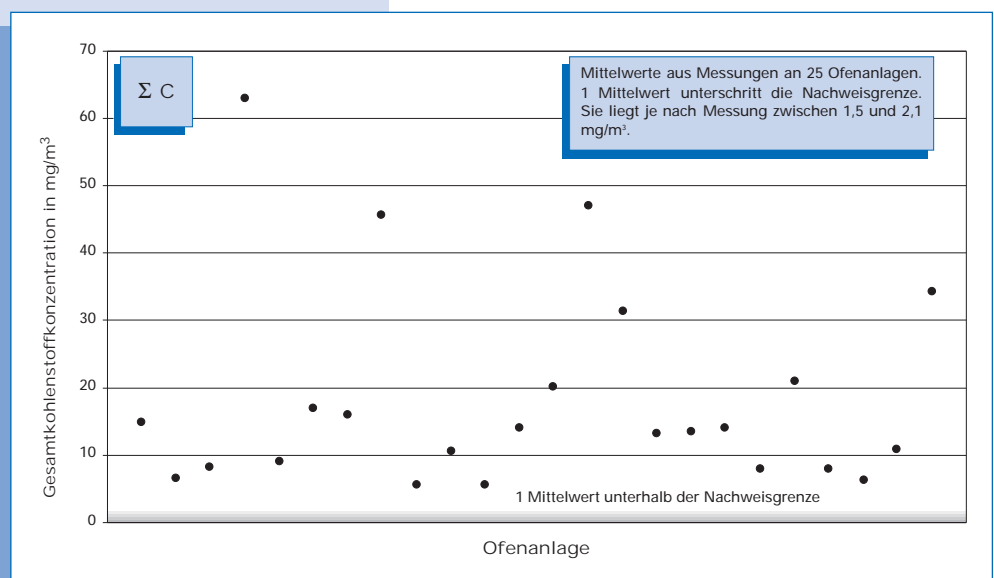


Bild 5-5: Mittelwerte (Jahr 1999) der Konzentration von organischem Gesamtkohlenstoff im Reingas von 25 Drehofenanlagen.

5.6 Dioxine und Furane (PCDD/F)

Drehofenanlagen der Zementindustrie unterscheiden sich von klassischen Feuerungsanlagen in erster Linie durch die Verbrennungsbedingungen beim Klinkerbrennen. Brenngut und Drehofenabgase werden im Gegenstrom geführt und intensiv durchmischt. Temperaturverlauf und Gasverweilzeit in Drehrohröfen bieten daher besonders günstige Bedingungen, um organische Verbindungen, die über Brennstoffe eingetragen werden oder daraus entstehen, vollständig zu zerstören.

Polychlorierte Dibenzop-dioxine und Dibenzofurane (kurz: Dioxine und Furane) liegen deshalb in Abgasen

von Drehöfen der Zementindustrie nur in sehr geringen Konzentrationen vor (Bild 5-6). Untersuchungen haben gezeigt, dass sie unabhängig von der Art der Einsatzstoffe sind und durch verfahrenstechnische Maßnahmen nicht beeinflusst werden können.

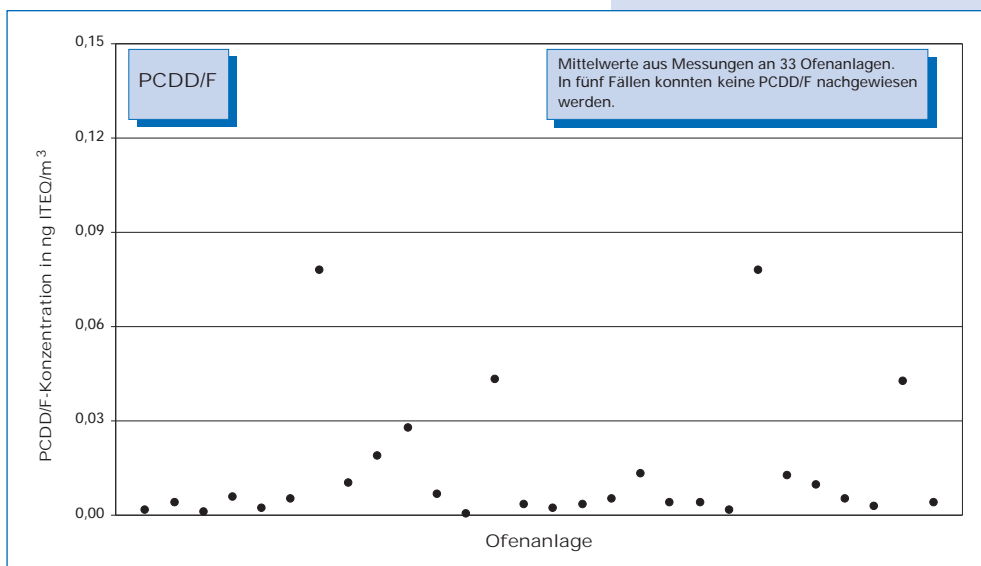


Bild 5-6: Mittelwerte aus Einzelmessungen (Jahr 1999) der Konzentration von Dioxinen und Furanen (PCDD/F) im Reingas von 33 Drehofenanlagen. In fünf Fällen konnten keine PCDD/F nachgewiesen werden.

Anmerkung: Aus der Norm lässt sich keine Nachweisgrenze ableiten. Für die Beurteilung der Messergebnisse kann die externe Streuung des Verfahrens (Vergleich verschiedener Laboratorien) herangezogen werden. Sie beträgt gemäß DIN EN 1948 $\pm 0,05$ ng ITEQ/m³. (ITEQ: Internationales Toxizitätsäquivalent)

5.7 Polychlorierte Biphenyle (PCB)

Das Emissionsverhalten der PCB ist mit dem der Dioxine und Furane vergleichbar. PCB können mit den Sekundärroh- und -brennstoffen in den Prozess gelangen. In Drehofenanlagen der Zementindustrie ist eine praktisch vollständige Zerstörung dieser Spurenkomponenten gewährleistet (Bild 5-7).

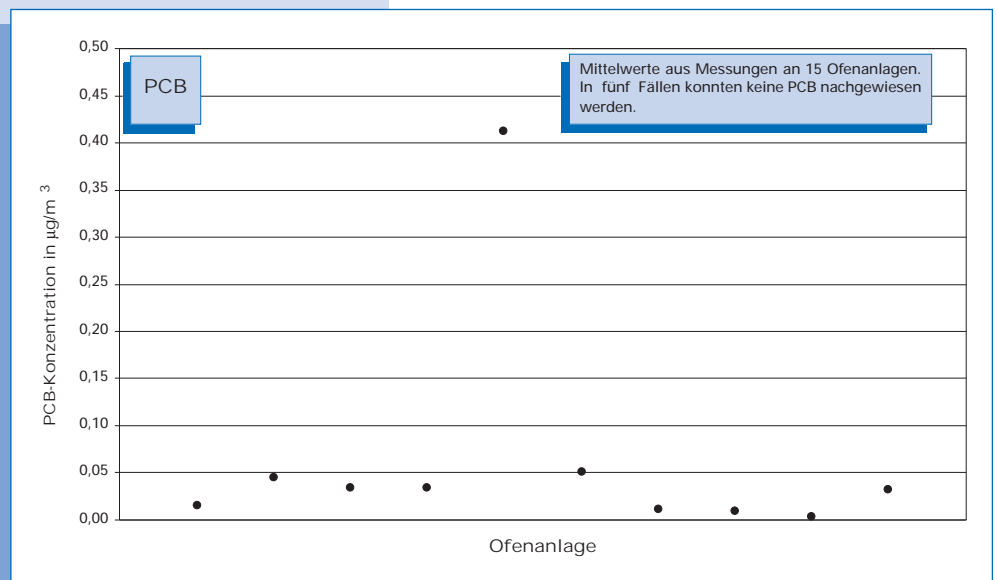


Bild 5-7: Mittelwerte aus Einzelmessungen (Jahr 1999) der Konzentration von polychlorierten Biphenylen (PCB nach DIN 51527) im Reingas von 15 Drehofenanlagen. In fünf Fällen konnten keine PCB nachgewiesen werden.

