

Die Mahlungsfunktionen.

Von
G. F. Hüttig.

Aus den Instituten für Anorganische und Physikalische Chemie
der Technischen Hochschule Graz.

Mit 1 Abbildung.

(Eingelangt am 12. Jan. 1953. Vorgelegt in der Sitzung am 15. Jan. 1953.)

Die im Verlaufe einer Mahlung erhaltenen Ergebnisse der granulometrischen Analyse werden durch sechs verschiedene „Mahlungsfunktionen“ dargestellt, von denen jede einzelne eine charakteristische Aussage beinhaltet. Die Ausführungen werden an zwei speziellen Beispielen in graphischer Darstellung erläutert.

Gelegentlich des Europäischen Treffens für Chemische Technik in Frankfurt am Main 1952 und des Internationalen Symposiums über die Reaktivität der Festkörper in Göteborg 1952¹ wurde auch über die Zermahlungsvorgänge als chemisches Problem diskutiert und die Berechtigung bzw. die Zweckmäßigkeit der Begriffe „Mechanochemie“, „Bindungsspektrum“, „Mahlungsfluß“, „Mühlencharakteristik“, „Mahlungsleichgewicht“ und die Anwendbarkeit der statistischen Mechanik² (wie sie etwa die Grundlage der kinetischen Gastheorie darstellt) auf die Zermahlungsvorgänge erörtert.

In der vorliegenden Mitteilung sollen solche Begriffe und Betrachtungsweisen dargelegt werden, welche für eine hypothesenfreie, von dem Zerfallsmechanismus des Einzelkornes unabhängige *Beschreibung* des Zermahlungsvorganges zweckmäßig sein können. Die unmittelbaren Beobachtungen über den Verlauf eines Mahlungsvorganges kann man in verschiedener Weise oder — wie man gleichbedeutend auch sagt —

¹ Vgl. die Vorträge von G. F. Hüttig in den Berichten dieser beiden Veranstaltungen.

² Vgl. hierzu die inzwischen erschienene Veröffentlichung: O. Theimer, Über die statistische Mechanik von Zermahlungsvorgängen. Kolloid-Z. 128, 1 (1952).

durch verschiedene Funktionen beschreiben. Jede dieser Funktionen gibt eine anschauliche Vorstellung über eine bestimmte Charakteristik der Zermahlung, die dem Grundlagenforscher als Ausgangsstellung für seine Theorienbildungen und dem Praktiker zur Beurteilung von Mühle und Mahlgut dienen kann. Die bisherigen Untersuchungen von *O. Theimer* bzw. *G. F. Hüttig*³ und anderen haben gezeigt, daß sich für diese Zwecke die folgenden sechs Funktionen anbieten: Die Durchgangscharakteristik (*D*), die Häufigkeit (*H*), der Mahlfluß (*M*), die Verteilungsverschiebung (*V*), die Zermahlungscharakteristik (*Z*) und die Bildungscharakteristik (*B*).

Im nachfolgenden werden diese „Mahlungsfunktionen“ definiert, ihre anschaulich vorstellbare Aussage umrissen und an Versuchsreihen erläutert, die von *W. Ebersold*⁴ in meinem Institut bei dem Mahlen von Sand in einer Kugelmühle beobachtet wurden. Der linke Teil der Abb. 1 bezieht sich auf Mahlungsvorgänge mit Stahlkugeln vom Durchmesser = 15 mm, der rechte Teil auf die in der ganz gleichen Weise vorgenommenen Mahlungen, wo bei unverändertem Gesamtgewicht der Stahlkugeln der Durchmesser der einzelnen Kugel 5 mm betrug.

