

Der Zementherstellungsprozess

Josef Waltisberg

**Ehemaliger Dozent für Thermodynamik
an der Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften**

JW-21-04-D

1. Einleitung

Im Rahmen meiner nebenberuflichen Tätigkeit an der Hochschule wurde diese Vorlesung (4 Lektionen) einmal pro Jahre gehalten. Von 1985 bis zu meiner Pensionierung an der Hochschule im Jahr 2013 wurde ich von «Holderbank»/Holcim dabei unterstützt.

Heute werde ich regelmässig gefragt, wie denn Zement produziert werde. Ich habe mich daher entschlossen, die damalige Vorlesung auf meiner Homepage zu veröffentlichen, wobei ich die Kapitel «Brennstoffe», «Zementarten» und «Zahlen» neu aufgenommen habe.

Alle gemachten Angaben beziehen sich auf ein mittleren Schweizer Zementofen mit einer Tagesproduktion von 2'200 [t/Tag] Klinker. Für heutige Verhältnisse sind dies weltweit eher kleine Werke. Zum Vergleich: Zwei der grössten Öfen stehen in Saraburi in Thailand mit einer Tagesleistung von 10'200 [t/Tag].

Autor:

Josef Waltisberg, dipl. Ing. ETH
Eichhaldenweg 23

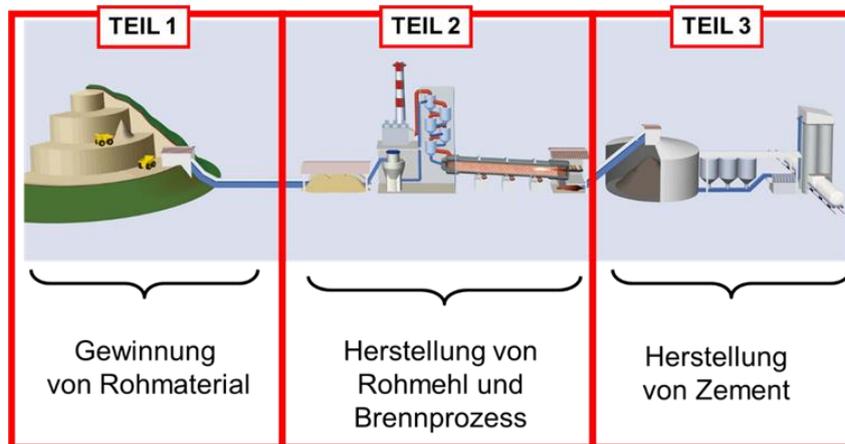
5113 Holderbank / Schweiz

Mail: josef@waltisberg.com

Webpage: waltisberg.com

2. Überblick

Den Zementherstellungsprozess kann man im Wesentlichen in drei Teilprozesse unterteilen.



- Teil 1: In einem oder mehreren Steinbrüchen werden die Rohmaterialien Kalkstein, Mergel, Ton gewonnen, vorzerkleinert und über Transportbänder zum Werk transportiert.
- Teil 2: Die Rohmaterialien vom Steinbruch werden homogenisiert (vergleichsmässig), eventuell noch durch Zusatzmaterialien korrigiert. Anschliessend werden sie in der Mühle gemahlen und mit dem Abgas des Ofens getrocknet. Das entstehende Mehl, Rohmehl genannt, wird dann im Ofen zu Zementklinker, kurz Klinker genannt, gebrannt.
- Teil 3: Der Klinker wird zwischengelagert und anschliessend zu verschiedenen Zementsorten unter Zugabe verschiedener Materialien wie Gips, Kalkstein, Flugasche, Puzzolan (Vulkanasche), etc., vermahlen. Die Auslieferung erfolgt über Bahn, Strasse, etc.

3. Chemische Zusammensetzung, Gewinnung von Rohmaterial

Zur Produktion eines sogenannten «Portland-Klinker»¹ braucht es eine bestimmte Zusammensetzung, nämlich

- Calciumkarbonate CaCO_3 77 [%]
- Siliziumoxide SiO_2 13.5 [%]
- Aluminiumoxide Oxide Al_2O_3 3.5 [%]
- Eisenoxide Fe_2O_3 1.5 [%]
- Andere Rest



¹ **Zementklinker** (Portlandzementklinker, kurz: Klinker) ist der gebrannte Bestandteil des Zements, der für die Aushärtung unter Beimengung von Wasser zuständig ist.

Das Rohmaterial aus dem Steinbruch oder den Steinbrüchen hat aber nicht die gewünschte Zusammensetzung und muss aus verschiedenen Komponenten zusammengemischt werden.

Beispiel	Kalkstein [%]	Mergel [%]
CaCO ₃	85	50
SiO ₂	12	36
Al ₂ O ₃	2	10
Fe ₂ O ₃	1	4

Das Bild zeigt den Steinbruch von Holcim in Siggenthal, wo der Kalkstein in den oberen und der Mergel in den unteren Schichten zu finden ist. Die CaCO₃-Gehalte in den einzelnen Schichten liegen bei:

- Kalkstein: 70 - 95 [%]
- Mergel: 50 - 70 [%]



In der Regel haben die Rohmaterialien zu wenig Al₂O₃ und/oder Fe₂O₃. Dann müssen sogenannte Korrekturmateriale, wie Bauxit, Eisenerz, etc. zugegeben werden.

4. Steinbruch Abbau, Brecherei, etc.

Nach einem genauen Abbauplan beginnen die Abbauarbeiten mit der Bohrung der Sprenglöcher im festgelegten Bohrraster. Nach der Sprengung werden die Materialien verladen und zum Vorbrecher (Primärbrecher) transportiert. Dabei werden die Materialien durch Bagger und/oder Radlader auf Schwerlastkraft verladen und transportiert.

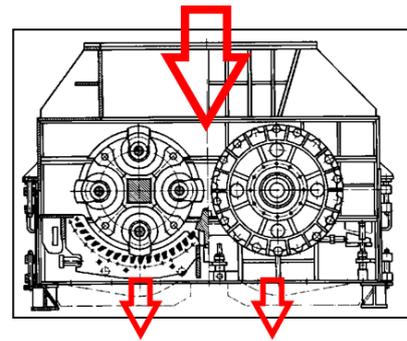


Unten links:
 CAT 992 C/G
 Schaufel: 13 [m³]; 24 [t]
 835 [PS]; 614 [kW]
 Verbrauch: 92 [l/h]



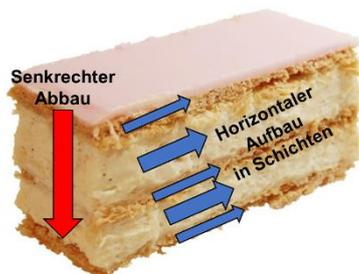
Unten rechts:
 Dumper
 Zuladung: 90 bis 9⁵ [t]
 1050 [PS], 772 [kW]
 Verbrauch: 40 [l/h]

In einem Brecher² werden die Rohmaterialien mit der Grösse von maximal 1 [m] auf 80 [mm] zerkleinert und über Transportbänder zum Werk transportiert.