Anmerkung: Für die Messung von PCB im Reingas von Drehofenanlagen gibt es keine genormte Prüfvorschrift, in der Verfahrenskenngrößen des eingesetzten Messverfahrens genannt werden. Deshalb wird hier auf die Angabe einer Nachweisgrenze verzichtet. Bei den derzeit eingesetzten Verfahren sind gemessene Emissionskonzentrationen unterhalb von $0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ nicht abgesichert.

5.8 Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

Im Abgas von Drehofenanlagen liegt i. allg. eine Verteilung der PAK (nach EPA 610) vor, in der Naphthalin mit einem Massenanteil von über 90 % dominiert. In Drehofenanlagen der Zementindustrie ist eine praktisch vollständige Zerstörung der aus den Brennstoffen stammenden PAK gewährleistet. Emissionen (Bild 5-8) entstammen den organischen Bestandteilen im Rohmaterial.

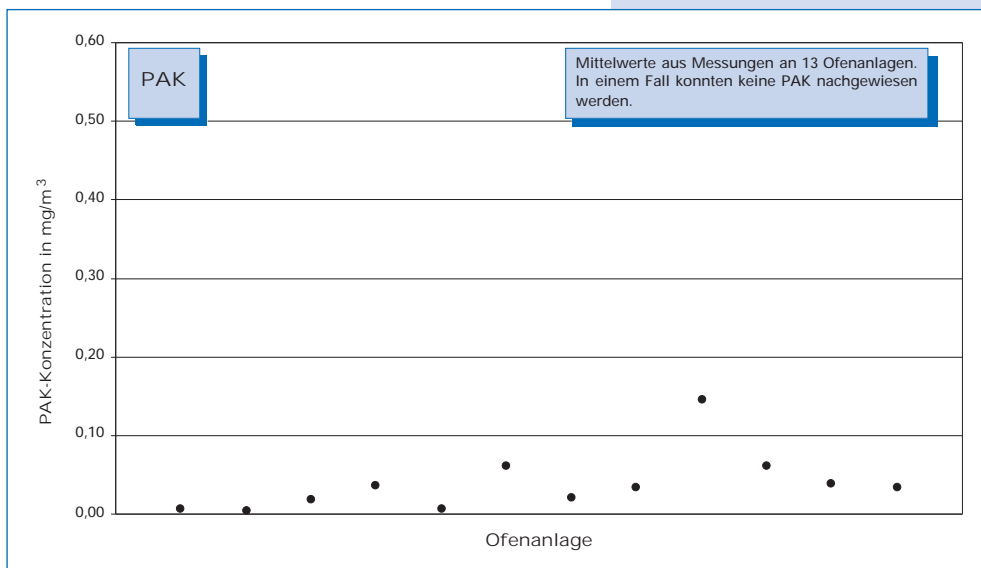


Bild 5-8: Mittelwerte aus Einzelmessungen (Jahr 1999) der Konzentration von polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK nach EPA 610) im Reingas von 13 Drehofenanlagen. In einem Fall konnten keine PAK nachgewiesen werden. Eine Nachweisgrenze lässt sich aus der Norm nicht ableiten.

5.9 Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol (BTEX)

Im Abgas von Drehofenanlagen der Zementindustrie liegen die o. g. Verbindungen i. allg. in einer charakteristischen Verteilung vor. BTEX entstehen bei der thermischen Zersetzung organischer Bestandteile des Rohmaterials im Vorwärmer. Sie sind zu etwa 10% an den Gesamtkohlenstoffemissionen beteiligt. Mittelwerte für die Emissionen des Jahres 1999 sind im Bild 5-9 dargestellt.

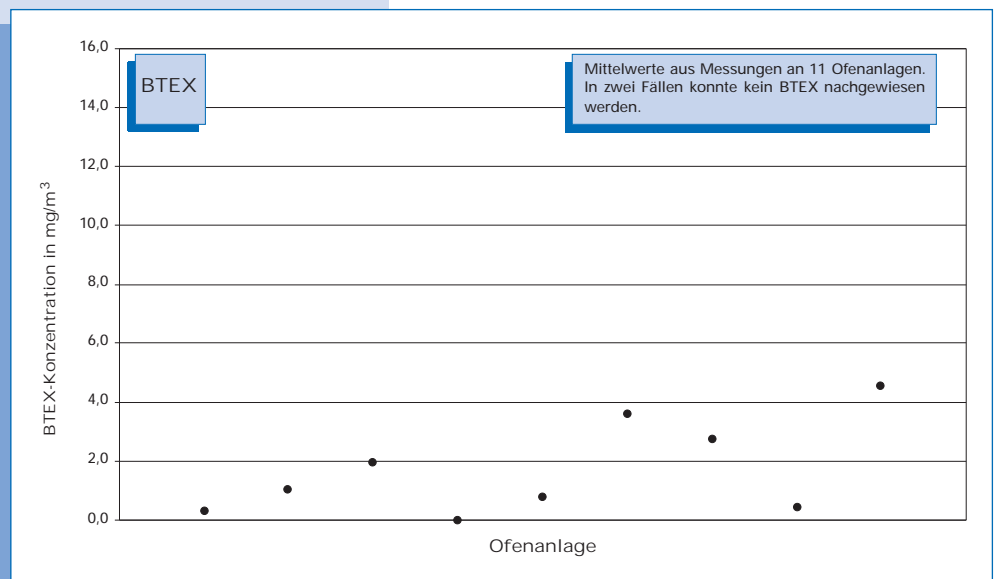
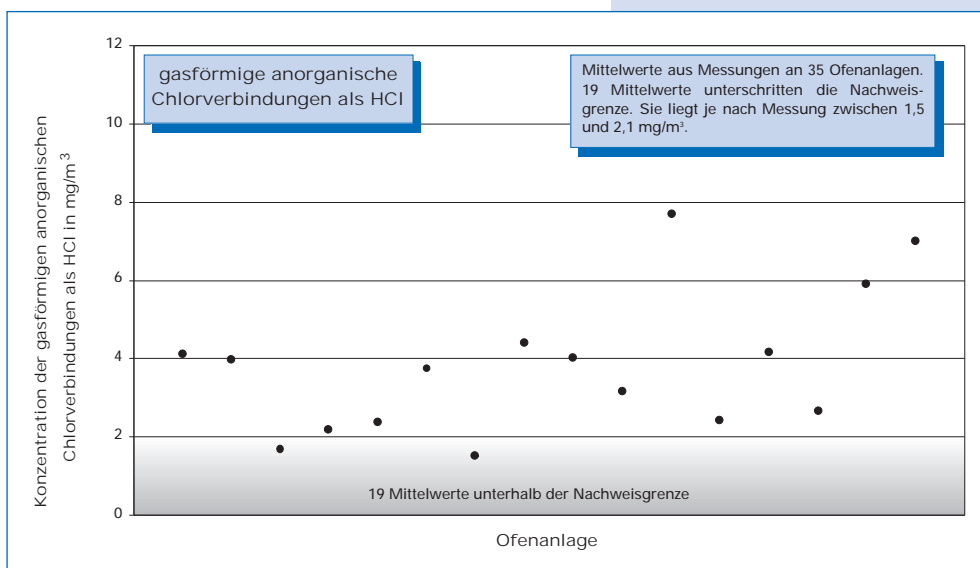


Bild 5-9: Mittelwerte aus Einzelmessungen (Jahr 1999) der Konzentration von BTEX im Reingas von 11 Drehofenanlagen. In zwei Fällen konnte kein BTEX nachgewiesen werden. Eine Nachweisgrenze lässt sich aus der Norm nicht ableiten.

