



Verein Deutscher Zementwerke e.V.
Forschungsinstitut der Zementindustrie

Fünfte aktualisierte Erklärung zur Klimavorsorge

Monitoring-Bericht 1998

Verminderung der CO₂-Emissionen
Beitrag der deutschen Zementindustrie

Inhaltsverzeichnis

1 Zusammenfassung.....	2
2 Monitoring 1999.....	6
3 Energieverbrauch 1998.....	7
3.1 Thermischer Energieverbrauch.....	7
3.2 Elektrischer Energieverbrauch	9
3.3 CO ₂ -Emissionen.....	9
4 Maßnahmen zur Erreichung des Minderungsziels.....	11
4.1 Maßnahmen zur Optimierung des Energieeinsatzes sowie zur Abwärmenutzung.....	11
4.2 Forschungsarbeiten	15
4.3 Koordination und Informationstransfer.....	16
4.4 Substitution von Portlandzement durch Hüttenzemente im Zementwerk Amöneburg der Dyckerhoff Zement GmbH.....	18
5 Möglichkeiten und Potentiale zur Verminderung des Energieverbrauchs.....	20
5.1 Thermischer Energieverbrauch.....	20
5.2 Elektrischer Energieverbrauch	28
5.3 Verstärkter Einsatz von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen	30
6 Emissionen klimarelevanter Gase bei der Zementherstellung.....	34
6.1 Energiebedingte CO ₂ -Emissionen	34
6.2 Rohstoffbedingte CO ₂ -Emissionen.....	34
6.3 Weitere klimarelevante Gase.....	35

Anlage: Monitoring-Tabellen

Verein Deutscher Zementwerke e.V.

Düsseldorf, im Juli 1999

1 Zusammenfassung

Das Berichtsjahr 1998 ist gekennzeichnet durch einen Wechsel in der politischen Einschätzung der Selbstverpflichtungserklärung der deutschen Wirtschaft von Seiten der neuen Bundesregierung. Obwohl die Bundesregierung mit der Einführung der ersten Stufe der Ökosteuer die gemeinsame Basis für die Selbstverpflichtung verlassen hat, hat sich die Zementindustrie in Abstimmung mit dem BDI und den anderen beteiligten Verbänden entschlossen, das Monitoring vorerst weiterzuführen. Für die zukünftige Entwicklung wird jedoch entscheidend sein, welche zusätzlichen Belastungen durch eine zweite oder dritte Stufe der Ökosteuer auf die Industrie zukommen werden.

Auf internationaler Ebene hat die 4. Vertragsstaatenkonferenz in Buenos Aires keine wesentlichen Fortschritte zur Umsetzung der Beschlüsse von Kyoto gebracht. Insbesondere ist nach wie vor vollkommen unklar, wie die im Kyoto-Protokoll vorgesehenen flexiblen Mechanismen konkretisiert und umgesetzt werden sollen. Die Zementindustrie hat diese Beschlüsse grundsätzlich begrüßt. Eine einseitige Beschränkung dieser Maßnahmen durch die Europäische Union würde allerdings zu einem weiteren Wettbewerbsnachteil der europäischen gegenüber z. B. der US-amerikanischen Industrie führen. Aus Sicht der deutschen Zementindustrie ist vor allem das Joint Implementation von besonderer Bedeutung, da hierdurch der globalen Dimension des Problems Rechnung getragen wird und CO₂-Minderungsmaßnahmen wirtschaftlicher durchgeführt werden können.

In ihrer Selbstverpflichtung vom März 1995 hat die Zementindustrie zugesagt, ihren spezifischen thermischen Energieverbrauch in der Periode von 1987 bis 2005 um 20 % zu vermindern. Im Frühjahr 1999 wurden die deutschen Zementwerke durch den Verein Deutscher Zementwerke zum vierten Mal befragt und alle relevanten Energieverbrauchsdaten für das Jahr 1998 erhoben. Im vorliegenden Bericht sind, wie auch in den vorangegangenen Berichten, neben den Daten zum Brennstoffenergieverbrauch, wiederum Angaben zum elektrischen Energieverbrauch und zu den energiebedingten CO₂-Emissionen in absoluten und spezifischen Zahlen gemacht worden. Nach eingehenden Gesprächen mit den Bundesministerien für Wirtschaft und Umwelt, dem RWI sowie dem Wuppertal-Institut hat die deutsche Zementindustrie ihr Monitoring sowie ihre Berichterstattung weiterentwickelt. Neben der Darstellung von einzelnen Beispielen von Umsetzungsmaßnahmen wird im vorliegenden Bericht eine Abschätzung der verbleibenden Potentiale der Zementindustrie zur Verminderung ihrer CO₂-Emissionen unter den gegebenen technischen, wirtschaftlichen und marktbezogenen Randbedingungen versucht.

Da im Kyoto-Protokoll neben Kohlendioxid fünf weitere Treibhausgase in die Betrachtung aufgenommen wurden, wird im vorliegenden Bericht auch eine Bewertung der entsprechenden Emissionen bei der Zementherstellung durchgeführt. Die Angaben der CO₂-Emissionen werden auf die rohstoffbedingten Emissionen aus der Entsäuerung des Kalksteins erweitert.

Die Umfrageergebnisse zeigen, daß die Zementindustrie auch weiterhin auf dem Weg ist, das Minderungsziel von 20 % bis zum Jahr 2005 zu erreichen. Allerdings wird immer deutlicher, daß die verfahrenstechnischen Optimierungsmöglichkeiten weitgehend ausgeschöpft sind, so daß eine weitere Absenkung des spezifischen Brennstoffenergieverbrauchs nur über eine erweiterte Zumahlung anderer Stoffe in den Zement möglich sein wird. Die CO₂-Emissionen können insgesamt durch einen weiter ansteigenden Einsatz von Sekundärbrennstoffen gesenkt werden.

Allgemeine Angaben

Zur deutschen Zementindustrie gehörten Ende 1998 39 Unternehmen mit 67 Werken. Im Verein Deutscher Zementwerke waren 33 Unternehmen mit 60 Werken organisiert. In die Statistik wurden zwei kleinere Mahlwerke neu aufgenommen, die nicht Mitglieder des VDZ sind. Die Zahl der Beschäftigten ist im Jahr 1998 mit 11 880 gegenüber dem Vorjahr leicht gesunken. Der Gesamtumsatz sank geringfügig um 0,1 Mrd. DM auf 5,4 Mrd. DM. An der aktuellen Umfrage haben sich 33 Unternehmen beteiligt. Somit beträgt die erfaßte Zementmenge im Jahr 1998 96,7 % der insgesamt produzierten Menge (zum Vergleich 1997: 98,2 %). Für die nicht erfaßten Unternehmen wurden wiederum Schätzungen auf Basis von Erfahrungswerten des VDZ durchgeführt. Der Erfassungsgrad der eingesetzten Brennstoffenergie beträgt dementsprechend 98,9 % des gesamten Brennstoffenergieverbrauchs.

Brennstoffenergieverbrauch

Der spezifische Brennstoffenergieverbrauch der deutschen Zementwerke ist im Jahr 1998 gegenüber dem Vorjahr um 70 KJ/kg gesunken. Der spezifische Energieverbrauch betrug im Jahr 1998 2 905 kJ/kg Zement. Eine Analyse des klinker- bzw. zementbezogenen Energieverbrauchs zeigt deutlich, daß die im Vergleich zu den Vorjahren deutliche Minderung ausschließlich auf die verstärkte Herstellung von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen zurückzuführen ist. Der Gesamtbrennstoffenergieverbrauch stieg dagegen wegen der leicht gestiegenen Zementproduktion von 99,3 auf 100,7 Mio. GJ/a. Auf eine getrennte Darstellung der Daten für alte und neue Bundesländer wird zukünftig verzichtet, da die Entwicklung nach Abschluß der Modernisierung der ostdeutschen Standorte nunmehr gleichartig verläuft.

Jahr	Brennstoffenergieverbrauch	
	absolut [10^6 GJ/a]	spezifisch [kJ/kg Zement]
1987	119,9	3 510
1990	109,5	3 200
1994	102,9	3 000
1995	102,8	3 000
1996	97,6	2 995
1997	99,3	2 975
1998	100,7	2 905
2005 ¹⁾	--	2 800 ²⁾

1) Zieljahr

2) Im Rahmen der Selbstverpflichtung von der deutschen Zementindustrie prognostizierter Wert im Zieljahr

Elektrischer Energieverbrauch

Der elektrische Energieverbrauch betrug im Jahr 1998 104,7 kWh/t Zement. Er lag damit um 0,8 kWh/t höher als im Vorjahr. Der absolute Energieverbrauch stieg von 3,47 auf 3,63 Mio. MWh/a. Die Veränderung des spezifischen Verbrauchs liegt in der üblichen Bandbreite. Die Erhöhung des Gesamtverbrauchs ist in erster Linie auf die leicht gestiegene Zementproduktion zurückzuführen. Darüber hinaus erhöht ein steigender Einsatz von Stoffen, die einen höheren Mahlwiderstand als Klinker aufweisen, den Verbrauch an elektrischer Energie.

Einsatz von Sekundärbrennstoffen

Der Anteil der Sekundärbrennstoffe am gesamten Brennstoffverbrauch ist 1998 gegenüber 1997 von 15,8 auf 18,6 % weiter angestiegen. Insgesamt wurden damit ca. 18,8 Mio. GJ/a an heizwertreichen Abfällen in der Zementindustrie energetisch verwertet. Diese Verwertung stellt aus Sicht der Zementindustrie nicht nur einen wesentlichen Beitrag zur Schonung natürlicher Ressourcen dar, sondern führt darüber hinaus insgesamt zu einer CO₂-Minderung. Der stetige Anstieg des Sekundärbrennstoffanteils am gesamten thermischen Energieverbrauch spiegelt die Bemühungen der Zementunternehmen wider, den Anteil der Sekundärbrennstoffe an ihrem Energieverbrauch signifikant zu steigern und damit zugleich auch einen Beitrag zur Kreislaufwirtschaft zu leisten.

Einsatz von Zuschlagstoffen

Die Bemühungen der Zementindustrie, den Anteil anderer Hauptbestandteile außer Klinker im Zement zu erhöhen, hat im Jahr 1998 erstmals zu einem meßbaren Anstieg geführt. Das Verhältnis von Klinker zu Zement (Klinker/Zement-Faktor) lag in den vergangenen Jahren stets zwischen 0,85 und 0,86. Als Stoffe, die Zementklinker im Zement teilweise ersetzen können, sind in Deutschland nur Hüttensand (granulierte Hochofenschlacke) aus der Stahlindustrie und ungebrannter Kalkstein von technischer Bedeutung. Die in Deutschland verfügbare Menge an Hüttensand soll aufgrund von Prognosen der Stahlindustrie, die allerdings auch von konjunkturellen Schwankungen abhängig sind, im Zeitraum 1996 – 2001 von 4,2 auf ca. 6,1 Mio. t/a ansteigen. Die Zementindustrie hat sich zum Ziel gesetzt, diese Menge vollständig zu übernehmen. Da die Leistungsfähigkeit und die Eigenschaften dieser Zementarten mit mehreren Hauptbestandteilen aufgrund von Anforderungen des Marktes weitgehend der Leistungsfähigkeit von Portlandzement (CEM I) angepaßt werden müssen, hängt der Erfolg dieser Maßnahme allerdings wesentlich davon ab, mit welchem Aufwand an Energie und damit Kosten dieses Ziel erreicht werden kann.

2 Monitoring 1999

Im Rahmen der Selbstverpflichtung der deutschen Wirtschaft zum Klimaschutz hat sich die deutsche Zementindustrie im März 1995 bereit erklärt, ihren spezifischen Brennstoffenergieverbrauch vom Basisjahr 1987 bis zum Jahr 2005 um 20 % zu reduzieren. Zur Offenlegung der relevanten Daten und zur Erreichung einer größtmöglichen Transparenz beteiligt sie sich an dem vom BDI koordinierten und vom Rheinisch-Westfälischen Institut für Wirtschaftsforschung (RWI) begleiteten Monitoring-System. Darin ist vorgesehen, im jährlichen Rhythmus die thermischen und elektrischen Energieverbräuche der beteiligten Branchen zu erheben und in anonymisierter Form dem RWI zur Überprüfung zu übergeben.

Im Frühjahr 1999 hat der Verein Deutscher Zementwerke die thermischen und elektrischen Energieverbräuche der deutschen Zementwerke für das Jahr 1998 abgefragt. Von den im Jahr 1998 in Deutschland tätigen 39 zementherstellenden Unternehmen sind 33 im Verein Deutscher Zementwerke (VDZ) organisiert. In die Statistik wurden zwei Mahlwerke aufgenommen, die nicht Vereinsmitglieder sind. An der aktuellen Umfrage haben sich insgesamt 33 Unternehmen beteiligt, davon 32 VDZ-Mitgliedswerke. Damit betrug die durch das Monitoring erfaßte produzierte Zementmenge 96,7 % gegenüber 98,2 % im Vorjahr. Die durch das Monitoring erfaßte Brennstoffmenge beträgt 98,9 % des Gesamtverbrauchs. Dementsprechend kann auch der Anteil der erfaßten brennstoffbedingten CO₂-Emissionen in ähnlicher Größenordnung angesetzt werden. Für die nicht erfaßten Unternehmen wurden wiederum Schätzungen der Energieverbräuche auf der Basis von Erfahrungswerten des Forschungsinstituts der Zementindustrie durchgeführt. Die Repräsentanz der Daten ist somit wiederum als sehr gut anzusehen. Die ausgefüllten Monitoring-Tabellen des RWI sind dem Bericht als **Anlage** beigefügt.

3 Energieverbrauch 1998

3.1 Thermischer Energieverbrauch

Die im Jahr 1998 in der Zementindustrie eingesetzten Brennstoffmengen sind aufgeteilt nach Energieträgern in **Tafel 1** den Verbräuchen der Jahre 1987 bis 1997 gegenübergestellt.

Tafel 1: Brennstoffenergieverbrauch nach Energieträgern

Brennstoff	1987	1990	1994	1995	1996	1997	1998
	[10 ⁶ GJ/a]						
Steinkohle	48,2	47,5	49,9	43,1	37,9	38,2	32,0
Braunkohle	56,0	45,8	32,5	33,4	32,1	31,4	33,2
Petrolkoks	0,8	0,8	1,9	10,0	9,9	9,5	10,2
Heizöl S	4,5	4,2	5,8	3,3	2,4	2,2	4,5
Heizöl EL	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,2	0,3
Erdgas und andere Gase	2,4	0,8	0,3	1,1	1,3	1,6	0,6
sonstige fossile Brennstoffe	2,9	2,1	1,9	0,6	0,6	0,5	1,1
Fossile Brennstoffe insgesamt	115,0	101,4	92,5	91,8	84,5	83,6	81,9
Sekundärbrennstoffe insgesamt	4,9	8,1	10,4	11,0	13,1	15,7	18,8
Thermischer Energieverbrauch insgesamt	119,9	109,5	102,9	102,8	97,6	99,3	100,7

Daraus wird deutlich, daß der Gesamtbrennstoffenergieverbrauch gegenüber dem Vorjahr um 1,4 Mio. GJ zugenommen hat. Dies ist in erster Linie auf die von 33,4 Mio. t (1997) auf 34,7 Mio. t (1998) leicht angestiegene Zementproduktion (Zement aus in Deutschland gebranntem Klinker) zurückzuführen. Gegenüber dem Basisjahr 1987 beträgt die absolute Reduzierung des Brennstoffenergieverbrauchs damit 16,0 % sowie gegenüber 1990 8,0 %. Aus der Tabelle geht hervor, daß die Substitution der Regelbrennstoffe durch sekundäre Brennstoffe in der Zementindustrie weiter voranschreitet. Der Anteil der Sekundärbrennstoffe stieg von 15,8 % im Vorjahr auf nunmehr 18,6 %. Durch die Sekundärbrennstoffe wurde im Berichtsjahr vorwiegend Steinkohle substituiert, während der Braunkohleinsatz leicht anstieg. Aufgrund der leicht veränderten Brennstoffkostensituation in Teilen Deutschlands stieg der Verbrauch von schwerem Heizöl von 2,2 auf 4,5 Mio. GJ/t, ebenfalls zu Lasten von Steinkohle.

