

# Energieeffizienz der österreichischen Zementindustrie

**Auftraggeber**

*Vereinigung der  
Österreichischen Zementindustrie*

**Projektausführung**

*Allplan GmbH, Wien  
Verein Deutscher  
Zementwerke e.V., Düsseldorf*

**Projektleiter**

*DI Dr. Helmut Berger  
Dr.-Ing. Volker Hoenig*

**ALLPLAN**

**vdz.**  
Deutsche Zementindustrie



# Energieeffizienz der österreichischen Zementindustrie

Auftraggeber: Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie  
Reisnerstraße 53 | A-1030 Wien | Österreich | [www.zement.at](http://www.zement.at)

Projektleiter: DI Dr. Helmut Berger  
Dr.-Ing. Volker Hoenig

Projektmitarbeiter (in alphabetischer Ordnung):

Dipl.-Ing. Zeki Aslan  
DI Dr. Gerald Bachmann  
Ing. Thomas Eisenhut  
Dr.-Ing. Otakar Knöpfelmacher  
DI (FH) Andrea Kohlhauser  
DI (FH) Andreas Litzellachner  
DI Sascha Polak  
Dipl.-Ing. Stefan Woywadt  
Dipl.-Ing. Helmut Wüstner

**ALLPLAN**

Allplan GmbH

Schwindgasse 10 | A-1040 Wien | Österreich

Tel. +43 1-505 37 07-0 | Telefax +43 1-505 37 07-27 | [www.allplan.at](http://www.allplan.at)



Verein Deutscher Zementwerke e.V.

Forschungsinstitut der Zementindustrie

Postfach 30 10 63 | 40410 Düsseldorf

Tannenstraße 2 | 40476 Düsseldorf | Deutschland | [www.vdz-online.de](http://www.vdz-online.de)

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Executive Summary</b> .....	<b>3</b>
1.1	English.....	3
1.2	Deutsch.....	5
<b>2</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Die österreichische Zementindustrie</b> .....	<b>9</b>
<b>4</b>	<b>Methodik</b> .....	<b>12</b>
4.1	Ermittlung des Istzustandes.....	13
4.2	Datenanalyse, Bewertung und Prozessmodellierung .....	14
4.3	Ableitung von Optimierungspotenzialen .....	15
<b>5</b>	<b>Überblick über den Istzustand</b> .....	<b>16</b>
5.1	Brennstoffeinsatz .....	17
5.2	Brennstoffenergiebedarf .....	20
5.3	Elektrischer Energiebedarf.....	22
5.4	Wärmenutzung.....	24
5.5	Klinker/Zement-Faktor .....	25
<b>6</b>	<b>Potenziale</b> .....	<b>27</b>
6.1	Thermischer Energiebedarf .....	27
6.2	Elektrischer Energieverbrauch.....	44
6.3	Reduzierung des Klinker/Zement-Faktors .....	54
<b>7</b>	<b>Gesamtpotenzial</b> .....	<b>57</b>
7.1	CO <sub>2</sub> -Emissionen.....	58
<b>8</b>	<b>Umsetzungshemmnisse</b> .....	<b>60</b>
8.1	Darstellung von Hemmnissen.....	60
8.2	Möglichkeiten zur Überwindung der Hemmnisse.....	60
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>61</b>
<b>10</b>	<b>Anhang</b> .....	<b>65</b>
10.1	Tabellenverzeichnis.....	65
10.2	Abbildungsverzeichnis .....	65
10.3	Literaturverzeichnis.....	67

# 1 Executive Summary

## 1.1 English

The companies Allplan from Vienna and FIZ<sup>1</sup>, located in Duesseldorf, were assigned by VÖZ<sup>2</sup> to analyse the energy efficiency of the Austrian cement industry in a joint project. This report contains, for the first time, the results of this analysis partly as benchmarking and in part as aggregated data over the entire sector of this industry. Nine clinker producing cement plants and three cement milling plants have been investigated within this scope with the plant's constellation in the year 2007. The actual situation with regards to thermal as well as electrical energy consumption was analysed in a first step. In a following step, actual key indicators were compared with values according to best available technique. Potentials for fuel savings were located in cases when the actual fuel energy demand was higher than modelled results from a computer-based process model. The analysed fuel energy demand of the complete sector of the Austrian cement works is 3,646 kJ/kg clinker on weighted average. Potential savings in a range of 2.2 up to 6.5 % were found deriving from comparing the annual average with actual data and modelling data.

Significant improvements of the analysed cement works with regards to energy efficiency are only feasible with a complete new construction or complex retrofit of the kiln plant.

To reduce the found savings very high investment cost on plant-engineering would be required. Only financial aspects arising from savings would exceed the normal amortisation periods by far and are therefore not reasonable measures. A realisation of such measures is in general carried out for reasons of capacity increase or in cases when two or more operating kilns can be replaced by one more efficient kiln. The most meaningful measure regarding energy savings is the replacement of two small kilns by a new rotary kiln with precalciner and will be carried out by one cement company within 2010.

The Austrian cement industry has about 419 GWh or 10.5 % of the fuel energy available for utilization of waste heat. However, a use of the available waste heat is only in singular cases profitable. The ORC process shows the highest potential with about 49 GWh with an average payback period of 9 years.

---

1 Forschungsinstitut der Zementindustrie (Research Institute of the Cement Industry)

2 Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie

Basic potentials for optimization of cement grinding with ball mills are improvement of the air separator grade efficiency as well as the adaptation of the ball charge according to the specific grinding task. Electrical potential savings of 11.6 GWh respectively 4.9 % were analysed from the cement milling process with ball mills.

Potentials of the cross-sectional technologies were also found at some sites with amortisation periods less than 5 years. A potential of 2.5 GWh was found through optimization of the existing lighting of the Austrian cement works whereas the air supply is almost optimised.

The major key in energy reduction of the cement production is the substitution of the clinker content in cements by other constituents. Austria's cement industry has achieved in 2007 a clinker to cement ratio of 75.4 % of the analysed cement. Savings of 193 TJ are accessible with a reduction per percent of the clinker to cement ratio.

## 1.2 Deutsch

Im Auftrag der Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie (VÖZ) haben das Forschungsinstitut der Zementindustrie (FIZ), Düsseldorf, und die Firma Allplan, Wien, die Situation der österreichischen Zementindustrie im Hinblick auf Energieeffizienz und Energieeinsparpotenziale untersucht. Dieser Bericht fasst die energetische Analyse der gesamten österreichischen Zementindustrie sowohl in standortspezifischen Kennzahlen als auch in aggregierter Form zusammen.

Neun Zementwerke mit Klinkerproduktion sowie drei Zementmahlwerke wurden auf der Basis des Bezugsjahres 2007 untersucht und bewertet. In einem ersten Schritt erfolgte eine Analyse der Istsituation aller Standorte bezüglich des thermischen und elektrischen Energiebedarfes. In einem zweiten Schritt wurden die entscheidenden Daten aus der Istanalyse den Kenngrößen gemäß **Best Available Technique (BAT)** gegenübergestellt. Thermische Einsparpotenziale wurden in Fällen abgeleitet, wenn der tatsächliche Brennstoffenergiebedarf über dem Brennstoffenergiebedarf gemäß BAT aus einem virtuellen FIZ-Prozessmodell lag. Der durchschnittliche gewichtete Brennstoffenergiebedarf über alle Klinker produzierenden Zementwerke betrug 3.646 kJ/kg Klinker. Aus der Gegenüberstellung dieses durchschnittlichen Brennstoffenergiebedarfes sowie den aggregierten Ergebnissen aus der Modellierung ergibt sich ein Einsparpotenzial von 2,2 bis 6,5 %.

Signifikante Verbesserungen der thermischen Energieeffizienz sind bei den untersuchten Zementdrehrohrofenanlagen nur durch vollständigen Neubau oder weit gehenden Umbau der Ofenanlagen möglich. Die Umsetzung dieser Maßnahmen ist dabei mit sehr hohen Investitionskosten verbunden, die nur auf der Basis einer energetischen Optimierung kaum vertretbar ist. Größere Umbaumaßnahmen werden in der Regel durchgeführt, wenn sie mit einer Leistungssteigerung der Ofenanlage verbunden werden oder aber die Produktionskapazität zweier kleiner Ofenanlagen durch eine große substituiert werden kann. In einem österreichischen Zementwerk ist die Substitution der beiden Ofenanlagen durch eine moderne Vorcalcinieranlage für das Jahr 2010 geplant.

Die österreichische Zementindustrie verfügt über ein nutzbares Abwärmepotenzial von 419 GWh oder ca. 10,5 % des Brennstoffenergieeinsatzes. Die Abwärmenutzung an den Standorten ist allerdings nur in einzelnen Fällen wirtschaftlich möglich. Der Einsatz von ORC-Prozessen weist das höchste Potenzial von ca. 49 GWh mit einer durchschnittlichen Amortisationszeit von 9 Jahren auf.

Die wesentlichen betrieblichen Optimierungspotenziale von Mahlanlagen mit Kugelmühlen liegen in der Verbesserung des Sichter-Trenngrades sowie der Optimierung der Kugelfüllung an die vorliegende Mahlung. Bezüglich der Rohmahlung mit Kugel-

mühlen wurde in drei Werken elektrisches Einsparpotenzial zwischen 5 und 7 % festgestellt. Das gesamte Einsparpotenzial aus der Zementmahlung mit Kugelmühlen beträgt über alle österreichischen Werke etwa 11,6 GWh oder 4,9 % des gesamten elektrischen Strombedarfes für die Zementmahlung.

Bei den Querschnittstechnologien wurden an einigen Standorten Optimierungspotenziale mit Amortisationszeiten kleiner als 5 Jahre festgestellt. Die Beleuchtung weist ein technisches Optimierungspotenzial von 2,5 GWh bei einer durchschnittlichen Abschreibung von 5 Jahren auf, wohingegen die Druckluftversorgung in den letzten Jahren weitgehend optimiert wurde.

Das entscheidende Potenzial zur Verminderung des Energieeinsatzes bei der Zementherstellung liegt in der Substitution des Zementklinkers im Zement durch andere Zementhauptbestandteile. Der Klinker/Zement-Faktor der österreichischen Zementindustrie betrug 75,4 % über die untersuchten Zementsorten. Eine energetische Einsparung von ca. 193 TJ ergäbe sich bei einer weiteren Absenkung des Klinker/Zement-Faktors je Prozent.

## 2 Einleitung

### Aufgabenstellung

Die Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie (VÖZ) hat das Forschungsinstitut der Zementindustrie (FIZ) aus Düsseldorf und die Firma Allplan in Wien beauftragt, die Situation der österreichischen Zementindustrie im Hinblick auf Energieeffizienz und Energieeinsparpotenziale zu untersuchen. Aufgabenstellung dabei war, mittels Analyse aller Standorte zunächst deren Zustand im Hinblick auf den Energieverbrauch aufzuzeigen, diesen mit dem Stand der Technik der Branche zu vergleichen bzw. zu bewerten, daraus Optimierungspotenziale abzuleiten und diese für die gesamte österreichische Zementindustrie erstmalig in aggregierter Form darzustellen.

Um einen vollständigen Überblick über die Potenziale der österreichischen Zementindustrie zu erhalten, wurden folgende Punkte für die Standorte ermittelt und in der vorliegenden Branchenanalyse zusammenfassend dargestellt:

- Vergleich der Drehrohrofenanlagen mit Anlagen nach Stand der Technik
- Optimierungspotenzial zur Verbesserung der thermischen Energieeffizienz der Ofenanlagen
- Optimierungspotenzial der Mahlprozesse zur Minderung des elektrischen Energiebedarfs
- Optimierungspotenzial der elektrischen Antriebe
- Optimierungspotenzial der Druckluftherzeugung und -nutzung
- Erfassung der Abwärmequellen
- Optimierungspotenzial durch Nutzung von Abwärmequellen (intern, extern, zur Kälte- bzw. Stromerzeugung)
- Optimierungspotenzial bei der Beleuchtung

### Zeitplan

Die Analyse basiert auf Daten des Bezugsjahres 2007 und auf dem technischen Zustand der Anlagen in diesem Produktionsjahr. Der Projektstart erfolgte im Juni 2008. Während der Projektlaufzeit von 18 Monaten wurden zunächst alle österreichischen Zementwerke energetisch untersucht. Die detaillierten Ergebnisse einschließlich der Verbesserungsvorschläge wurden den jeweiligen Standortbetreibern vorgestellt und mit diesen ausführlich diskutiert. Anschließend wurden die Ergebnisse der einzelnen Standorte in der vorliegenden Branchenanalyse zusammengefasst. Das Projekt endet mit der Vorlage dieses Berichtes im Jänner 2010.

## Team

Neben der Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie sowie deren Mitgliedsunternehmen selbst waren der Verein der Deutschen Zementwerke (VDZ) mit seinem Forschungsinstitut der Zementindustrie (FIZ) und die Firma Allplan GmbH an der Durchführung des Projektes beteiligt. Dabei wurden von den einzelnen Teammitgliedern folgende Aufgaben übernommen:

- Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie: Organisation und Kommunikation
- Standorte: Datenbereitstellung/Kommunikation
- VDZ/Forschungsinstitut der Zementindustrie: Bewertung des thermischen Energieverbrauchs der Drehrohrofenanlagen sowie Untersuchung, Beurteilung und Erarbeitung von Verbesserungsvorschlägen und Optimierung der Mahlprozesse
- Allplan GmbH: Untersuchung, Bewertung und Optimierung aller energierelevanter Bereiche der Standorte exklusive Drehrohrofenanlagen und Mahlprozesse (Antriebe, Druckluft, Beleuchtung, Wärmenutzung etc.)

In Summe wurden über 1.000 Expertentage mit 65 Werksbesuchen vom Projektteam für die Erstellung der Branchenanalyse aufgewendet.

### 3 Die österreichische Zementindustrie

Die österreichische Zementindustrie betreibt neun Zementwerke mit Klinkerproduktion sowie drei Mahlwerke für Zement und eine Umladestation für Zement. Die installierte Produktionskapazität betrug 2007 etwa 4,6 Mio. t Klinker pro Jahr und wird etwa zu 87 % ausgeschöpft.

Die Standorte sind über das gesamte Bundesgebiet verteilt (siehe Abbildung 1). Die jeweilige Werkskapazität stellt die Versorgung mit Zement sicher. Alle Standorte verfügen über ausreichende Rohstoffvorkommen, sodass auch für die nächsten Jahrzehnte die Versorgung der österreichischen Bauwirtschaft mit Zement aus nahe gelegenen Produktionsstätten gewährleistet ist. Die Versorgung der 3 Mahlwerke mit Zementklinker erfolgt von Standorten in ihrer Nachbarschaft. Jeweils ein Mahlwerk wird mit Zementklinker aus einem in der Schweiz bzw. in Deutschland gelegenen Zementwerk versorgt. Die gute regionale Verteilung der Werksstandorte gewährleistet insgesamt die geringstmöglichen Transportwege sowohl für Rohstoffe zu den Werken als auch für die Zementlieferung zu den Endverbrauchern.

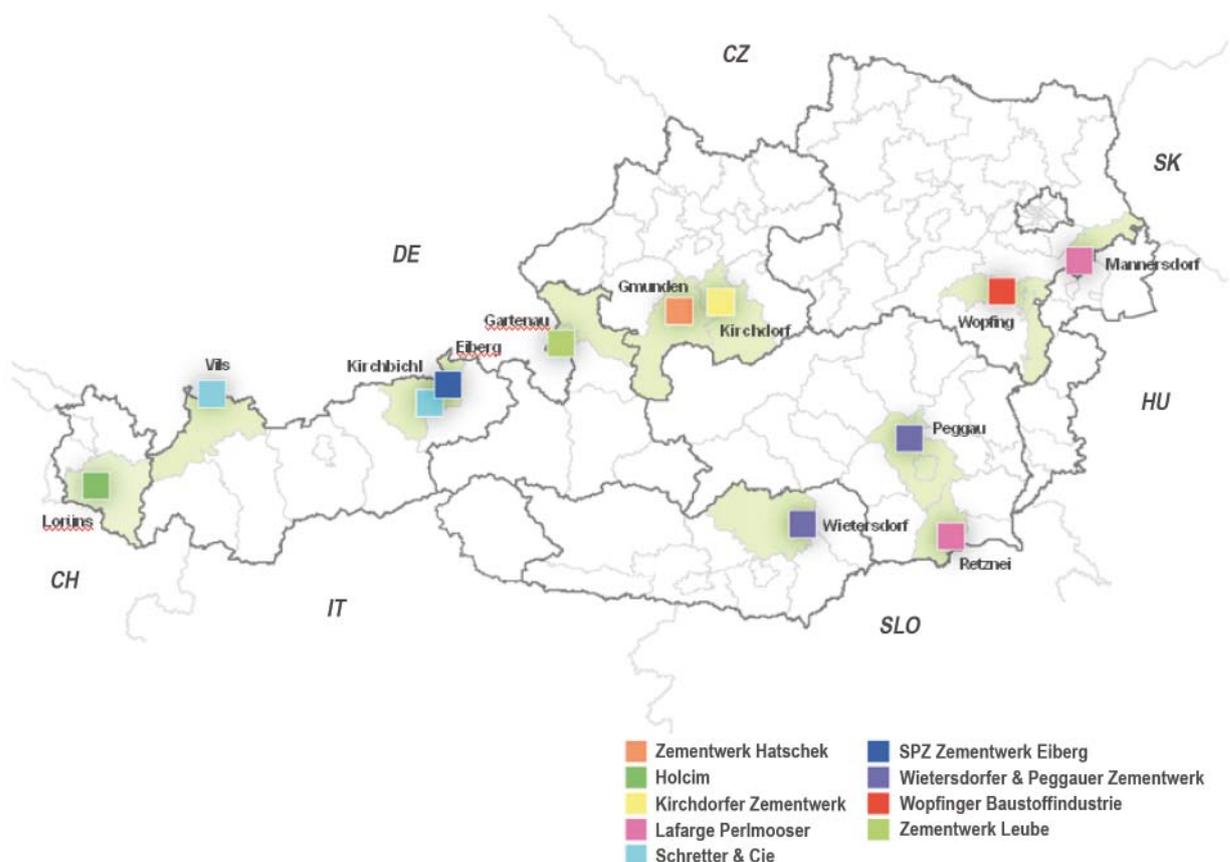


Abbildung 1: Mitgliedswerke VÖZ [VÖZ-1]

Geschätzte 60 % des Zementversandes in Österreich wurden in der Transportbetonindustrie abgesetzt. Knapp 20 % wurden an die Fertigteilindustrie geliefert, weitere 10 % wurden als Sackware verarbeitet und die verbleibenden 10 % als Losezement in die Bauwirtschaft verkauft. (Quelle: <http://www.zement.at>)

Zement ist ein hydraulisches Bindemittel, das durch Reaktion mit Wasser erhärtet und auch unter Wasser fest und beständig bleibt. Sein wichtigster Bestandteil ist Zementklinker. Die wesentlichen Ausgangsstoffe zur Erzeugung des Zementklinkers sind Kalkstein, Ton und Mergel. Ein Steinbruch mit ausreichenden Mengen dieser Rohstoffe ist die Grundvoraussetzung für den Betrieb eines Zementwerkes. Die gewünschte Rohmischung aus Schotter und den erforderlichen Zuschlagstoffen wie beispielhaft Quarzsand und Eisenerz wird über Dosiereinrichtungen hergestellt. In Kugel- oder Walzenschüsselmühlen wird dieses Rohmaterial gemahlen und mit dem heißen Abgas aus der Drehrohrofenanlage gleichzeitig getrocknet. Das Rohmehl wird in der Regel in Drehrohrofenanlagen mit Wärmetauschern, die aus Türmen mit mehreren übereinander stehenden Zyklonstufen bestehen, durch heißes Ofenabgas vorgewärmt. Eine weitere Möglichkeit ist die Vorwärmung des Rohmehls in so genannten Lepolanlagen mit Rostvorwärmern, bei der das Rohmehl vorher mit Wasser zu Granalien geformt wird. Die Calcination bzw. Entsäuerung des Kalksteins erfolgt durch die thermische Abspaltung des im Gestein enthaltenen Kohlendioxids im Vorwärmer und zu einem geringen Teil im Drehrohrofen bei Temperaturen über 800 °C. Zementklinker wird im Drehrohrofen durch Brennen des Ofenmehls bei 1.450 °C hergestellt, bevor die chemisch-mineralogischen Eigenschaften des granulierten Klinkers im nachfolgenden Kühler fixiert werden. Nach dem Brennen wird der Klinker abgekühlt und in Klinkersilos bevorratet. In einem letzten Schritt mahlen Zementmühlen den Klinker unter Zusatz von Gips und zum Teil weiteren Zuschlagstoffen, wie z. B. Kalkstein, Hüttensand oder Flugasche, zu Zement. Neue Ofenanlagen werden heute ausschließlich nach dem Trockenverfahren als Drehrohrofenanlagen mit Zyklonvorwärmer und Calcinator mit Tertiärluftleitung sowie Rostkühler ausgestattet. Diese Drehrohrofenanlagen können im Vergleich zu Anlagen gleicher Leistung ohne Calcinator kleiner dimensioniert und dadurch kostengünstiger errichtet und betrieben werden. Aufgrund der höheren Ofenleistung dieser Anlagen führt der zunehmende Einsatz dieser Technologie darüber hinaus zu einer Energieeffizienzsteigerung. In der österreichischen Zementindustrie wird Klinker in Drehrohrofenanlagen überwiegend nach dem Trockenverfahren produziert. Ein Zementwerk erzeugt den Klinker nach dem Halbtrockenverfahren in einer Lepolanlage. Fünf der elf im Jahr 2007 betriebsbereiten österreichischen Ofenanlagen sind mit der Vorcalciniertechnik ausgestattet. In folgender Abbildung sind beispielhaft die Prozessschritte der Zementherstellung dargestellt.

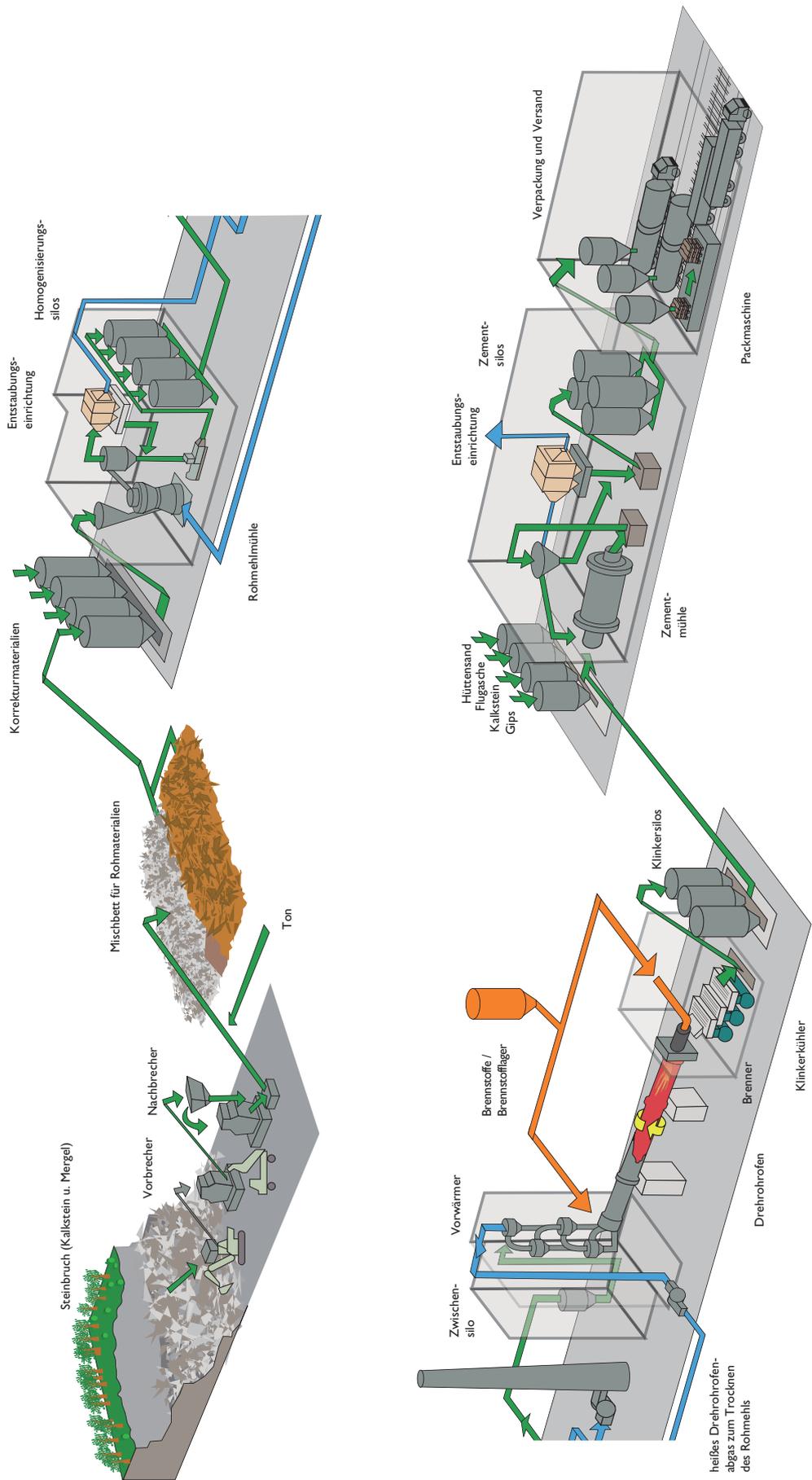


Abbildung 2: Schema eines Zementwerkes

## 4 Methodik

Die Durchführung der energetischen Effizienzanalyse der österreichischen Zementindustrie erfolgte im Rahmen eines gemeinsamen Projektes zwischen der Firma Allplan und dem Forschungsinstitut der Zementindustrie, FIZ. Die Untersuchung der Brenn- und Mahlprozesse wurde vom FIZ durchgeführt und Allplan analysierte alle übrigen energierelevanten Teilbereiche (elektrisch und thermisch) der Werksstandorte.

