

Dok-Nr. 106751

SUMMARY

The past 15 years have seen a continual increase in the fineness of cements in Germany [1]. Accordingly these now contain larger proportions of fine particles, which significantly determine the cement properties. In absolute terms, the fine range only accounts for a small part of the cement, but it is of crucial importance with regard to quality, for example the early strength of the cement. With the conventional process, the entire product is ground and classified, so that it is scarcely possible to specifically influence the proportion of fine fractions in the particle size distribution. The ball mills predominantly used in Germany generally produce the desired particle size ranges, but are not particularly energy-efficient. Vertical roller mills and high-pressure grinding rolls operate far more efficiently. Broad particle size ranges can however not be produced in all cases, and usually also not with optimum efficiency. A study was therefore conducted to establish how the missing ultra-fine fractions of the products from high-pressure comminution can be produced in a separate ultra-fine grinding unit (stirred media mill) by means of separate multi-stage grinding and subsequent mixing, and the effect this has on cement quality. The cement properties of the mortar samples produced by separate ultra-fine grinding do not essentially differ from those of a reference material, provided that there is no significant difference in the particle size distributions. It is possible to specifically influence the cement properties by adjusting the particle size distribution, in particular by altering the proportion of the ultra-fine fraction. Separate ultra-fine grinding can thus provide a further means of regulating cement properties to suit requirements. Furthermore, it can also reduce the specific energy demand for cement grinding as compared to a ball mill. ◀

ZUSAMMENFASSUNG

Die Feinheit von Zementen ist in Deutschland über die vergangenen 15 Jahre stetig gestiegen [1]. Entsprechend enthalten die Zemente mittlerweile größere Anteile feiner Partikel, die wesentlich die Zementeigenschaften bestimmen. Der Feinbereich macht – absolut betrachtet – nur einen kleinen Teil des Zements aus, ist aber von entscheidender Bedeutung für dessen Qualität, z.B. für die Frühfestigkeit. Bei der konventionellen Zementmahlung wird das gesamte Produkt beansprucht und klassiert, sodass eine gezielte Beeinflussung des Feinanteils der Korngrößenverteilung nur sehr bedingt möglich ist. Die in Deutschland überwiegend eingesetzten Kugelmühlen produzieren zwar in der Regel die gewünschten Korngrößenverteilungen, zeichnen sich aber durch eine geringe Energieeffizienz aus. Vertikal-Wälzmühlen und Gutbett-Walzenmühlen arbeiten deutlich effizienter. Breite Korngrößenverteilungen können jedoch nicht in allen Fällen und in der Regel auch nicht mit optimaler Effizienz hergestellt werden. Daher wurde untersucht, wie die fehlenden Feinstanteile der Produkte aus der Hochdruckzerkleinerung in einem separaten Feinstmahlaggregat (Rührwerkskugelmühle) durch getrennte mehrstufige Mahlung und anschließende Mischung hergestellt werden können und wie sich dies auf die Zementqualität auswirkt. Die Zementeigenschaften der durch die separate Feinstmahlung hergestellten Mörtelproben weichen nicht wesentlich von denen eines Referenzmaterials ab, sofern die Korngrößenverteilungen nicht signifikant anders sind. Durch Anpassung der Korngrößenverteilung, besonders durch Veränderung des Feinanteils, können die Zementeigenschaften gezielt beeinflusst werden. Die separate Feinstmahlung kann damit ein weiterer Hebel zur bedarfsgerechten Steuerung der Zementeigenschaften sein. Zudem könnte bei dieser Vorgehensweise der spezifische Energiebedarf bei der Zementmahlung im Vergleich zur Kugelmühle reduziert werden. ◀

Increase in energy efficiency and enhancement of cement properties by means of separate ultra-fine grinding

Steigerung der Energieeffizienz und Verbesserung der Zementeigenschaften durch separate Feinstmahlung

1 Introduction/initial situation

As the final step in the cement production value chain, cement grinding has a definitive influence on cement quality. In particular the increasing fineness of cements over the past 15 years and the diversification of the product portfolio have raised both the energy demand and the technical requirements for grinding [1]. Alongside these challenges, operational reliability and delivery obligations towards customers are top priorities.

A survey conducted by the VDZ [2] among its member companies shows that use was again primarily made of ball mills for cement grinding in Germany in 2018. These are almost always operated in a closed circuit with an air separator to be able to achieve high degrees of product fineness. Particularly efficient grinding processes based on the principle of comminution in the bed of material are often limited in terms of the maximum attainable product fineness. In addition such installations generally produce steeper particle size ranges than ball mills, which can have an influence on the cement properties. The early strength and water demand can also be affected by the comparatively smaller proportions of fine particles produced. This, together with sulphate agent dehydration aspects, explains why particularly efficient grinding processes are rarely used for cement finish grinding in Germany. Ball mills are generally less efficient but can produce products with broad particle size distributions and high degrees of fineness, as well as achieving the desired product properties.

Separate ultra-fine grinding creates an additional degree of freedom to precisely fill this gap. Intermediate products with narrow particle size distributions from high-pressure comminution can provide most of the material for a desired particle size distribution (e.g. with a broad distribution). On account of the lack of ultra-fine particles, intermediate products from high-pressure comminution primarily cover the coarse part of the desired particle size distribution. A proportion of these intermediate products can be separately subjected to secondary grinding in a suitable ultra-fine mill. A new broad particle size distribution is then obtained by subsequently mixing the coarse and ultra-fine ground intermediate products. If only a very small proportion of mill feed is processed in a downstream ultra-fine mill, a much smaller installation can be used in comparison to plants which grind the full quantity of material (such as combined grinding systems for example). In addition, it can be assumed that the influence of ultra-fine grinding on the specific energy demand will also be minimal if there is only a small proportion of ultra-fine material in the overall product. The energy-related advantages of efficient high-pressure comminution are thus basically retained.

1 Einführung/Ausgangssituation

Die Zementmahlung als letzter Schritt in der Wertschöpfungskette der Zementherstellung bestimmt maßgeblich die Zementqualität. Besonders die über die vergangenen 15 Jahre gestiegenen Feinheiten der Zemente sowie die Diversifizierung des Produktportfolios erhöhen den Energiebedarf ebenso wie die technischen Anforderungen an die Mahlung [1]. Neben diesen Herausforderungen sind auch die Zuverlässigkeit des Betriebs und Lieferverpflichtungen gegenüber den Kunden von hoher Wichtigkeit.

Eine durch den Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ) durchgeführte Umfrage [2] unter den Mitgliedsunternehmen zeigt, dass auch im Jahr 2018 in Deutschland hauptsächlich Kugelmøhlen in der Zementmahlung eingesetzt wurden. Diese werden fast ausschließlich im Kreislauf mit einem Sieb betrieben, um die hohen Produktfeinheiten herstellen zu können. Besonders effiziente Mahlverfahren, die nach dem Prinzip der Gutbettzerkleinerung arbeiten, sind oft in ihrer maximal erreichbaren Produktfeinheit limitiert. Zudem produzieren diese Anlagen im Vergleich zu Kugelmøhlen in der Regel steilere Korngrößenverteilungen, was sich auf die Zementeigenschaften auswirken kann. Im Vergleich werden geringere Anteile feiner Partikel produziert, wodurch die Frühfestigkeit und der Wasseranspruch beeinflusst werden können. Das führt neben dem Aspekt der Sulfatträgerentwässerung dazu, dass besonders effiziente Mahlverfahren in Deutschland nur vereinzelt in der Zementfertigmahlung genutzt werden. Kugelmøhlen sind generell weniger effizient, können aber Produkte mit breiten Korngrößenverteilungen sowie hohen Feinheiten und den daraus resultierenden gewünschten Produkteigenschaften erzeugen.