Die energetische Verwertung von Abfällen stellt nach Auffassung der Zementindustrie einen wesentlichen Beitrag zur Schonung natürlicher Ressourcen dar, da fossile Brennstoffe in energetisch äquivalentem Maße ersetzt werden. Da darüber hinaus der thermische Wirkungsgrad von Drehofenanlagen zum Brennen von Zementklinker deutlich höher als der anderer Verwertungsverfahren ist, führt der Einsatz von Sekundärbrennstoffen in der Zementindustrie insgesamt auch zu einer CO₂-Reduzierung.

Tafel 2 gibt eine Übersicht über die Entwicklung der ermittelten absoluten und spezifischen Brennstoffenergieverbräuche von 1987 bis 1997. Auf eine getrennte Darstellung der Daten für die neuen bzw. alten Bundesländer wurde verzichtet, da die Entwicklung nach Abschluß der Modernisierung der ostdeutschen Standorte nunmehr vergleichbar verläuft.

Tafel 2: Absoluter und spezifischer Brennstoffenergieverbrauch

Jahr	Brennstoffenergieverbrauch	
	absolut [10 ⁶ GJ/a]	spezifisch [kJ/kg Zement]
1987	119,9	3 510
1990	109,5	3 200
1994	102,9	3 000
1995	102,8	3 000
1996	97,6	2 995
1997	99,3	2 975
1998	100,7	2 905
2005 ¹⁾	--	2 800 ²⁾

1) Zieljahr

2) Im Rahmen der Selbstverpflichtung von der deutschen Zementindustrie prognostizierter Wert im Zieljahr

Bei der Berechnung der spezifischen Verbräuche wurde der Gesamtverbrauch an thermischer Energie einschließlich der Sekundärbrennstoffe berücksichtigt. Als Bezugsgröße wurde wiederum die aus dem in Deutschland hergestellten Zementklinker ermahlene Zementmenge eingesetzt. Zemente aus Importklinker blieben unberücksichtigt, da hierfür in Deutschland keine Brennstoffe verbraucht wurden.

Aus dem in Tafel 2 dargestellten Angaben geht hervor, daß der Gesamtbrennstoffenergieverbrauch auf 100,7 Mio. GJ/a leicht angestiegen ist. Der spezifische Energieverbrauch der deutschen Zementindustrie lag im Jahr 1998 gegenüber

dem Vorjahr mit 2 905 kJ/kg Zement um 70 KJ/kg niedriger. Eine Analyse des klinker- bzw. zementbezogenen Energieverbrauchs zeigt deutlich, daß die im Vergleich zu den Vorjahren deutliche Minderung ausschließlich auf die verstärkte Herstellung von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen zurückzuführen ist. Dies ist das Ergebnis der Bemühungen der Zementindustrie in den vergangenen Jahren, die Akzeptanz dieser Zementarten im Markt zu verbessern. Allein der Absatz von Portlandhüttenzementen stieg im vergangenen Jahr um ca. 2,4 Mio. t/a.

3.2 Elektrischer Energieverbrauch

Die Daten zum elektrischen Energieverbrauch der deutschen Zementwerke sind in **Tafel 3** zusammengestellt. Demnach ist der absolute elektrische Energieverbrauch gegenüber dem Vorjahr u. a. wegen der leicht angestiegenen Zementproduktion von 3,47 auf 3,63 Mio. MWh/a angestiegen. Dies ist z. T. auch darauf zurückzuführen, daß der spezifische elektrische Energieverbrauch im gleichen Zeitraum von 103,9 auf 104,7 kWh/t Zement zugenommen hat. Die Veränderung liegt noch im Bereich üblicher Schwankungsbreiten. Die Zementindustrie ist skeptisch, ob eine signifikante Verringerung des spezifischen elektrischen Energieverbrauchs möglich sein wird. Aufgrund der steigenden Marktanforderungen an die Leistungsfähigkeit, wie z. B. die Feinmahlung der Zemente, ist insbesondere bei zunehmender Produktion von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen, ein insgesamt höherer Energieverbrauch zur Feinmahlung zu erwarten.

Tafel 3: Elektrischer Energieverbrauch der deutschen Zementindustrie

Jahr	Elektrischer Energieverbrauch	
	absolut [10^6 MWh/a]	spezifisch [kWh/t Zement]
1987	3,80	111,2
1990	3,67	107,4
1994	3,72	107,8
1995	3,64	106,5
1996	3,50	107,4
1997	3,47	103,9
1998	3,63	104,7

3.3 CO₂-Emissionen

Wie bereits in den Vorjahren wurden bei der Berechnung der brennstoffbedingten CO₂-Emissionen im vorliegenden Bericht vorwiegend die vom RWI vorgeschlagenen CO₂-Emissionsfaktoren verwendet. Nur für Petrolkoks und Braunkohlenstaub wurden die spezifischen Emissionsfaktoren für die in der Zementin-

dustrie eingesetzten Brennstoffqualitäten verwendet (Braunkohle 0,093 kg CO₂/MJ Brennstoff, Petrolkoks 0,096 kg CO₂/MJ Brennstoff). Diese Faktoren beruhen auf einer Vielzahl von Brennstoffanalysen des Forschungsinstituts der Zementindustrie. Bei Verwendung der vom RWI angegebenen Faktoren würde bei diesen Brennstoffen nicht den spezifischen Brennstoffbedingungen der Zementindustrie Rechnung getragen. Die sich aus der Verbrennung der einzelnen Energieträger ergebenden CO₂-Emissionen sind der **Tabelle IV, Anlage** zu entnehmen. Eine Übersicht über die Entwicklung der absoluten bzw. spezifischen brennstoffbedingten CO₂-Emissionen der Zementindustrie gibt **Tafel 4**. Sekundärbrennstoffe wurden dabei als CO₂-neutral betrachtet und deshalb nicht berücksichtigt.

Tafel 4: Absolute und spezifische brennstoffbedingte CO₂-Emissionen

Jahr	CO ₂ -Emissionen	
	absolut [10 ⁶ t CO ₂ /a]	spezifisch [t CO ₂ / t Zement]
1987	10,8	0,317
1990	9,6	0,280
1994	8,7	0,252
1995	8,7	0,254
1996	8,0	0,245
1997	7,7	0,231
1998	7,6	0,218

Aus der Tafel geht hervor, daß die brennstoffbedingten absoluten CO₂-Emissionen der Zementindustrie gegenüber dem Vorjahr 1998 wegen der geringen Produktionssteigerung praktisch unverändert blieb. Demgegenüber sank die spezifische brennstoffbedingte CO₂-Emission von 0,231 auf 0,218 t CO₂/t Zement. Bei konstantem absoluten bzw. geringfügig gesunkenen spezifischen Brennstoffenergieverbrauch ist die Verminderung der CO₂-Emissionen im wesentlichen auf die Erhöhung des Sekundärbrennstoffanteils an der Menge der verfeuerten Brennstoffmenge zurückzuführen.

4 Maßnahmen zur Erreichung des Minderungsziels

4.1 Maßnahmen zur Optimierung des Energieeinsatzes sowie zur Abwärmennutzung

Das Berichtsjahr 1998 ist dadurch gekennzeichnet, daß die in den vergangenen Jahren neu gebauten bzw. von Grund auf modernisierten Ofenanlagen in den neuen Bundesländern wie auch in den alten Bundesländern inzwischen betriebstechnisch optimiert wurden und somit in den normalen Produktionsprozeß übernommen werden konnten. Dennoch sind wiederum in einer Vielzahl von Zementwerken im Rahmen des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses Anstrengungen unternommen worden, den thermischen bzw. elektrischen Energieverbrauch zu senken. Im folgenden sind Maßnahmen beschrieben, die beispielhaft in vier Zementwerken zur Optimierung des Klinkerbrennprozesses und zur Verbesserung der Rückgewinnung von Prozeßwärme durchgeführt wurden.

Nutzung der Klinkerkühlerabluft zur Stromerzeugung im Zementwerk Lengfurt der Heidelberger Zement AG

Im Zementwerk Lengfurt der Heidelberger Zement AG wird seit 100 Jahren Zement hergestellt. Der Klinker wird heute in einem Drehofen mit 4-stufigem Zyklonvorwärmer und mit einem nachgeschalteten 3-stufigen Rostkühler mit einem nach der zweiten Roststufe integrierten Rollenbrecher hergestellt. Mit einer Ofenleistung von 3 150 t werden zur Zeit ca. 800 000 t Klinker und ca. 700 000 t Zement pro Jahr mit einem durchschnittlichen Strombedarf von 80 000 MWh hergestellt.

Zur Reduzierung des elektrischen Energiebedarfs wurde eine Anlage zur Stromerzeugung durch Nutzung der Niedertemperaturabwärme aus der Klinkerkühlerabluft installiert. Die für eine solche Stromerzeugung grundsätzlich zur Verfügung stehenden potentiellen Abwärmequellen (Vorwärmerabgas, Bypassgas und Kühlerabluft) wurden ebenso untersucht wie auch die hierbei anwendbaren Verfahren. Die durchgeführte Analyse ergab, daß für das Werk Lengfurt nur die thermische Nutzung der Kühlerabluft nach dem ORC-Verfahren (**O**rganic **R**ankine **C**ycle) in Frage kam.

Beim ORC-Verfahren handelt es sich um eine Technologie zur Verstromung von Niedertemperaturwärme unter 250 °C, die zur Zeit vorwiegend bei der Verstromung von geothermischen Heißwasserquellen zur Anwendung kommt. Nach diesem Verfahren wird die Turbine anstelle von Wasserdampf mit einem organischen Treibmedium betrieben. Für die geplante ORC-Anlage ist der Einsatz von Pentan als Treibmedium wegen der einfachen Handhabbarkeit vorgesehen. Aufgrund des höheren Wirkungsgrads des Verfahrens, der höheren Flexibilität bei Temperaturschwankungen der Kühlerabluft sowie der niedrigeren

Investitionskosten und einfacheren Sicherheitsbestimmungen wurde diesem Verfahren gegenüber der Stromerzeugung mit Wasserdampf der Vorzug gegeben.

Bei dem im Werk Lengfurt durchgeführten Vorhaben handelt es sich um ein Pilotprojekt, bei dem das ORC-Verfahren erstmalig in einem Zementwerk zur Anwendung kommt. Wegen des innovativen und umweltfreundlichen Charakters wird die Errichtung und Langzeiterprobung dieses Vorhabens vom Bundesministerium für Umwelt/BMU und vom Land Bayern mit Zuschüssen gefördert.

Mit dem Vorhaben wurden folgende Zielsetzungen verfolgt:

- Erzeugung von 1,13 MW Strom (netto), mit dem ca. 12 % des Eigenbedarfs des Werkes gedeckt werden können.
- Flexibilität beim Strombezug während der Hochtarifzeiten.
- Senkung der stromerzeugungsbedingten CO₂-Emissionen um ca. 7 000 t pro Jahr.

Die Anlage besteht im wesentlichen aus einem Abhitzekessel, der ORC-Anlage und einer Kondensator-Anlage. Der gesamte Kühlerabluftstrom mit durchschnittlich 150 000 Nm³/h und bis zu 275 °C heiß wird nach Durchströmen des Heißgaselektrofilters einem Abhitzekessel zugeführt. Darüber hinaus kann die Abhitzekesselanlage im Bedarfsfall durch einen installierten Bypass außer Betrieb genommen werden, ohne daß die Ofenanlage abgeschaltet werden muß. Zur Energieauskopplung werden die Heizflächen des Abhitzekessels mit Wärmeträgeröl beaufschlagt. Die Kühlerabluft wird hierdurch auf ca. 125 °C abgekühlt, das Wärmeüberträgeröl auf 230 °C erwärmt und die ausgekoppelte Energie über Wärmeträgerölpumpen der ORC-Anlage zugeführt.

Nach Abzug aller internen Stromverbraucher (Pentan- und Wärmeträgerölpumpe sowie Ventilatoren des Luftkondensators) erzeugt die Anlage 1,13 MW Strom (netto). Die Anlage wurde im Mai 1999 in Betrieb genommen. In einem ein Jahr dauernden Versuch soll das Langzeitverhalten der Anlage untersucht werden.

Installationen eines Expertensystems „LINKman“ im Zementwerk Göllheim der Dyckerhoff Zement GmbH

Das Werk Göllheim ist einer von mehreren Produktionsstandorten der Dyckerhoff Zement GmbH. Im Werk Göllheim werden Zemente und Mörtel sowie Kalkstein, Dolomitmehl und Mischprodukte hergestellt. Zementklinker wird in zwei Ofenanlagen mit einer Leistung von 1 200 bzw. 1 800 t/d hergestellt. Beide Öfen sind mit einem vierstufigen Zyklonvorwärmer und einem Rostkühler als

Wärmetauscher ausgerüstet, in dem die Wärme der Ofenabgase und des fertig gebrannten Klinkers zurückgewonnen wird. Als Brennstoffe werden Braunkohle, Steinkohle, Altreifen, Altöl sowie Petrolkoks eingesetzt.

Im Jahr 1998 wurden beide Ofenanlagen mit einem Ofenführungssystem „LINKman“ ausgestattet. Ziel des Projekts war, den Klinkerbrennprozeß zu gleichmäßigen und dadurch den Energieverbrauch und die Betriebskosten zu senken. Ein gleichmäßiger Ofenbetrieb kann darüber hinaus auch zu gleichmäßigeren Ansatzverhältnissen und somit einem geringeren Verbrauch an Feuerfestmaterial führen. Der Implementierung des LINKman-Systems war eine verfahrenstechnische Optimierung der Ofenanlagen vorausgegangen. Eine solche verfahrenstechnische Optimierung ist zwingende Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz von Ofenführungssystemen. Mit Hilfe des Expertensystems kann der Betrieb der Ofenanlagen automatisiert und unabhängiger von der Betriebsweise durch einzelne Produktionssteuerer gemacht werden. Darüber hinaus können verschiedene Ofenführungsstrategien, z. B. mit dem Ziel einer maximalen Ofenleistung, verfolgt werden. Auf der anderen Seite werden die Erfahrungen der Produktionssteuerer genutzt und den Regelalgorithmen des Systems zugrundegelegt.

Die Betriebserfahrungen mit dem System im Werk Göllheim zeigen, daß eine deutliche Vergleichmäßigung des Ofenbetriebs an beiden Anlagen erzielt wurde. Dies läßt betriebstechnische Vorteile, z. B. für die Verfügbarkeit der Ofenanlage, die Gleichmäßigkeit der Produktqualität, den Brennstoffenergieverbrauch und die Standzeit der Ofenausmauerung erwarten. Betriebliche Schwankungen können besser ausgeglichen werden als es durch Steuerung von Hand möglich ist. Auch für den Betrieb des Klinkerkühlers und des Trockners konnten Verbesserungen erreicht werden.

Durch den vergleichmäßigsten Brennprozeß wurde eine Einsparung an Brennstoffenergie von ca. 100 kJ/kg Klinker erzielt, die auch die Erfolge der vorausgegangenen verfahrenstechnischen Optimierung beinhaltet. Bezogen auf eine Jahreskapazität von ca. 750 000 t/a führt dies zu einer Vermeidung von ca. 7 000 t CO₂/a. Inwieweit durch den vergleichmäßigsten Prozeß auch eine Einsparung an elektrischer Energie erreicht werden kann, ist derzeit noch nicht absehbar.

Substitution von Erdgas durch Ofenabgas bei der Tontrocknung im Zementwerk Karsdorf der Karsdorfer Zement GmbH

Im Zementwerk Karsdorf der Karsdorfer Zement GmbH wird seit dem Jahr 1927 Zement hergestellt. Damals wurde die erste Ofenlinie mit einer Klinkerproduktionsleistung von 250 t/d in Betrieb genommen. Zwischen 1958 und 1972 wurden

insgesamt elf Ofenlinien hinzugefügt, von denen sieben nach dem Naßverfahren und vier nach dem Trockenverfahren arbeiteten. Nach 1991 wurde das Zementwerk mit hohem Investitionsaufwand grundlegend modernisiert. Die nach dem Naßverfahren arbeitenden Ofenanlagen wurden außer Betrieb genommen und drei der vier Ofenanlagen, die nach dem Trockenverfahren arbeiten, wurden rekonstruiert. Die Gesamtkapazität der heute betriebenen drei Ofenanlagen liegt bei etwa 6 000 t Klinker/d.