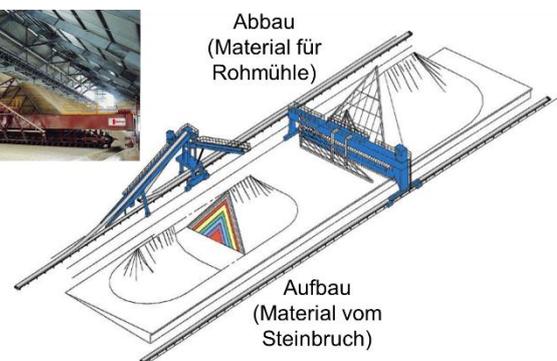
5. Zwischenlager, Homogenisierung

In einem Mischbett im Werk wird das Rohmaterial zwischengelagert, da in der Regel der Steinbruch an fünf Tagen arbeitet, der Ofen aber rund um die Uhr läuft. Neben der Lagerung werden im Mischbett auch die einzelnen Rohmaterialchargen, welche aus dem Steinbruch kommen, homogenisiert. Dies geschieht nach der «Cremeschnitten-Methode», also horizontaler Aufbau und senkrechter Abbau der Schichten.



Die einzelnen Chargen aus dem Steinbruch werden über eine verschiebbare Abwurfvorrichtung in Schichten abgeworfen (Aufbau) bis der ganze Materialhaufen eine bestimmte Menge Material enthält, in der Regel etwa die benötigte Menge von einer Woche. Das sind etwa 20'000 [t].

Gleichzeitig wird Material aus einem zweiten Mischbett (Abbau) abgebaut. Dabei bewegt sich ein «Kratzer» (Gitter mit vorstehenden «Zähnen») über die ganze Querschnittsfläche. Die einzelnen Steine aus den verschiedenen Schichten fallen dabei nach unten, werden mit einem Förderband zur Seite transportiert und von dort mit einem zweiten Förderband zur Mühle transportiert.



²

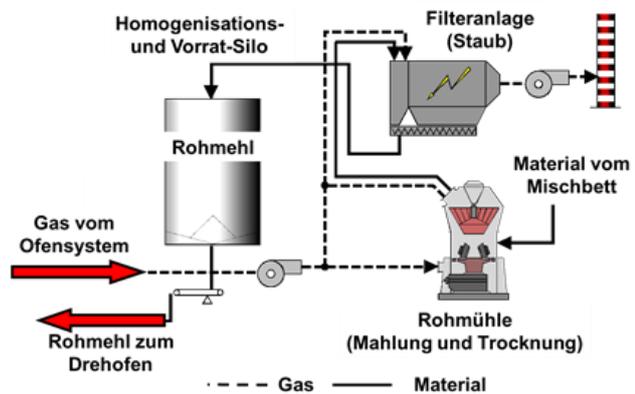
Beispiel: MIAG-Zweiwellen-Brecher mit einer Leistung von 1000 [kW] und einem Durchsatz von 750 [t/h]

6. Herstellung von Rohmehl

Die aus dem Mischbett kommenden Rohmaterialien werden in der Rohmühle zu feinem Staub, Rohmehl genannt, gemahlen und gleichzeitig mit dem Abgas aus dem Ofensystem getrocknet.

Das feine Rohmehl wird mit dem Gasstrom aus der Mühle ausgetragen, gelangt in eine Filteranlage, wo das Rohmehl vom Gas getrennt wird und in ein Vorrats-Silo geleitet wird.

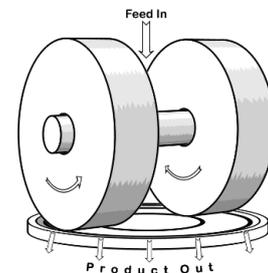
Wird die Mühle ausgeschaltet, so gelangt das Abgas des Ofens, welches auch Staub aus dem Ofensystem enthält, direkt zum Filtersystem.



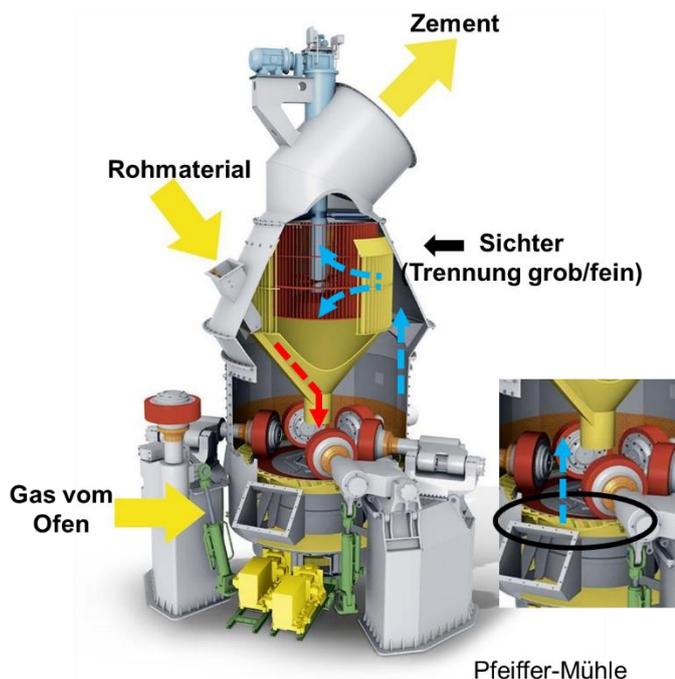
6.1 Die Rohmühle (Walzenschüsselmühle)

Die Rohmühle arbeitet nach dem Prinzip des Kollergangs, wobei sich aber nicht die Mahlsteine drehen, sondern der Mahlteller.

Das Rohmaterial wird in die Mühle zentral aufgegeben und gelangt unter die Walzen, wo es zerkleinert wird. Mit dem heißen Gasstrom (Düsenring, kleines Bild) wird es nach oben in den Sichter (Separator) geblasen, wo der noch zu grobe Anteil zurückgeworfen wird und das Feingut (Rohmehl) die Mühle Richtung Filter verlässt. Gleichzeitig wird das Material durch den heißen Gasstrom getrocknet.

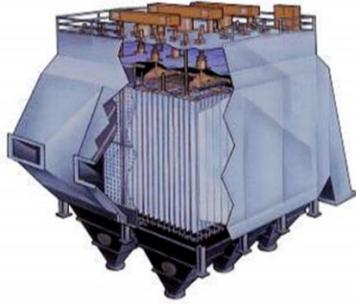


Der Durchsatz dieser Mühlen liegt bei 600 bis 800 [t/h] Rohmaterial.