Durch die separate Feinstmahlung wird ein zusätzlicher Freiheitsgrad geschaffen, der diese Lücke schließt. Zwischenprodukte mit engen Korngrößenverteilungen, beispielsweise aus der Hochdruckzerkleinerung, können einen Großteil des Materials einer gewünschten Korngrößenverteilung (z.B. mit einer breiten Verteilung) darstellen. Die Zwischenprodukte aus der Hochdruckzerkleinerung entsprechen aufgrund der fehlenden Feinstpartikel überwiegend dem Grobbereich der gewünschten Korngrößenverteilung. Ein Anteil dieser Zwischenprodukte kann in einer geeigneten Feinstmøhle separat nachgemahlen werden. Durch anschließende Mischung der groben und feinstgemahlenen Zwischenprodukte entsteht so eine neue, breite Korngrößenverteilung. Wird nur ein sehr geringer Anteil Mahlgut in einer nachgeschalteten Feinstmøhle beansprucht, sinkt die erforderliche Anlagengröße der Feinstmøhle im Vergleich zu Anlagen, die die gesamte Materialmenge mahlen wie z.B. Kombi-Mahlanlagen. Darüber hinaus kann davon ausgegangen werden, dass bei geringem Anteil des Feinstmaterials am Gesamtprodukt auch der Einfluss der Feinstmahlung auf den spezifischen Energiebedarf gering ist. Dementsprechend bleiben die energetischen Vorteile einer effizienten Vorzerkleinerung im Wesentlichen erhalten.

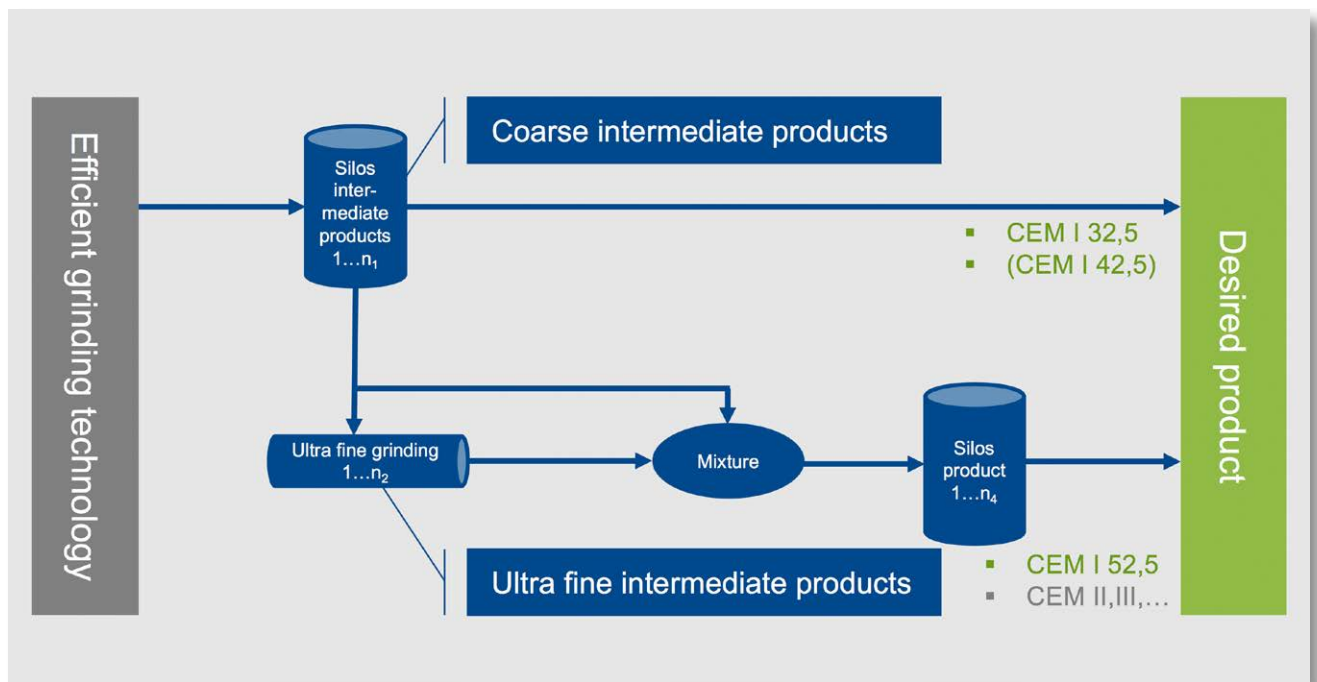


Figure 1: Concept of separate ultra-fine grinding

Bild 1: Konzept der separaten Feinstmahlung

2 Concept of separate ultra-fine grinding

A further increase in the energy efficiency of cement grinding can only be achieved with greater integration of modern and efficient grinding processes. However, for the reasons mentioned above, preference is given to ball mills for new installations in Germany in particular.

With separate ultra-fine grinding, the largest possible proportion of the cement is first produced in high-pressure comminution units as part of a multi-stage process (► Fig. 1). The narrow particle size distributions from high-pressure comminution mean that the ultra-fine range is under-represented. A separate mill enables the material required for this to be produced from the coarse intermediate products by way of secondary grinding. The desired particle size distribution is reproduced by mixing the coarse and ultra-fine ground intermediate products.

The calculation of a suitable mixture for reproducing a specified particle size distribution is a complex task. Not least the growing number of technically feasible intermediate products and the broad fineness ranges in which grinding plants are able to produce material make it necessary to employ a simplified means of representation. A model was accordingly developed to calculate the proportions of intermediate products and the specific energy demand. The model can be influenced by various boundary conditions and is so able to calculate a mixture composition which can be produced in industrial manufacturing. The proportion of material from high-pressure comminution is then maximised with the aid of the model.

3 Effects on cement properties

3.1 Production of starting materials and mixtures

Use was made of a small-scale vertical roller mill and an intermittently operating stirred media mill to assess the effects of separate ultra-fine grinding on the cement properties. To start with, the entire mill feed was ground in the vertical

2 Konzept der separaten Feinstmahlung

Zur weiteren Steigerung der Energieeffizienz der Zementmahlung ist die zunehmende Integration moderner und effizienter Mahlverfahren notwendig. Besonders in Deutschland wird jedoch aus den bereits genannten Gründen bei Neuinstallationen die Kugelmühle bevorzugt.

Bei der separaten Feinstmahlung wird in einem mehrstufigen Verfahren (► Bild 1) zunächst ein möglichst großer Anteil des Zements durch eine effiziente Vorzerkleinerung unter Anwendung des Druckprinzips hergestellt. Durch die engen Korngrößenverteilungen aus einer Druckzerkleinerung ist der Feinstbereich unterrepräsentiert. Mithilfe einer separaten Mühle wird das hierfür notwendige Material aus den groben Zwischenprodukten durch Nachmahlung erzeugt. Durch Mischung der groben und feinstgemahlenen Zwischenprodukte wird dann die gewünschte Korngrößenverteilung nachgebildet.

Die Berechnung einer geeigneten Mischung, um eine vorgegebene Korngrößenverteilung nachzubilden, ist eine komplexe Aufgabenstellung. Gerade mit steigender Anzahl technisch möglicher Zwischenprodukte und großer Feinheitbereiche, in denen die Mahlanlagen Material produzieren können, ist es notwendig, sich eines Hilfsmittels zu bedienen. Hierzu wurde ein Modell entwickelt, das die Anteile der Zwischenprodukte und den spezifischen Energiebedarf berechnet. Durch verschiedene Randbedingungen kann das Modell beeinflusst werden und so eine in der industriellen Produktion herstellbare Mischungszusammensetzung berechnen. Mithilfe des Modells wird dabei der Anteil des Materials aus der Vorzerkleinerung maximiert.

3 Auswirkungen auf die Zementeigenschaften

3.1 Herstellung der Ausgangsmaterialien und der Mischungen

Um die Auswirkungen der separaten Feinstmahlung auf die Zementeigenschaften bewerten zu können, wurden eine kleintechnische Vertikal-Wälzmühle und eine diskontinuier-

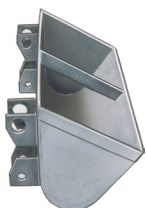


Deutscher Roter Helfer

WIR BRAUCHEN DICH, UM ÜBERALL
HELFEN ZU KÖNNEN.

