

Forschungszentrum Karlsruhe

Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 6508

Herstellung von Zementklinker
Verfahrensbeschreibung und Analysen zum Einsatz von
Sekundärbrennstoffen

M. Achternbosch, K.-R. Bräutigam

Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

2000

Kurzfassung:

Herstellung von Zementklinker - Verfahrensbeschreibung und Analysen zum Einsatz von Sekundärbrennstoffen

Durch den hohen Anteil der Energiekosten an der Wertschöpfung des fertigen Zements und durch den immer härter werdenden Wettbewerb ist die Zementindustrie daran interessiert, die Energiekosten zu senken. Daher gewinnt der Einsatz von kostengünstigen Sekundärbrennstoffen, die aus Abfällen bestehen, für die Zementindustrie immer mehr an Bedeutung. Mit zunehmendem Sekundärbrennstoffeinsatz treten die Zementwerke jedoch in direkte Konkurrenz zu den anderen Abfallbehandlungsanlagen. Es ist zudem ungeklärt, welche Auswirkungen ein erhöhter Einsatz von Sekundärbrennstoffen auf den produzierten Zement hat. Dies gilt insbesondere für den Verbleib von Spurenelementen, die in den Sekundärbrennstoffen enthalten sind. Aus diesem Grund wird der Einsatz von Sekundärbrennstoffen in der Zementindustrie von Fachkreisen, Politik und Teilen der Gesellschaft kontrovers diskutiert.

In der vorliegenden Studie werden die derzeitigen Kenntnisse zur Mitverbrennung von Abfällen bei der Zementherstellung zusammengestellt. Hierzu werden zunächst die unterschiedlichen Verfahren zur Herstellung von Zementklinker beschrieben. Den größten Anteil an der Klinkerproduktionskapazität hat das Trockenverfahren. Hier kommen Drehrohröfen mit mehrstufigen Zyklonvorwärmern mit oder ohne Calcinator oder lange Trockenöfen mit integriertem Vorwärmer zum Einsatz. Die größte Bedeutung haben die Zyklonvorwärmeröfen mit oder ohne Calcinator, die in Deutschland einen Anteil von ca. 85 % an der gesamten Klinkerkapazität haben.

Anschließend wird das Verhalten der mit Rohstoffen und Brennstoffen in den Klinkerbrennprozeß eingetragenen Schwermetalle in der Anlage beschrieben. Die Schwermetalle werden dabei je nach Flüchtigkeit der Elementverbindung direkt in den Klinker beim Klinkerbrennprozeß eingebunden oder aber als Filterstaub dem Klinker als Zuschlagstoff bei der Zementherstellung beigemischt.

In einem weiteren Berichtsteil werden die zu Beginn des Jahres 1999 in Deutschland vorhandenen Klinkerproduktionskapazitäten (Standort der Anlage, Ofentyp, Kapazität) erfaßt und - aus Geheimhaltungsgründen - in aggregierter Form dargestellt. Zusätzlich erfaßt wurden für die einzelnen Anlagen die genehmigten Einsatzmengen an Sekundärbrennstoffen (Art und Menge) und den tatsächlich eingesetzten Mengen gegenübergestellt. In den Anlagen, die eine Genehmigung zum Einsatz von Sekundärbrennstoffen besitzen, könnte danach 45% des Energiebedarfs durch diese Brennstoffe gedeckt werden.

Abstract:

Manufacture of cement clinker - Description of the process and analysis of the use of secondary fuels

The manufacture of cement clinker is an energy-intensive process. The high share of energy costs in production costs of cement and the steadily increasing international competition has intensified the cement industry's efforts to reduce energy costs. Therefore, the use of waste as low-cost secondary fuel is increasingly important for the cement industry. However, with the growing use of secondary fuels, forces the cement plants into a competition with thermal waste treatment facilities. Further on, the effect of the increased contamination of the cement clinker by the use of secondary fuels has its quality is not clear. Therefore, the use of waste as alternative fuel in the cement industry is subject of controversies in professional circles, politics and parts of society.

The aim of this work is to summarise the present knowledge on the co-incineration of waste in the clinker manufacturing process. In a first step different processes for clinker production are described. In Europe, especially in Germany, the most relevant process for clinker production is the dry process. In this process rotary kilns with mainly multi stage suspension preheaters with or without precalciners are used. In Germany these kilns have a share of approximately 85% in the total clinker capacity.

Afterwards, the distributions and interrelationships of heavy metals introduced through raw materials and fuels are performed. The heavy metals are either directly retained in the clinker depending on the volatility of the metals or incorporated into the fly ash which is grinded with clinker during cement production.

In a further step the clinker production capacities for Germany (sites, kind of preheater kiln, capacity) for the beginning of 1999 were collected and - due to observance of secrecy - presented in an aggregated form. Additionally, the type and amount of secondary fuels (kind and amount) which could be used due to official approvals are evaluated and compared with amounts really used. In all plants which have a permission for a co-incineration of secondary fuels, 45% of the energy consumption could be met by using them.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
2	EINFÜHRUNG IN DIE ZEMENTHERSTELLUNG	2
3	VERFAHREN ZUR HERSTELLUNG VON ZEMENTKLINKER	4
3.1	NABVERFAHREN	4
3.2	HALBNABVERFAHREN UND HALBTROCKENVERFAHREN	4
3.3	TROCKENVERFAHREN	5
4	VORWÄRMERARTEN	6
4.1	ROSTVORWÄRMER	6
4.2	ZYKLONVORWÄRMER	6
5	DREHROHRÖFEN	8
5.1	ENERGIEBEDARF	9
6	VARIANTEN DER VERFAHRENSTECHNIK UND DER BETRIEBSWEISE	10
6.1	ANLAGEN MIT SEKUNDÄRFEUERUNG.....	10
6.2	VERBUNDBETRIEB UND DIREKT BETRIEB	13
6.3	BETRIEB MIT BYPASS	14
7	KLINKERKÜHLER	16
8	ENTSTAUBUNGSANLAGEN	17
8.1	ZYKLON	17
8.2	GEWEBEFILTER	18
8.3	ELEKTROFILTER	18
9	CHEMISCHE GRUNDLAGEN ZUR ZEMENTKLINKERHERSTELLUNG	20
9.1	ROHSTOFFE ZUR HERSTELLUNG VON ZEMENTKLINKER	20
9.2	KLINKERPHASEN	22
10	STOFFKREISLÄUFE	23
10.1	INNERER UND ÄUßERER KREISLAUF	24
10.2	SCHWERFLÜCHTIGE ELEMENTE	25
10.3	HALBFLÜCHTIGE ELEMENTE	26
10.4	FLÜCHTIGE ELEMENTE	26
10.5	SEHR REAKTIVE FLÜCHTIGE ELEMENTE	26
11	RECHTLICHE GRUNDLAGEN	27
11.1	BUNDESIMMISSIONSSCHUTZRECHT	27

12	ÜBERBLICK ÜBER KLINKERPRODUKTIONSKAPAZITÄTEN IN DEUTSCHLAND	32
12.1	EINSATZ VON SEKUNDÄRBRENNSTOFFEN IN ANLAGEN ZUR KLINKERHERSTELLUNG	35
12.2	ANLAGEN, IN DENEN DER EINSATZ VON SEKUNDÄRBRENNSTOFFEN GENEHMIGT IST	38
12.3	ANLAGEN, IN DENEN DER EINSATZ VON ALTREIFEN/GUMMI GENEHMIGT IST.....	39
12.4	ANLAGEN, IN DENEN DER EINSATZ VON BRENNSTOFFEN AUS PRODUKTIONSSPEZIFISCHEN GEWERBEABFÄLLEN (BPG) GENEHMIGT IST.....	41
12.5	ANLAGEN, IN DENEN DER EINSATZ VON ALTÖL GENEHMIGT IST	42
12.6	ANLAGEN, IN DENEN DER EINSATZ VON ALTHOLZ GENEHMIGT IST	43
13	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	45
14	QUELLENVERZEICHNIS	48

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1:	SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER ZEMENTHERSTELLUNG	2
ABBILDUNG 2:	SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES PROZEBABLAUFS ZUR HERSTELLUNG VON ZEMENT BEI EINSATZ EINES ROSTVORWÄRMEROFENS	6
ABBILDUNG 3:	SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINES ZYKLONVORWÄRMEROFEN MIT ROHMEHL- UND GASSTROMFÜHRUNG IN DEM 4-STUFIGEN ZYKLON	7
ABBILDUNG 4:	SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER HERSTELLUNG VON ZEMENT AM BEISPIEL EINES ZYKLONVORWÄRMEROFENS	10
ABBILDUNG 5:	SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINER SEKUNDÄRFEUERUNG AM BEISPIEL EINES ZYKLONVORWÄRMEROFENS	11
ABBILDUNG 6:	SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINES ZYKLONVORWÄRMEROFENS MIT CALCINATOR	12
ABBILDUNG 7:	SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINES ZYKLONVORWÄRMEROFENS MIT CALCINATOR UND TERTIÄRLUFTLEITUNG	12
ABBILDUNG 8:	SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES VERBUNDBETRIEBS BEI EINEM ZYKLONVORWÄRMEROFEN	13
ABBILDUNG 9:	SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES DIREKTBTETRIEBS EINES ZYKLONVORWÄRMEROFENS	14
ABBILDUNG 10:	SCHEMATISCHE DARSTELLUNG VERSCHIEDENER BYPASSKONZEPTE	15
ABBILDUNG 11:	SCHEMATISCHER QUERSCHNITT EINES ZYKLONS	17
ABBILDUNG 12:	GEWEBEFILTER MIT DRUCKLUFTREINIGUNG	18
ABBILDUNG 13:	SCHEMATISCHER ABSCHIEDEVORGANG IN EINEM ELEKTROFILTER	19
ABBILDUNG 14:	SCHEMATISCHER AUFBAU EINES ELEKTROFILTERS.	19
ABBILDUNG 15:	SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER MATERIALSTRÖME FÜR DIE HERSTELLUNG VON 1 T ZEMENTKLINKER UND 1,25 T KOMPOSIT - ZEMENT	21
ABBILDUNG 16:	BEISPIEL VON RELATIVEN FLÜCHTIGKEITEN AUSGEWÄHLTER SPUREN- UND NEBENELEMENTE BEIM KLINKERBRENNEN IN EINEM ZYKLONVORWÄRMEROFEN	25
ABBILDUNG 17:	STANDORTE DER KLINKERPRODUZIERENDEN ANLAGEN IN DEUTSCHLAND 1998	35

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1:	TYPISCHE TEMPERATUREN UND VERWEILZEITEN VON BRENNGUT UND OFENGAS IN EINEM DREHROHROFEN MIT ZYKLONVORWÄRMER UND CALCINATOR	9
TABELLE 2:	NATÜRLICHE ROHSTOFFE FÜR DIE ZEMENTKLINKERHERSTELLUNG	20
TABELLE 3:	ROHMEHL- UND PORTLANDZEMENTKLINKERZUSAMMENSETZUNG	21
TABELLE 4:	ANTEIL DER WICHTIGSTEN MINERALOGISCHEN KLINKERPHASEN IM ZEMENTKLINKER.....	22
TABELLE 5:	SIEDETEMPERATUREN AUSGEWÄHLTER ANORGANISCHER VERBINDUNGEN.....	23
TABELLE 6:	EMISSIONSGRENZWERTE FÜR ZEMENTÖFEN NACH TA LUFT	28
TABELLE 7:	EMISSIONSGRENZWERTE NACH 17. BImSchV	29
TABELLE 8:	ANZAHL UND KAPAZITÄTEN VON ANLAGEN ZUR KLINKERHERSTELLUNG IN DEUTSCHLAND - STAND 1998	33
TABELLE 9:	ANZAHL UND KAPAZITÄTEN VON ANLAGEN ZUR KLINKERHERSTELLUNG IN DEUTSCHLAND	34
TABELLE 10:	EINSATZ VON SEKUNDÄRBRENNSTOFFEN IN ANLAGEN ZUR KLINKERHERSTELLUNG IN DEUTSCHLAND FÜR DAS JAHR 1998	36
TABELLE 11:	KLINKERKAPAZITÄTEN IN EINZELNEN BUNDESLÄNDERN INSGESAMT UND MIT GENEHMIGUNG FÜR DEN EINSATZ VON SEKUNDÄRBRENNSTOFFEN	37
TABELLE 12:	EINSATZ VON SEKUNDÄRBRENNSTOFFEN.....	39
TABELLE 13:	EINSATZ VON ALTREIFEN/GUMMI.....	40
TABELLE 14:	EINSATZ VON BPG	41
TABELLE 15:	EINSATZ VON ALTÖL.....	42
TABELLE 16:	EINSATZ VON ALTHOLZ.....	44
TABELLE 17:	ZUSAMMENFASSENDE DARSTELLUNG DES MAXIMAL GENEHMIGTEN UND DES TATSÄCHLICHEN EINSATZES VON SEKUNDÄRBRENNSTOFFEN	46

1 Einleitung

Zement ist ein mineralischer Stoff und gehört zu den hydraulischen Bindemitteln. Er erhärtet unter Wasseraufnahme an der Luft oder unter Wasser steinartig und kann auf diese Weise einzelne Gesteinsteile verbinden. Der Hauptabnehmer von Zement ist die Bauindustrie, denn Zement ist ein wichtiges Ausgangsmaterial für die Herstellung von Beton. Im Jahre 1998 wurden in Deutschland ca. 34 Mio t Zement produziert. Hiervon gingen 53% in die Transportbetonindustrie, 26% an die Hersteller von Betonbauteilen und 10% in den Bereich sonstiger Silozement. Sackzement hatte einen Anteil von 12% [VDZ-Umweltdaten], [BDZ].

Die Zementherstellung ist ein energieintensiver Produktionsprozeß, da der Herstellungsprozeß Materialtemperaturen von bis zu 1450 °C erfordert. Durch den hohen Anteil der Energiekosten an der Wertschöpfung des fertigen Zements und durch den immer härter werdenden Wettbewerb ist die Zementindustrie daran interessiert, die Energiekosten zu senken. Daher gewinnt der Einsatz von kostengünstigen Sekundärbrennstoffen, die aus Abfällen gewonnen werden, für die Zementindustrie immer mehr an Bedeutung. Innerhalb der nächsten Jahre soll der Einsatz von Sekundärbrennstoffen am thermischen Energieverbrauch von ca. 23% im Jahre 1999 deutlich erhöht werden. Mit zunehmendem Sekundärbrennstoffeinsatz treten die Zementwerke jedoch in direkte Konkurrenz zu Abfallbehandlungsanlagen.

Es ist zudem noch nicht vollständig geklärt, welche Auswirkungen ein erhöhter Einsatz von Sekundärbrennstoffen auf den produzierten Zement hat. Dies gilt insbesondere für den Verbleib von Spurenelementen, die in den Sekundärbrennstoffen enthalten sind. Aus diesem Grund wird der Einsatz von Sekundärbrennstoffen in der Zementindustrie von Fachkreisen, Politik und Teilen der Gesellschaft kontrovers diskutiert.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist eine Zusammenstellung der derzeitigen Kenntnisse zur Mitverbrennung von Abfällen bei der Zementherstellung. Dies beinhaltet Verfahrensbeschreibungen und eine Zusammenstellung der in Deutschland betriebenen Anlagen mit den zugehörigen Produktionskapazitäten. Die Sekundärbrennstoffe, die in deutschen Zementwerken entsprechend vorliegenden Genehmigungen eingesetzt werden können, werden nach Art und Menge erfaßt und mit tatsächlich eingesetzten Mengen verglichen.

2 Einführung in die Zementherstellung

Für ein Verständnis der verschiedenen Details der Zementproduktion, die im Rahmen dieser Arbeit zusammengestellt werden, ist ein kurzer Überblick über die grundlegenden Teilschritte sinnvoll. Die Produktion von Zement umfaßt verschiedene Schritte, die in der Abbildung 1 vereinfacht dargestellt sind.

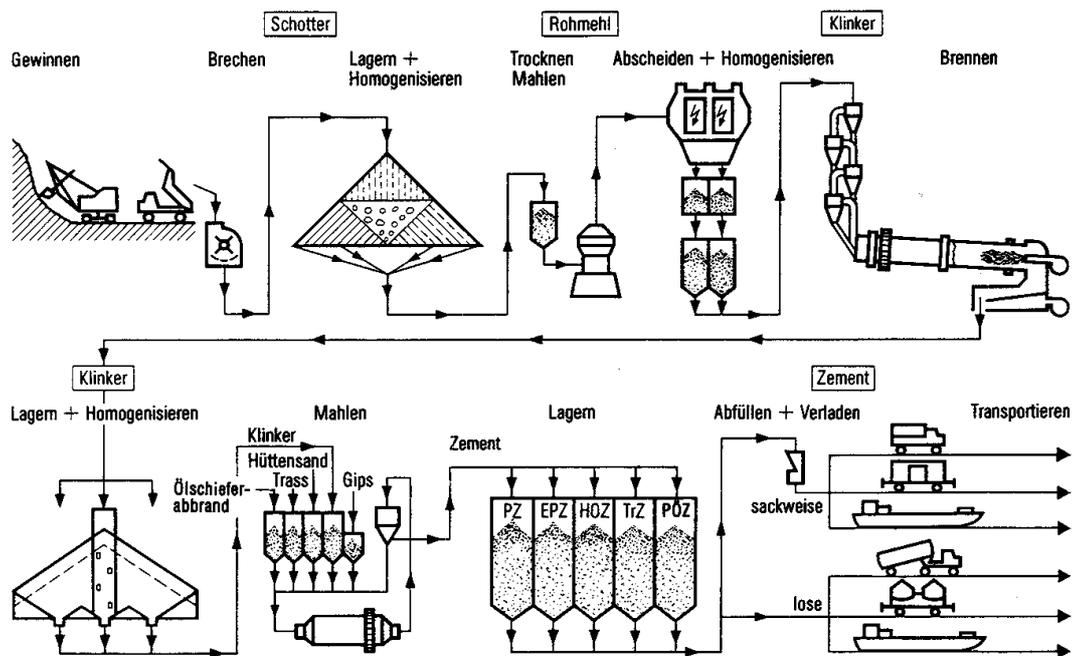


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Zementherstellung [Härig]

Die Herstellung von Zement beginnt mit dem Abbau der Rohstoffe Kalkstein, Kreide, Ton bzw. Mergel im Steinbruch. Nach einer Vorzerkleinerung mit einem Brecher werden diese Rohstoffe im genau festgelegten Verhältnis zum sogenannten Rohmehl vermischt. Gegebenenfalls werden auch Korrekturstoffe wie beispielsweise Bauxit, Sand oder Eisenoxid zugesetzt. Mit Mühlen wird das Rohmehl weiter zerkleinert, getrocknet und danach über einen Vorwärmer, in Abbildung 1 ein Zyklonvorwärmer, dem Drehrohfen staubförmig zugeführt. Hier wird bei Temperaturen im Bereich von 1250 °C bis 1450 °C aus dem Rohmehl der sogenannte Zementklinker in Form von nußgroßen, graugrünen Körpern gebrannt. Die erforderliche Energie wird durch Verbrennung von Kohlestaub oder anderen Brennstoffen in einem am Drehrohrende installierten Brenner erzeugt. Die heißen Abgase strömen im Gegenstrom zum Feststoff durch das Drehrohr und den Vorwärmer. Der am Ende aus dem Drehrohfen austretende Klinker muß anschließend gekühlt werden.

