

Trommelmühlen - allgemeine Betrachtung -

Henning Zoz, Zoz GmbH
D 57223 Kreuztal, Germany

Inhaltsverzeichnis

- 1.) Einleitung
- 2.) Trommelmühle - Stand der Technik
- 3.) Maschinenparameter
- 4.) Mahlmedien
- 5.) Füllparameter
- 6.) Füllmengenberechnung
- 7.) Betriebsparameter
- 8.) Beispiele

1.) Einleitung

Trommelmühlen werden zur Aufbereitung unterschiedlichster Produkte eingesetzt. Es handelt sich hier um einen diskontinuierlichen Prozess, bei dem durch die Auswahl unterschiedlicher Parameter auch unterschiedliche Prozessvarianten möglich sind.

2.) Trommelmühle - Stand der Technik

Das Prinzip der Trommelmühle ist seit über 100 Jahren bekannt und hat sich bis heute nicht grundsätzlich geändert. Gleichwohl verschieben sich die Anwendungsbereiche ständig. So werden heute wesentliche Materialien des Massenbedarfs in kontinuierlichen Prozessen aufbereitet, aber immer dann, wenn beispielsweise hohe kinetische Mahlenergien notwendig sind, wird auch heute noch auf die mit Mahlhilfsmittel und Produkt gefüllte, rotierende Trommel zurückgegriffen. Weitere Beispiele sind Prozesse, bei denen hohe Reinheitsanforderungen gestellt werden, teilweise geht es aber auch einfach nur um die oftmals höhere Flexibilität im Chargenbetrieb (Produktwechsel).

Trommelmühlen werden heute mit Vollschutz (Kapselung aller rotierenden Teile) und integrierter Schalldämmung gebaut und kommen hauptsächlich als Ständer-, z.Teil aber auch als Rahmenmühlen zum Einsatz. Die sogenannte Rahmenbauart wird dann verwendet, wenn die notwendigen Bauhöhen von Mühle und Zusatzaggregaten die vorhandene Raumhöhe überschreiten. Die Mühle kann dann in eine Etagedecke eingesetzt werden.

3.) Maschinenparameter

Zur technischen Einteilung der Trommelmühlen bezeichnet man zunächst die Materialqualität des Mahlmediums (hier: Mahlfutter und Mahlkörper). Das richtet sich primär danach, was, wie zerkleinert werden soll, und welcher qualitative und quantitative Abrieb der Mahlmedien akzeptiert werden soll. Mahlen ohne Abrieb ist grundsätzlich nicht möglich.

Der nächste Schritt ist die Unterscheidung von Trocken- und Naßmahlverfahren. Diese Auswahl richtet sich vorrangig nach dem angestrebten Prozessergebnis und natürlich nach dem Aggregatzustand des Aufgabematerials. Eine genaue Unterscheidung des Mahlprozesses aufgrund nur dieses einen Parameters ist nicht zweckmäßig. Allgemein kann aber festgestellt

werden, daß beim Trockenmahlen, bei vergleichbaren anderen Parametern, höhere kinetische Energien auftreten und beim Naßmahlen in der Summe höhere Scherkräfte. Daraus folgt, daß in vergleichbarer Situation, durch den Trockenbetrieb ein strukturiertes Korn und durch den Naßbetrieb ein rundes Korn gebildet wird. Die weithin verbreitete Meinung, durch Naßmahlung sei generell ein feineres Korn zu erreichen, ist nicht zutreffend.

