



Berg Huettenmaenn Monatsh
<https://doi.org/10.1007/s00501-023-01343-6>
 © Der/die Autor(en) 2023

BHM Berg- und
 Hüttenmännische
 Monatshefte

Zementmahlung – Stand der Technik und Trends für die Zukunft

Thomas Holzinger¹ und Helmut Flachberger²

¹Holzinger Consulting, Adligenswil, Schweiz

²Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung, Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich

Eingegangen 1. März 2023; angenommen 13. März 2023

Zusammenfassung: Die Zementindustrie steht vor großen Herausforderungen und hat gleichzeitig die Chance, eine entscheidende Rolle bei der Erreichung der klimapolitischen Ziele einzunehmen. Die Zementproduktion trägt weltweit mit ca. 7% zum gesamten CO₂-Ausstoß bei und steht daher seit Jahren im Fokus von Gesellschaft und Politik. Zur Zielerreichung beitragen können vielfältige Maßnahmen, wie die Reduktion des Einsatzes fossiler Brennstoffe durch CO₂-neutrale Ersatzbrennstoffe, neue Produktionstechniken unter Sauerstoffatmosphäre, Carbon Capture Projekte zur CO₂-Einlagerung, die Herstellung von technischem Kohlendioxid oder synthetischen Kraftstoffen. Eine weitere, seitens der Zementindustrie vorangetriebene Forschungsaktivität und weltweit zu beobachtender Trend ist die Reduzierung des Klinkeranteiles in Zementen. Normen und Standards werden angepasst, um neue Zemente mit einem höheren Anteil an Zuschlagstoffen für die Bauindustrie einzuführen. So weisen etwa die Zementsorten CEM II/C und CEM VI einen reduzierten Klinkeranteil auf, sie erlauben den Einsatz von erhöhten Anteilen an Schlacke, Kalkstein, rezykliertem Beton und anderen Zuschlagstoffen. Diese wiederum energetisch optimal, also mit geringem elektrischen Energieeinsatz herzustellen, stellt die Werke und die Industrie vor neue Herausforderungen. Der elektrische Energiebedarf eines Zementwerkes ist nicht zu unterschätzen und liegt aktuell in einem Bereich von 90 bis 110 kWh pro Tonne produziertem Zement, neuere Zementwerke liegen bei 80 kWh/t und darunter. Betrachtet man den mittleren Energieverbrauch eines Werkes, so werden rund 71% für die Mahlung ein-

gesetzt, etwa 24% für die Klinkerherstellung und ca. 5% für allgemeine Verbraucher. Davon beansprucht die Zementmahlung ca. 44% und beträgt je nach eingesetzten Mahlsystemen und erzeugtem Zementsortenportfolio zwischen 35 und 50 kWh/t.

Im Rahmen dieser Veröffentlichung werden die aktuell zum Einsatz gelangenden Mahlsysteme – Kugelmühlenkreisläufe, Walzenschüsselmühlen sowie Rollenpressen – besprochen. Des Weiteren werden deren Vorteile, Anwendungsmöglichkeiten und -grenzen sowie die aus der langjährigen Tätigkeit des Erstautors gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst und Markttrends präsentiert. Die optimierte Herstellung von Mischzementen durch Separatmahlung wird zur Diskussion gestellt und die damit gemachten Erfahrungen vorgestellt. Die Separatmahlung bietet optimale Voraussetzungen, um in Zukunft den Klinkerfaktor auf ein Minimum zu reduzieren, und ermöglicht gleichzeitig den Einsatz von energetisch günstigen Mahlsystemen, wie etwa Rollenpressen und/oder Walzenschüsselmühlen, um einerseits den steigenden Zementbedarf im Werk zu decken und andererseits die Energiekosten niedrig zu halten.

Schlüsselwörter: CO₂-Reduktion, Kugelmühle, Walzenschüsselmühle, Gutbettwalzenmühle, Rollenpresse, Keramische Mahlkugeln, Booster Mill®, Separatmahlung, Reduktion des Klinkerfaktors, Mahlsysteme

Cement Grinding—State of the Art and Trends for the Future

Abstract: The cement industry faces major challenges and, at the same time, has the opportunity to play a decisive role in achieving climate policy goals. Cement production contributes around 7% to total CO₂ emissions worldwide and has therefore been the focus of society and politics for years. Measures, such as reduction of the use of fossil fuels through CO₂-neutral substitute fuels, new production techniques under an oxygen atmosphere, carbon capture projects for storage, and production of technical

Nach einem Vortrag, gehalten im Rahmen des „Aufbereitungstechnischen Seminars 2022“ am 5. Oktober 2022 in Leoben Österreich.

H. Flachberger (✉)
 Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung,
 Montanuniversität Leoben,
 Max-Tendler-Straße 4,
 8700 Leoben, Österreich
helmut.flachberger@unileoben.ac.at

carbon dioxide or synthetic fuels and chemicals can contribute to achieving the goals. An important research activity of the cement industry that can be observed worldwide is the reduction of the clinker content in cements. Norms and standards are being adapted, and new cements with more additives are being introduced for the construction industry. The CEM II/C and CEM VI grades have a reduced clinker content, and they allow the use of increased proportions of slag, limestone, recycled concrete, and other aggregates. Producing these, in turn, in an energetically optimal way with low electrical energy input poses new challenges for the plants and the industry. The electrical energy demand of a cement plant should not be underestimated and is in the range of 90 to 110 kWh per ton of cement produced. Newer cement plants with modern equipment already achieve energy consumptions of 80 kWh/t and less. Around 71% is used for grinding, around 24% for clinker production, and around 5% for general consumers. Of this, cement grinding consumes around 44% and amounts to 35 to 50 kWh/t, depending on the region's grinding systems and cement type portfolio.

This publication discusses the current grinding systems – ball mill circuits, vertical mills, and roller press systems. Furthermore, their advantages, application possibilities, and the knowledge gained from the first author's many years of activity are described, and market trends are discussed. The optimised production of blended types of cement through separate grinding is put up for discussion and the experiences made with it are presented. Separate grinding offers optimal conditions to reduce the clinker factor to a minimum in the future and, at the same time, enables the use of energetically favourable grinding systems, like roller presses and/or vertical roller mills to cover the increasing cement demand in the plant on the one hand and to keep energy costs low on the other.