SETZE EIN ZEICHEN UND WERDE SPENDER.

DRK.DE



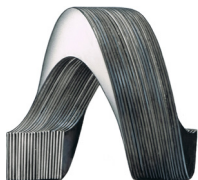
WE KEEP YOUR BULK
IN MOTION

WELDED AND DEEP DRAWN ELEVATOR-BUCKETS

Available in every design according to DIN, sample or drawing, enamelled, plastic-coated or galvanized

SCREW-FLIGHTS

Available in all materials, from 40 - 3.000 mm outer diameter, from 1-25 mm sheet-thickness



PAUL HEDFELD GMBH

D-58285 Gevelsberg · Hundecker Str. 20
www.hedfeld.com · hedfeld@hedfeld.com
Telefon (0 23 32) 63 71 · Fax (0 23 32) 6 11 67



bauingenieur 24.de
content for constructors

Berufsportal mit Stellenmarkt
für Bauingenieure [seit 2001]

„Interessante Jobangebote
finde ich im Stellenmarkt
von bauingenieur24“

Thomas Buchmann
Bauingenieur



BRAUER
Maschinentechnik AG
40 Jahre · Getriebeservice · seit 1979

Getriebeservice

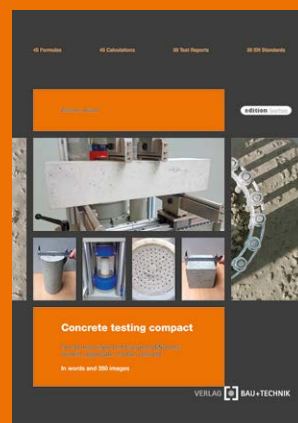
- » Instandsetzung aller Typen und Fabrikate
- » Vor-Ort-Inspektionen und Diagnose
- » Sonderkonstruktionen

D-46395 Bocholt · Tel.: +49 (0) 2871 / 70 33 · www.brauer-getriebe.de

CONCRETE TESTING COMPACT

Verlag Bau+Technik GmbH
Steinhof 39
40699 Erkrath, Germany

Order:
vertrieb@verlagbt.de
www.verlagbt.de / bookshop



The 30 most important European
(EN) tests:
cement, aggregate, mortar, concrete

The book contains instructions on how to carry out the 30 most important standardized and non-standardized building material tests. They are subdivided into **cement tests, aggregates tests, fresh concrete tests, hardened concrete tests and on-site evaluations**. The book is aimed at students, vocational school students, apprentices in industry and trade as well as building material testers who need reliable information on frequently used but also less frequently used test methods. The test procedures are presented and explained in the form of a **proven checklist** - subdivided into the goals of the test, the required equipment and aids, the material to be provided, the work steps, the frequent sources of error, the accident hazards and the minimum information in the test report. **Everything is explained with numerous colour illustrations**. The execution of all prescribed work steps ensures that the chronological test sequences are adhered to and that the results are reproducible. Some tests are presented in simplified form in order to make the sometimes very complex procedures comprehensible and transparent. Observing the information on potential sources of error makes it possible to exclude errors from the outset. **For each test procedure, a completed form of a test report** with all the necessary information is reproduced in the book, which is intended as an example for the reader and can be adapted by him to his requirements if necessary.

In words and 350 images
193 S., 21 x 29,7 cm, € 59,80
ISBN 978-3-7640-0625-9

VERLAG  BAU+TECHNIK

roller mill to four different product finenesses with relatively narrow particle size distributions. These four intermediate products were used as feed material for the stirred media mill and in turn ground to different finenesses. The operating parameters of the stirred media mill were optimised beforehand [3] to both lower the specific energy demand and to obtain as realistically as possible particle size distributions for the intermediate products. The optimum composition of the intermediate products was worked out on the basis of model calculations in order to reproduce the particle size distributions of various reference products. For this purpose, two reference products were produced beforehand in a small-scale closed-circuit grinding plant with ball mill. In keeping with the different chemical/mineralogical composition of the two clinkers, clinker 1 was ground to a fineness of 4950 cm^2/g and clinker 2 to a somewhat greater fineness of 5270 cm^2/g according to Blaine. The small-scale plant was appropriately operated to produce particle size distributions comparable to those from industrial plants.

3.2 Strength development

To investigate the suitability of separate ultra-fine grinding, the 2-, 7- and 28-day compressive strengths in accordance with DIN EN 196-1, as well as the water demand and setting behaviour in accordance with DIN EN 196-3, were determined for 13 mixtures for each clinker, produced by separate ultra-fine grinding.

Generally speaking, the cement compressive strength increases with increasing specific surface. This relationship basically also applies to cements produced by separate ultra-fine grinding. Several mixtures are shown by way of example to illustrate the relationship (Fig. 2). To vary the products, different boundary conditions were set in the model to alter the specific surface and the particle size distribution of the mixtures. A reduction in specific surface greatly affects the 2-day strength. By contrast, this has no significant influence on the 7- and 28-day strengths.

Comparison with the four particle size distributions for the reference grinding from the ball mill (Fig. 3) shows that there are no significant differences between the particle size distributions in the range less than 2 μm . It can therefore be assumed that the ultra-fine particle range is not solely responsible for the early strength, but rather that consideration has to be given to other particle size distribution ranges. No significant deviation between Mix 3, Mix 4 and the reference particle size distribution can again be seen in the range less than 7 μm . Comparison with the 2-day compressive strengths also reveals no essential difference. This is however the subject of ongoing studies.

The general suitability of separate ultra-fine grinding for the production of cements with the same cement compressive strength was thus confirmed. The relationship between the quality of the mixture and the desired particle size distribution is currently being investigated.

3.3 Further cement properties

Alongside strength development, the water demand of the cement is also of particular interest. A large water proportion is required to fill the voids in the

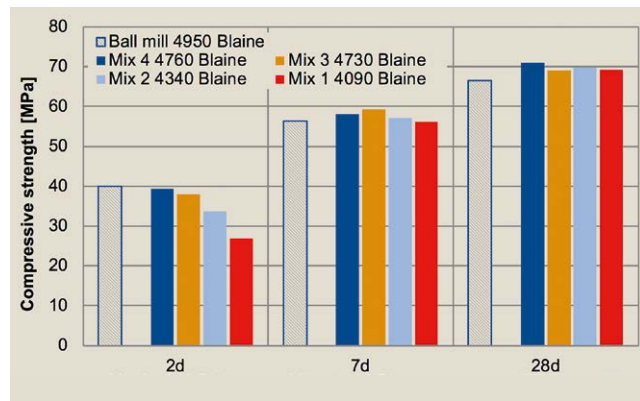


Figure 2: Strength development of selected products from separate ultra-fine grinding

Bild 2: Festigkeitsentwicklung ausgewählter separat feinstgemahlener Produkte

lich betriebene Rührwerkskugelmühle genutzt. Zunächst wurde das gesamte Mahlgut in der Vertikal-Wälzmühle auf vier unterschiedliche Produktfeinheiten mit relativ steilen Korngrößenverteilungen gemahlen. Diese vier Zwischenprodukte wurden als Aufgabegut für die Rührwerkskugelmühle genutzt und wiederum unterschiedlich fein gemahlen. Die Betriebsparameter der Rührwerkskugelmühle wurden zuvor optimiert [3], um zum einen den spezifischen Energiebedarf zu senken und zum anderen möglichst realistische Korngrößenverteilungen der Zwischenprodukte zu erzielen. Mithilfe von Modellrechnungen wurde die optimale Zusammensetzung der Zwischenprodukte berechnet, um die Korngrößenverteilungen von verschiedenen Referenzprodukten nachzubilden. Hierzu wurden im Vorfeld zwei Referenzprodukte in einer kleintechnischen Umlaufmahlanlage mit Kugelmühle herstellt. Entsprechend der unterschiedlichen chemisch-mineralogischen Zusammensetzung der beiden Klinker wurde Klinker 1 auf eine Feinheit von 4950 cm^2/g nach Blaine und Klinker 2 auf eine etwas höhere Feinheit von 5270 cm^2/g nach Blaine gemahlen. Die kleintechnische Anlage wurde dabei so betrieben, dass vergleichbare Korngrößenverteilungen mit industriellen Anlagen hergestellt werden können.

