

wandelt wurde. Es könnte sein, dass dabei etwas Perchlorat zurückblieb, welches als Fremdion in der NaCl-Lösung den scheinbaren  $i$ -Wert erhöht.

Herrn Prof. G. SCHWARZENBACH danke ich bestens für die anregenden Diskussionen und die Hilfe bei der Vorbereitung des Manuskriptes.

## SUMMARY

The vapor pressure of a saturated salt solution (the salt acting as inert electrolyte) is lowered by foreign solutes to an amount which is proportional to the molar concentration of the foreign solute. Any ion not contained in the inert electrolyte is acting as a foreign solute. Basing on that effect, a new method for the determination of the relative weights of ions has been developed and the principle of HILL was applied thereby. Sodium chloride acted as an inert electrolyte. The method has been applied to a number of different salts (foreign solute) with good success.

Laboratorium für Anorganische Chemie  
der Eidg. Technischen Hochschule, Zürich

## LITERATURVERZEICHNIS

- [1] B. MAGYAR & G. SCHWARZENBACH, *Helv.* **48**, 1249 (1965).
- [2] G. SCATCHARD, *J. Amer. chem. Soc.* **68**, 2315 (1946).
- [3] R. S. TOBIAS, *J. inorg. nucl. Chemistry* **19**, 348 (1961).
- [4] A. V. HILL, *Proc. Roy. Soc. (London) A* **127**, 9 (1930).
- [5] W. SIMON & C. TOMLINSON, *Chimia* **14**, 301 (1960).
- [6] R. MÜLLER & H. J. STOLTEN, *Analyt. Chemistry* **25**, 1103 (1953).
- [7] W. I. HIGUCHI & M. A. SCHWARTZ, *J. physic. Chemistry* **63**, 996 (1959); B. R. Y. IYENGAR, *J. scient. industr. Research India* **13 B**, 73 (1954).
- [8] G. SCHWARZENBACH & B. MAGYAR, *Helv.* **45**, 1429 (1962).
- [9] F. P. EMMENEGGER, *Diss. ETH, Zürich* 1963.

---

### 139. Über den Druckverlust strömender Gase in Schütttschichten bei erhöhtem Druck

von B. Böhlen, H. U. Bürki und A. Guyer

(29. V. 65)

Die experimentelle Bestimmung und Berechnung des Druckverlustes strömender Gase in Schütttschichten ist in den grundlegenden Studien von LEVA [1] und ERGUN [2] sowie in verschiedenen anderen Veröffentlichungen behandelt worden. Eingehende Untersuchungen wurden bisher jedoch nur bei Normaldruck durchgeführt. Mit der Entwicklung zahlreicher industrieller Druckprozesse hat indessen auch die Kenntnis der Strömungsverhältnisse von Gasen unter erhöhtem Druck praktische Bedeutung für die Dimensionierung entsprechender Anlagen erlangt. Mit dem Ziel, diese bestehenden Lücken zu schliessen, wurden für mehrere Schüttgüter Untersuchungen über den Druckverlust strömender komprimierter Gase durchgeführt. Die Messergebnisse wurden unter Berücksichtigung der massgeblichen Einflussgrößen nach verschiedenen Gesichtspunkten ausgewertet.