Das Projekt wurde in mehreren aufeinander folgenden und sich ergänzenden Schritten durchgeführt. Die Ermittlung des Istzustandes erfolgte per Fragebogen mit spezifischen Fragen zu den Ofenanlagen und zur Mahltechnik. Weiterhin wurde das im Forschungsinstitut entwickelte Programm zur Modellierung des Klinkerbrennprozesses eingesetzt.

Die energetische Analyse kann in folgende Punkte unterteilt werden:

- Datenerhebung
- Datenanalyse und Prozessmodellierung
- Auswertung der Ergebnisse und Branchenanalyse

Die so genannten Querschnittstechnologien wurden von Allplan untersucht. Basierend auf der Datenerhebung und Analyse für die einzelnen Standorte wurden folgende Punkte erarbeitet:

- Analyse aller energierelevanten Anlagen
- Erstellung einer Energiebilanz für die Standorte

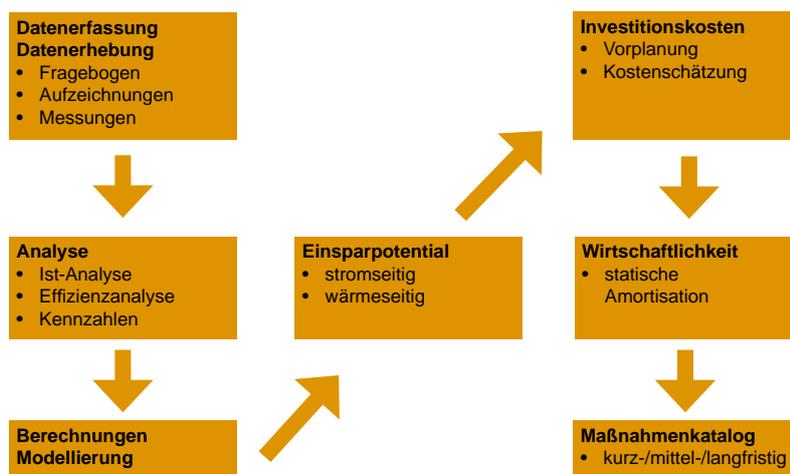


Abbildung 3: Methodischer Ansatz der energetischen Analyse und Bewertung mit FIZ-Prozessmodell und Allplan nach AEEP-Methodik<sup>3</sup>

<sup>3</sup> Allplan-Energie-Effizienz-Programm

- Prüfung vorhandener Optimierungsideen
- Identifikation zusätzlicher Optimierungspotenziale
- Ausarbeitung von technischen Lösungen
- Bestimmung der Wirtschaftlichkeit

Der schematische Ablauf der Projektpartner FIZ und Allplan zur energetischen Analyse und Bewertung ist in Abbildung 3 dargestellt.

## 4.1 Ermittlung des Istzustandes

Die Ableitung von Optimierungspotenzialen erfolgt grundsätzlich auf der Basis des vorliegenden Zustandes von Anlagen. Zu Beginn wurde der Istzustand der Zementwerke im Rahmen der Datenerhebung mithilfe eines Fragebogens und nachfolgenden Werksbesichtigungen festgestellt. Während der Werksbesichtigungen wurden die einzelnen Anlagen der relevanten Prozesse bei der Zementherstellung betrachtet, um auf diese Weise den Istzustand über bereits abgefragte Kennzahlen und Betriebsparameter hinaus beurteilen zu können.

### 4.1.1 Datenerhebung

Im Rahmen dieser Energieeffizienzanalyse wurde ein umfangreicher Fragebogen zur Datenerhebung erstellt. In diesem Fragebogen wurden Daten über die Drehrohrofenanlagen, die Mahlanlagen, die Brenn- und Rohstoffe und über die Nutzung von Abwärme abgefragt. Die Daten für den Fragebogen wurden vom zuständigen Fachpersonal der Werke zusammengetragen und anschließend dem FIZ und der Fa. Allplan zur Auswertung übermittelt. In einem ersten Schritt wurden einige Daten für die Analyse des Istzustandes der Ofen- und Mahlanlagen im Bezugsjahr herangezogen. Weitere Daten zur Modellierung des gängigen Betriebszustandes der Drehrohrofenanlage wurden mit den Fachkräften der Zementwerke abgestimmt. In einem weiteren Schritt wurden auf den Istzustand aufbauend energetische Optimierungspotenziale der Anlagen abgeleitet und Nutzungspotenziale der Abwärme ermittelt.

### 4.1.2 Werksbesuche und Vorortuntersuchungen

FIZ und Allplan führten Werksbesichtigungen durch, um den Anlagenbetrieb und Möglichkeiten der Nutzung von Abwärme wie auch die Umsetzung von Maßnahmen zur energetischen Effizienzsteigerung Vorort beurteilen zu können. Darüber hinaus hat Allplan die wichtigen elektrischen Aggregate untersucht und deren Stromverbrauch aufgezeichnet. Überlegungen der Anlagenbetreiber, inwieweit diese Maßnahmen am Standort umsetzbar oder bereits geplant waren, wurden ebenfalls in die Analyse einbezogen. Bei weiteren Vorortbesuchen, in Summe 65 Werksbesuche, wurden die erhaltenen Daten abgeklärt, fehlende Daten erhoben und schließlich die Zwischen- und Endergebnisse dieser Untersuchungen präsentiert.

## 4.2 Datenanalyse, Bewertung und Prozessmodellierung

Die Datenanalyse lieferte zunächst einen Überblick über die Istsituation der Teilanlagen sowie der gesamten Anlagen. Darüber hinaus wurden Nutzpotenziale der Abwärme auf der Basis der ermittelten Istsituation abgeleitet. Auf die Datenanalyse folgte die Bewertung der ermittelten Kennzahlen durch den Vergleich mit Anlagen gemäß „Best Available Techniques“, BAT. Bei der Bewertung der thermischen und elektrischen Prozesse ist nicht nur die ermittelte Istsituation eingeflossen. Die gewonnenen Erkenntnisse aus den Werksbesichtigungen wurden ebenfalls berücksichtigt, als Beispiel sei hier die Einspeisung von überschüssiger Wärme in ein Fernwärmenetz erwähnt.

Die Bewertung des thermischen Energiebedarfes der Werke beruht auf dem Vergleich der im Rahmen der Datenerhebung ermittelten Angaben über den Istzustand und der Energieeffizienz virtueller Modellanlagen, die einerseits mit optimaler Technologie gemäß Stand der Technik (BAT) und andererseits unter Nutzung der an den jeweiligen Werksstandorten tatsächlich verfügbaren Roh- und Brennstoffen betrieben werden. Dabei wird berücksichtigt, dass die Modellanlage einen optimalen stationären Zustand abbildet, während die erhobenen Daten eine durchschnittliche Jahresproduktion repräsentieren.

Das am FIZ entwickelte Modell bildet den Brennprozess realistisch von der Aufgabe des Ofenmehls in den Vorwärmer bis zum gekühlten Klinker ab und besteht aus den Einzelkomponenten Vorwärmer, Calcinator, gegebenenfalls Bypass, Drehrohröfen und Rostkühler. Diese werden rechnerisch miteinander verbunden. Aufgrund des modularen Aufbaus können unterschiedliche Anlagenschaltungen flexibel abgebildet werden. Ebenso können einzelne Komponenten der Anlage geometrisch definiert werden, sodass unterschiedliche Anlagengrößen abgebildet werden können. Das Computermodell basiert auf Stoff- und Energiebilanzierungen der Brenngut-, Staub- und Gasflüsse. Dabei werden neben der Verbrennungsrechnung der Brennstoffe und der Wärmeübertragung auch die relevanten chemisch-mineralogischen Feststoffreaktionen und die Gasphasenreaktionen sowie Gas-Feststoff-Reaktionen berücksichtigt. Eine detaillierte Beschreibung des Modells ist in [Klei-06] wiedergegeben.

Durch Vergleich des tatsächlichen Energieverbrauchs mit dem modellierten Energieverbrauch wurden Potenziale sowohl für die Gesamtanlage als auch für Teilanlagen abgeleitet.

Die für das FIZ-Prozessmodell notwendigen Parameter wurden im Rahmen der Datenerhebung zusammengetragen. Mittels dieser Daten wurden die Modell-Eingangsparameter erzeugt. Dieses betrifft die eingesetzten Brennstoffe, das Ofenmehl und den Klinker. Dabei wurde der Brennstoffmix mit den Werken abgestimmt, um in der Modellierung einen üblichen Betriebszustand abzubilden.

### 4.3 Ableitung von Optimierungspotenzialen

Energetisches Optimierungspotenzial kann einerseits abgeleitet werden, wenn die untersuchten Anlagen modernen Technologien gemäß BAT gegenübergestellt werden und einen höheren Energiebedarf aufweisen. Diese Methode wurde beispielsweise durch den Einsatz der Modellanlagen gewählt. Andererseits, dies gilt insbesondere für die Beurteilung der Mahlprozesse mit Kugelmöhlen, kann der Energiebedarf durch die Veränderung des Betriebes oder Prozessgrößen, wie z. B. die Kugelfüllung in der Mühle, optimiert werden.

Die Umsetzung von Optimierungsmaßnahmen hängt maßgeblich von ihrer Wirtschaftlichkeit ab. Die Bestimmung der Wirtschaftlichkeit von Maßnahmen erfolgte einheitlich unter Verwendung der statischen Amortisationsrechnung. Optimierungsmöglichkeiten mit statischen Amortisationszeiten kleiner 3 Jahre wurden als wirtschaftlich umsetzbar beurteilt. Die Einsparungen von Maßnahmen der Querschnittstechnologien wurden einheitlich mit Energiepreisen aus dem Jahr 2007 durchgeführt, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten und ein Aufsummieren der Teilergebnisse zu ermöglichen.

## 5 Überblick über den Istzustand

Im Jahr 2007 waren in der österreichischen Zementindustrie in 9 Werken 5 Drehrohrofenanlagen mit Wärmetauscherturm und Calcinator, weitere 4 Drehrohrofenanlagen mit Wärmetauscherturm sowie 2 Lepolanlagen betriebsbereit. In diesen 9 Werken mit Klinkerproduktion sowie darüber hinaus in 3 Mahlwerken werden Zementmühlen unterschiedlicher Bauart zur Zementherstellung betrieben. An den Klinker produzierenden Standorten der österreichischen Zementindustrie wurden nach Mauschitz 6,3 Mio. t Rohmehl eingesetzt und 4 Mio. t Klinker bzw. 5,2 Mio. t Zement hergestellt [Mau-07]. Die gesamte Zementproduktion einschließlich der Mahlwerke lag bei ca. 6 Mio. t. In Tabelle 1 sind die wichtigsten Kennzahlen der österreichischen Zementindustrie (ohne Mahlwerke) dargestellt.

	Mittelwert
Energiebedarf, Strom	113 kWh/t <sub>Zement</sub>
Energiebedarf, Brennstoff	3.618 kJ/kg <sub>Klinker</sub>
Energiebedarf, Brennstoff	2.776 kJ/kg <sub>Klinker</sub>
Energiebedarf, gesamt	3.183 kJ/kg <sub>Zement</sub>
Ersatzbrennstoffe als Anteil des gesamten thermischen Energieeinsatzes	46 %
Rohmehl/Klinker-Faktor	1,58 kg <sub>RM</sub> /kg <sub>KI</sub>
Klinker/Zement-Faktor	0,73 kg <sub>KI</sub> /kg <sub>Zement</sub>
spez. CO <sub>2</sub> -Emissionen	0,81 kg <sub>CO2</sub> /kg <sub>KI</sub>

Tabelle 1: Branchenkennzahlen ohne Zementmahlwerke (2007) nach Mauschitz [Mau-07]

Die österreichische Zementindustrie ist geprägt von einer Struktur mit kleiner bis mittlerer Produktionskapazität. Die mittlere erzeugte Klinkermenge liegt in Österreich bei ca. 1.450 t/d je Drehrohrofenanlage und schwankt in einem weiten Bereich zwischen etwa 700 und 3.000 t/d (zum Vergleich: in Deutschland betrug die mittlere Drehrohrofenkapazität in 2007 etwa 2.110 t/d<sup>4</sup>). Sie beträgt über alle Werke etwa 12.800 t/d. In Abbildung 4 ist der Brennstoffenergiebedarf als Funktion der Klinkerkapazität aus der Analyse der vorliegenden Istdaten zu sehen. Diese Darstellung verdeutlicht den erwartungsgemäß höheren spezifischen Brennstoffenergiebedarf bei kleinen Drehrohrofenanlagen, weil deren Betrieb zwangsläufig zu spezifisch höheren Wärmeverlusten über Drehrohrofen und ggf. Calcinator führt.

4 Quelle: VDZ

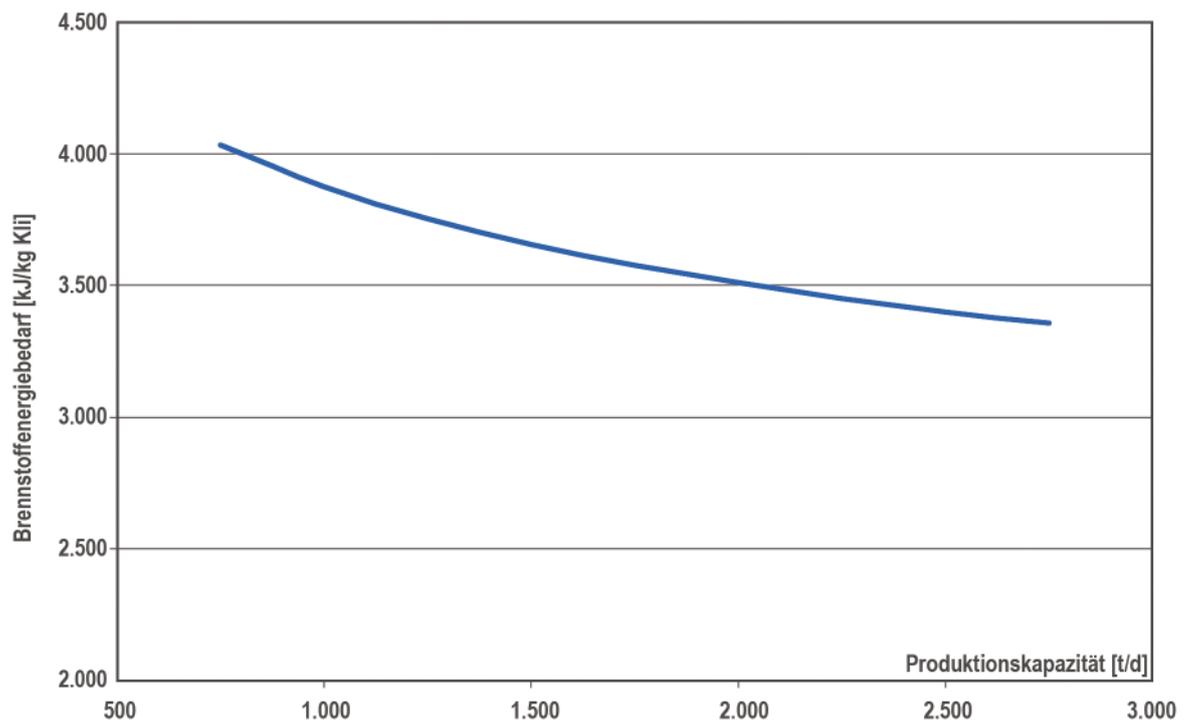


Abbildung 4: Brennstoffenergiebedarf in Abhängigkeit von der Produktionskapazität

## 5.1 Brennstoffeinsatz

In der Zementindustrie werden konventionelle feste und flüssige Brennstoffe sowie so genannte Sekundärbrennstoffe zur Erzeugung von Zementklinker eingesetzt. Der zunehmende Einsatz der Ersatz- oder Sekundärbrennstoffe stellt eine geeignete Maßnahme dar, um die Ressourcen der hochwertigen fossilen Brennstoffe zu schonen.

### 5.1.1 Überblick

Wie in Abbildung 5 ersichtlich, ist die Zementproduktion der Klinker produzierenden Werke (nach Mausnitz) im Jahr 2007 im Vergleich zum Jahr 2002 um 28 % gestiegen. Bezogen auf die Klinkerproduktion ist dabei der spezifische thermische Energiebedarf in diesem Zeitraum nahezu konstant geblieben. Dabei wirkt sich die gestiegene Zement- und die damit verbundene erhöhte Klinkerproduktion bei hoher Auslastung der Zementwerke günstig auf den Brennstoffenergiebedarf aus. Die Entwicklung des Brennstoffenergiebedarfes spiegelt weiterhin den im Querschnitt bereits erreichten hohen Modernisierungsgrad der österreichischen Zementindustrie wider. Insofern sind in Zukunft weitergehende bemerkenswerte sowie kontinuierliche Minderungen des spezifischen Energiebedarfes in der österreichischen Zementindustrie nicht zu erwarten.

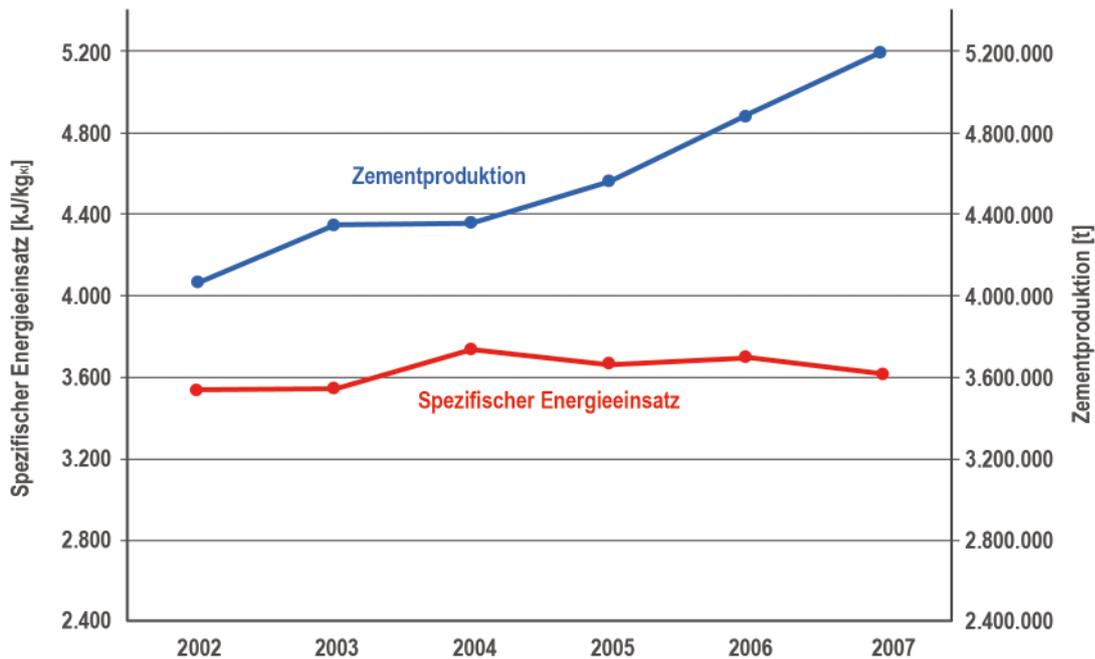


Abbildung 5: Historie der Zementproduktion und des spezifischen Energiebedarfes, nach [Mau-07]

Der Energiebedarf der österreichischen Zementwerke im Jahr 2007 betrug 4.600 GWh. Davon wurden 4.012 GWh thermischer Energie und 588 GWh elektrischer Energie bezogen. Dies entspricht einem Anstieg von etwa 7 % im Vergleich zum Energieeinsatz des Jahres 2006. Im Vergleich dazu stieg die Klinkerproduktion um 9 % und die Zementproduktion um 6,5 %. Die Bereitstellung der erforderlichen thermischen Energie erfolgte im Jahr 2007 mit ca. 54 % konventionellen Energieträgern und 46 % Ersatzbrennstoffen.

Steinkohle weist mit 30 % den größten Anteil des thermischen Energieeinsatzes auf, gefolgt von Kunststoffabfällen (24 %), Braunkohlestaub (13 %) und sonstigen Energieträgern.

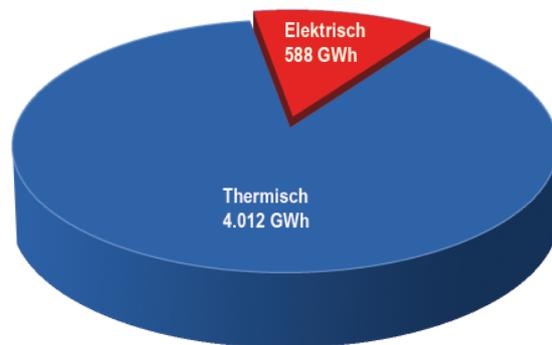


Abbildung 6: Energiebedarf der österreichischen Zementwerke

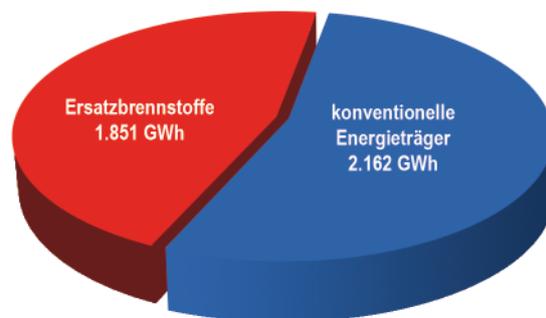


Abbildung 7: Anteile konventioneller Brennstoffe und Ersatzbrennstoffe am thermischen Energiebedarf

### 5.1.2 Konventionelle Brennstoffe

Im Jahr 2007 wurden etwa 54 % an konventionellen Energieträgern, bezogen auf den gesamten thermischen Energiebedarf, eingesetzt. Dies entspricht einem Anstieg der konventionellen Energieträger von ca. 6 % im Vergleich zum Vorjahr. Dieser Anstieg entspricht in etwa dem Anstieg der Produktionsmenge.

Tabelle 2: Konventioneller Energieeinsatz im Jahr 2007

Brennstoff	[GWh/a]
Steinkohle	1.212
Braunkohle	504
Petrolkoks	157
Heizöl L	7
Heizöl S	171
Erdgas	40
sonstige	71
<b>Summe</b>	<b>2.162</b>

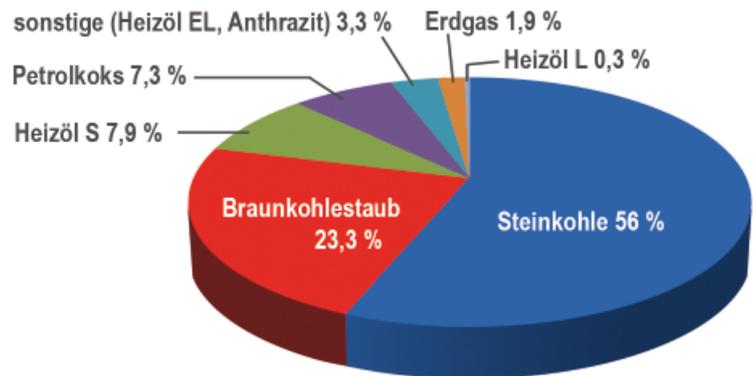


Abbildung 8: Anteile konventioneller Energieträger

Stein- und Braunkohle sind die am meisten eingesetzten konventionellen Energieträger mit in Summe ca. 80 %, wie in Abbildung 8 ersichtlich wird.

### 5.1.3 Ersatzbrennstoffe

Der Anteil an Ersatzbrennstoffen am gesamten thermischen Energiebedarf belief sich im Jahr 2007 auf 46 %. Bezogen auf das Jahr 2006 entspricht dies einem Rückgang von 4,9 Prozentpunkten. Zum Vergleich betrug der Anteil der Ersatzbrennstoffe im Jahr 2002 ungefähr 45 %.