Keywords: CO₂ reduction, Ball mill, Vertical roller mill, High pressure grinding roll, Roller press, Ceramic grinding media, Booster Mill®, Separate grinding, Clinker factor reduction, Cement grinding systems

1. Einleitung

Die Firma Holzinger Consulting berät die Zementindustrie sowie den Industriemineralsektor in Fragen der Prozessoptimierung in der thermischen sowie in der mechanischen Verfahrenstechnik. Hierbei besteht mit den Experten der Firmen in den verschiedenen Themengebieten eine enge Zusammenarbeit, die auf Erfahrung und Vertrauen aufgebaut ist.

Die Zementproduktion trägt weltweit mit ca. 7% zum gesamten CO₂-Ausstoß bei und steht daher seit Jahren im Fokus von Gesellschaft und Politik. Zur Reduzierung von CO₂-Emissionen beitragen können vielfältige Maßnahmen, wie die Reduktion des Einsatzes fossiler Brennstoffe durch CO₂-neutrale Ersatzbrennstoffe, neue Produktionstechniken unter Sauerstoffatmosphäre, Carbon Capture Projekte zur Einlagerung wie auch die Herstellung von technischem Kohlendioxid oder synthetischen Kraftstoffen oder Chemikali-

en. Ein weiterer weltweit zu beobachtender Trend ist die Reduzierung des Klinkeranteiles in Zementen. Normen und Standards werden angepasst, um neue Zemente mit einem höheren Anteil an Zusatzstoffen für die Bauindustrie einzuführen. Die Zementsorten CEM II/C und CEM VI weisen einen reduzierten Klinkeranteil auf und erlauben den Einsatz von erhöhten Anteilen an Schlacke, Kalkstein, recykliertem Beton und anderen Zuschlagstoffen. Diese wiederum energetisch optimal, mit geringem elektrischen Energieeinsatz herzustellen, stellt die Werke und die Industrie vor neue Herausforderungen.

2. Stand der Technik

Abb. 1 gibt einen allgemeinen Überblick über aktuell in der Zementindustrie zum Einsatz gelangende Mahlsysteme, von den Anfängen mit Zweikammer-Kugelmühlen im offenen Kreislauf bis hin zu heutigen Standards mit Kugelmühlen im geschlossenen Kreislauf mit Windsichtern, aber auch Walzenschüsselmühlen sowie Gutbettwalzenmühlen (auch Rollenpressen genannt).

Je nach Land und den spezifischen Märkten und Erweiterungsstufen kommen auch kombinierte Mahlsysteme mit Rollenpressen und Walzenschüsselmühlen (auch als Pregrinder bezeichnet) zum Einsatz, letztere vorwiegend in Indien und Asien in verschiedensten Schaltungen. Ziel bei den Vormahlaggregaten ist es, die zumeist unzureichend an den Zerkleinerungsschritt angepasste und damit „unwirtschaftlich“ arbeitende erste Kammer einer Kugelmühle durch ein „wirtschaftlicheres“ Aggregat zu ersetzen, um den Durchsatz einerseits zu erhöhen und andererseits den spezifischen Energieverbrauch zu senken.

Dieser bewegt sich pro Tonne Zement (siehe dazu Abb. 2) in Bereichen von 90 bis zu 110 kWh/t, abhängig vom Anlagendesign, den installierten Mahlsystemen und dem erzeugten Zementportfolio. Moderne Zementwerke, welche mit effizienten Mahlsystemen, sprich Walzenschüsselmühlen und Rollenpressen, ausgestattet sind und ein kompaktes Anlagendesign aufweisen, liegen heute bei Werten deutlich unter 80 kWh/t.

Die Verteilung der spezifischen elektrischen Energie in einem Werk ist anschaulich in Abb. 3 dargestellt und zeigt, dass

- 71% für die Mahlung von Rohmaterial, Kohle bis hin zur Zementmahlung
- 24% für die Klinkerherstellung und
- 5% in allgemeine Verbraucher

eingesetzt wird.

3. Mahlsysteme im Überblick

3.1 Klassischer Kugelmühlenkreislauf mit Windsichter

Die Kugelmühle im geschlossenen Kreislauf (Abb. 4) ist mit einem Sichtaggregat sogenannter erster, zweiter oder drit-

Abb. 1: Allgemeiner Überblick von in der Zementindustrie eingesetzten Mahlsystemen