Als Brennstoffe werden Braunkohle und Sekundärbrennstoffe bis zu einem genehmigten Anteil von 65 % an der Feuerungswärmeleistung eingesetzt. Das für die Klinkerproduktion notwendige Rohmehl wird aus den vier Komponenten Kalkstein, Ton, Sand sowie einer Eisenkomponente hergestellt. Der Ton, der mit einem Anteil von etwa 8 % im Rohmehl enthalten ist, wird von einer Abraumhalde der Braunkohlenindustrie gewonnen und im Zementwerk aufbereitet. Bis zu Beginn des Jahres 1998 mußte der Ton, der einen Wassergehalt von ca. 23 % enthält, in einer Trockneranlage mit Erdgas auf eine Restfeuchte von 7 % getrocknet werden. Eine gemeinsame Vermahlung des feuchten Tons mit den anderen Rohstoffkomponenten in der Rohmühle war nicht möglich, da sich der Ton mit dem hohen Feuchtegehalt nicht fördern ließ. Im Jahr 1998 wurde eine neue Tontrocknungsanlage in Betrieb genommen, wobei ein innovatives und bisher nicht in der Zementindustrie eingesetztes Granulationsverfahren verwendet wird. In dieser Granulationsanlage wird der Ton mit einem Additiv in Spezialmischern unter exakt definierten Bedingungen vermischt. Bei der Vermischung wird ein Teil des im Ton gebundenen Wassers durch das Additiv aufgenommen. Darüber hinaus erwärmt sich das Material durch die intensive Mischung, wodurch der Feuchtegehalt um ca. 7 % verringert wird. Dieses Verfahren erlaubt es, den Ton ohne Zufuhr von Wärmeenergie so aufzubereiten, daß dieser problemlos gelagert und in die Rohmühlen transportiert werden kann. Dort erfolgt die weitere Trocknung durch Ofenabgas, das bisher ungenutzt abgeleitet wurde.

Durch diese innovative Maßnahme wurden ca. 2 Mio. m³ Erdgas pro Jahr eingespart und durch Abwärme ersetzt. Daraus errechnet sich eine Verminderung der CO₂-Emissionen des Zementwerks um ca. 3 550 t CO₂/a.

Verfahrenstechnische Optimierung des Zyklonvorwärmers im Zementwerk der Märker Zement GmbH

Die Firma Märker Zementwerk GmbH in Harburg/Schwaben wurde im Jahr 1889 gegründet und stellte zunächst Kalk her. Seit dem Jahr 1906 wird auch Zement produziert. Bis Mitte der 50er Jahre wurde der Zementklinker in Naßöfen gebrannt. Bereits 1956 wurde der Naßofen ersetzt durch einen großen Ofen, der nach dem Trockenverfahren arbeitete. Heute verfügt die Firma Märker

über einen 3 000 tato-Ofen mit vierstufigem Zyklonvorwärmer und einem Satellitenkühler. In den vergangenen Jahren wurden laufend verfahrens- und betriebstechnische Verbesserungen durchgeführt, um den Prozeß energetisch zu optimieren. Darüber hinaus wurde die als Regelbrennstoff eingesetzte Kohle zu einem großen Anteil durch Sekundärbrennstoffe ersetzt.

Im Jahr 1997 wurde beschlossen, Teile des Vorwärmers und den Steigkanal zu modernisieren. Im Rahmen des 1998 durchgeführten Umbaus wurden die bestehenden Zyclone der untersten Vorwärmerstufe durch neue druckverlustarme Zyclone ersetzt. Die neuen Zyclone verfügen über eine optimierte Geometrie, die eine vergleichbare Abscheidung des Brennguts bei niedrigerem Druckverlust gegenüber der alten Technologie ermöglicht. Der Umbau führte zu einer Verringerung des Druckverlusts im Vorwärmerturm um etwa 15 %. Die bisherigen Betriebserfahrungen mit der neugebauten Anlage lassen erwarten, daß durch den Umbau eine Einsparung an elektrischer Energie für die Antriebe der Abgasgebläse von ca. 80 000 kWh/a erzielt werden kann.

4.2 Forschungsarbeiten

Im Jahr 1998 wurden die in den vergangenen Jahren begonnenen Forschungsarbeiten, die in den Monitoring-Berichten 1996 und 1997 dargestellt sind, fortgesetzt. Schwerpunkt der Arbeiten, die im Forschungsinstitut der Zementindustrie durchgeführt wurden, waren Untersuchungen über die Eigenschaften von Hüttensand sowie von hüttensandhaltigen Zementen. Zur Untersuchung der Hydratation von anderen Hauptbestandteilen als Klinker im Zement, wie z. B. Flugaschen oder Hüttensande, wurde ein neuartiges Rasterelektronenmikroskop, das die Untersuchung aller Proben in ihrem natürlichen Zustand ermöglicht, angeschafft. Im Mittelpunkt dieser Untersuchungen steht die Frage, inwieweit die anderen Hauptbestandteile die Hydratation bzw. Zusammensetzung und Morphologie der Hydratationsprodukte des Portlandzementanteils beeinflussen und verändern. Ziel der Untersuchungen ist letztlich, den Ursachen für die unterschiedlichen Eigenschaften von Portlandzementen und Zementen mit anderen Hauptbestandteilen auf den Grund zu gehen, die Leistungsfähigkeit im Mörtel und Beton anzugleichen und somit die Einsatzmöglichkeiten dieser Zementsorten zu fördern.

Darüber hinaus wurden umfangreiche Labor- und Betriebsuntersuchungen durchgeführt, um die verfahrenstechnischen Einflußgrößen auf die Eigenschaften von Zementen aus mehreren Hauptbestandteilen zu ermitteln. Traditionell werden die Hauptbestandteile solcher Zemente gemeinsam in den Mahlanlagen der Zementindustrie vermahlen. Die Untersuchungen zielen darauf ab, in wie weit sich durch eine getrennte Mahlung der Hauptbestandteile mit an-

schließlichem Mischen einerseits die Eigenschaften der hergestellten Zemente gezielt beeinflussen lassen und andererseits der elektrische Energieverbrauch für die Feinmahlung vermindert werden kann. Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse zeigen, daß neben dem Hüttensandanteil, der Mahlfeinheit der ermahlten Zemente sowie der Korngrößenverteilung auch die Reaktivität des Hüttensands und des Klinkers von Bedeutung sind. Die Untersuchungsergebnisse zeigen weiterhin, daß bei der Verwendung von Klinker und Hüttensand verschiedener Reaktivität zur Erzeugung gleichbleibender Zementeigenschaften die Mahlfeinheit und der Hüttensandgehalt der Zemente auf die Reaktivität der Einsatzstoffe abgestimmt werden müssen.

Aufbauend auf diese Untersuchungen wurde ein neues Forschungsprojekt initiiert, mit dem in den kommenden Jahren die Auswirkungen der verstärkten Zumahlung von Hüttensand auf die Eigenschaften des Betons untersucht werden sollen.

4.3 Koordination und Informationstransfer

Die im Jahr 1995 von der Zementindustrie eingesetzte Kommission „CO₂-Minderung“ hat auch im abgelaufenen Jahr 1998 wieder die Aktivitäten der Zementindustrie im Hinblick auf die Einleitung und Durchführung von Maßnahmen zur Verminderung des Brennstoffeinsatzes koordiniert. Die Kommission ist zusammengesetzt aus Vertretern der Zementunternehmen, des Bundesverbandes der deutschen Zementindustrie (BDZ) und des Vereins Deutscher Zementwerke (VDZ). Die Kommission hat das durch das Forschungsinstitut der Zementindustrie durchgeführte Monitoring begleitet, die Ergebnisse analysiert und die durchzuführenden Maßnahmen diskutiert. Die Kommission ist darüber hinaus verantwortlich für den vorliegenden Bericht.

Ein wesentlicher Schwerpunkt der Arbeit der Kommission im Berichtsjahr 1998 war die Weiterentwicklung des Monitorings und der damit verbundenen Berichterstattung der Zementindustrie. In Diskussionen mit dem Umweltministerium, dem Wirtschaftsministerium, dem Rheinisch-Westfälischen Institut für Wirtschaftsforschung und dem Wuppertal-Institut wurden – z. T. stellvertretend durch das Forschungsinstitut der Zementindustrie - eine Vielzahl von Vorschlägen zur Weiterentwicklung des Monitorings diskutiert und auf ihre Umsetzbarkeit in der Zementindustrie hin untersucht. Die im vorliegenden Bericht vorgenommene Anpassung des Monitoring-Berichts ist Ergebnis dieser Gespräche.

Ein zweiter Schwerpunkt war die Verfolgung der internationalen Diskussionen zur Klimapolitik in der Folge der Klimavertragsstaatenkonferenzen von Kyoto und Buenos Aires. Die Zementindustrie hat die Beschlüsse der Kyoto-Konferenz

grundsätzlich begrüßt. Allerdings ist nach wie vor vollkommen unklar, wie die darin vorgesehenen flexiblen Mechanismen konkretisiert und umgesetzt werden sollen. Aus Sicht der deutschen Zementindustrie ist vor allem das Joint Implementation von besonderem Interesse, da hierdurch der globalen Dimension Rechnung getragen wird und CO₂-Minderungsmaßnahmen wirtschaftlicher durchgeführt werden können. Als problematisch wird hierbei die Tatsache angesehen, daß Energieeinsparungen, die durch Investitionen im Ausland erzielt werden, nur angerechnet werden sollen, wenn sie „zusätzlich“ erfolgen. Eine solche Zusätzlichkeit wird in der Praxis niemals schlüssig nachweisbar sein. In wie weit Emission Trading in der derzeit vorliegenden Form (Handel zwischen Staaten, die das Kyoto-Protokoll ratifiziert haben) umsetzbar ist, ist derzeit noch offen. Ein „Herunterbrechen“ des Emission Trading auf nationaler Ebene (innerhalb der EU bzw. auf Unternehmensebene) erscheint derzeit wenig aussichtsreich. Die VDZ-Kommission beschäftigt sich weiterhin mit der Frage, wie die Selbstverpflichtung der Zementindustrie gegebenenfalls mit den genannten flexiblen Mechanismen kombiniert werden könnte. Entsprechende Vorstellungen bestehen jedoch bisher weder auf politischer Seite noch auf Seiten der Industrie.

Letztlich hat sich die CO₂-Kommission mit der veränderten politischen Situation nach den Bundestagswahlen im Herbst 1998 beschäftigt. Obwohl die Bundesregierung aus Sicht der Zementindustrie die Plattform für die Selbstverpflichtung der deutschen Wirtschaft aufgegeben hat, haben sich die Zementunternehmen entschlossen, das Monitoring in Verbindung mit dem BDI und den anderen beteiligten Branchen vorerst weiter zu führen. Entscheidend für die weitere Fortführung werden jedoch die von der Bundesregierung geplante zweite und dritte Stufe der Ökosteuern und die sich daraus ergebenden Belastungen für die Industrie sein.

Auch im Jahr 1998 hat der VDZ wiederum verschiedene Veranstaltungen durchgeführt, bei denen die Unternehmen und ihre Mitarbeiter über durchgeführte Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz sowie zum Klimaschutz informiert wurden.

- Im Herbst 1998 fand eine Technisch-wissenschaftliche Tagung mit mehr als 400 Teilnehmern aus der Zementindustrie in Ulm statt. Wichtige Themen der Veranstaltung waren der Stand der internationalen Klimadiskussion, die Auswirkungen der Klimapolitik auf die Zementindustrie, der Einsatz von Sekundärbrennstoffen sowie die Einführung „Best verfügbarer Techniken“ in der Zementindustrie sowie die Erarbeitung von Ökobilanzen als Maßstab zur Bewertung von Bauwerken.

- Je zweimal im Jahr tagten die Ausschüsse Umwelt und Verfahrenstechnik des VDZ. Insbesondere im Ausschuß Verfahrenstechnik standen wiederum Diskussionen über die Betriebserfahrungen mit den neuen Vorcalcineranlagen im Mittelpunkt. Zur Vertiefung des Informationsaustausches wurde ein Arbeitskreis gegründet, der sich speziell mit den Möglichkeiten dieser neuen Technologie beschäftigen soll.

Im Rahmen des 1997 gegründeten VDZ-Bildungswerkes wurden im Jahr 1998 mehrere Seminare durchgeführt, in denen die Einsparung von Energie sowie die Minderung von Emissionen ein zentraler Schwerpunkt darstellten. Hierzu zählen der Industriemeister-Lehrgang „Kalk/Zement“ sowie Seminare für junge Betriebsingenieure, Immissionsschutzbeauftragte sowie zur Einführung junger Mitarbeiter in die Umwelttechnik. Im Rahmen des VDZ-Bildungswerkes besteht die Möglichkeit zum intensiven Informationsaustausch zwischen Forschungsinstitut und den Mitgliedswerken sowie zwischen den Mitarbeitern der Werke untereinander. Die Beteiligung an den durchgeführten Seminaren zeigt, daß das Angebot des VDZ von den Mitgliedswerken in starkem Maße angenommen wird.

4.4 Substitution von Portlandzement durch Hüttenzemente im Zementwerk Amöneburg der Dyckerhoff Zement GmbH

Das Zementwerk Amöneburg ist das Stammwerk der Firma Dyckerhoff, hier wurde bereits im 19. Jahrhundert im großen Maße Zement produziert. Seit 1970 verfügt das Werk über zwei Ofenanlagen zur Herstellung von Normklinker sowie einer dritten Ofenanlage zur Herstellung von Weißklinker. Der Jahresausstoß beträgt ca. 1 Mio. t Zement/a, die von rund 300 Mitarbeitern hergestellt werden.

Die Ofenanlagen wurden in den vergangenen Jahren systematisch verfahrenstechnisch und betriebstechnisch optimiert. Beispielhaft sei die Umrüstung des Klinkerkühlers genannt, durch die es möglich wurde, den Kühlluftbedarf soweit zu senken, daß die verbleibende Kühlerabluft vollständig zur Trocknung der Rohstoffe verwendet werden kann. Ungenutzte Kühlerabluft fällt seitdem nicht mehr an. Als Sekundärbrennstoffe werden bereits seit Beginn der 80er Jahre Altreifen mit einem Anteil von bis zu 20 % des thermischen Energiebedarfs eingesetzt.

Im Jahr 1998 wurde eine Initiative im Verkaufsgebiet der Dyckerhoff Zement GmbH Werksgruppe Süd, zu der die Werke Amöneburg und Göllheim gehören, mit dem Ziel gestartet, den Verkauf von Portlandhüttenzementen (CEM II/A-B-S) anstelle von Portlandzement zu verstärken. Vor allem im Transportbeton sind

Betonrezepturen unter Verwendung von Portlandzement bzw. Hochofenzementen üblich. Dabei werden Hochofenzemente insbesondere für massige Bauteile eingesetzt. Da die hüttensandhaltigen Zementsorten CEM II/A-S und CEM II/B-S gleiche 28-Tage-Festigkeiten und ebenfalls hohe Frühfestigkeiten aufweisen, können in weiten Bereichen des Transportbetons statt der bisher üblichen Portlandzemente solche CEM II-Zemente eingesetzt werden. Beschränkungen gibt es bei hohen Anforderungen an die Frühfestigkeit vor allem bei niedrigen Temperaturen im Winter sowie bei speziellen Bauteilen, wie Brückenkappen und Fahrbahndecken, wo bislang der Bauherr (z. B. das Bundesverkehrsministerium) Sonderanforderungen stellt, die die Verwendung hüttensandhaltiger Zemente erschwert oder ausschließt.

Im Rahmen der Initiative wurden die Zementanwender sowie die Bauherren gezielt über die Möglichkeiten des Austauschs von Portlandzementen durch hüttensandhaltige Zemente informiert. Auf diese Weise konnte der Anteil an CEM II/S-Zementen mit 6 bis 36 % Hüttensand im Jahr 1998 um rund 30 % gegenüber dem Jahr 1997 erhöht werden. Dem entsprach ein um 18 % erhöhter Hüttensandeinsatz. Der Klinkerbedarf konnte um diese zusätzlich zugemahlene Hüttensandmenge gesenkt werden. Hierzu war es zuvor notwendig, die Silokapazitäten im Zementwerk Amöneburg deutlich auszubauen. Daher wurde mit einem Investitionsvolumen von 8,6 Mio. DM ein 5 000 t fassendes Mehrkammersilo mit Verladung neu errichtet. Auf dieser Basis wird angestrebt, die Bemühungen in den kommenden Jahren über den Einsatz im Transportbeton hinaus auch auf Betonwaren, wie Pflastersteine und die Rohr- und sonstige Fertigteilproduktion auszuweiten.