Tabelle 3: Ersatzbrennstoffeinsatz im Jahr 2007

Ersatzbrennstoff	[GWh/a]
Altreifen	232
Kunststoffabfälle	967
Altöl	240
Lösungsmittel	105
landwirtschaftliche Rückstände	12
Papierfaserreststoffe	48
sonstige	243
<b>Summe</b>	<b>1.851</b>

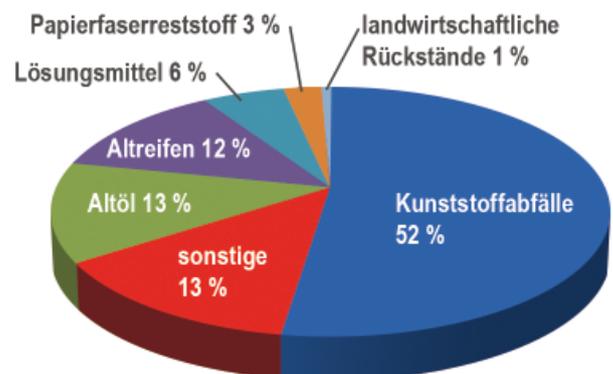


Abbildung 9: Anteile Ersatzbrennstoffe

Kunststoffabfälle bilden mit 52 % den am meisten eingesetzten Ersatzbrennstoff in der österreichischen Zementindustrie im Jahr 2007.

## 5.2 Brennstoffenergiebedarf

Zementklinker wird in Drehrohrofenanlagen im Brennprozess bei hohen Temperaturen unter Einsatz von fossilen Brennstoffen sowie geeigneten Sekundärbrennstoffen wie z. B. aufbereiteten Fraktionen aus Gewerbeabfällen erzeugt. Beim Brennen im Drehrohrofen ist ein gezieltes definiertes Temperaturprofil notwendig, um die geeignete Zusammensetzung und damit die charakteristischen Eigenschaften des Klinkers zu gewährleisten. Ca. 50 % der spezifischen Brennstoffenergie werden allein für das Abspalten des Kohlendioxides, welches im Calciumcarbonat im Gestein gebunden ist, benötigt [ZT-51]. Die verbleibende Energie aus den Brennstoffen wird im Klinkerbrennprozess für die Trocknung und die nachfolgende Aufheizung des Rohmaterials sowie zur Deckung der Wärmeverluste benötigt.

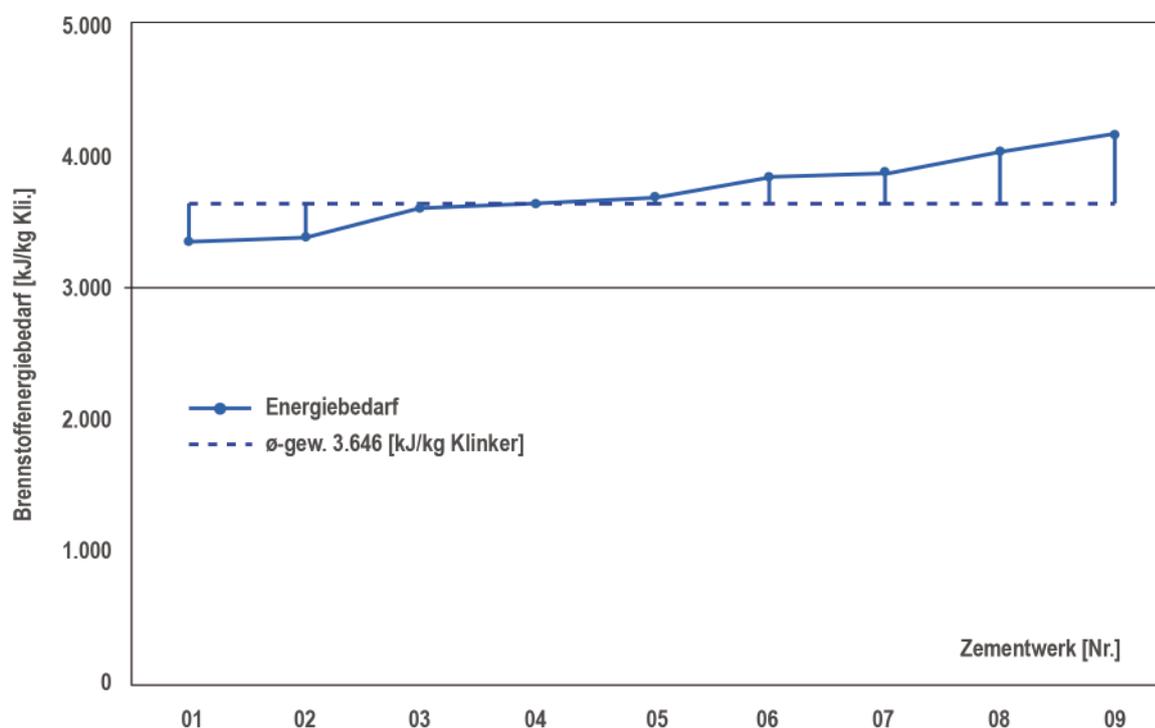


Abbildung 10: Brennstoffenergiebedarf der österreichischen Zementwerke im Bezugsjahr 2007

In den letzten zwei Dekaden konnte der thermische Energieeinsatz in der österreichischen Zementindustrie durch umfangreiche Modernisierungsmaßnahmen der Anlagen- und Verfahrenstechnik, die in der Regel zu einer höheren Produktionsleistung führten, auf ein stabiles, durchschnittliches Niveau von deutlich unter 4.000 kJ/kg Klinker gesenkt werden. Die Auswertung der Daten lieferte gemäß Abbildung 10, nach Gewichtung über die produzierten Klinkermengen der 9 Klinker brennenden Standorte, einen mittleren Brennstoffenergiebedarf von 3.646 kJ/kg Klinker. Aus dieser Abbildung wird weiterhin deutlich, dass der Energiebedarf von zwei Zementwerken um etwa 8 % unterhalb des Durchschnitts liegt, wohingegen zwei Werke den Durchschnitt um ca. 10 % überschreiten. Die Klinkerproduktionsmengen dieser beiden Werke sind relativ gering.

Der ermittelte Durchschnittswert von 3.646 kJ/kg Klinker aus Abbildung 10 stimmt insgesamt sehr gut mit dem von Mauschitz erhobenen Wert aus den Emissionsdaten für das Jahr 2007 überein, vgl. Tabelle 1. Für die deutsche Zementindustrie wird ein ähnlicher Mittelwert der eingesetzten Brennstoffenergie bei vergleichbarem Brennstoffmix berichtet [VDZ-Umweltdaten].

Die Energiebilanz in nachfolgender Abbildung 11 enthält die wesentlichen thermischen Input- und Output-Energieströme der österreichischen Zementindustrie zur Herstel-

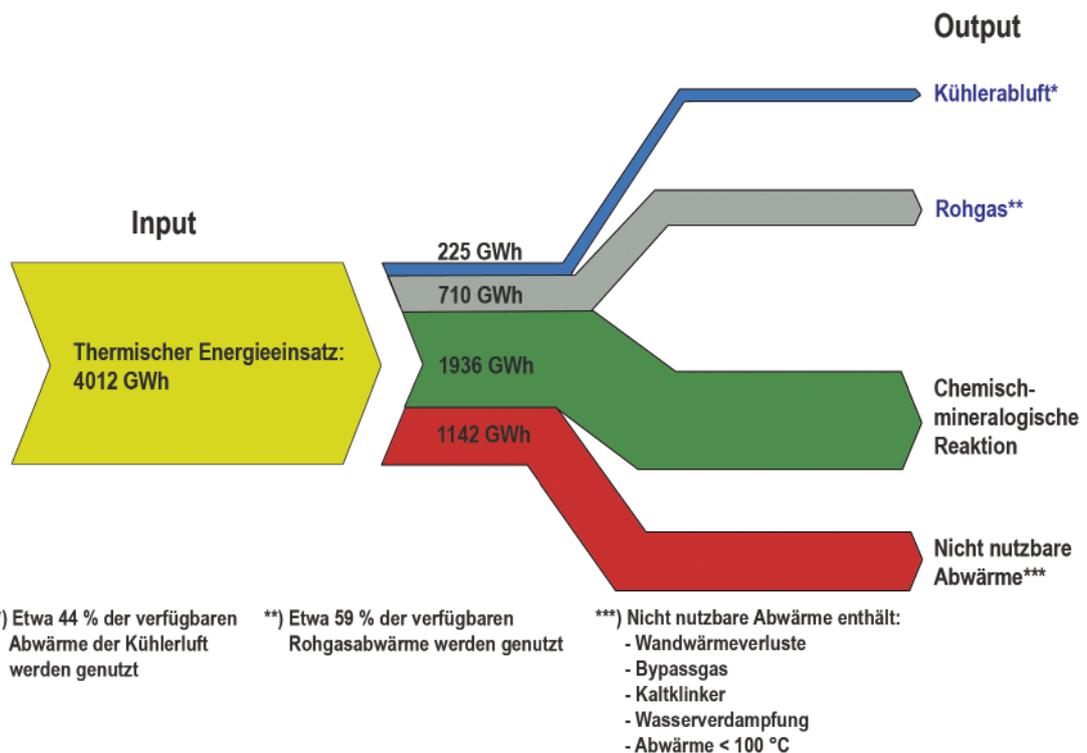


Abbildung 11: Energiebilanz der österreichischen Zementwerke im Bezugsjahr 2007

lung von Zementklinker. Der Brennstoffenergieeinsatz für den thermischen Prozess der Klinkerproduktion betrug im Jahr 2007 4.012 GWh. Die dabei erzeugte Abwärme im Rohgas in Höhe von ca. 710 GWh wurde zu einem großen Teil für die Materialtrocknung und Rohmehlerwärmung in den Rohmühlen verwendet, siehe hierzu Abbildung 17.

Für die chemisch-mineralogische<sup>5</sup> Umwandlung des Rohmaterials zu Zementklinker werden mit 1.936 GWh ca. 50 % der Brennstoffenergie eingesetzt. Der Anteil der vorhandenen, jedoch verfahrenstechnisch oder aufgrund niedriger Temperaturen nicht weiter nutzbaren Abwärme beträgt 1.142 GWh bzw. 28 % der für den Brennprozess eingesetzten thermischen Energie. Die ermittelten Potenziale der nutzbaren Abwärme werden in Abschnitt 6.1.2 beziffert.

### 5.3 Elektrischer Energiebedarf

Der elektrische Energiebedarf der österreichischen Zementindustrie belief sich im Jahr 2007 auf 588 GWh. Der Einsatz elektrischer Energie gliedert sich in folgende Teilbereiche:

- elektrische Antriebe >95 %
- Druckluft ~ 2-5 %
- Kälteerzeugung >1 %
- Raumheizung/Warmwasserbereitung <1 %
- Beleuchtung ~ 1 %

Bezogen auf die Prozessschritte wird elektrische Energie bei der Zementherstellung vor allem für die Rohmaterialaufbereitung (etwa 35 %), zum Brennen und Kühlen des Klinkers (ca. 22 %) und für die Zementmahlung einschließlich Verpackung und Verladung (ca. 38 %) aufgewendet. Der spezifische elektrische Energiebedarf für die Rohmehlmahlung lag bei den untersuchten Werken zwischen 14 und etwa 21 kWh/t Rohmehl. Zement wurde bei einem mittleren spezifischen Energiebedarf von 45 kWh/t Zement hergestellt, siehe Abbildung 12, wobei die Schwankungsbreite zwischen 35 und 66 kWh/t lag.

<sup>5</sup> Unter Annahme eines thermischen Energiebedarfs von 1.750 kJ/kg Klinker für die chemisch-mineralogischen Reaktionen bzw. Umwandlungen

### 5.3.1 Rohmehl- und Zementmahlung

Die Rohmehlmahlung in den untersuchten Werken erfolgt im Wesentlichen mithilfe von Kugel- und Vertikalwälzmühlen. Der Energiebedarf der Rohmahlanlagen schwankt dabei zwischen etwa 14 und 21 kWh/t. Zement wurde in 24 Zementmahlanlagen mit Kugelmühlen, von denen fünf Anlagen zusätzlich auch mit einer Rollenpresse ausgerüstet sind, hergestellt. Die Zementmahlung bezieht sich auf Angaben zur Herstellung von 5.186.000 t der Hauptsorten CEM I bis CEM III. Diese Produktionsmenge ist etwas geringer als die insgesamt hergestellte Zementmenge. Grund hierfür ist die Tatsache, dass Mahlanlagen üblicherweise auf die jeweils dann hergestellten Hauptsorten abgestimmt werden, um insgesamt eine möglichst effiziente Betriebsweise zu gewährleisten. Aus dieser Darstellung kann jedoch kein elektrisches Optimierungspotenzial abgeleitet werden, da der elektrische Energiebedarf für die Zementmahlung stark von der Zementsorte und damit von der Zementfeinheit und der Mahlbarkeit der Zementhauptbestandteile (Klinker, Hüttensand, Kalkstein u. a.) abhängt. Daneben ist auch die eingesetzte Mahltechnik (Mühlentyp, Sichter etc.) von Bedeutung.

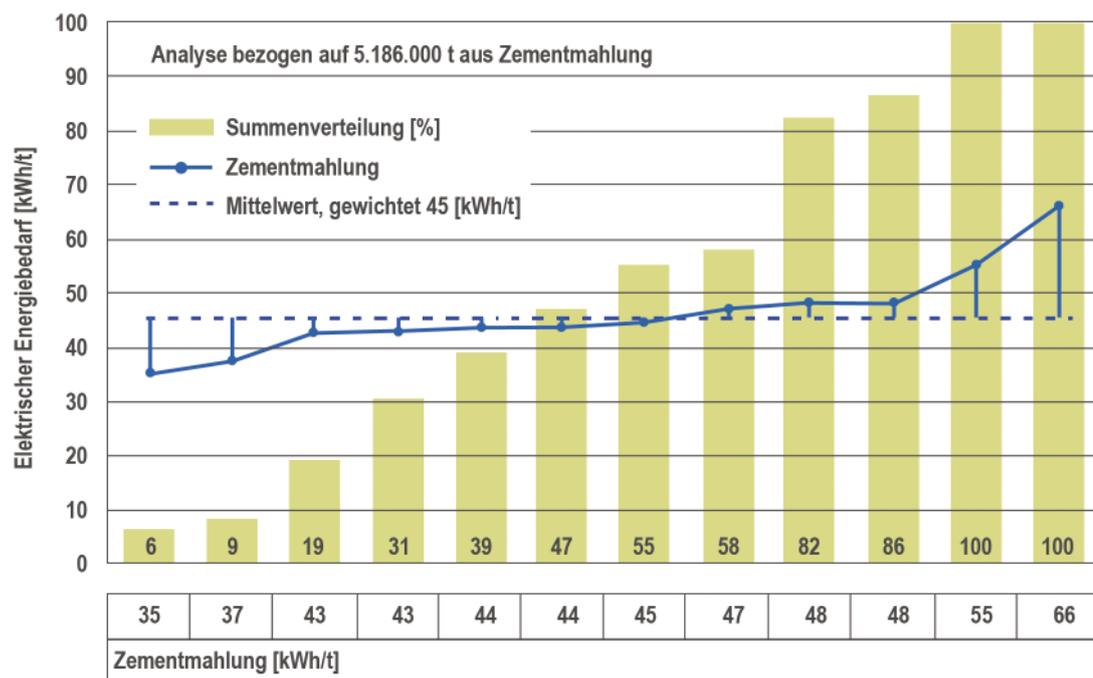


Abbildung 12: Elektrischer Energiebedarf für die Zementmahlung

Insofern spiegelt die große Streubreite der ermittelten Werte v. a. Unterschiede im Produktportfolio, aber z. T. auch bezüglich der eingesetzten Mahltechnik wider.

## 5.4 Wärmenutzung

Abwärme steht in Zementwerken vor allem mit dem Rohgas und der Kühlerabluft zur Verfügung. Zementrohstoffe werden in feuchter Form abgebaut, daher ist deren Trocknung erforderlich. Aus diesem Grund werden Drehrohrofenanlagen im Verbund mit Mahltrocknungsanlagen für die Rohstoffe betrieben. Wenn zusätzliche Abwärme verfügbar ist, kann diese zur Trocknung weiterer Stoffe, wie z. B. Hüttensand oder Rohkohle, verwendet werden. Grundsätzlich ist es auch möglich, die Abwärme in Wärme (z. B. für Fernwärmeeinspeisung) umzuwandeln oder zur Verstromung zu nutzen.

### 5.4.1 Interne Wärmenutzung

Im Jahr 2007 wurden 515 GWh vorhandene Abwärme für interne Anwendungen eingesetzt. Die Abwärme im Rohgas betrug im Jahr 2007 ca. 710 GWh. Diese Abwärme wurde zu einem großen Teil für die Materialtrocknung und Rohmehlerwärmung in den Rohmühlen verwendet. Zusätzlich stehen noch 294 GWh an nutzbarer Abwärme<sup>6</sup> aus dem Rohgas zur Verfügung. Die Abwärme aus Kühlerabluft beläuft sich auf 225 GWh. Die Kühlerabluft wird häufig für Trocknungs- bzw. Vorwärmvorgänge eingesetzt.

Im Jahr 2007 wurden ca. 23 GWh für weitere Anwendungen wie zum Beispiel Warmwasserbereitung, Raumheizung und Brennstoffwärmung und -trocknung eingesetzt. Eine Aufteilung der internen Wärmenutzung der österreichischen Zementindustrie ist in Abbildung 13 dargestellt.



Abbildung 13: Nutzbare Abwärme<sup>6</sup> (> 100 °C)

<sup>6</sup> Als nutzbare Abwärme wurden in dieser Studie ausschließlich Abwärmequellen mit einer Mindesttemperatur von 100 °C betrachtet. Das tatsächliche Abwärmepotenzial ist deutlich größer, jedoch sind keine geeigneten Abwärmesenken für Niedertemperaturabwärme vorhanden.

#### 5.4.2 Externe Wärmenutzung

Eine Möglichkeit der Nutzung von Abwärme ist die Versorgung von Wärmeverbraucherern mittels Fernwärmenetz. Bisher ist diese Form der Abwärmenutzung an einem Standort der österreichischen Zementindustrie realisiert. Das Versorgungsgebiet Kirchdorf, Micheldorf und ein Teil von Schlierbach ist das älteste Wärmenetz der Energie AG Oberösterreich Wärme GmbH. Ein Teil der Abwärme des Klinkerkühlers am Standort Kirchdorf wird als Kühlerabluft abgekoppelt und mittels Wärmetauscher in das Fernwärmenetz Kirchdorf/Micheldorf eingespeist. Im Jahr 2007 wurden somit ca. 10 GWh an Abwärme ausgespeist. Größere Abnehmer des Fernwärmenetzes sind ein Einkaufszentrum und ein Krankenhaus, wodurch eine ganzjährige Abnahme der Fernwärme von Kirchdorfer Zement möglich ist.

Die Leitungslänge des Fernwärmenetzes Kirchdorf betrug im Jahr 2007 ungefähr 48 km für 1.346 Abnehmer. Die Anschlussleistung der Abnehmer betrug 37,4 MW. Im Jahr 2007 wurden 58 GWh an Wärme an Kunden verkauft. Aufgrund der günstigen örtlichen Gegebenheiten und angeschlossener Verbraucher mit teilweise hohen Volllaststunden ist in diesem Fall eine ökonomische Wärmeausspeisung möglich.

Aufgrund der gegebenen Rahmenbedingungen muss die Wirtschaftlichkeit einer Fernwärmeausspeisung in jedem Fall einzeln überprüft werden.

### 5.5 Klinker/Zement-Faktor

Bei der Herstellung der verschiedenen Zementsorten werden neben Zementklinker und einem Sulfatträger andere Zementhauptbestandteile wie z. B. Kalkstein oder Hüttensand verwendet. Diese Zementhauptbestandteile ersetzen den Klinker im Zement und führen zu einer Verringerung des auf die Zementherstellung bezogenen Brennstoffenergiebedarfs. Da der Einsatz anderer Zementhauptbestandteile zu teilweise veränderten Zementeigenschaften führt, können diese Zementsorten – je nach Substitutionsgrad – nicht ohne Weiteres in allen Anwendungsbereichen einfach eingesetzt werden. Die Charakterisierung der unterschiedlichen Zementarten erfolgt nach ihrer Zusammensetzung. So setzt sich ein CEM-I-Zement aus 91 bis 96 % Klinker zusammen. Dagegen kann ein so genannter CEM-V-Kompositzement mit 20 bis 64 % Klinker hergestellt werden.

Im Jahr 2007 lag der im Rahmen dieser Studie (Hauptzementsorten, inkl. Mahlwerke, exkl. klinkerfreier Produkte) ermittelte durchschnittliche Klinker/Zement-Faktor über alle Zementsorten und -werke bei etwa 75 %. Abbildung 14 stellt den Klinker/Zement-Faktor der einzelnen Standorte dar. Aus dieser Darstellung kann jedoch kein Optimierungspotenzial direkt abgeleitet werden, da einerseits die Zementarten mit

unterschiedlichen Klinkergehalten marktgerecht bereitgestellt werden müssen. Andererseits sind die Hauptbestandteile wie Hüttsand und Flugasche nur für Standorte mit guter Anbindung an Hütten- und Kraftwerke verfügbar. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass diese Materialien nicht explizit, kontinuierlich und in bedarfsgerechten Mengen für die Zementindustrie hergestellt werden. Vielmehr handelt es sich um Materialien, deren Anfallmengen Einflüssen unterliegen, die nicht im Einflussbereich der Zementhersteller liegen.

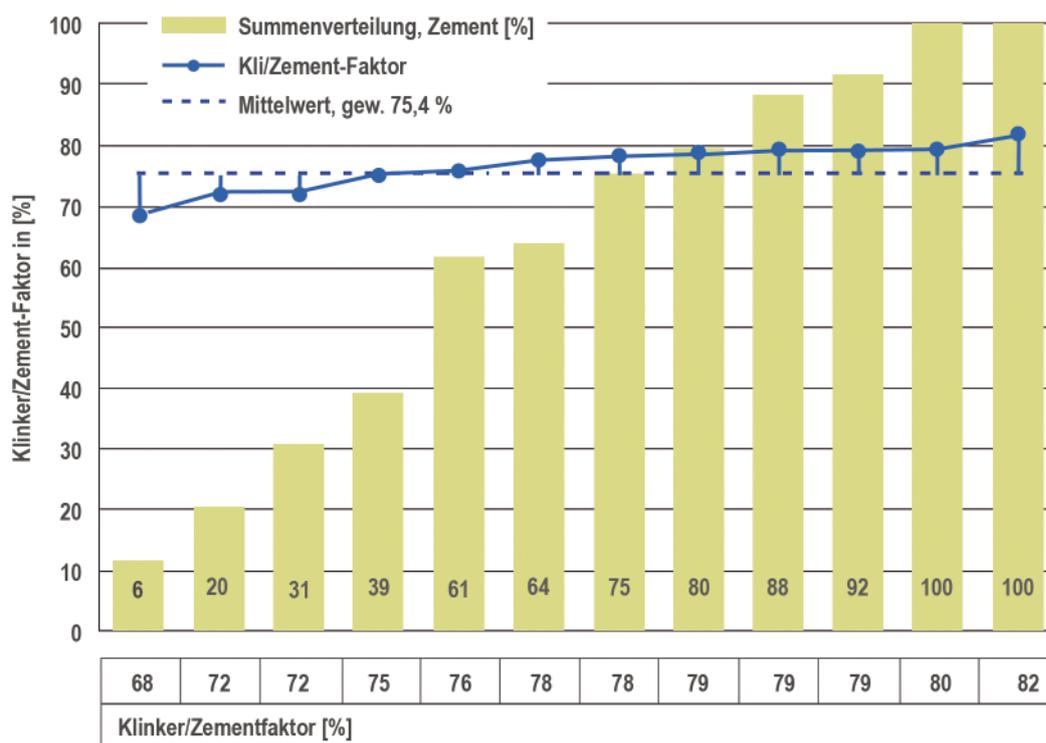


Abbildung 14: Klinker/Zement-Faktor der österreichischen Zementwerke

## 6 Potenziale

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse aus der energetischen Effizienzanalyse der einzelnen Standorte für die untersuchten Teilbereiche dargestellt. Darüber hinaus werden Erkenntnisse aus der Istanalyse und Einsparpotenziale in aggregierter Form gegenübergestellt, sodass auf diese Weise eine branchenweite Bewertung möglich ist.