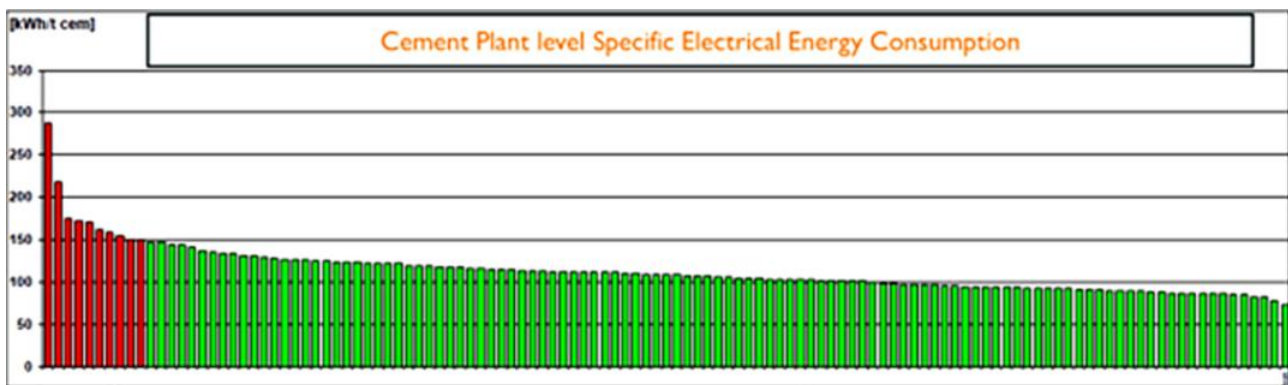
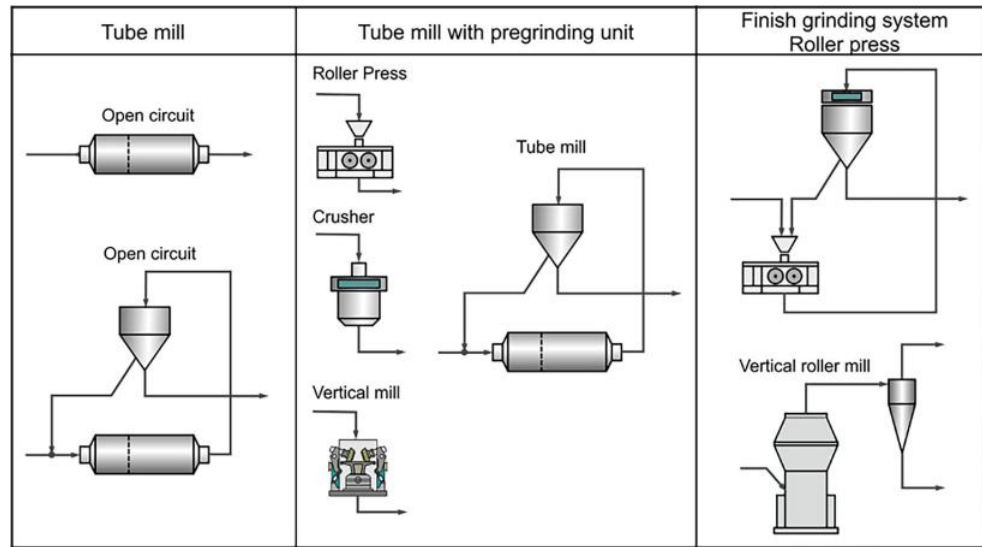
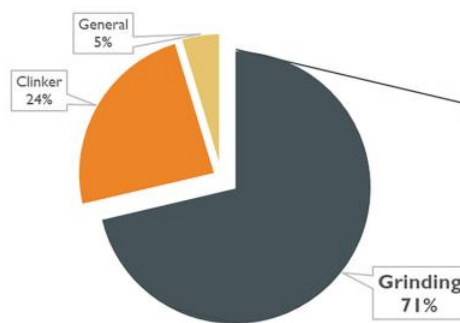


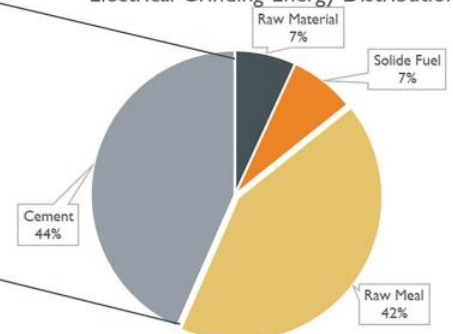
Abb. 2: Spezifischer elektrischer Gesamt-Energieverbrauch in Zementwerken [kWh/t_{cem}]

Abb. 3: Aufteilung des spezifischen elektrischen Energieverbrauchs in einem Zementwerk

Electrical Energy Consumption Cement Plant

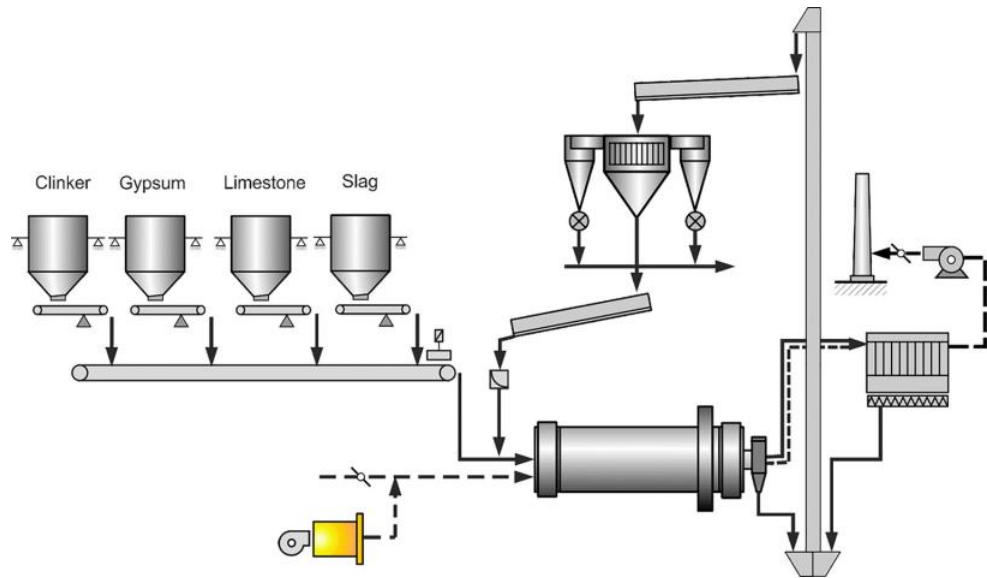


Electrical Grinding Energy Distribution



60 to 70% of the electrical energy consumption in a cement plant is utilised for Grinding! → Optimising grinding processes is key to reducing production costs!

Abb. 4: Kugelmühle im geschlossenen Mahlkreislauf



ter Generation ausgestattet. Alle Bauarten findet man heute noch im Betrieb und je nach Zementportfolio und Markt sind hier durchwegs Reduktionen im Energiebedarf von 10–20% durch Ersatz eines Siebers älterer Generation mit einem hocheffizienten Sieber der dritten Generation möglich.