5.10 Gasförmige anorganische Chlorverbindungen (HCl)

Rohmaterialien und Brennstoffe des Klinkerbrennprozesses enthalten als Nebenbestandteile Chloride. Sie werden beim Verbrennen der Brennstoffe oder Erhitzen des Brennguts freigesetzt und reagieren überwiegend mit den Alkalien aus dem Brenngut unter Bildung von Alkalichloriden. Diese zunächst dampfförmig vorliegenden Verbindungen kondensieren bei Temperaturen zwischen 700 °C und 900 °C am Brenngut bzw. am Ofengasstaub, gelangen anschließend erneut in den Drehrohfen und werden wieder verdampft. Dieser Kreislauf im Bereich



zwischen Drehofen und Vorwärmer kann zur Bildung von Ansätzen führen. Über einen Gasabzug am Ofeneinlauf können Alkalichloridkreisläufe wirkungsvoll reduziert und damit Betriebsstörungen vermindert werden.

Gasförmige anorganische Chlorverbindungen werden beim Klinkerbrennprozess nicht

Bild 5-10: Mittelwerte (Jahr 1999) der Konzentration gasförmiger anorganischer Chlorverbindungen, berechnet als HCl, im Reingas von 35 Drehofenanlagen.

oder nur in sehr geringen Mengen emittiert (Bild 5-10). Das Auftreten von Chlorwasserstoff (HCl) im Abgas kann aufgrund der basischen Ofengasatmosphäre praktisch ausgeschlossen werden. Werden gasförmige anorganische Chloride im Abgas von Drehofenanlagen nachgewiesen, so ist dies i. allg. auf feinste Kornfraktionen von Alkalichloriden im Reingasstaub zurückzuführen. Sie können Messgasfilter passieren und das Vorliegen der gasförmigen Verbindungen vortäuschen.

5.11 Gasförmige anorganische Fluorverbindungen (HF)

Fluor liegt in Drehrohröfen zu 90 bis 95 % im Klinker und der Rest in Form des unter den Bedingungen des Brennbetriebs stabilen Calciumfluorids an Staub gebunden vor. Die Emission gasförmiger Fluorverbindungen, insbesondere auch von Fluorwasserstoff, ist wegen des hohen Calcium-Überschusses praktisch ausgeschlossen. Feinste Staubfraktionen, die das Messgasfilter passieren, können bei Drehofenanlagen der Zementindustrie geringe Gehalte an gasförmigen Fluorverbindungen vortäuschen (Bild 5-11).

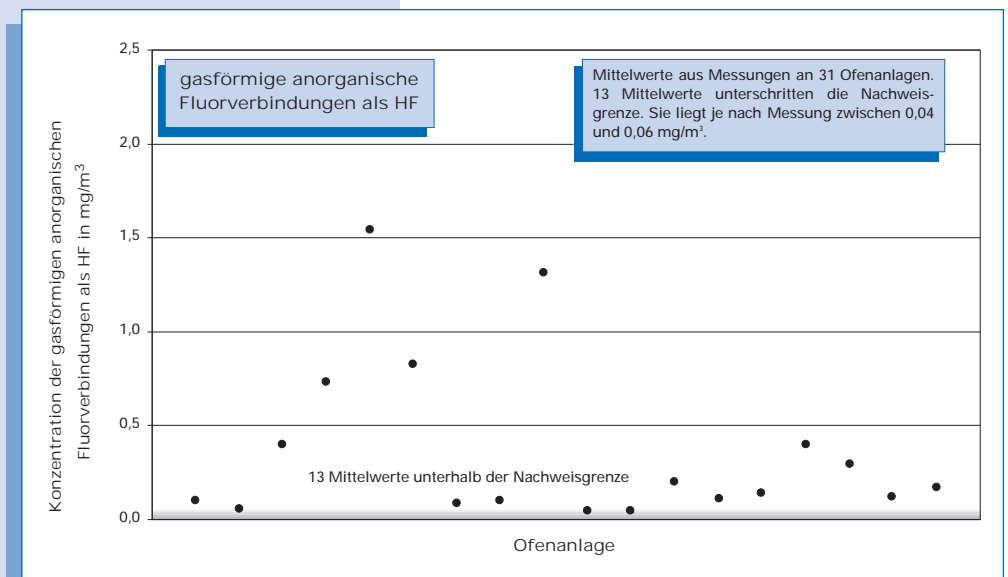


Bild 5-11: Mittelwerte (Jahr 1999) der Konzentration gasförmiger anorganischer Fluorverbindungen, berechnet als HF, im Reingas von 31 Drehofenanlagen.

5.12 Spurenelemente

Für das Emissionsverhalten der einzelnen Elemente im Klinkerbrennprozess sind die Eintragungssituation, das Verhalten in der Anlage sowie der Abscheidegrad der Entstaubungseinrichtung von Bedeutung. Die mit den Roh- und Brennstoffen dem Brennprozess zugeführten Spurenelemente können in Abhängigkeit von ihrer Flüchtigkeit ganz oder teilweise in den heißen Zonen des Vorwärmers und/oder Drehrohr-Ofens verdampfen, mit den in der Gasphase vorliegenden Bestandteilen reagieren und in den kälteren Bereichen des Ofensystems auf dem Brenngut kondensieren. Je nach Flüchtigkeit und Betriebsbedingungen können sich Kreisläufe ausbilden, die entweder auf die Ofenanlage beschränkt bleiben oder auch die Mahltrocknungsanlage mit einschließen. Spurenelemente aus den Brennstoffen gelangen zunächst in die Verbrennungsgase, werden jedoch aufgrund des Rückhaltevermögens von Ofen und Vor-

wärmer nur in äußerst geringem Maße emittiert. Tafel 5-4 enthält repräsentative Transferkoeffizienten für Drehofenanlagen mit Zyklonvorwärmer. Mit ihnen lässt sich berechnen, welcher Anteil der Spurenelemente aus den Brennstoffen mit dem Reingas emittiert wird.

Die in der Tafel aufgeführten

Komponente	EF [%]	TK [%]
Cadmium	< 0,01 bis < 0,2	0,003
Thallium	< 0,01 bis < 1	0,02
Antimon	< 0,01 bis < 0,05	0,0005
Arsen	< 0,01 bis 0,02	0,0005
Blei	< 0,01 bis < 0,2	0,002
Chrom	< 0,01 bis < 0,05	0,0005
Cobalt	< 0,01 bis < 0,05	0,0005
Kupfer	< 0,01 bis < 0,05	0,0005
Mangan	< 0,001 bis < 0,01	0,0005
Nickel	< 0,01 bis < 0,05	0,0005
Vanadium	< 0,01 bis < 0,05	0,0005

Tafel 5-4: Emissionsfaktoren (EF, emittierter Anteil des Gesamteintrags) und Transferkoeffizienten (TK, emittierter Anteil des Brennstoffeintrags) für Drehofenanlagen mit Zyklonvorwärmer.

