

5-Methyl-5-oxy-1,3,4,5-tetrahydro-benz(cd)indol (XVI aus XV)<sup>1)</sup>. 0,43 g 5-Keto-1,3,4,5-tetrahydro-benz(cd)indol<sup>2)</sup> wurden in 15 cm<sup>3</sup> abs. Tetrahydro-furan gelöst und unter gutem Rühren und Kühlen mit Eis innerhalb einer Std. zu einer Grignard-Lösung aus 0,60 g Magnesium und 3,64 g Methyljodid in 50 cm<sup>3</sup> abs. Äther zugetropft. Nach Beendigung der Zugabe wurde noch eine halbe Std. bei 0° und 12 Std. bei Zimmertemperatur weitergerührt. Der entstandene gelbe Niederschlag wurde mit gesättigter Ammoniumchloridlösung vorsichtig zersetzt, die ätherische Schicht abgetrennt und die wässrige Lösung nochmals gut mit Äther extrahiert. Die Extrakte wurden vereinigt, neutral gewaschen, getrocknet und eingedampft. Es blieben 0,40 g braunes Öl zurück, das in Petroläther aufgenommen und an Alox II chromatographiert wurde. Die Äther-Benzol-3:1-Eluate kristallisierten. Die aus Äther-Petroläther umkristallisierte Substanz schmolz bei 130°. Ausbeute 0,30 g. Zur Analyse wurde das Präparat 24 Std. bei Zimmertemperatur im Hochvakuum getrocknet.

C<sub>12</sub>H<sub>13</sub>ON Ber. C 76,97 H 7,00% Gef. C 76,81 H 7,08%

Die Analysen wurden in unserer mikroanalytischen Abteilung (Leitung *W. Manser*) ausgeführt.

### Zusammenfassung.

Im Zusammenhang mit Versuchen zur Totalsynthese von Verbindungen der Ergolinreihe wurde, ausgehend von 4-Chlorindol-2-carbonsäure (I) bzw. deren Äthylester Ia, die Herstellung einer grösseren Anzahl bisher wenig oder unbekannter 4-Chlorindol-Derivate, wie des 4-Chlor-tryptophans (IV), des 4-Chlor-skatols (XI), des 4-Chlor-skatolyl-acetons (XII), des 4-Chlorindol-3-aldehyds (XIII) u. a., beschrieben. Die Darstellung der neuen Derivate erfolgte meist nach bewährten und teilweise verbesserten Vorschriften zur Bereitung der bekannten chlorfreien Analoga obiger Verbindungen. Aus dem sog. Uhle-Keton XV wurde ein neues Tetrahydro-benz(cd)indol-Derivat XIV hergestellt.

Organisch-chemisches Laboratorium  
der Eidg. Techn. Hochschule, Zürich.

## 56. Untersuchungen an Schütt- und Wirbelschichten

von A. Guyer, E. Graf und A. Guyer jr.

(24. I. 55.)

Im Anschluss an verschiedene Veröffentlichungen der letzten Jahre soll im nachfolgenden über den Einfluss der Stoffcharakteristiken auf die Wirbelschicht sowie über eine Methode zur Berechnung der zur Erzeugung einer Wirbelschicht notwendigen Gas-massengeschwindigkeit berichtet werden. Letztere ist besonders bei der Dimensionierung von Wirbelschichtreaktoren von praktischer Bedeutung.

<sup>1)</sup> Vgl. dazu *C. A. Grob & P. Payot*, Helv. **36**, 839 (1953).

<sup>2)</sup> Hergestellt nach *F. C. Uhle*, J. Amer. chem. Soc. **71**, 761 (1949).

Es wurden zu diesem Zwecke an einer Reihe von verschiedenartigen Materialien einerseits der Druckabfall in der statischen Schicht, andererseits sämtliche für die Erzeugung einer Wirbelschicht massgeblichen Werte bestimmt und anschliessend rechnerisch und graphisch ausgewertet.