Durch Mahlen unter Zumischung von Zumahlstoffen entsteht dann der eigentliche Zement. Für verschiedene Anwendungszwecke werden unterschiedliche Zementsorten unter Zumahlung von Calciumsulfat, Hüttensand, Flugaschen, Kalksteinmehl, gebrannter Ölschiefer, Traß, etc. hergestellt, von denen der Portlandzement (PZ) die wichtigste Sorte ist.

Der technische Prozeß der Klinkerherstellung ist in der Realität aus verschiedenen Gründen komplexer als in der Abbildung 1 dargestellt. So existieren für die Rohmehlaufgabe neben dem in der Abbildung gezeigten Trockenverfahren andere, zum Teil technisch veraltete Verfahren.

Zusätzlich gibt es verschiedene Betriebsweisen der Anlagen. Die Prozesse Trocknen, Mahlen und Brennen sind miteinander verknüpft. Das Abgas aus dem Drehrohrofen kann zur Trocknung (Verbundbetrieb) oder vom Vorwärmer direkt zum Filter (Direktbetrieb) geführt werden. Zur Abtrennung von unerwünschten Nebenbestandteilen, die sich negativ auf den Anlagenbetrieb auswirken können, existieren verschiedene Bypasskonzepte, die in Abbildung 1 nicht dargestellt sind.

In den folgenden Abschnitten wird auf die Details der Zementherstellung genauer eingegangen. Danach erfolgt in Kapitel 11 eine kurze Darstellung der rechtlichen Grundlagen.

3 Verfahren zur Herstellung von Zementklinker

Die Verfahren zur Herstellung von Klinker bestehen aus der Rohmaterialaufbereitung zum Brenngut und dem Brennprozeß. Abhängig von der Rohmaterialfeuchte und -zusammensetzung kommen bei der Rohmaterialaufbereitung unterschiedliche Verfahren zum Einsatz. Das Rohmaterial kann entweder trocken zu Rohmehl oder naß zu Rohschlamm aufbereitet werden. Hierfür existieren insgesamt vier unterschiedliche Verfahren:

1. Naßverfahren
2. Halbnaßverfahren
3. Halbtrockenverfahren
4. Trockenverfahren

Das Rohmehl bzw. der Rohschlamm wird beim Halbnaß-, Halbtrocken- und Trockenverfahren, abhängig vom Typ des vorhandenen Vorwärmerofens, entweder als trockenes Rohmehl oder in Form von Pellets bzw. Granalien aufgegeben.

Erwähnt werden muß noch das Schwefelsäure-Zement-Verfahren (Müller-Kühne-Verfahren), das in den Neuen Bundesländern mit vernachlässigbarer Produktionskapazität betrieben wird.

3.1 Naßverfahren

Das älteste Verfahren zur Herstellung von Zementklinker ist das Naßverfahren, bei dem Schlämme von Rohmehl mit ca. 28 - 43% Wasseranteil eingesetzt werden. Dieses Verfahren ermöglicht ein einfacheres Verarbeiten und Homogenisieren der Rohmaterialien, insbesondere dann, wenn die mineralischen Rohstoffe eine hohe Feuchte und eine inhomogene chemische Zusammensetzung besitzen. Mit fortgeschrittener Technologie war man aber in der Lage, auch in einem Trockenprozeß homogenisiertes Rohmehl zu erzeugen.

Die Schlämme werden entweder direkt in langen Drehrohröfen mit integriertem Trockner/Vorwärmer (traditionelles Verfahren) aufgegeben oder nach einer Schlammtrocknung einem Zyklonvorwärmerofen (modernes Naßverfahren) zugeführt. Das traditionelle Naßverfahren benötigt gegenüber dem Trockenverfahren deutlich mehr an thermischer Energie, da der Wasseranteil der Schlämme verdampft werden muß. Aus diesem Grund hat das Naßverfahren stark an Bedeutung verloren. In Europa hat dieses Verfahren nach CEMBUREAU nur noch 6% Anteil an der Klinkerproduktion [CEMBUREAU 1997]. In Deutschland wird es nicht mehr eingesetzt.

3.2 Halbnaßverfahren und Halbtrockenverfahren

Auch beim *Halbnaßverfahren* erfolgt eine nasse Aufbereitung der Rohmaterialien. Die Rohmaterialien werden naß vermahlen und ein Mahlgutschlamm erzeugt. Dieses Verfahren wird eingesetzt, wenn die Rohstoffe, insbesondere der Kalk, hohe Feuchtigkeitsgehalte aufweisen.

Anschließend wird mit Hilfe von Filterpressen eine mechanische Entwässerung durchgeführt. Man erhält somit einen Filterkuchen mit 16 - 21% Wassergehalt. Der Kuchen kann entweder einer Vortrocknung unterzogen werden und als Rohmehl in einem Zyklonwärmetauscherofen eingesetzt werden oder es können Formlinge, wie z. B. Pellets, für den Rostvorwärmerofen hergestellt werden. Dieses Verfahren hat eine wesentlich bessere Energiebilanz als das traditionelle Naßverfahren. Es wird in Deutschland nur an einem Standort eingesetzt, an dem die Kreidevorkommen eine hohe Grubenfeuchte haben.

Beim *Halbtrockenverfahren* werden aus trockenem Rohmehl und Wasser mit Hilfe eines Granuliertellers Pellets oder ein Granulat erzeugt, das ca. 10 - 12% Wasser enthält. Diese Aufgabegüter werden dann in Rostvorwärmeröfen eingesetzt.

3.3 Trockenverfahren

Bei diesem Verfahren wird trockenes Rohmehl eingesetzt, das in einem Mahltrocknungsvorgang gewonnen wird. Es werden Drehrohröfen mit mehrstufigen Zyklonvorwärmern mit oder ohne Calcinator oder lange Trockenöfen mit integriertem Vorwärmer verwendet. Die größte Bedeutung haben die Zyklonvorwärmeröfen mit oder ohne Calcinator, die in Deutschland einen Anteil von ca. 85% an der gesamten Klinkerkapazität haben.

4 Vorwärmerarten

4.1 Rostvorwärmer

Die Pellets werden im Gegenstrom zum Ofengas in zwei Stufen auf einem Wanderrost vorgewärmt bzw. getrocknet, bevor das Gut in den Drehrohrofen gelangt. Diese Rostvorwärmeröfen werden Lepolöfen genannt. Dieses Verfahren hat in Deutschland einen Anteil von ca. 15% an der gesamten Klinkerkapazität. Ein schematischer Prozeßablauf ist in Abbildung 2 dargestellt.

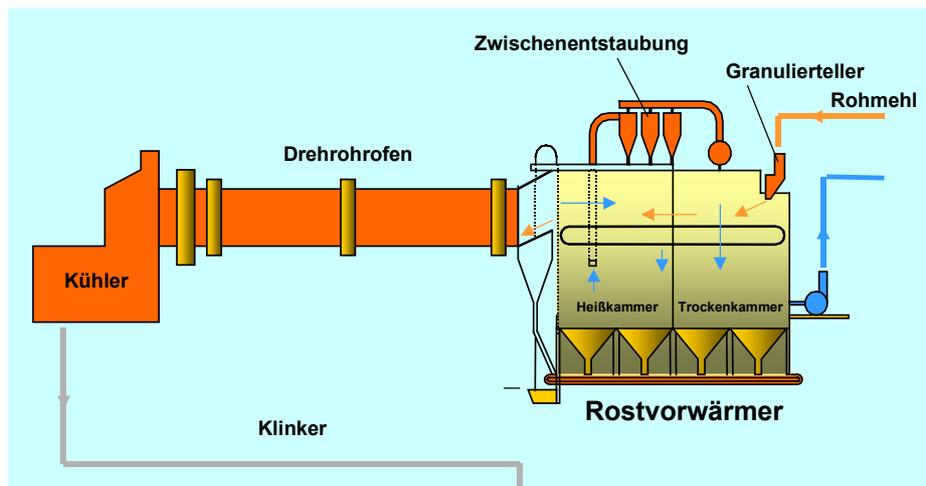


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Prozeßablaufs zur Herstellung von Zement bei Einsatz eines Rostvorwärmerofens (Lepolofen)

Die aus Rohmehl und Wasser auf einem Granulierteller hergestellten Pellets gelangen zuerst in die Trockenkammer, wo die Pelletschicht im Kreuzstrom zu dem Ofengas transportiert wird. Die Pelletschicht wird dabei auf ca. 150°C erwärmt und getrocknet. Nach Durchwanderung der Heißkammer erreicht das Brenngut eine Temperatur von ca. 700 – 850°C.

Das Ofengas wird mit einem Zwischengasgebläse von der Heißkammer in die Trockenkammer gesaugt. Um das Gebläse vor dem Grobstaub zu schützen, erfolgt eine Zwischenentstaubung des Gases mit Hilfe von Zyklonen.

In der Trockenkammer kühlt sich das Abgas auf 90 – 150 °C ab [Kirchartz]. Lepolöfen haben einen ähnlichen thermischen Energieverbrauch wie die Zyklonvorwärmeröfen ohne Calcinator, die im nächsten Abschnitt vorgestellt werden. Sie verbrauchen allerdings weniger elektrische Energie [Rentz].

4.2 Zyklonvorwärmer

Der Vorwärmer besteht in der Regel aus einem System von 4 - 6 Zyklonen, durch die das Rohmehl im Gegenstrom zu den Ofenabgasen geführt wird. Die übliche Produktionskapazität für 4-stufige Zyklonvorwärmeröfen ohne Calcinator liegt bei ca. 4000 t am Tag [CEMBUREAU BAT]. In Abbildung 3 ist ein 4-stufiger Zyklonvorwärmerofen dargestellt.

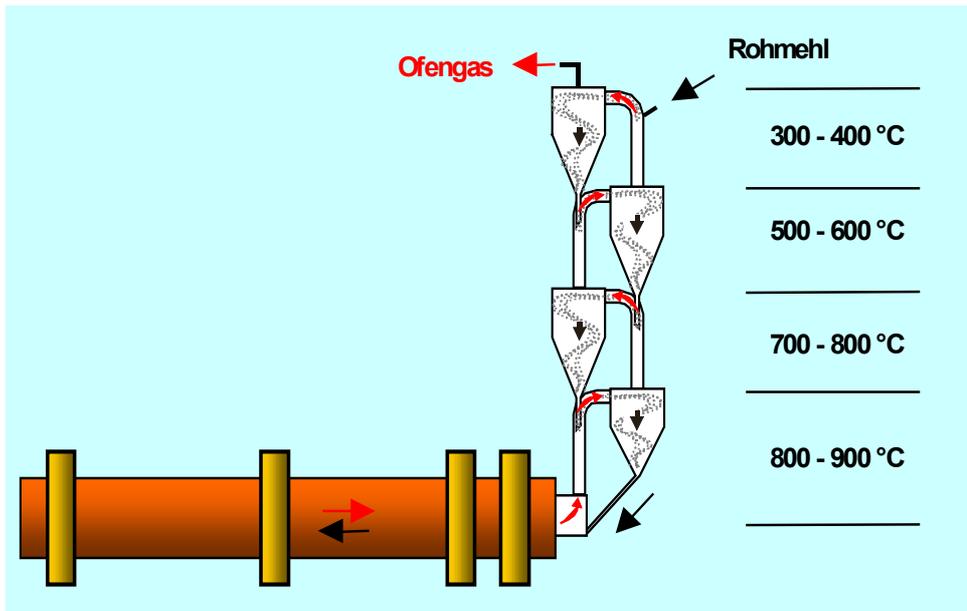


Abbildung 3: Schematische Darstellung eines Zyklonvorwärmerofens mit Rohmehl- und Gasstromführung in dem 4-stufigen Zyklon. Temperaturbereiche des Rohmehls in den einzelnen Zyklonstufen

Das warme Rohmehl wird über eine Leitung der obersten (vierten) Zyklonstufe zugegeben, dabei vom aufsteigendem Abgas mitgerissen und in den Zyklon überführt. In einem Spiralwirbel wird es durch die Zentrifugal- und Schwerkraft ausgetragen. Anschließend wird es mit dem aufsteigenden Abgas in den nächsten Zyklon mitgerissen. Auf diese Weise erwärmt sich das Rohmehl vom obersten Zyklon in den untersten Zyklon auf etwa 750 - 850°C, bevor es in den Drehrohrofen eintritt [Kirchartz 1993]. Umgekehrt kühlen sich die Ofenabgase von ca. 1000 - 1200 °C bei Eintritt in die unterste Zyklonstufe auf ca. 300 - 400 °C in der obersten Zyklonstufe ab.

In den Zyklonstufen beginnen schon stoffliche Umwandlungen. Tonminerale zersetzen sich ab ca. 400 °C, während die Entsäuerung (Calcinierung) der Carbonate bei ca. 850 °C eintritt. Allerdings kommt es in der untersten Zyklonstufe nur zu einer partiellen Calcinierung, bei der ca. 20 – 40% der Carbonate entsäuert werden. Der Entsäuerungsgrad kann aber durch Zusatzfeuerungen am Einlauf des Drehrohrofen oder im Vorwärmersystem erhöht werden.

5 Drehrohrofen

Der wichtigste Prozeß in einem Zementwerk ist das Brennen des Zementklinkers. In Deutschland werden hierfür praktisch ausschließlich Drehrohrofen eingesetzt. In sehr geringem Umfang kommen noch Schachtofen zum Einsatz, die an der gesamten Klinkerproduktion in Deutschland jedoch nur einen vernachlässigbaren Anteil haben.

Die Länge des Drehrohrofens hängt von der Anlagenkapazität und der Art des Verfahrens ab. Man unterscheidet kurze und lange Öfen. Kurze Öfen haben eine Länge von etwa 40 – 90 m, wobei die Mehrzahl wohl im Bereich 55 - 65 m liegt [CEMBUREAU BAT]. Lange Drehrohrofen können dagegen eine Länge von über 200 m erreichen. Das Verhältnis Länge zu Durchmesser liegt zwischen 10 und 40. Die Drehrohre drehen sich mit ca. 0,5 – 4,5 Umdrehungen in der Minute und sind leicht geneigt (ca. 2,5 – 4,5% Gefälle), um das Brenngut weiter zu transportieren. Sie bestehen aus Stahl und sind innen mit feuerfestem Mauerwerk ausgekleidet.

Das Ofenmehl wird langsam und kontinuierlich durch den Drehrohrofen transportiert. Es durchwandert dabei mehrere Brennzonen: Nach Eintritt in den Ofen gelangt das Rohmehl zuerst in die Calcinerzone. Hier wird das Calciumcarbonat im Rohmehl mit weiterer Aufheizung fortschreitend restentsäuert. In dieser Zone verbleibt das Ofenmehl in der Regel ca. 20 bis 30 Minuten, wobei es sich auf ca. 1000 °C erwärmt [Korf], [CEMBUREAU 1997]. Im Temperaturbereich von 900 – 1000 °C setzen die Sinterreaktionen verstärkt ein [Sprung 1982].

Das Brenngut durchläuft eine Übergangszone, in der es auf rund 1300 °C erhitzt wird. Danach verbleibt es ca. 10 Minuten in der Sinterzone, wo die Maximaltemperatur von ca. 1450 °C erreicht wird [Korf], [CEMBUREAU 1997]. Am Ende des Drehrohrofens wird die interne Kühlzone (1350 – 1200°C) durchlaufen, in der bestimmte Mineralphasen (Aluminat- und Ferritphasen) kristallisieren.

In der folgenden Tabelle 1 sind ergänzend typische Temperaturen und Verweilzeiten von Brenngut und Ofengasen in den einzelnen Anlagenteilen zum Brennen des Zementklinkers inklusive Klinkerkühler aufgeführt.

Während die Verweilzeit des Brenngutes im Drehrohrofen im Bereich von 30 - 45 min. liegt, beträgt die Verweilzeit der Gase im Ofen ca. 5 – 10 s, wobei die Verweilzeit für den Temperaturbereich oberhalb 1200 °C mit ca. 3 – 4 s angegeben wird [Hoenig].

	Feststoff		Gas	
	Temperatur [°C]	Verweilzeit [min.]	Temperatur [°C]	Verweilzeit [s]
Elektrofilter			ca. 150	ca. 10
Wärmetauscher	150- 800	ca. 1	ca. 350 - 800	ca. 10
Calcinator	ca. 700 – 800		ca. 1100	ca. 3
Drehrohrofen	ca. 800 – 1450	ca. 30 - 45	ca. 1000 - 2000	ca. 5 - 10
Klinkerkühler	ca. 200- 1100	ca. 30	20 - ca. 1000	ca. 1

Tabelle 1: Typische Temperaturen und Verweilzeiten von Brenngut und Ofengas in einem Drehrohrofen mit Zyklonvorwärmer und Calcinator; [CEMBUREAU 1997], [“HCB Siggenthal], [Korf]

5.1 Energiebedarf

Brennstoffenergie wird bei der Zementherstellung im wesentlichen für das Klinkerbrennen benötigt. Der theoretische Energiebedarf errechnet sich aus thermodynamischen Daten für das Brennen des Zementklinkers und ist abhängig von der Rohmehlzusammensetzung. Die Reaktionsenthalpien liegen im Bereich 1630 - 1840 MJ/t Klinker [Sprung 1982]. Des Weiteren wird thermische Energie für die Trocknung der Rohstoffe benötigt. Bei Berücksichtigung der Trocknung beträgt der Wert für den theoretischen Energiebedarf ca. 2500 MJ/t Klinker [VDZ Umweltdaten]. Der tatsächlich notwendige Energieeinsatz hängt von den Rohstoffen, von der Verfahrenstechnik und vom verwendeten Verfahren ab. In Europa liegt die Wärmezufuhr nach Angaben von CEMBUREAU bei 3200 – 5500 MJ/t. Allerdings dürfte sich der obere Wert auf das in Deutschland nicht eingesetzte Naßverfahren beziehen. Der spezifische Einsatz an Brennstoffenergie betrug 1998 in Deutschland im Mittel ca. 3600 MJ/t Klinker [VDZ Umweltdaten]. Über 65% des Gesamtwärmebedarfs werden für Vorwärmung, Trocknung und Calcinierung benötigt.