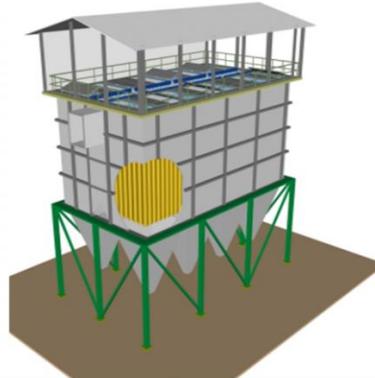


6.2 Filtersysteme

Es gibt zwei Filtersysteme, nämlich den Elektrofilter und das Gewebefilter. Heute wird vorwiegend nur noch der Gewebefilter verwendet.



Elektrofilter

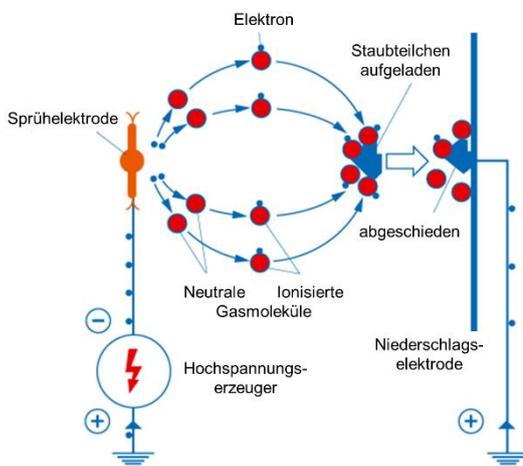
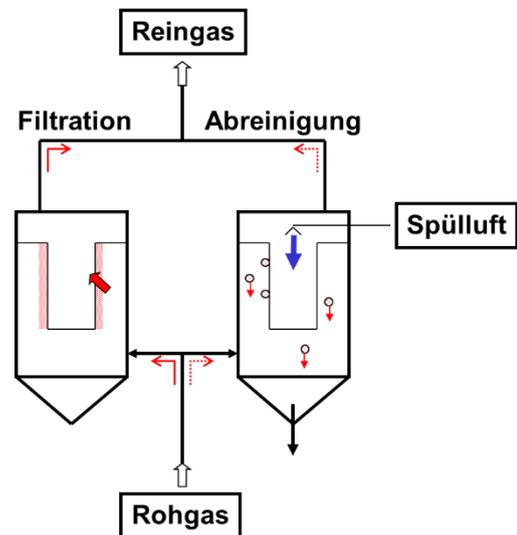


Gewebefilter

Der Gewebefilter funktioniert nach dem «Staubsaugerprinzip». Das Rohgas wird durch Staubsäcke geleitet und der Staub (Rohmehl) wird an der Oberfläche zurückgehalten (Filtration; linker Teil). Zur Abreinigung wird Spülluft in umgekehrter Richtung durch die Säcke geblasen (Abreinigung; rechter Teil) und der Staub (Rohmehl) wird zum Silo geleitet.

Einige Daten:

- Staubemission heute: $< 5 \text{ [mg/m}^3\text{N]}$
- Abscheidegrad: $> 99.9999 \text{ [%]}$
- Bei einem Zementwerk mit einer Produktion von 2'200 [t/Tag] (Mittlere Grösse der Zementwerke in der Schweiz) sind das weniger als 1 [kg] pro Stunde

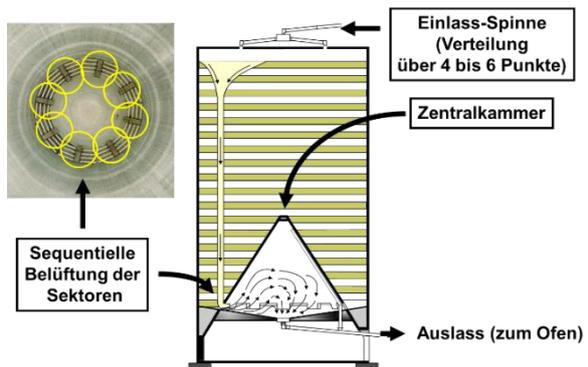


Beim Elektrofilter senden die Sprühelektroden Elektronen zu den Niederschlagselektroden. Staubmoleküle werden beim Durchgang (senkrecht zur Zeichenebene) negativ geladen und wandern zur geerdeten Niederschlagselektrode, wo sie sich ansammeln. Der angesammelte Staub wird dabei regelmässig abgeklopft, fällt nach unten in einen Bunker und wird zum Silo transportiert.

Die Elektrofilter können Stäube (Rohmehl) nur bis etwa 30 bis 40 $[\text{mg/m}^3\text{N}]$ abscheiden, was nach den heutigen Grenzwerten (Schweiz: 20 $[\text{mg/m}^3\text{N}]$, Deutschland: 10 $[\text{mg/m}^3\text{N}]$) nicht mehr genügt.

6.3 Vorrats- und Homogenisiersilos

Das gemahlene und getrocknete Rohmehl (Restfeuchtigkeit < 2 [%]) wird in ein Vorratssilo geleitet, wo nochmals eine Homogenisation (Vergleichmässigung) stattfindet. Es gibt dabei verschiedene Verfahren. In diesem Beispiel (Claudius-Peters) wird dies durch eine Verteilung über die Einlassspinne und einem sequentiellen Abzug über Sektoren realisiert.

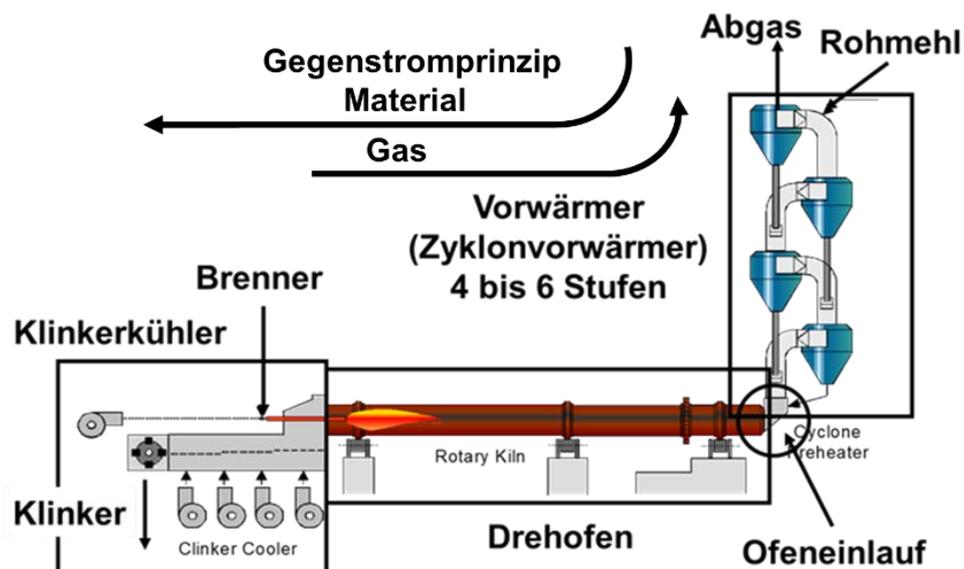


Kapazität dieser Silos: Grössenordnung 10'000 [t] Rohmehl

7. Der «Zementofen», eigentlich der «Klinkerbrennofen»

Das eigentliche Herzstück des ganzen Prozesses ist der Brennprozess. Er wird rund um die Uhr betrieben und besteht im Wesentlichen aus dem Vorwärmer mit 4 bis 6 Zyklonstufen, auch Wärmetauscher genannt, dem Drehofen und dem Klinkerkühler.