Emissionsfaktoren sind dagegen höher als die jeweiligen Transferkoeffizienten. Sie berücksichtigen neben den brennstoffbedingten Emissionen auch die rohstoffbedingten Emissionen, die in der Regel deutlich überwiegen. Für die Emissionsfaktoren werden Bandbreiten angegeben, die sich aus Bilanzuntersuchungen ergaben. Auf Angaben für das Element Quecksilber wird verzichtet, da die Messergebnisse vor allem von den jeweiligen Betriebsbedingungen abhängen.

Unter den Bedingungen des Klinkerbrennprozesses werden die nichtflüchtigen Elemente (z. B. Arsen, Vanadium, Nickel) vollständig in den Klinker eingebunden. Elemente wie Blei und Cadmium reagieren im Bereich zwischen Drehrohröfen und Vorwärmer bevorzugt mit den im Überschuss zur Verfügung stehenden Chloriden und Sulfaten zu schwerflüchtigen Verbindungen. Aufgrund des hohen Oberflächenangebots kondensieren diese Verbindungen bei Temperaturen zwischen 700 °C und 900 °C an den Brenngutpartikeln. Die im Ofen-Vorwärmer-System gespeicherten schwerflüchtigen Elemente werden so im Zyklonvorwärmer wieder abgeschieden und verbleiben praktisch vollständig im Klinker.

Thallium und seine Verbindungen kondensieren im oberen Bereich des Zyklonvorwärmers bei Temperaturen zwischen 450 °C und 500 °C, so dass sich zwischen Vorwärmer, Rohmaterialtrocknung und Abgasreinigungsanlage ein Kreislauf ausbilden kann.

Quecksilber und seine Verbindungen werden in Ofen und Vorwärmer nicht abgeschieden. Auf dem Abgasweg kondensieren sie infolge der Abkühlung des Gases und werden von den Rohmaterialpartikeln teilweise adsorbiert. Dieser Anteil wird im Ofenabgasfilter abgeschieden.

Aufgrund des Verhaltens der Spurenelemente beim Klinkerbrennprozess sowie der hohen Abscheideleistung der Entstaubungseinrichtungen liegen die Emissionskonzentrationen der Spurenelemente insgesamt auf einem niedrigen Niveau. So befinden sich die gemessenen Mittelwerte des Jahres 1999 der in der 17. BImSchV genannten Spurenelemente nur in ca. 20 % aller Fälle oberhalb der Nachweisgrenze.

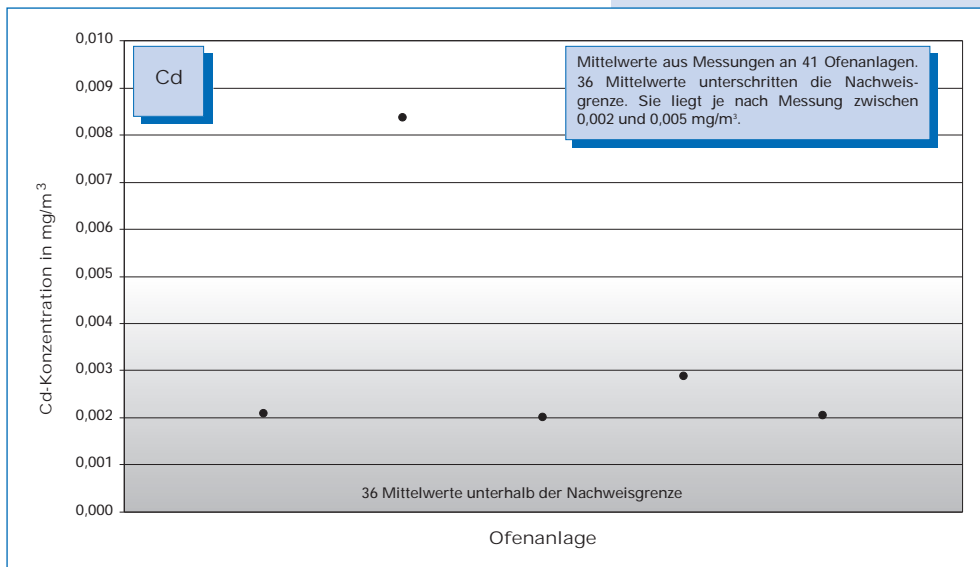


Bild 5-12: Mittelwerte aus Einzelmessungen (Jahr 1999) der Cadmium-Konzentration im Reingas von 41 Drehofenanlagen.

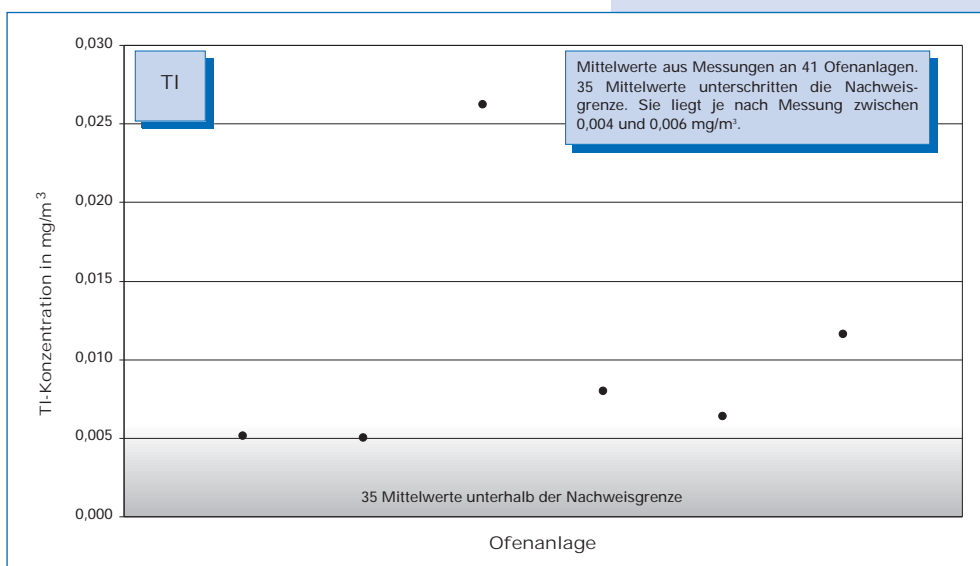


Bild 5-13: Mittelwerte aus Einzelmessungen (Jahr 1999) der Thallium-Konzentration im Reingas von 41 Drehofenanlagen.