3.2 Festigkeitsentwicklung

Zur Untersuchung der Eignung der separaten Feinstmahlung wurden die Druckfestigkeiten bei 2, 7 und 28 Tagen nach DIN EN 196-1 sowie der Wasseranspruch und das Erstarrungsverhalten nach DIN EN 196-3 von 13 Mischungen

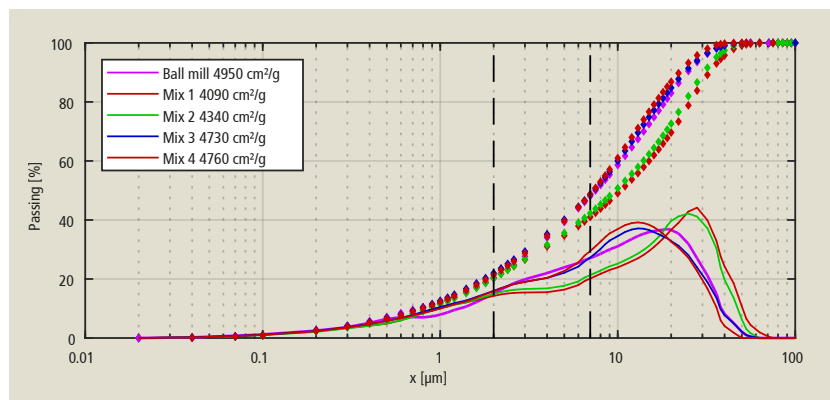


Figure 3: Particle size distributions of selected products from separate ultra-fine grinding

Bild 3: Korngrößenverteilungen ausgewählter separat feinstgemahlener Produkte

cement to permit the relative movement of the individual particles. This physically-based water demand is generally of an order of magnitude of 25 to 30 mass % [4]. A major factor influencing the water demand of the cement paste is the particle size distribution of the cement. On account of the greater specific surface [5], the water demand increases with increasing fineness. For a similar specific surface, good correlation is achieved between the slope of the RRSB distribution and the water demand. The known relationship which states that the water demand increases with narrower particle size distributions is also valid for products from separate ultra-fine grinding. It was observed that the mixing of different intermediate products generally produced particle size distributions which were broader than those specified by the reference particle size distribution. This accordingly has a positive influence on the water demand.

4 Improvement to specific energy demand

4.1 Trial grinding operations

To supplement the results obtained for separate ultra-fine grinding in small-scale grinding plants, the influence of the process on the specific energy demand was studied on the basis of pilot plants. Use was made of an Argo mill operating in a closed circuit with a high-efficiency separator for primary comminution (► Fig. 4 left). A stirred media mill operating in open-circuit mode was employed for separate ultra-fine grinding (Fig. 4 right).

The Argo mill was operated at 2.9 t/h, 2.1 t/h and 1.3 t/h in the experimental program. The products had a specific surface according to Blaine of between 1 700 and 2 400 cm²/g. As the mill is used to grind glass in everyday operation, the maximum attainable product fineness was limited. Processes involving comminution in the bed of material are however currently capable of producing greater product finenesses than was possible with the system used here.

The results of the experiments are presented in ► Fig. 5. The system used here produced very narrow particle size distributions. Given the same position parameter according

je Klinker, hergestellt durch die separate Feinstmahlung, bestimmt.

Mit steigender spezifischer Oberfläche steigt im Allgemeinen die Druckfestigkeit an. Generell gilt dieser Zusammenhang auch für die Zemente, die durch die separate Feinstmahlung hergestellt wurden. Um den Zusammenhang zu verdeutlichen, wurden einige Mischungen exemplarisch dargestellt (► Bild 2). Zur Variation der Produkte wurden im Modell unterschiedliche Randbedingungen gesetzt und so die spezifische Oberfläche und die Korngrößenverteilung der Mischungen beeinflusst. Die Reduzierung der spezifischen Oberfläche wirkt sich dabei stark auf die Festigkeit nach 2 Tagen aus. Ein signifikanter Einfluss auf die Festigkeit nach 7 und 28 Tagen ist dagegen nicht zu erkennen.

Werden die vier Korngrößenverteilungen der Referenzmahlung aus der Kugelmühle gegenübergestellt (► Bild 3), so ist zu erkennen, dass im Bereich kleiner 2 µm keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Korngrößenverteilungen bestehen. Es ist daher davon auszugehen, dass der Bereich feinsten Partikel somit nicht allein für die Frühfestigkeit verantwortlich ist, sondern vielmehr weitere Bereiche der Korngrößenverteilung betrachtet werden müssen. Im Bereich kleiner 7 µm ist ebenfalls keine signifikante Abweichung zwischen Mix 3, Mix 4 und der Referenz-Korngrößenverteilung zu erkennen. Vergleicht man dagegen die Ergebnisse mit den Druckfestigkeiten bei 2 Tagen, dann zeigt sich auch hier kein wesentlicher Unterschied.

Die generelle Eignung der separaten Feinstmahlung zur Herstellung von Zementen mit gleicher Zementdruckfestigkeit wurde damit bestätigt. Aktuell wird der Zusammenhang zwischen der Güte der Mischung im Vergleich zur gewünschten Korngrößenverteilung untersucht.

3.3 Weitere Zementeigenschaften

Neben der Festigkeitsentwicklung ist der Wasseranspruch des Zements von großem Interesse. Ein großer Wasseranteil wird zur Füllung der Hohlräume der Zementschüttung benötigt, um die einzelnen Partikel gegeneinander beweglich zu machen. Dieser physikalisch bedingte Wasserbedarf liegt im

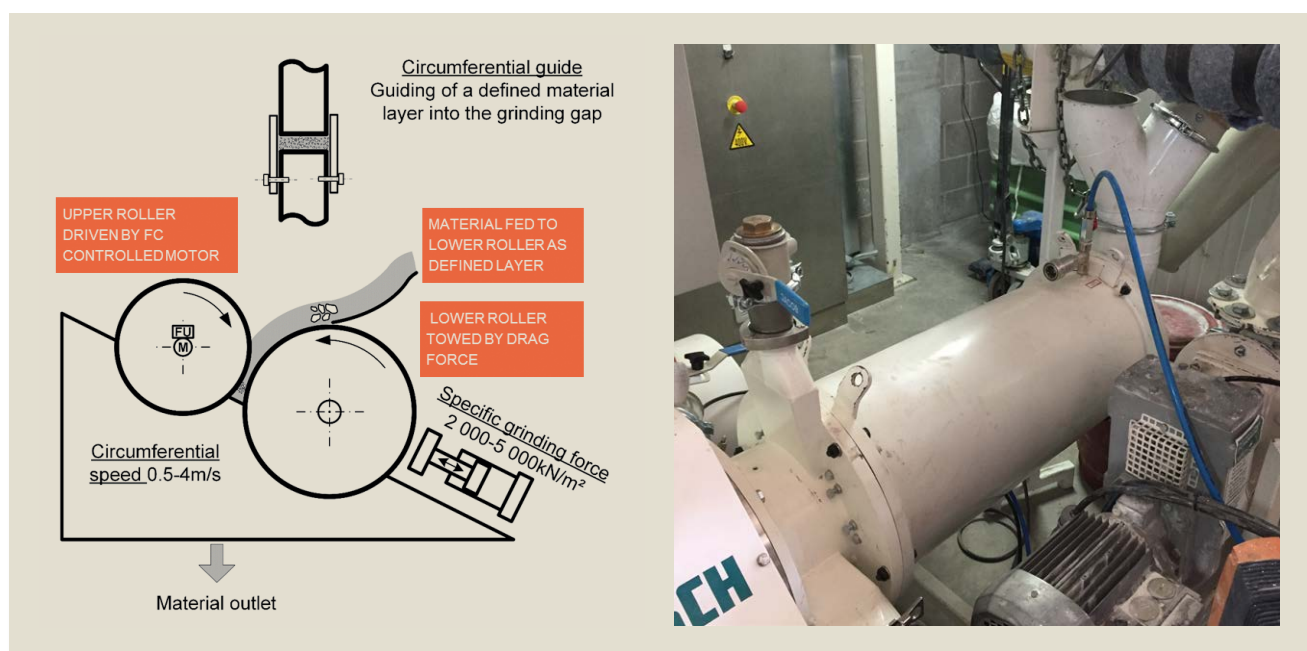


Figure 4: Operating principle of the Argo mill [6] (left) and stirred media mill used for the experiments (right)