### 6.1 Thermischer Energiebedarf

In der Zementindustrie fällt der Anteil der Energiekosten an den gesamten Herstellungskosten im Vergleich mit anderen Industrien relativ hoch aus. Die Energieeinsparung stellt nicht nur aus diesem Grund eine bedeutende technische und ressourcenschonende Aufgabe dar. Um im zunehmend globalisierten Markt erfolgreich bestehen zu können, ist die österreichische Zementindustrie bemüht, ihren Energiebedarf und damit die Brennstoffenergiekosten zu senken. Nicht zuletzt geht die Senkung des Energiebedarfes mit einer Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Hinblick auf künftig steigende Kosten aus dem Emissionshandel einher. Es ist jedoch zu beachten, dass die Verminderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen und die Erhöhung der Energieeffizienz in gewissen Fällen durchaus gegenläufig sein können. Insofern werden durch die Politik in Einzelfällen durchaus nicht eindeutige Zielsetzungen vorgegeben.

Der thermische Energiebedarf ist die bedeutendste Kenngröße für die Beurteilung der Energieeffizienz in der Zementindustrie. Bei der energetischen Analyse des thermischen Prozesses wird zunächst der reale Zustand der einzelnen Ofenanlagen ermittelt und anhand von Kenngrößen bewertet. Optimierungspotenziale werden abgeleitet, wenn entweder aus dem Abgleich mit den Ergebnissen der Modellierung eines „Idealzustandes“ Potenziale festgestellt werden oder der energetische Einsatz oberhalb von Vergleichswerten ähnlicher Anlagen liegt.

#### 6.1.1 Klinkerbrennprozess

Der Brennstoffenergiebedarf der realen sowie der modellierten Anlagen nach Stand der Technik (BAT) dient als entscheidende Größe zur Ableitung von Minderungspotenzialen. Der modellierte Energiebedarf unterscheidet sich insofern vom realen Energiebedarf, als dass dieser Wert für ideale Betriebsbedingungen gilt, der in der Praxis eher einem kurzzeitigen Leistungstest entspricht. Im Vergleich mit dem realen Jahresdurchschnittswert mit betriebsbedingten An- und Abfahrvorgängen und rohstoff-, brennstoff- oder prozessbedingten Schwankungen ist der modellierte Wert deshalb um einen

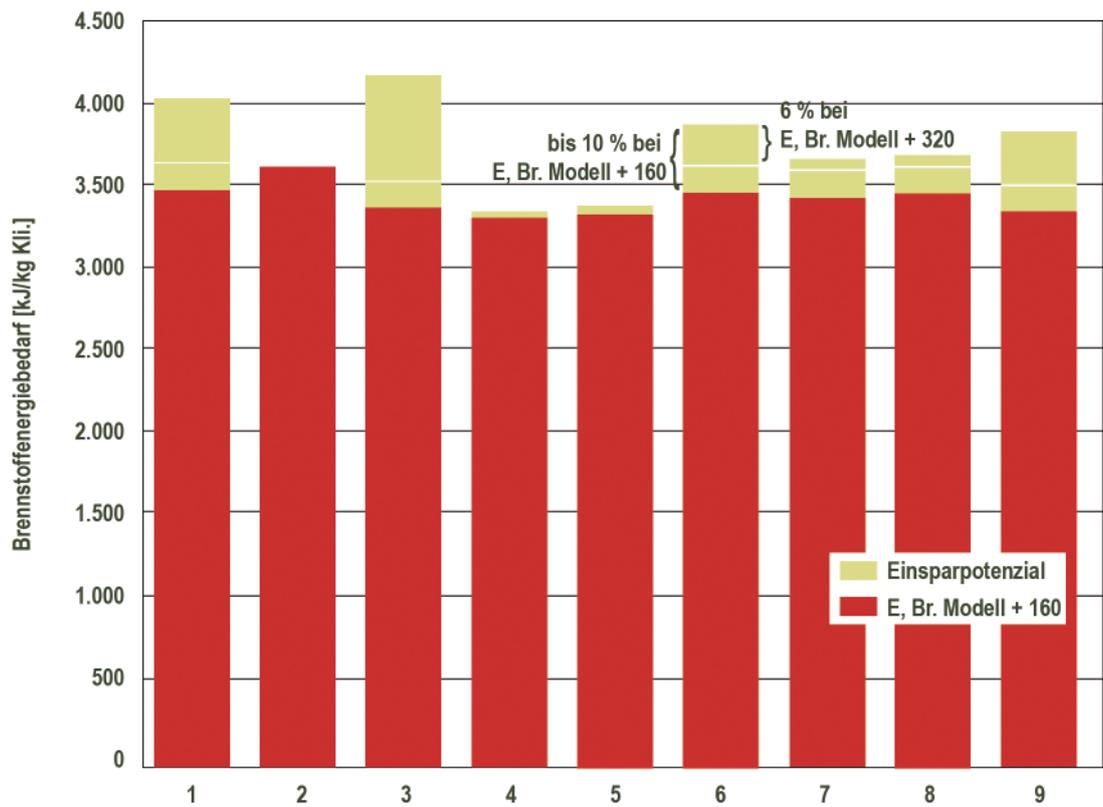
gewissen Betrag niedriger. Erfahrungen des Forschungsinstituts der Zementindustrie von einer Reihe in den vergangenen zwei Jahrzehnten neu gebauten Ofenanlagen zeigen, dass diese Differenz in der Praxis ca. 160-320 kJ/kg Klinker beträgt [Klei-06]. Dieser Bereich wurde durch Vergleich der Ergebnisse von Leistungsversuchen und Jahresmittelwerten des Brennstoffenergiebedarfs existierender Ofenanlagen ermittelt und ist auch in das revidierte BREF-Dokument (BREF = BAT Reference) für die Zementindustrie eingeflossen [BREF-2010]. Bezogen auf den Jahresdurchschnittswert des Brennstoffenergiebedarfs der österreichischen Zementwerke von 3.646 kJ/kg Klinker beträgt diese Differenz 4,4 bis 8,8 %.

Das Einsparpotenzial aus der Gegenüberstellung der Modellergebnisse und dem mittleren jeweiligen Brennstoffenergiebedarf der neun österreichischen Zementwerke mit Klinkerproduktion ist in Abbildung 15 zusammengefasst. Bei dieser Darstellung wurde der jeweils modellierte Brennstoffenergiebedarf um den oben beschriebenen Erfahrungswert von 160 kJ/kg Klinker erhöht, um einen direkten Vergleich auf der Basis von Jahresmittelwerten zu ermöglichen. Weiterhin wird aus den dargelegten Gründen das spezifische Einsparpotenzial als Bereich von zwei Werten (modellierter Wert + 160/320 kJ/kg Klinker) quantifiziert.

Auf der Basis der eingesetzten Brennstoffe sowie der vorliegenden Anlagenkonfiguration wurde an einer Anlage kein Optimierungspotenzial festgestellt. Das größte Optimierungspotenzial wurde mit 15 bis 19 % der eingesetzten Brennstoffenergie an einer anderen Anlage festgestellt, welches jedoch bei der vorliegenden Anlagenkonfiguration nicht umsetzbar ist.

Tabelle 4 enthält den aggregierten Brennstoffenergiebedarf aller neun Zementwerke mit Klinkerproduktion sowie den modellierten Energiebedarf im Jahresmittel. Zusätzlich ist der modellierte Mindestenergiebedarf (E, Br, Modell) dargestellt, der einem kurzzeitigen Leistungstest entspricht und nicht mit dem Jahresdurchschnitt vergleichbar ist. Zum Vergleich mit dem tatsächlichen Jahresmittelwert sind die berechneten Werte (E, Br, Modell + 160/+ 320) aufgeführt.

Das Einsparpotenzial liegt für den gesamten Branchendurchschnitt in einem Bereich zwischen 78 und 238 kJ/kg Klinker bzw. zwischen 2,2 und 6,5 %. Aus dieser Betrachtung heraus kann abgeleitet werden, dass die Klinkerherstellung in der österreichischen Zementindustrie bezüglich des Brennstoffeinsatzes insgesamt weitgehend optimiert betrieben wird. Inwieweit der Offset von 160 bzw. 320 kJ/kg Klinker mittelfristig verringert und dadurch die Jahresmittelwerte an die modellierten Mindestwerte weiter angenähert werden können, war nicht Gegenstand dieser Studie.



	Einsparpotenzial								
E, Br. Modell + 320	10 %	0 %	15 %	0 %	0 %	6 %	2 %	2 %	8 %
E, Br. Modell + 160	bis 14 %	bis 0 %	bis 19 %	bis 1 %	bis 2 %	bis 10 %	bis 6 %	bis 6 %	bis 13 %

Abbildung 15: Einsparpotenzial des Brennstoffenergiebedarfes der einzelnen Werke

Tabelle 4: Einsparpotenzial des Brennstoffenergiebedarfes über Branchendurchschnitt

	Energiebedarf			
	Istdaten	Modelldaten		
	Jahresmittel	Performance	Jahresmittel	
	E	E, Br. Modell	E, Br. Modell + 160	E, Br. Modell + 320
	[kJ/kg Kli.]	[kJ/kg Kli.]		
<b>Mittelwert, gew.</b>	3.646	3.247	3.407	3.567
<b>Einsparpotenzial I</b>			238	78
<b>Einsparpotenzial II</b>			6,5 %	2,2 %

Die dargestellte Analyse des Istzustandes sowie das ermittelte Gesamtpotenzial bestätigen die bekannte Tatsache, dass moderne Zementdrehrohrofenanlagen mit einem Brennstoffenergiebedarf betrieben werden, der in einem - im Vergleich zu anderen Industriebranchen - engen Bereich streut. Unter diesen Bedingungen sind signifikante Verbesserungen der Energieeffizienz nur durch vollständigen Neubau oder weitgehenden Umbau der Ofenanlagen möglich. Andererseits ist die Zementindustrie sehr kapitalintensiv und die Lebenszeit von Zementdrehrohrofenanlagen beträgt zwischen 30 und 50 Jahren. Während dieser Lebenszeit werden die Anlagen üblicherweise jährlich einer Großreparatur unterworfen, in der betriebliche Optimierungen und zum Teil der Ersatz einzelner Anlagenbauteile vorgenommen werden. Solche kleineren Maßnahmen führen jedoch meist nur zu vergleichsweise geringen Verbesserungen der Energieeffizienz. Weiterhin gilt allgemein, dass selbst der Ersatz einzelner Anlagenteile (wie z. B. Klinkerkühler) niemals allein durch die Verminderung der Energiekosten wirtschaftlich gerechtfertigt werden kann. Größere Umbaumaßnahmen werden in der Regel deshalb dann durchgeführt, wenn sie mit einer Leistungssteigerung der Ofenanlage verbunden werden können. Insbesondere der Umbau vom Trockenverfahren auf Vorcalciniertechnik ist mit einer Steigerung der Klinkerproduktionskapazität von 30 bis 50 % verbunden. Dies lässt sich nur dann rechtfertigen, wenn diese höheren Mengen im Markt abgesetzt werden können oder aber die Produktionskapazität zweier kleiner Ofenanlagen durch eine große substituiert werden kann.

In der österreichischen Zementindustrie sind fünf der elf betriebsbereiten Drehrohrofenanlagen mit der Vorcalciniertechnik ausgestattet. Zum Teil waren sie von Beginn an mit dieser Technologie ausgerüstet (z. B. Zementwerk Mannersdorf) oder wurden im Nachhinein auf diese Technologie umgebaut (z. B. Zementwerk Wietersdorf). Im Zementwerk Leube ist die Substitution der beiden Ofenanlagen durch eine Vorcalciniieranlage für das Jahr 2010 geplant.

Im Rahmen der Analyse der einzelnen Standorte wurden die im Folgenden zusammengefassten Technologien im Detail betrachtet und auf ihre Umsetzbarkeit untersucht.

#### 6.1.1.1 Einbau einer zusätzlichen Zyklonstufe

Bei der Auslegung neuer Anlagen richtet sich die Anzahl der Zyklonstufen nach der im Steinbruch vorliegenden Rohmaterialfeuchte, die primär mit Abwärme in der Rohmühle getrocknet wird. Darüber hinaus verfügbare Abwärme kann für weitere Nutzungszwecke verwendet werden. Abbildung 16 stellt Nutzung und verbleibendes Potenzial der im Rohgas enthaltenen Abwärme bei mittlerer Rohmaterialfeuchte sowie das Verhältnis dieser Größen dar. Werk 9 benötigt nahezu die vollständige Abwärme aus dem Rohgas für die Trocknung in der Rohmühle bei einer vorhandenen Rohmaterialfeuchte von etwa 10 %. Dagegen stehen in Werk 1 etwa 75 % der vorhandenen Abwärme,

bei geringer Rohmaterialfeuchte von 2,4 %, zur weiteren Nutzung zur Verfügung. In Werk 6 ist die Rohgastemperatur prozessbedingt derart gering, dass diese durch heißere Kühlerabluft aufgewärmt werden muss.

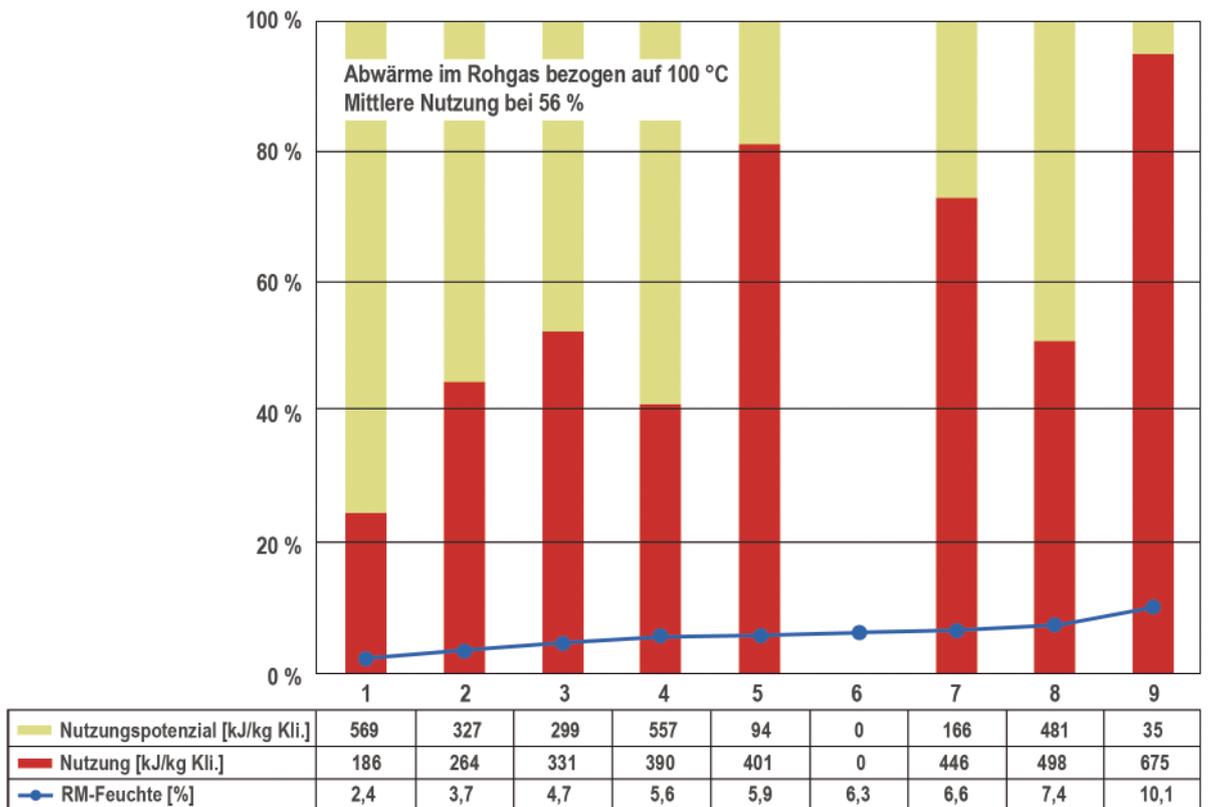


Abbildung 16: Abwärme im Rohgas/Nutzung und verbleibendes Potenzial

Die theoretische Mindestzyklonstufenzahl lässt sich aus der Rohmaterialfeuchte ermitteln, siehe Tabelle 5. So kann der Brennstoffenergiebedarf mit der Nachrüstung einer zusätzlichen Zyklonstufe gemindert werden, wenn es die Rohmaterialfeuchte zulässt. Dabei wird die Wärmerückgewinnung aus dem Rohgas an die Rohmaterialfeuchte angepasst. Jahreszeitliche Schwankungen des Feuchtegehaltes müssen bei der Auslegung der Zyklonstufen berücksichtigt werden.

Tabelle 5: Anzahl der Zyklonstufen in Abhängigkeit von der Feuchte des Rohmaterials [Klei-06]

Wassergehalt des Rohmaterials [Ma.-%]	Anzahl der Zyklonstufen [n]
> 12	3
8 bis 12	4
6 bis 8	5
< 6	6

Nachfolgende Tabelle 6 zeigt, dass bei der Modellierung vier Anlagen entgegen der Konfiguration der realen Anlagen mit sechs Zyklonstufen an die vorhandene Feuchte des Rohmaterials angepasst wurden. Aus dieser Betrachtung heraus ist grundsätzlich eine energetische Einsparung bezogen auf den Brennstoffenergiebedarf von 80 bis 100 kJ/kg Klinker durch Nachrüstung einer weiteren Zyklonstufe möglich [Ecr-09]. Diese Einsparmaßnahme ist im Einzelfall in Konkurrenz mit anderen Maßnahmen wie Stromerzeugung oder Abwärmenutzung durch Einspeisung in ein vorhandenes Fernwärmenetz zu sehen.

Tabelle 6: Rohmaterialfeuchte/Anzahl der Zyklonstufen, Modellanlagen vs. Istanlagen

Werk [Nr.]	RM-Feuchte [%]	Istdaten Zyklonstufen	Modell Zyklonstufen
1	2,4	5	6
2	3,7	4	6
3	4,7	4	6
4	5,6	4	5
5	5,9	5	5
6	6,3	Lepol	5
7	6,6	5	5
8	7,4	5	5
9	10,1	4	4

### 6.1.1.2 Klinkerkühler

Der Energieverbrauch einer Drehrohrofenanlage hängt entscheidend davon ab, inwieweit die im Klinker enthaltene Energie im Kühler zurückgewonnen wird. Die ungenutzte Enthalpie geht der Drehrohrofenanlage als Energieverlust verloren. Rostkühler werden grundsätzlich mit einem Überschuss an Kühlluft betrieben, der als Kühlerabluft aus dem thermischen Prozess ausgeschleust wird. Die Kühlerabluft kann unter bestimmten Voraussetzungen zum Trocknen, zur Rekuperation in Heizanlagen oder zur Verstromung genutzt werden. Bei Satellitenkühlern entsteht bauartbedingt keine Abluft, da die gesamte Kühlluftmenge durch den Kühler in den Drehrohrofen geführt

wird. Messungen haben gezeigt, dass der energetische Verluststrom nach [ZKG-5] zwischen 25 % und teilweise über 40 % beträgt. Moderne Klinkerkühler können unter optimierten Betriebsbedingungen günstige Wirkungsgrade bis 80 % erreichen.

Die ermittelten Kühlerwirkungsgrade aus den untersuchten Zementwerken sowie der Modellierung sind in Tabelle 7 dargestellt. Die Mehrzahl der Kühler der untersuchten Zementwerke erreicht akzeptable Wirkungsgrade. Vier Klinkerkühler wiesen recht günstige Wirkungsgrade über 70 % auf. Großes Optimierungspotenzial kann jedoch bei den vorliegenden Kühlern allein durch bauliche Maßnahmen nicht mehr erreicht werden. Bei zwei Werken wurden jeweils erhebliche Optimierungspotenziale um etwa 20 % im Vergleich mit den modellierten Kühlern festgestellt. Die aus der Modellierung ermittelten Kühlerwirkungsgrade gemäß BAT können bei den meisten vorliegenden Klinkerkühlern allein durch technische Umbaumaßnahmen nicht erreicht werden, da die wesentlichen baulichen Optimierungsmöglichkeiten bzw. Maßnahmen zur Kapazitätssteigerung bereits ergriffen wurden. Bei einigen Kühlern wurde ein Optimierungspotenzial durch Instandhaltungsmaßnahmen festgestellt.

Tabelle 7: Kühlerwirkungsgrade nach [Vt-8], Istdaten und Modelldaten

Werk	Kühlerwirkungsgrad		
	Istdaten	Modelldaten	Differenz
[Nr.]	[%]	[%]	[%]
1	69	78	9
2	71	72	1
3	58	76	18
4	71	78	7
5	67	75	8
6	75	74	-1
7	71	75	4
8	53	74	21
9	72	74	2

Im erfolgreichen Produktionsjahr 2007 wurden Klinkerkühler weitgehend an der Leistungsgrenze nahe der thermischen Belastbarkeit betrieben. Der Austausch der Klinkerkühler als Teilanlage stellt dann eine technisch mögliche Maßnahme zur Effizienzsteigerung dar. Allein aus Gründen der energetischen Optimierung sind jedoch die hohen Investitionskosten nicht zu vertreten.

#### 6.1.1.3 Weitere Potenziale

Weitere standortspezifische Optimierungspotenziale wurden aus der Istanalyse und dem Abgleich mit optimalen Kenngrößen festgestellt. Bei einigen Werken wurden beispielsweise etwas höhere Falschlufteinbrüche ermittelt, sodass aus der Minderung

der Falschluff eine Reduzierung des Brennstoffenergiebedarfes mit einfachen Mitteln möglich ist. Weiterhin kann der Brennprozess in einigen Fällen, insbesondere bei höheren Ersatzbrennstoffraten, durch Sauerstoffanreicherung stabilisiert werden, wodurch ebenfalls eine Reduzierung des Brennstoffenergiebedarfs möglich ist. Der Einsatz von Mineralisatoren sowie entsäuerter Rohmaterialien ist grundsätzlich eine weitere Möglichkeit zur Verminderung des Brennstoffenergiebedarfs beim Klinkerbrennen.

Die Strahlungsabwärme des Drehrohrofens ist neben der Rohgasenthalpie bei konventionellen Drehrohrofenanlagen der größte spezifische Energieverlust. Insofern ist es verständlich, dass schon seit vielen Jahrzehnten immer wieder versucht wurde, Technologien zu entwickeln, die eine Nutzung dieser Strahlungsabwärme ermöglichen. Zwei wesentliche Gründe haben dazu geführt, dass diese Technologien bis heute nicht als Stand der Technik gelten: Zum einen fällt die Wärme auf niedrigem Temperaturniveau an, sodass eine weitere Umwandlung nicht sinnvoll ist und die Wärme nur direkt als solche verwendet werden kann. Der zweite aus betriebstechnischer Sicht wichtigere Punkt ist die notwendige Überwachung der Ofenwandtemperatur mittels Pyrometer als wichtiges Kontrollinstrument zur Vermeidung von Hotspots an der Ofenwand.

In der Vergangenheit wurde eine Vielzahl technischer Maßnahmen zur Nutzung der Strahlungsabwärme untersucht. Da diese sich alle als nicht umsetzbar erwiesen, wurde zwischenzeitig versucht, die Strahlungsabwärme selbst durch zusätzliche Isolation der Drehrohrofenwand abzusenken. Allerdings blieben auch diese Versuche letztlich erfolglos, da gasförmige Alkalisalze bei geringeren Temperaturen auf der Ofeninnenwand auskondensieren und zu erheblichen Schäden an Feuerfestmaterial und Verankerungen führten.

### 6.1.2 Abwärmenutzung

Aufgrund des hohen thermischen Energieeinsatzes in Zementwerken steht in vielen Fällen nutzbare Abwärme zur Verfügung. Die nachfolgende Abbildung 17 stellt die Nutzung sowie das verbleibende Nutzpotenzial der Abwärme aus Rohgas und Kühlerabluft dar. Bei dieser Betrachtung wurde davon ausgegangen, dass das Abgas nur bis zu einer Temperatur von 100 °C genutzt werden kann, um eine gesicherte Ableitung über den Kamin zu gewährleisten. Der österreichischen Zementindustrie stehen mit 935 GWh an nutzbarer Abwärme aus Rohgas und Kühlerabluft etwa 23 % der eingesetzten thermischen Energie zur Verfügung, vgl. Abbildung 11. Davon werden bereits ca. 44 % bzw. 416 GWh für die Rohmaterialtrocknung und die Rohmehlerwärmung verwendet. 2 % bzw. 23 GWh werden für interne Wärmeverbraucher (Warmwasserbereitung, Raumheizung, Brennstofftrocknung und Brennstoffvorwärmung) eingesetzt.