1. Die „Durchgangscharakteristik“ = *D* (gelegentlich auch „Summationskurve“ genannt). Bezeichnet man mit *x* die Korngröße (Durchmesser) der Pulverteilchen und mit *D* die Gewichtsprozente desjenigen Pulveranteiles, der mit Korngrößen gleich oder kleiner als *x* in dem Pulver vorhanden ist, so nennt man die Funktion

$$D = f(x)$$

die „Durchgangscharakteristik“. Sie ergibt sich unmittelbar aus der Siebanalyse eines Pulvers, indem *D* die Gewichtsprozente des Pulvers anzeigt, die durch ein Sieb von der Maschenweite = *x* hindurchgehen. In dem oberen Teil der Abb. 1 geben die mit *D* bezeichneten Kurven eine graphische Darstellung (Abszisse *x*, Ordinate *D*) von experimentell beobachteten Durchgangscharakteristiken. Hierbei beziehen sich die schwach ausgezogenen Kurven auf den ursprünglich (also zur Zeit = $\tau =$ = Null) vorliegenden Sand, wohingegen die stark ausgezogenen Kurven für das gleiche Pulver nach einer Mahldauer von $\tau = 30$ Min. gelten.

Manche Autoren bevorzugen die Darstellung ihrer Ergebnisse in Form der „Rückstandscharakteristik“. Diese Angaben sind gleichwertig derjenigen der Durchgangscharakteristik, nur daß hier statt *D* der Wert $(100 - D) = R$ als Funktion von *x* gesetzt wird.

2. Die „Häufigkeit“ = *H* (= Kornhäufigkeitsverteilung) ist die Funktion

³ Vgl. hierzu *G. F. Hüttig*, loc. cit. — *G. F. Hüttig* und *R. Kieffer*, *Angew. Chem.* **64**, 45—48 (1952). — *O. Theimer* und *F. Moser*, *Kolloid-Z.* **128**, 68 (1952).

⁴ *W. Ebersold*, Dipl.-Arb., Techn. Hochsch. Graz (1953).

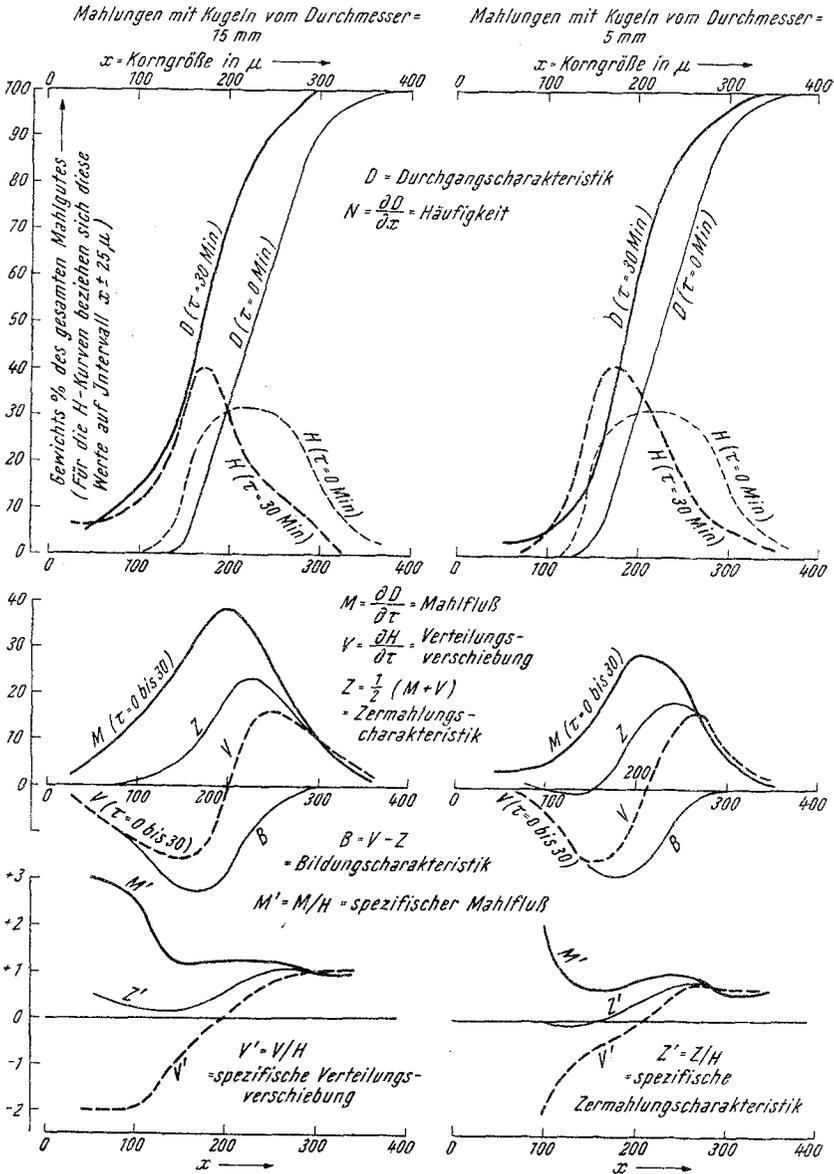


Abb. 1. Die verschiedenen Mahlunfunktionen.

