

Zur Berechnung des chemischen Umsatzes in technischen Pulversystemen aus der exakt bestimmten Reaktionsgeschwindigkeit

Von Robert Jagitsch und Björn Mattsson

Chalmers Tekniska Högskola, Institution för teknisk kemi, Göteborg

Bei den chemischen Umsetzungen in Pulversystemen der keramischen Industrie (Glas, Tonwaren, Zement, Hochfeuerfest, Isolatoren, sintermetallurgische Produkte) wie der chemischen Technologie überhaupt (Sulfat, Chlorkalk, Phosphat, Pigment usw.) kommen die festen Reaktionspartner wegen der verhältnismäßig geringen Reaktionsgeschwindigkeit in festen Phasen stets mehr oder weniger feinteilig zur Anwendung. Während man nun aber längst gelernt hat, sich nicht mit Bezeichnung und Herkunft der Rohstoffe allein zu begnügen, sondern zu ihrer weiteren Charakterisierung die chemische Analyse heranzieht, so finden Korngröße und Form technischer Pulver nur in den seltensten Fällen genügend Aufmerksamkeit. Erst in letzter Zeit wurde (nach Erkenntnis der Bedeutung der Ausbildungsform technischer Adsorptionsmittel und Katalysatoren) mit steigendem Nachdruck auf den Einfluß topochemischer Faktoren auf das chemische Verhalten der Rohstoffe und damit für eine gleichmäßig-hochwertige Produktion hingewiesen¹.

In der folgenden Abhandlung soll gezeigt werden, daß eine kritische Behandlung der Frage nach der Größe der Umsetzung in Pulversystemen zu einer quantitativen Erfassung der Ausbeute führt; in komplizierten Systemen wird eine Beschäftigung mit derartigen Fragen zumindest vor Fehlschlüssen über den Reaktionsablauf bewahren.

1. Problemstellung

Charakteristisch für technische Pulver ist, daß sie nicht von einheitlicher Korngröße sind, sondern bei ihrer Herstellung oder durch Zerkleinerung nach ihrer Gewinnung eine bestimmte Korngrößenverteilung erhalten. Während man im allgemeinen sich damit begnügt, die obere Korngrenze durch Siebung festzulegen (eventuell kann auch die feinste Fraktion als unerwünschter Staub abgetrennt werden), bestimmt man für gewisse (keramische) Zwecke die mengenmäßige Verteilung der Fraktionen über

den gesamten Bereich. Eingehende Untersuchungen über Korngrößenverteilungen sind dementsprechend in erster Linie bei Tonen bekannt geworden, wobei unsere Kenntnisse über die kleinsten Fraktionen in letzter Zeit durch elektronenmikroskopische Untersuchungen stark erweitert wurden².

Wenn nun die Reaktionsverhältnisse in derartigen Pulvern einer quantitativen Untersuchung unterzogen werden sollen, dann müssen offenbar vorerst die wahren Reaktionsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von Zeit und Temperatur mit übersichtlichen Versuchsanordnungen bestimmt und diese dann in entsprechender Weise auf die Behandlung der geometrisch komplizierten, weil nicht einheitlichen Pulver zur Berechnung der Umsatzgeschwindigkeit angewendet werden. Da die Voraussetzungen für eine exakte Behandlung des Diffusionsvorganges gegeben sind und eine immer ausgedehntere Untersuchung spezieller Prozesse in letzter Zeit unseren Einblick in die Elementarvorgänge bei Umsetzungen in festen Phasen weiter vertieft hat und endlich auch die formalen Verfahren zur Behandlung der Diffusionsprozesse bei bestimmten geometrischen Ausbildungen der Diffusionswege klargelegt sind, gilt es hier also bloß, den Einfluß der Korngrößenverteilung auf die Ausbeute klarzulegen.

2. Methodik

Als Beispiel zur Behandlung des vorliegenden Problems wurde die Spinellbildung im System $\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ gewählt, da bei dieser Reaktion die Kinetik kürzlich eingehend studiert wurde³. Die Geschwindigkeit der Umsetzung, die in einer durchaus einseitigen Wanderung von ZnO durch das Reaktionsprodukt besteht, ergab sich für die hier angewendete Reaktionstemperatur durch Interpolation zu

$$k''_{1196^\circ\text{C}} = \left(\frac{\Delta m}{q}\right)^2 \frac{l}{t} = 8,13 \cdot 10^{-7} [\text{g}^2 \cdot \text{cm}^{-4} \cdot \text{sec}^{-1}],$$

² Vgl. W. EITEL und C. SCHUSTERIUS, Chem. d. Erde **13**, 322 (1940); M. ARDENNE, K. ENDELL und U. HOFMANN, Ber. dtsh. Keram. Ges. **21**, 209 (1940).