Bild 4: Funktionsprinzip der Argo-Mühle [6] (links) und der für die Untersuchungen verwendete Rührwerkskugelmühle (rechts)

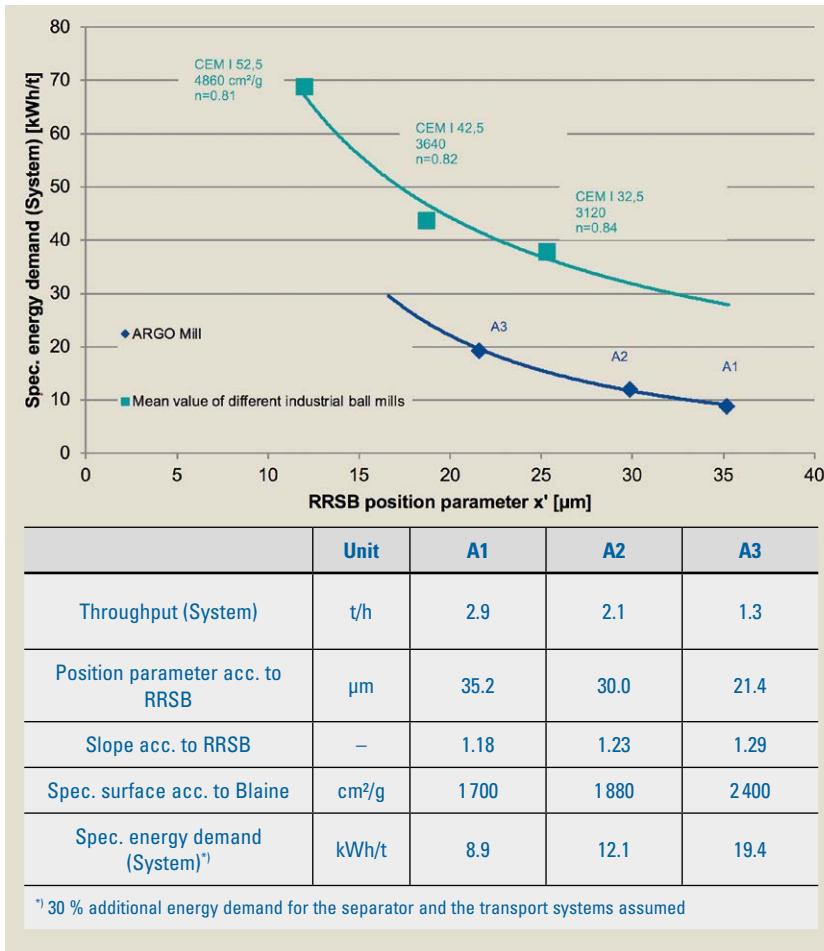


Figure 5: Trial grinding parameters in the Argo mill in separator operation; top: in comparison with calculated average CEM I cements of various strength classes

Bild 5: Versuchsparameter der Mahlung in der Argo-Mühle im Sichterbetrieb; oben: im Vergleich zu berechneten mittleren CEM I-Zementen verschiedener Festigkeitsklassen

to RRSB, the specific surfaces are accordingly far smaller than for a typical average CEM I cement from a ball mill. The reason for this is the narrower particle size distribution and the associated smaller proportion of small and large particles. The intermediate products produced here also exhibit far steeper particle size distributions than cements produced using high-pressure comminution processes. As compared to the ball mill, the specific energy demand for producing the intermediate products in the Argo mill was however low.

Separate ultra-fine grinding of the intermediate products from the Argo mill was performed in a horizontal dry stirred media mill from Netzsch (Fig. 4 right). The Netzsch Pamir® is a type of mill which uses a flow of air to convey the mill feed through the grinding chamber. The balls in the stirred media mill are moved by an agitator and so reduce the size of the mill feed. The coarse (A1) and the fine intermediate product (A3) from the Argo mill were used as feed materials for the grinding experiments. The stirred media mill was operated in the open-circuit mode, thus limiting the maximum attainable fineness. Different product finenesses were set by varying the feed quantity (► Fig. 6). Operating points outside the meaningful range were not used for further model calculations.

4.2 Influence on energy demand

To illustrate the influence of the specific energy demand, the model was employed to reproduce three cements originating

Allgemeinen in der Größenordnung von 25 bis 30 M.-% [4]. Ein wichtiger Einflussfaktor auf den Wasseranspruchs des Zementleims besteht in der Korngrößenverteilung des Zements. Bei Zunahme der Feinheit steigt der Wasseranspruch, aufgrund der höheren spezifischen Oberfläche [5]. Bei ähnlicher spezifischer Oberfläche kann das Steigungsmaß der RRSB-Verteilung gut mit dem Wasseranspruch korreliert werden. Der bekannte Zusammenhang, dass bei engeren Korngrößenverteilungen der Wasseranspruch steigt, ist auch für Produkte aus der separaten Feinstmahlung gültig. Es wurde beobachtet, dass durch die Mischung verschiedener Zwischenprodukte meist breitere Korngrößenverteilungen hergestellt werden als durch die Referenz-Korngrößenverteilung vorgegeben, was demzufolge einen positiven Einfluss auf den Wasseranspruch hat.

4 Verbesserung des spezifischen Energiebedarfs

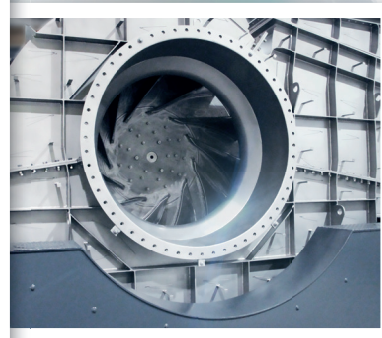
4.1 Versuchsmahlungen

Zur Ergänzung der Ergebnisse zur separaten Feinstmahlung mit kleintechnischen Mahlanlagen wurde der Einfluss des Verfahrens auf den spezifischen Energiebedarf in Pilotanlagen untersucht. Zur Verkleinerung wurde eine Argo-Mühle im Kreislauf mit einem Hochleistungssichter verwendet (► Bild 4 links). Für die separate Feinstmahlung wurde eine Rührwerkskugelmühle im Durchlaufbetrieb genutzt (Bild 4 rechts).

Die Argo-Mühle wurde im Versuchsprogramm mit einem Durchsatz von 2,9, 2,1 und 1,3 t/h betrieben. Die spezifische Oberfläche nach Blaine der Produkte lag zwischen 1700 und 2400 cm²/g. Da die Mühle im betrieblichen Alltag zur Feinstmahlung von Glasbruch verwendet wird, war die maximal erreichbare Produktfeinheit limitiert.