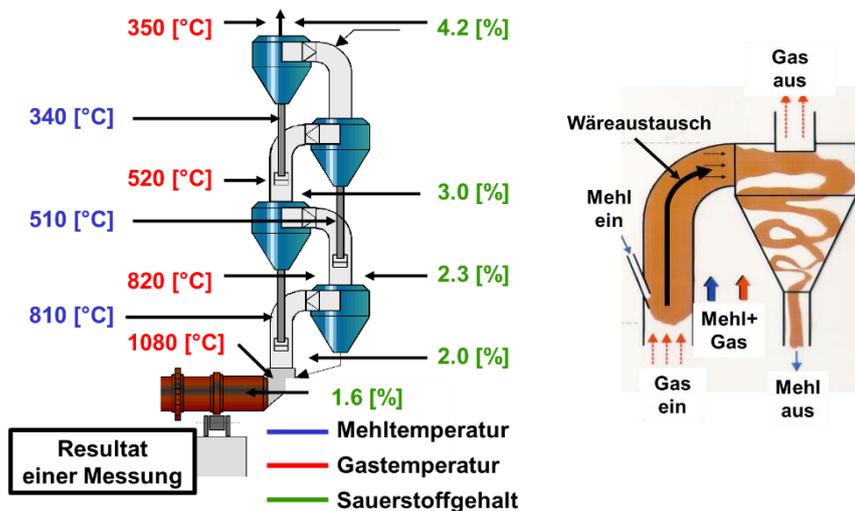
Das Rohmehl wird in die Steigleitung zum obersten Zyklon aufgegeben, fällt über die Stufen nach unten und wird im Gegenstrom zum heissen Gas, aufgeheizt und schlussendlich im Drehofen zu Klinker gebrannt. Der noch glühende Klinker fällt aus dem Drehrohr in den Klinkerkühler, wird dort gekühlt und über Förderbänder zur Zementproduktion geleitet.



7.1 Der Wärmetauscher

Im Wärmetauscher wird das Rohmehl im Gegenstrom von Umgebungstemperatur auf über 800 [°C] aufgeheizt, wobei der eigentliche Wärmetausch zwischen dem Gas und dem Material auf einer kurzen Strecke zwischen dem Einlauf in die Steigleitung und dem Eintritt in den Zyklon stattfindet.

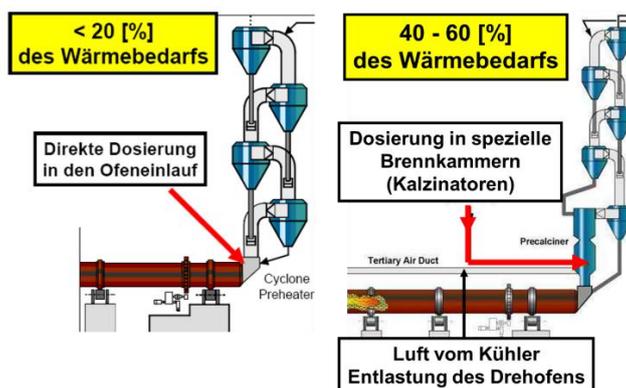
Im Wärmetauscher wird einerseits die Restfeuchtigkeit des Rohmehls von weniger als 2 [%] eliminiert und andererseits das Rohmehl (teilweise) kalziniert (siehe dazu Kapitel 7.3).



7.2 Sekundärfeuerung, Kalzinator

Anfänglich ging die ganze Verbrennungsluft durch das Drehrohr. Dann begann man auch am Ofeneinlauf Brennstoff (z.B. ganze Reifen) zuzuführen. Später baute man spezielle Verbrennungskammern (Kalzinatoren) in den Wärmetauscher ein. Die ursprüngliche Aufgabe dieser Kalzinatoren bestand darin, das Rohmehl besser zu kalzinieren (siehe dazu Kapitel 7.3), doch die Anforderung möglichst hoher Einsatzraten von oftmals grobstückigem Brennstoffen trat mit der Zeit in den Vordergrund.

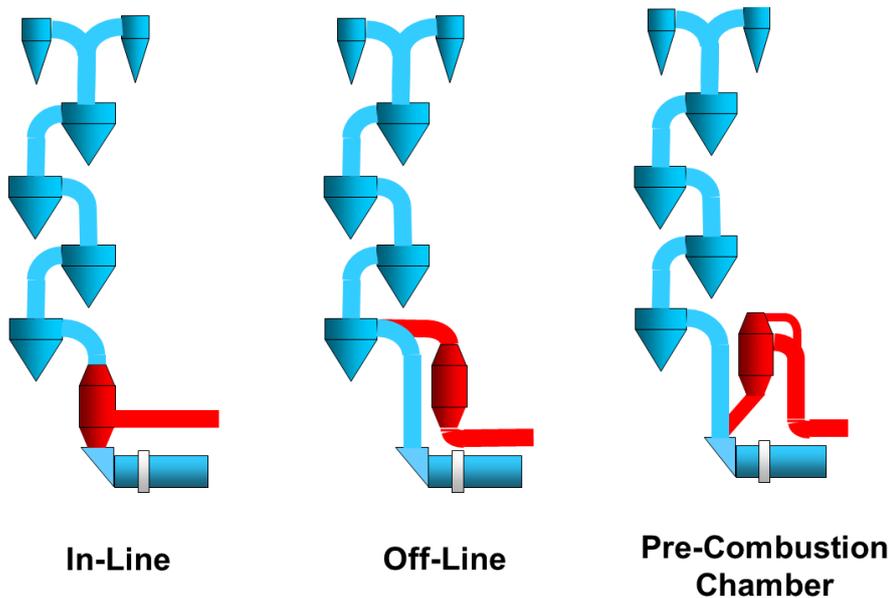
Die Kalzinatoren sind Verbrennungskammern, deren Verbrennungsluft direkt aus der Abluft des Klinkerkühlers (Kühler siehe 7.7) bezogen wird. Dadurch wird die Verbrennungsluft, welche durch den Drehofen gezogen wird, deutlich reduziert und zudem ist diese Verbrennungsluft heiss (800 bis 1000 [°C]).