### 1. Experimentelles, Apparatur und Materialkonstanten.

#### Nomenklatur.

D	Rohrdurchmesser . . . . .	cm
D <sub>p</sub>	Partikeldurchmesser . . . . .	cm (mm)
f	Reibungsfaktor . . . . .	—
G	Gasmassengeschwindigkeit . . . . .	g/cm <sup>2</sup> sec
g	Fallbeschleunigung . . . . .	981 cm/sec <sup>2</sup>
k	Konstante . . . . .	—
L	Schichthöhe . . . . .	cm
ΔP	Druckabfall (in Zeichnungen und Nomogrammen usw. in g*/cm <sup>2</sup> angegeben) . . . . .	dyn/cm <sup>2</sup>
Δp	Druckabfall pro Längeneinheit (in Zeichnungen und Nomogrammen usw. in g*/cm <sup>2</sup> /cm angegeben) . . . . .	dyn/cm <sup>3</sup> /cm
q	Rohrquerschnitt . . . . .	cm <sup>2</sup>
R <sub>e</sub>	Reynolds'sche Zahl . . . . .	—
v	lineare Gasgeschwindigkeit . . . . .	cm/sec
w	Gewicht der Festsubstanz . . . . .	g*
γ <sub>g</sub>	Dichte des Gases (spez. Gew.) . . . . .	g/cm <sup>3</sup> (g*/cm <sup>3</sup> )
γ <sub>f</sub>	Dichte des Feststoffes (spez. Gew.) . . . . .	g/cm <sup>3</sup> (g*/cm <sup>3</sup> )
ε	relatives Kornzwischenraumvolumen . . . . .	—
λ	Formfaktor . . . . .	—
μ	Viskosität des Gases . . . . .	g/cm sec

Die praktischen Versuche wurden in Plexiglasrohren von 60 und 80 mm Durchmesser ausgeführt, welche mit einem feinen Sieb als Substanzträger und mit Druckmessstellen ausgerüstet waren. Die Gasmengenmessung erfolgte mittels Staublenden und Rotametern.

Die untersuchten Materialien und ihre Eigenschaften sind in der nachfolgenden Tab. zusammengestellt.

**Tabelle 1.**  
Untersuchte Materialien und Materialkonstanten.

Material	Spez. Gew.	Untersuchte Korngrößenbereiche in mm
Glaskugeln . . . . .	2,81	0,2 bis 0,6
Aluminogel . . . . .	1,74	0,12 bis 0,75
Silicium . . . . .	2,42	0,12 bis 0,40
Koks . . . . .	1,86	0,12 bis 0,50
Sand . . . . .	2,63	0,12 bis 0,40
Silicagel . . . . .	0,94	0,20 bis 0,60
Holzkohle . . . . .	0,63	0,30 bis 0,39
Aluminiumgriess . .	2,70	0,30 bis 0,75
Kaliumchlorid . . .	1,98	0,10 bis 0,49
Ammoniumsulfat . .	1,77	0,20 bis 0,60

Die Materialkonstanten sind wie folgt definiert:

a) Unter mittlerem Partikeldurchmesser wird, da die Korngrößenfraktionen innerhalb enger Grenzen gehalten wurden, das arithmetische Mittel der Sieboffnungen verstanden.

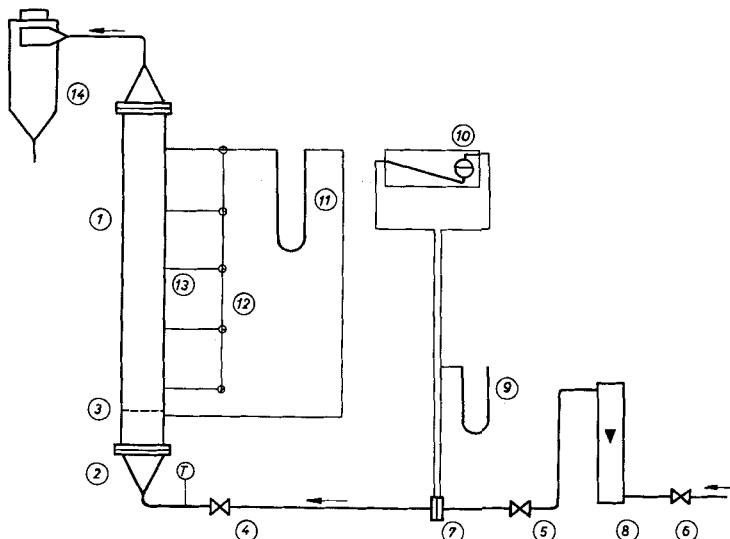


Fig. 1.  
Apparatur.

1 Plexiglasrohr. 2 Konische Gaseinlassöffnung. 3 Sieb. 4, 5, 6 Drosselventile. 7 Staurand. 8 Rotameter. 9 Absolutdruck-Manometer. 10 Differenzdruck-Manometer. 11 Manometer zur Messung des Druckverlustes der Schüttsschicht. 12, 13 Druckmess-Stellen. 14 Zyklonabscheider.

b) Das wahre spezifische Gewicht eines Festkörpers stellt das Gewicht von  $1 \text{ cm}^3$  der Substanz ohne eventuelle Poren, und das scheinbare spezifische Gewicht eines porösen Stoffes stellt das Gewicht von  $1 \text{ cm}^3$  der Substanz einschliesslich aller Poren dar. Die Bestimmung des scheinbaren spezifischen Gewichtes geschah nach der Methode von Herbst<sup>1)</sup> mit Quecksilber. Entsprechendes gilt für Dichten.

c) Die Angaben von Gas- und Massengeschwindigkeiten sowie von Reynolds'schen Zahlen beziehen sich stets auf  $20^\circ$  und einen Atmosphärendruck von 730 mm Hg.