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in ► Bild 5 dargestellt. Die Argo-Mühle hat einen Zement mit sehr engen Korngrößenverteilungen produziert. Dementsprechend waren bei gleichem Lageparameter nach RRSB die spezifischen Oberflächen deutlich geringer im Vergleich zu einem typischen mittleren CEM I-Zement aus einer Kugelmühle. Grund hierfür ist die geringere Breite der Korngrößenverteilung und der damit einhergehende verringerte Anteil kleiner und großer Partikel. Die hier hergestellten Zwischenprodukte haben im Vergleich zu Zementen, die in Mühlen für die Hochdruckzerkleinerung hergestellt werden, steilere Korngrößenverteilungen. Der spezifische Energiebedarf zur Herstellung der Zwischenprodukte in der Argo-Mühle war jedoch, verglichen mit der Kugelmühle, niedrig.

Die separate Feinstmahlung der Zwischenprodukte aus der Argo-Mühle wurde in einer horizontalen trockenen Rührwerkskugelmühle der Firma Netzsch (Bild 4 rechts) durchgeführt. Bei der mit der Bezeichnung Netzsch Pamir® eingesetzten Mühle handelt es sich um eine Luftstrommühle. Die Kugelcharge in der Rührwerkskugelmühle wird durch



INDUSTRIAL FANS FOR THE HARSHEST CONDITIONS

WE OFFER:

- Tailor-made products
- Energy-efficient and high-performance fans
- Heavy duty industrial standards
- Fast and reliable 24/7 service
- Expert knowledge since 1906

BENEFITS:

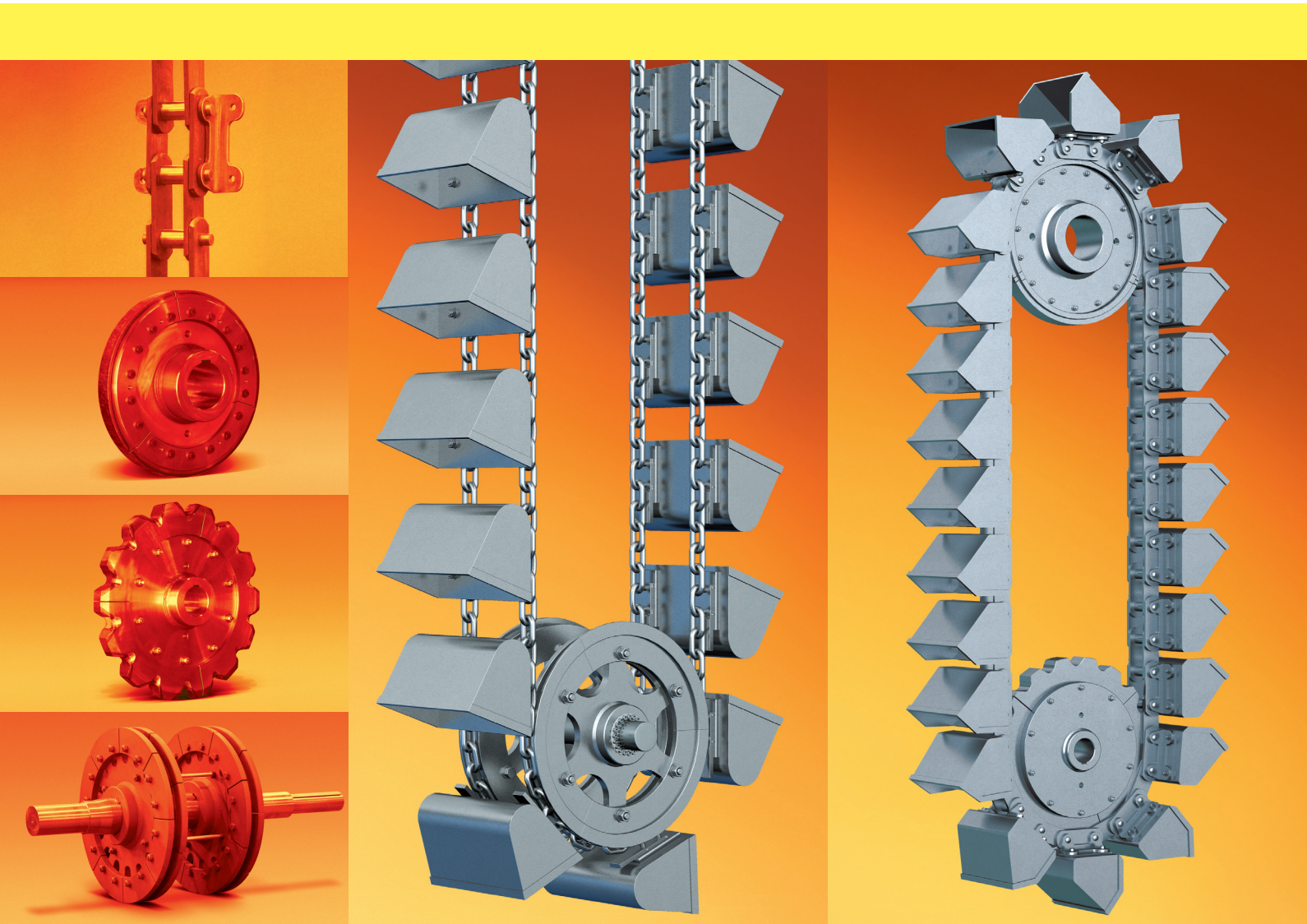
- Wear protection
- Low danger of caking
- Gas tightness
- Explosion protection
- Energy efficiency
- Low-maintenance and longevity



HEKO components for bucket elevators

- Round link chains
- Central chains
- Plate link chains
- Rollers and Sprockets
- Bearings
- Buckets

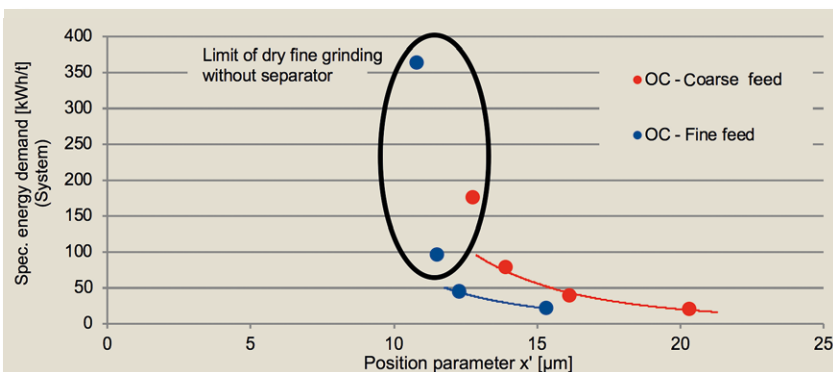
HEKO offers the whole range of chains and other wear parts for bucket elevators and chain conveyors. Proven in thousands of elevators and conveyors, worldwide.



HEKO Ketten GmbH

Eisenbahnstraße 2 | 58739 Wickede (Ruhr), Germany | Telephone +49(0)2377-9180-0 | Fax +49(0)2377-1028 | E-Mail: info@HEKO.com

www.heko.com



Designation	Unit	Clinker A3 (Argo-Mill)				Clinker A1 (Argo-Mill)			
		OC-V1	OC-V2	OC-V3	OC-V4	OC-V5	OC-V6	OC-V7	OC-V8
Throughput (System)	kg/h	40	130	280	600	60	140	300	310
Position parameter acc. to RRSB	μm	10.8	11.5	12.3	15.3	12.7	13.9	16.1	20.3
Slope acc. to RRSB	—	0.89	0.87	0.93	1.03	0.96	0.96	1.02	1.05
Spec. surface acc. to Blaine	cm²/g	5600	4700	4220	3470	4660	4220	3530	2860
Spec. energy demand (Mill)	kWh/t	363	95	44	22	175	79	39	20

Figure 6: Parameters for grinding trials in a Netzsch Pamir® stirred media mill in open-circuit operation

Bild 6: Versuchsparameter der Feinstmahlung in einer Netzsch-Pamir®-Rührwerkskugelmühle im Durchlaufbetrieb

from the same cement plant which supplied the clinker used. A CEM I 42,5 N, a CEM I 52,5 N and a CEM I 52,5 R were chosen for this purpose. In the Argo mill, the coarse intermediate products were made to correspond to the requirements of the particle size distributions of the reference products. Fig. 7 shows the coarse intermediate product with the greatest fineness in comparison with the CEM I 52,5 N from the industrial ball mill. It can be seen that the ultra-fine range is under-represented in the particle size distribution. This ultra-fine range was made up by the separately ultra-fine ground intermediate products with the aid of the model calculation.