6 Varianten der Verfahrenstechnik und der Betriebsweise

Zur Herstellung von Zementklinker werden, wie bereits erwähnt, verschiedene Verfahren eingesetzt, von denen das Trockenverfahren die größte Bedeutung hat. Allerdings gibt es verschiedene verfahrenstechnische Varianten. Außerdem kann der Betrieb einer technischen Anlage den produktionsspezifischen Anforderungen angepaßt werden. Für eine genauere Betrachtung der möglichen Varianten ist eine detaillierte Darstellung der Verbindungen zwischen den einzelnen Anlagenteilen zur Rohmehlaufgabe sehr hilfreich (s. Abbildung 4).

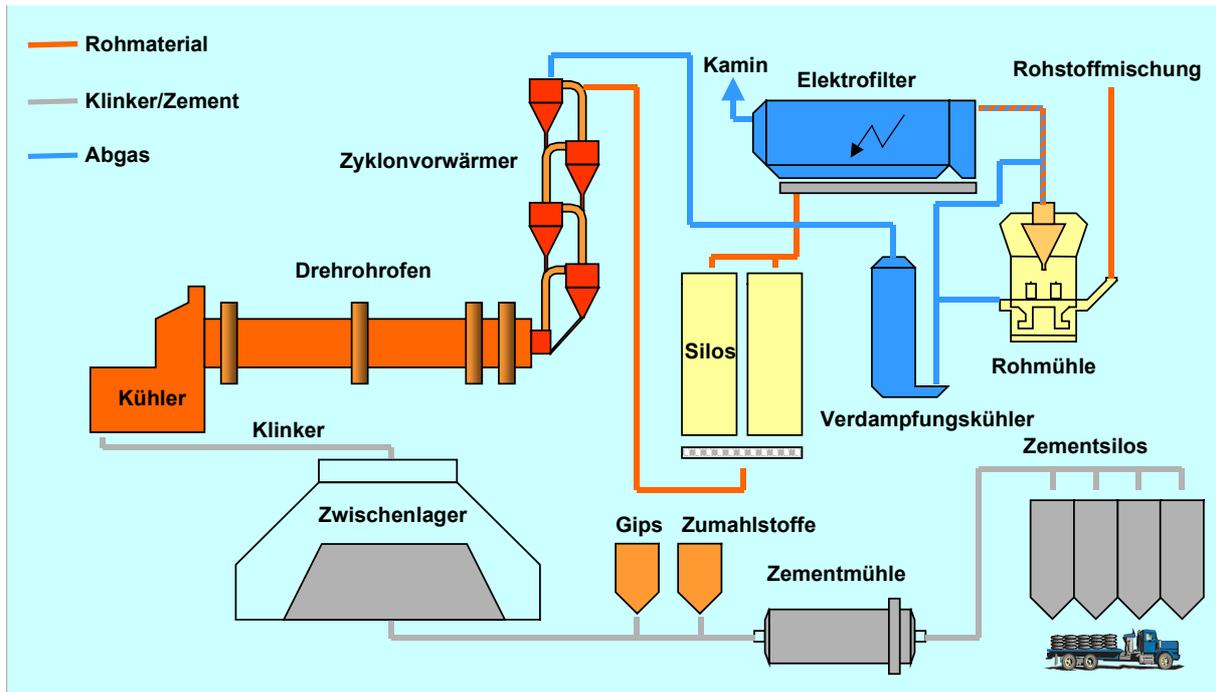


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Herstellung von Zement am Beispiel eines Zyklonvorwärmerofens

Während des Mahlvorgangs der Rohstoffmischung in der Rohmühle findet eine Trocknung statt, für die das Abgas aus dem Vorwärmerofen verwendet wird. Das fertige Rohmehl wird von dem Abgas in den Elektrofilter geblasen, dort vom Abgas getrennt und in die Silos transportiert. Von hier gelangt es dann über einen Vorwärmer, in dem die heißen Ofenabgase das Rohmehl auf ca. 850 °C erwärmen, in den Drehrohrofen. Dort wird das Ofenmehl bis auf ca. 1450 °C erhitzt und "gesintert". Bei diesem Sinterprozeß verwandelt sich das heiße Ofenmehl in Klinker. Der frisch gebrannte Klinker wird in einem Klinkerkühler wieder abgekühlt und in das Zwischenlager gefördert.

6.1 Anlagen mit Sekundärfeuerung

Viele Zementwerke verfügen neben der Primärfeuerung des Drehrohrofens über eine zweite Brennstoffaufgabe am Einlauf des Drehrohrofens oder im Vorwärmer. In Abbildung 5 ist für einen Zyklonvorwärmerofen eine Sekundärfeuerung schematisch dargestellt.

Der Brennstoff kann entweder stückig oder staubförmig durch eigene Brennerlanzen zugeführt werden. Im Zyklonvorwärmerofen ohne Sekundärfeuerung findet die Calciniierung des Rohmehls hauptsächlich in der Calciniierungszone des Drehrohrofens statt. Bei Einsatz einer Sekundärfeuerung kann eine weitgehende Calciniierung bereits im Vorwärmer oder am Ofen-einlauf erreicht werden. Die hierfür benötigte Energie muß von der Sekundärfeuerung erbracht werden. Je nach Anlagentechnik werden 20 – 60 % des gesamten Wärmebedarfs für das Klinkerbrennen schon durch die Sekundärfeuerung bereitgestellt. Die Primärfeuerung des Drehrohrofens kann dadurch deutlich entlastet werden kann. Es muß dort praktisch nur noch die Sinterung durchgeführt werden.

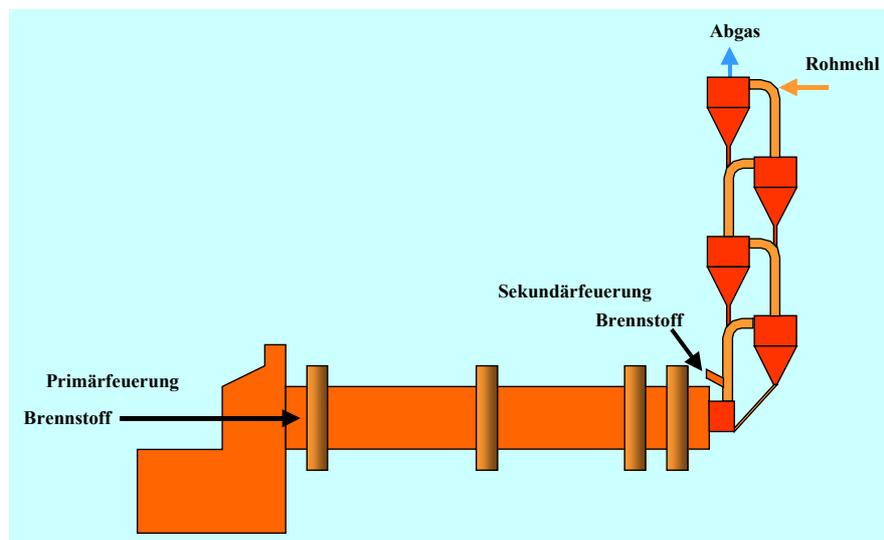


Abbildung 5: Schematische Darstellung einer Sekundärfeuerung am Beispiel eines Zyklonvorwärmerofens

Auch in Lepolöfen kann eine Vorcalciniierung durchgeführt werden, indem Brennstoff in der Heißkammer des Rostvorwärmers verbrannt wird.

In modernen Ofenanlagen, bevorzugt Zyklonvorwärmeröfen mit Calcinator, kann eine 90%ige Entsäuerung bereits vor Eintritt in den Drehrohröfen erreicht werden [Hoenig]. Hierfür müssen ca. 60% des gesamten Wärmebedarfs in der Sekundärfeuerung bereitgestellt werden, dies bedingt einen gesonderten Verbrennungsraum - den Calcinator. Dieser befindet sich zwischen Vorwärmer und Drehrohröfen. Ein solcher Aufbau ist in Abbildung 6 schematisch dargestellt.

Der Calcinator ist ein Flugstromreaktor, in dem fossile Brennstoffe aber auch Ersatzbrennstoffe aufgegeben werden können. Die Verweilzeiten der Gase und die Verbrennungstemperatur werden durch die Prozeßbedingungen bei der Calciniierungsreaktion (thermodynamisches Gleichgewicht) sowie durch die Dimensionen des Calcinators bestimmt. Für die Verweilzeiten der Gase werden in der Literatur 2 bis 4 s bei 850 – 900°C angegeben [Hoenig].

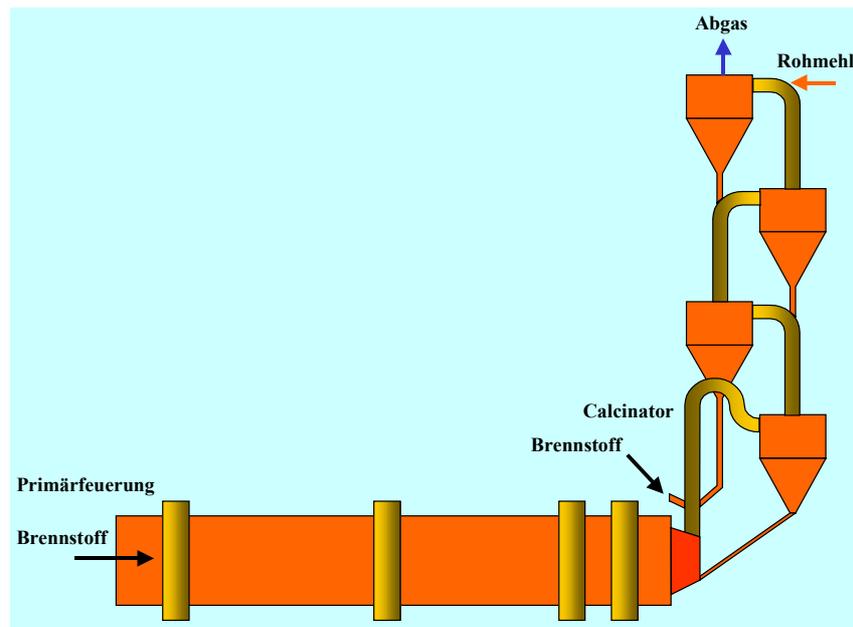


Abbildung 6: Schematische Darstellung eines Zyclonvorwärmerofens mit Calcinator

Mit Zyclonvorwärmeröfen mit Calcinatoren können wesentlich höhere Produktionskapazitäten erreicht werden als mit Öfen ohne Calcinatoren. Die Technologie gestattet eine verbesserte Prozeßführung und bietet zusätzliche Möglichkeiten der Emissionsminderung. Es kommen auch ganz spezielle Calcinatoren zum Einsatz, die eine gestufte Verbrennungsführung ermöglichen, wodurch das gebildete NO_x teilweise reduziert werden kann.

Für die Bereitstellung der Verbrennungsluft für die Sekundärfeuerung existieren verschiedene Varianten. Die gesamte Verbrennungsluft kann entweder durch den Drehrohröfen oder über separate Rohrleitungen zugeführt werden, indem ein Teil der heißen (ca. 800°C) Abluft des Klinkerkühlers abgezweigt und der Sekundärfeuerung als Tertiärluft zur Verfügung gestellt wird (in Abbildung 7 schematisch dargestellt). Dadurch kann der Durchmesser des Drehrohröfens entsprechend der geringeren Rauchgasmenge dimensioniert werden.

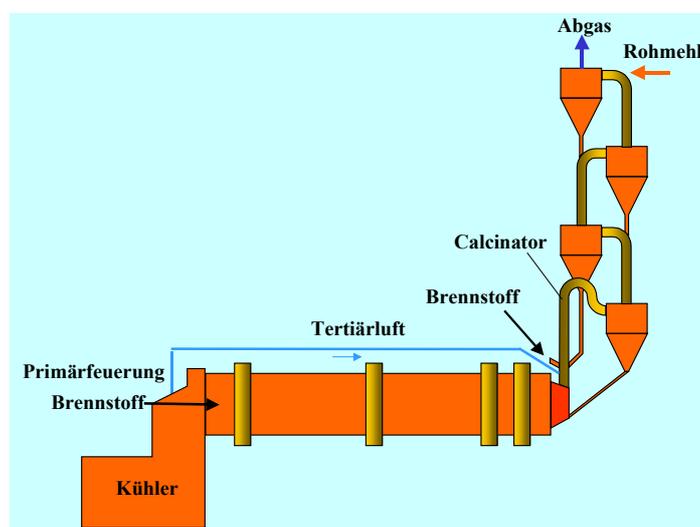


Abbildung 7: Schematische Darstellung eines Zyclonvorwärmerofens mit Calcinator und Tertiärluftleitung

6.2 Verbundbetrieb und Direktbetrieb

Das heiße Ofenabgas durchläuft im Gegenstrom zum Rohmehl den Vorwärmer, wo es einen Großteil seines Wärmeinhalts an das Rohmehl überträgt. Die Abgastemperatur nach dem Vorwärmer beträgt 300-400 °C. Für die Ableitung der Abgase existieren zwei Betriebsweisen.

Im *Verbundbetrieb* wird der restliche Wärmeinhalt des Abgases zum Trocknen des Mahlgutes (Mahltrocknung) in der Rohmühle genutzt. Dies geschieht nur so lange, wie die Rohmühle arbeitet. Abbildung 8 zeigt schematisch das Fließschema für das Abgas beim Verbundbetrieb.

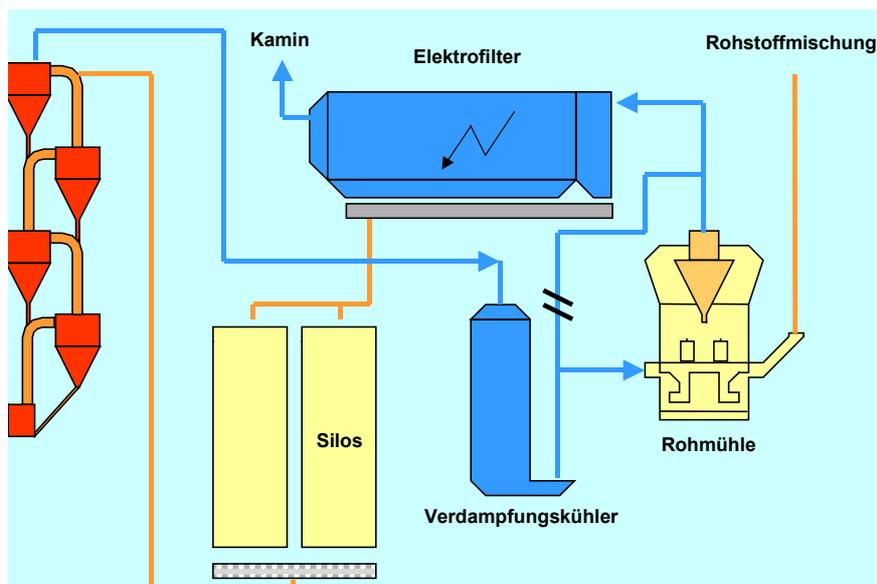


Abbildung 8: Schematische Darstellung des Verbundbetriebs bei einem Zyklonvorwärmerofen

Wie in der Abbildung ersichtlich, wird das Ofenabgas durch die Rohmühle geleitet und danach im Elektrofilter (bzw. Gewebefilter) entstaubt. In diesem Fall ist der Verdampfungskühler außer Funktion.

Des weiteren besteht die Möglichkeit, das Ofenabgas direkt vom Verdampfungskühler der Entstaubungsanlage zuzuführen, was in Abbildung 9 schematisch dargestellt ist. Die Rohmühle ist bei diesem *Direktbetrieb* außer Funktion. Zur besseren Staubabscheidung wird zuvor im Verdampfungskühler das Abgas mit Wasser gekühlt und konditioniert.

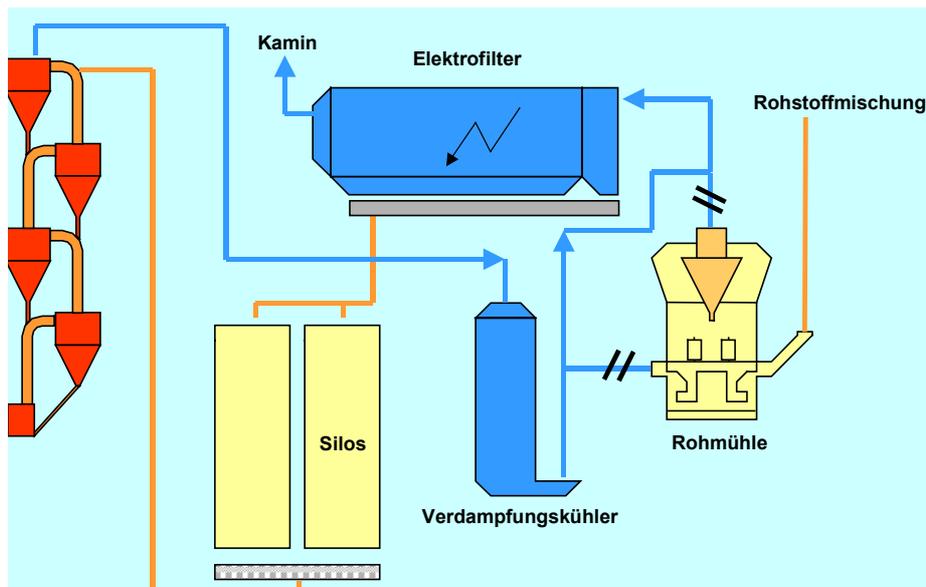


Abbildung 9: Schematische Darstellung des Direktbetriebs eines Zyklonvorwärmerofens

Im Verbundbetrieb kommt es zu einer Abscheidung von Spurenelementverbindungen aus dem Abgas an dem Rohmehl. Die Spurenelementemissionen nach der Entstaubungsanlage sind im Verbundbetrieb somit niedriger als im Direktbetrieb.

Im Verbundbetrieb besteht die Staubfracht im Abgas nach der Mühle aus mitgerissenem Rohmehl und Ofenstaub. Die Staubbelastung im Abgas im Verbundbetrieb ist somit höher als im Direktbetrieb. Die Filterstäube werden in der Regel dem Rohmehl wieder zugemischt oder als Zumahlstoff der Zementmühle zugeführt. Nur in seltenen Fällen erfolgt eine Deponierung des Filterstaubs.

Der Anteil des Verbundbetriebs an den Betriebsstunden der Anlage hängt von den spezifischen Durchsätzen der Rohmühle und des Drehrohrofens ab. Aus anlagentechnischen Gründen ist die Rohmühle im Vergleich zur Ofenanlage auf einen höheren Durchsatz ausgelegt [Reiter]. Der Verbundbetrieb wird solange gefahren, bis die Rohmehlsilos gefüllt sind. Anschließend stellt man auf Direktbetrieb um. Genaue Angaben über den prozentualen Anteil des Verbundbetriebs liegen nicht vor. Nach den uns zur Verfügung stehenden Informationen hat der Verbundbetrieb in Deutschland in der Regel einen sehr hohen Anteil.