³ B. BENGTSOON und R. JAGITSCH, Arkiv Kemi, Min. Geol. (Stockholm) **24 A**, Nr. 18 (1947).

¹ Vgl. J. A. HEDVALL, Ber. dtsh. Keram. Ges. **24**, 318 (1943).

wobei Δm die Menge eindiffundierte ZnO in Gramm, q den Diffusionsquerschnitt in cm^2 und t die Versuchszeit in Stunden bedeuten.

Als Aluminiumoxyd wurde dichtgesinterter Korund (aus Al_2O_3 , wasserfreie Tonerde, rein, Görlitz) in pulverisierter Form verwendet. Durch die Wahl von Sinterkorund können bei bekannter Korngrößenverteilung unter Annahme von Kugel- oder Würfelgestalt die geometrischen Abmessungen in Rechnung gestellt werden, während niedriger gebrannte Al_2O_3 -Pulver wegen deren unregelmäßigen Gestalt mathematisch schwieriger zu erfassen sind.

Nach Bestimmung der Korngrößenverteilung nach ANDREASEN⁴ ist dann die Möglichkeit gegeben, aus der bekannten Diffusionsgeschwindigkeit die Größe der Umsetzung in den einzelnen Korngrößenfraktionen in Abhängigkeit von der Zeit zu berechnen und mit der am Pulver experimentell bestimmten Umsatzgeschwindigkeit zu vergleichen.

Zur Umsetzung wurde das Korundpulver mit überschüssigem ZnO (Zinc oxide 841418/39113, Grahamstreet, London N1) im Molverhältnis 1:2, entsprechend einem Gewichtsverhältnis 0,63, gemischt, um eine allseitige Umhüllung der Korundkörner, auf denen sich erfahrungsgemäß die Spinellschichte ausbildet, zu sichern. Auf die Art des Reaktionsproduktes ist der Überschuß von ZnO ohne Einfluß, da keine höhere Verbindung als ZnAl_2O_4 gebildet wird. Das Pulver wurde sodann zu Pastillen gepreßt und diese nach der Wägung (zwecks Bestimmung des Al_2O_3 -Gehaltes der Pastillen) verschieden lang auf die konstante Versuchstemperatur gebracht. Nach der Umsetzung wurde das nicht umgesetzte ZnO in verdünnter Salzsäure (1:1) gelöst und nach dem Aufschluß der verbleibenden Al_2O_3 und ZnAl_2O_4 in KHSO_4 das in Reaktion getretene ZnO gravimetrisch bestimmt. Die Fällung erfolgte als ZnS unter Zusatz von Weinsäure und HgCl_2 . In Vorversuchen wurde außerdem festgestellt, daß das gesamte nicht reagierende ZnO in der Salzsäure gelöst wird und kein Angriff auf den Spinell erfolgt.

3. Korngrößenverteilung des Korundpulvers

Die Korngrößenbestimmung erfolgte nach der Pipettenmethode nach ANDREASEN. Als Suspensionsmittel wurde Glycerin verwendet, dessen Viskosität zu 1,90 poise bestimmt wurde. Die Kantlänge der Körner ergibt sich damit aus

$$K = 141 \sqrt{\frac{h}{t}} \cdot \sqrt{\frac{\eta}{s_K - s_F}}$$

mit einem spezifischen Gewicht von Korund $s_K = 4,0$, dem spezifischen Gewicht der Suspension $s_F = 1,27$ und der Viskosität $\eta = 1,90$ zu

⁴ H. ANDREASEN, Ber. dtsch. Keram. Ges. 11, 251 (1930).

$$K = 117 \sqrt{\frac{h}{t}} \cdot 10^{-4} \text{ cm,}$$

wobei h die Fallhöhe in cm und t die Fallzeit in Minuten bedeuten.

Die Korngrößenverteilung des verwendeten Korundpulvers geht aus Tab. 1 hervor. Die ursprüngliche Menge Al_2O_3 in der Suspension C_0 war 7,4062 g/l; C_t/C_0 ist derjenige Bruchteil der gesamten Körner, die eine kleinere Kantlänge besitzen, als sie der Zeit t und der Fallhöhe h entspricht.