In heutigen Anlagen wird der Wärmezuführung in ein Ofensystem in der Regel wie folgt aufgeteilt:

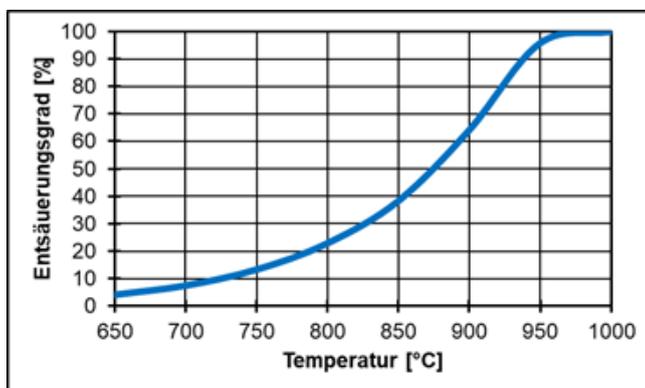
- Öfen ohne Kalzinatoren: bis maximal 20 [%] des Wärmebedarfs (z.B. ganze Reifen) kam im Ofeneinlauf erzeugt werden, der Rest wird mit dem Hauptbrenner erzeugt.
- Öfen mit Kalzinatoren: 40 bis 60 [%] des Wärmebedarfs wird im Kalzinator erzeugt, wobei auch eine Kombination Ofeneinlauf/Kalzinator möglich ist. Der Rest wird mit der Hauptflamme im Drehteil erzeugt.

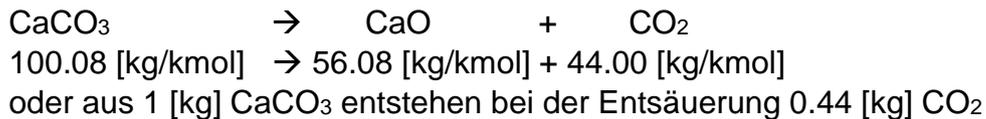
Verschiedene mögliche Schaltungen von Kalzinatoren



7.3 Die Kalzination oder Entsäuerung des Rohmaterials

Rund 77 [%] des Rohmaterials ist Kalziumkarbonat (CaCO_3). Dieses zerfällt bei höheren Temperaturen im Vorwärmer und teilweise noch im Drehteil zu CaO . Das Kalziumoxid (CaO) reagiert im Ofen mit den anderen Mineralen zu Klinkermineralien, während Kohlenstoffdioxid (CO_2) emittiert wird.





Bei der Herstellung von 1 [kg] Klinker entstehen somit rund 0.55 [kg] CO₂ !!!

	Rohmaterial [kg]	Klinker [kg]	CO ₂ [kg]
CaCO ₃ / CaO	0.770	0.431 (CaO)	0.339
SiO ₂	0.135	0.135	---
Al ₂ O ₃	0.035	0.035	---
Fe ₂ O ₃	0.015	0.015	---
Rest	0.005	0.005	
TOTAL	1.000	0.621	0.339
CO₂ pro [kg] Klinker			0.546

Diesem Anteil aus der Kalzination ist der Anteil CO₂ aus der Verbrennung überlagert. Bei modernen Öfen liegt der Emissionsanteil der Kalzinierung bei rund 2/3, jener der Verbrennung bei 1/3.

Bei der Herstellung von 1 [kg] Klinker wird also 0.70 bis 0.85 [kg CO₂] emittiert, wobei dies das gesamte entstehende CO₂ ist, also ohne Reduktion von biogenem CO₂ («klimaneutrales CO₂») aus irgendwelchen Brennstoffen (z.B. Altholz). Der Anteil aus der Kalzination (Entsäuerung) ist auf alle Fälle klimarelevantes CO₂.

Nachsatz: Zementwerke haben einen Anteil an den weltweiten Kohlendioxid-Emission von etwa 8 bis 9 [%], wobei etwa 70 [%] davon in der Volksrepublik China emittiert wird.

7.4 Der Drehofen

Drehöfen sind feuerfest ausgemauerte Rohre mit Durchmessern bis etwa 6 [m] (Schweizer Öfen: ca. 3.5 [m]), die sich mit 1.5 bis 3.5 Umdrehungen in der Minute drehen. Durch die Drehbewegung und die Neigung der Ofenachse von 3° bis 4° wird das Brenngut vom Ofeneinlauf (Übergangsstelle zwischen Vorwärmer und Drehteil) in Richtung des am Ofenauslauf (Ofenkopf) installierten Brenners bewegt. In der Sinterzone erreicht das Brenngut bei einer Verweildauer von 10 bis 20 [min] die nötige Brenntemperatur von 1450 [°C] und beginnt teilweise zu schmelzen (Sinterung). Aus den Ausgangsstoffen bilden sich dabei die so genannten Klinkerphasen. Das sind Calciumsilicate und Calciumaluminat, die dem Zement seine charakteristischen Eigenschaften bei der hydraulischen Erhärtung geben.

Die heutigen Öfen mit Zyklonvorwärmern haben ein Verhältnis Länge/Durchmesser von 10 bis 17.

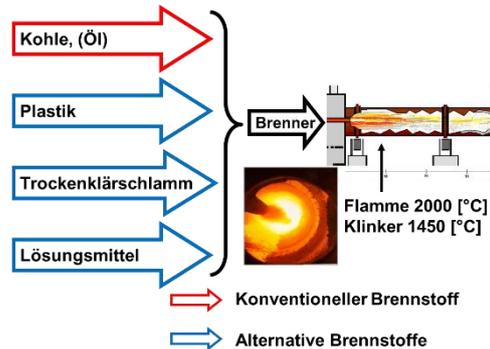
An den Ofenauslauf schliesst sich ein Klinkerkühler, heute in der Regel ein Rostkühler an, welcher den Klinker auf 80 [°C] bis 200 [°C] kühlt. Die Verweildauer des Brennguts in der gesamten Ofenanlage bewegt sich zwischen etwa 1.5 und 4 [h]. Davon entfallen auf:

- einen Zyklonvorwärmer je Stufe im Durchschnitt 0.8 bis 5 [s],
- auf den Drehofen je nach Länge etwa 30 [min] bis 3 [h],
- auf den Rostkühler 30 bis 45 [min].