Der Zweikammer-Kugelmühlen-Kreislauf mit Windsichter ist das älteste und nach wie vor das vorherrschende Mahlsystem in der Zementindustrie. Das System kann man wie folgt kurz charakterisieren:

- Bewährte Technik und Standard für Normen und Festigkeit
- Einfacher Betrieb und Wartung
- Hohe Produktionsfeinheiten nach dem Sieber möglich (6000 Blaine)
- Abwärmenutzung zur Trocknung
- Aufgabekorngröße des Klinkers mit einem k_{80} -Wert < 25 mm
- Aufgabe aller Zumahlstoffe in die Mühle
- Hohe spezifische Energiekosten
- Limitierte Trocknungskapazität (externe Beheizung limitiert durch kleinen Ein- und Auslauf)
- Hoher Produktionsverlust bei häufigem Sortenwechsel
- Nach wie vor hohes Optimierungspotential in vielen Werken (Kugelchargen, hocheffiziente Sieber, externe Trocknung feuchter Zumahlstoffe, Automatisierung, Kühlung, ...)

3.2 Kombimahlanlagen

Als Kombimahlanlagen oder kombinierte Mahlanlagen bezeichnet man Mahlsysteme, bei denen der Kugelmühlen-Kreislauf durch ein Vormahlaggregat erweitert wird. Dieses kann einerseits ausgeführt sein als:

- Hammermühle
- „Horizontale Schleudermühle“ (VSI; vertical shaft impactor)

- Gutbettwalzenmühle oder kurz Rollenpresse
- Walzenschüsselmühle ohne Sieber (vertical mill pre-grinder)

Als Gründe für diese Anlagenerweiterung können Kapazitätssteigerungen sowie eine Reduktion des spezifischen Energiebedarfs genannt werden. In Abb. 5 sind zwei mögliche Schaltungsvarianten dargestellt.

Das linke Fließbild zeigt eine sogenannte Semi-Finish-Mahlung mit Rollenpresse, statischem Vorsichter zur Schülpenrezirkulation und dynamischem Sieber zur Abscheidung von Feingut aus dem Mühlenkreislauf. Hierbei wird sowohl im Vormahlaggregat als auch in der Kugelmühle das Fertiggut erzeugt. Durch diese Kombination sind Leistungssteigerungen bis zu 100% und eine Reduktion der Feuchte um bis zu 15%-Punkte möglich.

Die Vorteile dieser Anordnung sind:

- Aufgabe von Klinker und groben Zumahlstoffen trocken und feucht
- Rezirkulation der Schülpen (100–400%) und dadurch hoher Energieeintrag in der effizienten Vormahlung
- Vortrocknung im statischen Vorsichter
- Abscheidung von Feingut aus dem Vormahlkreis im dynamischen Sieber vor Eintritt in die Kugelmühle
- Optimierung der Kammern und Kugelchargen
- Erweiterung der Produktion um bis zu 100%
- Für eine definierte Produktkühlung wird ein weiterer Sieber im Kugelmühlenkreislauf benötigt

Das rechte Fließbild zeigt eine sogenannte Vormahlung mit Schülpenrezirkulation. Hier dient die Vormahlung nur dazu, das Mahlgut für die anschließende Fertigmahlung in der Kugelmühle vorzubereiten. Durch diese Kombination kann die Produktionsleistung um bis zu 30% gesteigert und der spezifische Energiebedarf um bis zu 9% gesenkt werden. Ein solches Mahlsystem zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus:

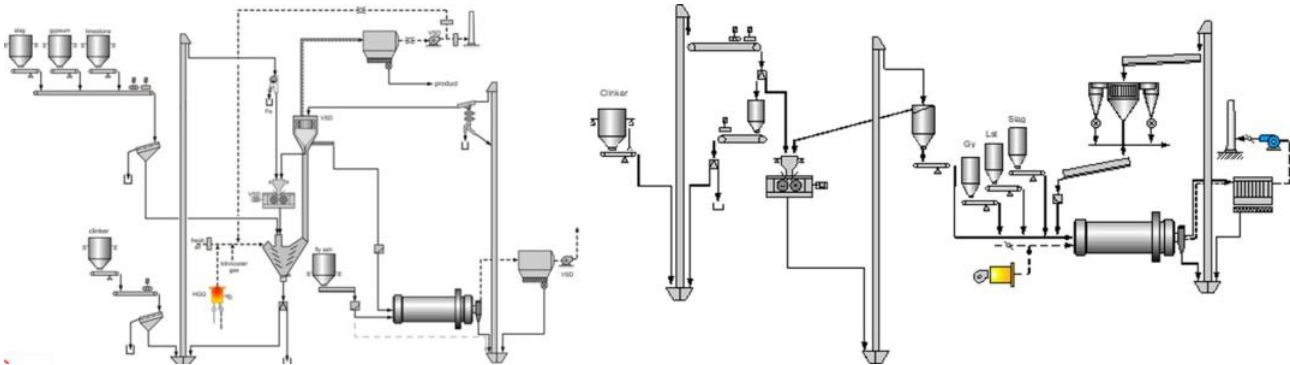


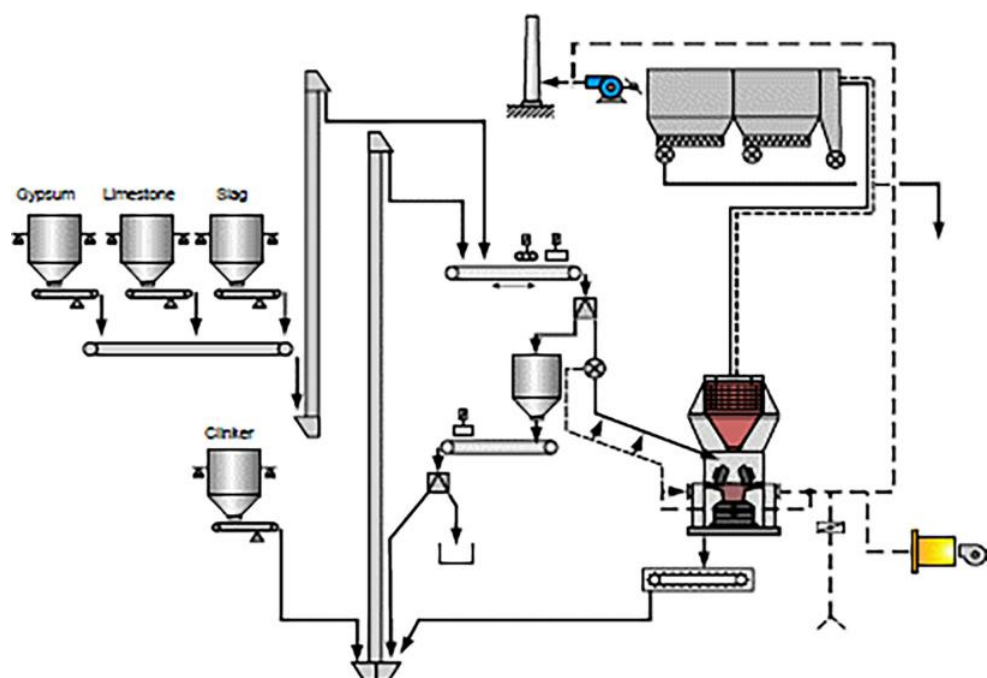
Abb. 5: Schematische Darstellung zweier Kombimahlanlagen