Tabelle 1

Probe Nr.	Zeit in Minuten	h in cm	$\sqrt{\frac{h}{t}}$	g Al_2O_3 in 10 cm^3 Suspens.	C_t	C_t/C_0 in %	K in 10^{-4} cm
1	1	20,1	4,48	0,0738	7,28	99,5	525
2	5,5	19,6	1,89	0,0694	6,94	93,7	221
3	12	19,1	1,26	0,0663	6,63	89,6	147
4	20,5	18,7	0,96	0,0635	6,45	87,2	112
5	64	18,3	0,54	0,0532	5,32	71,7	63,2
6	252	17,8	0,27	0,0273	2,73	36,9	31,6
7	1400	17,3	0,11	0,0055	0,55	7,44	12,8
8	2835	16,8	0,077	0,0028	0,28	3,78	9,0

4. Berechnung des Umsatzes aus der Geschwindigkeitskonstante und der Kornverteilung

Mit Hilfe der früher angegebenen Reaktionsgeschwindigkeitskonstante und dem spez. Gewicht von ZnAl_2O_4 , $s_{sp} = 4,57$, kann für die bei der experimentellen Untersuchung des Umsatzes angewendeten Versuchszeiten von 1, 2, 3, 5 bzw. 7 Stunden leicht die jeweilige Schichtdicke des Reaktionsproduktes berechnet werden (Tab. 2).

Tabelle 2

Versuchsdauer in Stunden	$\left(\frac{\Delta m}{q}\right)^2 \cdot 10^6$	mg ZnO/ cm^2	mg Zn Al_2O_4 / cm^2	Dicke der Spinellschichte in 10^{-4} cm
1	0,8128	0,90	2,03	4,45
2	1,6256	1,27	2,87	6,29
3	2,4384	1,56	3,52	7,71
5	4,0640	2,02	4,54	9,94
7	5,6896	2,38	5,37	11,7

Der diesen Schichtdicken entsprechende Umsatz u verhält sich zum insgesamt möglichen Umsatz U wie

$$\frac{u}{U} = \frac{R^3 - (R-y)^3}{R^3}$$

worin R den Radius der Korundkörner und y die Dicke der umgesetzten Al_2O_3 -Schichte bedeuten. Es ist also⁵

$$u = U \left(1 - \frac{(R-y)^3}{R^3}\right)$$

⁵ Vgl. W. JANDER, Z. anorg. allg. Chem. 163, 1 (1927).

Die Dicke der umgesetzten Korundschicht kann aus der oben berechneten Dicke der Spinellschicht nach den jeweiligen Erhitzungszeiten berechnet werden aus

$$y_{Al_2O_3} = y_{ZnAl_2O_4} \cdot \frac{M_{ZnAl_2O_4} \cdot M_{Al_2O_3}}{M_{ZnAl_2O_4} \cdot S_{Al_2O_3}}$$

zu

$$y_{Al_2O_3} = 0,635 \cdot y_{ZnAl_2O_4}$$

Im folgenden soll die Berechnung des Umsatzes im Pulvergemisch bei der einstündigen Erhitzung für eine gewisse Fraktion *explizite* durchgeführt werden. Das Ergebnis für die gesamten Fraktionen aller Versuchszeiten werden in den darauffolgenden Tabellen mitgeteilt.

Als Beispiel sei die Fraktion mit einer Kantenlänge von $31,6 \cdot 10^{-4}$ bis $63,2 \cdot 10^{-4}$ cm, entsprechend 34,8 % der gesamten Korundmenge, gewählt. Faßt man diese Körner näherungsweise als Kugeln auf, so ist ihr mittlerer Radius dementsprechend $23,7 \cdot 10^{-4}$ cm. Die in dieser Fraktion maximal mögliche Umsetzung *U* ist zufolge des Gewichtes der Pastille, die bei dem einstündigen Versuch zur Anwendung kam und einen Al_2O_3 -Gehalt von 0,2170 g (entsprechend 0,1728 g ZnO) aufwies, gleich

$$U = \frac{34,8}{100} \cdot 0,1728 = 0,0602 \text{ g ZnO gebunden.}$$

Da die Dicke der Spinellschicht nach einstündiger Erhitzungsdauer bei $1196^{\circ} C$, wie oben berechnet, gleich $4,45 \cdot 10^{-4}$ cm ist, entsprechend einer Dicke der umgesetzten Korundschicht von $2,83 \cdot 10^{-4}$ cm, beträgt die Umsetzung in dieser Fraktion nach

$$u = 0,0602 \left[1 - \left(\frac{20,87}{23,70} \right)^3 \right] = 0,01910 \text{ g.}$$