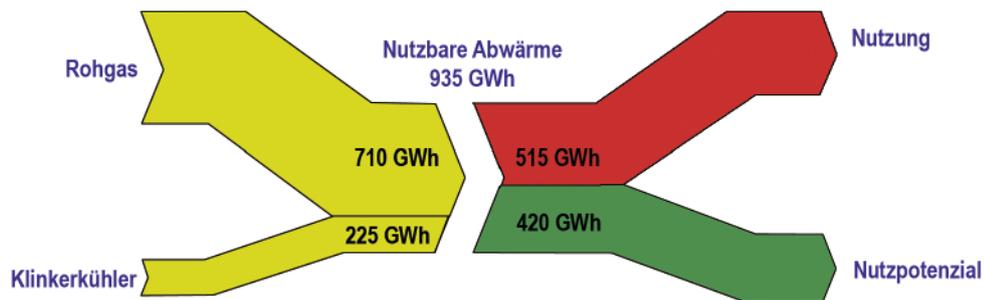


Abbildung 17: Nutzungspotenziale aus nutzbarer Abwärme der österreichischen Zementindustrie

Im Jahr 2007 wurden in der österreichischen Zementindustrie etwa 44 % der Kühlerabluft überwiegend für Mahltrocknungsprozesse bei der Zementherstellung und für weitere Zwecke wie Brennstoffvorwärmung, Heizanlagen, Fernwärmeausspeisung etc. genutzt. In diesem Bereich der Anlage und des Zyklonwärmetauschers sind teilweise zusätzlich wirtschaftlich und technisch nutzbare Abwärmeströme vorhanden.

Das noch verfügbare nutzbare Abwärmepotenzial der gesamten österreichischen Zementindustrie betrug im Jahr 2007 ca. 420 GWh bzw. 45 % der nutzbaren Abwärme. Dies entspricht ca. 10,5 % der eingesetzten thermischen Energie.

Die noch verfügbare Abwärme kann grundsätzlich intern am Standort oder von externen Verbrauchern genutzt werden.

Für die interne Nutzung können folgende Verbraucher in Betracht gezogen werden:

- Brennstofftrocknung/Brennstoffvorwärmung
- Raumheizung
- Kälteerzeugung
- Stromerzeugung

Für die externe Nutzung wurde in dieser Studie die Möglichkeit der Fernwärmeauskopplung betrachtet. Die folgende Abbildung stellt die nutzbare Abwärme an den einzelnen Standorten dar.

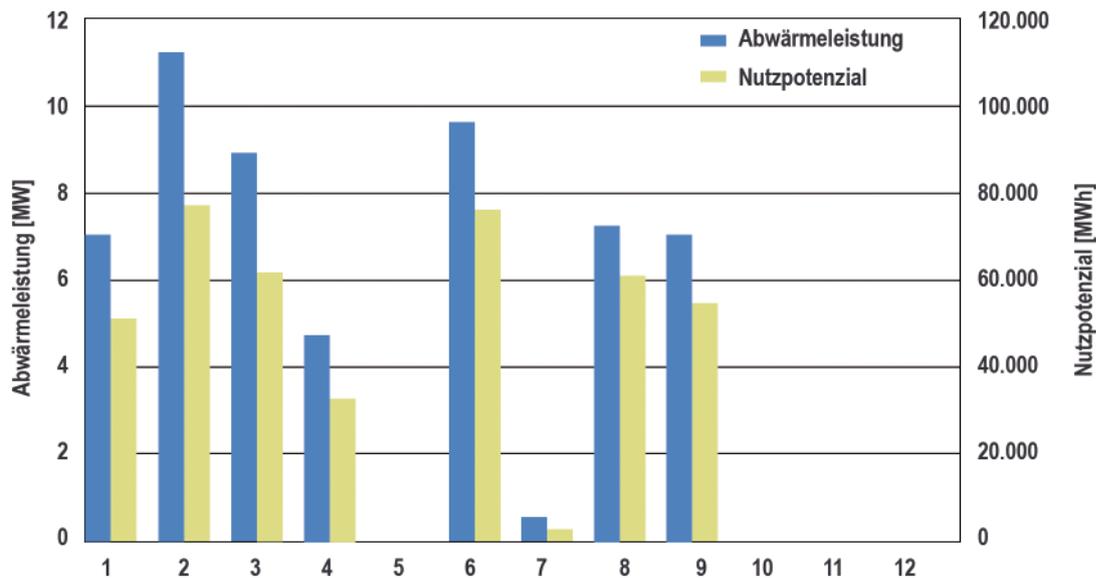


Abbildung 18: Abwärme an den Standorten der österreichischen Zementindustrie

Die max. Abwärmeleistung und das sich daraus ergebende Nutzpotenzial der untersuchten Standorte ist in Abbildung 18 dargestellt. Dabei ist auf der linken Ordinate die nutzbare Abwärmeleistung und auf der rechten Ordinate das Nutzpotenzial unter Berücksichtigung der jährlichen Volllaststunden dargestellt. Zur Erklärung dieses Diagramms dient das folgende Beispiel: Ein Standort verfügt über eine Abwärmequelle mit einer thermischen Leistung von 10 MW (bezogen auf 100 °C). Diese Abwärmequelle steht während der Drehrohfenbetriebszeit von 8.000 Stunden ganzjährig mit voller Leistung zur Verfügung. Daraus ergibt sich ein Nutzpotenzial dieser Abwärmequelle von 80.000 MWh pro Jahr.

#### 6.1.2.1 Interne Abwärmenutzung

Die Stromerzeugung aus Abwärme bietet im Gegensatz zur direkten Wärmenutzung den Vorteil, die erzeugte elektrische Energie in ein öffentliches Netz einzuspeisen, auch wenn kein Wärmebedarf besteht. Somit können mit einer Stromerzeugung hohe Volllaststunden im Gegensatz zu einer direkten Wärmenutzung für z. B. Heizzwecke erreicht werden. Aufgrund der unterschiedlichen Tarife für elektrische Energie und Energiepreissteigerungen kann eine Stromerzeugung aus Abwärme eine wirtschaftliche Maßnahme darstellen.

Derzeit wird an keinem Standort der österreichischen Zementindustrie der Energieträger Dampf erzeugt. Für eine effiziente Dampferzeugung aus Abwärme sind hohe Abgastemperaturen erforderlich, welche nur in einzelnen Fällen vorliegen. Der ORC-Prozess basiert auf einem Wasser-Dampf-Prozess, verwendet jedoch ein organisches Arbeitsmedium, welches bereits bei geringeren Temperaturen verdampft. Somit kann

der ORC-Prozess ab Temperaturen von ca. 100 °C eingesetzt werden und wurde deshalb an allen Standorten der österreichischen Zementindustrie betrachtet.

Ein ORC-Prozess bietet die Möglichkeit, Gase oder Flüssigkeitsströme selbst auf geringem Temperaturniveau zur Elektrizitätserzeugung mit passablem Wirkungsgrad zu nutzen. Der elektrische Wirkungsgrad solcher Anlagen liegt zwischen 15 % und 23 %. Der tatsächlich erreichbare Wirkungsgrad hängt u. a. von Faktoren wie Gleichmäßigkeit bzw. Verfügbarkeit von Abwärme und eingesetztem Arbeitsmedium ab. Grundsätzlich weisen ORC-Prozesse eine gute Teillastfähigkeit und die Fähigkeit zu schnellen Lastwechseln auf, was sich bei An- und Abfahrvorgängen positiv auswirkt. Die Instandhaltungskosten von ORC-Prozessen sind verhältnismäßig gering und es ist kein zusätzliches Personal am Standort notwendig.

In einem Zementwerk bieten sich allgemein drei Möglichkeiten zum Einsatz eines ORC-Prozesses:

- Klinkerkühlerabluft
- Abgas aus dem Wärmetauscher vor dem Ofen
- Chlorbypass-Abgas

Basierend auf den vorhandenen Abwärmepotenzialen der einzelnen Standorte wurde der Einsatz von ORC-Anlagen untersucht. Das technische Potenzial einer Stromerzeugung mittels ORC-Anlagen in der österreichischen Zementindustrie liegt bei etwa 6,8 MW. Dadurch könnten jährlich etwa 48.000 MWh elektrischer Energie erzeugt werden. Zusätzlich bietet ein erforderlicher Kühlprozess bei ORC-Anlagen eine Nutzung der verbleibenden Abwärme aus ORC-Anlagen für Niedertemperaturanwendungen wie z. B. Raumheizung, Warmwasserbereitung, Trocknungsprozesse usw.

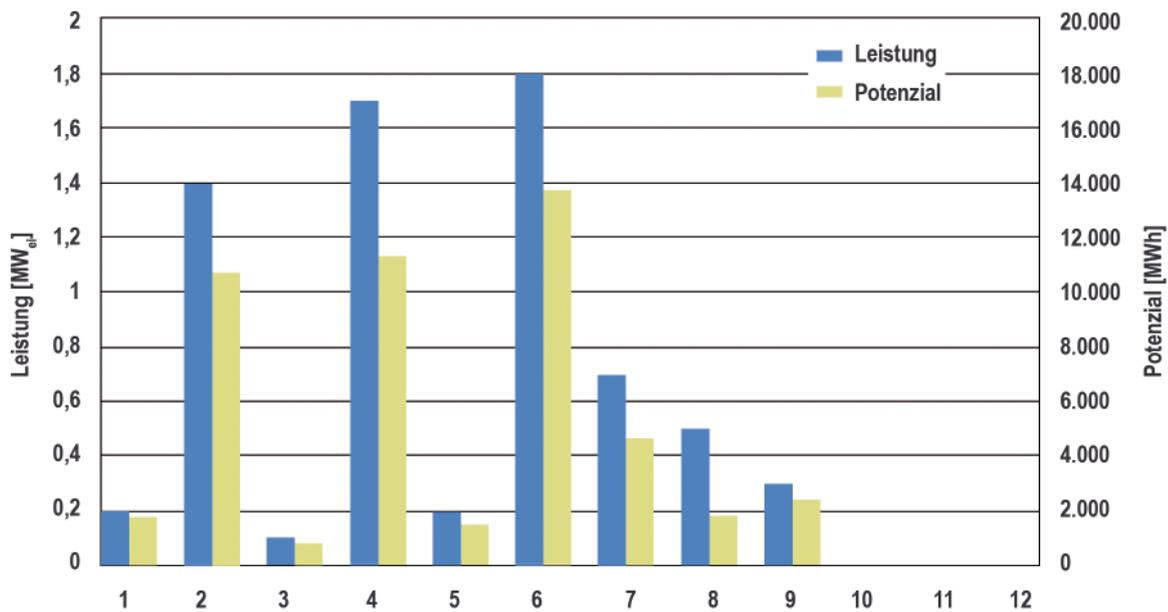


Abbildung 19: Potenzial ORC-Prozess in der österreichischen Zementindustrie

Die statischen Amortisationszeiten der identifizierten Optimierungsmaßnahmen können wie folgt unterteilt werden:

Statische Amortisationszeit [a]	[GWh]
<3	0
3-5	0
>5	48

#### 6.1.2.2 Externe Abwärmenutzung

Eine direkte Nutzung für interne oder externe Verbraucher stellt die effizienteste Nutzungsmöglichkeit vorhandener Abwärme dar. Derzeit ist, wie in Kapitel 5.4.2 angeführt, an einem Standort bereits eine Fernwärmeauskopplung realisiert. Eine Fernwärmeauskopplung ist technisch an allen Standorten der österreichischen Zementindustrie möglich, jedoch nur in den seltensten Fällen ist auch die Wirtschaftlichkeit solcher Maßnahmen gegeben.

Kommunale Wärmenetze sind in den seltensten Fällen in der Nähe von Zementwerken vorhanden, wodurch ein Aufbau eines entsprechenden Wärmenetzes in den meisten Fällen erforderlich ist. Ein Aufbau eines Fernwärmesystems ist lediglich bei nahe liegenden geeigneten Verbrauchern unter wirtschaftlichen Rahmenbedingungen möglich. Die Wirtschaftlichkeit von Fern- und Nahwärmesystemen hängt stark von der Anschlussdichte, den angeschlossenen Verbrauchern und den daraus resultierenden Volllaststunden der Anlage ab.

Häufig finden die vier- bis achtwöchigen wartungsbedingten Werksstillstände während der Heizperiode statt, wodurch einerseits die Volllaststunden des Systems reduziert werden und andererseits ein zusätzliches Wärmebereitstellungssystem für die angeschlossenen Verbraucher erforderlich ist.

Ein Aufbau eines Fernwärmesystems durch einen Wärmeversorger reduziert die Investitionskosten deutlich, erhöht jedoch zugleich den organisatorischen Aufwand. Eine Vernetzung von Betrieben mit hohem, konstantem Wärmebedarf in örtlicher Nähe der Zementwerke würde die Wirtschaftlichkeit einer Fernwärmeausspeisung erhöhen. Unter den derzeitigen Gegebenheiten ist eine Vernetzung jedoch nicht möglich, da aufgrund der örtlichen Gegebenheiten und eines erheblichen organisatorischen Aufwandes nur vereinzelt die notwendigen Rahmenbedingungen gegeben sind. Die Nutzung von Abwärme für die Wärmebereitstellung in Fern- bzw. Nahwärmenetzen ist somit nur in den seltensten Fällen unter wirtschaftlichen Rahmenbedingungen möglich.

In der folgenden Abbildung ist das technische Potenzial zur Fernwärmeauskopplung dargestellt.

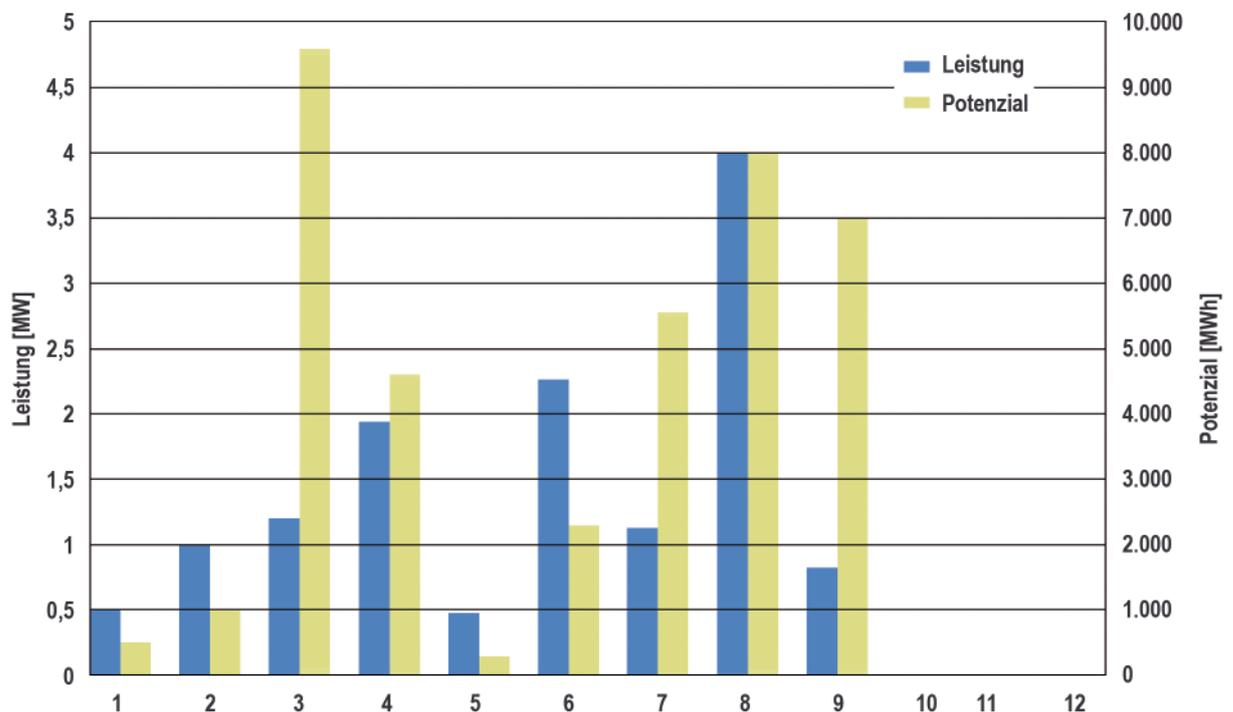


Abbildung 20: Fernwärmepotenzial der österreichischen Zementindustrie

Das technische Potenzial für Fernwärmeauskopplung in der österreichischen Zementindustrie beträgt ca. 39 GWh. Davon könnten Maßnahmen in der Höhe von ca. 22 GWh an Fernwärme mit statischen Amortisationszeiten kleiner 10 Jahren umge-

setzt werden. Die Wirtschaftlichkeit der gesamten identifizierten Maßnahmen beläuft sich auf ca. 10 Jahre. Voraussetzung ist jedoch, wie bereits erwähnt, das Vorhandensein eines Fernwärmenetzes in der näheren Umgebung der Zementwerke.

Die statischen Amortisationszeiten der identifizierten Optimierungsmaßnahmen können wie folgt unterteilt werden:

Statische Amortisationszeit [a]	[GWh]
<3	13
3-5	0
>5	26

### 6.1.3 Kälteerzeugung

Die Kälteversorgung von Gebäuden und die Raumklimatisierung (z. B. Serverräume) gewinnen zunehmend auch in Industriebetrieben an Bedeutung, was sich bei dem Energiebedarf für Kälteerzeugung bemerkbar macht. Die Standorte der österreichischen Zementindustrie verfügen hauptsächlich über dezentrale Kälteanlagen. Lediglich in Ausnahmefällen wird Kälte über zentrale Kälteanlagen bereitgestellt. Die Effizienz zentraler Kälteerzeugungsanlagen (ohne Berücksichtigung von Transportverlusten) ist in den meisten Fällen höher als von vergleichbaren dezentralen Kälteanlagen. Aus diesem Grund wurden in dieser Studie die Standorte hinsichtlich des Einsatzes von zentralen Kälteanlagen mit der dafür erforderlichen Infrastruktur untersucht. Die erforderliche Kälteleistung der österreichischen Zementindustrie im Jahr 2007 betrug etwa 3 MW. Der elektrische Energiebedarf zur Kältebereitstellung belief sich im Jahr 2007 auf ca. 9.800 MWh bzw. rund 1,7 % des gesamten Strombedarfs der österreichischen Zement- und Mahlwerke.

#### **Kompressionskälteanlagen:**

Die Arbeitszahl (COP – Coefficient of Performance) aktueller Kompressionskältemaschinen liegt im Bereich zwischen 2,5 und 5. Zentrale Kälteanlagen sind in der Lage, den erforderlichen Kältebedarf effizient bereitzustellen. Anhand dieser Maßnahme können jährlich ca. 266 MWh elektrischer Energie eingespart werden. Die statische Amortisationszeit für die Erneuerung der vorhandenen Kältemaschinen beträgt im Durchschnitt ca. 70 Jahre.

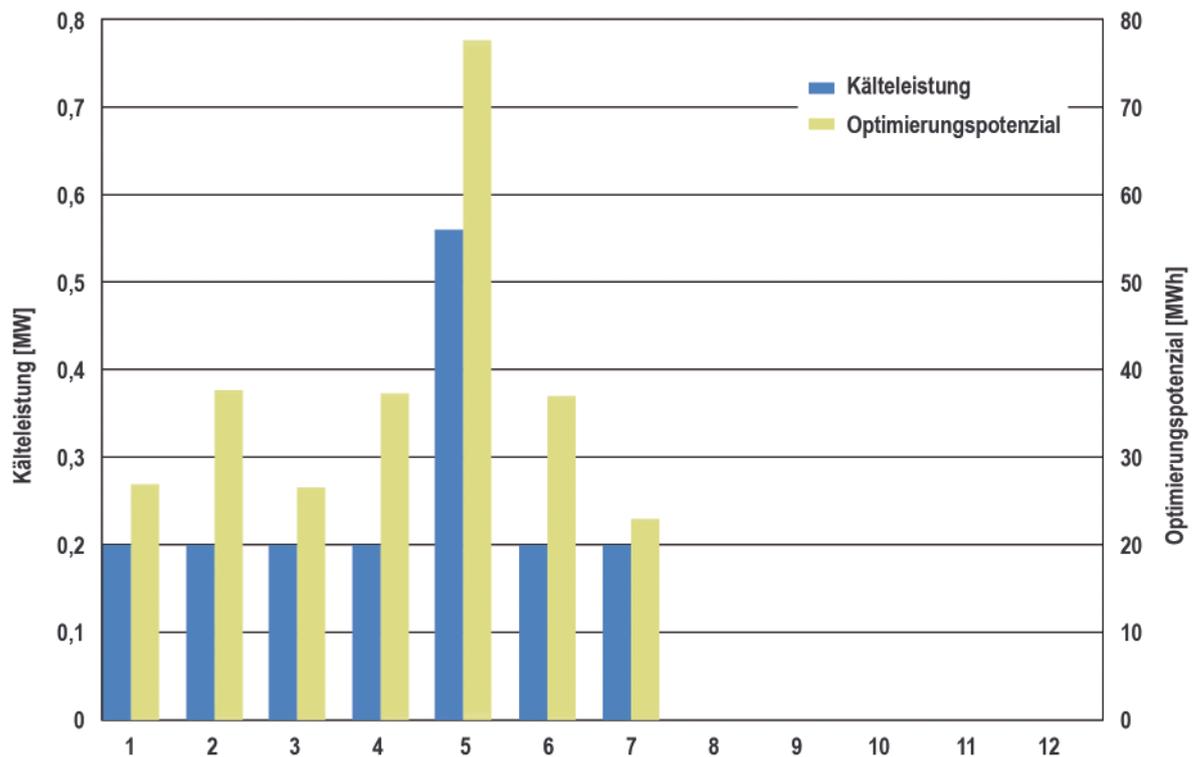


Abbildung 21: Potentiale zentraler Kompressionskältemaschinen in der österreichischen Zementindustrie

Die statischen Amortisationszeiten der identifizierten Optimierungsmaßnahmen können wie folgt unterteilt werden:

Statische Amortisationszeit [a]	[GWh]
<3	0
3-5	0
>5	0,3

### **Absorptionskälteanlagen:**

Die Kälteerzeugung aus Wärme wird häufig mittels Absorptionskälteanlagen bewerkstelligt. Absorptionskälteanlagen verwenden im Gegensatz zu Kompressionskälteanlagen einen thermischen Verdichter, wodurch der elektrische Energiebedarf deutlich gesenkt wird. Dadurch sind diese in der Lage, auftretende Lastspitzen von Kältemaschinen zu reduzieren. Fernwärme, (industrielle) Abwärme oder Abwärme aus KWK-Anlagen werden üblicherweise als Energieträger zur Kälteerzeugung verwendet. Absorptionskälteanlagen sind mit Kälteleistungen zwischen 20 kW und größer 1 MW am Markt verfügbar.

Der Einsatz von Absorptionskälteanlagen könnte den elektrischen Energiebedarf der österreichischen Zement- und Mahlwerke jährlich um 850 MWh verringern, wobei die durchschnittliche statische Amortisationszeit bei ca. 50 Jahren liegt.

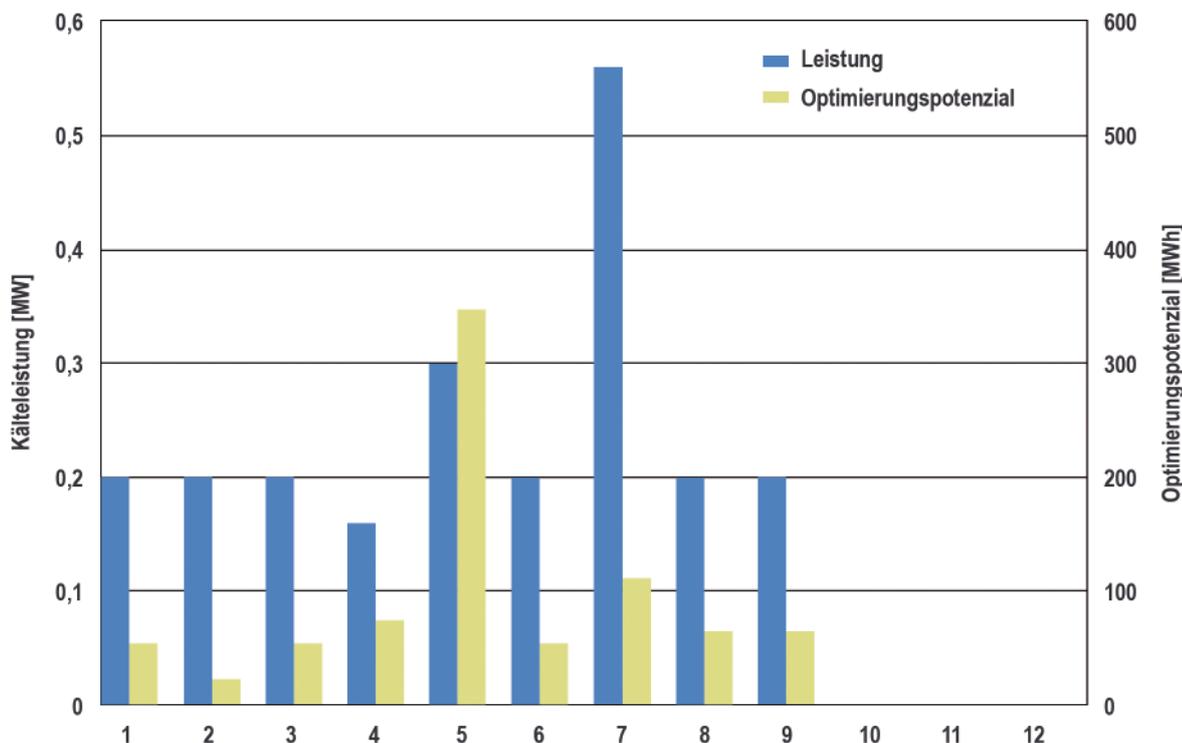


Abbildung 22: Potenziale von Absorptionskälteanlagen in der österreichischen Zementindustrie

Die statischen Amortisationszeiten der identifizierten Optimierungsmaßnahmen können wie folgt unterteilt werden:

Statische Amortisationszeit [a]	[GWh]
<3	0
3-5	0
>5	0,85

#### 6.1.4 Raumheizung, Warmwasserbereitstellung und sonstige Wärmebereitstellung

Die Raumheizung wird an den Standorten der österreichischen Zementindustrie aufgrund örtlicher Gegebenheiten hauptsächlich durch mehrere dezentrale Heizungs-systeme einfach und effizient bereitgestellt. Aufgrund der dezentralen Bereitstellung treten geringe Bereitschafts- und Verteilverluste an den Standorten auf. Als Energieträger werden Erdgas, Heizöl, elektrische Energie und Abwärme eingesetzt. An man-

chen Standorten wird bereits Abwärme aus dem Produktionsprozess für Raumheizung verwendet. Zusätzlich konnten Potenziale für die Einbindung von Abwärme aus der Druckluftherzeugung identifiziert werden. Die ermittelten Potenziale sind in folgender Abbildung dargestellt.