Die notwendigen Daten konnten auf folgende Weise erhalten werden: Aus der Schichthöhe L des eingefüllten Materials vom Gewicht w, dem Rohrquerschnitt q und dem spezifischen Gewicht  $\gamma_f$  des Materials konnte das relative Kornzwischenraumvolumen  $\varepsilon$  nach Formel (1) erhalten werden.

$$\varepsilon = 1 - \frac{w}{L \cdot q \cdot \gamma_f} \quad (1)$$

Bei den verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten v des Gases wurden sodann die entsprechenden Druckabfälle  $\Delta P$  und Schichthöhen L registriert. Aus der Gasgeschwindigkeit, bezogen auf das Leerrohr, konnte die Reynolds'sche Zahl  $R_e = D_p \cdot v \cdot \gamma_g / \mu$  festgestellt werden.

<sup>1)</sup> Herbst, Chem. Z. 50, 49 (1926).

## 2. Maximaler Druckabfall.

Der maximale, in einer Wirbelschicht auftretende Druckabfall berechnet sich bekanntlich aus der Gleichung

$$\Delta P = L (1 - \varepsilon) (\gamma_f - \gamma_g) g \quad (2)$$

oder, bei Vernachlässigung der Dichte des Gases, aus dem Materialgewicht und dem Rohrquerschnitt,

$$\Delta P = \frac{w}{q} \quad (\Delta P \text{ hier in g/cm}^2). \quad (3)$$

Bei den meisten Versuchen wird nun nicht der der Gleichung (3) entsprechende Wert beobachtet, sondern die Messwerte liegen tiefer. Es zeigt sich, dass bei Schichthöhen, die im Vergleich zum Rohrdurchmesser klein sind, sich grössere Unterschiede einstellen, indem der Druckabfall nur ca. 80–90 % des theoretisch berechneten beträgt. Während frühere Autoren recht unterschiedliche Abweichungen beobachteten, konnte bei den vorliegenden Untersuchungen ein direkter Zusammenhang mit der Schichthöhe festgestellt werden.

In Fig. 2 sind die Messresultate, die in einem Rohr von 60 mm Durchmesser bei Verwendung von Glaskugeln als Feststoff und Luft als strömendem Medium erhalten wurden, graphisch dargestellt.

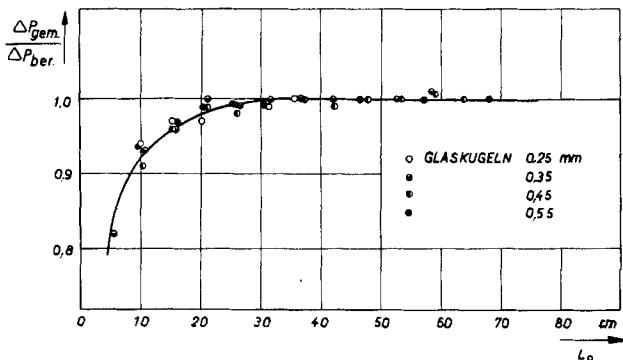


Fig. 2.

Verhältnis von gemessenem zu berechnetem Druckabfall in Funktion der Schichthöhe.

Die eben beschriebenen Erscheinungen können dadurch erklärt werden, dass in einer Wirbelschicht ein kleiner Teil der auf dem Sieb aufliegenden Partikel nicht vom Gas getragen wird und deshalb eine Verkleinerung des Druckverlustes bewirkt. Mit steigender Schichthöhe fällt dieser stationäre Teil immer weniger ins Gewicht, wodurch die in Fig. 2 dargestellte Kurve sich dem Wert 1 nähert. Bei Schichthöhen, welche ungefähr von 5 facher Grösse des Rohrdurchmessers sind, stimmen berechneter und gemessener Druckabfall überein. Beim Punkt losester stabiler Packung ist der Druckabfall

meist etwas höher als in der eigentlichen Wirbelschicht, da zur Lösung der aneinander anliegenden Partikel infolge der grossen Reibungskräfte ein etwas höherer, von der Packungsdichte abhängiger Druck erforderlich ist.