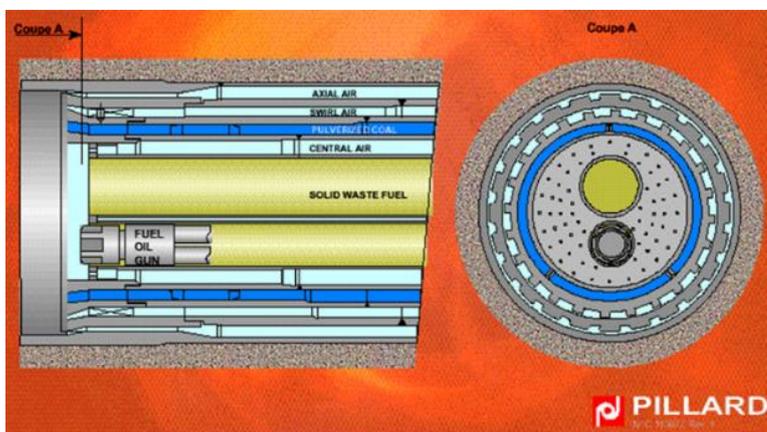
7.5 Der Hauptbrenner

Heute sind in der Regel in den Zementöfen sogenannte Mehrkanalbrenner installiert, für die Verbrennung von verschiedenen Brennstoffen gleichzeitig, nämlich

- Konventionelle Brennstoffe wie Kohle, Öl
- Alternative Brennstoffe («Abfallbrennstoffe») wie Plastik, Altholz, imprägniertes Sägemehl, Tiermehl, Trockenklärschlamm, etc. ...

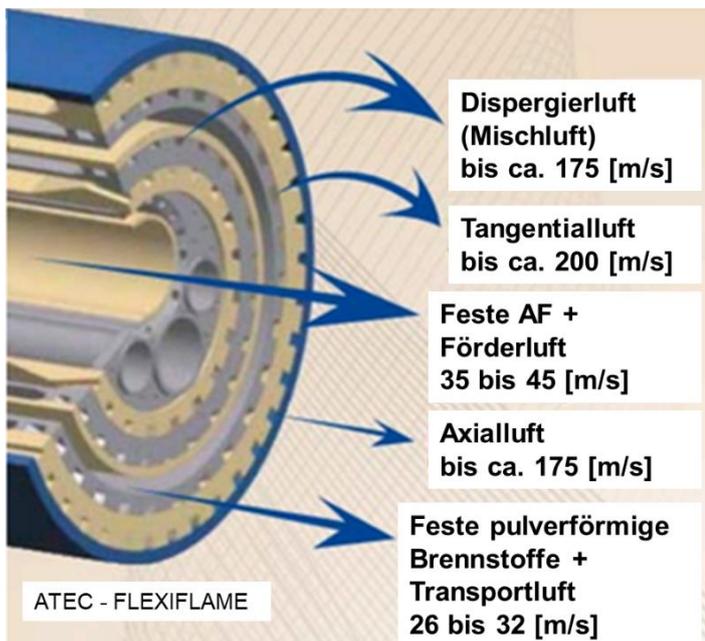


Die Brenner müssen ganz spezielle Anforderungen in Bezug auf den Ausbrand der Brennstoffe - feste Partikel müssen z.B. in der Flamme verbrennen – und der Flammenform erfüllen, welche einen Einfluss auf die Klinkerbildung hat.



UNITHERM
Leistung: 270 [GJ/h]

Einige Beispiele von Brennern



Pillard NOVAFLAME



Unitherm CEMCON



Unitherm CEMCON (Satellitenbrenner)



7.6 «Alternative Brennstoffe» AF

In einem Zementwerk wird kein unsortierter Müll (Kehricht) eingesetzt, sondern definierte und kontrollierte Abfallfraktionen.

2018 setzte die Schweizer Zementindustrie total 340'846 [t] «alternative Brennstoffe» ein, was 65.5 [%] des Wärmebedarfs der Schweizer Öfen entsprach.



Ein Zementwerk ist keine Müllverbrennungsanlage!



2018	[%]
Altöl	11.7
Lösungsmittel	15.2
Reifen/Gummi	11.6
Kunststoffe	18.6
andere fossile	2.4
Tierfette/-mehle	8.5
Trockenklärschlamm	13.5
Altholz	18.3
andere biogene	0.1

Nutzen von solchen Brennstoffen am Beispiel von Altreifen:

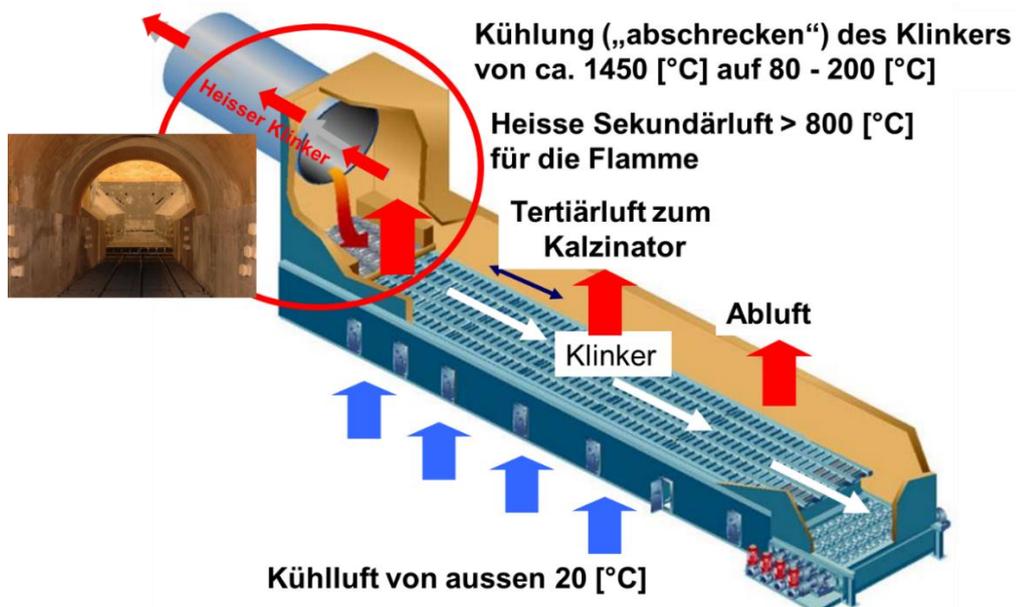
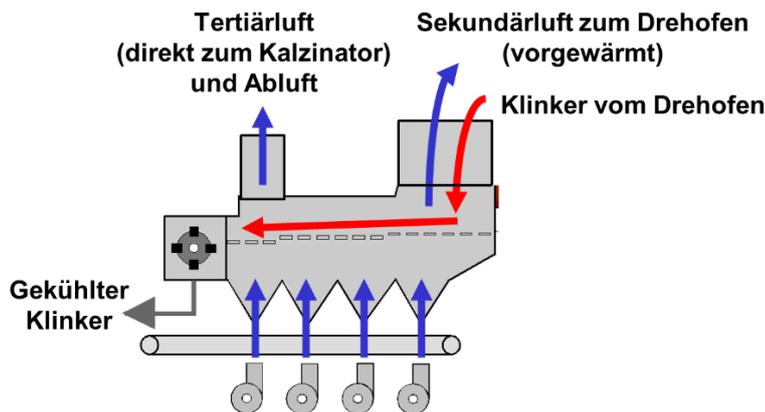
- Heizwert (~ 28 [MJ/kg]) von 1 [kg] Reifen entspricht etwa dem Heizwert der verwendeten Kohle. Das heisst, 1 [kg] Reifen ersetzt energetisch 1 [kg] Kohle
- Kohlendioxid CO₂:
 - Kohle: Der C-Gehalt beträgt etwa 88 [%]. Daraus entstehen bei der Verbrennung etwa 3.22 [kgCO₂/kg Kohle]
 - Reifen: Der C-Gehalt ist mit etwa 69 [%] deutlich geringer. Daraus entstehen bei der Verbrennung etwa 2.54 [kgCO₂/kg Reifen], also etwa 21 [%] weniger
- Biogener CO₂-Anteil
 - Während Kohle keinen biogenen CO₂-Anteil besitzt, beträgt er beim Reifen rund 27 [%]
- Klimaaktives CO₂
 - Bei der Verbrennung von Kohle entsteht 3.22 [kgCO₂/kg Kohle], das klimaaktiv ist (100 [%])
 - Bei der Verbrennung von Reifen entsteht 1.85 [kgCO₂/kg Reifen], das klimaaktiv ist, also nur 57.5 [%]
- Das Eisen im Reifen wird in den Klinker eingebunden. Da viele Rohmaterialien von Zementwerken zu wenig Eisen haben, ist dies ein gewünschter Korrekturstoff.