Aus den untersuchten Standorten konnten 9 Optimierungsmaßnahmen an 7 Standorten im Bereich Raumheizung und Warmwasserbereitung ermittelt werden. Eine Umsetzung dieser Projekte entspricht einer jährlichen Minderung des Energiebedarfs von ca. 4,6 GWh/a.

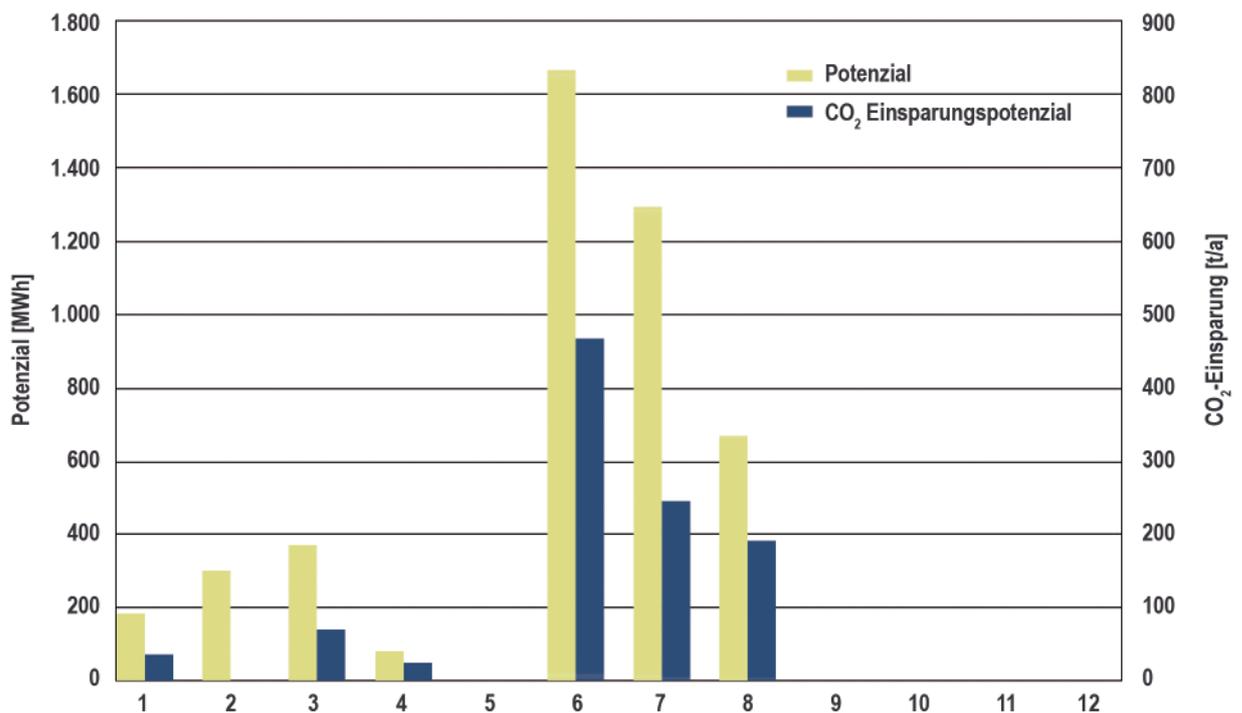


Abbildung 23: Energie- und CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial im Bereich Raumheizung

Eine Umsetzung der identifizierten Maßnahmen würde eine jährliche Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um ca. 1.060 t bewirken. Aus den erarbeiteten Maßnahmen konnte ein wirtschaftliches Projekt identifiziert werden. Die durchschnittliche statische Amortisationszeit der Maßnahmen beträgt 4,5 Jahre.

Die statischen Amortisationszeiten der identifizierten Optimierungsmaßnahmen können wie folgt unterteilt werden:

Statische Amortisationszeit [a]	[GWh]
<3	0,1
3-5	2,7
>5	1,8

### 6.1.5 Trocknung von Sekundärbrennstoffen

Die aufbereiteten kunststoffhaltigen Gewerbeabfälle werden mit Wassergehalten von etwa 10 bis über 20 % in Drehrohrofenanlagen verbrannt. Da außerdem die Partikelgrößen in einem weiten Bereich schwanken, werden diese Fraktionen bevorzugt im Calcinator eingesetzt. Der Einsatz in der Hauptfeuerung ist wegen der gezielten Temperaturführung im Drehrohrofen ohne weitere Aufbereitung nur in gewissen Grenzen möglich. Es ist zu erwarten, dass mittel- bis langfristig die Qualität der flugfähigen Kunststoffe abnimmt bzw. auch die Feuchte dieser Sekundärbrennstoffe zunimmt. Daher könnte die Trocknung dieser feuchten Brennstoffe mithilfe von Abluft oder Abgas in Zukunft an Bedeutung zunehmen. Hinsichtlich einer Steigerung der Energieeffizienz könnte das in den Sekundärbrennstoffen enthaltene freie Wasser mithilfe von Prozessabwärme entfernt werden. Hierzu liegen jedoch derzeit keine verbreiteten Betriebserfahrungen vor. Versuche an Pilotanlagen könnten erste Erkenntnisse liefern, ob die Trocknung mittels Prozessabwärme eine geeignete Methode zur Effizienzsteigerung oder Potenzialnutzung darstellt.

## 6.2 Elektrischer Energieverbrauch

Elektrische Energie wird bei der Zementherstellung - nach Prozessschritten eingeteilt - vor allem für Rohmaterialaufbereitung (etwa 35 %), zum Brennen und Kühlen des Klinkers (ca. 22 %) und für die Zementmahlung einschließlich Verpackung und Verladung (ca. 38 %) aufgewendet. Der große Teil dieser elektrischen Energie wird wiederum für elektrische Antriebe in allen Prozessstufen eingesetzt. Die Mahlprozesse - die Mahlung der eingesetzten Rohmaterialien zu einem feinen Gesteinsmehl (dem sog. Rohmehl) sowie die Aufmahlung des Zementklinkers mit dem Sulfatträger und anderen Zementhauptbestandteilen wie Hüttsand, Kalkstein usw. - bestimmen mit ihrer Effizienz maßgeblich den Stromverbrauch des gesamten Zementwerks. Da die energetische Effizienz dieser Prozesse eher durch Prozessoptimierung als durch Optimierung der einzelnen Aggregate wie z. B. die Antriebe verbessert werden kann, wurden die Mahlprozesse in den Zementwerken insgesamt analysiert und bewertet. Querschnittstechnologien wie z. B. Druckluftversorgung, Beleuchtung sowie Antriebe in den anderen Prozessstufen wurden gesondert untersucht.

Die wesentlichen Optimierungspotenziale von Mahlanlagen mit Kugelmühlen liegen in der Verbesserung des Sichter-Trenngrades sowie der Optimierung des Zerkleinerungsprozesses durch Anpassung der Gattierung an die vorliegende Zerkleinerungsaufgabe. Dazu gehören im Bedarfsfall auch die Anpassung der Mühlenpanzerung sowie die Konfiguration der Trenn- und Austragswände, um die in die Mühle eingetragene Energie möglichst gut in Zerkleinerungsarbeit umsetzen zu können. Die nachfolgend quantifizierten Einsparmaßnahmen zur Optimierung der Kugelmühlen mithilfe dieser beschriebenen Maßnahmen lassen sich somit recht einfach umsetzen. Weitere Verbesserungen können durch den Einsatz von Mahlhilfsmitteln erreicht werden.

### 6.2.1 Mahlung der Rohstoffe

Das Rohmaterial wird in allen österreichischen Zementwerken trocken aufbereitet. Bei dieser Aufbereitung werden die Rohmaterialkomponenten über genau geregelte Dosiereinrichtungen einer Mühle in bestimmten Mischungsverhältnissen aufgegeben und zu Rohmehl feingemahlen. Mitunter werden Korrekturkomponenten wie Quarzsand, Ton oder Eisenerz zugesetzt, um die erforderliche chemische Zusammensetzung des Rohmehls einzustellen.

Bei der Zerkleinerung in der Kugelmühle oder in der Vertikalwälmühle wird das Mahlgut mit Heißgas getrocknet, das durch die Mahlanlage gesaugt wird. Im Allgemeinen wird hierfür der Wärmeinhalt der Abgase des Ofensystems genutzt. Bei höherem Feuchtegehalt des Aufgabematerials wird zusätzlich ein Teil der Kühlerabluft verwendet oder eine zusätzliche Feuerung zur Heißgaserzeugung eingesetzt. Sehr feuchtes Rohmaterial wird z. T. vor der Mahlung in einem Trommeltrockner vorgetrocknet. Anstelle von Kugelmühlen, in denen das Gut durch eine umlaufende Stahlkugelfüllung gemahlen wird, werden heute zunehmend Vertikalwälmühlen zur Rohmaterialmahlung verwendet. Bei diesem Mühlentyp zerkleinern feststehende Walzen das Gut auf einem sich drehenden Mahlteller. Diese Mühlen haben im Vergleich zu Kugelmühlen einen niedrigeren spezifischen Energiebedarf, außerdem kann das Aufgabematerial deutlich höhere Wassergehalte haben als bei der Zerkleinerung in Kugelmühlen. Bei stark abrasiven Materialien sind ihre Einsatzmöglichkeiten durch hohen Verschleiß an den Mahlwerkzeugen aber begrenzt. Große Vertikalwälmühlen nach dem Stand der Technik ermahlen heute das Rohmehl, in Abhängigkeit der Mahlbarkeit des eingesetzten Rohmaterials, bei einem spezifischen Energiebedarf von etwa 10 kWh/t bis 16 kWh/t Rohmehl.

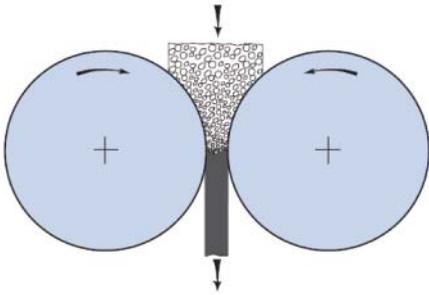


Abbildung 24: Rollenpresse

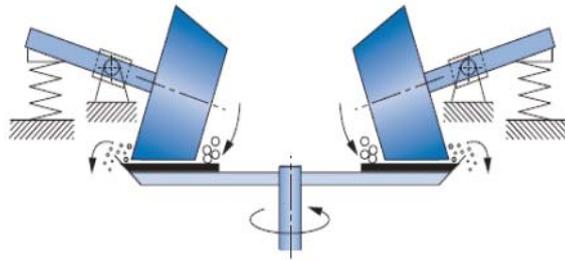


Abbildung 25: Vertikalwählmühle

In den 9 Werken mit Klinkerproduktion werden 10 Rohmühlen betrieben, davon 4 Kugelmühlen und 6 Vertikalwählmühlen. Die Vertikalwählmühlen sind überwiegend älteren Baujahres; bauartbedingt sind Mühlen dieses Typs aber relativ energieeffizient, sodass hier bis auf einen Fall keine signifikanten Verbesserungspotenziale bestehen. Ein Zementwerk, in dem zur Rohmahlung eine ältere Vertikalwählmühle eingesetzt wird, lieferte auf der Basis eines spezifischen Strombedarfes von 21 kWh/t Rohmehl unter der Annahme üblicher Mahlbarkeit beachtliches Optimierungspotenzial im Vergleich zu einer neueren Mühle dieses Typs, die dem Stand der Technik entspricht. Die übrigen Mahlanlagen waren weitgehend optimiert.

Weiterhin wurde in drei Werken ein elektrisches Einsparpotenzial zwischen 5 und 7 % bezüglich der Rohmahlung mit Kugelmühlen festgestellt. Dieses Einsparpotenzial entspricht einer Energie von ca. 1.440 MWh/a. Das theoretische Potenzial durch Austausch der Kugelmühlen gegen Vertikalwählmühlen beträgt ca. 20 bis 30 % oder bis zu 5,4 kWh/t Rohmehl, allerdings ist eine derartige Investition allein durch die erreichbare Stromeinsparung nicht wirtschaftlich darstellbar.

### 6.2.2 Zementmahlung

Etwa 40 % der elektrischen Energie werden bei der Zementherstellung für die Zementmahlung einschließlich Verpackung und Verladung aufgewendet. Somit stellen die Energiekosten für die Zementmahlung einen erheblichen Anteil der Herstellungskosten dar. Geringe Minderungen des Strombedarfes führen so zu erheblichen Einsparungen bei den gesamten Produktionskosten. Für die Zementmahlung werden heute weltweit Kugelmühlen, Vertikalwählmühlen und Rollenpressen eingesetzt. Kugelmühlen zeichnen sich durch hohe Zuverlässigkeit aus. Die Zemente aus der Kugelmühlenmahlung weisen üblicherweise eine breite Kornverteilung auf und haben damit sehr günstige Verarbeitungseigenschaften. Der spezifische Energiebedarf der Kugelmühlenmahlung ist jedoch relativ hoch. Im Vergleich dazu ist der spezifische Energiebedarf von Vertikalwählmühlen und Rollenpressen deutlich geringer. Allerdings sind die Kornverteilungen von Zementen, die auf diesen Mühlentypen gemahlen werden,

üblicherweise meist enger, sodass in der Regel eine Nachmahlung in einer Kugelmühle erfolgt. Dadurch kann das Einsparpotenzial der genannten effizienten Mühlentypen nicht vollständig genutzt werden.

In den österreichischen Zementwerken waren im Jahr 2007 24 Kugelmühlen im Einsatz, davon waren fünf in Kombination mit einer vorgeschalteten Rollenpresse. Die Einsparpotenziale durch Nachrüstung/Vorschaltung einer Rollenpresse bzw. Vertikalwälzmühle lassen sich nicht ohne weitere detaillierte Untersuchungen der Mahlbarkeit und der erforderlichen Korngrößenverteilung quantifizieren. Deshalb wurde im Rahmen der Potenzialanalysen zunächst detailliert die durchweg wirtschaftlichen Optimierungspotenziale der bestehenden Kugelmühlen untersucht. Im zweiten Schritt wurden eine – mehr theoretische – Abschätzung der technischen Potenziale durch Ersatz bzw. Ergänzung der bestehenden Kugelmühlen durch effizientere Mahlsysteme vorgenommen.

#### 6.2.2.1 Optimierungspotenziale der Kugelmühlen

Das gesamte Einsparpotenzial aus der Zementmahlung mit Kugelmühlen beträgt über alle österreichischen Werke etwa 11,6 GWh, das sind 4,9 % des gesamten elektrischen Strombedarfes für die Zementmahlung in den österreichischen Werken (siehe Abbildung 26). Untersucht wurden 24 Zementmahanlagen mit Kugelmühlen. 17 Mühlen wiesen Optimierungsbedarf bezüglich der Mahlkörpergattung der zweiten Kammer auf. Die Mahlkörper-Füllung der ersten Kammer war in nahezu allen Fällen recht gut eingestellt. Bei 13 Anlagen wurde zudem Optimierungsbedarf bei der Sichtung festgestellt. Neben Änderungsvorschlägen bezüglich der Prozessgrößen wie Umlaufzahl, Sichtluftmenge oder Sichterzahl wurde bei 7 Mühlen die Empfehlung zur Modifikation oder vollständigen Substitution des bestehenden Sichters ausgesprochen.

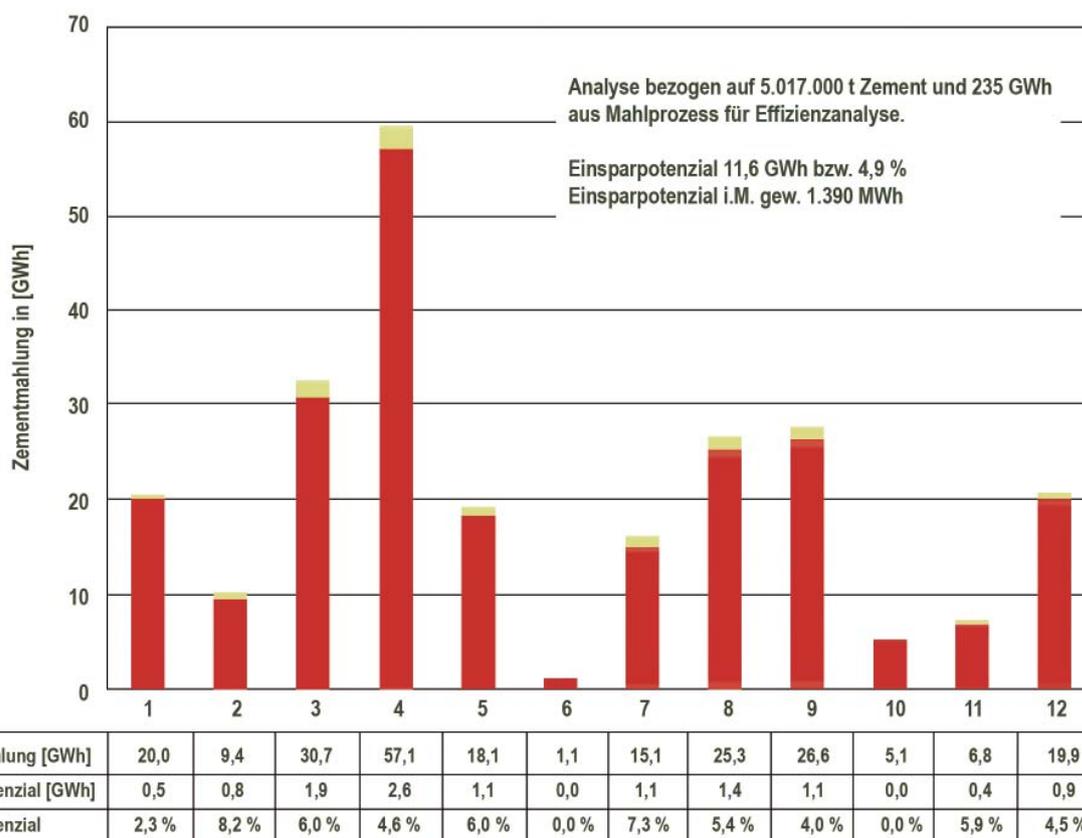


Abbildung 26: Einsparpotenziale bei der Zementmahlung

### 6.2.3 Potenziale durch Ersatz bzw. Ergänzung der Kugelmöhlen durch effiziente Mahlsysteme

Eine Möglichkeit zur besseren Energieausnutzung bei den Mahlprozessen im Rahmen der Zementherstellung besteht durch die Vorschaltung eines weiteren Zerkleinerungsaggregats vor die bestehende Kugelmöhlen-Mahlanlage, wenn auch zu betriebswirtschaftlich auf der Basis von Einsparungen selten vertretbaren Investitionskosten. Mit einer derartigen Anlagenmodifikation ist es möglich, insbesondere die Mahlung in der Kugelmühle auf die Feinzerkleinerung hin zu optimieren. Die Vorzerkleinerung grober Partikel erfolgt dann weitgehend in dem vorgeschalteten Zerkleinerungsaggregat. Im Idealfall kann die erste Mahlkammer der Kugelmühle sogar entfallen. Als weiteres Zerkleinerungsaggregat kommt üblicherweise eine Rollenpresse zum Einsatz. In fünf Werken werden bereits Rollenpressen zur Zementmahlung eingesetzt. Je nach Anordnung der zusätzlichen Mühle in der bestehenden Mahlanlage werden folgende Betriebsarten der Gesamt-Mahlanlage unterschieden.

#### 6.2.3.1 Vormahlung

Das Aufgabematerial wird der Rollenpresse aufgegeben und anschließend in die Kugelmühle geführt; diese wird als herkömmlicher geschlossener Mahl-Klassier-Kreislauf betrieben.

### 6.2.3.2 Hybridmahlung

In diesem Fall wird das Frischgut zusammen mit einem Teilstrom der Sichtergrieße des Mahl-Klassier-Kreislaufs der Kugelmühle auf die Gutbett-Walzenmühle aufgegeben, so dass ein Teil der Fertigmahlung von der Gutbett-Walzenmühle übernommen wird.

### 6.2.3.3 Teilfertigmahlung/Kombimahlung

Das Frischgut wird der Rollenpresse aufgegeben; nach Zerkleinerung in diesem Aggregat wird der im ersten Zerkleinerungsschritt entstandene Feingutanteil über den Siebter der Rollenpresse abgetrennt. Dieses „teilmahlige“ Produkt aus dem Primär-Mahlkreislauf wird dann der Kugelmühle zugeführt, die als geschlossener Mahl-Klassier-Kreislauf oder als Durchlaufmühle betrieben werden kann. Durch diese Sekundär-Mahlung wird das Zwischenprodukt aus der Rollenpresse dann auf die gewünschte Produktfeinheit fertig gemahlen. Das Siebtergrobgut des Primär-Kreislaufes wird zusammen mit dem Frischgut erneut der Rollenpresse aufgegeben.

Bei der Installation einer Rollenpresse zusätzlich zu einer bestehenden Mahlanlage mit Kugelmühle kann der höhere Wirkungsgrad dieses modernen Zerkleinerungsaggregates genutzt werden. Für das gleiche Zerkleinerungsergebnis wie die Kugelmühle benötigt die Rollenpresse nur etwa 50 bis 60 % der Energie. Dabei muss aber unbedingt berücksichtigt werden, dass die Materialeigenschaften von Zementen aus der Zerkleinerung mit der Rollenpresse deutlich anders als die von Zementen aus einer Kugelmühlen-Mahlung sein können. In der Regel haben Zemente, die aus der Zerkleinerung mit der Rollenpresse stammen, deutlich andere Korngrößenverteilungen als Zemente aus Kugelmühlenmahlung. Zum Erreichen der gewünschten (breiten) Korngrößenverteilung ist deshalb die Nachmahlung in der Kugelmühle erforderlich; die Zerkleinerung ausschließlich in der Rollenpresse reicht in den meisten Fällen nicht aus.

Herausragender Vorteil der Kombimahlung ist jedoch die hohe Leistungssteigerung bereits bestehender Mahlanlagen durch einfaches Vorschalten der Rollenpressen-Mahlanlage.

Je größer der mit der Gutbett-Walzenmühle erzeugte Feingutanteil ist, umso größer ist die Energieeinsparung. Erfahrungen zeigen, dass die Fein- und Feinstmahlung spröder Stoffe mit diesem Anlagenkonzept bei gleicher elektrischer Leistungsaufnahme eine Steigerung der Durchsatzleistung um bis zu 100 % und eine Energieeinsparung gegenüber Anlagen mit Kugelmühlen im Einzelfall um mehr als 50 % ergeben. Für die Zementmahlung wird daher angestrebt, die gesamte Feinzerkleinerung in der Gutbett-Walzenmühle durchzuführen. Außerdem haben Gutbett-Walzenmühlen offenbar einen geringeren massebezogenen Verschleiß und einen deutlich geringeren Raumbedarf als Kugelmühlen.