6.3 Betrieb mit Bypass

Flüchtige Neben- und Spurenelemente können in den Anlagen Kreisläufe ausbilden, die zu ungewollten Anreicherungen der Elemente führen. Es kann deshalb notwendig sein, diese Anreicherungen zu reduzieren. Zu diesem Zweck existieren verschiedene Möglichkeiten. Die wichtigsten Bypasskonzepte sind in Abbildung 10 schematisch dargestellt.

Bei einem *Staubbypass* unterbricht man den äußeren Kreislauf. In diesem Fall wird ein Teil des Filterstaubs dem Rohmehl nicht mehr zugeführt, sondern ausgeschleust. Dies empfiehlt sich vor allem zur Entlastung des Schwermetallkreislaufs. In der Regel wird der abgetrennte

Filterstaub, wenn die Zusammensetzung es erlaubt, dem Klinker in der Zementmühle zuge-
mischt.

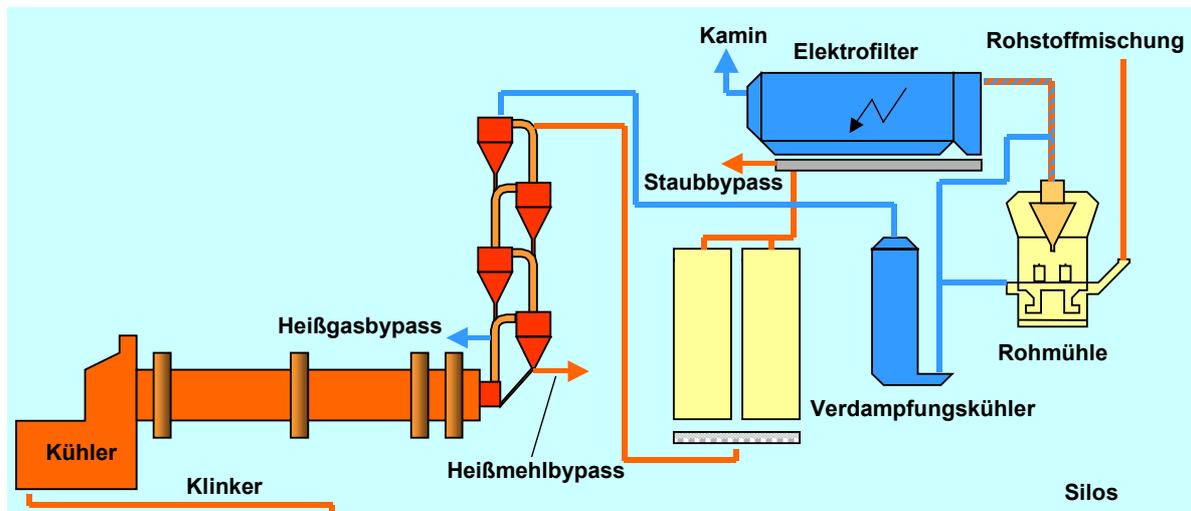


Abbildung 10: Schematische Darstellung verschiedener Bypasskonzepte

Zur Minderung insbesondere der Alkalichloride und -sulfate bei einem insgesamt hohen Input an Alkali-, Schwefel- und Halogenverbindungen eignet sich ein *Heißgasbypass*, der an der Übergangsstelle vom Drehrohr zum Zyklonvorwärmer einen Teil der Ofenabgase abführt. Die Ofenabgase werden je nach Betriebsweise unterschiedlich stark abgekühlt und gegebenenfalls entstaubt. Die Abgase können dann dem Hauptgasstrom wieder zugeleitet oder zur Mahltrocknung eingesetzt werden. Die entstaubten Gase können aber auch in einem Kamin abgeführt werden.

Des Weiteren kann entweder kontinuierlich oder diskontinuierlich ein Teil des Ofenmehls an der Übergangsstelle vom Drehrohr zum Zyklonvorwärmer ausgeschleust werden. In diesem Fall handelt es sich um einen *Heißmehlbypass*. Der Anlagenaufbau ist gegenüber dem Gasbypass einfacher und die Wärmeverluste sind geringer. Mit einem Heißmehlbypass kann z. B. der Chloridkreislauf entlastet werden, wenngleich hierfür der Gasbypass effektiver ist [Reiter 1995]. Das abgetrennte Heißmehl wird dem Zement zugemahlen.

7 Klinkerkühler

Der frisch gebrannte Klinker verläßt den Drehrohrofen bei Temperaturen von 1200 – 1250 °C [CEMBUREAU BAT] und wird auf etwa 100 – 300 °C gekühlt. Die Abkühlung des Klinkers wird relativ schnell durchgeführt, um chemische Umwandlungsprozesse bestimmter Klinkerphasen zu vermeiden. Eine wesentliche Aufgabe der Klinkerkühler besteht aus der Wärmerückgewinnung, bei der die Kühlluft die Wärme des heißen Klinkers aufnimmt, die dann im Ofen als vorgewärmte Verbrennungsluft oder in der Mühle als Trockenluft eingesetzt wird. Es werden hauptsächlich zwei Arten von Klinkerkühlern eingesetzt:

- Planetenkühler, auch Satellitenkühler genannt
- Rostkühler.

Der *Planetenkühler* besteht aus 9 – 11 Kühlrohren, die außen am Ende des Drehrohrofens parallel angebracht sind und auf die sich der Klinkerstrom aufteilt. Optional kann zur Verbesserung der Kühlung Wasser (< 40 l/t Klinker) eingespeist werden [CEMBUREAU BAT]. Ein Nachteil des Planetenkühlers ist, daß von der erwärmten Kühlluft keine Verbrennungsluft für eine Sekundärfeuerung abgezweigt werden kann, die gesamte Verbrennungsluft durch den Drehrohrofen geschleust werden muß und die einsetzbare Kühlluftmenge begrenzt ist.

Bei modernen Anlagen wird ein *Rostkühler* eingesetzt, der eine höhere Wärmerückgewinnung ermöglicht. Hier wird der Klinker auf einem Rost, der aus luftdurchlässigen Platten besteht, im Kreuzstrom zur Kühlluft transportiert. Es existieren verschiedene Arten von Rosten. In der Regel werden Schubrostkühler eingesetzt, in denen der Klinker rhythmisch schubartig über Platten bewegt wird. Der Klinker durchläuft hierbei zwei Kühlzonen. In der heißeren Zone kann die Sekundärluft für die Primärfeuerung und gegebenenfalls auch die Tertiärluft für die Sekundärfeuerung entnommen werden. Der Luftverbrauch liegt bei konventionellen Schubrostkühlern unter 2000 Nm³/t Klinker, wogegen moderne Kühler abhängig vom Ofensystem nur 800 – 1700 Nm³/t Klinker benötigen.

8 Entstaubungsanlagen

Während der Zementherstellung entsteht Staub unterschiedlicher Zusammensetzung in verschiedenen Prozessschritten. So fällt Staub in den Brechern der Rohmaterialien, in den Mühlen zur Herstellung von Rohmehl, Kohlestaub und Zement und in den Vorwärmern der Öfen an. Die Ausführungen beziehen sich im folgenden nur auf die staubhaltigen Abgase der Rohmühlen und Vorwärmeröfen.

Die Staubgehalte im Abgas der Mühlen hängen von der Konstruktion, dem Abgasvolumenstrom und von der Art bzw. Korngrößenverteilung des Mahlgutes ab. Im Verbundbetrieb können die Staubgehalte im Rohgas bis 1000 g/Nm^3 betragen. [Rentz], [pers. Mitteilung]. Im Rohgas von Zyklonvorwärmeröfen (Direktbetrieb) liegen die Konzentrationen zwischen 20 und 100 g/Nm^3 . Rostvorwärmeröfen weisen dagegen mit Werten von 2 - 14 g/Nm^3 niedrigere Staubkonzentrationen im Rohgas auf.

Zur Abscheidung der Staubpartikel aus den Abgasen werden im wesentlichen Elektrofilter aber auch Gewebefilter und Zyclone eingesetzt. Vor der Entstaubungsanlage kann ein Verdampfungskühler vorgeschaltet sein, der das Abgas mit Wasserdampf konditioniert, um eine bessere Abscheidung zu erzielen.

8.1 Zyclon

Zyklone sind durch einen einfachen Aufbau und eine hohe Betriebssicherheit gekennzeichnet. Die Staubabscheidung beruht auf Zentrifugalkräften, die, wie in Abbildung 11 dargestellt, durch eine entsprechende Konstruktion der Gaszuführung erzeugt werden.

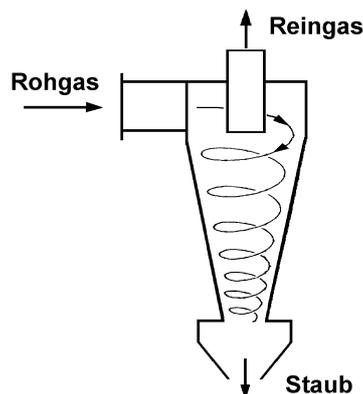


Abbildung 11: Schematischer Querschnitt eines Zyklons

Das staubhaltige Abgas tritt tangential in den Zyklon ein. Durch die Zentrifugalkräfte wird der Staub an den Wandungen abgeschieden und fällt durch die Schwerkraft nach unten zum Staubaustrag. Das entstaubte Rauchgas verläßt den Zyklon nach oben durch das sogenannte Tauchrohr. Der Feinstaub verbleibt aufgrund dieser Wirkungsweise im Abgas. Zyclone werden z. B. in der Zwischengasentstaubung bei Rostvorwärmern, als Vorabscheider vor Gewebefiltern und im Zyklonvorwärmer eingesetzt.

8.2 Gewebefilter

Gewebefilter (s. Abbildung 12) gehören zu den filtrierenden Abscheidern, die als Oberflächenfilter arbeiten. Die Abscheidung der Partikel erfolgt vorwiegend an der Oberfläche des Filtermediums, das vom Gas durchströmt wird. Dort bilden die abgeschiedenen Partikel einen Staubkuchen, der mit zunehmender Schichtdicke einen ansteigenden Druckverlust bewirkt. Dies hat zur Folge, daß der Staubkuchen regelmäßig entfernt werden muß.

Durch Auswahl der Filtermedien und Konstruktion der Filter kann der Gewebefilter den Betriebsbedingungen und Eigenschaften der Stäube optimal angepaßt werden. Als Materialien für die Filtermedien werden Faserschichten, membranartige Materialien oder Sinterlamellen eingesetzt.

Die Betriebstemperatur eines Gewebefilters wird maßgeblich durch die eingesetzten Filtermaterialien begrenzt. Da die Filterelemente durch eine Temperaturüberschreitung leicht beschädigt oder zerstört werden können, ist dem Gewebefilter in der Regel ein Verdampfungskühler vorgeschaltet. Durch das Eindüsen von Wasser wird in diesem Aggregat die Abgastemperatur gesenkt.

Gewebefilter haben einen sehr hohen Abscheidegrad, der mit über 99% angegeben wird [Turegg]. Insbesondere im Feinkornbereich, d.h. bei Partikelgrößen im Bereich von 10 µm, stellt ein Gewebefilter ein sehr gutes Abscheidesystem dar. Als Nachteil ist jedoch der relativ hohe Druckverlust anzuführen. Dieser muß durch eine höhere Gebläseleistung ausgeglichen werden.

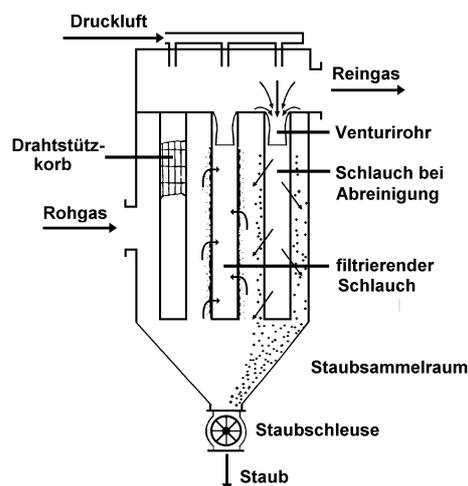


Abbildung 12: Gewebefilter mit Druckluftreinigung

8.3 Elektrofilter

In einem Elektrofilter beruht die Abscheidung von Staubpartikeln oder Flüssigkeitströpfchen auf der Wirkung von elektrostatischen Kräften in einem elektrischen Feld. Der Abscheideprozeß gliedert sich in mehrere Teilschritte, die der Abbildung 13 zu entnehmen sind.

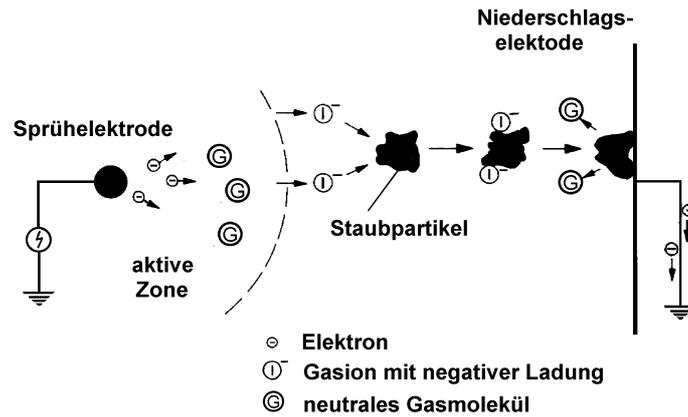


Abbildung 13: Schematischer Abscheidvorgang in einem Elektrofilter

Vor der Abscheidung müssen die Staubpartikel elektrisch aufgeladen werden. Dies geschieht durch negativ geladene Gasmoleküle, die in der aktiven Zone an der Sprühelektrode gebildet werden. Anschließend werden die geladenen Partikel im elektrischen Feld zur sogenannten Niederschlags-elektrode transportiert. Die erzeugte Staubschicht muß regelmäßig durch Rütteln der Niederschlags-elektrode entfernt werden.

Für Partikel mit einer Größe von weniger als $0,1 \mu\text{m}$ beruht die Abscheidung auf einem anderen Prozeß. Die Brownsche Molekularbewegung führt zu einer Anlagerung der Partikel an die Niederschlags-elektrode.

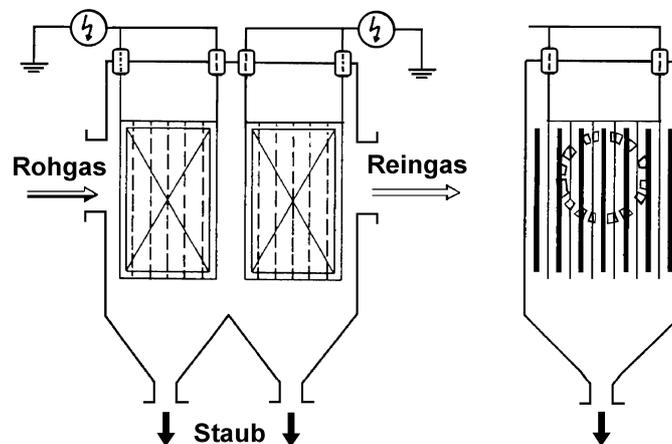


Abbildung 14: Schematischer Aufbau eines Elektrofilters

Die Staubabscheidung eines Elektrofilters ist sehr gut und erreicht in der Praxis Abscheidgrade im Bereich von 99%. Elektrofilter zeichnen sich darüber hinaus durch einen kleinen Druckverlust aus. Die maximale Einsatztemperatur ist auf $450 \text{ }^\circ\text{C}$ begrenzt. Die Betriebstemperaturen von Elektrofiltern in Zementwerken liegen im Bereich von $150 - 200 \text{ }^\circ\text{C}$.

9 Chemische Grundlagen zur Zementklinkerherstellung

9.1 Rohstoffe zur Herstellung von Zementklinker

Zement entsteht durch eine Sinterungsreaktion (Bildung künstlicher Mineralien mit hydraulischen Bindeeigenschaften) einer Mischung kalk- und tonhaltiger Ausgangsstoffe. Die Rohstoffe sind Kalksteinmergel, ein natürlich vorkommendes Gemisch aus Kalkstein und Ton, oder ein im Zementwerk hergestelltes Gemenge aus Kalkstein bzw. Kreide und Ton. In gewissem Umfang kommen auch Sekundärrohstoffe wie Kiesabbrand, Aschen, Bleicherden, etc. mit wachsender Bedeutung zum Einsatz. Tabelle 2 führt die wichtigsten natürlichen Rohstoffe für die Klinkerherstellung auf. Kalkstein und Kreide bestehen aus Calciumcarbonat. Ton ist ein Verwitterungsprodukt von Aluminiumsilikaten wie Feldspäten, Hornblenden etc. und besteht aus feinkörnigen bzw. glimmerartigen Mineralien sowie in geringen Mengen aus nicht umgewandeltem Quarz und Feldspat.

Kalkkomponente	Kalkstein:	96 - 100 %	CaCO ₃
	Kreide:	98 - 99 %	CaCO ₃
	Kalkmergel:	75 - 90 %	CaCO ₃
	Mergel:	40 - 75 %	CaCO ₃
	(Tonmergel:)	10 - 40 %	CaCO ₃
Tonkomponente	Mergel	45 - 55 %	Tone
	Tonmergel	65 - 95 %	Tone
	Kaolinit	ca. 32 %	Al ₂ O ₃ *
	Montmorillonit	ca. 11 %	Al ₂ O ₃ *
	Tonglimmer		
Korrekturbestandteile	Bauxit		Al ₂ O ₃
	Eisenerz		Fe ₂ O ₃
	Sand		SiO ₂

Tabelle 2: Natürliche Rohstoffe für die Zementklinkerherstellung;
*: stöchiometrischer Gehalt

Diese Rohmaterialien werden in einem bestimmten Verhältnis gemischt und zu einem Rohmehl fein vermahlen, so daß nach der thermischen Zersetzung des Calciumcarbonats (sogenannte Calcinerungsreaktion) eine bestimmte Zusammensetzung an CaO, SiO₂, Al₂O₃ und Fe₂O₃ vorliegt.

Bei der Sinterung in den Öfen entstehen bestimmte Mineralphasen, welche für die hydraulischen Eigenschaften maßgeblich verantwortlich sind. Wichtigster Hauptbestandteil des Klinkers ist die Mineralphase Tricalciumsilikat (3 CaO·SiO₂), Alit genannt, die dem Zement die gewünschten Eigenschaften wie schnelles Erhärten und hohe Festigkeit verleiht. Ziel ist es, beim Klinkerbrennen ein bestimmtes Verhältnis von Mineralphasen zu erzeugen, was durch geeignete Mischungsverhältnisse der Rohstoffkomponenten und durch Temperaturen von

über 1250 °C bei der Sinterung erreicht wird. Die genaue Einstellung des Gehaltes an CaO ist besonders wichtig. Die folgende Tabelle 3 führt typische Zusammensetzungen von Rohmehl und Portlandzementklinker auf.