7.7 Der Klinkerkühler

Der heiße Klinker aus dem Drehofen fällt in den Klinkerkühler und wird mit beweglichen Platten zum Ausgang transportiert. Er wird dabei im Querstromprinzip mit Umgebungsluft abgekühlt und verlässt den Kühler mit 80 bis 200 [°C].

Die heiße Abluft des Kühlers wird in drei Teile aufgeteilt:

- Sekundärluft: Die Abluft im Bereich des Kühlereintritts, Sekundärluft genannt, wird in den Drehofen gezogen und dient mit der über den Hauptbrenner geleitete Primärluft als Verbrennungsluft im Drehteil. Die gesamte Luftmenge aus Primär- und Sekundärluft muss einen Luftüberschuss (ca. 2 [%] O₂) aufweisen, sonst hat dies negative Einflüsse auf die Qualität des Klinkers.
- Tertiärluft: Die Mittenluft des Klinkerkühlers wird über die Tertiärleitung zum Kalzinator geführt und dient dort als Verbrennungsluft. Die Temperatur dieser Luft liegt im Bereich von 800 bis 1000 [°C].
- Abluft: Ein Teil der Luft ist Abluft und muss an die Umgebung abgegeben werden oder kann in einem System zur Wärmerückgewinnung verwendet werden.

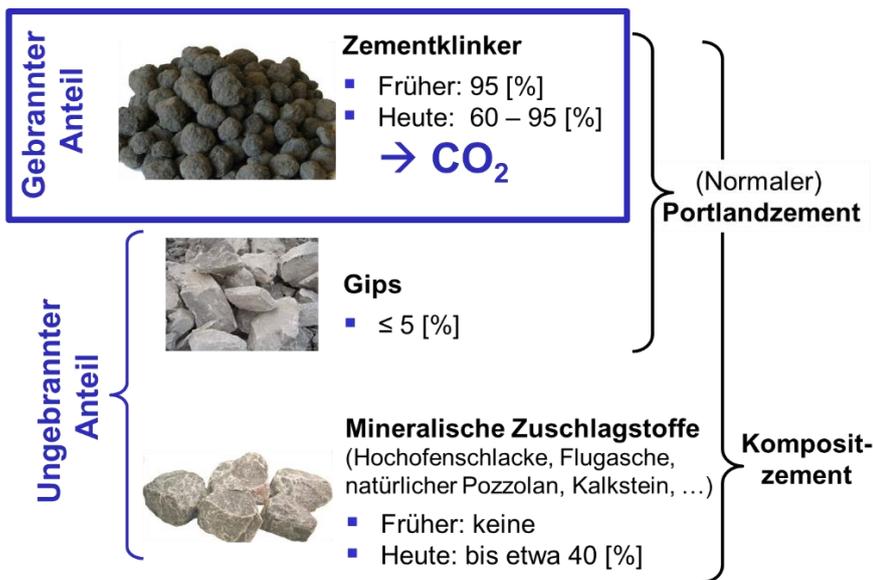


8. Die Zementherstellung

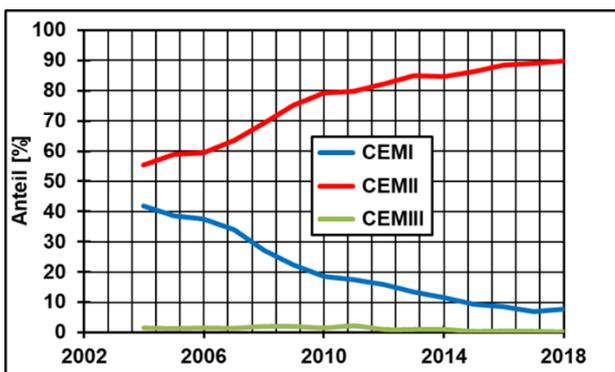
8.1 Zementarten

Vor den 90er Jahren des letzten Jahrhunderts wurde vorwiegend der Portlandzement (CEM I) fabriziert und verwendet. Er bestand aus mehr als 95 [%] aus gemahlenem Klinker und bis zu 5 [%] aus Gips.

Heute wird der sogenannte Kompositzement gebraucht, dem bis zu 40 [%] mineralische Zuschlagstoffe wie Kalkstein, Puzzolan, Flugasche, Hochofenschlacke, etc. zugemischt wird. Durch diesen ungebrannten Anteil im Zement konnten die CO₂-Emissionen bei der Produktion gesenkt werden.