### 3. Druckabfall in der statischen Schicht.

Gemäss der Gleichung

$$\Delta P = \frac{2 f G^2 L \lambda^2 (1 - \varepsilon)^2}{D_p \cdot \gamma_g \cdot \varepsilon^3} \quad (4)$$

ist der Druckverlust pro Längeneinheit proportional dem Quadrat der Gasmassengeschwindigkeit<sup>1)</sup>. Im Gebiete laminarer Strömung ( $R_e \leq 10$ ) kann der Reibungsfaktor  $f$ , wie später noch gezeigt wird, durch die Beziehung

$$f = 100/R_e$$

mit der *Reynolds'schen* Zahl verknüpft werden, wodurch Gleichung (5) erhalten wird:

$$\Delta P = \frac{200 G L \lambda^2 (1 - \varepsilon)^2 \mu}{D_p^2 \cdot \gamma_g \cdot \varepsilon^3}. \quad (5)$$

Im laminaren Strömungsbereich ist somit der Druckverlust proportional der Gasgeschwindigkeit. In der nachfolgenden Fig. 3 ist diese Beziehung für eine Reihe von Stoffen, mit denen gearbeitet worden ist, graphisch veranschaulicht.

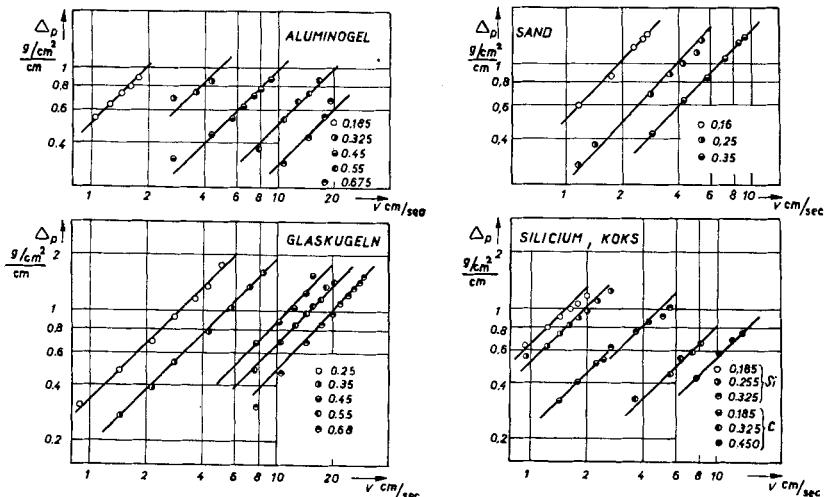


Fig. 3.

Druckabfall pro Längeneinheit in Funktion der Gasgeschwindigkeit.

<sup>1)</sup> M. Leva, M. Grummer, M. Weintraub & M. Pollichik, Chem. Eng. Progr. **44**, 511, 619, 707 (1948).

Bei den einzelnen Stoffen sind die Druckverluste auf ein für jedes Material einheitliches Kornzwischenraumvolumen durch Anwendung der Beziehung von *Kozeny*<sup>1)</sup>

$$\Delta P \text{ prop. } (1 - \varepsilon)^2 / \varepsilon^3 \quad (6)$$

umgerechnet worden.

Aus Fig. 3 ist ersichtlich, dass in Übereinstimmung mit den theoretischen Gegebenheiten alle Geraden die Steigung 1 aufweisen.

#### 4. Praktische Anwendung des linearen Druckabfalles.

Die eben betrachtete Beziehung lässt sich vorteilhaft für die Mengenmessung von Gasen in Laboratoriums- und halbtechnischen Apparaturen anwenden.

Bei der Anwendung des Druckabfalles durch Schüttsschichten auf die Gasmengenmessung kann aus einem einzigen bestimmten Wert die Eichgerade sofort gezeichnet (sofern die *Reynolds*'sche Zahl nicht grösser als 10 ist) und auf jedes beliebige Gas umgerechnet werden. Besteht das Material der Schüttsschicht aus Kugeln, so wird es ferner möglich, mit guter Genauigkeit direkte Mengenmessungen ohne besondere Eichung durchzuführen.

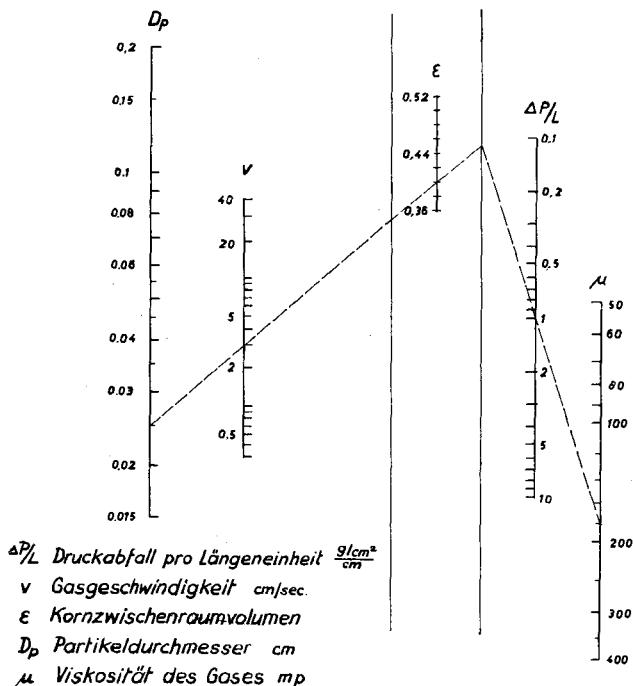


Fig. 4.