	Rohmehl	Portlandzementklinker
Komponente	Gehalt [Gew-%]	Gehalt [Gew-%]
CaO	40 - 45	63,76 – 70,14
„CO ₂ “ gebunden in Carbonaten	31 - 35	0,03 – 0,83
SiO ₂	12 - 16	19,71 – 24,25
Al ₂ O ₃ + TiO ₂	2 - 5	3,97 – 7,30
Fe ₂ O ₃ + Mn ₂ O ₃	≤ 2 (5*)	1,32 – 5,32
MgO	0,3 - 3	0 – 4,51
K ₂ O	0,2 - 1,4	0,31 – 1,76
Na ₂ O	≤ 0,3	0,03 – 0,33
Cl	0,01 - 0,1	
S	< 0,5	0,08 – 0,83

Tabelle 3: Rohmehl- und Portlandzementklinkerzusammensetzung [Winkler], [Sprung 1982], [CEMBUREAU BAT]

Da die Zusammensetzung der verfügbaren Rohstoffe von den örtlichen Lagerstätten abhängt, kann in bestimmten Fällen nur unter Mitverwendung von Korrekturstoffen die gewünschte Rohmehlzusammensetzung erreicht werden. Als Korrekturstoffe werden z. B. Sand, Bauxit und Eisenerz verwendet. Insgesamt werden für 1 Tonne Klinker ca. 1,5 – 1,6 t an mineralischen Rohstoffen benötigt. Davon entweichen, wie der Tabelle 3 entnommen werden kann, beim Brennen ca. 35% in Form von CO₂ und Wasserdampf. Abbildung 15 zeigt schematisch die Materialflüsse für die Herstellung von 1 t Portlandlandzementklinker bzw. 1,25 t Komposit-Zement.

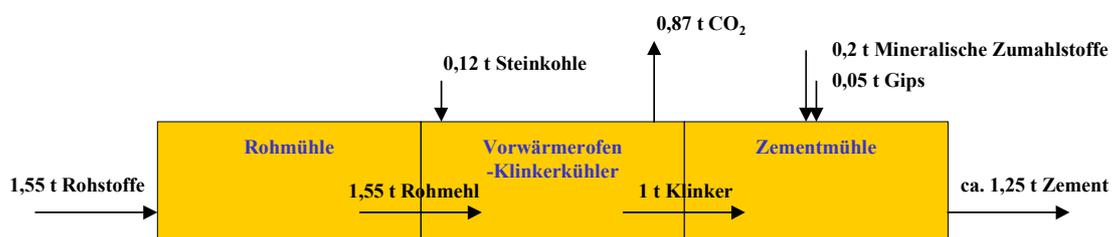


Abbildung 15: Schematische Darstellung der Materialströme für die Herstellung von 1 t Zementklinker und 1,25 t Komposit - Zement; (Wasser vernachlässigt)

Für die Ofenreaktionen muß die Rohstoffmischung in feingemahlenem Zustand vorliegen, um beim Brennen eine quantitative Reaktion zu gewährleisten. Der Mahlvorgang hängt von dem verwendeten Verfahren der Zementklinkerherstellung ab. Wie bereits erwähnt, wird beim häufigsten Verfahren (Trockenverfahren) das Rohmehl in trockener Form eingesetzt. In die-

sem Fall erfolgt das Mahlen der Rohstoffe unter gleichzeitigem Trocknen des Mahlgutes. Dieser Vorgang wird als Mahltrocknung bezeichnet. Hierfür werden in der Regel heiße Ofenabgase eingesetzt (siehe Abschnitt Verbundbetrieb). Bei Einsatz von Rohmehlschlämmen für die Zementklinkerherstellung erfolgt der Mahlvorgang z. T. in Schlamm-Mühlen. Nach der Mahlung haben ca. 85 – 90% des Rohmehls eine Korngröße kleiner 90 µm.

9.2 Klinkerphasen

Beim anschließenden Klinkerbrennen entstehen neben dem bereits erwähnten Alit Mineralphasen wie Dicalciumsilikat C_2S (Belit), Calciumaluminat C_3A und Calciumaluminatferrit C_4AF sowie freies Calciumoxid CaO . Oberhalb ca. 1250 °C bildet sich unter Abnahme des freien CaO -Gehalts eine Schmelze, wobei sich verstärkt das Tricalciumsilikat C_3S (Alit) bildet, das den Hauptbestandteil des Klinkers bildet [Korf]. Die Anteile der einzelnen Phasen im Klinker sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Mineralogische Phase	Abkürzung	Anteil Klinker
(freies Calciumoxid)	C	(< 2 %)
Tricalciumsilikat	C_3S	ca. 40 – 80 %
Dicalciumsilikat	C_2S	ca. 0 – 30 %
Calciumaluminat	C_3A	ca. 7 – 15 %
Calciumaluminatferrit	C_4AF	ca. 4 – 15 %

Tabelle 4: Anteil der wichtigsten mineralogischen Klinkerphasen im Zementklinker [Reiter]

10 Stoffkreisläufe

Die Rohmaterialien und Brennstoffe enthalten in bestimmten Bandbreiten Spurenelemente. Von besonderem Interesse ist das Verhalten der Spurenelemente Thallium, Cadmium, Quecksilber, Blei, Zink, Chrom und von Nebenbestandteilen wie Alkalimetallen, Halogenen und Schwefel. Im folgenden wird ein Überblick über das Verhalten der Spurenelemente im System Vorwärmer - Drehrohrofen gegeben.

Für das Verhalten ist die Kenntnis der im Vorwärmerofensystem entstehenden Spurenelementverbindungen notwendig, die aber direkt quantitativ nicht vollständig vorliegt [Kirchartz]. Aus Untersuchungen kann geschlossen werden, daß sie z. B. als Oxide, Halogenide, Sulfate bzw. als komplexere Mischverbindungen vorliegen. Im Vorwärmerofensystem verdampft ein Teil der Verbindungen aufgrund ihres Dampfdruckes bei den dort herrschenden Temperaturen. Voraussagen über das Verhalten der Spurenelemente in der Anlage, die auf theoretischen Berechnungen reiner Stoffe mit Hilfe thermodynamischer Daten beruhen, sind aufgrund der in den Ofenanlagen nicht vorhandenen Gleichgewichtszustände und Mischphasen nur bedingt möglich. Die Siedetemperaturen möglicher Verbindungen geben aber einen ersten Anhaltspunkt über das Verhalten der Verbindungen. In Tabelle 5 sind die Siedetemperaturen ausgewählter anorganischer Verbindungen aufgeführt.

Verbindung	Siedetemperatur [°C] bei Normaldruck [1013 mbar]
KCl	1500
NaCl	1413
MgCl ₂	1412
K ₂ SO ₄	1689
MgSO ₄	Zersetzung 1124
Na ₂ O	Sublimation 1275
Cd	765
CdCl ₂	960
CdO	>1500
Pb	1740
PbCl ₂	950
PbSO ₄	1170
CuCl ₂	Zersetzung 993 (1490)
NiCl ₂	Sublimation 973
ZnCl ₂	732
ZnO	1975
TiCl ₃	720
Hg	357
HgCl ₂	302
Hg ₂ Cl ₂	Sublimation 400

Tabelle 5: Siedetemperaturen ausgewählter anorganischer Verbindungen [Handbook]

Wie der Tabelle entnommen werden kann, verdampfen Schwermetallchloride bei wesentlich niedrigeren Temperaturen als die entsprechenden Sulfate bzw. Oxide. Die flüchtigen Verbindungen gelangen in die Gasphase und werden mit dem Gasstrom in kühlere Bereiche transportiert, wo sie wieder kondensieren und adsorbiert werden. Da die am Rohmehl adsorbierten Verbindungen wieder in heißere Zonen transportiert werden und erneut verdampfen, bilden sich auf diese Weise Kreisläufe aus. Es kommt zu Anreicherungen, die ein Vielfaches der Eingangskonzentration erreichen können.

10.1 Innerer und äußerer Kreislauf

Erfolgt der Stoffkreislauf – Verdampfung und Kondensation - vorwiegend im System Vorwärmer - Ofen, so bezeichnet man diesen Vorgang als *inneren Kreislauf*. Insbesondere die flüchtigen Elemente Kalium, Chlor und Schwefel neigen zur Bildung von inneren Kreisläufen. Für die Schwermetalle Thallium, Cadmium und Blei gilt dies in ähnlicher Weise.

Der *äußere Kreislauf* umfaßt dagegen zusätzlich den Massenstrom, der die Rohmühle bzw. die Entstaubung nach dem Vorwärmer mit einschließt. Der äußere Kreislauf gilt als geschlossen, wenn dieser Massenstrom dem Brenngut wieder zugefügt wird.

Innere und äußere Stoffkreisläufe bilden sich bevorzugt bei Zyklonvorwärmeröfen aus, deren Rückhaltevermögen größer als das der Rostvorwärmeröfen ist [Kirchartz]. In bezug auf Thallium tritt bei Rostvorwärmeröfen kein innerer bzw. äußerer Kreislauf auf, weil Thallium den Rostvorwärmer ohne nennenswerte Adsorption passiert [Kirchartz].

Der Zeitraum, in dem sich die Anreicherungen aufbauen, hängt von der Flüchtigkeit der jeweiligen Verbindung, vom Adsorptions- bzw. Abscheidevermögen von Mühle, Vorwärmer, Drehrohrofen und Entstaubungsanlage ab. Alkaliverbindungen, insbesondere die der Halogenide und der Sulfate, bauen in wenigen Stunden eine Anreicherung auf. Bei Schwermetallen wie z. B. dem Thallium verläuft die Anreicherung in mehreren Monaten.

In Fachkreisen wird der Begriff "Flüchtigkeit" auf das Verhalten der Spurenelemente im Klinkerbrennprozeß bezogen. Er bezieht sich nicht auf Dampfdrücke der Elemente bei bestimmten Temperaturen. Zahlenmäßig kann die Flüchtigkeit z. B. als Quotient der inneren zur äußeren Bilanzsumme des betreffenden "Elements" ausgedrückt und auf den entsprechenden Wert des "Calciums" bezogen werden [Sprung 1988]. Es handelt sich bei dieser Definition um die Angabe einer relativen Flüchtigkeit. Bei der inneren Bilanz werden die Inputs über Ofenmehl und ofenfertige Brennstoffe mit den Outputs Klinker und Rohgas verglichen. Im Gegensatz dazu stehen bei der äußeren Bilanz die Elementinputs aus dem Rohstoffgemisch und den Brennstoffen den Ausgaben über Klinker, Filterstäube und Emissionen gegenüber.

Es ist hierbei zu beachten, daß es sich nicht um das Verhalten der reinen Elemente handelt, sondern um das Verhalten der in diesem System auftretenden chemischen Verbindungen. Die

folgende Abbildung 16 zeigt nach Sprung beispielhaft relative Flüchtigkeiten aus Meßergebnissen eines Zyklonvorwärmerofens [Sprung 1988].

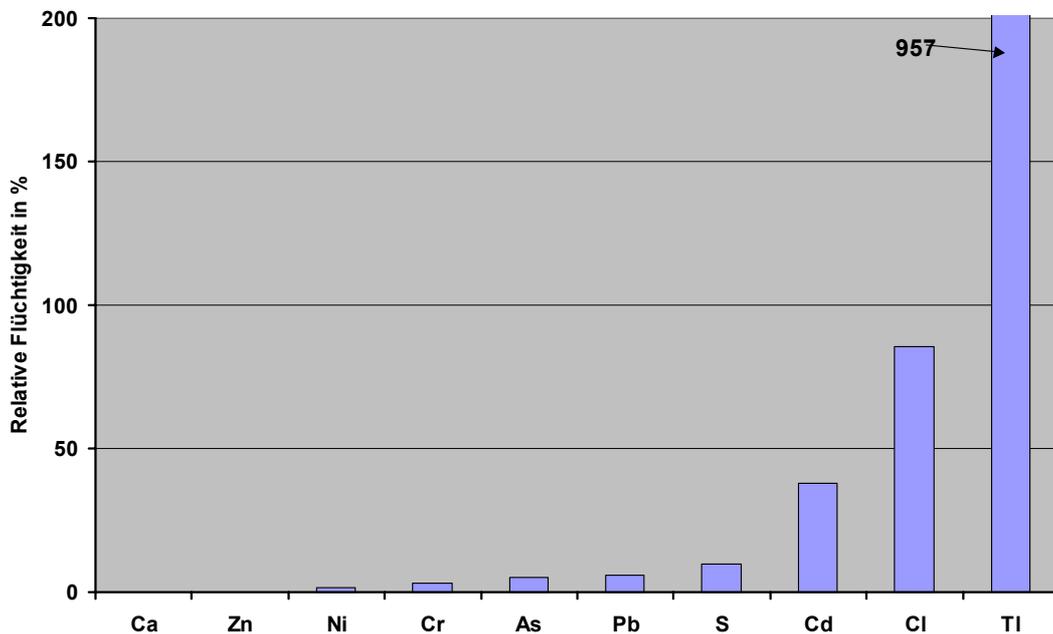


Abbildung 16: Beispiel von relativen Flüchtigkeiten ausgewählter Spuren- und Nebenelemente beim Klinkerbrennen in einem Zyklonvorwärmerofen [Sprung 1988]

Die Abbildung verdeutlicht, daß in dieser Anlage "Elemente" wie z. B. Zink, Nickel, Chrom, Arsen, Blei nicht oder nur unwesentlich flüchtiger sind als Calcium, wogegen Cadmium und das Nebenelement "Chlor" stärker flüchtig sind. Deutlich abgesetzt von diesen Elementen ist Thallium, das bei diesem Bezug eine extrem hohe Flüchtigkeit aufweist. Die Bezugnahme auf Calcium erscheint aus diesem Grund wenig geeignet, das Flüchtigkeitsverhalten der Elemente zu charakterisieren.

Die Spuren- und Nebenelemente werden in Fachkreisen entsprechend ihrem Verhalten im Vorwärmerofensystem in verschiedene Klassen eingeteilt. Die relativen Flüchtigkeiten der Elemente werden je nach Standpunkt aber unterschiedlich bewertet, so daß die Elemente z. T. unterschiedlich bezeichneten Flüchtigkeitsklassen zugeordnet werden [BUWAL 1997], [Sprung 1988], [Hoenig], [Buekens]. So kann ein und dasselbe Spurenelement als nichtflüchtig, schwerflüchtig oder weniger flüchtig bezeichnet werden. Es ergeben sich Zuordnungen, die z.T. deutlich von den in der thermischen Abfallbehandlung üblichen Zuordnungen abweichen. Das BUWAL teilt die Spuren- und Nebenelemente entsprechend ihrem Verhalten beispielsweise in folgende Klassen ein.

10.2 Schwerflüchtige Elemente

Elemente wie z. B. Chrom, Eisen, Nickel, Vanadium, Titan, Kupfer, Zink, Zinn, Arsen, Antimon sind, wie Messungen zeigen, nicht oder nur im geringen Maße „flüchtiger“ als Calcium. Beim Arsen, das selbst flüchtig ist, ist anzunehmen, daß es aufgrund des Calciumüber-

schusses und der oxidativen Reaktionsbedingungen im Vorwärmerofensystem als schwerflüchtiges Calciumarsenat vorliegt [Kirchartz]. Die Flüchtigkeit des Bleis wird unterschiedlich beurteilt. Während in manchen Publikationen Blei den schwerflüchtigen Elementen zugerechnet wird, weisen andere auf eine offensichtlich höhere Flüchtigkeit hin [Kirchartz]. Kennzeichnend für schwerflüchtige Elemente ist ein Gleichgewicht zwischen Einnahmen und Ausgaben innerhalb der betrachteten Bilanzgrenzen.

Schwerflüchtige Elemente werden auch bei erhöhter Zufuhr weitgehend in den Klinker eingebunden, unter der Voraussetzung, daß sich die Elementanteile im Ofenmehl nicht grundsätzlich ändern: Eine Änderung des Halogenidanteils im Brenngut kann zu Veränderungen der Flüchtigkeit bestimmter Spurenelemente führen.

10.3 Halbflüchtige Elemente

Hierzu gehören Metalle wie z. B. Cadmium und Wismuth und überraschenderweise auch Thallium¹. Sie befinden sich im Ofen in der Gasphase und können nur teilweise in den Klinker eingebunden werden. An kühleren Stellen kondensieren sie an Staubpartikeln und werden in der Entstaubungsanlage fast vollständig abgeschieden. Systematische Fehlbeträge bei Stoffbilanzierungen der Anlagen sind kennzeichnend für eine erhöhte Flüchtigkeit, die zu einem geringeren Einbindegrad in den Klinker führt und Anreicherungen zur Folge hat.

10.4 Flüchtige Elemente

Zu dieser Klasse gehört vor allem das Quecksilber. Es reagiert zu Verbindungen, die im gesamten Ofen- und Vorwärmersystem aufgrund ihrer hohen Flüchtigkeit überwiegend in der Gasphase vorliegen. Für die Abscheidung sind niedrige Temperaturen vor den Entstaubungsanlagen erforderlich, die im großtechnischen Betrieb jedoch nicht erreicht werden. Die Abscheidung findet zudem bevorzugt bei einem großen Oberflächenangebot statt: Zyklonvorwärmeröfen haben aufgrund der höheren Staubbelastung der Ofengase ein vergleichsweise höheres Rückhaltevermögen als Lepolöfen.

10.5 Sehr reaktive flüchtige Elemente

Die im Rohmehl und in Brennstoffen enthaltenen Alkalimetalle verdampfen z. T. im Ofen. An kühleren Stellen kondensieren die Alkalimetalle bevorzugt als Halogenide und Sulfate. Diese Verbindungen werden mit dem Rohmehl wieder in die heiße Zone transportiert, wo insbesondere die Chloride, die flüchtiger als die Alkalisulfate sind, wieder verdampfen und Kreisläufe ausbilden. Da das Rohmehl und die Brennstoffe in der Regel mengenmäßig mehr Schwefel als Chlorid enthalten, überwiegen die Alkalisulfate. Die Alkalisulfate werden teilweise in die Schmelzphase aufgenommen.

¹ Diese Zuordnung kommt daher zustande, daß das BUWAL als ein Kriterium für diese Klasse den Transfer in den Filterstaub aufführt.