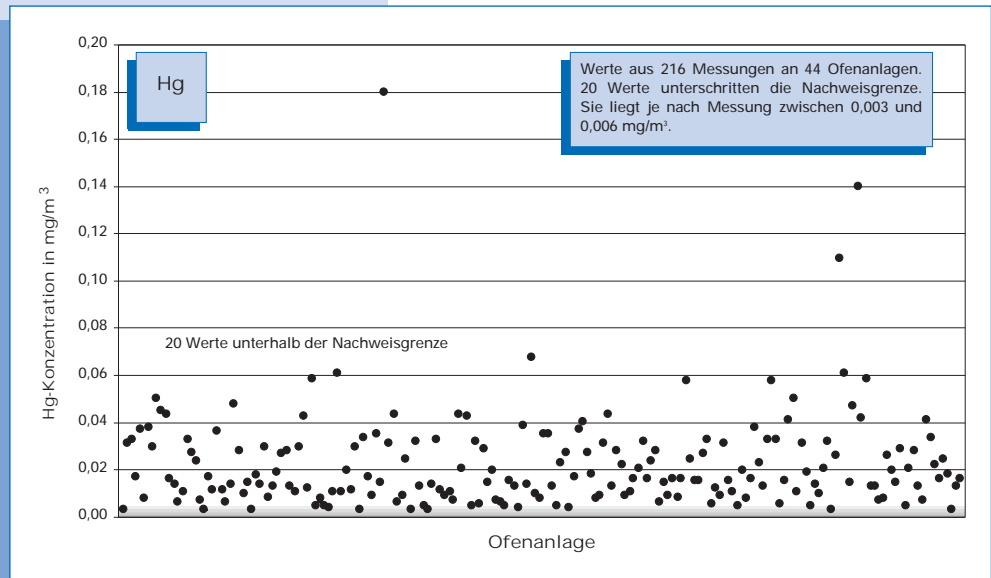


Bild 5-14: Einzelmesswerte (Jahr 1999) der Quecksilberkonzentration im Reingas von 44 Drehofenanlagen.
Anmerkung: Die Grafik enthält neben den Messwerten der gesetzlich vorgeschriebenen Messungen auch Messwerte von zusätzlich durchgeführten Einzelmessungen.

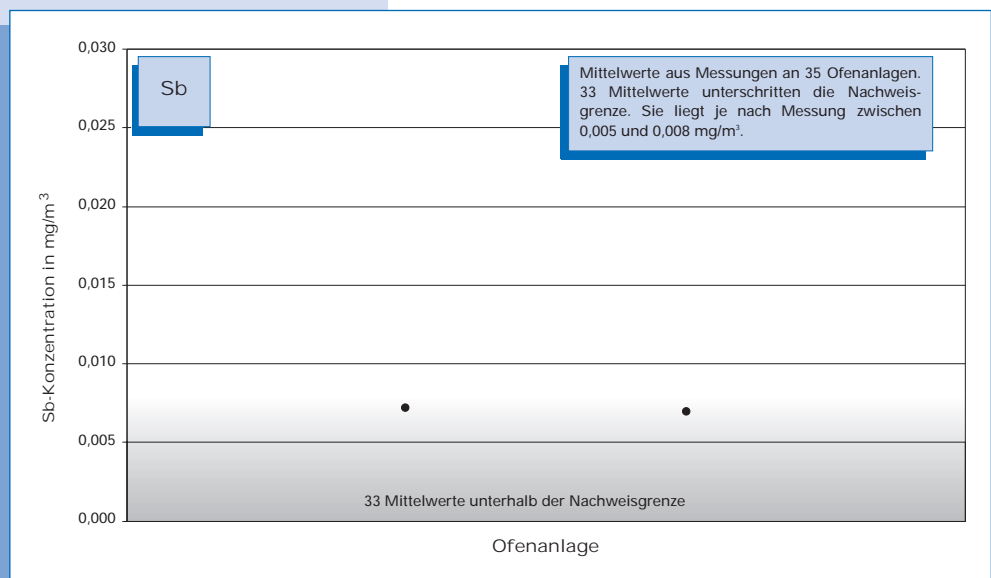


Bild 5-15: Mittelwerte aus Einzelmessungen (Jahr 1999) der Antimon-Konzentration im Reingas von 35 Drehofenanlagen.

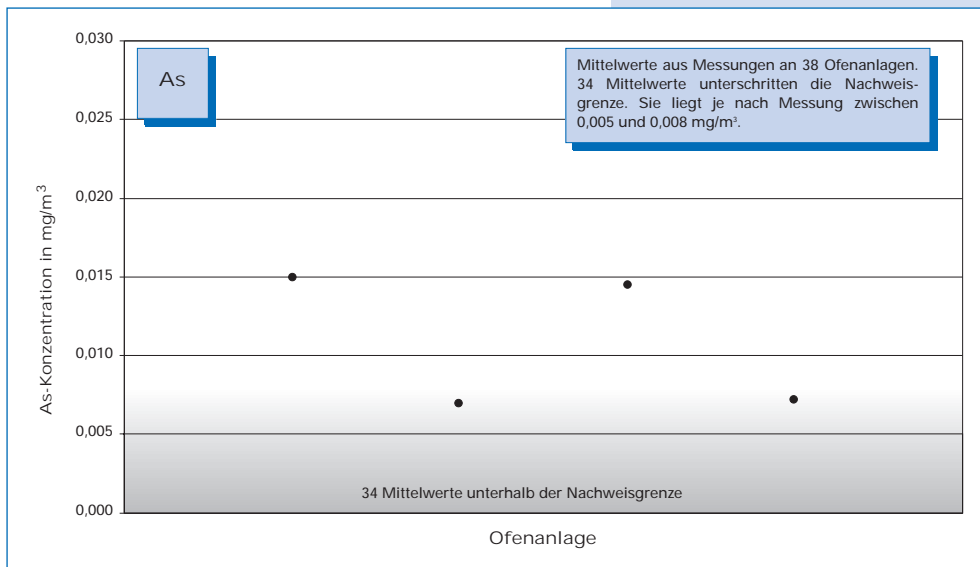


Bild 5-16: Mittelwerte aus Einzelmessungen (Jahr 1999) der Arsen-Konzentration im Reingas von 38 Drehofenanlagen.

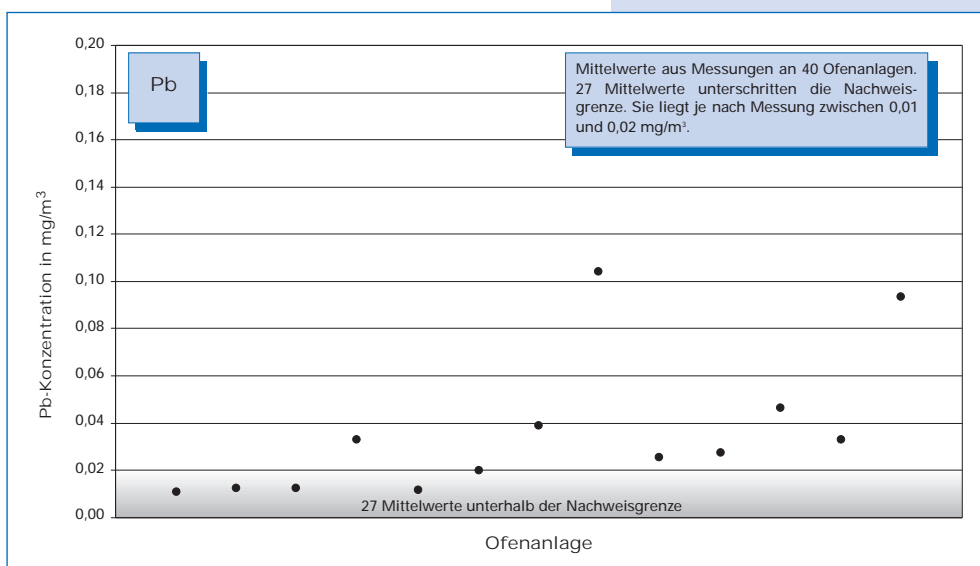


Bild 5-17: Mittelwerte aus Einzelmessungen (Jahr 1999) der Blei-Konzentration im Reingas von 40 Drehofenanlagen.