Nomogramm zur Berechnung von Kugelschicht-Strömungsmessern ( $R_e \leq 10$ ).

<sup>1)</sup> J. Kozeny, Ber. Wien. Akad. 136a, 271 (1927).

Für die direkte Berechnung solcher Strömungsmesser wurde ein Nomogramm (Fig. 4) aufgestellt, welches auf einem Formfaktor der eingefüllten Festkörper von 1 (Kugeln) basiert.

Der Messbereich der Strömungsmesser lässt sich durch Variation von Schichthöhe, Kugelgröße und Rohrdurchmesser innerhalb weiter Grenzen verändern (solange  $Re \leq 10$ ). Wichtig erscheint lediglich, dass das Gas von oben nach unten durchgeleitet wird, damit sich die einmal eingestellte Packungsdichte nicht verändert kann.

### 5. Bestimmung der Reibungsfaktoren.

Im Bereich von  $Re \leq 10$  kann der Reibungsfaktor  $f$  in der Gleichung (4) (S. 477) durch die einfache Beziehung

$$f = k/Re$$

mit der *Reynolds'schen* Zahl verknüpft werden. Der Wert von  $k$  variiert in der Literatur je nach Autor von 77 bis 100<sup>1)</sup>). Aus durchgeföhrten Druckabfallmessungen an Glaskugelschichten konnte hier  $k$  eindeutig mit einem Wert von 100 bestimmt werden.

Unter Zugrundelegung der durch Gleichung (5) (S. 477) zwischen Reibungsfaktor, *Reynolds'scher* Zahl und Formfaktor gegebenen Beziehung konnte der Formfaktor  $\lambda$  für verschiedene Stoffe eindeutig festgelegt werden.

Die für unporöse Stoffe durchgeföhrte Behandlung wurde auch auf poröse Stoffe übertragen. Für poröse Materialien setzt sich der Wert von  $\varepsilon$  aus dem eigentlichen Kornzwischenraumvolumen und der Eigenporosität der Partikel zusammen, welche letztere um so grösser ist, je weiter das scheinbare und das wahre spezifische Gewicht der Partikel auseinanderliegen. Doch nur in den seltensten Fällen werden die Poren eines einzelnen Teilchens wesentlich zum Gasdurchtritt beitragen; das Partikel kann vielmehr wie eine Hohlkugel aufgefasst werden, da der Widerstand, den die Poren dem Gasdurchtritt entgegensezten, verglichen mit dem Widerstand, den die Schicht als Ganzes darstellt, viel zu hoch ist.

Für unsere Versuche fand hauptsächlich Aluminogel Verwendung. Sein Formfaktor wurde durch Vergleich von Mikroaufnahmen von Stoffen bestimmter Form erhalten, und zwar ist  $\lambda = 1,5$ . Für die Bestimmung des Kornzwischenraumvolumens poröser Stoffe muss die scheinbare Dichte herangezogen werden. Mit Hilfe des gefundenen Formfaktors und des auf der scheinbaren Dichte basierenden Kornzwischenraumvolumens liessen sich in Verbindung mit Druckabfallmessungen die Reibungsfaktoren bestimmen. Sie sind in Fig. 5 mit

<sup>1)</sup> C. van Heerden, A. Nobel & W. D. van Krevelen, Chem. Eng. Sci. 1, 37 (1951).

<sup>2)</sup> M. Leva, M. Grummer, M. Weintraub & M. Pollchik, Chem. Eng. Progr. 44, 511, 619, 707 (1948).

denjenigen von Silicium und Sandpartikeln in Funktion der *Reynolds'schen Zahl* dargestellt.