5 Möglichkeiten und Potentiale zur Verminderung des Energieverbrauchs

5.1 Thermischer Energieverbrauch

Energieeinsatz und Energiekosten

Brennstoffenergie wird bei der Zementherstellung im wesentlichen für das Brennen des Klinkers aufgewendet, der das wichtigste Vorprodukt des Zements ist. Beim in Deutschland überwiegend angewendeten Trockenverfahren, wird das mehlfein aufgemahlene Rohmaterial (im wesentlichen Kalkstein und Ton bzw. deren natürliches Gemisch, der Mergel) im Gegenstrom vom Ofenabgas auf Temperaturen von etwa 850 bis 900 °C vorgewärmt. Das Brennen des Klinkers erfolgt in Drehrohröfen, wo das Brenngut bei Flammentemperaturen von über 2 000 °C auf die notwendige Sintertemperatur von etwa 1 450 °C erwärmt wird. Diese hohe Temperaturen sind notwendig, damit sich die für die Zementeigenschaften notwendigen Klinkerphasen bilden können. In einem nachgeschalteten Klinkerkühler wird der fertiggebrannte Zementklinker im Gegenstrom zur Verbrennungsluft abgekühlt. Die so vorgewärmte Luft wird dem Ofen als Verbrennungsluft zugeführt.

Gemessen an der Bruttowertschöpfung der zementherstellenden Unternehmen betragen die Energiekosten im Jahr 1996 rund 35 %. Ihr Anteil am Nettoproduktionswert belief sich auf ca. 24 %¹. Aufgrund dieses hohen Energiekostenanteils, war und ist es zwingend erforderlich, daß die Zementindustrie Energie rationell einsetzt, um ihre Brennstoffenergiekosten zu senken. Der Energieanteil des Zements im fertigen Bauwerk ist dagegen sehr gering.

Die Verringerung des Brennstoffenergieverbrauchs der Zementindustrie in den letzten 50 Jahren ist in der beigefügten Grafik dargestellt (**Bild 1**). Im Gegensatz zu den Vorjahren ist darin der Energieverbrauch auf die produzierte Menge an Zementklinker (statt bisher Zement) bezogen, da Brennstoffenergie fast ausschließlich für den Klinkerbrennprozeß eingesetzt wird. Damit wird dem Wunsch Rechnung getragen, zukünftig auch die Entwicklung des klinkerbezogenen Energieverbrauchs anzugeben. Der anlagentechnische Wirkungsgrad und damit die Ausnutzung der Brennstoffenergie im Gesamtprozeß beträgt über 70 %. Diese hohe Effizienz ist das Ergebnis kontinuierlicher Verbesserungen der Verfahrenstechnik, die unabhängig von den Brennstoffkosten durchgeführt werden und eine langfristige Verbesserung der Energieeffizienz zur Folge haben. Diese Entwicklung ist nur möglich durch einen kontinuierlichen Verbesserungsprozeß, der einen dauernden hohen Kapitaleinsatz sowie hervorragenden

¹ Quelle: Statistisches Bundesamt, Kostenstrukturstatistik

de Ingenieurleistungen für die Optimierung bestehender sowie Entwicklung neuer Technologien erfordert.

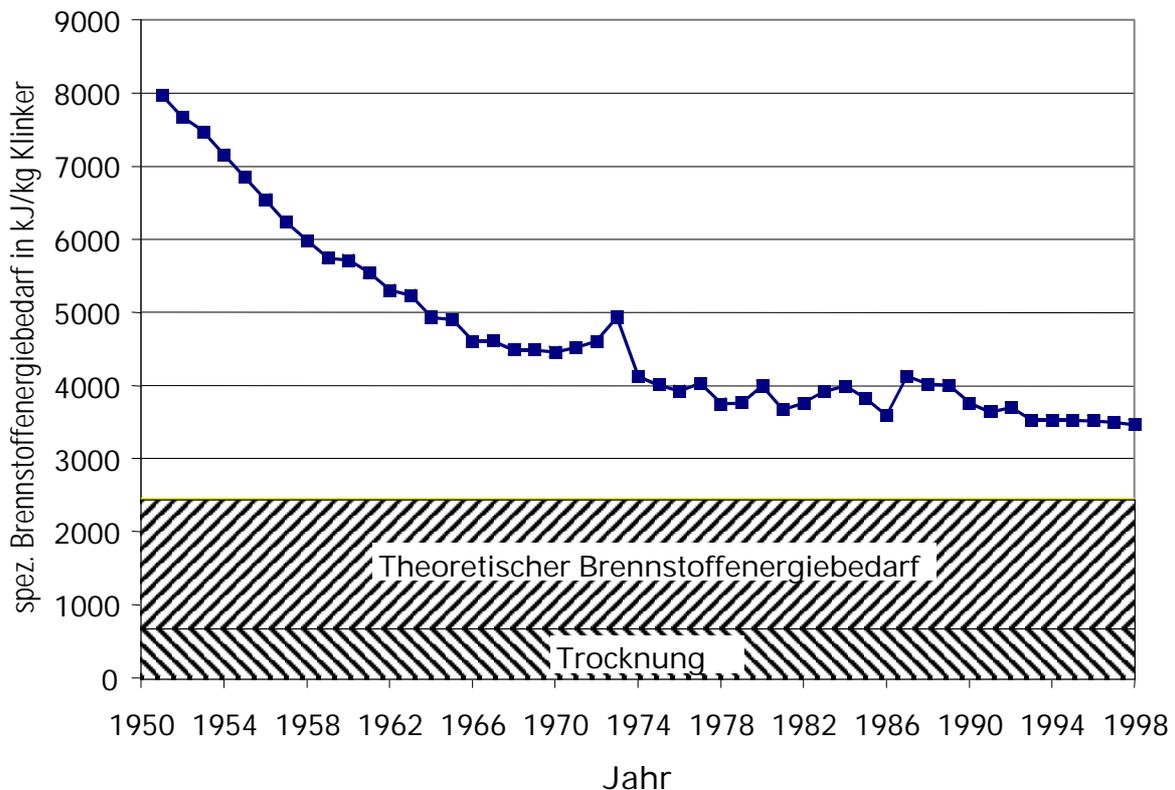


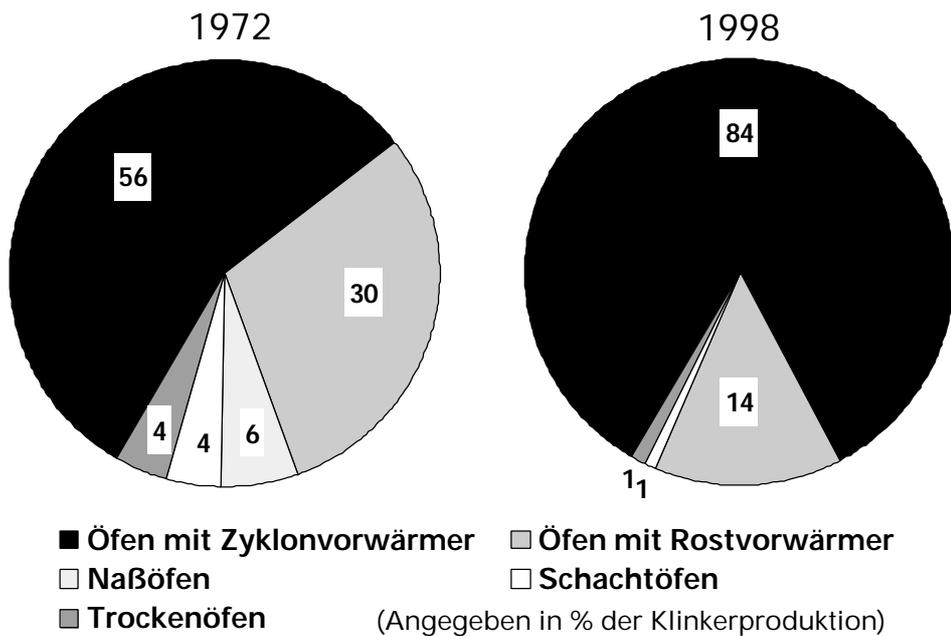
Bild 1:

Spezifischer Brennstoffenergieverbrauch

(bis 1987 alte Bundesländer, danach gesamte Bundesrepublik)

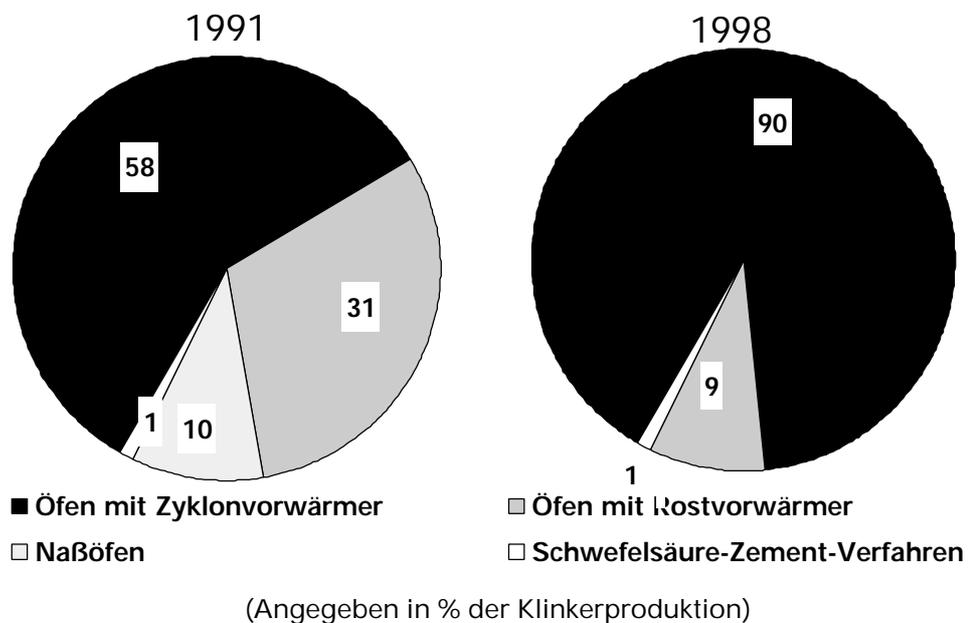
Entwicklung der Ofentechnik

Die Struktur der Ofenanlagen in den alten Bundesländern hat sich, wie **Bild 2** zeigt, langfristig deutlich verändert. So wurde der Anteil der energiesparenden Anlagen, die nach dem Trockenverfahren arbeiten (Öfen mit Zyklonvorwärmer), von 1972 bis 1998 von 56 % auf 84 % (Anteil an der genehmigten Klinkerleistung) gesteigert. Der Anteil der Rostvorwärmanlagen, bei dem das Rohmaterial in pelletierter Form aufgegeben wird, und daher ein höherer Feuchteanteil erforderlich ist, wurde von 30 auf 14 % mehr als halbiert. Öfen, die nach dem Naßverfahren arbeiten, sind vollständig stillgelegt worden.

**Bild 2:**

Entwicklung der Ofentechnik (alte Bundesländer)

Wie aus **Bild 3** hervorgeht, hat sich eine ähnliche Entwicklung in den neuen Bundesländern, allerdings in einem deutlich kürzeren Zeitraum von nur 8 Jahren (1990 bis 1998), vollzogen. Dort werden inzwischen sogar 90 % des Zementklinkers in Ofenanlagen nach dem Trockenverfahren hergestellt.

**Bild 3:**

Entwicklung der Ofentechnik (neue Bundesländer)

Neue Ofenanlagen werden heute ausschließlich als Zyklonvorwärmeröfen mit Calcinator, Tertiärluftleitung und Rostkühler gebaut. Der Vorteil dieses Verfahrens besteht zunächst nicht in einem geringeren Energieverbrauch, sondern insbesondere darin, daß der Drehofen kleiner dimensioniert werden kann und dadurch kostengünstiger ist. Die etwas geringeren Energieverluste, die sich bei diesem Verfahren aufgrund der geringeren Wärmeabstrahlung des Drehofens ergeben, werden bei gleicher Zyklonstufenzahl durch erhöhte Abgasverluste aufgehoben. Allerdings besteht bei Neuanlagen die Möglichkeit, diese Verluste durch den Einbau zusätzlicher Zyklonstufen auszugleichen. Durch die separate Vorcalcinierung des Rohmehls wird ein gleichmäßiger Ofenbetrieb erreicht, der eine wichtige Voraussetzung für einen niedrigen Brennstoffenergieverbrauch ist. Da Ofenanlagen mit Vorcalcinierung darüber hinaus meistens mit größerer Ofenleistung gebaut werden, führt der zunehmende Einsatz dieser Technologie zu einer Energieeffizienzsteigerung. Das im Vergleich zum Drehofen niedrigere Temperaturniveau im Vorcalcinator ermöglicht nicht zuletzt den Einsatz kostengünstigerer niederkalorischer Sekundärbrennstoffe.

Einige der weiterhin betriebenen Öfen mit Rostvorwärmer wurden betriebstechnisch soweit optimiert, daß sie mit einem spezifischen Energieverbrauch betrieben werden, der dem von Zyklonvorwärmeröfen vergleichbar ist. Ein Umbau von Öfen mit Rostvorwärmer auf das Trocken- bzw. Vorcalcinierverfahren ist mit hohen Investitionen verbunden, die nur durch eine deutliche Steigerung der Produktionskapazität wirtschaftlich durchführbar wären. Dies ist jedoch aufgrund der Marktsituation, die durch erhebliche Zementimporte v. a. aus den östlichen Nachbarländern sowie eine Kapazitätsauslastung der Drehöfen von nur 64 % (1998) geprägt ist, vollkommen unrealistisch. Daß die Zahl der Öfen mit Rostvorwärmer in den vergangenen Jahren zurückgegangen ist, ist vor allem auf Produktionsstillegungen zurückzuführen.

Optimierung des Klinkerkühlers

Die Wärmerekuperation aus dem fertiggebrannten Klinker hat einen maßgeblichen Einfluß auf den gesamten Energieverbrauch des Klinkerbrennprozesses. Die Fortschritte in der Klinkerkühlertechnik haben in den vergangenen zehn bis fünfzehn Jahren zu einer wesentlichen Verbesserung der thermischen Effizienz und der Verfügbarkeit der Anlagen geführt. Die aus dem Heißklinker zurückgewonnene Energie wird weitgehend zur Vorwärmung der im Ofen bzw. im Calcinator genutzten Verbrennungsluft genutzt. Ziel einer Modernisierung des Klinkerkühlers ist, höhere Verbrennungslufttemperaturen und gleichzeitig kältere Klinkertemperaturen mit niedrigeren Kühlluftvolumenströmen zu erreichen, ohne daß die Verfügbarkeit der Ofenanlage beeinträchtigt wird.

Die mit dieser Technologie heute möglichen Kühlerwirkungsgrade von bis zu 75 % stellen vorerst eine Grenze dar, die nur überschritten werden kann, wenn prozeß- und werkstofftechnische Probleme, die bei Verbrennungslufttemperaturen von über 1 000 bis 1 100 °C auftreten können, gelöst werden. Das Minderungspotential gegenüber einer Ofenanlage mit herkömmlicher Kühlertechnik beträgt ca. 40 bis 200 kJ/kg Klinker. Aufgrund der meist wirtschaftlich vertretbaren Investitionen wurden die Klinkerkühler der meisten Ofenanlagen in den vergangenen Jahren umgebaut oder modernisiert, so daß das verbleibende Potential dieser Technologie als gering einzustufen ist.

Der Einsparung an thermischer Energie steht ein leicht erhöhter elektrischer Energieverbrauch des modernisierten Klinkerkühlers gegenüber, da der erhöhte Druckverlust des Kühlrosts und des Klinkerbettes durch eine höhere Gebläseleistung aufgebracht werden muß.