11 Rechtliche Grundlagen

Die Verbrennung bzw. Mitverbrennung von Abfällen wird in der Bundesrepublik Deutschland durch zwei Rechtsgebiete maßgeblich geregelt. Für alle Bereiche der Abfallwirtschaft bildet das Abfallrecht mit dem Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) [KrW-/AbfG] einschließlich der entsprechenden Verordnungen die Grundlage. Der Bau und Betrieb von technischen Anlagen, die eine Beeinträchtigung der Umwelt verursachen können, wird durch das Immissionsschutzrecht geregelt.

Neben diesen beiden Rechtsgebieten existiert eine große Anzahl von Gesetzen, die weitere Vorgaben für die Errichtung und den Betrieb technischer Anlagen beinhalten. Dazu gehören unter anderem:

- Wasserhaushaltsgesetz - WHG [WHG]
- Bundes-Bodenschutzgesetz - BBodSchG [BBodSchG]
- Baugesetzbuch - BauGB [BauGB]
- Bundesnaturschutzgesetz - BNatSchG [BNatSchG]
- Raumordnungsgesetz - ROG [ROG]
- Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung - UVPG [UVPG]

Im Rahmen dieser Arbeit wird nur auf das Immissionsschutzrecht näher eingegangen. Hier werden u.a. die Veränderungen der Emissionsgrenzwerte bei der Mitverbrennung von Abfällen geregelt, die für den Schutz der Umwelt von Bedeutung sind.

Auf das KrW-/AbfG und abfallwirtschaftliche Fragestellungen, insbesondere die Abgrenzung von Verwertung und Beseitigung bei der Mitverbrennung, wird nicht eingegangen.

11.1 Bundesimmissionsschutzrecht

Im Mittelpunkt des Bundesimmissionsschutzrechts steht das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) [BImSchG], das u.a. Maßnahmen zur Luftreinhaltung in der Bundesrepublik Deutschland regelt. Dieses Gesetz wurde 1974 verabschiedet und ist seitdem mehrfach novelliert worden.

Grundsätzlich ist für Anlagen, die schädliche Umwelteinwirkungen verursachen können, nach § 4 Abs. 1 BImSchG eine Genehmigung erforderlich. Folglich gilt dies insbesondere für Anlagen zur Zementherstellung, für Kraftwerke und für Abfallverbrennungsanlagen. Eine genauere Definition der genehmigungsbedürftigen Anlagen enthält die "Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen (4. BImSchV)" [4. BImSchV]. Grenzwerte oder andere Vorgaben sind weder in der 4. BImSchV noch im BImSchG enthalten, sondern werden in weiteren Verordnungen und Verwaltungsvorschriften zum BImSchG geregelt. Im Fall der Mitverbrennung von Abfällen sind im Rahmen dieser Arbeit die beiden folgenden Rechtsvorschriften von Bedeutung:

- "Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft)" [TA Luft]
- "Verordnung über Verbrennungsanlagen für Abfälle und ähnliche Stoffe (17. BImSchV)" [17. BImSchV]

Die TA Luft ist eine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz, die in der aktuellen Fassung im Februar 1986 verabschiedet wurde. Sie erfaßt genehmigungsbedürftige Anlagen, für die es in den Verordnungen zum BImSchG keine Anforderungen gibt. Die TA Luft gilt u.a. für Anlagen zur Zementherstellung und auch für Kraftwerke mit einer Feuerungswärmeleistung von 1 bis 50 MW.

Im Vergleich zu anderen Verordnungen lässt die TA Luft relativ hohe Emissionswerte zu, denn in der Vergangenheit wurde eine Anpassung an den technischen Fortschritt in der Luftreinhaltung nicht durchgeführt. Allerdings fordert die TA Luft Maßnahmen nach dem Stand der Technik, so daß die Genehmigungsbehörden von den Vorgaben der TA Luft abweichen und teilweise verschärfte Emissionswerte fordern. Außerdem werden von anderen Gremien, wie dem Länderausschuß Immissionsschutz (LAI) oder der Umweltministerkonferenz, Richtlinien zur Umsetzung der TA Luft vorgegeben.

In der TA Luft gibt es im Abschnitt 3.3.2 "Steine und Erden" für den Betrieb von Zementöfen Emissionswerte für die Emissionen der Schwefeloxide und Stickoxide. Diese Daten sind in der Tabelle 6 zusammengestellt.

Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO ₂), angegeben als Stickstoffdioxid	a. Rostvorwärmer	1,5 g/m ³
	b. Zyklonvorwärmer mit Abgaswärmenutzung	1,3 g/m ³
	c. Zyklonvorwärmer ohne Abgaswärmenutzung	1,8 g/m ³
Schwefeldioxid (SO ₂) und Schwefeltrioxid (SO ₃), angegeben als Schwefeldioxid		0,40 g/m ³

Tabelle 6: Emissionswerte für Zementöfen nach TA Luft (Nm³, tr.)

Der Länderausschuß Immissionsschutz (LAI) hat für die Herstellung von Zement in neuen Anlagen einen Zielwert für Stickoxide, gemessen als NO₂, von 500 mg/Nm³ (tr) vorgegeben. Dieser Wert wird bereits bei neuen Anlagen gefordert [Rosemann]. Die Stickoxidemissionen für ältere Anlagen dürften heute in der Regel bei 800 mg/Nm³ (tr) festgelegt sein. Für SO₂ liegen den Autoren unterschiedliche Aussagen vor. Während seitens der Genehmigungsbehörden die 400 mg/Nm³ für SO₂ bestätigt werden, gibt es in der Literatur auch Hinweise auf niedrigere Werte [Rosemann]. Für Gesamtstaub werden nach den allgemeinen Anforderungen der TA Luft in Abschnitt 3.1.3 Emissionswerte von weniger als 50 mg/Nm³ gefordert.

Darüber hinaus gelten für Zementwerke weitere Vorgaben, die in den Abschnitten

- 2.3 Krebserzeugende Stoffe
- 3.1.4 Staubförmige anorganische Stoffe
- 3.1.6 Dampf- oder gasförmige anorganische Stoffe
- 3.1.7 Organische Stoffe

der TA Luft zusammengefaßt sind. Auf eine detaillierte Zusammenstellung aller Vorgaben wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet. Es soll nur darauf hingewiesen werden, daß es für einzelne organische Schadstoffe wie z. B. Benzol oder Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) Emissionswerte gibt. Diese werden in den Genehmigungsbescheiden für die Mitverbrennung berücksichtigt. Andererseits gibt es für Zementwerke zu dem Summenparameter der Kohlenwasserstoffe (Gesamt-C) Ausnahmeregelungen. Die TA Luft enthält für die in der Öffentlichkeit diskutierten PCDD und PCDF nur ein Minimierungsgebot, aber keinen Emissionswert.

Für Anlagen zur thermischen Behandlung von festen und flüssigen Abfällen sowie ähnlichen Stoffen existiert eine Verordnung zum BImSchG. In der "Verordnung über Verbrennungsanlagen für Abfälle und ähnliche brennbare Stoffe (17. BImSchV)" [17. BImSchV] werden seit 1990 die Anforderungen an die thermische Behandlung von Abfällen festgelegt.

Der Anwendungsbereich der 17. BImSchV wird in § 1 geregelt. Auch die Ausnahmen wie z.B. die Verbrennung von Stroh oder der Einsatz von flüssigen brennbaren Stoffen, die im Vergleich zu Heizöl EL keine anderen oder höheren Emissionen verursachen, sind hier aufgeführt.

Neben den in der Öffentlichkeit viel diskutierten Grenzwerten ist anzumerken, daß die 17. BImSchV in den Anlagenbetrieb direkt eingreift. Es werden u.a. bestimmte Temperaturen, Verweilzeiten im Feuerraum oder eine umfangreiche Emissionsüberwachung gefordert. Die folgende Tabelle 7 enthält ausgewählte Grenzwerte der 17. BImSchV.

Schadstoff	Einheit Bezug: (Nm ³ , tr.)	Tagesmittelwert
Org. Stoffe (Gesamt-C)	mg/m ³	10
Gesamtstaub	mg/m ³	10
SO ₂	mg/m ³	50
NO u. NO ₂ angegeben als NO ₂	mg/m ³	200
HCl	mg/m ³	10

Tabelle 7: Emissionsgrenzwerte nach 17. BImSchV

Eine kurze Gegenüberstellung der Grenzwerte in Tabelle 6 und Tabelle 7 ohne detaillierten Vergleich zeigt, daß die 17. BImSchV im Vergleich zu den Vorgaben der TA Luft sehr viel niedrigere Grenzwerte enthält. Außerdem gibt es in der 17. BImSchV einen Grenzwert von 0,1 ng/Nm³(tr) für PCDD und PCDF.

Im Fall der Mitverbrennung von Abfällen in Feuerungsanlagen und anderen industriellen Anlagen wie z. B. Zementwerke werden nach § 5 Absatz 3 der 17. BImSchV entsprechende Emissionsbegrenzungen festgelegt. Zu beachten sind die Ausnahmen, die in § 1 Absatz 3 der Verordnung aufgeführt sind. Für die Vorgehensweise zur Berechnung der Grenzwerte bei Abfallmitverbrennung sind zwei Fälle zu unterscheiden.

1. Fall: Die Abfälle liefern bis zu 25% der Feuerungswärmeleistung

Die Verordnung sieht zur Bestimmung der Emissionsbegrenzungen eine Mischungsrechnung vor. In Feuerungsanlagen wie auch anderen Anlagen (z. B. Zementwerke) müssen die Emissionsbegrenzungen nach der Mischungsregel anteilig aus den Vorgaben der TA Luft, 17. BImSchV und anderen Verordnungen des BImSchG ermittelt werden. In die Berechnung gehen die Rauchgasvolumina bei der Verbrennung der einzelnen Einsatzstoffe und die unterschiedlichen Bezugszustände (O₂-Gehalt) der Grenzwerte ein. Für Grenzwerte, die nur in der 17. BImSchV, aber in der TA Luft nicht als Emissionswerte aufgeführt sind, müssen entsprechende Betriebsdaten der spezifischen Anlage ohne Abfallmitverbrennung zugrunde gelegt werden.

Mit der Novellierung der 17. BImSchV im Februar 1999 ergibt sich bei der Mitverbrennung von Abfällen eine etwas geänderte Vorgehensweise. So werden jetzt nur noch die Anforderungen für die Bunkerausrüstung und einige Vorgaben zu den Verbrennungsbedingungen nicht angewandt. Für die Bestimmung der Emissionsbegrenzungen findet die Mischungsregel auch weiter Anwendung; zusätzlich wurde aber festgelegt, daß bei Mitverbrennung von Abfallstoffen mit einem Anteil unterhalb von 10% der Feuerungswärmeleistung für die Bestimmung der Emissionsbegrenzungen ein Anteil von 10% zu berücksichtigen ist.

2. Fall: Die Abfälle liefern mehr als 25% der Feuerungswärmeleistung

In diesem Falle ist bei Anlagen, die nicht in den Anhängen Nr. 1.2 bis 1.3 und 8.1 der 4. BImSchV enthalten sind, wie z. B. Zementwerke, auch die Mischungsregel anzuwenden. Durch die Novellierung der 17. BImSchV im Februar 1999 wurde der Einsatz besonders überwachungsbedürftiger Abfälle beschränkt: Bei einem Einsatz von mehr als 40 % dieser Abfälle gilt die 17. BImSchV uneingeschränkt.

Die hier nur kurz beschriebene Anwendung der TA Luft und der 17. BImSchV für die Festlegung der Genehmigungsaufgaben bei der Mitverbrennung in Zementwerken erscheint im Prinzip logisch. In der praktischen Durchführung ergeben sich sowohl für die Festlegung der Anwendung der 17. BImSchV als auch bei der Festlegung von Emissionsgrenzwerten Schwierigkeiten [Lübbe-W.].

Die neue Richtlinie 2000/76/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über die Verbrennung von Abfällen vom 4. Dezember 2000 hebt die geltenden Richtlinien für neue und bestehende Verbrennungsanlagen für Siedlungsmüll aus dem Jahre 1989 und über die Verbrennung gefährlicher Abfälle aus dem Jahre 1994 zum 28. Dezember 2005 auf. Bis dahin gelten Übergangsbestimmungen. Die Umsetzung in nationales Recht muß bis zum 28. Dezember 2002 erfolgen.

Die Richtlinie enthält im Anhang II.1 besondere Vorschriften für Zementöfen, in denen Abfälle verbrannt werden. Danach gelten nun für Zementöfen, die Abfälle mitverbrennen, spezifische Grenzwerte.

12 Überblick über Klinkerproduktionskapazitäten in Deutschland

Um Art und Menge von Sekundärbrennstoffen abschätzen zu können, die in Zementwerken eingesetzt werden bzw. aufgrund von Genehmigungsbescheiden eingesetzt werden dürfen, sollen zunächst die Daten aller klinkerproduzierenden Anlagen in Deutschland erfaßt werden. Hierzu gehören die Klinkerkapazität (t Klinker pro Tag), die Anzahl und der Typ der Öfen (Rostvorwärmerofen, Zyklonvorwärmerofen mit bzw. ohne Calcinator), sowie der genehmigte Einsatz von Sekundärbrennstoffen nach Art und Menge. Zusätzlich wurde versucht, auch Daten zur tatsächlichen Klinkerproduktion der einzelnen Anlagen sowie zu den in den einzelnen Anlagen tatsächlich eingesetzten Sekundärbrennstoffen (Art und Menge) zusammenzustellen. Aus Wettbewerbs- bzw. Geheimhaltungsgründen wurden hierzu jedoch - bis auf wenige Ausnahmen - keine Informationen zur Verfügung gestellt.

Die Befragung erfolgte in den Jahren 1999 und 2000. Die dargestellten Ergebnisse zur Klinkerproduktion geben den Stand von Ende 1998 wieder. Die Erhebung des Ofentyps wurde im wesentlichen für das Jahr 2000 durchgeführt. Insgesamt gesehen erwies sich die Datenbeschaffung als sehr schwierig und zeitaufwendig. Datenquellen bzw. Kontaktpartner waren dabei:

- Genehmigungs- und Aufsichtsbehördenbehörden;
- Anlagenbetreiber;
- Literaturquellen;

und zusätzlich Plausibilitätsbetrachtungen.

Während einzelne Anlagenbetreiber und Genehmigungsbehörden die von uns benötigten Daten problemlos zur Verfügung stellten, war in vielen Fällen umfangreicher Schriftverkehr, teilweise auch Anfragen um Auskunft nach dem Umweltinformationsgesetz bei den Genehmigungsbehörden erforderlich. Diese Auskünfte waren in einigen Fällen gebührenpflichtig. Viele Anlagenbetreiber verwiesen an den Verein Deutscher Zementwerke e.V., Forschungsinstitut der Zementindustrie, im folgenden VDZ genannt. Der VDZ mit Sitz in Düsseldorf ist die technisch wissenschaftliche Vereinigung der deutschen Zementindustrie. Dem VDZ gehören zur Zeit 34 deutsche Zementunternehmen mit 64 Zementwerken als ordentliche Mitglieder an. Da der VDZ an einer ähnlichen Zusammenstellung arbeitet, war er nicht bereit, uns vorab entsprechende Informationen zu einzelnen Werken zur Verfügung zu stellen. Inzwischen sind die Arbeiten des VDZ zum Einsatz von Sekundärbrennstoffen jedoch abgeschlossen und in einem Bericht veröffentlicht [VDZ Umweltdaten]. Dieser Bericht enthält jedoch nur Daten zum Gesamteinsatz von Sekundärbrennstoffen nach Art und Menge in Anlagen zur Klinkerproduktion in Deutschland. Detaillierte, anlagenbezogene Daten, dürften dem VDZ zwar zur Verfügung stehen, wurden uns aber aus Geheimhaltungsgründen nicht zur Verfügung gestellt.

Die folgende Tabelle 8 gibt einen Überblick über die von uns erfaßten Öfen (in einer Anlage an einem Standort können mehrere Öfen unterschiedlichen Typs und unterschiedlicher Kapazität betrieben werden) und stellt sie zum Vergleich den vom VDZ [VDZ Tätigkeitsbericht] veröffentlichten Daten gegenüber. Bezugsjahr ist das Jahr 1998. Enthalten sind in den von uns erfaßten Daten auch die Öfen der Anlage in Hardegsen mit 1500 t/d, die im Jahr 1999 stillgelegt wurde, von Büechl-Zement mit 1000 t/d (Ende 1998 stillgelegt) sowie ein Ofen mit 2500 t/d in Mainz-Amöneburg, der derzeit nicht betrieben wird, für den aber eine Genehmigung besteht.

Ofentyp	Anzahl		Kapazität (t/d)	
	VDZ *	ITAS**	VDZ*	ITAS**
Lepol	19	18	17700	18610
Zyklon mit Calcinator	11	13	113700	34800
Zyklon ohne Calcinator	35	32		71300
Schacht	8	10	1200	1200
Schwefelsäure-Zement	2	2***	280	312
Trocken	1	-	1050	-
Insgesamt	76	75	133930	126222

Tabelle 8: Anzahl und Kapazitäten von Anlagen zur Klinkerherstellung in Deutschland - Stand 1998 (die ITAS Angaben beruhen auf eigenen Erhebungen und Abschätzungen) *:Quelle: [VDZ Tätigkeitsbericht]; **Befragung 1999/2000; *** derzeit stillgelegt

Bei den in Tabelle 8 dargestellten Daten sowie bei den in den folgenden Abschnitten wiedergegebenen Informationen ist zu berücksichtigen, daß diese teilweise auf telefonischen Auskünften beruhen und in vielen Fällen keine Möglichkeit bestand, diese Informationen auf Vollständigkeit (Erfassung aller Anlagen) und auf Korrektheit zu überprüfen. Aus diesem Grund dürfen alle in den folgenden Tabellen enthaltenen Angaben nicht als eine vollständige und gesicherte Datenbasis betrachtet werden. Da die Summenwerte jedoch relativ gut mit den Angaben des VDZ [VDZ Tätigkeitsbericht] übereinstimmen, gehen wir davon aus, daß unsere Erhebung und Auswertung die realen Verhältnisse gut widerspiegelt.

Für alle von uns erfaßten 76 Öfen liegen folgende Informationen vor:

- Klinkerkapazität (t Klinker pro Tag)
- Ofentyp
- Genehmigte Sekundärbrennstoffe nach Art und Menge

Da uns diese Informationen teilweise vertraulich mitgeteilt wurden, können diese Daten hier nicht detailliert dargestellt werden.

Die Anzahl der Öfen insgesamt sowie die Anzahl der Öfen mit Zyklonvorwärmern stimmen nahezu überein. Unterschiede in der gesamten Klinkerkapazität dürften u.a. darauf beruhen, daß vom VDZ alle Anlagen erfaßt wurden, für die Ende 1998 eine Genehmigung bestand, unabhängig davon, ob der Ofen in Betrieb war oder nicht. Im Gegensatz dazu wurden von uns nur die Anlagen aufgenommen, die tatsächlich in Betrieb sind (mit Ausnahme von Mainz-Amöneburg). Insgesamt ergibt sich nach unseren Recherchen eine gesamte Klinkerkapazität von ca. 126000 t/d im Vergleich zu ca. 134000 t/d nach Angaben des VDZ.