4.) Mahlmedien

Unter Mahlmedien sind alle im Prozess produktberührenden Teile zu verstehen. Das sind der Mahllinnenraum und die Mahlhilfsmittel. Die entscheidenden Eigenschaften des Mahllinnenraumes sind die chemische Werkstoffzusammensetzung (Qualität der Kontamination) sowie das Abrieb- und Elastizitätsverhalten (Quantität der Kontamination). Gewöhnlich werden heute Stahl, Oxydkeramik und Gummi verwendet. Stahl wird beispielsweise dann verwendet, wenn hohe Mahlleistung einer relativ bedeutungslosen Kontamination gegenüberstehen soll, oder wenn es sich bei den Produkten selber um Fe-Basiswerkstoffe handelt. Oxidkeramik wird aufgrund ihrer hohen Härte verwendet, wenn insbesondere eisenfrei und mit geringer Kontamination gemahlen werden soll. Die Verwendung einer gummierten Trommel ist sinnvoll, wenn im Mahlprozess vorwiegend Scherkräfte genutzt werden sollen, die fast ausschließlich im Kugelpaket auftreten (z.B. Aufbrechen von Agglomeraten). Das hier unerwünschte Mahlen zwischen Kugelpaket und Mahlrauminnenwand kann oftmals aufgrund der hohen Elastizität der Gummierung verhindert werden. Ein weiterer, wichtiger Anwendungsfall ist hochenergetisches Mahlen. So werden Gummierungen oftmals dann eingesetzt, wenn oxidkeramische Auskleidungen aufgrund ihrer geringen Bruchfestigkeit hohen kinetischen Belastungen durch die Mahlkugeln nicht standhalten würden. Auch in Stahlmühlen (Stahlwand) die beispielsweise mit Hartmetallmahlkugeln betrieben werden, können Gummierungen die Kontamination mit dem Trommelwerkstoff verhindern und weisen z.T. eine erstaunlich hohe Lebensdauer auf.

Unter Mahlhilfsmitteln versteht man die Mahlkörper sowie andere Additive, wie z.B. Flüssigkeiten beim Naßmahlen, die aber hier nur der Vollständigkeit halber erwähnt werden. Da heute Werkstoffe hoher Festigkeit und Härte kostengünstig geformt und hergestellt werden können, sind die früher für die Auskleidung und als Mahlkörper verwendeten Natursteine längst durch künstlich hergestellte Futtersteine und Mahlkörper abgelöst worden. Ähnlich ist es im Grunde bereits dem noch vor wenigen Jahren regelmäßig eingesetzten Steatit ergangen, der heute nicht mehr aufgrund seiner Härte, sondern nur noch aufgrund des Werkstoffes verwendet wird (artgleiches Mahlen).

Als Mahlkörper werden meistens Kugeln verwendet, da diese die kinetisch und abrasiv widerstandsfähigste Geometrie und trotzdem noch ein günstiges Volumen : Oberfläche Verhältniss aufweisen. Die Werkstoffe werden in der Regel artgleich mit denen der Trommelinnenwand gewählt. Gewöhnlich eingesetzt werden Kugeln aus Stahl, Hartmetall, Oxydkeramik sowie gummierte Kugeln mit unterschiedlichen Kernen.

5.) Füllparameter

Relevant sind hier Mahlhilfsmittel und Mahlgut. Bei dieser Betrachtungsweise ist es sinnvoll, zwischen den Mahlkörpern einerseits und dem Mahlgut sowie anderen Mahlhilfsmitteln andererseits zu unterscheiden. Die absoluten Größen und insbesondere der Durchmesser der Trommel (Zoz-Mühle 30 - 5000 Liter Mahlraumvolumen) bleiben bei dieser Betrachtung unberücksichtigt. Vereinfacht sind also folgende Parameter aktiv einflußbar:

- a) Gesamtgewicht, Durchmesser und spezifisches Gewicht der Mahlkugeln
- b) Gesamtgewicht, Aufgabekorngröße und spezifisches Gewicht des Mahlgutes

insbesondere von Interesse sind die Proportionen:

Gewichtsverhältnis	Mahlkugeln : Mahlgut
Volumenverhältnis	Mahlkugeln : Mahlgut

Mit den Füllparametern kann man nun den Mahlprozess entscheidend beeinflussen. Da es hier aufgrund der Vielzahl der Parameter, die sich wiederum gegenseitig beeinflussen, keine universell gültige Regel gibt, sei das im folgenden anhand von Extremfällen für die Trockenmahlung erläutert (normale Betriebsparameter vorausgesetzt):