- Komplexes Aufgabesystem
- Limitierte Trocknungskapazität
- Etwa 9% geringerer Energieverbrauch im Vergleich zum „klassischen“ Kugelmühlen-Kreislauf
- Bis zu 30% höherer Durchsatz
- Geringe Flexibilität für verschiedene Produkte
- Komplexer Betrieb und Wartung durch die Rollenpresse (spezielles Wissen notwendig)
- Rollenpressenverfügbarkeit ist geringer als bei der Kugelmühle; Produktions- sowie Verschleißstrategieplanung komplexer
- Die Vormahlung kann an sich nicht im Bypass betrieben werden, da die Kugelcharge der Kammer 1 auf das Vorprodukt abgestimmt ist

3.3 Walzenschüsselmühlen

Die Walzenschüsselmühle (Abb. 6) ist heutzutage das Standardmahlaggregat für Rohmehl und Zement mit wenigen

Abb. 6: Schematische Darstellung eines Mahlkreislaufes mit Walzenschüsselmühle



Ausnahmen. Diese können länderspezifisch oder auch produktspezifisch sein. Versuche zur Erzeugung von Produktqualitäten CEM I 52,5N sowie CEM I 52,5R zeigen, dass bei der Walzenschüsselmühle ein in etwa 500 bis 1000 Blaine feineres Produkt hergestellt werden muss, um gleiche Festigkeitswerte im Vergleich zu einem Kugelmühlenprodukt zu erreichen (Tab. 1). In der Tabelle werden mit Walzenschüsselmühlen hergestellte Zemente – die ersten 4 Analysen – mit einem Kugelmühlzement verglichen (unterste Zeile). Der Klinker kam jeweils aus dem selben Werk, um hier eine bessere Vergleichbarkeit zu erzielen.

Die Walzenschüsselmühle ist charakterisiert durch:

- Keine Einschränkung für Zemente mit Klinkergehalten >95% (sogenannten OPCs) und Komposit-Zemente mit moderaten Blaine-Werten (<4500 Blaine)
- Keine relevanten Unterschiede für diese Zementtypen im Vergleich zu Kugelmühlzementen

TABELLE 1
Vergleich von mit einer Walzenschüsselmühle (Zeilen 1–4) und einer Kugelmühle (Zeile 5) hergestellte Zementproben

Sample information		XRF DSC, %			Fineness			Laser Granulometer			Mortar Strength, MPa	
Name	Sampling location	SO3	Dihydrate	Hemihydrate	Blaine	R45 Alpine	R32 Alpine	d50	RRSB n	RRSB d'	R1	R2
CEM I 52,5N	Ex mill	3,47	2,9	2,1	4960	0,2	1,0	8,3	0,96	11,6	17,3	30,6
CEM I 52,5N	Ex mill	3,39	3,2	1,6	4600	1,0	3,4	9,2	0,95	12,8	18,6	33,6
CEM I 52,5 pre-hyd.	Ex silo	3,19	0,1	0,9	4750	0,8	3,1	9,2	0,98	12,7	13,4	30,1
CEM I 52,5N	Ex mill	3,59	3,4	2,1	5030	0,2	1,6	8,1	0,98	11,2	16,7	35,7
CEM I 52,5N Ball Mill	Ex silo	3,69	0,5	1,5	4100	4,5	8,7	11,8	0,93	15,9	19,8	35,3

- Feinheiten >5000 Blaine sind heute technisch möglich, die Wirtschaftlichkeit (Investition und Betriebskosten) im Vergleich zur Kugelmühle ist aber nicht mehr gegeben.
- Höhere Blaine-Werte für frühfeste Zemente im Vergleich zu Kugelmühlzementen notwendig
- Mahltemperaturen >75 °C gut für Durchsatz und Mühlenstabilität – jedoch Risiko von Klumpenbildung im Silo
- Zementfeinheiten von 6000 Blaine wurden in einer MVR-Walzenschüsselmühle bereits stabil erreicht
- Durch die Möglichkeit der Beheizung sind hohe Aufgubeuchten (von Zumahlstoffen) möglich
- Hohe Differenz der spezifischen Mahlbarkeit von Zumahlstoffen zu Klinker möglich

Die Effizienzsteigerung der Hochdruckmahlung gegenüber der Kugelmühlen-Mahlung beträgt 100% und mehr. Das Mahlgut wird nur kurz beansprucht (1,5–3kWh/t pro Durch-

gang). Nach jedem Durchgang muss das Mahlgut gesichtet werden. Dafür ist eine im Vergleich zum Kugelmühlen-Kreislauf deutlich höhere Sichtluftmenge mit dem dafür notwendigen Energieaufwand erforderlich. Bauartbedingt unterscheiden sich die Druckverluste von Walzenschüsselmühlen verschiedener Hersteller.