Zyklonvorwärmer

Im Rohmehlvorwärmer wird der Energieinhalt der Ofenabgase für die Aufwärmung des Rohmehls auf bis zu 830 °C sowie für die Teilentsäuerung des Kalksteins weitgehend verwertet. Konventionelle Ofenanlagen verfügen überwiegend über einen vierstufigen, moderne über fünf- und sechsstufige Zyklonvorwärmer. Eine Verbesserung der Energierückgewinnung kann theoretisch durch eine Erhöhung der Zyklonstufenzahl und durch eine Verbesserung des Wärmeaustausches in den Zyklonstufen erreicht werden.

Ob grundsätzlich die Möglichkeit besteht, die Stufenzahl des Zyklonvorwärmers zu erhöhen, hängt im wesentlichen von der erforderlichen Trocknungsleistung für die Rohstoffe ab, die durch den Wärmeinhalt des Vorwärmerabgases aufgebracht werden muß. Die Abgasenergie eines vierstufigen Zyklonvorwärmers (Abgastemperatur 350 °C) reicht zur Trocknung einer Rohstofffeuchte von ca. 8 % aus. Dies entspricht etwa der durchschnittlichen Rohstofffeuchte in den deutschen Zementwerken. Bei geringerer Feuchte wird die überschüssige Abgasenergie durch Eindüsen von Wasser im Verdampfungskühler reduziert. Dabei dient die Einspritzung gleichzeitig zur Konditionierung der Abgase für eine optimale Staubabscheidung im Elektrofilter. Durch die Erweiterung des Vorwärmers um eine fünfte Stufe sinkt die einzudüsende Wassermenge. Das ist jedoch mit einer Verschlechterung der Abscheideeigenschaften des Staubes verbunden, die durch eine erhöhte Filterspannung im Elektrofilter wieder ausgeglichen werden muß.

Das Minderungspotential dieser Maßnahme beträgt ca. 80 bis 120 kJ/kg Klinker. Allerdings ist aufgrund der Rohstofffeuchte bei den meisten deutschen Ofenanlagen der Einbau einer weiteren Zyklonstufe nicht möglich. Begrenzt wird

diese Möglichkeit in vielen Zementwerken weiterhin dadurch, daß die Statik des Vorwärmergebäudes auf die bestehende Stufenzahl ausgelegt ist. Aus wirtschaftlicher Sicht würde sich daher ein solcher grundlegender Umbau höchstens dann lohnen, wenn der komplette Vorwärmer vollständig erneuert werden muß.

Die Geometrie der Zyklone war in den vergangenen Jahren Gegenstand von Weiterentwicklungen. Ziel war es dabei, den Abscheidegrad der Zyklone zu verbessern, ohne gleichzeitig den Druckverlust und damit den Stromverbrauch für die gesamte Ofenanlage zu erhöhen. Infolge der verringerten Abgasverluste kann eine Einsparung an thermischer Energie von ca. 25 bis 75 kJ/kg Klinker sowie des Stromverbrauchs um ca. 0,7 kWh/t Zement erreicht werden. Druckverlustarme Zyklone werden heute grundsätzlich in der Zementindustrie eingebaut, wenn die vorhandenen Zyklone erneuert werden müssen. Die Investition für den Austausch intakter Zyklone durch neue druckverlustarme ist durch den verminderten Brennstoffverbrauch allein nicht wirtschaftlich darstellbar.

Drehofen

Die moderne Vorcalciniertechnik in Verbindung mit Ofenführungssystemen ermöglichen es heute, Drehöfen kürzer zu bauen als dies vor wenigen Jahren noch der Fall war. Dadurch werden die spezifischen Abstrahlverluste des Ofens verringert. Obwohl es nicht an Versuchen gefehlt hat, die Abstrahlwärme des Ofens technisch sinnvoll zu nutzen, existiert bis heute kein wirtschaftliches Verfahren für deren Verwertung.

Maßnahmen zur Optimierung des Energieverbrauchs am Drehofen betreffen vor allem die Verhinderung von Falschlufteinbrüchen durch eine verbesserte Abdichtung von Ofeneinlauf bzw. -auslauf sowie den Einsatz primärluftarmer Drehofenbrenner. Die Technik der Ofenabdichtung ist in den vergangenen Jahren ebenso weiterentwickelt worden, wie die Brennertechnik. Beide Maßnahmen sind in der deutschen Zementindustrie heute weitgehend umgesetzt. Moderne Brenner erfordern einen Brennerluftanteil an der Verbrennungsluft von 6 bis 8 % gegenüber herkömmlichen Brennern mit 12 bis 13 %. Durch diese Verringerung des nicht vorgewärmten Verbrennungsluftanteiles kann eine Einsparung von 50 bis 80 kJ/kg Klinker erreicht werden.

Primärluftarme Brenner werden jedoch nicht in allen Ofenanlagen eingesetzt, da sie zu einem veränderten Temperaturprofil im Ofen führen. Die dadurch teilweise bedingten betriebstechnischen Probleme sowie gegebenenfalls veränderte Produkteigenschaften stellen eine Begrenzung des Einsatzes dieser Brenner dar.

Ofenführungssysteme

Aufgrund der Komplexität des Klinkerbrennprozesses kann der Einsatz von Ofenführungssystemen (z. B. Expertensysteme) zu einer Vergleichmäßigung des Ofenbetriebs beitragen. Das hierdurch erreichbare Einsparpotential beträgt ca. 20 bis 100 kJ/kg Klinker an thermischer Energie sowie bis zu 1 kWh/t Zement an Stromverbrauch. Die Vergleichmäßigung des Ofenbetriebs ist seit jeher ein wichtiges Ziel bei der Optimierung der Anlagentechnik in der Zementindustrie. Für den Einsatz eines Ofenführungssystems ist eine vorherige Optimierung des Prozesses zwingende Voraussetzung. An den meisten Ofenanlagen der deutschen Zementindustrie werden Ofenführungssysteme eingesetzt oder erprobt. Die Betriebserfahrungen zeigen, daß dadurch ein ruhigerer Ofenbetrieb und ein Abbau von kurzfristigen Überhitzungen der Sinterzone erreicht werden kann. Ob die erzielte Energieeinsparung auf das Führungssystem selbst oder die zuvor durchgeführten Optimierungsmaßnahmen zurückzuführen ist, läßt sich meist nicht differenzieren.

Einsatz von Mineralisatoren bzw. Flußmitteln

Damit beim Klinkerbrennprozeß die zur Bildung der Klinkerphasen notwendigen Reaktionen ausreichend schnell ablaufen können, sind Brennguttemperaturen von ca. 1 450 °C erforderlich. Durch Zugabe von Flußmitteln und/oder Mineralisatoren zum Rohstoffgemisch kann diese Temperatur in gewissen Grenzen gesenkt werden. Der Einsatz des üblicherweise verwendeten Calciumfluorids, das in natürlicher Form als Flußspat vorliegt, ist mit vergleichsweise hohen Kosten verbunden. Durch den Einsatz solcher Brennhilfsmittel kann eine Energieeinsparung von etwa 80 kJ/kg Klinker erreicht werden. Trotzdem werden diese Stoffe nur relativ selten eingesetzt, da sie auch ungünstige Auswirkungen auf den Ofenbetrieb und die Produkteigenschaften haben können. Darüber hinaus muß mit einem etwa 1 kWh/t Zement höheren Stromverbrauch gerechnet werden, da das Brenngut aufgrund der veränderten Fließigenschaften länger im Ofen verweilt. Weiterhin wurde festgestellt, daß der Mahlwiderstand solcher Klinker zunimmt. Das hat einen erhöhten Bedarf an elektrischer Energie zur Zementmahlung zur Folge.

Abwärmennutzung

Eine Nutzung der Energieverlustströme des Klinkerbrennprozesses wird bei modernen Drehofenanlagen bereits weitgehend betrieben. Damit erreichen Ofenanlagen der Zementindustrie Anlagenwirkungsgrade von über 70 %. Die verbleibenden Energieverlustströme sind – je nach Kühlerbauart - die Kühlerabluft, das Ofenabgas sowie ggf. Bypassgas. Der größte Teil dieser Energie wird zur Trocknung der Rohstoffe und der Kohle sowie gegebenenfalls von anderen Hauptbestandteilen des Zements (z. B. Hüttensand) verwertet. In den vergangenen 20 Jahren hat es nicht an Versuchen gefehlt, eine weitergehende

Nutzung dieser Abwärmeströme zu erreichen. Grundsätzlich ist eine solche Nutzung jedoch nur dann sinnvoll, wenn die erforderliche Trocknungsleistung für die Rohmaterialien gering ist. Die spezifischen Investitions- und Betriebskosten sinken dabei mit steigender Anlagengröße.

Hohe Abwärme-Nutzungsgrade lassen sich nur erreichen, wenn auf eine Umwandlung der thermischen in elektrische Energie verzichtet wird. Da in einem Zementwerk kein Dampf oder nur in geringem Umfang Heizleistung benötigt wird, lohnt sich deren Erzeugung nur, wenn eine gesicherte Abgabe, beispielsweise in Form von Fernwärme oder Prozeßdampf an einen benachbarten Ort oder Betrieb möglich ist. Problematisch ist in diesem Fall die Kopplung verschiedener Prozesse, die eine Redundanz der Energieerzeugungsanlagen erfordert. Gerade im Winter, wenn Fernwärme in besonderem Maße benötigt wird, ist der Zementabsatz jedoch gering. Dementsprechend werden Drehofenanlagen in der Regel über mehrere Wochen oder Monate zur Wartung stillgesetzt.

Bei der Erzeugung von elektrischer Energie ist einerseits der Eigenbedarf der Ofenanlage immer gegeben. Strom kann aber nur erzeugt werden, wenn der Ofen betrieben wird. Andererseits ist der Wirkungsgrad realisierter Stromerzeugungs-Anlagen so gering und die Investitions- und Betriebskosten so hoch, daß die Stromentstehungskosten deutlich über denen öffentlicher Anbieter liegen. Darüber hinaus erfordert die Kopplung des Kraftwerks mit dem Klinkerbrennprozeß höchste Anforderungen an die Verfügbarkeit beider Aggregate.

Höhere Wirkungsgrade lassen sich realisieren, wenn der Abhitzekeessel in den Zyklonvorwärmer installiert wird. Im Monitoring-Bericht 1997 wurde über den Einbau eines solchen Abhitzekeessels zwischen der zweiten und dritten Zyklonstufe berichtet. Bei dieser Anlage ist die Energienutzung wirtschaftlich, da eine vorhandene Kraftwerksinfrastruktur und eine vorhandene Dampfturbine genutzt werden können. Der Strom wird weitgehend im Zementwerk genutzt und teilweise an das öffentliche Netz abgegeben.

Die Frage, inwieweit die Nutzungsgrade der Wärmerückgewinnung zukünftig beispielsweise durch moderne Verfahren der Kraftwärmekopplung verbessert werden können, ist heute noch nicht endgültig zu beantworten. Allerdings steht die Komplexität dieser Anlagen dem Bestreben der Zementindustrie entgegen, eine maximale Verfügbarkeit durch Einfachheit der Anlagentechnik zu erzielen.

Verbleibende Potentiale

Es ist nicht möglich, die Einsparpotentiale der in den vorhergehenden Kapiteln beschriebenen Einzelmaßnahmen aufzusummieren und daraus das verbleibende Gesamtpotential abzuschätzen. In **Bild 4** ist der thermische Energiebedarf

aller in Deutschland betriebenen Ofenanlagen in Abhängigkeit der Ofenleistung dargestellt. Im Bild ist zum Vergleich der minimale thermische Energieverbrauch dargestellt, der sich heute durch Realisierung modernster Anlagentechnik bei dem Neubau einer Ofenlinie realisieren läßt. Daraus läßt sich berechnen, daß selbst bei Stilllegung sämtlicher bestehender Ofenanlagen und deren Neubau „auf der grünen Wiese“ nur eine Reduzierung des thermischen Energiebedarfs von maximal 9 % zu erreichen wäre. Hierzu wäre ein Investitionsbedarf von 2 bis 4 Mrd. DM notwendig. Diese Summe liegt in der Größenordnung des Jahresumsatzes der deutschen Zementindustrie, der 1998 knapp 5,4 Mrd. DM betrug.

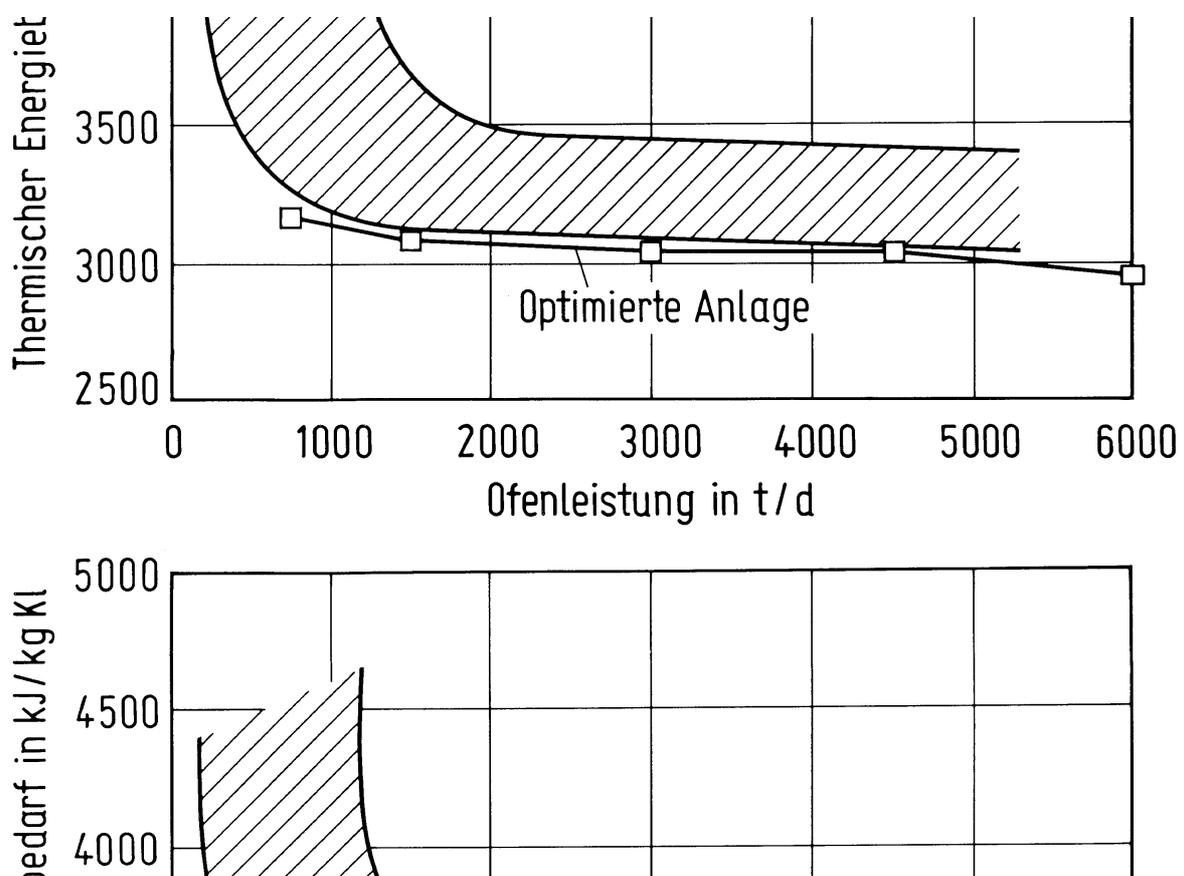


Bild 4:

Thermischer Energieverbrauch der in Deutschland betriebenen Ofenanlagen

5.2 Elektrischer Energieverbrauch

Elektrische Energie wird bei der Zementherstellung vor allem für die Rohmaterialaufbereitung (etwa 35 %), zum Brennen und Kühlen des Klinkers (ca. 22 %) und für die Zementmahlung (ca. 38 %) aufgewendet. Der stetige Anstieg des elektrischen Energieverbrauchs durch höhere Anforderungen an die Produktqualität, d. h. feinere Aufmahlung des Zements und an den Umweltschutz

konnte zwischenzeitlich gestoppt werden. In **Bild 5** ist die Entwicklung des elektrischen Energieverbrauchs über die letzten fast 50 Jahre aufgetragen.