- a) Die Trommel wird zu annähernd 100 % Füllgrad mit Kugeln gefüllt, das Lückenvolumen zwischen den Kugeln wird zu einem geringen Prozentsatz mit Mahlgut aufgefüllt.
Die Folge ist eine geringe Relativbewegung zwischen den Kugeln, das Mahlgut verliert sich quasi im Kugelpaket, ein wirtschaftliches Mahlen ist nicht gegeben, der Abrieb der Kugeln unnötig hoch.
- b) Die Trommel wird zu ca. 10 Vol.% mit Kugeln und dann bis auf annähernd 100 % Füllgrad mit Mahlgut aufgefüllt.
Die Folge ist auch hier eine geringe Relativbewegung der Mahlkugeln, ein Mahlen nach dem Kugelmühlenprinzip findet fast nicht statt.
- c) Die Trommel wird wirtschaftlich zu ca. 40-50 % Füllgrad mit Kugeln gefüllt , aber das Lückenvolumen wird nur zu einem geringen Prozentsatz mit Mahlgut aufgefüllt.
Die Relativbewegung der Kugeln ist wünschenswert groß, allerdings ist die kinetische Mahlenergie überdurchschnittlich hoch, da der beim Trockenmahlen notwendige Dämpfungseffekt des Mahlgutes entfällt, und wird hauptsächlich zwischen den Kugeln, und nicht zwischen Kugeln und Mahlgut umgesetzt. Der Abrieb der Kugeln ist unnötig groß, die Bearbeitung des Mahlgutes allerdings von hoher Kinetik, so daß diese Variante in Einzelfällen Anwendung findet.
- d) Die Trommel wird wirtschaftlich zu ca. 40-50 % Füllgrad mit Kugeln gefüllt , aber dann bis auf einen überhöhten Füllgrad (in diesem Fall über 50-60 %) mit Mahlgut gefüllt.
Die Kinetik zwischen den Kugeln ist gering, die Relativbewegung allerdings vertretbar. Der Mahlerfolg wird bei erhöhter Mahlzeit in aller Regel eintreten. Unter dem Aspekt der Reduzierung der Nebenzeiten (Füllen, Entleeren, ggfls. Reinigen und Trocknen) wird diese Variante sehr oft angewendet.

Weitere wichtige Proportionen sind:

Größenverhältnis	Mahlkugeln : Mahlgut
Gewichtsverhältnis	Mahlkugeln : Mahlgut
Größenverhältnis	Kugelradius : Trommelradius

Für ein wirtschaftliches Mahlen muß der Durchmesser der größten Mahlkugel mindestens 5 mal größer als die größte Diagonale der Mahlgutanteile sein. Das spezifische Gewicht der Mahlkugeln soll mindestens gleich dem Schüttgewicht des Mahlgutes im Endzustand sein.

Bei Einzelbetrachtung soll der Durchmesser der größten Mahlkugel bei kleineren Mühlen (Trommeldurchmessern unter 1000 mm) 20 x kleiner als der Trommeldurchmesser sein, bei größeren Mühlen 30 - 40 mal kleiner. Das gilt für eine spezifische Dichte der Kugeln von 2.5 - 3.5 kg/dm³. Bei größeren Dichten werden die Durchmesser etwa proportional herabgesetzt.

6.) Füllmengenberechnung

Da das Mahlgut im Regelfall nicht mehr als das Lückenvolumen der Kugelschüttung einnehmen soll (ca. 39 % des Gesamtvolumens), ist für die Füllmengenberechnung unter Anwendung der Tabellen *Typenschlüssel* und *Füllrichtlinien* wie folgt anzusetzen (Beispiel Trockenmahlung):

Tafel 1 + 2

Man berechne das maximale Schüttvolumen und das maximale Gewicht der Kugelfüllung. Anhand der Tabelle ist zu kontrollieren, daß dieses Gewicht innerhalb der zulässigen Toleranz liegt. 39 % des errechneten Schüttvolumens ergeben das maximale Schüttvolumen des Mahlgutes. Man kann daraus das Füllgewicht des Mahlgutes berechnen. Dieses mit dem Füllgewicht der Mahlkugeln addiert, ergibt das Füllgewicht der Trommel. Das ist wiederum anhand der Tabelle auf Zulässigkeit zu kontrollieren. Bei Überschreitung einzelner Werte sind diese zu korrigieren und die Füllung ist neu zu berechnen.

7.) Betriebsparameter

Da hier zur Vereinfachung eine Unterscheidung von Füll- und Betriebsparametern vorgenommen wird, sind als Betriebsparameter folgende für den Prozess wesentliche Kenngrößen anzusehen: Drehzahl der Trommel, Mahlzeit, Mahltemperatur und Mahlatmosphäre (hier gibt es eine für diese Betrachtungsweise unvermeidbare Überschneidung mit der Flüssigkeit beim Naßmahlen).