Die Aufteilung der Öfen und der zugehörigen Kapazitäten auf die einzelnen Bundesländer zeigt die Tabelle 9. Aus Geheimhaltungsgründen konnte auch hier das Zahlenmaterial nicht detailliert aufgeführt werden. So wurden beispielsweise die in den Bundesländern Sachsen-Anhalt, Thüringen und Brandenburg betriebenen Öfen unter "Neue Bundesländer" zusammengefaßt.

	Öfen	
	Anzahl	Kapazität (t/d)
Schleswig-Holstein und Niedersachsen	4	11800
Nordrhein-Westfalen *	30	32350
Hessen	5	8750
Rheinland-Pfalz	5	8300
Baden-Württemberg	10	18610
Bayern	10	20950
Neue Bundesländer	11	25462
Insgesamt	75	126222

Tabelle 9: Anzahl und Kapazitäten von Anlagen zur Klinkerherstellung in Deutschland (Stand 1998) aufgeschlüsselt nach einzelnen Bundesländern (die Angaben beruhen auf eigenen Erhebungen und Abschätzungen)
* einschließlich 10 Schachtöfen

Die höchsten Kapazitäten liegen in Nordrhein-Westfalen (26%), gefolgt von Bayern mit 17% und Baden-Württemberg mit 15%. Insgesamt liegen in diesen 3 Bundesländern damit ca. 57% der gesamten Klinkerkapazität Deutschlands.

Abbildung 17 zeigt die Standorte der klinkerproduzierenden Anlagen in Deutschland.



Abbildung 17: Standorte der klinkerproduzierenden Anlagen in Deutschland 1998

12.1 Einsatz von Sekundärbrennstoffen in Anlagen zur Klinkerherstellung

Wie bereits erwähnt, liegen uns nur wenige Informationen über den *tatsächlichen* Einsatz von Sekundärbrennstoffen in einzelnen Anlagen vor. Daher mußten von uns Angaben zum *genehmigten* Sekundärbrennstoffeinsatz in einzelnen Anlagen ausgewertet werden. Diese Daten stammen einerseits aus Genehmigungsbescheiden, aber auch aus Befragungen und weiteren Veröffentlichungen [LFU], [Landtag Baden-Württ. 1997, 1998], [Striegel, K.-H.; Emig, M.], [Genehmigungsbescheide]. Der gesamte Einsatz von Sekundärbrennstoffen in Deutschland für das Jahr 1998 nach Art und Menge kann jedoch dem Umweltbericht des VDZ [VDZ Umweltbericht] entnommen werden (s. Tabelle 10).

Sekundärbrennstoff	Einsatzmenge	Heizwert	Einsatz
	1000 t/a	MJ/kg	Mio GJ/a
Reifen/Gummi	229	26	5.95
Altöl	168	34	5.71
Fraktionen aus Industrie- /Gewerbeabfällen	176	22	3.87
Altholz	76	14	1.06
Lösungsmittel	18	22	0.40
Teppichabfälle	18	19	0.34
Bleicherde	13	14	0.18
Sonstiges	84	12	1.01
Sekundärbrennstoffe 1998			18.53
Fossile Brennstoffe 1998			81.90
Insgesamt 1998			100.43

Tabelle 10: Einsatz von Sekundärbrennstoffen in Anlagen zur Klinkerherstellung in Deutschland für das Jahr 1998 (Quelle: [VDZ Umweltbericht])

Danach hatten - bezogen auf die Energie - Altreifen/Gummi mit 32% den höchsten Anteil, gefolgt von Altöl (31%) und von Fraktionen aus Industrie- und Gewerbeabfällen, häufig auch als Brennstoffe aus produktionsspezifischen Gewerbeabfällen (BPG) bezeichnet, mit 21%. Inzwischen liegen auch für 1999 Daten vor [Oerter]. Danach stieg der Anteil an Sekundärbrennstoffen am gesamten Brennstoffeinsatz (bezogen auf die Energie) von 18,6% im Jahre 1998 auf 23% im Jahre 1999.

Tabelle 11 zeigt, aufgeschlüsselt nach einzelnen Bundesländern, die Klinkerkapazitäten aller Anlagen und im Vergleich dazu die Klinkerkapazitäten der Anlagen, in denen der Einsatz von Sekundärbrennstoffen genehmigt ist. Wie bereits erwähnt, mußten aus Geheimhaltungsgründen teilweise mehrere Bundesländer zusammengefaßt werden. Insgesamt werden in 26 Öfen zuzüglich 10 Schachtöfen keine Sekundärbrennstoffe eingesetzt, d.h. in 40 Öfen ist der Einsatz von Sekundärbrennstoffen genehmigt. Die Klinkerkapazität der Anlagen mit Sekundärbrennstoffeinsatz beträgt ca. 94000 t/d, dies entspricht ca. 75% der von uns erfaßten Klinkerkapazität.

	Klinkerkapazität	
	alle Anlagen	nur Anlagen, die Sekundärbrennstoffe einsetzen dürfen
	t/d	t/d
Schleswig-Holstein und Niedersachsen	11800	7800
Nordrhein-Westfalen	32350	18900
Hessen	8750	3250
Rheinland-Pfalz	8300	5800
Baden-Württemberg	18610	17310
Bayern	20950	18750
Neue Bundesländer	25462	22462
Insgesamt	126222	94272

Tabelle 11: Klinkerkapazitäten in einzelnen Bundesländern insgesamt und mit Genehmigung für den Einsatz von Sekundärbrennstoffen (die Angaben beruhen auf eigenen Erhebungen und Abschätzungen)

Geht man nun, entsprechend den Angaben des VDZ [VDZ Tätigkeitsbericht], davon aus, daß die Verfügbarkeit der Anlagen im Mittel bei 320 Tagen im Jahr liegt und deren Auslastung im Jahr 1998 im Mittel 64% betrug, so kommt man auf eine mittlere Betriebsdauer der Anlagen von 205 Tagen im Jahr. Da uns für einzelne Anlagen keine spezifischen Angaben vorlagen, wurde unter Zuhilfenahme der oben angeführten mittleren Betriebsdauer von 205 Tagen im Jahr die mittlere Klinkerproduktion der einzelnen Anlagen berechnet. Multipliziert mit 3600 MJ/t Klinker Brennstoffenergiebedarf erhält man dann den mittleren Brennstoffenergiebedarf der einzelnen Anlagen. Unter diesen Annahmen ergibt sich für 1998 eine gesamte Klinkerproduktion von ca. 26 Mio t im Vergleich zu 27,5 Mio t nach Angaben des VDZ.

Aus den genehmigten Einsatzmengen von Sekundärbrennstoffen läßt sich dann wiederum für jede Anlage der maximal mögliche Einsatz von Sekundärbrennstoffen abschätzen. Diese Abschätzung wurde durchgeführt für:

- Alle genehmigten Sekundärbrennstoffe zusammen
- Altreifen
- Altöl
- BPG
- Altholz

Der Anteil der Altreifen an der gesamten Feuerungswärmeleistung, der genehmigt ist, liegt in vielen Fällen deutlich über 20%. Aus technischen Gründen ist der Altreifeneinsatz jedoch im allgemeinen auf 20% der Feuerungswärmeleistung begrenzt [pers. Mitteilung]. Aus diesem Grund wird im folgenden mit einem maximalen Altreifeneinsatz von 20% der Feuerungswärmeleistung gerechnet.

12.2 Anlagen, in denen der Einsatz von Sekundärbrennstoffen genehmigt ist

Einen Überblick über den genehmigten Einsatz von Sekundärbrennstoffen, aufgeschlüsselt nach einzelnen Bundesländern, gibt Tabelle 12. Dabei wurde nicht nach der Art des genehmigten Sekundärbrennstoffs differenziert; vielmehr wurde von der maximal genehmigten Menge an Sekundärbrennstoffen ausgegangen (Ausnahme: Altreifen maximal 20%).

Wie bereits einleitend erwähnt, beruhen alle folgenden Zahlenangaben zum genehmigten Sekundärbrennstoffeinsatz auf Auswertungen der uns zur Verfügung gestellten Informationen. Da in manchen Fällen keine detaillierte Überprüfung der Informationen möglich war (z.B. bei telefonischen Auskünften) und auch nicht überprüft werden konnte, ob alle aktuellen Informationen (aktueller Stand der Genehmigungsbescheide, Erfassung aller Anlagen, die eine Genehmigung für den Einsatz von Sekundärbrennstoffen besitzen) berücksichtigt wurden, dürfen die folgenden Angaben nur als Orientierungswerte betrachtet werden. Wir gehen aber davon aus, daß die Abweichungen von den tatsächlichen Werten nicht allzu groß sind. In den folgenden Tabellen sind die aufgrund der Annahmen berechneten Werte angegeben.

In Anlagen, in denen der Einsatz von Sekundärbrennstoffen genehmigt ist, kann maximal ca. 45% des Energiebedarfs durch diese Sekundärbrennstoffe gedeckt werden. Betrachtet man alle Anlagen zusammen, also berücksichtigt auch die Anlagen, die bisher keine Genehmigung für den Einsatz von Sekundärbrennstoffen haben, so kann durch die genehmigten Mengen ca. 34% des gesamten Energiebedarfs durch den Einsatz von Sekundärbrennstoffen gedeckt werden. Nach Angaben des VDZ werden 18,5 Mio GJ an Sekundärbrennstoffen eingesetzt. Dies entspricht nach unseren Abschätzungen einer ca. 27%-igen Deckung des Energiebedarfs durch Sekundärbrennstoffe, d.h. die Genehmigungen werden zu ca. 60% ausgeschöpft. Der Energiebedarf aller Anlagen wird zu ca. 19% durch Sekundärbrennstoffe gedeckt.

Alle Sekundärbrennstoffe					
	Klinkerkapazität		Energiebedarf, der durch Sekundärbrennstoffe gedeckt werden kann	Anteil am gesamten Energiebedarf	
	alle Anlagen	nur Anlagen, die Sekundärbrennstoffe einsetzen dürfen		nur Anlagen, die Sekundärbrennstoffe einsetzen dürfen	alle Anlagen
	t/d	t/d	Mio. GJ/a	%	%
Schleswig-Holstein und Niedersachsen	11800	7800	2.2	38	25
Nordrhein-Westfalen	32350	18900	6.8	49	28
Hessen	8750	3250	0.5	20	7
Rheinland-Pfalz	8300	5800	2.1	50	35
Baden-Württemberg	18610	17310	4.6	36	34
Bayern	20950	18750	7.2	52	47
Neue Bundesländer	25462	22462	8.0	48	43
Insgesamt	126222	94272	31.5	45	34
Tatsächlich eingesetzt			18.5*	27	18

Tabelle 12: Einsatz von Sekundärbrennstoffen (genehmigt und bezogen auf mittlere Auslastung von 205 Tagen im Jahr) in Deutschland (die Angaben beruhen auf eigenen Erhebungen und Abschätzungen)
*:Quelle: [VDZ Umweltbericht]

12.3 Anlagen, in denen der Einsatz von Altreifen/Gummi genehmigt ist

Einen Überblick über den genehmigten Einsatz von Altreifen/Gummi, aufgeschlüsselt nach einzelnen Bundesländern, gibt Tabelle 13. Wie weiter oben bereits erwähnt, wurde dabei der maximal mögliche Einsatz auf 20% der Feuerungswärmeleistung begrenzt, auch wenn höhere Werte genehmigt sind.

Altreifen/Gummi					
	Klinkerkapazität		Energiebedarf, der durch Altreifen/Gummi gedeckt werden kann	Anteil am gesamten Energiebedarf	
	alle Anlagen	nur Anlagen, die Altreifen/ Gummi einsetzen dürfen		nur Anlagen, die Altreifen/ Gummi einsetzen dürfen	alle Anlagen
	t/d	t/d	Mio. GJ/a	%	%
Schleswig-Holstein und Niedersachsen	11800	7800	1.2	20	13
Nordrhein-Westfalen	32350	9900	1.3	18	6
Hessen	8750	3250	0.5	20	7
Rheinland-Pfalz	8300	3200	0.5	20	8
Baden-Württemberg	18610	12710	1.7	18	12
Bayern	20950	18750	2.1	15	14
Neue Bundesländer	25462	16500	2.0	16	11
Insgesamt	126222	72110	9.2	17	10
Tatsächlich eingesetzt			6.0*	11	6

Tabelle 13: Einsatz von Altreifen/Gummi (genehmigt und bezogen auf mittlere Auslastung von 205 Tagen im Jahr) in Deutschland (die Angaben beruhen auf eigenen Erhebungen und Abschätzungen) *: Quelle: [VDZ Umweltbericht]

Die Gesamtkapazität der 29 Öfen bzw. 22 Anlagen, in denen Altreifen/Gummi eingesetzt werden darf, beträgt ca. 72000 t Klinker pro Tag (57% der Gesamtkapazität). In diesen Anlagen kann maximal 17% des Energiebedarfs durch diese Sekundärbrennstoffe gedeckt werden. Betrachtet man die Gesamtheit aller Anlagen, so könnte durch die genehmigten Mengen ca. 10% des Energiebedarfs durch den Einsatz von Altreifen/Gummi gedeckt werden. Nach Angaben des VDZ werden 6 Mio GJ an Altreifen/Gummi eingesetzt. Damit werden nach unseren Abschätzungen ca. 11% des Energiebedarfs durch Altreifen gedeckt, d.h. die Genehmigungen werden zu ca. 65% ausgeschöpft. Der Energiebedarf aller Anlagen wird zu ca. 6% durch Altreifen gedeckt.

Für einige Anlagen liegen uns Informationen über den Einsatz von Altreifen/Gummi vor. Danach wurden 171.000 t Altreifen/Gummi eingesetzt. Nach Angaben des VDZ wurden 1998 ca. 229.000 t Altreifen eingesetzt.

12.4 Anlagen, in denen der Einsatz von Brennstoffen aus produktionsspezifischen Gewerbeabfällen (BPG) genehmigt ist

Zu Brennstoffen aus produktionsspezifischen Gewerbeabfällen (BPG) zählen heizwertreiche Fraktionen aus Industrie- und Gewerbeabfällen wie beispielsweise Kunststoffe, Papier, Textilien, Teppichabfälle etc.. Je nach Zusammensetzung kann der Heizwert unterschiedlich hoch sein. Im Mittel wird von 22 MJ/kg ausgegangen [VDZ Umweltbericht]. Einen Überblick über den genehmigten Einsatz von BPG, aufgeschlüsselt nach einzelnen Bundesländern, gibt Tabelle 14. Dabei wurden sowohl die Genehmigungen berücksichtigt, bei denen BPG explizit erwähnt ist, als auch die, in denen Werte für Fraktionen aus Kunststoffen, Papier, Textilien, Teppichabfällen etc. genannt sind.

BPG					
	Klinkerkapazität		Energiebedarf, der durch BPG gedeckt werden kann	Anteil am gesamten Energiebedarf	
	alle Anlagen	nur Anlagen, die BPG einsetzen dürfen		nur Anlagen, die BPG einsetzen dürfen	alle Anlagen
	t/d	t/d	Mio. GJ/a	%	%
Schleswig-Holstein und Niedersachsen	11800	0	0.0		
Nordrhein-Westfalen	32350	12200	3.0	33	13
Hessen	8750	0	0.0		
Rheinland-Pfalz	8300	2600	0.6	30	9
Baden-Württemberg	18610	7700	2.4	42	17
Bayern	20950	11750	3.6	41	23
Neue Bundesländer	25462	16500	4.0	33	21
Insgesamt	126222	50750	13.5	36	15
Tatsächlich eingesetzt			4.2*	11	4

Tabelle 14: Einsatz von BPG (genehmigt und bezogen auf mittlere Auslastung von 205 Tagen im Jahr) in Deutschland (die Angaben beruhen auf eigenen Erhebungen und Abschätzungen) *: Quelle: [VDZ Umweltbericht]

Der Einsatz von BPG ist in 16 Anlagen bzw. 19 Öfen mit einer Gesamtkapazität von ca. 51000 t Klinker pro Tag (40% der von uns erfaßten Gesamtkapazität) genehmigt. In diesen Anlagen kann maximal ca. 36% des Energiebedarfs durch BPG gedeckt werden. Betrachtet man alle Anlagen zusammen, also auch die Anlagen, die bisher keine Genehmigung für den Einsatz von BPG haben, so könnte durch die genehmigten Mengen ca. 15% des Energiebe-

darfs durch den Einsatz von BPG gedeckt werden. Nach Angaben des VDZ werden 4,21 Mio GJ an Fraktionen aus Industrie- und Gewerbeabfällen sowie Teppichabfällen (BPG) eingesetzt. Damit werden nach unseren Abschätzungen in diesen Anlagen ca. 11% des Energiebedarfs durch BPG gedeckt, d.h. die Genehmigungen werden zu ca. 31% ausgeschöpft. Der Energiebedarf aller Anlagen wird zu ca. 4% durch BPG gedeckt.

Für einige Anlagen liegen uns Informationen über den Einsatz von BPG vor. Danach wurden ca. 51000 t BPG eingesetzt. Nach Angaben des VDZ wurden 1998 ca. 194.000 t BPG einschließlich Teppichresten eingesetzt, d.h. nur ein geringer Anteil wurde von uns erfaßt.

12.5 Anlagen, in denen der Einsatz von Altöl genehmigt ist

Einen Überblick über den genehmigten Einsatz von Altöl, aufgeschlüsselt nach einzelnen Bundesländern, gibt Tabelle 15.

Altöl					
	Klinkerkapazität		Energiebedarf, der durch Altöl gedeckt werden kann	Anteil am gesamten Energiebedarf	
	alle Anlagen	nur Anlagen, die Altöl einsetzen dürfen		nur Anlagen, die Altöl einsetzen dürfen	alle Anlagen
	t/d	t/d	Mio. GJ/a	%	%
Schleswig-Holstein und Niedersachsen	11800	4800	1.8	50	20
Nordrhein-Westfalen	32350	1700	0.8	60	3
Hessen	8750	0	0.0		
Rheinland-Pfalz	8300	3200	1.2	50	19
Baden-Württemberg	18610	2500	0.9	50	7
Bayern	20950	8150	2.6	43	17
Neue Bundesländer	25462	5962	2.3	53	12
Insgesamt	126222	26312	9.5	49	10
Tatsächlich eingesetzt			5.7*	29	6

Tabelle 15: Einsatz von Altöl (genehmigt und bezogen auf mittlere Auslastung von 205 Tagen im Jahr) in Deutschland (die Angaben beruhen auf eigenen Erhebungen und Abschätzungen) *: Quelle: [VDZ Umweltbericht]

In 14 Öfen bzw. 9 Anlagen darf Altöl eingesetzt werden. Die Gesamtkapazität dieser Anlagen beträgt ca. 26000 t Klinker pro Tag. Bei einer von uns erfaßten Gesamtkapazität von ca. 126000 t/d darf damit in ca. 21% der Gesamtkapazität Altöl eingesetzt werden.