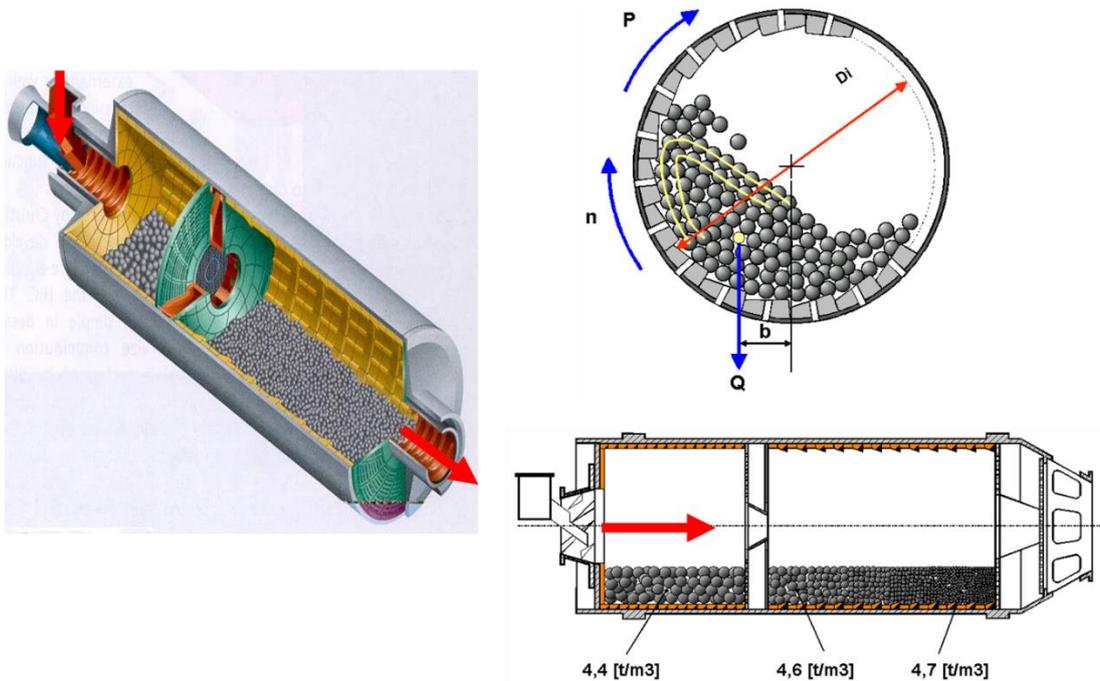
Der Anteil des Portlandzements (CEM I) wurde seit den 90er Jahren stetig kleiner und erreicht heute noch weniger als 10 [%].



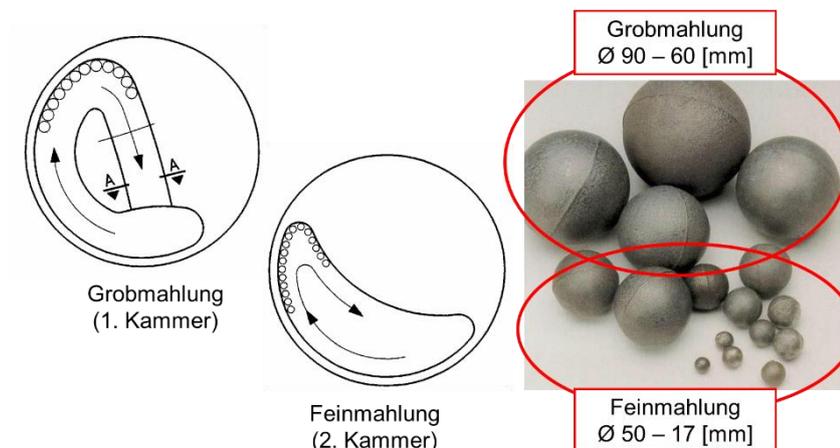
- CEM I – Portlandzement
 - CEM II – Portlandkompositzement
 - CEM III – Hochofenzement
 - CEM IV – Puzzolanzement
 - CEM V – Kompositzement
- } Kompositzement

8.2 Zementmahlung

Der Klinker wird zusammen mit den Zuschlagstoffen (siehe 8.1) in der Regel in Kugelmühen gemahlen. Im Gegensatz zur Walzenschüsselmühle (Rohmühle vgl. 6.1) wird bei dieser Mühle eine günstigere Kornverteilung für den Zement erreicht.



Die Kugelmühen zur Zementherstellung besitzen in der Regel zwei Kammer, eine für die Grobmahlung mit Kugel mit Durchmessern zwischen 90 und 60 [mm] und eine längere Kammer für die Feinmahlung mit Kugeln mit Durchmessern zwischen etwa 50 und 17 [mm]. Die Kammern sind mit Panzerungen ausgerüstet, welche eine automatische Separierung der Kugel nach Grösse vornehmen.



8. Zahlen

Produktion: (Annahme: Produktion während 330 Tagen)
Klinker 2'200 [t/Tag] oder etwa 0.65 Mio. [t/Jahr]
Zement ca. 3000 [t/Tag] oder 0.9 bis 1 Mio. [t/Jahr]

Benötigtes Rohmaterial

Kalkstein, Mergel, etc. total ca. 3'600 [t/Tag] oder 1.2 Mio. [t/Jahr] (trocken)

Benötigte Wärmeenergie

Wärmebedarf des Ofens: 3.5 [GJ/t Klinker]

pro Jahr etwa 2.5 Mio. [GJ]

Feuerung mit Kohle: 275 [t/Tag] oder etwa 90'000 [t]

Hinweis: heute werden 2/3 «alternative Brennstoffe» eingesetzt. Der Verbrauch an Kohle soll die Grössenordnung der verwendeten Mengen an Brennstoffen zeigen.

Benötigte elektrische Energie

Rohmehlaufbereitung ca. 25 [%] der elektrischen Leistung

Klinkerkühlung ca. 25 [%] der elektrischen Leistung

Zementmahlung ca. 50 [%] der elektrischen Leistung

Total ca. 100 – 120 [kWh/t Zement]

oder 360 – 430 [MJ/t Zement]

3000 [t/Tag] Zement] etwa 100 [GWh] oder 0.35 Mio. [GJ] pro Jahr

NO_x-Emissionen

Abgasmenge ca. 200'000 [m³_N/h]³

Stickoxide (NO_x) 370 [mg/m³_N]^{3,4} oder 74 [kg/h] oder ca. 590 [t/Jahr]

CO₂-Emission

Berechnet mit den mittleren CO₂-Emissionsfaktoren und der Zusammensetzung der alternativen Brennstoffe (AF – siehe 7.6) des Jahres 2018)

Emission aus	[t/Tag]	[t/Jahr]	Anteil [%]
Kalzinierung (geogen)	1'210	399'300	73.4
Kohle	231	76'230	14.0
Fossilem Anteil AF	207	68'310	12.6
Total klimaaktiv	1'648	543'840	100.0

Total klimaaktiv	1'648	543'840	91.4
Biogen – nicht klimaaktiv	156	51'480	8.6
Emission total	1'804	595'320	100.0

³ [m³_N] = Kubikmeter bei Normbedingungen (1013 [mbar], 0 [°C]), trockenes Abgas, bei einem Referenzsauerstoffgehalt von 10 [%]

⁴ Mittlere Emission der Schweizer Werke 2018