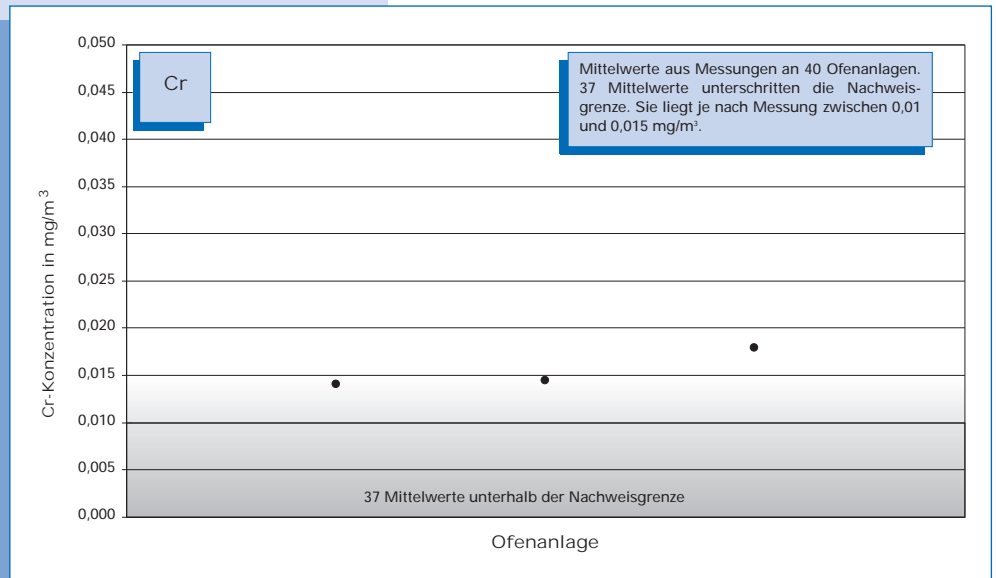


Bild 5-18: Mittelwerte aus Einzelmessungen (Jahr 1999) der Chrom-Konzentration im Reingas von 40 Drehofenanlagen.

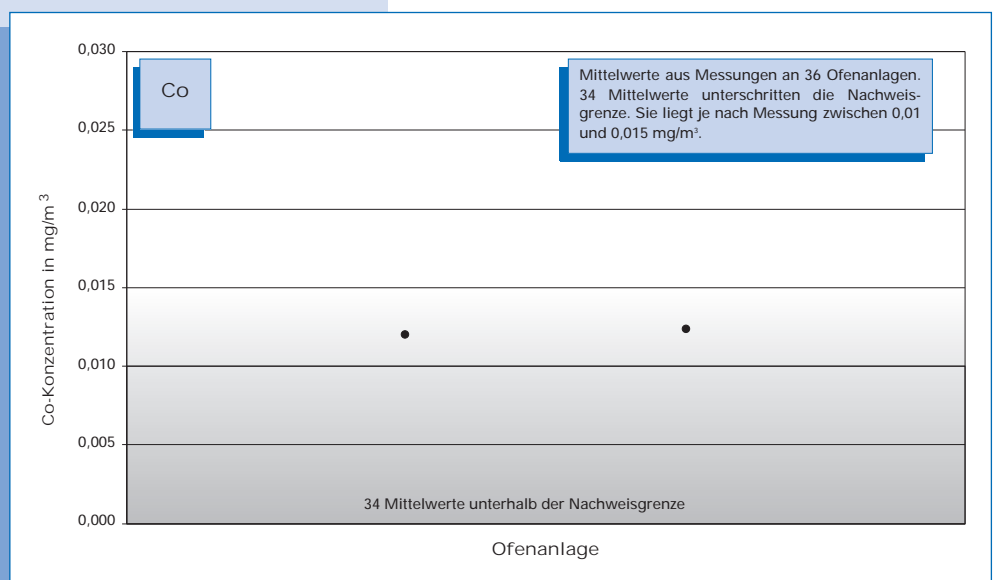


Bild 5-19: Mittelwerte aus Einzelmessungen (Jahr 1999) der Cobalt-Konzentration im Reingas von 36 Drehofenanlagen.

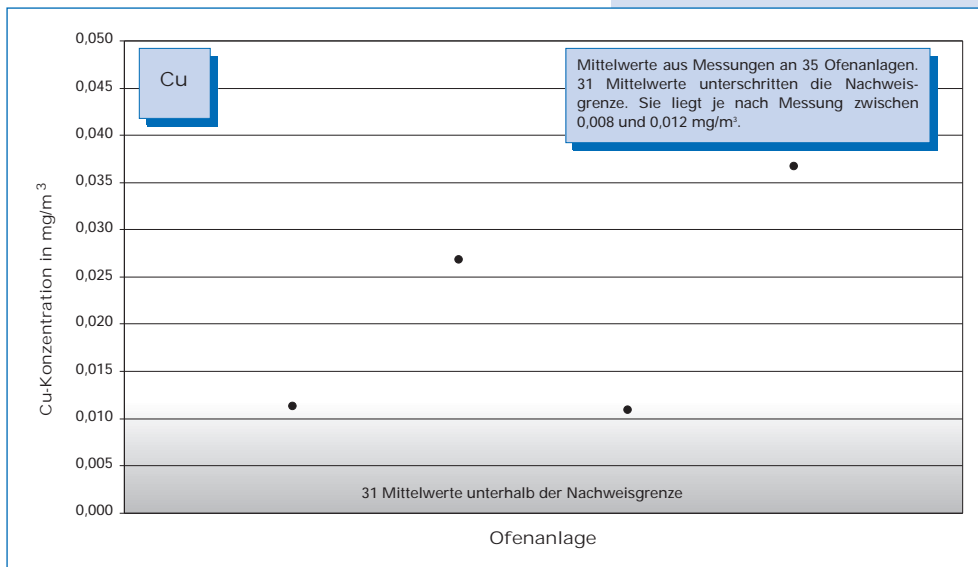


Bild 5-20: Mittelwerte aus Einzelmessungen (Jahr 1999) der Kupfer-Konzentration im Reingas von 35 Drehofenanlagen.

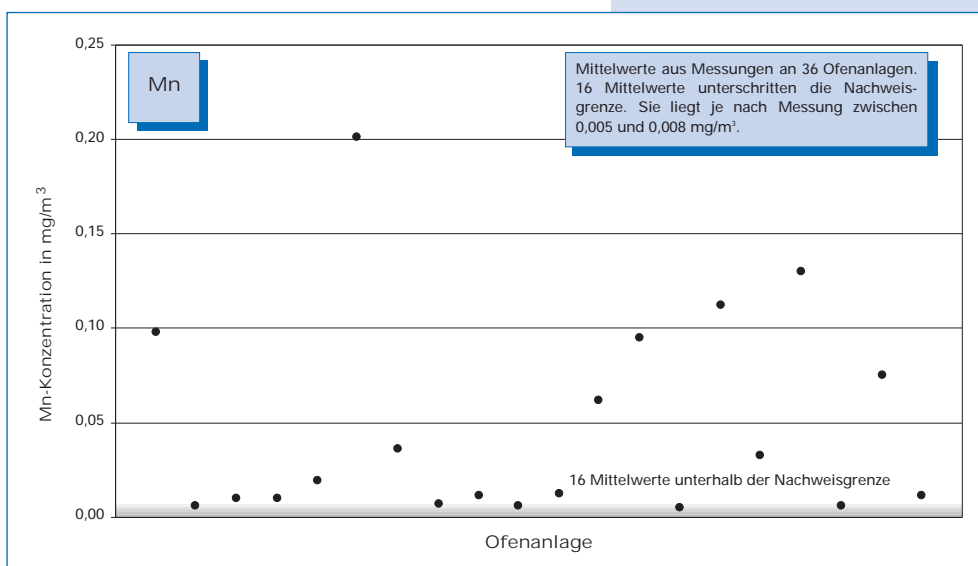


Bild 5-21: Mittelwerte aus Einzelmessungen (Jahr 1999) der Mangan-Konzentration im Reingas von 36 Drehofenanlagen.