Ein Mühlenventilator hat in etwa dieselbe installierte Leistung wie der Mühlenantrieb selbst. Die absorbierte Leistung hängt vom Produktportfolio ab, aber größenordnungsmäßig liegen der Stromverbrauch von Ventilator und Mühlenantrieb in einer ähnlichen Größenordnung.

Wie in Abb. 7 zu erkennen ist, gibt es Walzenschüsselmühlen, die selbst für feine Zementqualitäten einen Gesamtdruckverlust kleiner 35 mbar erreichen, während andere noch deutlich höher liegen. Diese Betrachtung ist ebenso relevant, da man die Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems und nicht nur den Vergleich der Mahlenergien von ei-

Abb. 7: Druckverluste von Walzenschüsselmühlen unterschiedlicher Hersteller

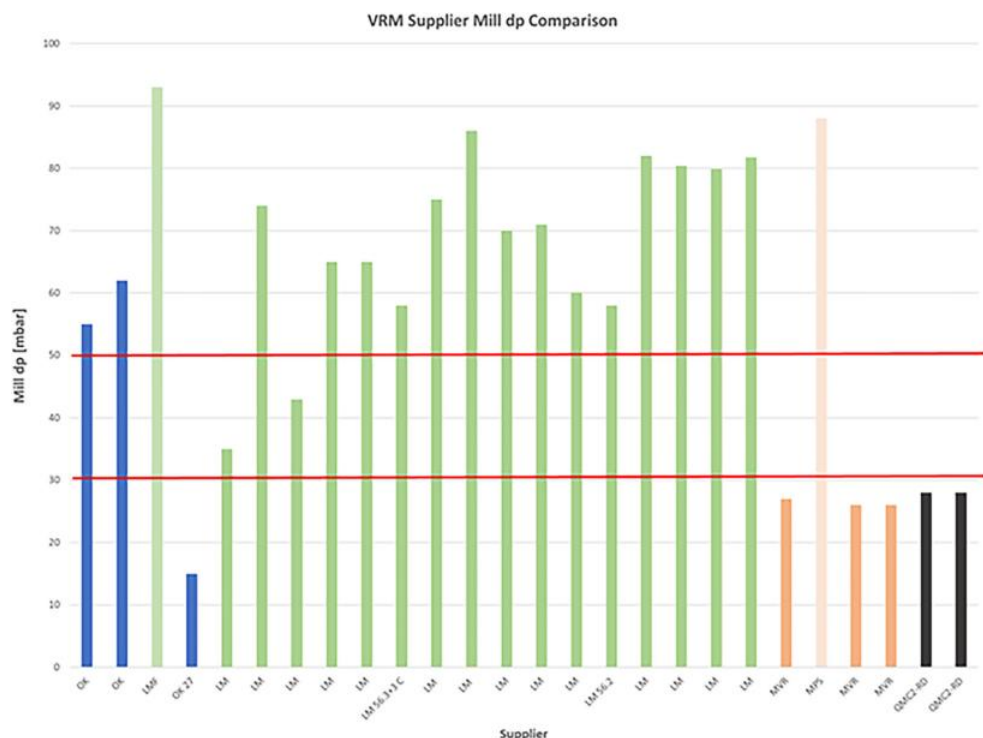


TABELLE 2
Vergleichende Darstellung verschiedener Kriterien bei Einsatz einer Kugelmühle (KM) und einer Walzenschüsselmühle (VRM)

Kriterium	KM	VRM
Gips Dehydrierung	Hoch	Niedrig
KGV	Breit	Normal
Blaine für 1 d Festigkeitsziel	Referenz	+ 500
Blaine für 28 d Festigkeitsziel	Referenz	+ 100
SEEC für 1 d Festigkeitsziel	100 %	80–85 %
SEEC für 28 d Festigkeitsziel	100 %	75–80 %
Max. Blaine	5500–5800	5200
SEEC specific electrical energy consumption		

ner Walzenschüsselmühle (VRM) zu einer Kugelmühle (KM) (P_{VRM} zu P_{KM} etwa 1:2) betrachten muss (Tab. 2).

3.4 Gutbettwalzenmühle oder Rollenpresse

Die Gutbettwalzenmühle (Abb. 8) ist bereits seit über drei Jahrzehnten bekannt und vielfach eingesetzt.

In den 1990er-Jahren, als die meisten Walzenpressen installiert wurden, litt diese Mahltechnik unter schweren mechanischen Problemen. Die damals verwendeten segmentierten Walzenoberflächen erwiesen sich als nicht zuverlässig. Nach dieser negativen Erfahrung stellten alle Lieferanten von Segmenten auf ganze Walzen um. In der Zwischenzeit hielt die Walzenschüsselmühle Einzug in die Zementmahlung und die Rollenpresse wurde nur noch selten gewählt.

Angetrieben durch die erfolgreiche Einführung der Walzenpressentechnologie in der Erzaufbereitung forcierten