**I. Experimentelles**

*Nomenklatur*

$D_u$ Äquivalentdurchmesser (cm)	$S_p$ Partikeloberfläche (cm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup> )
$D_m$ mittlerer Korndurchmesser (cm)	$v$ lineare Gasgeschwindigkeit (cm/s)
$f, f'$ Reibungsfaktoren nach LEVA	$V_p$ Partikelvolumen (cm <sup>3</sup> )
$f_k, f_v$ Reibungsfaktoren nach ERGUN	$\epsilon$ Porosität
$g$ Fallbeschleunigung (981 cm/s <sup>2</sup> )	$\lambda$ geometrischer Formfaktor
$G$ Massengeschwindigkeit (g/cm <sup>2</sup> · s)	$\lambda'$ Form-Oberflächenfaktor
$k_1, k_2$ Konstanten	$\gamma_B$ Schüttgewicht (g*/cm <sup>3</sup> )
$L$ Schichthöhe (cm)	$\gamma_S$ scheinbares spezifisches Gewicht (g*/cm <sup>3</sup> )
$n$ Strömungszustandsfaktor	$\gamma_G$ Gasdichte (g/cm <sup>3</sup> )
$N_{Re}$ modifizierte REYNOLDS'sche Kennzahl	$\mu$ Gasviskosität (g/cm · s)
$\Delta P$ Druckabfall (Dyn/cm <sup>2</sup> ) (in den Zeichnungen mit g*/cm <sup>2</sup> angegeben).	

1. *Apparatur.* Die Bestimmung des Druckverlustes erfolgte mit der in Fig. 1 schematisch dargestellten Apparatur.

Im Unterschied zu den für Messungen bei Normaldruck üblichen Apparaturen gelangte in den vorliegenden Untersuchungen ein Kreislaufsystem zur Anwendung. Als Strömungsrohr und Behälter für das Schüttgut diente ein Stahlrohr mit einem inneren Durchmesser von 35 mm und einer Länge von 1000 mm. Der Druckverlust wurde über beidseitig der Schicht montierte Druckmeßstellen bestimmt. Zur Gewährung optimaler Messbedingungen wurden die Meßstellen als Ringkammern ausgebildet. Die Druckabfallmessung selbst erfolgte mit Hilfe eines Differentialmanometers. Der Gaskreislauf wurde durch einen Membrankompressor Typ SERA mit einer Maximalleistung von 44 Nm<sup>3</sup>/h bei einem Enddruck von 25 ata aufrechterhalten. Zur Dämpfung von Druckstößen erwies sich der Einbau von Puffergefäßen in den Gaskreislauf als unumgänglich.

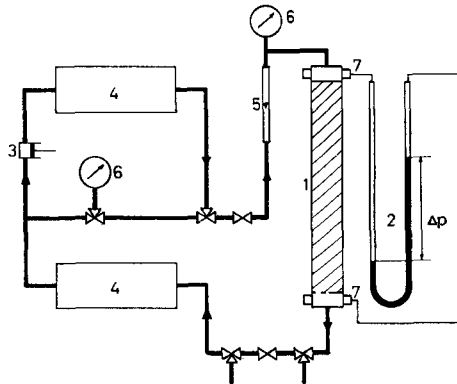


Fig. 1. *Schema der Apparatur*

- |                                     |                    |
|-------------------------------------|--------------------|
| 1 Strömungsrohr mit Schüttgeschicht | 4 Puffergefäße     |
| 2 Differentialmanometer             | 5 Rotameter        |
| 3 Kompressor                        | 6 Absolutmanometer |
|                                     | 7 Ringkammern      |

2. *Meßsysteme.* Der Druckverlust strömender Gase wird von der Kornform und der Oberflächenbeschaffenheit des Schüttgutes erheblich beeinflusst. Um diesen Faktoren Rechnung zu tragen, wurden die Messungen mit geometrisch definierten wie auch mit undefinierten, bezüglich der Oberflächenbeschaffenheit glatten und rauhen Materialien unterschiedlicher Korngröße durchgeführt. Als Strömungsmedien gelangten Stickstoff und Kohlendioxid zur Anwendung. Die Charakteristika der untersuchten Meßsysteme sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1. *Charakteristika der untersuchten Meßsysteme*

Material	Kornform	Kornoberfläche	Korndurchmesser $D_m$ (cm)	Strömungs- medium
Glas	Kugeln	glatt	0,31	$N_2$ , $CO_2$
Polyvinylchlorid	Zylinder	glatt	0,36	$N_2$
Silicagel	Granulat	glatt, porös	0,075–0,40	$N_2$
Aktivkohle	Granulat	rauh, porös	0,078–0,35	$N_2$ , $CO_2$
Typ A, B, C, D, E				
Aktivkohle	Zylinder	rauh, porös	0,292–0,558	$N_2$
Typ F, G, H, I, K				

Die Druckabfallmessungen wurden bei Betriebsdrucken von 1–21 ata vorgenommen.