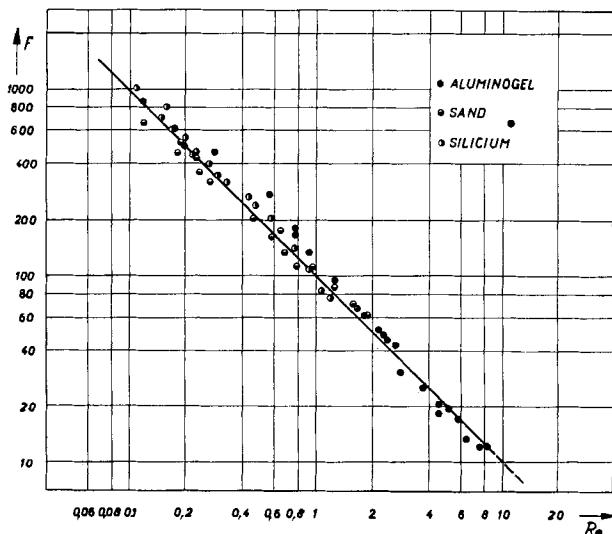


Fig. 5.

Reibungsfaktoren als Funktion der *Reynolds'schen Zahl*.

## 6. Gasgeschwindigkeit am Wirbelpunkt.

Im nachfolgenden sollen die Überlegungen und Versuche, die zu einer Vereinfachung der Gleichung zur Bestimmung der Gasmassen geschwindigkeit am Wirbelpunkt führen, näher erläutert werden. Unter der Gasgeschwindigkeit am Wirbelpunkt wird definitions gemäss diejenige Strömungsgeschwindigkeit verstanden, die notwendig ist, um die einzelnen Teilchen in die loseste und dabei noch stabile Packung zu bringen. Für die Berechnung dieser Gasgeschwindigkeit kann die von *Leva et al.*<sup>1)</sup> vorgeschlagene Formel verwendet werden, die aus einer Kombination der Gleichungen 2 und 5 hervorgeht:

$$G_{WP} = v_{WP} \gamma_g = \frac{0,005 D_p^2 g \gamma_g (\gamma_f - \gamma_g) \varepsilon_{WP}^3}{\lambda^2 (1 - \varepsilon_{WP}) \mu}. \quad (7)$$

Andere Autoren<sup>2)</sup><sup>3)</sup> stellten ähnliche Gleichungen auf.

Das Vorkommen eines Faktors zur Charakterisierung der Packungsdichte ( $\varepsilon$ ) neben einem solchen zur Beurteilung der Partikel form ( $\lambda$ ) erschwerte eine rasche Berechnung des Wirbelpunktes.

<sup>1)</sup> *M. Leva, M. Grummer, M. Weintraub & M. Pollchik*, Chem. Eng. Progr. **44**, 511, 619, 707 (1948).

<sup>2)</sup> *C. van Heerden, A. Nobel & W. D. van Krevelen*, Chem. Eng. Sci. **1**, 37 (1951).

<sup>3)</sup> *C. O. Miller & A. K. Logwinuk*, Ind. Eng. Chemistry **43**, 1220 (1951).

Unser Bestreben ging in der Richtung, die Koeffizienten für Kornform und Packungsdichte in einem einzigen Ausdruck erfassen zu können. Nimmt man an, dass das maximale Kornzwischenraumvolumen am Wirbelpunkt (loseste stabile Packung) vollständig durch die geometrische Form der Partikel bestimmt sei, so können die beiden getrennten Koeffizienten vereinigt werden. Partikel verschiedener, unter sich einheitlicher Grösse zeigen am Wirbelpunkt immer das gleiche Kornzwischenraumvolumen, z. B. ergaben Kugeln verschiedener Größenfraktionen stets den Wert  $\epsilon_{WP} = 0,406$ .

Die durch Versuche ermittelten Gasgeschwindigkeiten am Wirbelpunkt sowie die aus der frei absitzengelassenen Schicht berechneten Kornzwischenraumvolumen sind in Tab. 2 für verschiedene Materialien zusammengestellt.

Eine genaue Analyse der in nachstehender Tab. zusammengefassten Messresultate lässt erkennen, dass die Gasgeschwindigkeit am Wirbelpunkt, dividiert durch die Dichte der Partikel (bei porösen Partikeln die scheinbare Dichte), in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser aufgetragen, eine einzige Gerade für alle untersuchten Materialien liefert.