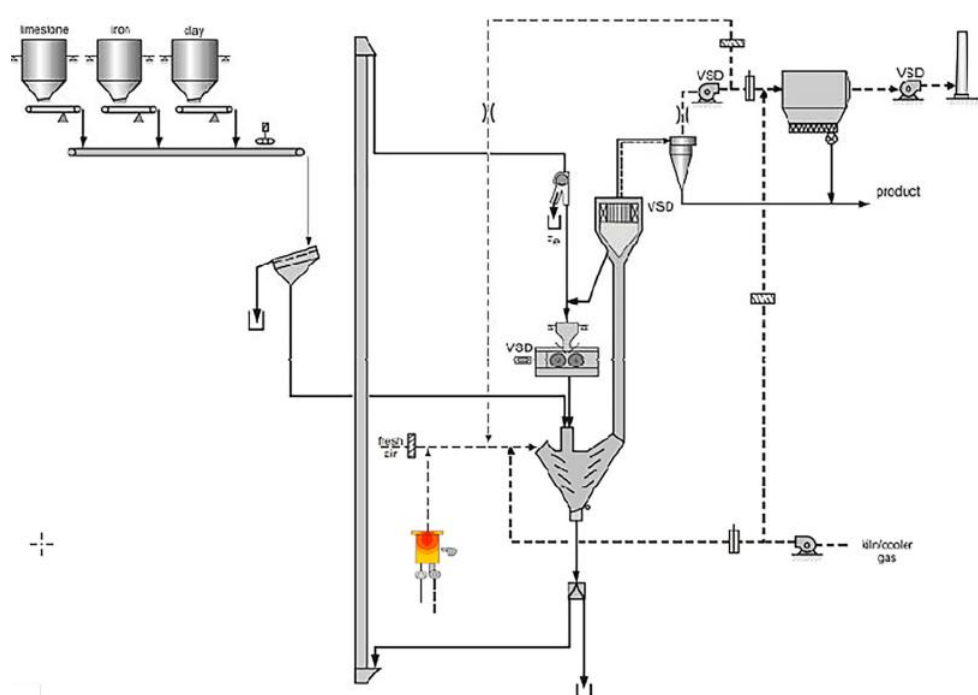
verschiedene Hersteller (wie z. B. KHD, Polysius, Köppern) die Verwendung der Walzenpresse zur Fertigmahlung von Zement. Dabei wurden spezielle Verschleißschutztechnologien für die Walzen entwickelt, wie zum Beispiel den Hexadur®-Verschleißschutz. Dadurch konnte die Verfügbarkeit der Rollenpresse deutlich verbessert werden. Heutzutage sind Walzen in der Zementmahlung bereits bis zu 50.000 h und mehr ohne Wartungsarbeiten in Betrieb.

Rollenpressen werden heute vorwiegend in der Mineralrohstoffindustrie und als Rohmühle in der Zementindustrie eingesetzt, wenn der Anteil toniger Aufgabematerialien <5% beträgt und die Aufgabefeuchte <10% ist. Durch das steilere Kornband des Mahlproduktes einer Rollenpresse erzielt man Vorteile im Ofenbetrieb und erreicht auch geringere Staubverluste, was für die Betreiber wirtschaftlich und energetisch interessant ist.

In der Zementindustrie sind bereits einige wenige Anlagen zur Fertigmahlung installiert. Das Haupteinsatzgebiet ist hier vorwiegend die Erweiterung einer bestehenden Kugelmühle, wie bereits diskutiert. Studien mit Zementen haben gezeigt, dass trotz Kornbandsteilheiten mit RRSB-Koeffizienten von 1,06 und höher sehr ähnliche Wasseransprüche wie bei Kugelmühlzementen erzielt werden. Beton- und Mörteltests zeigten lediglich einen Nachteil in der Eintagesfestigkeit. Nach 7 und 28 Tagen waren die Festigkeiten im Vergleich bereits jeweils höher.

Die Begrenzung für den Einsatz in der Zementmahlung ist die maximal mögliche Durchsatzrate. Hierbei ist der limitierende Faktor der Walzendurchmesser und somit die zu installierende Motorleistung. Die derzeit größte Rollenpresse mit einem Walzendurchmesser von 2,2 m steht in Thailand mit einer installierten Motorleistung von 3900 kW.

Abb. 8: Fließbild einer Gutbettwalzenmühle als Fertigungsmahlsystem



4. Trends und Neuerungen in der Zementmahlung

Die Zementindustrie ist mit ihrem Massenprodukt in den letzten Jahren mehr und mehr mit steigenden Produktionskosten konfrontiert. Einerseits sind CO₂-Emissionsabgaben in einigen Ländern zu bezahlen, was in Europa bereits zu erheblichen Kosten um ca. 100€ pro t CO₂ geführt hat, zudem sind die steigenden Preise für Energie und fossile Brennstoffe ein weiterer Kostentreiber. Die Zulieferer haben noch nicht darauf reagiert, um den spezifischen Energieverbrauch im Bereich der Mahltechnik zu reduzieren, darum gibt es hier nur wenig Neues zu berichten. Von den Trends am Markt werden drei Beispiele angeführt:

1. Einsatz keramischer Kugeln
2. Einsatz einer horizontalen Rührwerkskugelmühle, genannt Booster Mill® von Polysius (Abb. 9 und 10)
3. Separatmahlung

Ad 1) Keramische Kugeln werden von chinesischen Anbietern vorwiegend propagiert und sollen bei der Mahlung folgende Vorteile bieten:

- Energieeinsparungen von bis zu 20%
- Eine bessere Kornverteilung im Bereich 3–32 µm und dadurch bessere Festigkeitsentwicklungen



Abb. 9: Polysius Booster Mill®

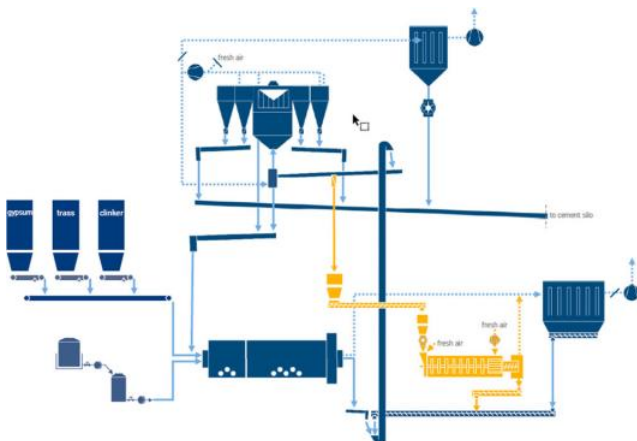


Abb. 10: Beispiele zweier Mahlkreisläufe mit einer Booster Mill®

- Eine um bis zu 20°C geringere Temperaturentwicklung
- 40% geringerer Verschleiß im Vergleich zu Stahlkugeln

Soweit bekannt können in klassischen herkömmlichen Kugelmühlenmahlsystemen die Energieeinsparungen mit dem Ersatz von keramischen Kugeln anstelle von herkömmlichen Stahlkugeln aufgrund der viel geringeren Dichte von Korund nicht realisiert werden. Hier liegt das Schüttgewicht im Bereich von 2,1 bis 2,3 kg/dm³ im Vergleich zu 4,8 kg/dm³ bei (kleinen) Stahlkugeln.