3. *Charakterisierung von Schüttgut und Schüttschicht.* Die charakteristischen Kennwerte der einzelnen Schüttgüter sowie der Schüttschichten sind wie folgt definiert:

Der mittlere Korndurchmesser  $D_m$  ist gegeben durch das arithmetische Mittel der Sieböffnungen, die der Kornfraktion zugrunde gelegt sind.

Der Äquivalentdurchmesser  $D_a$  eines Schüttgutes ist gegeben durch den Durchmesser von Kugeln, die pro Volumeneinheit dieselbe Oberfläche aufweisen wie das Material.

Die Schichtporosität  $\epsilon$  ist definiert als der Anteil des Zwischenkornvolumens am gesamten Schüttschichtvolumen. Sie kann berechnet werden nach  $\epsilon = 1 - \gamma_B/\gamma_S$ .

Das scheinbare spezifische Gewicht  $\gamma_S$  ist auf das sowohl Gerüstsubstanz wie auch Poren umfassende Kornvolumen bezogen.

Die Angaben von Gas- und Massengeschwindigkeiten sowie von REYNOLDS'schen Zahlen beziehen sich auf 20°C und einen Druck von 1 ata.

Die einzelnen Kennwerte wurden experimentell wie folgt ermittelt:

a) *Äquivalentdurchmesser:* Zwischen dem Äquivalentdurchmesser  $D_a$  und der Kornoberfläche  $S_p$  besteht die Relation  $D_a = 6/S_p$ . Die Bestimmung des Äquivalentdurchmessers kann demzufolge auf eine Oberflächenbestimmung zurückgeführt werden. Nach einer von ERGUN [3] vorgeschlagenen Methode lässt sich die Kornoberfläche  $S_p$  eines Schüttgutes durch Druckabfallmessungen bei variablem Schüttgewicht ermitteln.

b) *Schichtporosität und scheinbares spezifisches Gewicht:* Das zur Berechnung der Schichtporosität  $\epsilon$  nötige scheinbare Gewicht  $\gamma_S$  wird üblicherweise nach der Quecksilberverdrängungsmethode von HERBST [4] bestimmt. In den vorliegenden Untersuchungen erwies sich eine Modifi-

Tabelle 2. *Kennwerte der untersuchten Materialien und Schüttschichten*

Material	mittl. Korn- durchmesser $D_m$ (cm)	Äquivalent- durchmesser $D_a$ (cm)	Porosität $\epsilon$	Schüttgewicht $\gamma_B$ (g*/cm <sup>3</sup> )	scheinbares spez. Gewicht (g*/cm <sup>3</sup> )
Glas	0,31	0,31	0,38	1,63	2,63
Polyvinylchlorid	0,36	0,33	0,38	0,63	1,02
Silicagel A	0,35	0,19	0,41	0,47	0,80
Aktivkohle A	0,35	0,22	0,39	0,45	0,73
B	0,093	0,067	0,39	0,42	0,68
C	0,078	0,065	0,43	0,47	0,82
D	0,080	0,050	0,43	0,43	0,75
E	0,21	0,14	0,39	0,39	0,64
F	0,56	0,43	0,36	0,42	0,65
G	0,49	0,43	0,36	0,46	0,72
H	0,29	0,22	0,36	0,45	0,71
I	0,29	0,22	0,36	0,45	0,71
K	0,29	0,21	0,36	0,44	0,69

kation dieser Methode als geeigneter. Die Verdrängung erfolgte mit Wasser, wobei der poröse Stoff jedoch vorgängig mit der Verdrängungsflüssigkeit gesättigt wurde.