#### 6.2.3.4 Getrennte Mahlung

Eine weitere Möglichkeit zur Steigerung der Energieeffizienz von Zerkleinerungsprozessen in der Zementproduktion besteht in der getrennten Vermahlung von Zementbestandteilen. Wird ein derartiges Konzept angewendet, können die spezifischen Eigenschaften verschiedener Zementbestandteile deutlich besser berücksichtigt werden. So ist z. B. die gemeinsame Vermahlung der Bestandteile von CEM-III-Zementen wegen der unterschiedlichen Mahlbarkeit von Zementklinker und Hüttensand immer problematisch. Der leichter mahlbare Klinker wird feiner aufgemahlen als der Hüttensand; damit reicht häufig die Reaktivität der Hüttensandkomponente nicht aus, um die gewünschten Zementeigenschaften zu erreichen. Wird dann noch feiner aufgemahlen, um die Zielfeinheit der Hüttensandkomponente zu erreichen, kann es zur Übermahlung der Klinkerkomponente kommen. Abhilfe schafft hier die getrennte Vermahlung der Zementkomponenten mit anschließender Mischung. Dabei besteht dann auch die Möglichkeit, zur Vermahlung jeweils die für bestimmte Zementbestandteile optimale Zerkleinerungstechnologie einzusetzen. So ist z. B. die Vertikalwälmühle besonders geeignet für die Hüttensandzerkleinerung; die spezifische Leistungsaufnahme beträgt für das gleiche Zerkleinerungsergebnis wie in der Kugelmühle üblicherweise nur ca. 40 bis 50 %. Da die Vertikalwälmühle weiterhin besonders gut für die Mahltrocknung von Stoffen mit hoher Aufgabefeuchte geeignet ist, kann sich die Installation einer derartigen Mühle insbesondere lohnen, wenn größere Mengen Schlacke verarbeitet werden. Eine Quantifizierung möglicher Einsparpotenziale ist jedoch nur möglich, wenn genaue Angaben bezüglich der Mahlbarkeit aller Einsatzstoffe vorliegen.

Zusammenfassend kann abgeschätzt werden, dass bei Ergänzung von reinen Kugelmühlenmahlanlagen mit einer Rollenpresse in den hier beschriebenen Schaltungsvarianten mittlere Einsparpotenziale von bis zu 10 % bezogen auf den spezifischen Energiebedarf der Zementmahlung ausschließlich mit der Kugelmühle bestehen. Im Rahmen der Untersuchungen wurden Daten über die Zementmahlung von 3,4 Mio. t auf Mahlanlagen mit reinen Kugelmühlen erhoben. Bei einem mittleren spezifischen Energiebedarf von 44,5 kWh/t ergibt sich somit ein theoretisches Einsparpotenzial von ca. 15 GWh. Auch für diese Investitionen gilt allerdings, dass sie durch die verminderten Energiekosten allein nicht wirtschaftlich darstellbar sind.

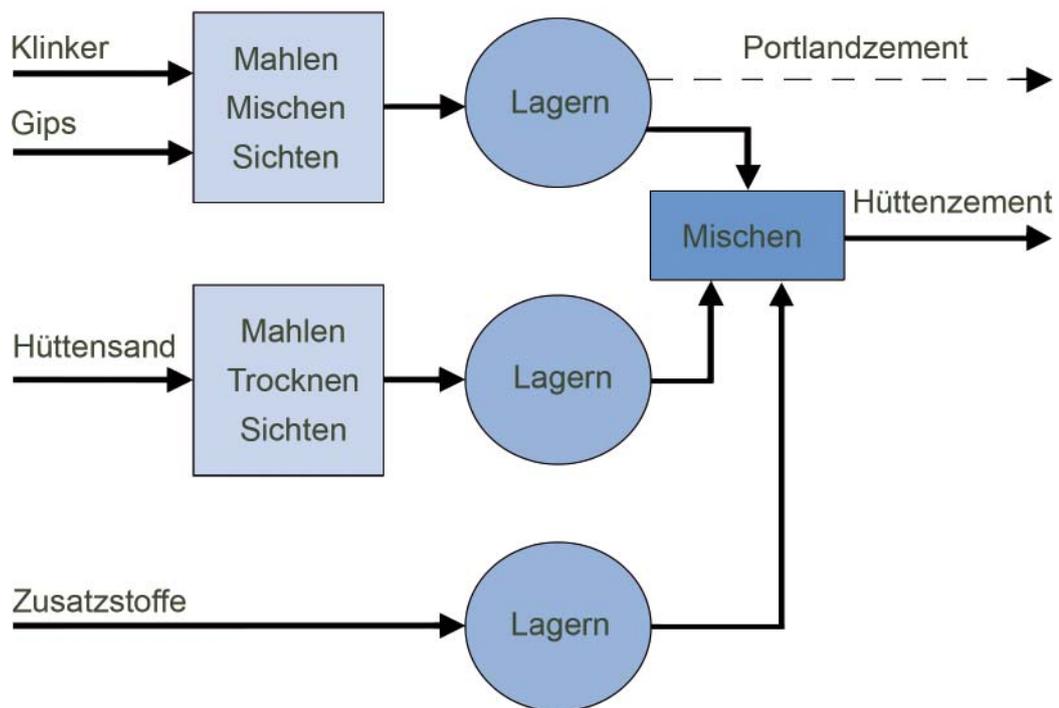


Abbildung 27: Prinzip der getrennten Mahlung am Beispiel der Hüttenzementherzeugung

#### 6.2.4 Elektrische Antriebe

Elektrische Motoren werden in der Industrie zum Antrieb von Ventilatoren, Gebläsen, Kompressoren und Pumpen verwendet. Eine Optimierung der elektrischen Antriebe erfordert eine Betrachtung des Gesamtsystems z. B. elektrischer Wirkungsgrad, Laufzeit, Antrieb, hydraulischer Wirkungsgrad, Regelung usw.

Im Zuge der Werksbesuche wurden etwa 1.400 der eingesetzten elektrischen Antriebe an den Standorten hinsichtlich möglicher Optimierungspotenziale untersucht. Dabei konnten an 3 Standorten wirtschaftliche Optimierungsmaßnahmen bei 9 Antrieben identifiziert werden. Die Umsetzung der erarbeiteten Maßnahmen entspricht einer jährlichen Minderung des elektrischen Energiebedarfs um 672 MWh. Die erarbeiteten Maßnahmen und die daraus entstehenden Reduktionen sind in folgender Abbildung dargestellt.

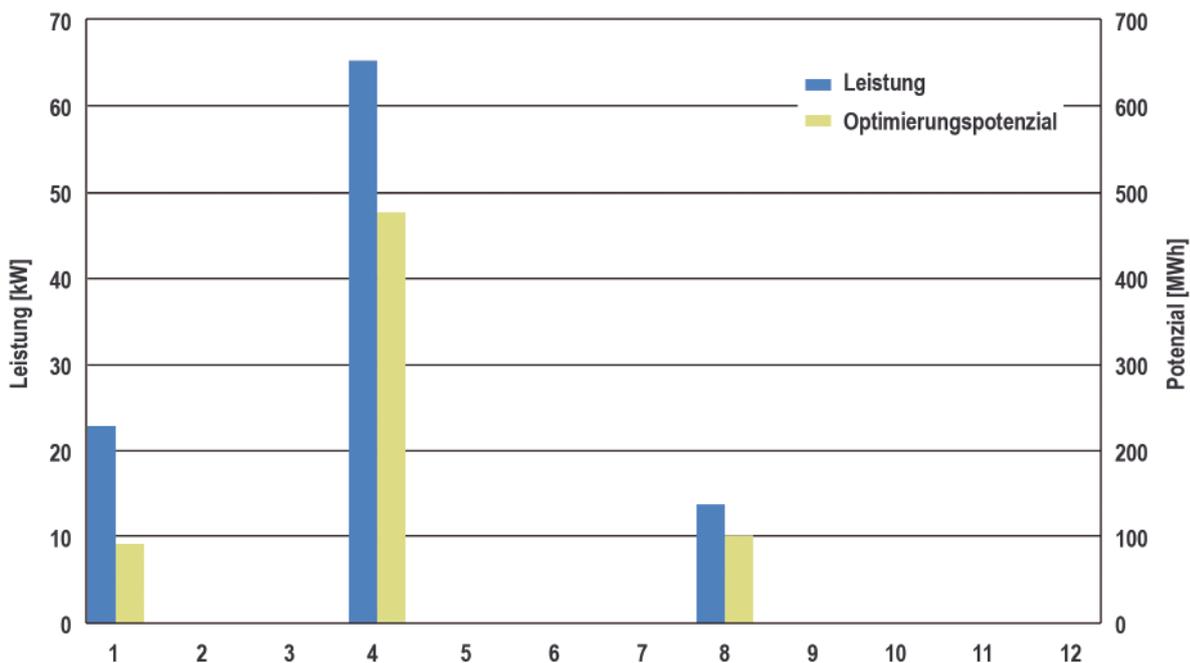


Abbildung 28: Optimierungspotenziale elektrischer Antriebe (Gebläse, Ventilatoren und Pumpen)

Die statischen Amortisationszeiten der identifizierten Optimierungsmaßnahmen können wie folgt unterteilt werden:

Statische Amortisationszeit [a]	[GWh]
<3	0,34
3-5	0,19
>5	0,14

### 6.2.5 Druckluftherzeugung und -nutzung

Druckluft ist ein universell nutzbarer, jedoch auch kostenintensiver Energieträger. Im Durchschnitt kann von Druckluftkosten zwischen 1,5 und 3 Cent pro m<sup>3</sup> erzeugter Druckluft ausgegangen werden. In der Zementindustrie wird Druckluft hauptsächlich für Transport-, Misch-, Reinigungs- und Steuerungszwecke verwendet.

Moderne Druckluftherzeugungsanlagen wandeln 20 % der zugeführten Energie in mechanische Energie um. 80 % der zugeführten Energie werden als Abwärme wieder abgegeben. Mangelhafte Wartung, Druckluftaufbereitung und Leckagen können die nutzbare Energie auf unter 5 % der zugeführten Energie reduzieren. Der erste Schritt zur Reduktion der Druckluftkosten ist ein sparsamer Umgang mit der Druckluft selbst. Der zweite Schritt zur Reduktion des Druckluftenergieverbrauchs ist die Erhöhung der Energieeffizienz im Bereich der Druckluftherzeugung, Druckluftverteilung und der Druckluftverbraucher.

Für die Ermittlung des technischen Optimierungspotenzials im Bereich der Druckluftherzeugung wurde diese an den einzelnen Standorten untersucht und analysiert. An mehreren Standorten wurden in den letzten Jahren Investitionen in die Optimierung der Druckluftanlagen getätigt. An 7 Standorten konnten Optimierungsmaßnahmen identifiziert werden. Die dadurch mögliche Reduktion des Energiebedarfs für die Druckluftherzeugung beläuft sich auf etwa 1.800 MWh/a.

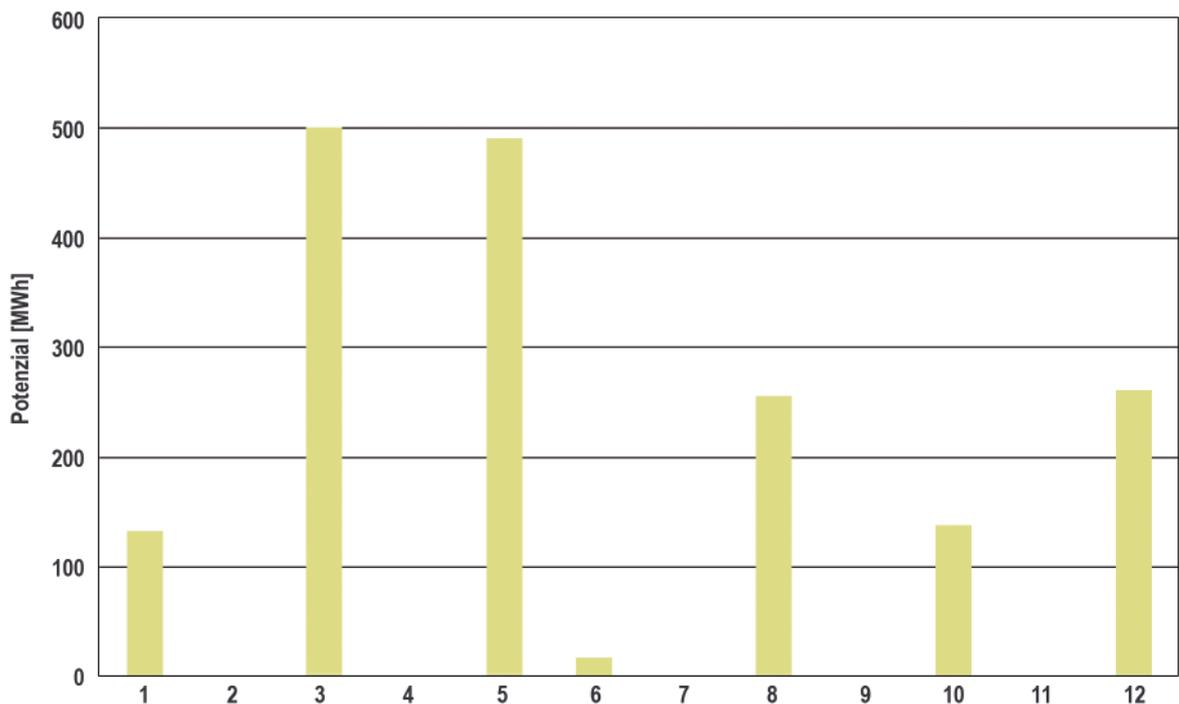


Abbildung 29: Optimierungspotenzial der Erzeugung, Transport und Verwendung von Druckluft

Die statischen Amortisationszeiten der identifizierten Optimierungsmaßnahmen können wie folgt unterteilt werden:

Statische Amortisationszeit [a]	[GWh]
<3	1,27
3-5	0
>5	0,63

### 6.2.6 Beleuchtung

An den Standorten der österreichischen Zementindustrie wird häufig eine hohe Anzahl an Leuchten eingesetzt. Großteils werden herkömmliche Leuchtstoffröhren für die Bereitstellung der Beleuchtung eingesetzt. Die eingesetzten Leuchtstoffröhren werden

hauptsächlich mit konventionellen oder energiesparenden Vorschaltgeräten betrieben. Durch den Ersatz herkömmlicher Leuchtmittel durch energieeffiziente Leuchtmittel mit modernen Vorschaltgeräten kann der jährliche Beleuchtungsenergiebedarf um etwa 2.500 MWh reduziert werden. Die durchschnittliche statische Amortisationszeit des Tausches der Leuchten beträgt 4,7 Jahre.

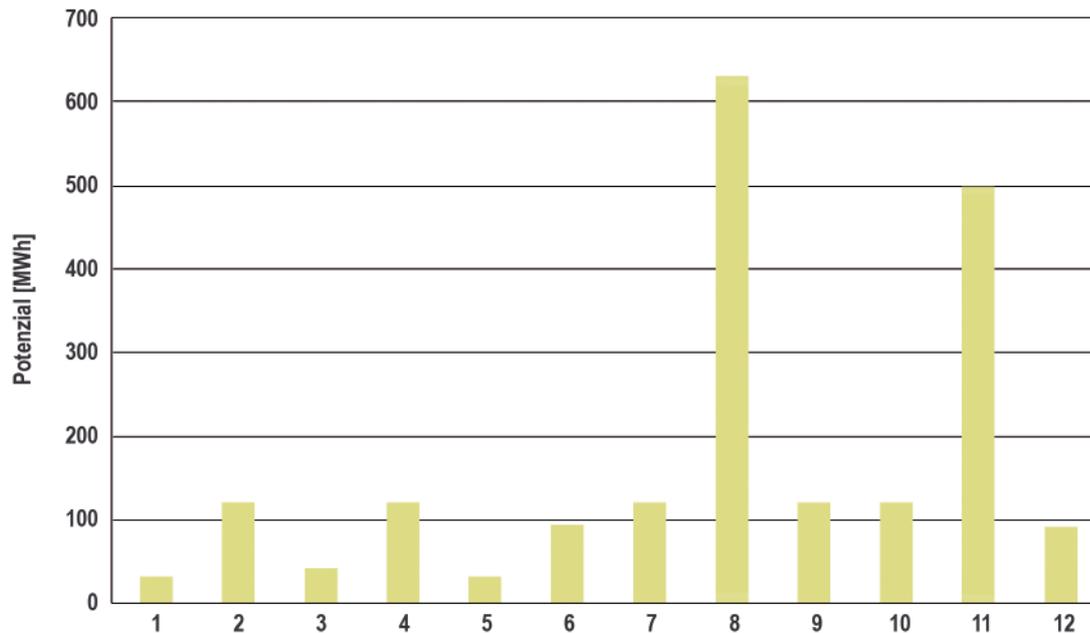


Abbildung 30: Optimierungspotenzial Beleuchtung

Die statischen Amortisationszeiten der identifizierten Optimierungsmaßnahmen können wie folgt unterteilt werden:

Statische Amortisationszeit [a]	[GWh]
<3	0,2
3-5	1,2
>5	1,1

### 6.3 Reduzierung des Klinker/Zement-Faktors

Der stärkste Hebel zur Verminderung des Energieeinsatzes bei der Zementherstellung liegt in der Substitution des Zementklinkers durch andere Zementhauptbestandteile wie Hüttensand aus der Stahlherstellung, Steinkohleflugasche aus Kraftwerken,

Kalksteinmehl oder Puzzolane<sup>7</sup>. Nicht nur unter energetischen Gesichtspunkten ist die Zementindustrie weltweit seit vielen Jahren bestrebt, den Anteil des Klinkers in Zement (den sog. „Klinker/Zement-Faktor“) zu senken.

Während die Brennstoffenergie des substituierten Klinkers fast vollständig (Hütten-sand muss z. B. getrocknet werden, z. T. mithilfe von Abwärme) vermieden wird, hängt der Effekt auf den elektrischen Energiebedarf v. a. von der Mahlbarkeit der anderen Zementhauptbestandteile ab. Während bei Einsatz des schwer mahlbaren Hütten-sands insgesamt kein Strom eingespart werden kann, führt der Einsatz von (sehr feiner) Flugasche oder leicht mahlbarem Kalkstein auch zu einer Stromeinsparung. Grundsätzlich ist jedoch zu beachten, dass sich die Eigenschaften dieser Zementsorten zum Teil von denen des CEM-I-Zements, der nur aus Zementklinker und Gips als Sulfatträger besteht, unterscheiden können. Somit kann nicht in allen Anwendungsfällen von einer freien Substituierbarkeit ausgegangen werden.

Eine Bewertung der Einsparpotenziale nur auf Basis von Werksdaten ist kaum möglich, da hierfür auch der lokale bzw. regionale Zementmarkt selbst von Bedeutung ist und darüber hinaus die regionale Verfügbarkeit anderer Zementhauptbestandteile wie u. a. Hütten-sand zu betrachten wäre. Deshalb wird im Folgenden einerseits abgeschätzt, wie viel thermische Energie die österreichischen Zementwerke durch die im Jahr 2007 eingesetzten anderen Zementhauptbestandteile im Vergleich zur reinen Portlandzementherstellung einspart. Andererseits wird berechnet, wie viel thermische Energie die österreichische Zementindustrie durch jeden weiteren Prozentpunkt Absenkung des Klinker/Zement-Faktors einsparen könnte. In welchem Maße dies unter den gegebenen Marktbedingungen tatsächlich möglich ist, war nicht Gegenstand dieser Studie.

Zur Bewertung der Energieeinsparung durch die Verminderung des Klinker/Zement-Faktors wird der Vergleich mit einem CEM-I-Zement mit 92 % Klinkeranteil herangezogen (Annahme: 3 bis 4 % Sulfatträger und 4 bis 5 % andere Zumahlstoffe als Nebenbestandteile). Der Klinker/Zement-Faktor der österreichischen Zementindustrie betrug im Jahr 2007 über alle hergestellten Produkten ohne Berücksichtigung der klinkerfreien Produkte 75,4 %. (Im Vergleich: In Deutschland lag dieser Wert in 2007 ebenfalls in dieser Größenordnung bei etwa 75 %.)

---

<sup>7</sup> Puzzolane sind natürliche oder künstliche Gesteine, die zumeist unter Hitzeeinwirkung entstehen und durch ihren Gehalt an Kieselsäure und Kalkhydrat in Verbindung mit Wasser erhärten.

Unter der Annahme eines Klinker/Zement-Faktors von 92 % wäre für die Herstellung der untersuchten Produktionsmenge von 5,3 Mio. t Zement für das Jahr 2007 eine Klinkermenge von 4,9 Mio. t erforderlich gewesen. Die tatsächlich hergestellte bzw. eingesetzte Klinkermenge von 4 Mio. t Klinker führt aus diesem Vergleich zu einer Klinkersubstitution von 0,9 Mio. t. Unter Zugrundelegung des spezifischen Brennstoffenergiebedarfes von 3.660 kJ/kg Klinker ergibt sich über alle zwölf Zementwerke im Jahr 2007 eine Gesamtenergieeinsparung von 3.218 TJ pro Jahr (zum Vergleich: Brennstoffenergiebedarf für alle 12 Zementwerke ca. 16.300 TJ in 2007). Basierend auf einem typischen Heizwert von 25 GJ/t für Steinkohle ergibt sich daraus eine Einsparung fossiler Brennstoffe als Kohle von etwa 129.000 t/a.

Unter der Voraussetzung eines konstanten Brennstoffenergiebedarfs kann die weitere Energieeinsparung je Prozentpunkt abgesenkten Klinker/Zement-Faktors berechnet werden. Für die österreichischen Zementwerke ergäbe sich daraus eine energetische Einsparung von ca. 193 TJ je Prozentpunkt Klinker/Zement-Faktor.

## 7 Gesamtpotenzial

Die Ergebnisse der in den vorigen Kapiteln näher betrachteten Maßnahmen sind in Tabelle 8 und Tabelle 9 zusammengefasst. Die einzelnen Maßnahmen sind nach thermischen und elektrischen Energieeinsparungen getrennt angeführt.

*Tabelle 8: Thermisches Gesamtpotenzial der untersuchten Technologien in der österreichischen Zementindustrie*

Maßnahme	Potenzial	Potenzial bezogen auf thermischen Energieeinsatz	Statische Amortisationszeit
	[GWh]	[%]	[a]
BAT-Anlage + 160	264	6,6	>>5
BAT-Anlage + 320	87	2,2	>>5
Fernwärme	39	1	>5
Raumheizung	3,8	0,1	3-5
Sonstiges	0,8	0,02	>5

Das Einsparpotenzial aus Maßnahmen zur Minderung der elektrischen Energie enthält nachfolgende Tabelle. Hier finden sich einige Maßnahmen, die bei relativ geringen Investitionskosten umzusetzen sind.

*Tabelle 9: Elektrisches Gesamtpotenzial der untersuchten Technologien in der österreichischen Zementindustrie*

Maßnahme	Potenzial	Potenzial bezogen auf elektrischen Energieeinsatz	Statische Amortisationszeit
	[GWh]	[%]	[a]
Rohmahlung	1,4	1,7	<<3
Zementmahlung	11,6	4,9	<<3
ORC-Prozess	48,8	8	>5
elektrische Antriebe	0,7	0,1	<3
Druckluft	1,8	0,3	<3
Kompressionskälteanlagen	0,3	0,1	>5
Absorptionskälteanlagen	0,9	0,1	>5
Beleuchtung	2,5	0,4	3-5

## 7.1 CO<sub>2</sub>-Emissionen

CO<sub>2</sub>-Emissionen entstehen bei der Herstellung von Klinker in Drehrohrofenanlagen direkt aus den Roh- und Brennstoffen sowie indirekt durch den Einsatz von elektrischer Energie aus Brennstoffen. Etwa 60 % des CO<sub>2</sub> entsteht rohstoffbedingt bei der Entsäuerung des carbonathaltigen Rohmaterials wie Kalkstein und Mergel. Dieser Anteil kann prozessbedingt nicht gemindert werden. Eine Effizienzsteigerung geht in der energieintensiven Zementindustrie in der Regel mit dem positiven Aspekt der CO<sub>2</sub>-Minderung einher. Durch die Verminderung des Brennstoffenergieeinsatzes im thermischen Prozess wird die direkte CO<sub>2</sub>-Emission verhindert. Durch die Senkung des Stromverbrauchs wird indirekt CO<sub>2</sub> bei der Stromerzeugung vermindert. Die Absenkung des Klinker/Zement-Faktors bedingt eine Verminderung der direkten Emissionen entsprechend dem substituierten Zementklinker. Je nach Zementsorte bzw. Zementhauptbestandteilen wird über die Stromeinsparung auch indirekt CO<sub>2</sub> bei der Stromproduktion gemindert. Durch den ermittelten Klinker/Zement-Faktor von 75,4 % erreicht die gesamte Zementindustrie eine CO<sub>2</sub>-Einsparung von etwa 700.000 t pro Jahr. In den nächsten Jahren bietet die weitere Absenkung des Klinker/Zement-Faktors grundsätzlich den größten Hebel, um CO<sub>2</sub> effektiv zu senken, wenn es gelingt die Akzeptanz und den Markt für solche Zementsorten zu verbessern und die Zuschlagstoffe in ausreichendem Maß zu Verfügung stehen. Falls es gelingt, den Brennstoffenergiebedarf um das Einsparpotenzial von bis zu 6,5 % zu mindern, so können daraus bis zu 88.000 t CO<sub>2</sub> aus einer vereinfachten Rechnung mit Kohle jährlich eingespart werden. Allerdings fällt das Einsparpotenzial bei den tatsächlich eingesetzten Brennstoffen geringer aus, da der um den biogenen Anteil bereinigte Emissionsfaktor im durchschnittlich eingesetzten Brennstoffmix unter 0,08 t CO<sub>2</sub>/GJ liegt. Das ermittelte CO<sub>2</sub>-Minderungspotenzial für den thermischen Prozess fasst Tabelle 10 zusammen.