Tabelle 3

Theoretischer Umsatz bei einer Versuchsdauer von 1 Stunde (Pastille Nr. 1). Dicke der umgesetzten Al_2O_3 -Schichte: $y = 0,635 \cdot 4,45 \cdot 10^{-4} = 2,83 \cdot 10^{-4}$ cm. Gewicht der Pastille: 0,5791 g. Gehalt an Al_2O_3 : 0,2170 g. ZnO-Verbrauch bei vollständiger Umsetzung: 0,1728 g

Korngrößenfraktion in 10^{-4} cm	Menge in Prozent	Maximale Umsetzung U	Mittlerer Radius R in 10^{-4} cm	R - y	Umsatz u in mg
K_{max} - 221	6,3	0,01090	186,5	183,67	0,49
221 - 147	4,1	0,00708	92,0	89,17	0,64
147 - 112	2,4	0,00415	64,75	61,92	0,52
112 - 63,2	15,5	0,02680	43,80	40,97	4,86
63,2 - 31,6	34,8	0,06020	23,70	20,87	19,10
31,6 - 12,8	29,46	0,05090	11,10	8,27	29,91
12,8 - 9,0	3,66	0,00633	5,45	2,62	5,62
9,0 - 5,76	1,98	0,00342	3,66	0,83	3,38
5,76 - 0,0	1,80	0,00311	Vollständig umgesetzt		3,11
					= 0,0676 g
					= 39,2 %

Tabelle 4

Theoretischer Umsatz bei einer Versuchsdauer von 2 Stunden (Pastille Nr. 2). Dicke der umgesetzten Al_2O_3 -Schichte: $y = 4,0 \cdot 10^{-4}$ cm. Gewicht der Pastille: 0,5686 g. Gehalt an Al_2O_3 : 0,2130 g. ZnO-Verbrauch bei vollständiger Umsetzung: 0,1696 g

Korngrößenfraktion in 10^{-4} cm	Menge in Prozent	Maximale Umsetzung U	Mittlerer Radius R in 10^{-4} cm	R - y	Umsatz u in mg
$K_{m,p,v}$ - 221	6,3	0,01067	186,5	182,5	0,67
221 - 147	4,1	0,00696	92,0	88,0	0,87
147 - 112	2,4	0,00407	64,75	60,75	0,71
112 - 63,2	15,5	0,02630	43,80	39,80	6,57
63,2 - 31,6	34,8	0,05910	23,70	19,70	25,15
31,6 - 12,8	29,46	0,05030	11,10	7,10	37,00
12,8 - 8,0	4,44	0,00754	5,20	1,20	7,45
8,0 - 0,0	3,00	0,00508	Vollständig umgesetzt		5,09
					= 0,0835 g
					= 49,2 %

In gleicher Weise gibt die fraktionenweise Berechnung des theoretischen Umsatzes bei 3stündiger Erhitzung (Pastille Nr. 3) 55,5 %, bei 5stündiger Erhitzung (Pastille Nr. 4) 63,3 % und bei 7stündiger Erhitzung (Pastille Nr. 5) 68,3 %.

5. Experimentelle Bestimmung des Umsatzes

Für jede Versuchsdauer wurde eine Pastille aus dem Reaktionsgemisch gepreßt, gewogen und auf die konstante Versuchstemperatur von $1196^{\circ} C$ gebracht. Nach Abbruch der Erhitzung wurde die Menge des an Al_2O_3 gebundenen ZnO bestimmt und der Umsatz daraus berechnet (Tab. 5 mit der theoretisch bestimmten Ausbeute in der letzten Kolonne).