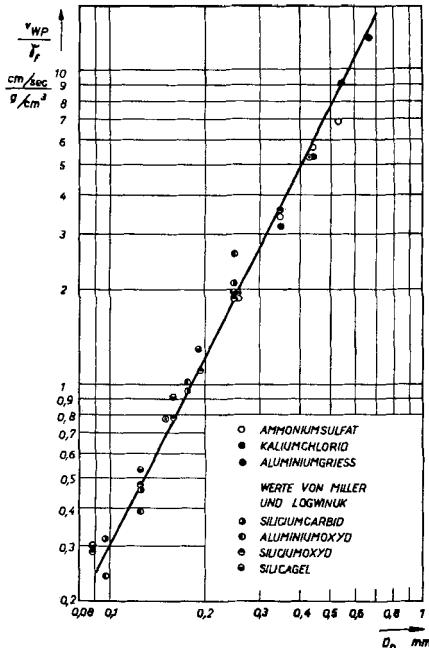
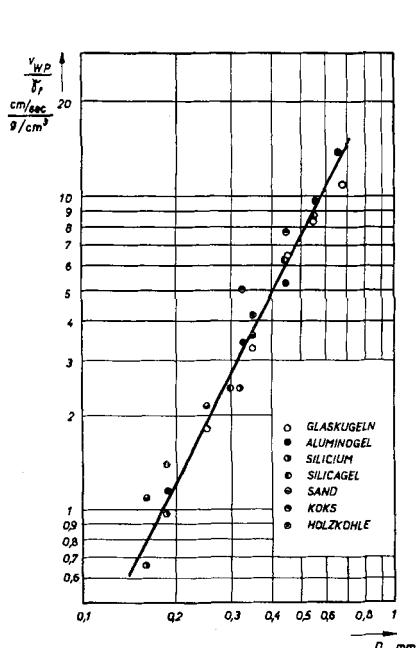


Fig. 6.

Gasgeschwindigkeit am Wirbelpunkt, dividiert durch Partikeldichte, in Funktion vom Partikeldurchmesser.

**Tabelle 2.**  
Gasgeschwindigkeit am Wirbelpunkt.

Material	Grösse D <sub>p</sub> mm	Dichte γ <sub>f</sub> g/cm <sup>3</sup>	v <sub>WP</sub> cm/sec	v <sub>WP</sub> /γ <sub>f</sub>	ε <sub>WP</sub>
Glaskugeln	0,250	2,81	5,16	1,83	0,406
	0,350	2,81	9,24	3,29	0,406
	0,450	2,81	18,50	6,55	0,406
	0,550	2,81	23,60	8,40	0,406
	0,680	2,81	30,80	10,94	0,406
Aluminogel	0,185	1,74	1,98	1,14	0,500
	0,325	1,74	5,98	3,43	0,513
	0,450	1,74	9,28	5,33	0,512
	0,550	1,74	17,05	9,80	0,510
	0,675	1,74	24,30	13,95	0,518
Silicium	0,185	2,42	2,31	0,96	0,534
	0,320	2,42	5,98	2,47	0,535
	0,160	2,42	1,59	0,66	0,540
Koks	0,185	1,86	2,58	1,38	0,637
	0,325	1,86	9,45	5,08	0,666
	0,450	1,86	14,50	7,78	0,660
Silicagel	0,300	0,94	2,31	2,45	0,445
	0,445	0,94	5,76	6,16	0,450
	0,545	0,94	8,07	8,60	0,449
Sand	0,160	2,63	2,91	1,11	0,453
	0,250	2,63	5,76	2,20	0,445
	0,350	2,63	9,78	3,73	0,448
Holzkohle	0,345	0,63	2,65	4,20	0,650
Kaliumchlorid KCl	0,150	1,98	1,54	0,78	—
	0,250	1,98	3,78	1,91	—
	0,350	1,98	7,18	3,62	—
	0,445	1,98	10,35	5,23	—
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,25	1,77	3,24	1,83	—
	0,35	1,77	6,04	3,42	—
	0,445	1,77	10,05	5,67	—
	0,545	1,77	12,10	6,84	—
Aluminumbriess	0,35	2,70	8,60	3,18	—
	0,445	2,70	14,0	5,18	—
	0,545	2,70	24,2	8,95	—
	0,675	2,70	33,5	12,40	—

Wird die im Vergleich zur Festmaterialdichte kleine Gasdichte vernachlässigt, so ist ersichtlich, dass auf Grund von Fig. 6, wo alle Materialien sich durch dieselbe Gerade repräsentieren lassen, der Ausdruck

$$\frac{\varepsilon_{WP}^3}{(1 - \varepsilon_{WP}) \lambda^2} \cdot \frac{0,005 \text{ g}}{\mu}$$

in der früher erwähnten Formel (7) eine Konstante ergeben muss. Der Porositätsausdruck und der Formfaktor können so zu einem Wert kombiniert werden, der für alle Stoffe als gleich gefunden wurde. Diese Tatsache lässt sich wie folgt erklären:

Bei den durchgeföhrten Versuchen zeigte es sich, dass mit steigendem Formfaktor zunehmende Schichtporosität am Wirbelpunkt auftritt. Somit ist jeder bestimmten Partikelform ein bestimmtes Kornzwischenraumvolumen zuzuordnen. Die geometrische Form der Partikel bestimmt demnach innerhalb weiter Grenzen die loseste noch stabile Packung, welche bei einer gegebenen Form von den übrigen Partikeleigenschaften, speziell auch von der Partikelgrösse, unab-