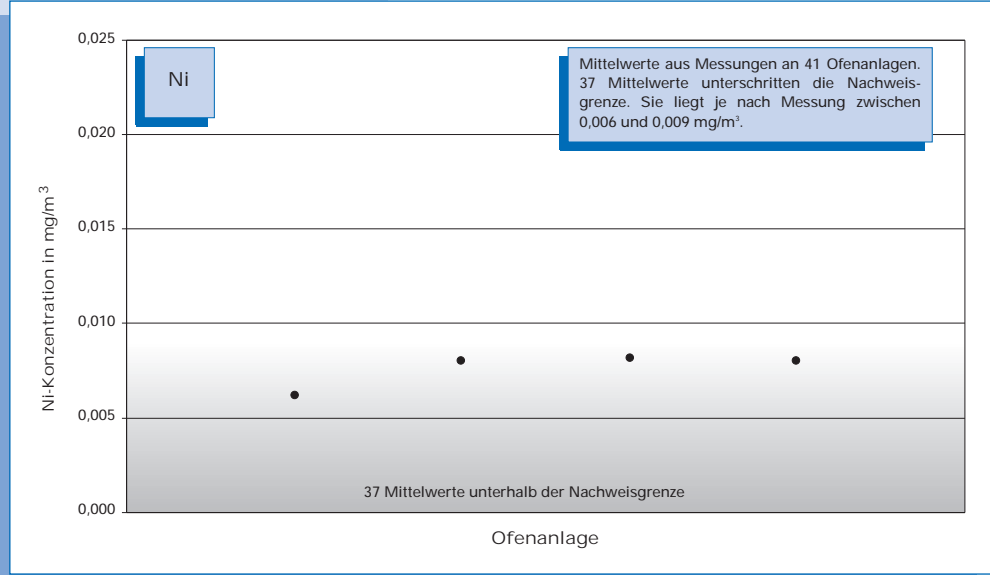


Bild 5-22: Mittelwerte aus Einzelmessungen (Jahr 1999) der Nickel-Konzentration im Reingas von 41 Drehofenanlagen.

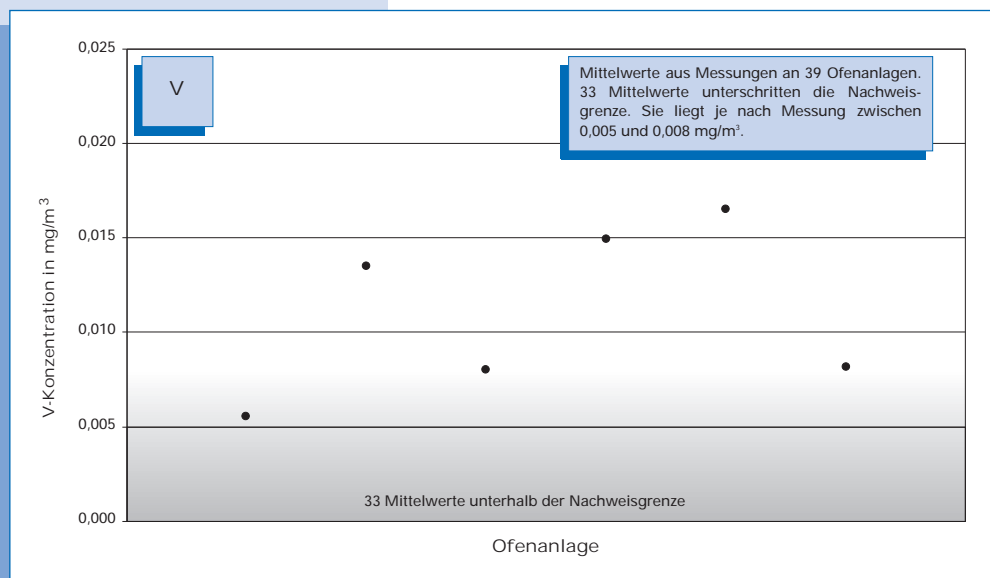


Bild 5-23: Mittelwerte aus Einzelmessungen (Jahr 1999) der Vanadium-Konzentration im Reingas von 39 Drehofenanlagen.

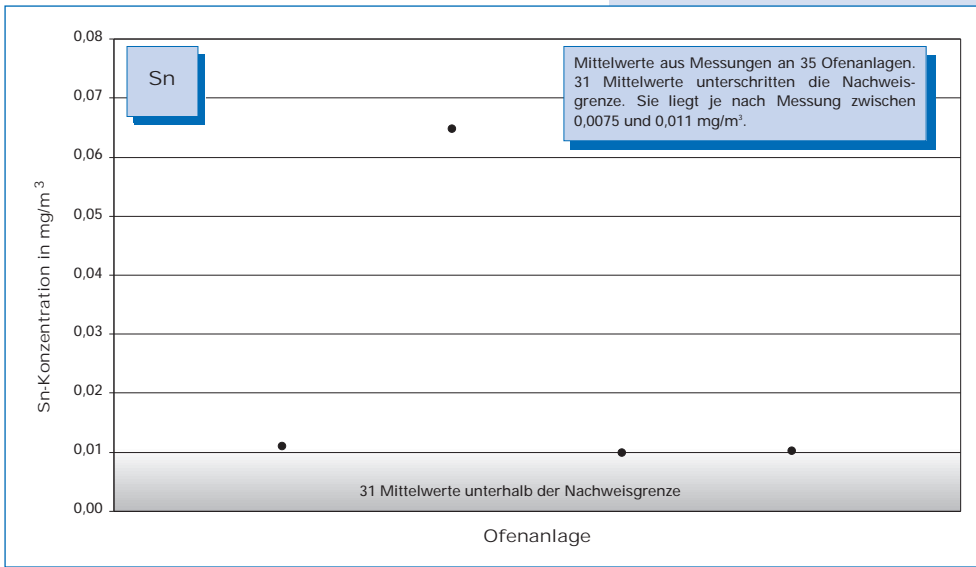


Bild 5-24: Mittelwerte aus Einzelmessungen (Jahr 1999) der Zinn-Konzentration im Reingas von 35 Drehofenanlagen.