Tabelle 10: CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenzial der thermischen Prozesse in der österreichischen Zementindustrie/Bezugsjahr 2007

Maßnahme	Potenzial, thermisch	CO <sub>2</sub> -Reduktionspotenzial
	[GWh]	[t/a]
BAT-Anlage, E, Br. Modell + 160	264 (6,5 %)	88.000 <sup>8</sup>
BAT-Anlage, E, Br. Modell + 320	87 (2,2 %)	29.000 <sup>8</sup>
Fernwärme	39	7.900 <sup>9</sup>
Raumheizung	3,8	840
Sonstiges	0,8	220

<sup>8</sup> Basis: Emissionsfaktor aus Kohle mit 0,093 t CO<sub>2</sub>/GJ

<sup>9</sup> Indirekte Minderung bei Netzbetreiber/Basis: Emissionsfaktor aus Gas mit 0,056 t CO<sub>2</sub>/GJ

Sekundärbrennstoffe werden aus mehreren Gründen eingesetzt. Einerseits trägt der Sekundärbrennstoffeinsatz zur Minderung der Brennstoffkosten bei. Andererseits ist der CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor bezogen auf den Energieinhalt der meisten Sekundärbrennstoffe deutlich niedriger als der anderer fossiler Brennstoffe, wie v. a. Kohle. Dies ist auf den geringeren heizwertbezogenen Kohlenstoffgehalt sowie den biogenen Anteil des Kohlenstoffes in einigen Sekundärbrennstoffen zurückzuführen. Dadurch können die Kosten im Rahmen des Emissionshandels gesenkt werden. Der Einsatz von regional verfügbaren Sekundärbrennstoffen ist eine geeignete Maßnahme, um sowohl begrenzte Ressourcen zu schonen als auch erhöhte Emissionen aufgrund weiter Transportwege zu vermeiden. Sekundärbrennstoffe werden aus diesen Gründen bei der Produktion von Zementklinker in Österreich wie auch in den umliegenden Nachbarländern vermehrt eingesetzt. Bei einer erreichten Substitutionsquote von durchschnittlich 46 % und einer steigenden Nachfrage aus anderen Industriezweigen kann zukünftig mit einer zunehmenden Verknappung gerechnet werden.

Die indirekten CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenziale bezüglich des elektrischen Energieeinsatzes<sup>10</sup> sind in Tabelle 11 dargestellt. Die CO<sub>2</sub>-Einsparung aus der Minderung des ermittelten Potenzials für die Zementmahlung beträgt etwa 2.600 t CO<sub>2</sub> pro Jahr. Das Minderungspotenzial der Rohmahlung ist mit 320 t pro Jahr relativ gering.

Tabelle 11: CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenzial der elektrischen Prozesse in der österreichischen Zementindustrie/Bezugsjahr 2007

Maßnahme	Potenzial, elektrisch	CO <sub>2</sub> -Reduktionspotenzial
	[GWh]	[t/a]
Rohmahlung	1,4	320
Zementmahlung	11,6	2.580
ORC-Prozess	48,8	10.870
elektrische Antriebe	0,7	150
Druckluft	1,8	400
Kompressionskälteanlagen	0,3	60
Absorptionskälteanlagen	0,9	190
Beleuchtung	2,5	560

<sup>10</sup> Für die Ermittlung des CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenziales aus elektrischer Energie wurde ein Emissionsfaktor von 0,223 t/MWh aus dem Stromkennzeichnungsbericht 2009 entnommen [EC-1].

## 8 Umsetzungshemmnisse

### 8.1 Darstellung von Hemmnissen

In der österreichischen Zementindustrie sind in den letzten Jahren viele Projekte, mit dem Ziel den Energieeinsatz zu reduzieren, realisiert worden.

Nennenswerte Effizienzsteigerungen in der Zementindustrie sind nur mehr durch massiven Umbau der bestehenden Anlagen bzw. durch die Errichtung von Neuanlagen möglich. Investitionen in Neuanlagen weisen einen hohen Kapitaleinsatz auf. Im Schnitt sind Anlagen in der Zementindustrie 30-50 Jahre in Betrieb und die Wirtschaftlichkeit solcher Investitionen hängt von vielen Parametern wie zum Beispiel den Preisentwicklungen für Rohstoffe, Produkte, Ersatzbrennstoffe oder CO<sub>2</sub> ab. Des Weiteren müssen rechtliche Rahmenbedingungen sowie die Entwicklungen des Absatzmarktes berücksichtigt werden. Dementsprechend ist die Entscheidungsfindung zu Neuinvestitionen komplex. Vor allem sind die Entwicklungen im Bereich des CO<sub>2</sub>-Preises und der Energiepreise sowie die Veränderungen am Ersatzbrennstoffmarkt derzeit nur schwer abzuschätzen und damit langfristige Planungen mit zahlreichen und deutlichen Unschärfen behaftet. Die derzeit vorliegende Planungsunsicherheit ist demnach - neben der Wirtschaftlichkeit - das größte Hemmnis bei der Umsetzung zusätzlicher nennenswerter Effizienzsteigerungen.

### 8.2 Möglichkeiten zur Überwindung der Hemmnisse

Das Hemmnis der schlechten Wirtschaftlichkeit von einzelnen Projekten kann theoretisch im Wesentlichen mittels zweier Ansätze überwunden werden: Förderungen und alternative Finanzierungsansätze.

Bestehende Förderungen erhöhen die Wirtschaftlichkeit der derzeit vorhandenen unwirtschaftlichen Projekte nur in geringem Ausmaß. Vor allem größere Einsparpotenziale wie zum Beispiel die Eigenstromerzeugung aus Abwärme oder die Auskoppelung von Abwärme in Form von Fernwärme weisen trotz Förderungen immer noch Amortisationszeiten auf, welche eine Investition in diese Projekte nicht zulassen. Demnach wäre eine Erhöhung der Förderung für die Realisierung solcher Projekte erforderlich. Eine Möglichkeit dazu wäre die Umschichtung von Fördermitteln in Richtung jener Maßnahmen, welche eine hohe Effizienz der Förderwirksamkeit aufweisen. Durch die hohe Anzahl von Vollbetriebsstunden sind Fördermittel in der Zementindustrie im Vergleich zu anderen Branchen oder dem Privatbereich teilweise deutlich effizienter eingesetzt.

## 9 Zusammenfassung

Im Auftrag der Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie (VÖZ) haben das Forschungsinstitut der Zementindustrie (FIZ), Düsseldorf, und die Firma Allplan, Wien, die Situation der österreichischen Zementindustrie im Hinblick auf Energieeffizienz und Energieeinsparpotenziale untersucht. Der Auftrag umfasste dabei die Besichtigung aller österreichischen Zementwerke, die Erhebung von Daten zu Produktion, Brennstoffverbrauch, Stromverbrauch und installierten Anlagen, die Durchführung von Messungen hinsichtlich Stromverbrauch sowie die Modellierung so genannter BAT-Anlagen, Best Available Technique, für die jeweiligen Standorte mit Klinkerproduktion. Darauf aufbauend erfolgte eine detaillierte energetische Bewertung der einzelnen Anlagen und nachfolgende Analyse von Minderungspotenzialen. Der vorliegende Branchenbericht fasst die Ergebnisse der Untersuchungen der gesamten österreichischen Zementindustrie zusammen.

Die österreichische Zementindustrie ist geprägt von einer Struktur mit kleiner bis mittlerer Produktionskapazität. Im Bezugsjahr 2007 wurden neun Zementwerke mit Klinkerproduktion sowie drei Mahlwerke betrieben.

Die mittlere erzeugte Klinkermenge pro Tag streut in einem weiten Bereich zwischen etwa 700 und 3.000 t und beträgt insgesamt etwa 12.800 t. Der Brennstoffenergiebedarf liegt über alle Werke im Jahresmittel bei 3.646 kJ/kg Klinker. Bei den kleineren Drehrohrofenanlagen wurde erwartungsgemäß ein spezifisch höherer Brennstoffeinsatz festgestellt, weil deren Betrieb zwangsläufig mit verhältnismäßig höheren Wärmeverlusten über Drehrohrofen und ggf. Calcinator verbunden ist.

Der spezifische Brennstoffenergiebedarf ist die entscheidende Kenngröße zur Beurteilung der Energieeffizienz in der Zementindustrie. Bei der energetischen Analyse des thermischen Prozesses wurde zunächst der reale Zustand der einzelnen Ofenanlagen ermittelt. Optimierungspotenziale wurden aus dem Vergleich der Istdaten mit modellierten Werten abgeleitet. Mithilfe eines Prozessmodells wurden für alle Werksstandorte mit Klinkerproduktion moderne Vorcalcinieranlagen simuliert, wobei die spezifischen Produktionsbedingungen wie Klinkerkapazität, Rohstoffbasis und Brennstoffmix individuell zu Grunde gelegt wurden. Dieser Mindestenergiebedarf wurde in Übereinstimmung mit dem BREF-Dokument für die Zementindustrie um 160 bis 320 kJ/kg Klinker erhöht, um reale Betriebsbedingungen (Betriebsschwankungen, An- und Abfahrvorgänge) zu berücksichtigen. Aus der Gegenüberstellung des durchschnittlichen Brennstoffenergiebedarfes der gesamten österreichischen Zementindustrie sowie der Ergebnisse aus der Modellierung ergibt sich ein Einsparpotenzial von 2,2 bis 6,5 %.

Die Analyse des Istzustandes sowie das ermittelte Gesamtpotenzial bestätigen die bekannte Tatsache, dass moderne Zementdrehrohrofenanlagen mit einem Brennstoffenergiebedarf betrieben werden, der in einem engen Bereich streut. Unter diesen Bedingungen sind signifikante Verbesserungen der Energieeffizienz nur durch vollständigen Neubau oder weit gehenden Umbau der Ofenanlagen möglich. Andererseits ist die Zementindustrie sehr kapitalintensiv und die Lebenszeit von Zementdrehrohrofenanlagen beträgt zwischen 30 und 50 Jahren. Größere Umbaumaßnahmen werden in der Regel deshalb dann durchgeführt, wenn sie mit einer Leistungssteigerung der Ofenanlage verbunden werden können. Insbesondere der Umbau vom Trockenverfahren auf Vorcalciniertechnik ist mit einer Steigerung der Klinkerproduktionskapazität von 30 bis 50 % verbunden. Dies lässt sich nur dann rechtfertigen, wenn diese höheren Mengen im Markt abgesetzt werden können oder aber die Produktionskapazität zweier kleiner Ofenanlagen durch eine große substituiert werden kann. In der österreichischen Zementindustrie sind fünf der elf betriebsbereiten Ofenanlagen mit der Vorcalciniertechnik ausgestattet. Zum Teil waren sie von Beginn an mit dieser Technologie ausgerüstet (z. B. Zementwerk Mannersdorf) oder wurden im Nachhinein auf diese Technologie umgebaut (z. B. Zementwerk Wietersdorf). Im Zementwerk Leube ist die Substitution der beiden Ofenanlagen durch eine moderne Vorcalciniereinrichtung für das Jahr 2010 geplant. Im Rahmen der Studie wurden alle Werke darüber hinaus im Hinblick auf eine große Zahl weiterer Optimierungsmaßnahmen, wie z. B. am Klinkerkühler, Vorwärmer usw., untersucht und die Verbesserungspotenziale im einzelnen aufgezeigt.

Die österreichische Zementindustrie verfügt über ein Abwärmepotenzial von ca. 10,5 % (bezogen auf den gesamten Brennstoffenergieeinsatz) bzw. 419 GWh. Die Abwärmenutzung an den Standorten ist allerdings nur in einzelnen Fällen wirtschaftlich möglich. Der Einsatz von ORC-Prozessen weist das höchste Potenzial von ca. 49 GWh mit einer durchschnittlichen Amortisationszeit von 9 Jahren auf. Die Fernwärmeauskopplung verfügt über ein technisches Potenzial von 39 GWh mit einer durchschnittlichen Amortisationszeit von ca. 10 Jahren. Dabei sind 3 Projekte mit Amortisationszeiten kleiner als 10 Jahren vorhanden. Die Raumheizung an den Standorten der österreichischen Zementindustrie wird häufig dezentral durch meist fossil befeuerte Heizanlagen bereitgestellt. In diesem Bereich besteht ein Optimierungspotenzial von ca. 4 GWh bei einer durchschnittlichen Amortisationszeit von 5 Jahren.

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 einschließlich Verpackung und Verladung (ca. 38 %) aufgewendet. Eine Möglichkeit zur besseren Energieausnutzung bei den Mahlprozessen besteht durch die Vorschaltung eines weiteren Zerkleinerungsaggregats vor die bestehende Kugelmöhlen-Mahlanlage, wenn auch zu betriebswirtschaftlich auf der Basis von Ein-

sparungen selten vertretbaren Investitionskosten. Die wesentlichen betrieblichen Optimierungspotenziale von Mahlanlagen mit Kugelmühlen liegen in der Verbesserung des Sichter-Trenngrades sowie der Optimierung der Zerkleinerung durch Anpassung der Gattierung an die vorliegende Zerkleinerungsaufgabe. Bezüglich der Rohmehlmahlung mit Kugelmühlen wurde in drei Werken elektrisches Einsparpotenzial zwischen 5 und 7 % festgestellt. Ein Zementwerk lieferte auf der Basis des spezifischen Strombedarfes von 21 kWh/t Rohmehl beachtliches Optimierungspotenzial für eine Walzenschüsselmühle. Bei 24 untersuchten Zementmahlanlagen mit Kugelmühlen wiesen 17 Mühlen Optimierungsbedarf bezüglich der Mahlkörpergattierung auf. Das gesamte Einsparpotenzial aus der Zementmahlung mit Kugelmühlen beträgt über alle österreichischen Werke etwa 11,6 GWh; das sind 4,9 % des gesamten elektrischen Strombedarfes für die Zementmahlung in den österreichischen Werken.

Die Querschnittstechnologien an den Standorten der österreichischen Zementindustrie weisen in den Bereichen Raumheizung, Beleuchtung, Druckluft und elektrische Antriebe Optimierungspotenziale mit Amortisationszeiten kleiner als 5 Jahre auf. Die Beleuchtung bringt ein technisches Optimierungspotenzial von 2,5 GWh bei einer durchschnittlichen Amortisationszeit von 5 Jahren. Auf den Bereich Druckluft wurde in den letzten Jahren ein Schwerpunkt in der Zementindustrie gelegt. Dadurch besteht in diesem Bereich ein Optimierungspotenzial von ca. 1,8 GWh bei einer durchschnittlichen Amortisationszeit von 2 Jahren. Kälteanlagen werden in der österreichischen Zementindustrie hauptsächlich für die Gebäudekühlung verwendet. Die Kälte wird in der Regel durch dezentrale Kälteanlagen bereitgestellt. Eine Optimierung der bestehenden Kälteanlagen und die Kälteerzeugung aus Abwärme sind aufgrund des verhältnismäßig geringen Kältebedarfs nicht unter wirtschaftlichen Rahmenbedingungen möglich.

Der stärkste Hebel zur Verminderung des Energieeinsatzes bei der Zementherstellung liegt in der Substitution des Zementklinkers durch andere Zementhauptbestandteile wie Hüttensand, Steinkohleflugasche, Kalksteinmehl oder Puzzolane. Der Klinker/Zement-Faktor der österreichischen Zementindustrie betrug im Jahr 2007 über alle hergestellten Produkte ohne Berücksichtigung der klinkerfreien Produkte 75,4 %. Im Vergleich zur Herstellung reinen Portland-Zements ergibt sich daraus für die gesamte österreichische Zementindustrie eine Energieeinsparung von 3.218 TJ pro Jahr (zum Vergleich: Brennstoffenergiebedarf für alle 12 Zementwerke ca. 16.300 TJ in 2007). Dies entspricht einer Einsparung von etwa 129.000 t/a an Kohle. Je weiteren Prozentpunkt abgesenkten Klinker/Zement-Faktors ergäbe sich eine weitere energetische Einsparung von ca. 193 TJ.

Aufgrund der heutigen wirtschaftlichen und umwelt- bzw. klimapolitischen Rahmenbedingungen ist nicht davon auszugehen, dass die österreichische Zementindustrie weitere Großinvestitionen in nennenswertem Umfang in Neuanlagen startet, die zu

einer signifikanten Verbesserung der Energieeffizienz der Anlagen - in dem gegebenen begrenzten Spielraum - führen. Die Struktur der österreichischen Zementindustrie mit überwiegend kleineren Anlagen wird allein schon aus Markt- und Wirtschaftlichkeitsgründen weitgehend bestehen bleiben. Dies schränkt die Minderungspotenziale naturgemäß ein, ist aber im Prinzip für ganz Europa gültig. Kostengünstige Einsparpotenziale können jedoch relativ schnell umgesetzt werden. Das Knowhow hierfür ist aufgrund des hohen Bildungsstandes in der Branche verfügbar, sodass von dieser Seite keine Hemmnisse bestehen.

Große Unsicherheiten bestehen weiterhin in der unsicheren Entwicklung der Verfügbarkeit geeigneter Sekundärstoffe. Eine ausreichende Verfügbarkeit in quantitativer und qualitativer Hinsicht ist eine wichtige Grundlage dafür, die Wirtschaftskraft der Branche zu erhalten und damit Investitionen auch langfristig zu ermöglichen.

## 10 Anhang

### 10.1 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Branchenkennzahlen ohne Zementmahlwerke (2007) nach Mauschitz [Mau-07].....	16
Tabelle 2:	Konventioneller Energieeinsatz im Jahr 2007.....	19
Tabelle 3:	Ersatzbrennstoffeinsatz im Jahr 2007.....	19
Tabelle 4:	Einsparpotenzial des Brennstoffenergiebedarfes über Branchendurchschnitt.....	29
Tabelle 5:	Anzahl der Zyklonstufen in Abhängigkeit von der Feuchte des Rohmaterials [Klei-06].....	32
Tabelle 6:	Rohmaterialfeuchte/Anzahl der Zyklonstufen, Modellanlagen vs. Istanlagen.....	32
Tabelle 7:	Kühlerwirkungsgrade nach [Vt-8], Istdaten und Modelldaten.....	33
Tabelle 8:	Thermisches Gesamtpotenzial der untersuchten Technologien in der österreichischen Zementindustrie.....	57
Tabelle 9:	Elektrisches Gesamtpotenzial der untersuchten Technologien in der österreichischen Zementindustrie.....	57
Tabelle 10:	CO <sub>2</sub> -Reduktionspotenzial der thermischen Prozesse in der österreichischen Zementindustrie/Bezugsjahr 2007.....	58
Tabelle 11:	CO <sub>2</sub> -Reduktionspotenzial der elektrischen Prozesse in der österreichischen Zementindustrie/Bezugsjahr 2007.....	59

### 10.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Mitgliedswerke VÖZ [VÖZ-1].....	9
Abbildung 2:	Schema eines Zementwerkes.....	11
Abbildung 3:	Methodischer Ansatz der energetischen Analyse und Bewertung mit FIZ-Prozessmodell und Allplan nach AEEP-Methodik.....	12
Abbildung 4:	Brennstoffenergiebedarf in Abhängigkeit von der Produktionskapazität.....	17
Abbildung 5:	Historie der Zementproduktion und des spezifischen Energiebedarfes, nach [Mau-07].....	18
Abbildung 6:	Energiebedarf der österreichischen Zementwerke.....	18

Abbildung 7:	Anteile konventioneller Brennstoffe und Ersatzbrennstoffe am thermischen Energiebedarf.....	18
Abbildung 8:	Anteile konventioneller Energieträger.....	19
Abbildung 9:	Anteile Ersatzbrennstoffe.....	19
Abbildung 10:	Brennstoffenergiebedarf der österreichischen Zementwerke im Bezugsjahr 2007.....	20
Abbildung 11:	Energiebilanz der österreichischen Zementwerke im Bezugsjahr 2007.....	21
Abbildung 12:	Elektrischer Energiebedarf für die Zementmahlung.....	23
Abbildung 13:	Nutzbare Abwärme (> 100 °C).....	24
Abbildung 14:	Klinker/Zement-Faktor der österreichischen Zementwerke.....	26
Abbildung 15:	Einsparpotenzial des Brennstoffenergiebedarfes der einzelnen Werke.....	29
Abbildung 16:	Abwärme im Rohgas/Nutzung und verbleibendes Potenzial.....	31
Abbildung 17:	Nutzungspotenziale aus Abwärme der österreichischen Zementindustrie.....	35
Abbildung 18:	Abwärme an den Standorten der österreichischen Zementindustrie.....	36
Abbildung 19:	Potenzial ORC-Prozess in der österreichischen Zementindustrie.....	38
Abbildung 20:	Fernwärmepotenzial der österreichischen Zementindustrie.....	39
Abbildung 21:	Potenziale zentraler Kompressionskältemaschinen in der österreichischen Zementindustrie.....	41
Abbildung 22:	Potenziale von Absorptionskälteanlagen in der österreichischen Zementindustrie.....	42
Abbildung 23:	Energie- und CO <sub>2</sub> -Einsparpotenzial im Bereich Raumheizung....	43
Abbildung 24:	Rollenpresse.....	46
Abbildung 25:	Vertikalwälzmühle.....	46
Abbildung 26:	Einsparpotenziale bei der Zementmahlung.....	48
Abbildung 27:	Prinzip der getrennten Mahlung am Beispiel der Hüttenzementherzeugung.....	51
Abbildung 28:	Optimierungspotenziale elektrischer Antriebe (Gebläse, Ventilatoren und Pumpen).....	52
Abbildung 29:	Optimierungspotenzial der Erzeugung, Transport und Verwendung von Druckluft.....	53
Abbildung 30:	Optimierungspotenzial Beleuchtung.....	54

## 10.3 Literaturverzeichnis

- [BREF-2010] IPPC Bureau: Draft Reference Document on Best Available Techniques in the Cement, Lime and Magnesium Oxide Manufacturing Industries. European IPPC Bureau. May 2009
- [Ecra-09] WBCSD/ECRA: Development of State of the Art-Techniques in Cement Manufacturing: Trying to Look Ahead (CSI/ECRA-Technology Papers).  
European Cement Research Academy, 2009.  
[www.wbcSDcement.org/technology](http://www.wbcSDcement.org/technology)
- [EC-1] e-control GmbH: Bericht über die Stromkennzeichnung. Berichtsjahr 2009. Quelle: <http://www.e-control.at/portal/page/portal/medienbibliothek/oeko-energie/dokumente/pdfs/Stromkennzeichnungsbericht%202009.pdf>.  
Letzter Zugriff 08.01.2010
- [Klei-06] Henning Klein, Volker Hoenig: Modellrechnungen zum Brennstoffenergieverbrauch des Klinkerbrennprozesses. Cement International, 2006, S. 5
- [Mau-07] Gerd Mauschwitz: Emissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie. Berichtsjahr 2007. Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften. Technische Universität Wien
- [VDZ-Umweltdaten] VDZ: Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2007. Verein Deutscher Zementwerke e.V. <http://www.vdz-online.de/literatur.html>
- [Vt-8] Merkblatt Vt 8: Rost-, Satelliten- und Rohrkühler in der Zementindustrie. Verein Deutscher Zementwerke, 1989
- [Vt-10] Merkblatt Vt 10: Durchführung und Auswertung von Drehofenversuchen. Verein Deutscher Zementwerke, 1992
- [VÖZ-1] VÖZ: Zement lebt. Nachhaltigkeitsbericht 2008/2009 der österreichischen Zementindustrie. Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie. 2009
- [ZKG-2] H. O. Gardeik, H. Ludwig: Berechnung des Wandwärmeverlustes von Drehöfen und Mühlen. Teil I: Grundlagen. ZKG INTERNATIONAL (Heft 2), 1980, S. 53-62
- [ZKG-3] H. O. Gardeik, H. Ludwig: Berechnung des Wandwärmeverlustes von Drehöfen und Mühlen. Teil II: Näherungsgleichungen und Anwendungen. ZKG INTERNATIONAL (Heft 3), 1980, S. 144-149

- [ZKG-5] H. O. Gardeik, H. Rosemann, V. Steinbach: Thermische Beurteilung von Klinkerkühlern. Empfehlungen des VDZ-Arbeitskreises Klinkerkühler. ZKG INTERNATIONAL (Heft 5), 1987, S. 230-237
- [ZT-51] VDZ: Zement-Taschenbuch. Verein Deutscher Zementwerke e.V. Forschungsinstitut der Zementindustrie. 51. Auflage. 2008