Die Trommeldrehzahl muß im Zusammenhang mit der kritischen Drehzahl n_k betrachtet werden. Diese errechnet sich näherungsweise aus der Division der Konstante 42.3 durch die Wurzel aus dem Durchmesser der Trommel in Dezimetern. Die Einheit ist dann min^{-1}

Die kritische Drehzahl ist die Drehzahl, bei der die durch die Rotation hervorgerufenen Zentrifugalkräfte die Gravitationskräfte, die auf Kugeln und Mahlgut lasten, überlagern würden. Daraus geht schon hervor, daß die o.g. Berechnung nur einen Näherungswert darstellen kann. Bei Überschreiten oder Erreichen von n_k würden also die Kugeln gegen die Mahlwand gedrückt und keine Mahlarbeit leisten.

Der wirtschaftlichste Drehzahlbereich liegt zwischen 60 - 80 % n_k , da in diesem Bereich der Übergang von Kaskaden- zu Kataraktmahlung liegt (siehe schematische Darstellung 01 + 02). Kaskadenmahlung heißt, daß die Kugeln in der Trommel abrollen, Kataraktmahlung heißt, daß die Kugeln abheben und quasi in die Kugelmenge zurückgeworfen werden. Diese Zustände sind direkt vom Füllgrad abhängig.

Zu hohe Drehzahlen (> 80 % n_k) führen dann insbesondere bei niedrigen Füllgraden (< 30 %) dazu, daß die Kugeln auf der Mahlwand auftreffen, diese extrem beanspruchen und keine Mahlarbeit leisten.

Die Mahlzeit ist von allen vorgenannten Parametern abhängig und daher durch Versuche zu ermitteln, alle Empfehlungen basieren hier auf Erfahrungswerten.

Mahltemperatur und Atmosphäre werden gewöhnlich nur dann aktiv beeinflusst, wenn das Produkt dieses erfordert. So ist die Ausrüstung einer Trommel mit Kühl- oder Heizmantel dann sinnvoll, wenn die Materialien oder dessen Mahleigenschaften durch die Erwärmung aufgrund des Mahlvorganges nachteilig beeinflusst würden. Dann wird die Trommel gekühlt. Gleiches kann für eine notwendige externe Erwärmung gelten.

Der Betrieb einer Kugelmühle unter Inertgas-Atmosphäre oder Vakuum ist dann notwendig, wenn das Mahlgut aufgrund der Korngrößenreduzierung und der daraus folgenden exponentialen Oberflächenvergrößerung bei Kontakt mit der Umgebungsatmosphäre unbrauchbar würde, da die Kinetik der Oxidationsreaktion stark beschleunigt wird.

Abschließend kann man feststellen, daß für „optimalen“ Betrieb und Auslegung einer Kugelmühle immer noch wesentlich auf Erfahrungen zurückgegriffen werden muß, allerdings auch keine Hexenkünste nötig sind.

8.) Beispiele

Um die Vielzahl der Anwendungsbereiche zu belegen, seien zum Schluß noch einige Beispiele mit individuellen Lösungen aus der Praxis geschildert:

Bild 02 zeigt eine 200-Liter Trockenmühle (A2TAs) die für eine Selten-Erd-Aufbereitung eingesetzt wird. Die Betriebs- und Füllparameter fallen aus jeder Norm, da sehr hohe kinetische Mahlenergien gefordert waren. Dazu mußte die Trommel mit einem hochwertigen und vor allem bruchfesten Aluminiumoxid ausgekleidet werden, und zwar im Klebeverfahren, so das zwischen den Futtersteinen quasi keine Fuge entsteht. Der Ablaßroster war mit einer speziellen oxidkeramischen Beschichtung zu versehen.

Bild 03 zeigt eine 100-Liter Trockenmühle (S1TSs) mit Stahlwand und Stahlkugelfüllung für die Aufbereitung von Edelmetall-Schrott. Diese Maschine wurde mit staubdicht angeschlossenem Siebwagen (SW28) geliefert.

Bild 04 zeigt eine 100-Liter Naßmühle (T100Nos1) mit eingesetztem Porzellanmahltopf in offener Bauform ohne Vollschutz oder Schalldämmung. Der Ablaßseiher wurde mit Al₂O₃ beschichtet, Antrieb und Steuerung in ex-geschützter Ausführung.

Bild 05 zeigt zwei 1200-Liter Naßmühlen (A12NAex) für die Aufbereitung unter Alkohol, ausgerüstet mit Ex-Schutz.

Bild 06 zeigt 2 Trockenmühlen in den Größen 45 und 100 Liter mit eingesetzten Töpfen aus speziellem Steingut zur Aufbereitung von dentalmedizinischen Präparaten.