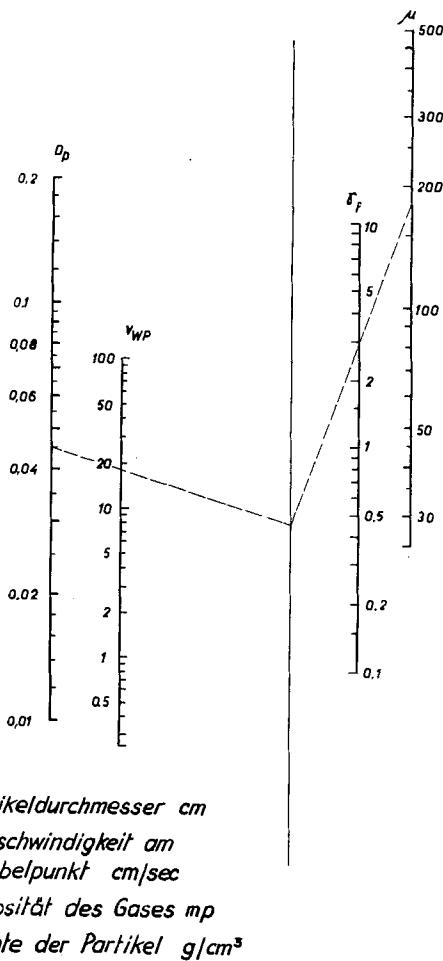


Fig. 7.

Nomogramm zur Bestimmung der Gasgeschwindigkeit am Wirbelpunkt.

hängig ist. Diese Feststellung erwähnen auch *van Heerden et al.*<sup>1)</sup> anhand von Versuchen mit Siliciumcarbidpartikeln. Da nun die geometrische Form bei gleichem Zerkleinerungsvorgang ebenfalls von der Partikelgrösse unabhängig ist, so kann nach dem Prinzip der Ähnlichkeit gefolgert werden, dass auch das Kornzwischenraumvolumen von der Grösse der Partikel unabhängig ist.

*Yagi & Shirai*<sup>2)</sup> haben in neuerer Zeit ähnliche Untersuchungen angestellt und ebenfalls gefunden, dass Formfaktor und Schichtporosität zu einem konstanten Faktor zusammengezogen werden können, dem sie jedoch noch eine Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser zuschreiben. Nimmt man für Kugeln des Formfaktors 1 den Wert von  $\varepsilon_{WP} = 0,406$  als den Verhältnissen entsprechend an, so reduziert sich die frühere Gleichung (7) entsprechend den neuen Feststellungen auf folgende Form:

$$G_{WP} = v_{WP} \cdot \gamma_g = 0,00056 \frac{g \cdot \gamma_g \cdot \gamma_l \cdot D_p^2}{\mu} \quad (\text{gültig bis } Re \leq 10). \quad (8)$$

In dieser Gleichung ist die kleine Gasdichte gegenüber der Feststoffdichte vernachlässigt.

Fig. 7, welche ein auf dieser neuen Gleichung basierendes Nomogramm darstellt, erlaubt die rasche Berechnung der Gasgeschwindigkeit am Wirbelpunkt, insbesondere bei der Dimensionierung von Wirbelschicht-Reaktoren. Es muss einzig bedacht werden, dass für poröse Medien die mit Quecksilber bestimmte scheinbare Dichte anzuwenden ist.

#### Zusammenfassung.

- a) Untersuchungen über Druckabfälle in Schüttsschichten führten zur Bestimmung von Reibungsfaktoren für unporöse und poröse Partikel.
- b) Die lineare Beziehung zwischen Druckabfall und Gasgeschwindigkeit bei *Reynolds*-Zahlen kleiner oder gleich 10 wurde für die Gasmengenmessung in Laboratoriums- und halbtechnischen Anlagen angewandt. Mit Hilfe eines aufgestellten Nomogramms ist eine rasche Dimensionierung der neuen Mengenmesser möglich.
- c) Für die Berechnung der zur Erzeugung einer Wirbelschicht minimal notwendigen Gasgeschwindigkeit wurde eine neue, vereinfachte Beziehung entwickelt und ein entsprechendes Nomogramm aufgestellt.

Technisch-chemisches Laboratorium,  
Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich.

<sup>1)</sup> C. van Herden, A. Nobel & W. D. van Krevelen, Chem. Eng. Sci. 1, 37 (1951).

<sup>2)</sup> S. Yagi & T. Shirai, Chem. Eng. (Japan) 16, 2 (1952).