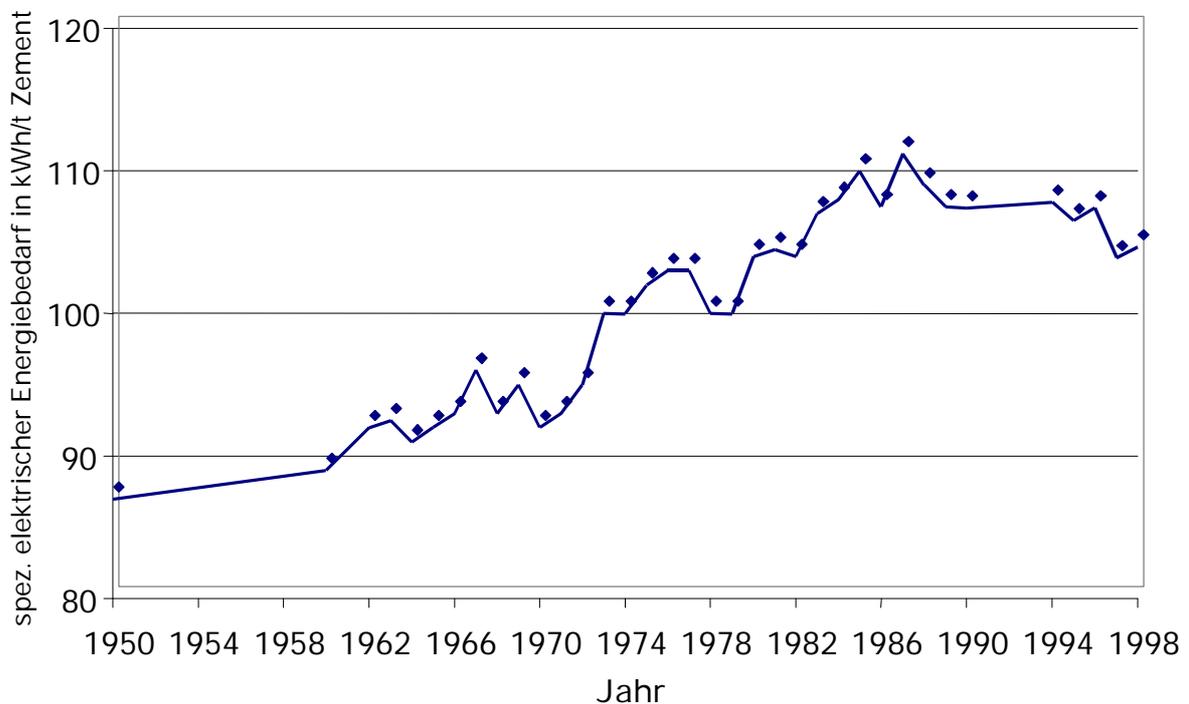


Bild 5:

Spezifischer elektrischer Energieverbrauch

(bis 1987 alte Bundesländer, danach gesamte Bundesrepublik)

Der spezifische elektrische Energieverbrauch macht bei Zementwerken etwas mehr als 10 % des Gesamtenergieverbrauchs aus. Die Energiekosten verteilen sich allerdings etwa je zur Hälfte auf Brennstoffe und Strom. Maßnahmen zur Verringerung zielen in erster Linie auf die energieeffizientere Zementmahlung ab. Allerdings stehen Energieverbrauch und Zementqualität in engem Zusammenhang. Effizientere Mahlsysteme sind heute bereits in großem Umfang im Einsatz, jedoch kann das Potential nach wie vor nicht in vollem Umfang genutzt werden, da die Gebrauchseigenschaften der Zemente aus den effizienteren Mühlen, aber bei steiler Kornverteilung, nicht mit denen aus herkömmlichen Kugelmühlen vergleichbar sind.

Neben dem Mühlentyp hängt die erreichbare Energieeinsparung insbesondere von der Zementart und deren Leistungsfähigkeit sowie dem Mahlsystem ab. Eine zu erwartende Energieeinsparung kann daher nicht absolut angegeben werden sondern nur relativ zum Energieaufwand bei der Mahlung in der Kugelmühle. So läßt die Anordnung einer Gutbett-Walzenmühle zur Vorzerkleinerung des Mahlguts in einer Umlaufmahlanlage mit Kugelmühle eine Energieeinsparung von 7 bis 15 % zu. Je größer der mit der Gutbett-Walzenmühle er-

zeugte Feingutanteil ist, desto größer ist die Energieausnutzung. Daher ist man aus energetischer Sicht bestrebt, die Gesamtzerkleinerung in effizienteren Mühlen durchzuführen. Wie Untersuchungen zeigen, könnte dadurch der Energieaufwand für die Zementmahlung um 25 bis 50 % vermindert werden. Neben den veränderten Produkteigenschaften steht einem umfassenden Einsatz dieser sogenannten Fertigmahlung auf der Gutbett-Walzenmühle jedoch auch die mangelnde Verfügbarkeit dieser Mühlen entgegen. Die erforderlichen hohen Mahldrücke führen häufig zu einem erheblichen Verschleiß der Mahlwalzen.

5.3 Verstärkter Einsatz von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen

Neben der weitgehend abgeschlossenen verfahrenstechnischen Modernisierung ihrer Ofen- und Mahlanlagen sieht die Zementindustrie in der verstärkten Herstellung von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen eine Möglichkeit, den auf die Tonne Zement bezogenen Energieverbrauch nennenswert zu senken. Grundsätzlich erlauben es nationale und europäische Zementnormen, den gebrannten Zementklinker teilweise durch andere Stoffe zu ersetzen. Eine technische Bedeutung weisen in Deutschland allerdings nur Hüttensand aus der Herstellung von Roheisen sowie ungebrannter Kalkstein auf. Auf der anderen Seite sind bei der Abschätzung des darin bestehenden Potentials die unterschiedlichen Eigenschaften und die Leistungsfähigkeit dieser Zementarten zu berücksichtigen.

In **Tafel 5** ist eine Übersicht der insgesamt 12 zur Zeit in Deutschland genormten Zemente wiedergegeben. In Abhängigkeit vom Gehalt an weiteren Hauptbestandteilen neben Klinker werden sie in Hauptgruppen CEM I, CEM II und CEM III unterteilt. Hüttensandhaltige Zemente findet man sowohl in der Gruppe mit einem mittleren Gehalt an weiteren Hauptbestandteilen von 6 bis 35 % (CEM II) als auch in der Gruppe mit hohem Gehalt zwischen 36 und 80 % (CEM III).

Tafel 5: Klassifizierung der Zemente mit unterschiedlichen Arten und Gehalten an weiteren Hauptbestandteilen neben Klinker nach DIN 1164, Teil 1

Zementart			weitere Hauptkomponente	
Gruppe	Benennung	Kurzzeichen	Art	Anteil %
CEM I	Portlandzement	CEM I	-	0
CEM II	Portlandhüttenzement	CEM II/A-S	Hüttensand	6 – 20
		CEM II/B-S		21 – 35
	Portlandpuzzolanzement	CEM II/A-P	Natürliches	6 – 20
		CEM II/B-P	Puzzolan	21 – 35
	Portlandflugaschezement	CEM II/A-V	Steinkohlenflugasche	6-20
	Portlandölschieferzement	CEM II/A-T	Gebrannter	6 - 20
		CEM II/B-T	Ölschiefer	21 – 35
	Portlandkalksteinzement	CEM II/A-L	Kalkstein	6 – 20
Portlandflugaschehüttenzement	CEM II/B-SV	Steinkohlenflugasche und Hüttensand	10 – 20 10 – 20	
CEM III	Hochofenzement	CEM III/A	Hüttensand	36 – 65
		CEM III/B		66 - 80

Grundsätzlich unterscheidet sich die Reaktionsfähigkeit von Hüttensand (latent-hydraulische Reaktion) von der des Zementklinkers (hydraulische Reaktion). Hüttensand hydratisiert – abhängig von der Mahlfinheit und Zusammensetzung - langsamer als Zementklinker. Die jeweilige Leistungsfähigkeit hütten-sandhaltiger Zemente ist bei der Betonherstellung zu berücksichtigen. Normalerweise kommen die Portlandhüttenzemente (CEM II) hinsichtlich ihrer beton-technologischen Eigenschaften den Portlandzementen sehr nahe. Hochofenzemente (CEM III) mit üblicher Mahlfinheit unterscheiden sich von Portlandzementen vor allem durch

1. eine langsamere Hydratationsgeschwindigkeit. Aufgrund der langsameren Erhärtung verfügen sie nur über eine geringere Anfangsfestigkeit. Da sich die Hüttensandhydratation bei ausreichend hohem Feuchtigkeitsangebot weiter fortsetzt, erreichen diese Zemente häufig eine höhere Endfestigkeit im Mörtel und Beton als Portlandzement. Aufgrund dieser verlangsamten Reaktionsgeschwindigkeit sind Betone aus hütten-sandreichen Zementen allerdings nachbehandlungsempfindlicher als vergleichbare Betone aus Portlandzement. Demnach muß der Beton gegen Austrocknung geschützt werden.
2. eine niedrigere Wärmeentwicklung, die auf den verminderten Klinkeranteil sowie auf die langsamere Reaktion des Hüttensandes zurückzuführen ist.

Daher können hüttensandreiche Zemente insbesondere bei massigen Bauteilen (z. B. Fundamenten) vorteilhaft eingesetzt werden. Umgekehrt sind bei schlanken Bauteilen, insbesondere bei niedrigen Außentemperaturen, eher schnell erhärtende Zemente gefragt.

Mit hüttensandreichen Zementen können nach ausreichend langer Nachbehandlung Betone mit einem sehr dichten Gefüge hergestellt werden. Solche Betone lassen sich daher z. B. überall dort vorteilhaft einsetzen, wo eine hohe Widerstandsfähigkeit des Betons gegenüber chemisch angreifenden Medien verlangt wird. Außerdem weisen hüttensandreiche Zemente einen niedrigen wirksamen Alkaligehalt auf, der zur Unterbindung einer schädigenden Alkali/Zuschlag-Reaktion erforderlich ist.

Die geschilderten Einflüsse des Hüttensandes auf einige betontechnologische Eigenschaften zeigen, daß die Auswahl eines geeigneten Zements abhängig vom jeweiligen Anwendungsfall und somit ein einfacher Austausch von Zementsorten nicht möglich ist.

In CEM II-Zementen kann Hüttensand Zementklinker im Verhältnis 1 : 1 ersetzen. Dies bedeutet, daß die für die eingesparte Klinkermenge erforderliche thermische Energie fast vollständig eingespart werden kann. Zusätzliche thermische Energie ist allerdings notwendig für die Trocknung des Hüttensandes sowie gegebenenfalls für den Transport vom Stahlwerk zum Zementwerk. Außerdem ist Hüttensand schwerer mahlbar als Zementklinker. Deshalb erfordern hüttensandhaltige Zemente eine feinere Aufmahlung, um mit Portlandzement vergleichbare Eigenschaften zu erzielen. Der für die Zementmahlung erforderliche elektrische Energieaufwand kann je nach Zementsorte bis auf das Doppelte ansteigen. Da der thermische Energieeinsatz jedoch bei weitem den größten Anteil des Gesamtprimärenergieverbrauchs ausmacht, ist insgesamt z. B. für die Herstellung eines CEM II/B-S mit einem Hüttensandanteil von 35 % eine Einsparung an Primärenergie um ca. 22 % möglich. Wird der Hüttensandanteil bis auf maximal 80 % erhöht, beträgt die Einsparmöglichkeit sogar 48 %. Hinsichtlich der Entstehung von CO₂-Emissionen besteht in der Substitution von Zementklinker ein weiterer Vorteil dadurch, daß auch der rohstoffbedingte Anteil des emittierten CO₂ vermieden wird.

Insgesamt fielen in der deutschen Stahlindustrie im Jahr 1997 knapp 7,5 Mio. t Hochofenschlacke an (Geiseler, 1998). Im Jahr 1996 wurden etwa 4,2 Mio. t zu Hüttensand granuliert. Die Stahlindustrie wird diesen Anteil bis zum Jahr 2001 auf ca. 6,1 Mio. t/a steigern. Dies zeigt sich u. a. in der Inbetriebnahme neuer Granulationsanlagen z. B. in Eisenhüttenstadt (siehe Monitoring-Bericht 1995/96) und in Salzgitter (siehe Monitoring-Bericht 1997). Insgesamt wird die

erzeugte Hüttensandmenge somit innerhalb von nur fünf Jahren um ca. 1,9 Mio. t/a ansteigen. Darüber hinaus wird Hüttensand aus dem benachbarten Ausland nach Deutschland importiert.

Die deutsche Zementindustrie hat sich zum Ziel gesetzt, diese zusätzlich anfallende Hüttensandmenge zu übernehmen und vollständig zur Zementherstellung zu verwerten. Der Marktanteil hüttensandhaltiger Zemente beträgt traditionell in Deutschland etwa 20 % der Gesamtproduktion. Die Zementindustrie hat in 1995 ca. 3,6 Mio. t Hüttensand verarbeitet. Der größte Teil davon wurde zur Herstellung hüttensandhaltiger Zemente genutzt. Wenn die deutsche Zementindustrie ihr Ziel erreicht, wird diese Menge bis zum Jahr 2000 um mehr als 1,5 Mio. t/a ansteigen und die gleiche Menge Zementklinker ersetzen. Dies entspräche einer Verminderung der energiebedingten CO₂-Emissionen (Brennstoffe und Strom) von ca. 330 000 t/a. Schließt man die Vermeidung rohstoffbedingter CO₂-Emissionen aus der Entsäuerung des Kalksteins mit ein, entspräche dies sogar einer Verminderung um ca. 1,1 Mio. t/a. Der Erfolg dieses Prozesses hängt jedoch wesentlich von der Marktakzeptanz der mit Hüttensand hergestellten Zementarten ab.

6 Emissionen klimarelevanter Gase bei der Zementherstellung

6.1 Energiebedingte CO₂-Emissionen

Bei der Umsetzung von Brennstoffenergie zur Erzeugung von Prozeßwärme entstehen beim Klinkerbrennprozeß CO₂-Emissionen. Darüber hinaus wird Brennstoffenergie für Trocknungsprozesse für andere Hauptbestandteile des Zements, wie z. B. Hüttensand aufgewendet. Über die brennstoffbedingten CO₂-Emissionen der Zementindustrie wird im Rahmen des Monitorings regelmäßig berichtet. Im Jahr 1998 betragen sie 0,221 t CO₂/t Zement oder 7,66 Mio. t/a. Hierin sind die CO₂-Emissionen aus dem Einsatz von Sekundärbrennstoffen nicht berücksichtigt, da sie fossile Brennstoffe vollständig substituieren. Da die Abfälle ansonsten an anderer Stelle ihren Kohlenstoffgehalt zu CO₂ freisetzen würden, führt der Einsatz von Sekundärbrennstoffen insgesamt zu einer Verminderung der CO₂-Emissionen.

Eine Substitution der traditionellen fossilen Brennstoffe Braun- und Steinkohle durch andere Brennstoffe mit niedrigeren spezifischen CO₂-Emissionen, wie z. B. Erdgas ist aus Kostengründen nicht möglich. Da die Brennstoffkosten maßgeblich die Herstellkosten des Zements beeinflussen, gehen die Bestrebungen der Zementindustrie aus Wettbewerbsgründen dahin, fossile Brennstoffe verstärkt durch Abfallbrennstoffe zu ersetzen.

Der elektrische Energieverbrauch macht nur etwa 10 % des gesamten Energieverbrauchs der Zementwerke aus. Als Primärenergie gerechnet ist der Anteil des elektrischen Energieverbrauchs und damit der CO₂-Emissionen, die sich aus deren Einsatz ergeben, größer. Die durch den Stromverbrauch bedingte CO₂-Emission betrug im Jahr 1998 0,07 t CO₂/t Zement oder 2,43 Mio. t/a. Eine Eigenstromerzeugung findet in der deutschen Zementindustrie bisher praktisch nicht statt. Nur in einem einzigen Zementwerk wurde ein Abhitzekeessel in den Vorwärmer eingebaut und der erzeugte Dampf auf einer vorhandenen Turbine zur Stromerzeugung genutzt (siehe Monitoring-Bericht 1997). Eine zweite Anlage, die auf Basis der ORC-Technik arbeitet, wurde erst kürzlich in Betrieb genommen (s. Kap. 4).