Use can be made of the two coarse intermediate products to reproduce the CEM I 42,5 N and the CEM I 52,5 N. The maximum particle size of the coarse intermediate product with a low degree of fineness coincides well with the maximum particle size of the CEM I 42,5 N. As can be seen from Fig. 8, the maximum particle size of the coarse intermediate product with a high degree of fineness is identical to that of the CEM I 52,5 N. Use was made of the two coarse intermediate products (A1, A3) and an ultra-fine ground intermediate product (OC-V3) to reproduce these two cements. Variation

einen Rührer bewegt und zerkleinert so das Mahlgut. Als Ausgangsmaterial für die Mahlversuche wurden das grobe (A1) und das feine Zwischenprodukt (A3) der Argo-Mühle verwendet. Die Rührwerkskugelmühle wurde im Durchlauf betrieben und ist daher in ihrer maximal erreichbaren Feinheit limitiert. Durch Variation der Aufgabemenge wurden verschiedene Produktfeinheiten eingestellt (» Bild 6). Betriebspunkte, die außerhalb des sinnvollen Bereiches liegen, wurden nicht für weitere Modellrechnungen genutzt.

4.2 Einfluss auf den Energiebedarf

Um den Einfluss des spezifischen Energiebedarfs darstellen zu können, wurden mithilfe des Modells drei Zemente nachgebildet, die aus dem Zementwerk stammen, aus dem auch der verwendete Klinker zur Verfügung gestellt wurde. Hierzu wurden ein CEM I 42,5 N, ein CEM I 52,5 N und ein CEM I 52,5 R genutzt. Die groben Zwischenprodukte wurden in der Argo-Mühle so hergestellt, dass sie den Anforderungen der Korngrößenverteilungen der Referenz-Produkte entsprechen. Bild 7 zeigt das grobe Zwischenprodukt der höchsten Feinheit im Vergleich zum CEM I 52,5 N aus der industriellen Kugelmühle. Es ist zu erkennen, dass der Feinstbereich in der Korngrößenverteilung unterrepräsentiert ist. Dieser Feinstbereich wurde durch die separat feinstgemahlene Zwischenprodukte mithilfe der Modellrechnung aufgefüllt.

Für die Nachbildung des CEM I 42,5 N und des CEM I 52,5 N können die beiden groben Zwischenprodukte verwendet werden. Das Maximalkorn des groben Zwischenprodukts geringer Feinheit stimmt gut mit dem Maximalkorn des CEM I 42,5 N überein. Wie in Bild 8 zu erkennen ist, ist das Maximalkorn des groben Zwischenproduktes hoher Feinheit identisch mit dem des CEM I 52,5 N. Für die Nachbildung dieser beiden Zemente wurden die beiden groben Zwischenprodukte (A1, A3) sowie ein feinstgemahlene

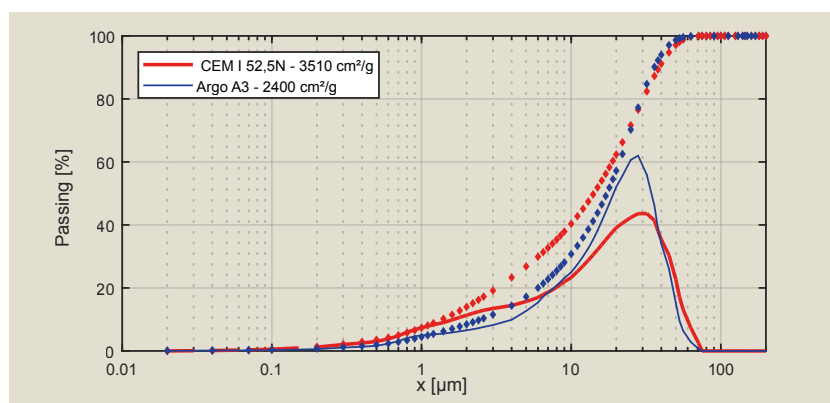


Figure 7: Particle size distribution of the CEM I 52,5 N and the coarse intermediate product with the greatest fineness (A3)

Bild 7: Korngrößenverteilung des CEM I 52,5 N und des groben Zwischenproduktes der höchsten Feinheit (A3)

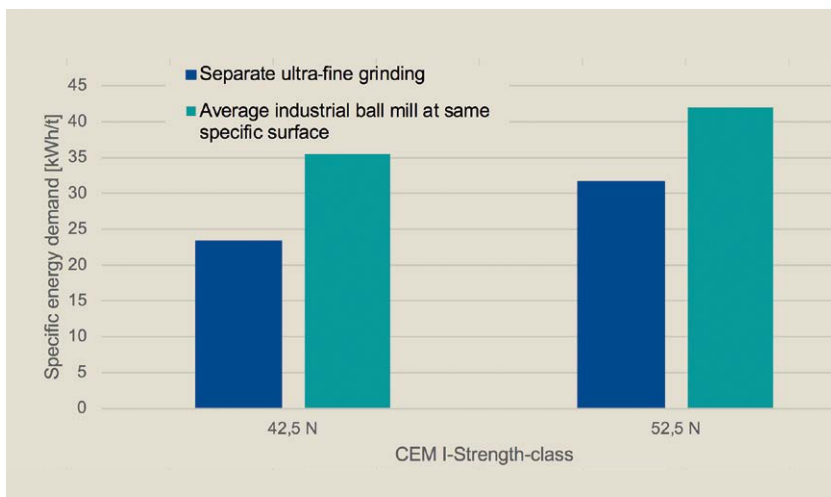


Figure 8: Specific energy demand of the cements made using separate ultra-fine grinding

Bild 8: Spezifischer Energiebedarf der durch separate Feinstmahlung hergestellten Zemente

of the proportions of the three intermediate products used made it possible to set the different particle size distributions (Table 1). This means that different cement properties can be set by varying the proportions. Given appropriate selection of the intermediate products, the same can also be achieved for other cements and the specific energy demand can be further reduced. The reference cement CEM I 52,5 R has a far higher degree of fineness and could only be reproduced with the intermediate products from the separate ultra-fine grinding process. The coarse fraction of the coarse intermediate products is too large to permit use in this very fine cement. High-pressure grinding rolls can however produce far higher degrees of product fineness than it was possible to achieve in this mill, which was designed for the glass industry.

As compared to cements from ball mills, it proved possible to significantly reduce the specific energy demands of the cements CEM I 42,5 N and CEM I 52,5 N (Fig. 8). Whereby the clinker used is slightly easier to grind compared to an average clinker. It is to be noted at this point that all grinding experiments in this project were performed without the addition of grinding aids to avoid any interaction between grinding aids and cement properties.

5 Conclusion

The results of the research project presented here show that separate ultra-fine grinding is basically suitable for producing cements with specified properties by way of high-pressure comminution and subsequent partial secondary grinding in an ultra-fine mill. The intermediate products from high-pressure comminution can be combined with ultra-fine fractions from actual production to obtain the desired particle size distributions (e.g. broad distributions). In particular, this allows better setting of the water demand and early strength than has previously been the case. A further advantage of this approach is that the ultra-fine range of the particle size distribution can be specifically influenced without having to process the entire coarse range. This is not possible with grinding in a single mill. In addition, ultra-fine mills can be employed which are far smaller than the main grinding unit.