$$H = \frac{\partial D}{\partial x} = f'(x).$$

In der Abb. 1 sind in den gleichen Feldern wie die Durchgangscharakteristiken auch die daraus abgeleiteten Häufigkeiten $= H$ eingezeichnet. Die Länge der Ordinate, die in irgendeinem x -Wert errichtet wird, ist ein Maß für die Häufigkeit, mit welcher die Körner von der Größe des betreffenden x in dem Pulver vorhanden sind. So entnimmt man beispielsweise der Abb. 1, daß in dem ursprünglichen ungemahlten Sand die Körner von einem Durchmesser $x = 225 \mu$ am häufigsten vorkommen.

3. Der „Mahlfluß“ $= M$ ist definiert durch den Ausdruck

$$M = \frac{\partial D}{\partial \tau}; (x = \text{konstant})$$

wobei τ die Zeit (= Dauer der Mahlung) bedeutet. Dieser Ausdruck gibt an, wieviele Gewichtsprocente des Pulvers sich im Verlaufe der Zeit $d\tau$ aus Körnern von der Größe $> x$ in Körner von der Größe $< x$ gewandelt haben. In der Abb. 1 ist der Mahlfluß für die vorhin herangezogenen experimentellen Beispiele graphisch dargestellt, wobei $d\tau = 30$ Min. gesetzt ist. Man sieht, daß bei den mit Kugeln von 15 mm Durchmesser ausgeführten Versuchen der Mahlfluß bei etwa $x = 200 \mu$ ein deutliches Maximum hat.

Werden in irgendeinem Größengebiet die Werte für den Mahlfluß negativ, so bedeutet dies, daß in diesem Gebiete die Mühle vorwiegend nicht größere Stücke zerkleinert, sondern im Gegenteil kleinere Stücke zu größeren zusammenschweißt (zusammensintert). Diese Erscheinungen sind bedeutsam für die mit dem „Zermahlungsgleichgewicht“ zusammenhängenden Fragen. Die in der Abb. 1 dargestellten Mahlflüsse zeigen in keinem Gebiete negative Werte.

Für manche Zwecke ist es anschaulich, den Mahlfluß als „spezifischen Mahlfluß“

$$= M' = M/H$$

anzugeben. Auf diese Weise wird der Mahlfluß immer auf das gleiche in der Korngröße x vorhandene Pulvergewicht bezogen. Die graphische Darstellung der Abb. 1 (unterer Teil) zeigt, daß sich der spezifische Mahlfluß von dem Gebiete der größten bis herab zu etwa $x = 150 \mu$ nur wenig ändert; immerhin liegt namentlich bei den mit Kugeln von 5 mm Durchmesser ausgeführten Versuchen auch in diesem Gebiet ein deutliches Maximum bei etwa $x = 250 \mu$, dessen Lage und Höhe für die Wechselwirkung zwischen Mühlenbeschaffenheit und Mahlgut charakteristisch sein dürfte. Unterhalb etwa $x = 150 \mu$ steigt der spezifische Mahlfluß um so mehr an, je kleiner die Teilchengröße wird. Der spezifische Mahlfluß ist in allen beobachteten Gebieten bei den

mit 5-mm-Kugeln durchgeführten Versuchen geringer, als bei den mit 15-mm-Kugeln ausgeführten, jedoch zeigt eine geringfügige Extrapolation, daß sich etwa unterhalb $x = 80 \mu$ diese Sachlage gerade umkehrt.