Tabelle 5

Pastille Nr.	Versuchsdauer in Stunden	Gewicht der Pastille	Al_2O_3 -Gehalt der Pastille	Zinkoxyd		Umsetzung u in Prozent	
				äquivalent dem Al_2O_3	gebunden	exp.	theor.
1	1	0,5791	0,2170	0,1728	0,0665	38,5	39,2
2	2	0,5686	0,2130	0,1696	0,0787	46,4	49,2
3	3	0,5850	0,2192	0,1746	0,0918	52,6	55,5
4	5	0,5094	0,1909	0,1520	0,0934	61,3	63,3
5	7	0,6148	0,2303	0,1833	0,1306	71,2	68,3

6. Besprechung der Ergebnisse

Die Übereinstimmung zwischen der experimentell bestimmten und der (auf Grund der exakt bestimmten Reaktionsgeschwindigkeit an Hand der Korngrößenverteilung) theoretisch berechneten Umsatz-Zeitkurve legt es nahe, auch bei technischen Untersuchungen die Umsetzungsverhältnisse nach dieser rationellen Methode zu studieren. Eine

eingehendere Beschäftigung mit dem Einfluß der Korngröße auf die Reaktionsausbeute wird selbst in den Fällen, wo eine komplizierte Ausbildungsform der Pulver eine quantitative Erfassung der Umsatzgeschwindigkeit erschwert oder gar unmöglich macht, die Einsicht des Chemikers in den Prozeß vertiefen. Es seien in diesem Zusammenhang folgende weitere Ergebnisse mitgeteilt.

a) Temperaturfunktion der Ausbeute in technischen Pulvern

Bei der Untersuchung der Temperaturabhängigkeit der Ausbeute in technischen Pulvern bei bestimmten konstanten Erhitzungsdauer wird oft bei verhältnismäßig niedrigen Temperaturen bereits ein beachtlicher Umsatz festgestellt, der bei steigender Temperatur kaum oder gar nicht ansteigt, bis endlich bei wesentlich höheren Temperaturen ein steiler Anstieg der Ausbeutekurve einsetzt.

Eine derartige Temperaturfunktion bedeutet nun keineswegs, daß die Reaktionsgeschwindigkeit in dem Intervall der temperaturunabhängigen Ausbeute die wahre Reaktionsgeschwindigkeit nicht größer wird oder die Umsetzung im Temperaturgebiet des beginnenden Steilanstieges der Ausbeute neuerdings einsetzt, sondern daß in dem betreffenden Pulver eine Fraktion vorkommt, die einen um Größenordnungen kleineren Korndurchmesser besitzt als die übrigen Körner.

Als Beispiel sei die von HEDVALL und Mitarbeitern⁶ untersuchte Umsetzung zwischen Kalk und verschiedenen Tonen angeführt, bei welcher nach jeweils ein-stündiger Erhitzungsdauer mit steigender Reaktionstemperatur folgende durch Umsetzung mit bei 800°C vorerhitztem Pholerit gebundene Mengen Kalk festgestellt wurden:

Versuchstemp. °C:	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1150
Gew. % CaO geb.	3,1	3,2	4,4	4,2	4,1	8,5	43,2	89,0	98,5

Während die Menge der wesentlich kleineren Körner unmittelbar aus dem Versuchsergebnis entnommen werden kann, ist es kaum möglich, über den Unterschied in der Größe der Diffusionswege bei den bei niedriger Temperatur bereits reagierenden Anteilen und der Hauptmenge des Tones irgendwelche Aussagen zu machen. Nur unter der Voraussetzung, daß in beiden Fällen bloß ein Unterschied in der Größe der Partikeln und nicht in der Form derselben besteht und der Prozeß in beiden Fällen in seiner Geschwindigkeit durch den gleichen Wanderungsvorgang bestimmt wird, der in seiner Abhängigkeit von der Temperatur bekannt ist, könnte eine Berechnung der Korngröße der feinteiligen Anteile erfolgen. Ganz allgemein wird man da berücksichtigen müssen, daß mit kleiner werdender Korngröße das Verhältnis

⁶ J. A. HEDVALL, Chalmers Tekn. Högskolas Handlingar Nr. 2, Gothenburg, 1942.

zwischen Oberfläche und Volumen immer mehr anwächst und damit bei den um Größenordnungen kleineren Anteilen (die wohl in erster Linie den Spitzen und vorstehenden Teilen an der Oberfläche der unregelmäßigen Partikeln zuzuordnen sind) die Oberflächenreaktion gegenüber der Gitterdiffusion vorherrscht.

b) Temperaturinkrement bei Pulverreaktionen

Die Ausbeute-Temperaturkurven geben außerdem kein richtiges Bild von der Temperaturabhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit. Nachdem die Fraktionen mit kleinerem Korndurchmesser bei viel niedrigerer Temperatur vollständig abreagieren als die Anteile mit größerem Korn, ist der Anstieg der Ausbeute mit der Temperatur stets viel kleiner als der Anstieg der wahren Reaktionsgeschwindigkeit.