Der Einsatz von keramischen Kugeln ist daher nur bei wenigen kombinierten Mahlsystemen gerechtfertigt. Beim Großteil der Installationen hat diese Umstellung zu einem erheblichen Produktionsverlust geführt. Geringe Reduktionen im spezifischen Energieverbrauch sind erzielt worden, diese sind jedoch auch mit einem Produktionsrückgang und Modifikationen an den Kammerlängen verbunden. Der finanzielle Aufwand für Umbauten, ein Produktionsrückgang sowie erhöhte Kosten für die Kugeln sind über Einsparungen im spezifischen Energieverbrauch nicht wirtschaftlich zu rechtfertigen.

Ad 2) Polysius – Booster Mill® Die horizontale Rührwerkskugelmühle mit einer Gattierung von 6 mm und kleineren Kugeln ist eine schnell und einfach umsetzbare Zusatzinstallation für Kugelmühlenkreisläufe sowie für Walzenschüsselmühlen, um einen Teilstrom des Sichterrückgutes fein aufzumahlen und somit den Anlagendurchsatz sowie die Produktqualität für Mischzemente mit großen Mahlbarkeitsunterschieden der einzelnen Komponenten zu verbessern.

Durch die Installation, welche in einem Zeitraum von nur drei bis vier Monaten erfolgen kann, können folgende Verbesserungen erzielt werden:

- Produktion von sogenannten Hochperformance-Zementen
- Eine Reduktion des Klinkerfaktors
- Erhöhung der Klinkerreaktivität
- Produktionssteigerung bei geringer Investition
- Schnelle Installation bei kurzer Stillstandszeit

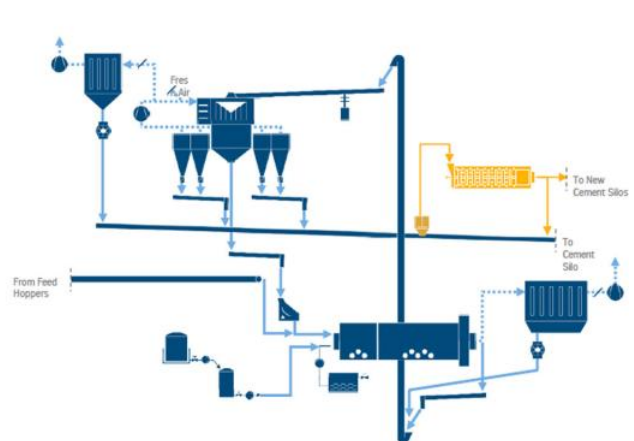


Abb. 11: Schaubild der idealen Korngrößenverteilungen für den Klinker (rot) und die Zuschlagstoffe (grau). MIC Mineral Component

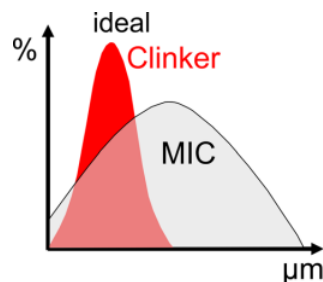
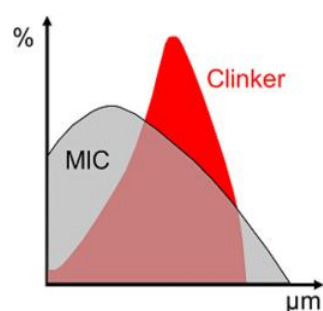


Abb. 12: Reale Korngrößenverteilungen bei gemeinsamer Vermahlung zweier Komponenten mit sehr unterschiedlicher Mahlbarkeit. MIC Mineral Component



Testresultate aus einer Installation in der Türkei zeigen, dass der Energiebedarf eines CEM I 42,5N Zementes von 34 kWh/t auf 29 kWh/t reduziert und die Produktionsrate von 45 t/h auf 55 t/h erhöht werden konnten.

Weiterhin konnte ein CEM I 52,5R mit derselben Produktionsmenge eines CEM I 42,5R und einem spezifischen Energieverbrauch von 50 kWh/t produziert werden. Die Anlage war zu dem Zeitpunkt noch nicht vollständig optimiert und hatte noch Verbesserungspotential, die Resultate jedoch waren bereits vielversprechend.

Ad 3) Separatmahlung Die Separatmahlung – also die getrennte Vermahlung der einzelnen Mahlkomponenten, Klinker und Zuschlagstoffe – hat den Vorteil, dass man entsprechend den Anforderungen für eine optimale Zementperformance jede Komponente in einer bestmöglichen Korngrößenverteilung produzieren kann (Abb. 11). Dies ist bei der gemeinsamen Vermahlung nicht möglich, da z. B. Klinker und Kalkstein sehr unterschiedliche spezifische Mahlbarkeiten besitzen. In diesem Fall wird der Kalkstein als Mahlkomponente mit dem geringeren spezifischen Energiever-

TABELLE 3

Reduktion des Klinkerfaktors durch Separatmahlung

Plant	Cement Type	CF Reduction (%)
Plant 1	Slag cement	16
Plant 2	Slag cement	13
Plant 3	Pozzolanic cement	10
Plant 4	Limestone cement	7

brauch übermahlen, die Zementperformance und Festigkeitswerte leiden unter diesem Umstand (Abb. 12).

Die getrennte Vermahlung der einzelnen Komponenten wurde in verschiedenen Regionen an verschiedenen Zementqualitäten getestet. Dabei wurde eine deutliche Reduktion des Klinkerfaktors (CF Reduction) festgestellt (siehe Tab. 3).

In Werken mit einer hohen Flexibilität an installierten Mahlsystemen und Mahlkapazitäten konnte die Separatmahlung einfacher umgesetzt werden.

Durch die stetig steigenden Kosten für die elektrische Energie, für die CO₂-Zertifikate und einen steigenden Marktbedarf an Mischzementen wird die Separatmahlung an Bedeutung gewinnen.

Funding. Open access funding provided by Montanuniversität Leoben.

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Hinweis des Verlags. Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.