4. Als „Verteilungsverschiebung“ $= V$ bezeichnen wir den Ausdruck

$$V = - \frac{\partial H}{\partial \tau}; \quad (x = \text{konstant}).$$

Dieser Ausdruck gibt also an, in welchem Ausmaße sich die durch einen bestimmten x -Wert gekennzeichnete Pulvermenge im Verlaufe der Mahlungsdauer $d\tau$ ändert. Es ist selbstverständlich, daß diese Menge in den Gebieten der großen Körner abnehmen, in denen der kleinen Körner im gleichen Ausmaße zunehmen muß. Da die Abnahme der positiven Leistung der Mühle entspricht, haben wir die „Verteilungsverschiebung“ durch den *negativen* Differentialquotienten definiert. Auf diese Weise ergibt sich auch ein unmittelbarer Vergleich mit dem Mahlfluß, indem dieser mit der Verteilungsverschiebung dort identisch wird, wo der Mahlfluß ausschließlich auch einer Mühlenleistung entspricht. Die Kurven für V sind gleichfalls in der Abb. I eingezeichnet.

Auch hier ist es zweckmäßig, den Begriff der „spezifischen Verteilungsverschiebung“

$$= V' = V/H$$

einzuführen. Der Abb. I entnimmt man, daß die spezifische Verteilungsverschiebung um so höheren negativen Werten zustrebt, je kleiner x wird, daß also mit zunehmender Pulverfeinheit die Zerkleinerungstendenz der Mühle abnimmt, die Verschleißungstendenz zunimmt.

Die für einen bestimmten (konstanten) x -Wert angegebene Größe für die Verteilungsverschiebung setzt sich aus zwei algebraisch additiven Ausdrücken zusammen, so daß

$$V = - \frac{\partial H}{\partial \tau} = \frac{\partial H_1}{\partial \tau} - \frac{\partial H_2}{\partial \tau}$$

ist. Hierin bedeutet $\partial H_1/\partial \tau$ denjenigen Anteil des Pulvers von der Korngröße x , der durch Zermahlen in der Dauer von $\partial \tau$ in Körner von der Größe $< x$ umgewandelt wurde, also aus der Klasse der Körner von der Größe x *verschwunden* ist. Es bedeutet ferner $\partial H_2/\partial \tau$ denjenigen Anteil des Pulvers von der ursprünglichen Korngröße $> x$, welcher durch das Zermahlen in der Dauer von $\partial \tau$ in Körner von der Größe x umgewandelt wurde, also jene Menge, um welche die Klasse der Körner von der Größe x zugenommen haben. Diese beiden Ausdrücke betreffen die zwei Hauptfragen des Praktikers: In welchen Gebieten zermahlt die Mühle das Gut ($= Z$) und was für Korngrößen werden hierbei gebildet ($= B$)?

5. Die „Zermahlungscharakteristik“ = Z

$$= Z = \frac{\partial H_1}{\partial \tau} \sim \frac{1}{2} (M + V).$$

Von dieser Zermahlungscharakteristik läßt sich aussagen, daß sie kleiner sein muß als M und größer als V . Der Vorschlag von *O. Theimer* (loc. cit.), den Wert von Z wenigstens näherungsweise durch Bildung des arithmetischen Mittels aus M und V zu ermitteln, ist nur dort wirklich sinnvoll, wo der Unterschied von M und V gering ist, also in den Bereichen großer Pulverkörner (vgl. Abb. 1, mittlere Figurenreihe). Dort können wir auch feststellen, daß bei unseren Mühlen die absolute Zermahlungsleistung bei x etwa zwischen 225 und 250 μ ihr Maximum hat.

Die spezifische Zermahlungscharakteristik

$$= Z' = Z/H$$

ist am größten bei den größten Körnern und nimmt in der Richtung gegen die kleineren Körner kontinuierlich ab, um anscheinend etwa unterhalb $x = 150 \mu$ praktisch gleich Null zu werden.

6. Die „Bildungscharakteristik“ = B

$$= B = - \frac{\partial H_2}{\partial \tau}.$$

Von dieser Größe läßt sich aussagen, daß $B = V - Z$ sein muß. In bezug auf die von uns herangezogenen Beobachtungen (Abb. 1, mittlere Figurenreihe) kann mit Sicherheit nur festgestellt werden, daß bei dem Zermahlen so gut wie keine Körner gebildet werden, welche größer als etwa 280 μ sind.