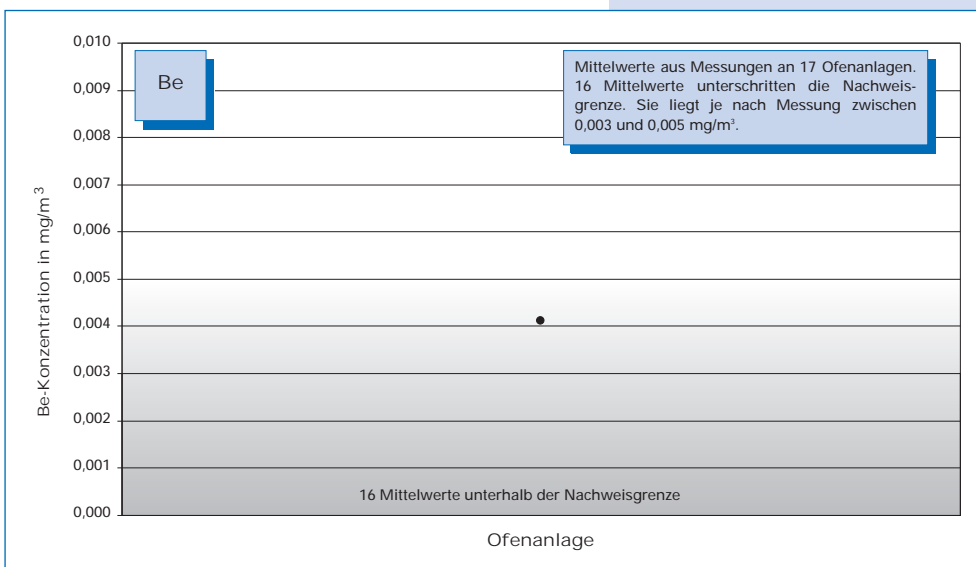


Bild 5-25: Mittelwerte aus Einzelmessungen (Jahr 1999) der Beryllium-Konzentration im Reingas von 17 Drehofenanlagen.

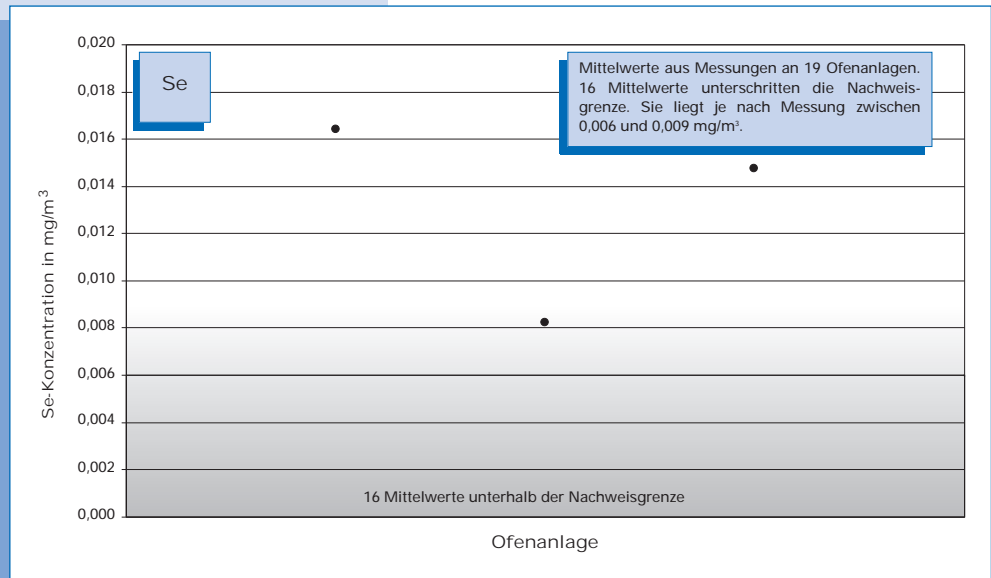


Bild 5-26: Mittelwerte aus Einzelmessungen (Jahr 1999) der Selen-Konzentration im Reingas von 19 Drehofenanlagen.

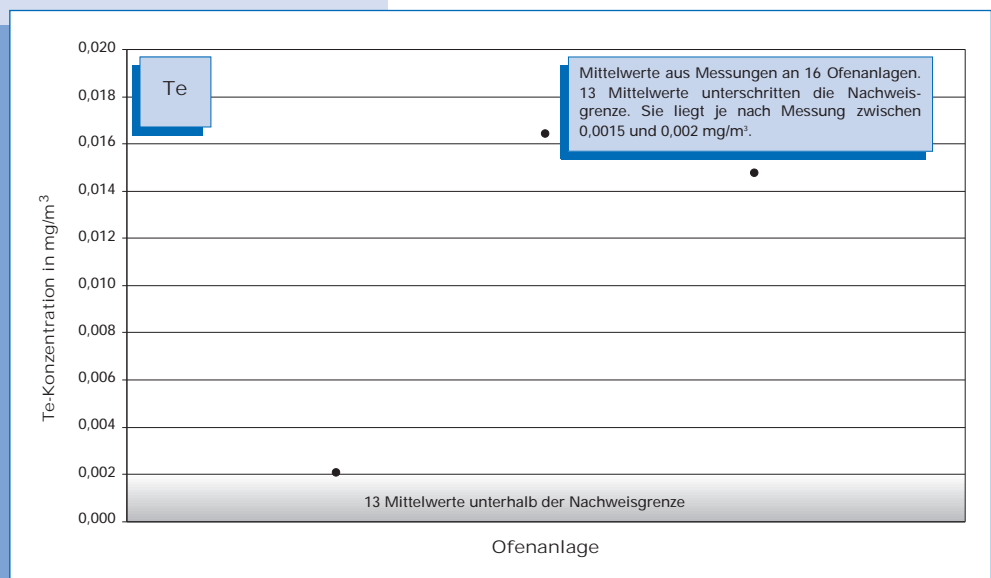


Bild 5-27: Mittelwerte aus Einzelmessungen (Jahr 1999) der Tellur-Konzentration im Reingas von 16 Drehofenanlagen.

Literatur

- [1] Zahlen und Daten 1999/2000
Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e. V.,
Köln
- [2] Tätigkeitsbericht 1996 - 99
Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf
- [3] Umfrage des Forschungsinstituts der Zementindustrie
2000/2001
Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf
- [4] Verminderung der CO₂-Emissionen
Monitoring-Bericht 1999
Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf

Ergänzende Literatur

Umweltdaten der deutschen Zementindustrie
Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf, 2000

Zement-Taschenbuch 2000
Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf

Ökologische Positionierung von Zement und Beton
InformationsZentrum Beton GmbH, Köln
Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e. V., Köln
Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf, 1999

Zement-Jahresbericht 1999-2000
Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e. V., Köln

Beton - Hart im Nehmen, Stark in der Leistung, Fair zur
Umwelt
Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf

Altöl - Wo Abfall Wunder wirkt
Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf

Alte Steinbrüche - Neues Leben
Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf

Richtlinie VDI 2094: Emissionsminderung Zementwerke

Norm DIN 1164-1: Zement: Teil 1: Zusammensetzung,
Anforderungen

Norm DIN EN 197-1 2001-02. Zement: Teil 1: Zusammen-
setzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von
Normalzement; Deutsche Fassung EN 197-1: 2000

Richtlinie 2000/76/EG des Europäischen Parlaments und
des Rates vom 04. Dezember 2000 über die Verbrennung
von Abfällen

Copyright/Herausgeber:

VDZ Verein Deutscher Zementwerke e. V.

Postfach 30 10 63, D-40410 Düsseldorf

Tannenstraße 2, D-40476 Düsseldorf

Telefon: (02 11) 45 78-1

Telefax: (02 11) 45 78-296

E-Mail: info@vdz-online.de

Internet: <http://www.vdz-online.de>

Alle Rechte vorbehalten

Veröffentlicht durch den Verein Deutscher Zementwerke e. V.

Gesamtproduktion: Verlag Bau + Technik GmbH, Düsseldorf

Redaktionsschluss: April 2001