c) Über die exponentielle Zeitfunktion bei der Umsetzung zwischen festen Stoffen nach TAMMANN

Bei der Untersuchung der Anlaufgeschwindigkeit von Metallen sowie bei Pulverreaktion zwischen festen Stoffen wurde von TAMMANN⁷ festgestellt, daß in gewissen Fällen nicht eine der Diffusionsgleichung entsprechende «quadratische» Beziehung

$$x^2 = k \cdot t$$

die Versuchsergebnisse wiedergibt, sondern eine logarithmische Beziehung von der Form

$$x = a \log t + b,$$

in der x die Schichtdicke, t die Versuchsdauer und a und b Konstanten bedeuten. Eine theoretische Herleitung dieser Gleichung gab später JOST⁸, indem er bei der Auflösung des FICKSchen Diffusionsgesetzes den Einfluß des chemischen Potentials auf die Wanderungsgeschwindigkeit berücksichtigte. Gleichzeitig wies er jedoch, wie vor ihm FISCHBECK⁹ und WAGNER¹⁰, darauf hin, daß der TAMMANNschen Beziehung in dem angewendeten Stadium der Umsetzung keine theoretische Bedeutung zukommen kann.

Das Ergebnis dieser Arbeit bestätigt diese Auffassung zur Gänze und zeigt, daß es abwegig ist, durch nicht begründete Annahmen die TAMMANNsche Beziehung bei Pulverreaktionen aus dem Diffusionsgesetz herleiten zu wollen, wie dies GUILLISSEN und VAN RYSELBERGHE¹¹ getan haben. Diese Autoren

⁷ Vgl. G. TAMMANN und W. KÖSTER, Z. anorg. allg. chem. **123**, 196 (1922); G. TAMMANN, Z. anorg. allg. chem. **149**, 21 (1925); Z. angew. Chem. **39**, 869 (1926).

⁸ W. JOST, Diffusion und chemische Reaktion in festen Stoffen, Dresden und Leipzig (1937).

⁹ K. FISCHBECK, Z. anorg. allg. Chem. **165**, 46 (1927).

¹⁰ C. WAGNER, Z. angew. Chem. **49**, 735 (1936).

¹¹ J. GUILLISSEN und P. J. VAN RYSELBERGHE, Trans. Amer. Elektrochem. Soc. **59**, 95 (1931).

setzen bei der Beschreibung ihrer Untersuchung am System $\text{ZnO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ im FICKSchen Gesetz

$$dx/dt = D \cdot \frac{dc}{dl}$$

den Konzentrationsgradienten dc/dl umgekehrt proportional der Versuchsdauer

$$dc/dl = \frac{\text{const}}{t}$$

und erhalten damit die TAMMANSsche Beziehung.

Nach unserem Ergebnis ist in Pulvern nicht einheitlicher Korngrößen bei konstanter Reaktionstemperatur eine Zeitfunktion zu erwarten, die wegen der wesentlich rascheren Umsetzung der kleineren Körner im Verhältnis zu den größeren näherungsweise durch eine Exponentialfunktion wiedergegeben werden kann; in unserem Fall

$$u = 35,0 \log t + 38,7.$$

Daß diese Funktion ohne theoretische Bedeutung ist, geht aus der obigen Behandlung des Reaktions-

ablaufes unter Anwendung der wahren Reaktionsgeschwindigkeit und Aufteilung des Pulvers in Fraktionen verschiedener Korngrößen hervor: die Beziehung sagt nicht mehr aus, als daß du/dt mit der Zeit sehr rasch abnimmt.

7. Zusammenfassung

Es wird gezeigt, daß die Größe des chemischen Umsatzes in technischen Pulvern aus der exakt, d. h. an auswertbarer Versuchsanordnung bestimmter Reaktionsgeschwindigkeit und der Korngrößenverteilung des Pulvers berechnet werden kann.

Auf die Bedeutung einer rationellen Untersuchung des Reaktionsablaufes für das Verständnis der Temperaturabhängigkeit von Pulverreaktionen wird hingewiesen.

Es wird gezeigt, daß die TAMMANSsche Exponentialfunktion bei Pulverreaktionen erwartungsgemäß keine theoretische Bedeutung besitzt.