Die experimentell und rechnerisch ermittelten Kennwerte der untersuchten Materialien sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

**II. Messresultate und Auswertung**

**1. Druckabfallberechnung nach LEVA [1].** – Als Grundlage für die Berechnung des Druckabfalles strömender Medien in Schütttschichten dient vielfach die bekannte Beziehung von LEVA:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{2 \cdot f \cdot G^n \cdot \lambda^{3-n} \cdot (1-\epsilon)^{3-n}}{D_m^{3-n} \cdot g \cdot \gamma_g \cdot \epsilon^3} \tag{1}$$

Normalerweise sind in Gleichung (1) ausser  $f$ ,  $\lambda$  und  $n$  sämtliche Grössen bekannt oder können mittels einfacher Methoden bestimmt werden. Dem Strömungszustandsfaktor  $n$  ist für laminare Strömung der Wert 1, für turbulente Strömung der Wert 2 zugeordnet. Im Übergangsbereich kann er einer von LEVA [1] vorgeschlagenen Kurve entnommen werden.

a) *Bestimmung des Reibungs- und Formfaktors.* Die experimentelle Bestimmung des Reibungsfaktors  $f$  für kugelförmige Schüttgüter basiert auf der praktischen Anwendung von Gleichung (1). Diese reduziert sich bei laminaren Strömungsbedingungen ( $N_{Re} \leq 10$ ) auf die einfache Beziehung  $f = 100/N_{Re}$ . Für nicht kugelförmige Materialien ist zusätzlich der Formfaktor zu berücksichtigen. Der geometrische Formfaktor  $\lambda$  wird häufig nach der Beziehung  $\lambda = 0,205 \cdot S_p/V_p^{2/3}$  berechnet. Immerhin ist dieser mit einer gewissen wertmässigen Unsicherheit behaftet, weshalb dem sogenannten Form-Oberflächenfaktor  $\lambda'$  weit grössere Bedeutung zukommt, indem er sowohl der Kornform wie auch der Oberflächenbeschaffenheit Rechnung trägt. Er kann experimentell aus einem Vergleich des Reibungsfaktors  $f$  einer Kugelschüttung mit dem modifizierten Reibungsfaktor  $f'$  der zu charakterisierenden Schütttschicht bestimmt werden, wobei  $f'$  aus experimentellen Daten nach Gleichung (2) berechnet wird:

$$f' = \frac{\Delta P \cdot D_m \cdot \gamma_g \cdot \epsilon^3 \cdot g}{2 \cdot L \cdot G^2 (1-\epsilon)^2} \tag{2}$$

Es gilt nun:  $\lambda'^2 = f'/f$ .

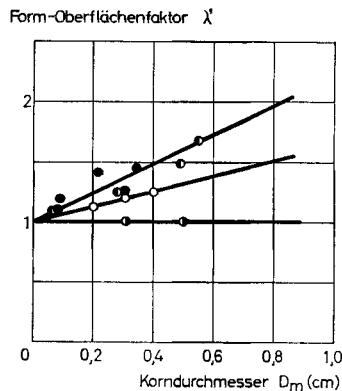


Fig. 2. Form-Oberflächenfaktor in Abhängigkeit vom mittleren Korndurchmesser

- Glaskugeln
- Aktivkohle-Granulat
- Silicagel
- Aktivkohle-Zylinder

Der Form-Oberflächenfaktor ist gemäss obiger Gleichung von der Partikelgrösse abhängig. Diese Abhängigkeit ist in Fig. 2 durch graphische Darstellung experimenteller Messwerte veranschaulicht.

Die Werte für den geometrischen Formfaktor  $\lambda$  betragen vergleichsweise nach LEVA [1] 1,0 für Kugeln, 1,14–1,16 für Zylinder und 1,10 für verschiedenste Granulate.

b) *Druckverlust strömender komprimierter Gase für verschiedene Schüttgüter.* Die in Fig. 1 dargestellte Apparatur ermöglichte die Bestimmung des Druckabfalles in Abhängigkeit von der auf das Leerrohr bezogenen Lineargeschwindigkeit  $v$ . In Fig. 3 sind die Messwerte einiger typischer Versuchsreihen graphisch aufgetragen.