High-pressure comminution plants are currently already capable of achieving high degrees of product fineness in an energy-efficient manner and so of producing a large proportion of the desired product. Significant improvements in the

Zwischenprodukt (OC-V3) verwendet. Um die unterschiedlichen Korngrößenverteilungen einzustellen, konnten die Anteile der drei verwendeten Zwischenprodukte variiert werden (Table 1). Das bedeutet, dass durch Variation der Anteile die Einstellung unterschiedlicher Zementeigenschaften möglich ist. Bei geeigneter Wahl der Zwischenprodukte kann das auch für weitere Zemente möglich gemacht und der spezifische Energiebedarf weiter reduziert werden. Der Referenzzement CEM I 52,5 R ist von wesentlich höherer Feinheit und konnte nur durch die separat feinstgemahlene Zwischenprodukte nachgebildet werden. Die groben Zwischenprodukte haben einen zu hohen Grobanteil, um in diesem sehr feinen Zement genutzt werden zu können.

Table 1: Composition of reproduced cements made using separate ultra-fine grinding

Tabelle 1: Zusammensetzung der nachgebildeten Zemente, die durch die separate Feinstmahlung hergestellt wurden

	Portion of intermediate products [%]			Total
	Argo-Mill A1	Argo-Mill A3	Stirred Media Mill OC-V3	
CEM I 42,5 N	53.9	17.2	28.9	100
CEM I 52,5 N	10.5	50.0	39.5	100

Im Vergleich zu Kugelmühlzementen konnten die spezifischen Energiebedarfswerte der Zemente CEM I 42,5 N und CEM I 52,5 N signifikant gesenkt werden (Bild 8), wobei Klinker 3 etwas einfacher zu zerkleinern ist als ein mittlerer Klinker. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass sämtliche Mahlversuche in diesem Projekt ohne Zusatz von Mahlhilfen durchgeführt wurden, um Wechselwirkungen der Mahlhilfen mit den Zementeneigenschaften zu vermeiden.

5 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse des hier vorgestellten Forschungsprojekts zeigen, dass die separate Feinstmahlung generell dazu geeignet ist, Zemente mit vorgegebenen Eigenschaften durch eine effiziente Vorzerkleinerung und anschließende teilweise Nachmahlung in einer Feinstmühle herzustellen. Dabei können die Zwischenprodukte aus der Vorzerkleinerung mit praktisch herstellbaren Feinstfraktionen zu gewünschten Korngrößenverteilungen (z.B. breiten Verteilungen) vereinigt werden. Hierdurch können besonders der Wasseranspruch und die Frühfestigkeit besser eingestellt werden als bisher. Ein weiterer Vorteil dieses Ansatzes liegt darin, dass der Feinstbereich der Korngrößenverteilung gezielt beeinflusst werden kann, ohne den ganzen Grobbereich beanspruchen zu müssen, was bei der Mahlung in einer einzelnen Mühle nicht möglich ist. Zudem können die eingesetzten Feinstmühlen wesentlich kleiner dimensioniert werden als das Hauptmahlaggregat.

Hochdruckzerkleinerungsanlagen können nach aktuellem Stand bereits energetisch effizient hohe Produktfeinheiten erzeugen und so einen großen Anteil des gewünschten Produkts herstellen. Hierdurch sind signifikante Verbesserungen

specific energy demand as compared to grinding in a ball mill can therefore be expected. This does however directly depend on how much material from high-pressure comminution can be used to cover the required particle size distribution. The greater this proportion is, the better will be the energy efficiency attained. It should however be remembered that the particle size distribution of the intermediate product also has a direct influence on the distribution of the secondary ground product. Energy-efficiency optimisation can therefore only be achieved within the boundary conditions set down by the desired particle size distribution of the final product. A model was developed and tested for this complex optimisation task.

Large-scale implementation of the concept of separate ultra-fine grinding is currently being examined in a further research project. This will include taking a closer look at industrially sized ultra-fine grinding plants, above all from the point of view of energy efficiency. To date, this has not been adequately investigated for either cements or other products, particularly in connection with dry stirred media mills. Furthermore, only limited empirical values are available in the cement industry with regard to the transportation, storage and dosing of products with extremely high degrees of fineness.

Acknowledgements

The research project IGF 18853 N "Investigation of separate ultra-fine grinding in cement production as a means of improving energy efficiency and cement properties" was financed by the Federal Ministry for Economic Affairs and Technology (BMWi) through the AiF. We would additionally like to thank the Dr. Edith and Dr. Klaus Dyckerhoff Foundation for supporting this project within the framework of the overall research project "Development of high-performance cements and concretes with low specific CO₂ emissions".

des spezifischen Energiebedarfs im Vergleich zur Mahlung in der Kugelmühle zu erwarten. Je größer dabei der Anteil aus der Vorzerkleinerung ist, desto besser ist folglich auch die Energieeffizienz. Es ist jedoch zu beachten, dass die Korngrößenverteilungen des Zwischenprodukts auch direkt die Verteilung des nachgemahlten Produkts beeinflusst. Die energetische Optimierung kann somit nur innerhalb der durch die gewünschte Korngrößenverteilung des Endprodukts vorgegebenen Randbedingungen erfolgen. Für diese komplexe Optimierungsaufgabe wurde ein Modell entwickelt und getestet.

Die großtechnische Umsetzung des Konzepts der separaten Feinstmahlung wird aktuell in einem weiteren Forschungsprojekt untersucht. Hierbei sollen u.a. Feinstmahanlagen mit industrieller Baugröße genauer betrachtet werden, vor allem in Hinblick auf die Energieeffizienz. Diesbezügliche Untersuchungen sind für die trocken arbeitenden Rührwerkskugelmühlen bislang weder für Zemente noch für andere Produkte durchgeführt worden. Zum anderen gibt es in der Zementindustrie bisher nur begrenzte Erfahrungswerte hinsichtlich des Transports, der Lagerung und Dosierung von Produkten mit extrem hohen Mahlfeinheiten.

Danksagung

Das Forschungsvorhaben IGF 18853 N „Untersuchung der separaten Feinstmahlung zur Zementherstellung zur Verbesserung der Energieeffizienz und der Zementeigenschaften“ wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) über die AiF finanziert. Des Weiteren danken wir ganz herzlich der Dres. Edith und Klaus Dyckerhoff Stiftung für die Förderung dieses Projekts im Rahmen des Gesamt-Forschungsvorhabens „Entwicklung leistungsfähiger Zemente und Betone mit geringen spezifischen CO₂-Emissionen“.

LITERATURE / LITERATUR

- [1] Müller-Pfeiffer, M.; Fleiger, P: Trends in Grinding Technologies (Report from VDZ's Working Group Grinding Technology). VDZ Congress 2018, Duesseldorf 2018.
- [2] Verfahrenstechnisches Merkblatt: Zerkleinerungstechnik. Verein Deutscher Zementwerke e.V., Duesseldorf 2018, unpublished.
- [3] Treiber, K.; Fleiger, P: Optimization of the powder and ball movement inside a high-speed horizontal attrition mill for dry grinding. 2015.
- [4] Zement-Taschenbuch 2008. Verein Deutscher Zementwerke, Duesseldorf 2018.
- [5] Kuhlmann, K.: Verbesserung der Energieausnutzung beim Mahlen von Zement. Schriftenreihe der Zementindustrie 44 (1985).
- [6] Drüphake, P: The Argo Mill – First operation experiences and application examples. 9th International Symposium on Fine Grinding and Dispersing, Braunschweig 2018, p. 31.

IN-projects
GmbH

is specialized in production process and operation
of the building material industry and its supply industry.

As your service provider we carry out your orders in project management and quality management, as well as participation in commissioning of plants, formulation development, trouble shooting, monitoring of the factory production control, etc., at home and abroad.

Your contact: Dr. Jürgen Lutter • St.-Blasius-Str. 32b • D-85051 Ingolstadt • +49(0)176 66491218 • info@in-projects.com • www.in-projects.com