6.2 Rohstoffbedingte CO₂-Emissionen

Bei der Entsäuerung des wichtigsten Rohstoffs Kalkstein (chemisch CaCO₃) wird CO₂ freigesetzt. Die je Tonne produzierten Klinkers erzeugte rohstoffbedingte CO₂-Emission hängt von der Rohstoffrezeptur ab, variiert aber nur in geringem Maße. Sie beträgt ca. 0,53 t CO₂/t Klinker oder derzeit ca. 0,443 t CO₂/t Zement. Aus der in 1998 erzeugten Klinkermenge von 29,0 Mio. t ergibt sich eine rohstoffbedingte CO₂-Emission von 12,76 Mio. t pro Jahr. Damit ergeben sich für das Jahr 1998 die in **Tafel 6** dargestellten spezifischen bzw. absoluten CO₂-Emissionen. Eine Verminderung der rohstoffbedingten CO₂-Emissionen ist nur –

in begrenztem Maße – durch die verstärkte Herstellung von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen - möglich.

Tafel 6: CO₂-Emissionen der Zementindustrie im Jahr 1998

	Absolute CO₂- Emissionen in 10⁶ t/a	Spezifische CO₂- Emissionen in t CO₂/t Zement
thermisch bedingt ¹⁾	7,56	0,218
elektrisch bedingt	2,43	0,070
rohstoffbedingt	12,76	0,443

1) ohne Sekundärbrennstoffe

6.3 Weitere klimarelevante Gase

Bei der dritten Vertragsstaatenkonferenz zur Klimarahmenkonvention, die im Dezember 1997 in Kyoto stattfand, wurden Minderungsziele nicht nur für CO₂ sondern ebenfalls für die Treibhausgase Methan (CH₄), Distickstoffoxid (N₂O), Schwefelhexafluorid (SF₆), wasserstoffhaltige Fluorkohlenwasserstoffe (HFKW) sowie perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW) festgelegt. Diese Gase haben gegenüber CO₂ ein deutlich höheres Treibhauspotential.

SF₆, HFKW und FKW wurden bisher im Abgas von Drehofenanlagen der Zementindustrie nicht festgestellt. Die Entstehung dieser Stoffe ist beim Klinkerbrennprozeß aufgrund der Reaktionsbedingungen praktisch auszuschließen. N₂O kann bei Verbrennungsprozessen in einem Temperaturbereich zwischen 800 und 900 °C entstehen, wenn bestimmte Reaktionsbedingungen (teilweise reduzierende Atmosphäre, Existenz von Vorläuferverbindungen) auftreten. Darüber hinaus kann N₂O gebildet werden, wenn ammoniumhaltige Verbindungen mit dem Ziel der Verminderung der NO_x-Emissionen (SNCR-Verfahren) zudosiert werden. Allerdings sind auch hierfür die genannten spezifischen Betriebsbedingungen Voraussetzung. Wie Messungen des Forschungsinstituts der Zementindustrie gezeigt haben, liegen die N₂O-Emissionen von Drehofenanlagen der Zementindustrie mit < 1 bis 5 mg/m³ im Bereich der Nachweisgrenze des Meßverfahrens, und das unabhängig davon, ob NO_x-mindernde Reduktionsmittel eingesetzt werden oder nicht.

Methan ist im Abgas von Drehofenanlagen der Zementindustrie als Spurenbestandteil enthalten. Es entsteht aus organischen Bestandteilen, die in den Rohstoffen Kalkstein und Ton enthalten sind. Die Emissionen organischer Verbindungen, ausgedrückt als Summe C, betragen bei Zementwerken zwischen 10

und 100 mg/m^3 , im Mittel ca. 30 mg/m^3 . Wie Untersuchungen des Forschungsinstituts gezeigt haben, beträgt der Anteil des Methans daran etwa 50 %. Auf Basis dieser groben Abschätzung ergibt sich eine spezifische CH_4 -Emission bei der Zementherstellung von ca. 30 g/t Zement. Selbst unter Berücksichtigung des CO_2 -Äquivalenzfaktors von Methan ($28 \text{ kg CO}_2/\text{kg CH}_4$) ergibt sich daraus ein Anteil an der Gesamtemission von Treibhausgasen der Zementindustrie von nur ca. 0,1 %.

Aufgrund dieses vernachlässigbaren Beitrags anderer Gase an der Emission von Treibhausgasen von Zementwerken besteht keine Notwendigkeit, die Selbstverpflichtungserklärung der Zementindustrie auf diese zu erweitern.

CO₂-MONITORING

- Bitte in grau unterlegte Felder im EDV-Programm MS-Excel die entsprechenden Daten eintragen -

Branche (Verband)	Verein Deutscher Zementwerke
--------------------------	-------------------------------------

Verwendete Datenbasis: (STABUA-Daten = 1; Verbandsdaten = 2) 2

Tabelle I. Gesamtbrennstoffeinsatz fossiler Energieträger

	Basisjahr 1987	Berichtsjahr 1995	Berichtsjahr 1996	Berichtsjahr 1997	Berichtsjahr 1998
Brennstoff ¹	[Menge/a]	[Menge/a]	[Menge/a]	[Menge/a]	[Menge/a]
Steinkohlen [t/a]	1.644.625	1.469.786	1.294.985	1.294.722	1.084.902
Steinkohlenbriketts [t/a]	0	0	0	0	0
Steinkohlenkoks [t/a]	0	0	0	0	0
Rohbraunkohlen [t/a]	0	0	0	0	0
Braunkohlenbriketts [t/a]	0	0	0	0	0
Braunkohlenkoks[t/a]	0	0	0	0	0
Braunkohlenstaub [t/a]	2.611.224	1.558.587	1.495.225	1.463.439	1.550.596
Hartbraunkohlen [t/a]	0	0	0	0	0
Petrolkoks [t/a]	27.296	323.475	320.868	306.266	329.162
Heizöl-S [t/a]	109.673	81.528	58.125	54.245	112.235
Heizöl-L [t/a]	4.683	6.127	7.227	5.794	6.578
Erdgas [1000 m³/a] bzw.	0	0	0	0	0
Erdgas [1000 KWh/a]	666.667	308.145	354.125	490.893	186.774
Erdölgas [1000 m ³ /a]	0	0	0	0	0
Flüssiggas [t/a]	0	0	0	0	0
Raffineriegas [1000 m ³ /a]	0	0	0	0	0
Kokereigas (Ortsgas) [1000 m³/a] bzw.	0	0	0	0	0
Kokereigas (Ortsgas) [1000 KWh/a]	0	0	0	0	0
Gichtgas [1000 m ³ /a]	0	0	0	0	0
Grubengas [1000 m ³ /a]	0	0	0	0	0
Sonstige Regelbrennstoffe [t/a]	135.514	27.141	26.354	23.268	50.523

Anm: Als Heizwerte (Hu) in [GJ/Bezugseinheit] werden - sofern auf Daten des Statistischen Bundesamtes (STABUA)

zurückgegriffen wird - die oben genannten STABUA-Angaben verwendet.

Falls verbandseigene Energieverbrauchswerte vorliegen, werden die Heizwerte der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB) angesetzt.

1) Die Brennstoffverbräuche aus den Angaben des Statistischen Bundesamtes sind - sofern verwendet - neben den fett gedruckten Rubriken in die grau unterlegten Felder einzutragen.

[Bitte branchenspezifische Besonderheiten vermerken; z.B. Anteil des Brennstoffeinsatzes in (Kraftwerks-) Betreiber-gesellschaften mit KWK u.ä.; ggf. mit Quellenangabe]

Datenbasis : Erhebung durch den Verein Deutscher Zementwerke

Tabelle III enthält nicht den Einsatz von Sekundärbrennstoffen

Branchenspezifische CO₂- Emissionsfaktoren für Braunkohlenstaub und Petrolkoks

Basisjahr 1987

Selbstverpflichtung bezieht sich auf den spezifischen thermischen Energieverbrauch

Hu-STABUA

Tabelle Ia. Heizwerte (H_n) fossiler Energieträger (Statist. Bundesamt)

	Basisjahr 1987	Berichtsjahr 1995	Berichtsjahr 1996	Berichtsjahr 1997	Berichtsjahr 1998	Berichtsjahr 1999
Brennstoff	[GJ/ME]	[GJ/ME]	[GJ/ME]	[GJ/ME]	[GJ/ME]	[GJ/ME]
Steinkohlen [t/a]	29,308	29,308	29,308	29,308	29,308	
Steinkohlenbriketts [t/a]	29,308	29,308	29,308	29,308	29,308	
Steinkohlenkoks [t/a]	28,428	28,429	28,429	28,429	28,429	
Rohbraunkohlen [t/a]	7,913	8,792	8,792	8,792	8,792	
Braunkohlenbriketts [t/a]	20,222	20,223	20,223	20,223	20,223	
Braunkohlenkoks[t/a]	20,222	20,223	20,223	20,223	20,223	
Braunkohlenstaub [t/a]	21,446	21,466	21,466	21,466	21,466	
Hartbraunkohlen [t/a]	14,654	13,275	13,275	13,275	13,275	
Petrolkoks [t/a]	29,308	31,018	31,018	31,018	31,018	
Heizöl-S [t/a]	41,031	40,614	40,614	40,614	40,614	
Heizöl-L [t/a]	42,705	42,733	42,733	42,733	42,733	
Erdgas [1000 m ³ /a]	31,736	31,736	31,736	31,736	31,736	
Erdgas [1000 KWh/a]	3,249	3,249	3,249	3,249	4,249	
Erdölgas [1000 m ³ /a]	31,736	31,736	31,736	31,736	31,736	
Flüssiggas [t/a]	45,887	45,987	45,987	45,987	45,987	
Raffineriegas [1000 m ³ /a]	31,736	31,736	31,736	31,736	31,736	
Kokereigas (Ortsgas) [1000 m ³ /a]	31,736	31,736	31,736	31,736	31,736	
Kokereigas (Ortsgas) [1000 KWh/a]	3,249	3,249	3,249	3,249	3,249	
Gichtgas [1000 m ³ /a]	31,736	31,736	31,736	31,736	31,736	
Grubengas [1000 m ³ /a]	31,736	31,736	31,736	31,736	31,736	
Sonstige Regelbrennstoffe [t/a]	21,400	21,400	21,400	21,400	21,400	

Quelle: Statistisches Bundesamt, FS 4, R. 4.1.1. Die Heizwerte der nicht in der Reihe des Statistischen Bundesamtes aufgeführten Energieträger entsprechen den Angaben der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen.

Tabelle Ib. Heizwerte (H_u) fossiler Energieträger (Arbeitsg. Energiebilanzen)

	Basisjahr 1987	Berichtsjahr 1995 ²	Berichtsjahr 1996 ²	Berichtsjahr 1997	Berichtsjahr 1998
Brennstoff	[GJ/ME]	[GJ/ME]	[GJ/ME]	[GJ/ME]	[GJ/ME]
Steinkohlen [t/a]	29,033	29,491	29,491	29,491	29,491
Steinkohlenbriketts [t/a]	31,401	31,401	31,401	31,401	31,401
Steinkohlenkoks [t/a]	28,430	28,601	28,601	28,601	28,601
Rohbraunkohlen [t/a]	8,994	8,781	8,781	8,781	8,781
Braunkohlenbriketts [t/a]	19,339	19,457	19,457	19,457	19,457
Braunkohlenkoks[t/a]	29,726	29,935	29,935	29,935	29,935
Braunkohlenstaub [t/a]	21,446	21,466	21,466	21,466	21,466
Hartbraunkohlen [t/a]	14,963	13,275	13,275	13,275	13,275
Petrolkoks [t/a]	29,308	31,018	31,018	31,018	31,018
Heizöl-S [t/a]	41,031	40,614	40,614	40,614	40,614
Heizöl-L [t/a]	42,705	42,733	42,733	42,733	42,733
Erdgas [1000 m ³ /a]	31,736	31,736	31,736	31,736	31,736
Erdgas [1000 Kwh/a]	3,249	3,249	3,249	3,249	3,249
Erdölgas [1000 m ³ /a]	31,736	31,736	31,736	31,736	31,736
Flüssiggas [t/a]	45,887	45,987	45,987	45,987	45,987
Raffineriegas [1000 m ³ /a]	31,736	31,736	31,736	31,736	31,736
Kokereigas (Ortsgas) [1000 m ³ /a]	31,736	31,736	31,736	31,736	31,736
Kokereigas (Ortsgas) [1000 KWh/a]	3,249	3,249	3,249	3,249	3,249
Gichtgas [1000 m ³ /a]	31,736	31,736	31,736	31,736	31,736
Grubengas [1000 m ³ /a]	31,736	31,736	31,736	31,736	31,736
Sonstige Regelbrennstoffe [t/a]	21,400	21,400	21,400	21,400	21,400

1) Für die neuen Bundesländer sind die frühest verfügbaren Heizwerte aus dem Jahr 1991 verwendet und mit dem Brennstoffverbrauch aus dem Jahr 1990 gewichtet.

2) Bei den Heizwerten der Festbrennstoffe handelt es sich um mit den Angaben der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen über die Energieverbräuche in den alten und neuen Bundesländern gewichtete Daten.

Für die alten und neuen Bundesländer sind die frühest verfügbaren Heizwerte aus dem Jahr 1993 verwendet und mit den Brennstoffverbräuchen aus dem Jahr 1995 gewichtet.

Joule

Tabelle Ic.

Gesamtbrennstoffeinsatz fossiler Energieträger, in GJ

	Basisjahr 1987	Berichtsjahr 1995	Berichtsjahr 1996	Berichtsjahr 1997	Berichtsjahr 1998
	[GJ/a]	[GJ/a]	[GJ/a]	[GJ/a]	[GJ/a]
Brennstoff					
Steinkohlen	47.747.582	43.345.305	38.190.267	38.182.498	31.994.726
Steinkohlenbriketts	0	0	0	0	0
Steinkohlenkoks	0	0	0	0	0
Rohbraunkohlen	0	0	0	0	0
Braunkohlenbriketts	0	0	0	0	0
Braunkohlenkoks	0	0	0	0	0
Braunkohlenstaub	56.000.000	33.456.355	32.096.247	31.413.937	33.284.825
Hartbraunkohlen	0	0	0	0	0
Petrolkoks	800.000	10.033.545	9.952.685	9.499.765	10.209.947
Heizöl-S	4.500.000	3.311.173	2.360.669	2.203.093	4.558.299
Heizöl-L	200.000	261.817	308.811	247.608	281.090
Erdgas	2.165.733	1.001.040	1.150.412	1.594.715	606.755
Erdölgas	0	0	0	0	0
Flüssiggas	0	0	0	0	0
Raffineriegas	0	0	0	0	0
Kokereigas (Ortsgas)	0	0	0	0	0
Gichtgas	0	0	0	0	0
Grubengas	0	0	0	0	0
Sonstige Regelbrennstoffe	2.900.000	580.818	563.966	497.936	1.081.187
Summen	114.313.315	91.990.051	84.623.057	83.639.553	82.016.829
Differenz (Berichtsjahr-Vorjahr) absolut	---	---	-7.366.994	-983.504	-1.622.724
Differenz (Berichtsjahr-Vorjahr) in vH	---	---	-8,0	-1,2	-1,9
Differenz (Berichtsjahr-Basisjahr) absolut	---	-22.323.264	-29.690.258	-30.673.762	-32.296.486
Differenz (Berichtsjahr-Basisjahr) in vH	---	-19,5	-26,0	-26,8	-28,3

Anm.: [Menge Brennstoff/a] multipliziert mit Hu =[GJ/a].

Strombilanz

Tabelle II. Nettofremdstrombezug (NFS)

	Basisjahr 1987	Berichtsjahr 1995	Berichtsjahr 1996	Berichtsjahr 1997	Berichtsjahr 1998
Strom bezogen [MWh/a]	3.802.415	3.643.891	3.495.830	3.466.606	3.630.086
Strom abgegeben [MWh/a]	0	0	0	0	0
NFS [MWh/a]	3.802.415	3.643.891	3.495.830	3.466.606	3.630.086
BW	10,434	10,434	10,434	10,434	10,434
NBE [GJ/a]	39.674.398	38.020.359	36.475.490	36.170.570	37.876.322
Differenz (Berichtsjahr-Vorjahr) absolut		---	-1.544.868	-304.920	1.705.752
Differenz (Berichtsjahr-Vorjahr) in vH		---	-4,1	-0,8	4,7
Differenz (Berichtsjahr-Basisjahr) absolut		-1654039	-3198908	-3503828	-1798076
Differenz (Berichtsjahr-Basisjahr) in vH		-4,2	-8,1	-8,8	-4,5

Anm.: NBE (Nettobrennstoffeinsatz) = Summe aus [Strom bezogen, MWh/a] multipliziert mit einheitlichem BW und [Strom abgegeben, MWh/a] multipliziert mit einheitlichem (-BW).