Die Druckabfallmessungen wurden je nach Gasdruck und Strömungsgeschwindigkeit im laminaren wie auch im turbulenten Strömungsbereich durchgeführt. Es kommt dies in den teilweise gekrümmten Kurven zum Ausdruck. Es ist dabei zu beachten,

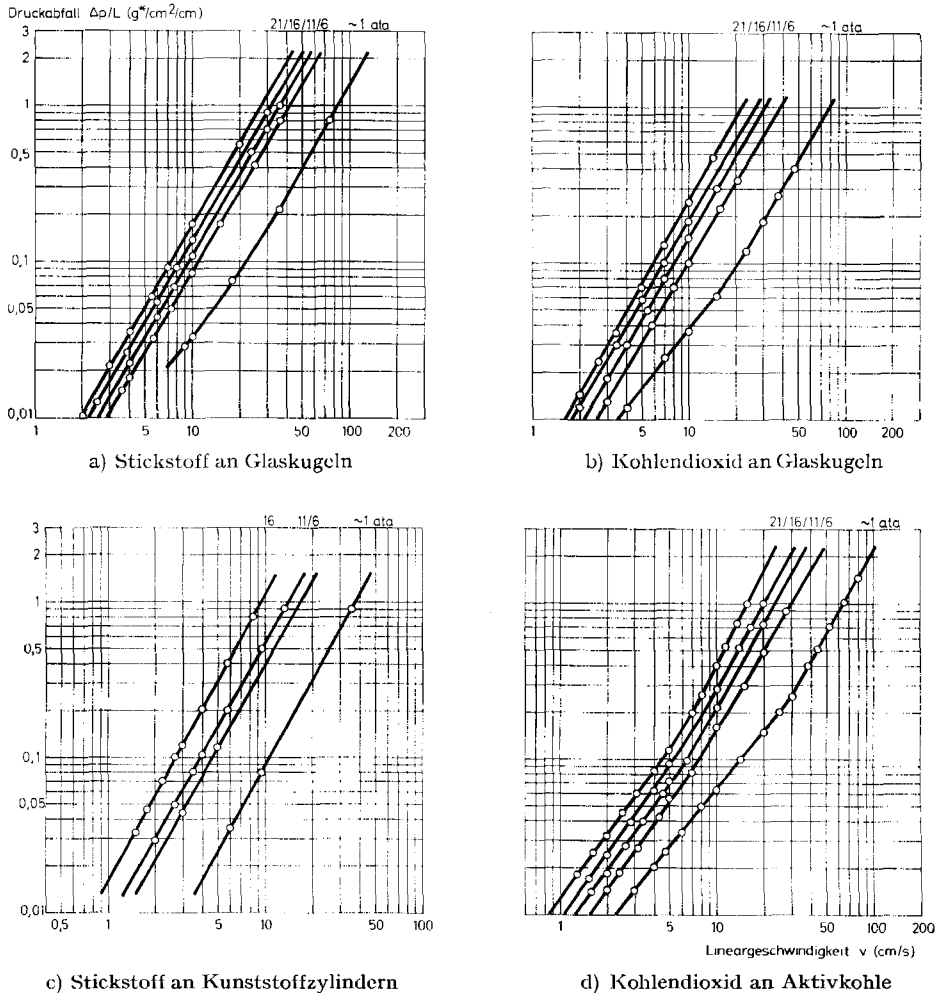


Fig. 3. Druckverlust pro Längeneinheit in Funktion der Gasgeschwindigkeit

dass eine REYNOLDS'sche Kennzahl  $N_{Re} = 10$  bei einem Absolutdruck von 1 ata Geschwindigkeiten von 2–5 cm/s, bei Drucken von 21 ata solchen von 0,1–0,25 cm/s entspricht.

c) *Auswertung der Messergebnisse nach LEVA.* Sämtliche Messergebnisse wurden nach der Gleichung von LEVA [1] ausgewertet, wobei vorerst der geometrische Formfaktor als Berechnungsgrundlage diente. Der Reibungsfaktor  $f$  zeigte dabei eine Abhängigkeit von der REYNOLDS'schen Kennzahl  $N_{Re}$ , wie sie aus Fig. 4 ersichtlich ist.