In Anlagen, in denen der Einsatz von Altöl genehmigt ist, kann maximal ca. 49% des Energiebedarfs durch diese Sekundärbrennstoffe gedeckt werden. Betrachtet man alle Anlagen zusammen, also berücksichtigt auch die Anlagen, die bisher keine Genehmigung für den Einsatz von Altöl haben, so könnte durch die genehmigten Mengen Altöl ca. 10% des Energiebedarfs gedeckt werden. Tatsächlich werden nach Angaben des VDZ 5,71 Mio GJ an Altöl eingesetzt. Damit werden nach unseren Abschätzungen ca. 29% des Energiebedarfs durch Altöl gedeckt, d.h. die Genehmigungen werden zu ca. 60% ausgeschöpft. Der Energiebedarf aller Anlagen wird zu ca. 6% durch Altöl gedeckt.

Für einige Anlagen liegen uns Informationen über den Einsatz von Altöl vor. Danach wurden ca. 106000 t Altöl eingesetzt. Nach Angaben des VDZ wurden 1998 ca. 168.000 t Altöl eingesetzt.

12.6 Anlagen, in denen der Einsatz von Altholz genehmigt ist

Einen Überblick über den genehmigten Einsatz von Altholz, aufgeschlüsselt nach einzelnen Bundesländern, gibt Tabelle 16.

In sechs Anlagen mit sieben Öfen darf Altholz eingesetzt werden. Durch die genehmigten Mengen kann maximal 30% des Energiebedarfs dieser Öfen, die zusammen eine Kapazität von 24000 t Klinker pro Tag besitzen, gedeckt werden. Die genehmigten Mengen an Altholzeinsatz könnten maximal 6% des Energiebedarfs aller Anlagen abdecken. Nach Angaben des VDZ werden 1,1 Mio GJ an Altholz eingesetzt. Damit werden nach unseren Abschätzungen ca. 6% des Energiebedarfs der Anlagen, die eine Genehmigung für den Einsatz von Altholz besitzen, durch diesen Brennstoff gedeckt, d.h. die Genehmigungen werden zu ca. 21% ausgeschöpft. Der Energiebedarf aller Anlagen wird zu ca. 1% durch Altholz gedeckt.

Für einige Anlagen liegen uns Informationen über den Einsatz von Altholz vor (unterschiedliche Bezugsjahre). Danach wurden ca. 33000 t Altholz eingesetzt. Nach Angaben des VDZ wurden 1998 ca. 76.000 t Altholz eingesetzt.

Altholz					
	Klinkerkapazität		Energiebedarf, der durch Altholz gedeckt werden kann	Anteil am gesamten Energiebedarf	
	alle Anlagen	nur Anlagen, die Altholz einsetzen dürfen		nur Anlagen, die Altholz einsetzen dürfen	alle Anlagen
	t/d	t/d	Mio. GJ/a	%	%
Schleswig-Holstein und Niedersachsen	11800	0	0.0		
Nordrhein-Westfalen	32350	3500	0.7	26	3
Hessen	8750	0	0.0		
Rheinland-Pfalz	8300	0	0.0		
Baden-Württemberg	18610	3400	1.0	40	7
Bayern	20950	10600	2.3	30	15
Neue Bundesländer	25462	6000	1.1	25	6
Insgesamt	126222	23500	5.1	30	6
Tatsächlich eingesetzt			1.1*	6	1

Tabelle 16: Einsatz von Altholz (genehmigt und bezogen auf mittlere Auslastung von 205 Tagen im Jahr) in Deutschland (die Angaben beruhen auf eigenen Erhebungen und Abschätzungen) *: Quelle: [VDZ Umweltbericht]

13 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Studie gibt einen Überblick über den Einsatz von Sekundärbrennstoffen in der deutschen Zementindustrie. Hierzu werden zunächst die einzelnen Prozeßschritte und die verschiedenen Verfahren zur Herstellung von Zementklinker beschrieben. Allen Verfahren gemeinsam ist, daß zuerst das kalk- und tonhaltige Brenngut getrocknet, dann der Bestandteil Calciumcarbonat entsäuert (calciniert) und schließlich zum Klinker bei Temperaturen bis zu 1450 °C in Drehrohröfen gesintert wird. Die Ofengase verbleiben 5 - 10 s im Drehrohröfen, wobei die Verweilzeit für den Temperaturbereich über 1200 °C 3 - 4 s beträgt.

Abhängig von der Feuchte der Ausgangsmaterialien werden unterschiedliche Verfahren zur Rohmaterialaufbereitung eingesetzt. Das bedeutendste Verfahren ist das Trockenverfahren, bei dem ein trockenes Rohmehl hergestellt wird, das in Drehrohröfen mit mehrstufigen Zyklonvorwärmern eingesetzt wird. Hierbei gehören Zyklonvorwärmeröfen, die neben einer Primärfeuerung auch mit einer Sekundärfeuerung mit gesondertem Verbrennungsraum (Calcinator) ausgestattet sind, zu den modernsten Anlagen. Von den 45 Zyklonvorwärmeröfen in Deutschland sind 13 Anlagen mit Calcinatoren ausgestattet. Sekundärbrennstoffe können abhängig von ihren spezifischen Eigenschaften in der Primärfeuerung als auch in der Sekundärfeuerung eingesetzt werden. Daneben kommen auch halbtrockene und halbnasse Verfahren zum Einsatz. Im Mittel beträgt der spezifische thermische Energiebedarf zur Herstellung von Zementklinker ca. 3,6 GJ/t Zementklinker.

Es existieren verschiedene Betriebsweisen der Anlagen. Die Prozesse Trocknen, Mahlen und Brennen sind miteinander verknüpft. Das Abgas aus dem Drehrohröfen kann zur Trocknung (Verbundbetrieb) oder vom Vorwärmer direkt zum Filter (Direktbetrieb) geführt werden. Diese Betriebsführung kann die Zusammensetzung der Filterstäube, insbesondere bezogen auf die Spurenelemente, beeinflussen. In manchen Fällen treten aufgrund von Anreicherungen bestimmte Nebenbestandteile wie z. B. Alkaliverbindungen oder Chloride, in unerwünschten Konzentrationen im Ofenmehl auf, was sich negativ auf den Anlagenbetrieb auswirken kann. Mit Hilfe eines geeigneten Bypasses können die Anreicherungen verringert werden.

Zusätzlich zu den Verfahrensbeschreibungen wurden die in Deutschland betriebenen Anlagen zur Klinkerproduktion mit den zugehörigen Produktionskapazitäten und der Art des Ofens zusammengestellt. Aus Geheimhaltungsgründen wurden jedoch nur aggregierte Werte dargestellt. Des weiteren wurden die Sekundärbrennstoffe, die in deutschen Zementwerken entsprechend vorliegender Genehmigungen eingesetzt werden können, nach Art und Menge erfaßt und mit tatsächlich eingesetzten Mengen verglichen. Diese Abschätzung geschah unter der Annahme, daß die Auslastung der einzelnen Anlagen der mittleren Auslastung aller Anlagen (205 Tage im Jahr) und daß der Energiebedarf der einzelnen Anlagen dem mittleren Energiebedarf von 3600 MJ/t Klinker entspricht. Alle Abschätzungen über die Klinkerkapa-

zitäten der einzelnen Anlagen beruhen auf den von uns durchgeführten Erhebungen und Befragungen.

Tabelle 17 zeigt eine zusammenfassende Darstellung des maximal genehmigten und des tatsächlichen Einsatzes von Sekundärbrennstoffen, dargestellt als prozentualer Anteil am gesamten Brennstoffeinsatz.

	Energiebedarf, der durch Sekundärbrennstoffe gedeckt werden kann		Energiebedarf, der durch Sekundärbrennstoffe gedeckt wird*		Ausschöpfung der Genehmigung
	nur Anlagen, die Genehmigung besitzen	alle Anlagen	nur Anlagen, die Genehmigung besitzen	alle Anlagen	
	Angaben in Prozent				
alle Sekundärbrennstoffe	45	34	27	19	60
Altreifen	17	10	11	6	65
BPG	36	15	11	4	31
Altöl	49	10	29	6	60
Altholz	30	6	6	1	21

Tabelle 17: Zusammenfassende Darstellung des maximal genehmigten und des tatsächlichen Einsatzes von Sekundärbrennstoffen, dargestellt als prozentualer Anteil am gesamten Brennstoffeinsatz (die Angaben beruhen auf eigenen Erhebungen und Abschätzungen)

*: unter Berücksichtigung der vom VDZ angegebenen Einsatzmengen von Sekundärbrennstoffen

Dabei ist zu berücksichtigen, daß die Werte für die einzeln aufgeführten Sekundärbrennstoffe (Altreifen/Gummi, BPG, Altöl und Altholz) nicht aufaddiert werden dürfen, da in den meisten Fällen für den gesamten Sekundärbrennstoffeinsatz eine Obergrenze festgelegt ist (z.B. maximal 50% der FWL), der Energiebedarf aber beispielsweise zu maximal 50% durch Altöl oder aber auch alternativ zu 50% durch BPG gedeckt werden kann. Wie die Tabelle zeigt, könnten bei optimaler Ausnutzung der Genehmigungen deutlich höhere Mengen an Sekundärbrennstoffen eingesetzt werden. Bei Altöl und Altreifen werden beispielsweise 60% bzw. 65% der genehmigten Werte ausgeschöpft, bei BPG sind dies lediglich ca. 30% und bei Altholz ca. 20% (Bezugsjahr 1998). Im Jahre 1999 ist der Anteil der Sekundärbrennstoffe am Gesamtbrennstoffeinsatz deutlich gestiegen. Damit hat auch die Ausschöpfung der Genehmigungswerte deutlich zugenommen. Betrachtet man alle Sekundärbrennstoffe zusammen, so könnten 45% des Energiebedarfs der Anlagen, die eine Genehmigung besitzen, durch Sekundärbrennstoffe gedeckt werden.

Durch den Einsatz von Abfällen beim Zementherstellungsprozeß gelangen die in den Abfällen enthaltenen Schwermetalle in den Klinker. Nach dem Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz besteht die Grundpflicht, daß die Verwertung von Abfällen, insbesondere durch ihre Einbindung in Erzeugnisse, ordnungsgemäß und schadlos zu erfolgen hat. In einem neuen, vom Umweltbundesamt mitfinanzierten Vorhaben, soll in den kommenden zwei Jahren schwerpunktmäßig diese Fragestellung untersucht werden.

14 Quellenverzeichnis

- [AbfKlärV] Klärschlammverordnung. April 1992.
- [BauGB] Baugesetzbuch (BauGB). Stand: August 1997.
- [BBodSchG] Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten. (Bundes-Bodenschutzgesetz). Stand: März 1998.
- [BDZ] Statistiken des Bundesverbandes der Zementindustrie, veröffentlicht im Internet
- [BImSchG] Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG). Stand: Oktober 1996.
- [4. BImSchV] Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes. (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen). Stand: März 1997.
- [17. BImSchV] Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes. (Verordnung über Verbrennungsanlagen für Abfälle und ähnliche brennbare Stoffe). November 1990, umfangreiche Änderungen im Februar 1999.
- [BNatSchG] Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege (Bundesnaturschutzgesetz - BNatSchG). Stand: September 1998.
- [BUWAL 1997] Abfallentsorgung in Zementwerken - Thesenpapier, Umwelt-Materialien Nr. 70, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern, 1997
- [CEMBUREAU 1997] Alternative Fuels in Cement Manufacture - Technical and Environmental Review, Verbandschrift D/1997/5457/April, April 1997, CEMBUREAU The European Cement Association, Brüssel.
- [CEMBUREAU BAT] Best Available Techniques For The Cement Industry, Verbandschrift D/1999/5457/December, Dezember 1999, CEMBUREAU The European Cement Association, Brüssel
- [Dürkop] Dürkop, J.: "EU-Richtlinie über die Verbrennung von Abfällen", 5. Fachtagung "Thermische Abfallbehandlung", 9.-11. Oktober 2000, Kassel, Universität Gh Kassel, S. 26-40
- [Genehmigungsbescheide] Genehmigungsbescheide der Behörden/Landratsämter/Bezirksregierung zu einzelnen Zementwerken

- [Gerhardt] Gerhardt, T.: "Thermische Behandlung von kommunalen Klärschlämmen in Kohlenstaubfeuerungen". VGB Technisch-wissenschaftliche Berichte. TW-217. 1999.
- [Handbook] Handbook of Chemistry and Physics, 64th Edition, 1984, CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida.
- [Härig] Härig, S.; Günther, K.; Klausen, D.: "Technologie der Baustoffe"; C.F. Müller Verlag Heidelberg, 13. Auflage 1996.
- ["HCB Siggenthal"] "HCB Siggenthal, Firmenschrift des Zementwerkes "HCB Siggenthal, Schweiz
- [Hoenig] Hoenig, V.: "Einsatz von Sekundärstoffen in Drehofenanlagen der Zementindustrie", 11. DVV-Kolloquium, Stoffliche und thermische Verwertung von Abfällen in industriellen Hochtemperaturprozessen, TU Braunschweig, September, 1998; S. 47-68.
- [Hoffmann] Hoffmann, V.: "Mitverbrennen von Klärschlamm und anderen Abfällen in Kraftwerken". Kreislaufwirtschaft und Abfallverwertung in thermischen Prozessen. Tagungsband des 9. Aachener Kolloquiums Abfallwirtschaft. Dezember 1996. Hrsg.: Prof. M. Dohmann, Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen.
- [Kirchartz 1993] Kirchartz, B: "Abscheidung von Spurenelementen beim Klinkerbrennprozeß", VDZ Kongress 1993, Verfahrenstechnik der Zementherstellung, 1993, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin, S. 570-573.
- [Kirchartz 1994] Kirchartz, B: "Reaktionen und Abscheidung von Spurenelementen beim Brennen des Zementklinkers", Schriftreihe der Zementindustrie, Heft 56, 1994, Beton-Verlag, Düsseldorf.
- [Korf] Korf, P.: "Umweltschutz beim Einsatz von Sekundärroh- und Sekundärbrennstoffen in Zementwerken aus der Sicht des Betreibers", Technische Mitteilungen, 92, 1999, Heft 2, S. 83-93.
- [KrW-/AbfG] Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen. (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz - KrW-/AbfG). Stand: September 1994.
- [Landtag Baden-Württ.1997] Müllverbrennung/-verwertung in Zementfabriken, Ziegeleien und sonstigen Anlagen; Drucksache 12/1787 vom 17.7.1997
- [Landtag Baden-Württ.1998] Verbrennung von Abfällen in den Zementwerken Allendingen und Schelklingen; Drucksache 12/3060 vom 10.7.1998

- [LFU] Regelwerke und beste verfügbare Techniken zur Luftreinhaltung sowie Einsatz von Abfällen in der Zementindustrie; Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg; Karlsruhe 1999
- [Lillack] Lillack, H.; Frantz, W.; Hartung, M.: "Emissionsgrenzwertberechnung bei Mitverbrennung von Abfällen". 7 Abfallwirtschaftsjournal 7 (1995) Heft 11 S. 671-674.
- [Lübbe-Wolf] Lübbe-Wolf, G.: "Abfallverbrennung in Industrieanlagen", Deutsches Verwaltungsblatt, 15. August 1999, S. 1091-1107.
- [Oerter] Oerter, M.: "Anforderungen an geeignete Sekundärbrennstoffe für die Zementindustrie", 5. Fachtagung "Thermische Abfallbehandlung", 9.-11. Oktober 2000, Kassel, Universität Gh Kassel, S. 265-270.
- [pers. Mitteilung] persönliche Mitteilung 2000
- [Reiter] Reiter, B.; Stroh, R.: "Behandlung von Abfällen in der Zementindustrie", Monographien Band 72, Umweltbundesamt, Wien, Dezember 1995.
- [Rentz] Rentz, Otto; Sasse, Henning; Karl, Ute; Schleef, H.-J.; Dorn, R.: "Maßnahmen zur Emissionsminderung bei stationären Quellen in der Bundesrepublik Deutschland", Band II, Minderung von Schwermetallemissionen, Umweltforschungsplan des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Forschungsbericht 104 02 360, Im Auftrag des Umweltbundesamtes, Mai 1997.
- [ROG] Raumordnungsgesetz - ROG. Stand: August 1987.
- [Rosemann] Rosemann, H.; Röper, G.: "Energetische und stoffliche Verwertung von Abfällen in der Zementindustrie - Betriebserfahrungen aus der Sicht eines Betreibers und der Aufsichtsbehörde am Beispiel Werk Lägersdorf". VDI-Seminar. "Abfallwirtschaft im Umbruch". München, 6.-7. Mai 1999.
- [Sprung 1982] Sprung, S.: "Technologische Probleme beim Brennen des Zementklinkers, Ursache und Lösung", Schriftreihe der Zementindustrie, Heft 43, 1982, Beton-Verlag, Düsseldorf.
- [Sprung 1988] Sprung, S.: "Spurenelemente - Anreicherung und Minderungsmaßnahmen", ZKG 41 (1988), Heft 5, S. 251-257.
- [Striegel, K.-H.; Emig, M.] Mitverbrennung von Abfällen - Erfassung der genehmigungsbedürftigen industriellen Anlagen in Nordrhein-Westfalen; Umwelt Bd. 30 (2000), Nr. 3

- [TA Luft] Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft). 27. Februar 1986.
- [Turegg] v. Turegg, R.: "Richtige und effiziente Staubabscheidung - Technologien und Potentiale", in: VDI (Hrsg.): "Thermische Biomassenutzung - Technik und Realisierung", VDI Berichte 1319, 23./24. April 1997, Salzburg, S. 167-198.
- [UVPg] Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung UVPg. Stand: Februar 1990.
- [VDZ Umweltbericht] Umweltdaten der deutschen Zementindustrie; Verein deutscher Zementwerke e.V. September 2000
- [VDZ Tätigkeitsbericht] Tätigkeitsbericht 1996-1999; Verein deutscher Zementwerke e.V. April 1999
- [WHG] Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts. Wasserhaushaltsgesetz - WHG. Stand: November 1996.
- [Winkler] Winkler, H.D.: "Energetische Verwertung von Abfällen in Zementöfen", 4. Fachtagung Thermische Abfallbehandlung Co-Verbrennung, 1. - 3. März 1999, Dresden, Beiträge zur Abfallwirtschaft, Band 9, 1999, S.177-201.