BW _{1990,D} = 10,434 GJ/MWh
BW _{1987,ABL} = 10,024 GJ/MWh
BW _{1987,NBL} = 12,281 GJ/MWh

BW = Brennstoffwert. Aus Gründen der Vergleichbarkeit wird der nach der Substitutionsmethode (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen) primärenergetisch bewertete durchschnittliche spezifische Brennstoffeinsatz - in [GJ/MWh] - in Kraftwerken der öffentlichen Versorgung verwendet. Dieser auf die Netto-Stromerzeugung der öffentlichen Kraftwerke Gesamtdeutschlands bezogene Wert ist für das betreffende Jahr in der VDEW-Statistik ausgewiesen. Um den meldenden Verbänden nicht die Effizienzsteigerungen in den Kraftwerken der öffentlichen Versorgung zuzurechnen, wird der Berechnung des Nettobrennstoffeinsatzes der Brennstoffwert des Basisjahrs 1990 zugrunde gelegt.

Spezifischer Brennstoffeinsatz bei der Stromerzeugung in EVU-Kraftwerken (BW) Angaben in GJ/MWh

Jahr	1987	1990
Alte Bundesländer (brutto)	9,409	9,379
Alte Bundesländer (netto)	10,024	10,053
Neue Bundesländer (brutto)	11,167	11,138
Neue Bundesländer (netto)	12,281	12,252
Deutschland insgesamt (brutto)	a)	9,672
Deutschland insgesamt (netto)	a)	10,434

a) Zusammenfassung nicht sinnvoll.

Quellen: 1987-1994 Statistischer Jahresbericht des Referats Elektrizitätswirtschaft im BMWi, Statistisches Bundesamt.

Gesamtbilanz

Tabelle III. Energieeinsatz gesamt (Summe Tabellen I und II)

Basisjahr 1990 [GJ/a]	Berichtsjahr 1995 [GJ/a]	Berichtsjahr 1996 [GJ/a]	Berichtsjahr 1997 [GJ/a]	Berichtsjahr 1998 [GJ/a]
GJ/a mit Fremdstrom	GJ/a mit Fremdstrom	GJ/a mit Fremdstrom	GJ/a mit Fremdstrom	GJ/a mit Fremdstrom
153.987.713	130.010.410	121.098.547	119.810.123	119.893.151
GJ/a ohne Fremdstrom	GJ/a ohne Fremdstrom	GJ/a ohne Fremdstrom	GJ/a ohne Fremdstrom	GJ/a ohne Fremdstrom
114.313.315	91.990.051	84.623.057	83.639.553	82.016.829
Differenz (Berichtsjahr-Vorjahr) absolut	---	-8.911.863	-1.288.424	83.028
Differenz (Berichtsjahr-Vorjahr) in vH	---	-6,9	-1,1	0,1
Differenz (Berichtsjahr-Basisjahr) absolut	-23.977.304	-32.889.166	-34177590,5	-34094562,3
Differenz (Berichtsjahr-Basisjahr) in vH	-15,6	-21,4	-22,2	-22,1
Differenz (Berichtsjahr-Vorjahr) absolut	---	-7.366.994	-983.504	-1.622.724
Differenz (Berichtsjahr-Vorjahr) in vH	---	-8,0	-1,2	-1,9
Differenz (Berichtsjahr-Basisjahr) absolut	-22.323.264	-29.690.258	-30.673.762	-32.296.486
Differenz (Berichtsjahr-Basisjahr) in vH	-19,5	-26,0	-26,8	-28,3

Angaben ohne Sekundärbrennstoffe

CO₂-Energie

Tabelle IV. CO₂-Emissionen aus Tabelle I

Brennstoff	CO ₂ -Faktor	Basisjahr 1987 [tCO ₂ /a]	Berichtsjahr 1995 [tCO ₂ /a]	Berichtsjahr 1996 [tCO ₂ /a]	Berichtsjahr 1997 [tCO ₂ /a]	Berichtsjahr 1998 [tCO ₂ /a]
Steinkohlen	0,093	4.440.525	4.031.113	3.551.695	3.550.972	2.975.510
Steinkohlenbriketts	0,093	0	0	0	0	0
Steinkohlenkoks	0,105	0	0	0	0	0
Rohbraunkohlen	0,112	0	0	0	0	0
Braunkohlenbriketts	0,098	0	0	0	0	0
Braunkohlenkoks	0,106	0	0	0	0	0
Braunkohlenstaub	0,093	5.208.000	3.111.441	2.984.951	2.921.496	3.095.489
Hartbraunkohlen	0,097	0	0	0	0	0
Petrolkoks	0,096	76.800	963.220	955.458	911.977	980.155
Heizöl-S	0,078	351.000	258.271	184.132	171.841	355.547
Heizöl-L	0,074	14.800	19.374	22.852	18.323	20.801
Erdgas	0,056	121.281	56.058	64.423	89.304	33.978
Erdölgas	0,059	0	0	0	0	0
Flüssiggas	0,065	0	0	0	0	0
Raffineriegas	0,060	0	0	0	0	0
Kokereigas (Ortsgas)	0,044	0	0	0	0	0
Gichtgas	0,105	0	0	0	0	0
Grubengas	0,054	0	0	0	0	0
Sonstige Regelbrennstoffe	0,093	269.700	54.016	52.449	46.308	100.550
Summen		10.482.106	8.493.495	7.815.960	7.710.222	7.562.030
Differenz (Berichtsjahr-Vorjahr) absolut			---	-677.535	-105.737	-148.192
Differenz (Berichtsjahr-Vorjahr) in vH			---	-8,0	-1,4	-1,9
Differenz (Berichtsjahr-Basisjahr) absolut			-1988611,4	-2.666.147	-2.771.884	-2.920.076
Differenz (Berichtsjahr-Basisjahr) in vH			-19,0	-25,4	-26,4	-27,9

Ann.: [GJ Brennstoff / a] multipliziert mit CO₂-Faktor = [tCO₂/a].

Als CO₂-Faktoren sind die Werte aus BMU (Hrsg.), Erster Bericht der Regierung der Bundesrepublik Deutschland

nach dem Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen. Bonn, September 1994 zu verwenden.

Tabelle V. CO₂-Emissionen aus Tabelle II (NFS: Nettofremdstrombezug)

	Basisjahr 1987 [tCO ₂ /a]	Berichtsjahr 1995 [tCO ₂ /a]	Berichtsjahr 1996 [tCO ₂ /a]	Berichtsjahr 1997 [tCO ₂ /a]	Berichtsjahr 1998 [tCO ₂ /a]
Nettofremdstrombezug [MWh/a]	3.802.415	3.643.891	3.495.830	3.466.606	3.630.086
EF	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
Co ₂ -Emissionen [t CO ₂ /a]	2.547.618	2.441.407	2.342.206	2.322.626	2.432.158
Differenz (Berichtsjahr-Vorjahr) absolut	---	---	-99.201	-19.580	109.532
Differenz (Berichtsjahr-Vorjahr) in vH	---	---	-4,1	-0,8	4,7
Differenz (Berichtsjahr-Basisjahr) absolut	---	-106.211	-205.412	-224.992	-115.460
Differenz (Berichtsjahr-Basisjahr) in vH	---	-4,2	-8,1	-8,8	-4,5

Anm.: [Nettofremdstrombezug, MWh/a] multipliziert mit einheitlichem EF= [tCO₂/a].

EF _{1990,D} = 0,67 t CO ₂ /MWh _{netto}
EF _{1987,ABL} = 0,56 t CO ₂ /MWh _{netto}
EF _{1987,NBL} = 1,18 t CO ₂ /MWh _{netto}

EF = Spezifischer CO₂-Emissionsfaktor in [tCO₂/MWh] bezogen auf den gesamten Energieträgermix der Netto-Stromerzeugung der öffentlichen Versorgung in Ost- und Westdeutschland im Jahr 1990.

Spezifische CO₂-Emissionsfaktoren bei der Stromerzeugung in EVU-Kraftwerken (EF)

Angaben in t CO₂/MWh

<u>Alte Bundesländer</u>	1987	1990
Fossile Energieträger (brutto)	0,91	0,89
Fossile Energieträger (netto)	0,97	0,97
Alle Energieträger (brutto)	0,52	0,51
Alle Energieträger (netto)	0,56	0,55

<u>Neue Bundesländer</u>	1987	1990
Fossile Energieträger (brutto)	1,25	1,24
Fossile Energieträger (netto)	1,37	1,38
Alle Energieträger (brutto)	1,07	1,14
Alle Energieträger (netto)	1,18	1,27

<u>Deutschland insgesamt</u>	1987	1990
Fossile Energieträger (brutto)	a)	0,98
Fossile Energieträger (netto)	a)	1,07
Alle Energieträger (brutto)	a)	0,62
Alle Energieträger (netto)	a)	0,67

a) Zusammenfassung nicht sinnvoll.

Quelle: Berechnungen nach Angaben des Statistischen Jahresberichts des Referats Elektrizitätswirtschaft des BMWi.

Co2-Gesamt

Tabelle VI.

CO₂-Emissionen gesamt (Summe Tabellen IV und V)

Basisjahr 1987	Berichtsjahr 1995	Berichtsjahr 1996	Berichtsjahr 1997	Berichtsjahr 1998
tCO ₂ /a mit Fremdstrom				
13.029.724	10.934.902	10.158.166	10.032.849	9.994.188
tCO ₂ /a ohne Fremdstrom				
10.482.106	8.493.495	7.815.960	7.710.222	7.562.030
Differenz (Berichtsjahr-Vorjahr) absolut	---	-776.736	-125.317	-38.661
Differenz (Berichtsjahr-Vorjahr) in vH	---	-7,1	-1,2	-0,4
Differenz (Berichtsjahr-Basisjahr) absolut	-2.094.822	-2.871.558	-2996875,7	-3035536,5
Differenz (Berichtsjahr-Basisjahr) in vH	-16,1	-22,0	-23,0	-23,3
Differenz (Berichtsjahr-Vorjahr) absolut	---	-677.535	-105.737	-148.192
Differenz (Berichtsjahr-Vorjahr) in vH	---	-8,0	-1,4	-1,9
Differenz (Berichtsjahr-Basisjahr) absolut	-1.988.611	-2.666.147	-2.771.884	-2.920.076
Differenz (Berichtsjahr-Basisjahr) in vH	-19,0	-25,4	-26,4	-27,9

Spez.Energie

Bezugsgröße für den spezifischen Energieeinsatz:.....

Zementproduktion

Tabelle VII. Spezifischer Energieeinsatz (Jahresdurchschnitt; nur fossile Energieträger)

	Basisjahr 1987	Berichtsjahr 1995	Berichtsjahr 1996	Berichtsjahr 1997	Berichtsjahr 1998
Energieeinsatz gesamt [GJ/a] mit Fremdstrom (s. Tabelle III) bzw. Energieindex	153.987.713	130.010.410	121.098.547	119.810.123	119.893.151
Produzierte Menge [t/a] bzw. Produktionsindex	34.166.231	34.202.694	32.551.461	33.373.245	34.684.849
Spezifischer Energieeinsatz [GJ / Bezugsgröße] bzw. [Energieindex / Produktionsindex]	4,51	3,80	3,72	3,59	3,46
Differenz (Berichtsjahr-Vorjahr) absolut		---	-0,08	-0,13	0
Differenz (Berichtsjahr-Vorjahr) in vH		---	-2,1	-3,5	-3,7
Differenz (Berichtsjahr-Basisjahr) absolut		-0,71	-0,79	-1	-1
Differenz (Berichtsjahr-Basisjahr) in vH		-15,7	-17,5	-20,3	-23,3

Spez.CO2

Tabelle VIII. Spezifische CO2-Emissionen (Jahresdurchschnitt)

	Basisjahr 1987	Berichtsjahr 1995	Berichtsjahr 1996	Berichtsjahr 1997	Berichtsjahr 1998
CO2-Emissionen gesamt, mit Fremdstom [tCO2/a] (s. Tabelle VI) bzw. Emissionsindex	13.029.724	10.934.902	10.158.166	10.032.849	9.994.188
Produzierte Menge [t/a] bzw. Produktionsindex	34.166.231	34.202.694	32.551.461	33.373.245	34.684.849
Spezifische CO2-Emissionen [tCO2/Bezugsgröße] bzw. [Emissionsindex / Produktionsindex]	0,381	0,320	0,312	0,301	0,288
Differenz (Berichtsjahr-Vorjahr) absolut		---	-0,008	-0,011	
Differenz (Berichtsjahr-Vorjahr) in vH		---	-2,4	-3,7	-4,2
Differenz (Berichtsjahr-Basisjahr) absolut		-0,062	-0,069	-0,081	-0,093
Differenz (Berichtsjahr-Basisjahr) in vH		-16,2	-18,2	-21,2	-24,4

NACHRICHTLICH ¹

Tabelle IX. Gesamteinsatz sonstiger Energieträger

Sekt.	Basisjahr 1987			Berichtsjahr 1995			Berichtsjahr 1996			Berichtsjahr 1997			Berichtsjahr 1998		
	Hu	[ME/a]	[GJ/a]	Hu	[ME/a]	[GJ/a]	Hu	[ME/a]	[GJ/a]	Hu	[ME/a]	[GJ/a]	Hu	[ME/a]	[GJ/a]
Sekundärbrennst.	29,308	168314	4932947	29,308	373863	10957177	29,308	445835	13066532	29,308	536755	15731216	29,308	640070	18759171,56
			0			0			0			0			0
			0			0			0			0			0
			0			0			0			0			0
Summen			4932946,7			10957177			13066532			15731215,54			18759171,56
Differenz (Berichtsjahr-Vorjahr) absolut			---			---			2.109.355			2.664.683			3.027.956
Differenz (Berichtsjahr-Vorjahr) in vH			---			---			19,3			20,4			19,2
Differenz (Berichtsjahr-Basisjahr) absolut			---			6.024.230			8.133.585			10.798.269			13.826.225
Differenz (Berichtsjahr-Basisjahr) in vH			---			122,1			164,9			218,9			280,3

Nachw.	Basisjahr 1987			Berichtsjahr 1995			Berichtsjahr 1996			Berichtsjahr 1997			Berichtsjahr 1998		
	Hu	[ME/a]	[GJ/a]	Hu	[ME/a]	[GJ/a]	Hu	[ME/a]	[GJ/a]	Hu	[ME/a]	[GJ/a]	Hu	[ME/a]	[GJ/a]
			0			0			0			0			0
			0			0			0			0			0
			0			0			0			0			0
			0			0			0			0			0
Summen			0			0			0			0			0
Differenz (Berichtsjahr-Vorjahr) absolut			---			---			0			0			0
Differenz (Berichtsjahr-Vorjahr) in vH			---			---			#DIV/0!			#DIV/0!			#DIV/0!
Differenz (Berichtsjahr-Basisjahr) absolut			---			0			0			0			0
Differenz (Berichtsjahr-Basisjahr) in vH			---			#DIV/0!			#DIV/0!			#DIV/0!			#DIV/0!

Ann.: [ME/a] multipliziert mit Hu = [GJ/a]

- Sek.= Sekundärbrennstoffe (Siedlungsabfall, Altreifen, Produktionsrückstände etc.).
- Hu = Heizwert in [GJ/ME]; Angabe der Quelle(n) erforderlich, z.B. K.U. Birnbaum, R. Pauls, H.J. Wagner, M. Walbeck, "Berechnung sektoraler Kohlendioxidemissionen für die Bundesrepublik Deutschland", KFA-Bericht JÜL-2530, Jülich 1991.
- ME= Mengeneinheit.
- Nachw.= Nachwachsende Brennstoffe (Holz, Biogas etc.).

Raum für weitere branchenspezifische nachrichtliche Angaben

siehe gesonderten Bericht