Aus den vorliegenden Messungen geht eindeutig hervor, dass für ein bestimmtes Schüttgut der Reibungsfaktor  $f$ , unbeeinflusst durch den herrschenden Gasdruck und die Art des Gases, ein und dieselbe Abhängigkeit vom Strömungszustand aufweist.

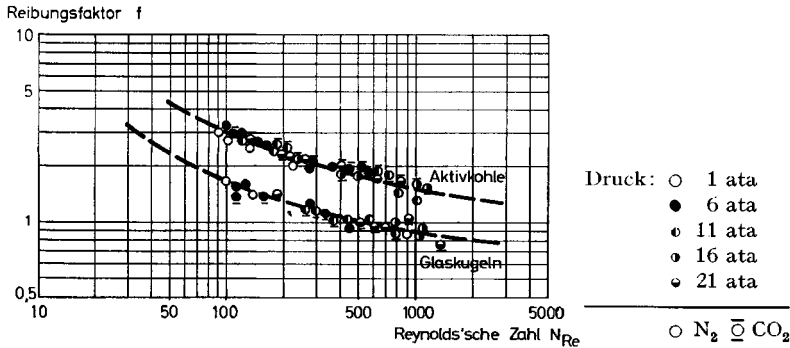


Fig. 4. Reibungsfaktor als Funktion der REYNOLDS'schen Zahl  $N_{Re}$

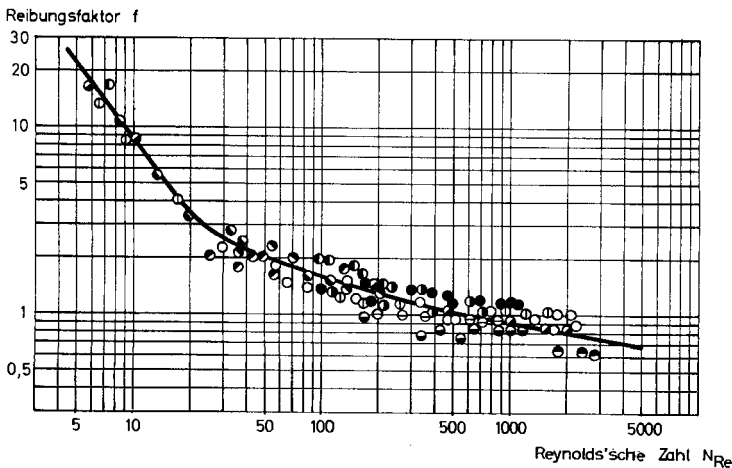


Fig. 5. Reibungsfaktor als Funktion der REYNOLDS'schen Zahl  $N_{Re}$

- Glaskugeln/ $N_2$
- Glaskugeln/ $CO_2$
- ◐ Aktivkohle A/ $N_2$
- ◑ Aktivkohle B/ $N_2$
- ◒ Aktivkohle C/ $N_2$
- ◓ Aktivkohle D/ $N_2$
- ⊙ PVC-Zylinder/ $N_2$
- ⊖ Silicagel/ $N_2$
- ◌ Aktivkohle E, F, G/ $N_2$
- ◌ Aktivkohle H/ $N_2$
- ◌ Aktivkohle I/ $N_2$
- ◌ Aktivkohle K/ $N_2$

Druck: 1–21 ata

Der unterschiedliche Kurvenverlauf für Glaskugeln und Kunststoffzylinder einerseits und für Aktivkohle andererseits erweist sich als klarer Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit. Werden die Reibungsfaktoren auf der Basis der Form-Oberflächenfaktoren  $\lambda'$  berechnet, so wird die Oberflächenbeschaffenheit mitberücksichtigt und als Folge davon resultiert ein einheitlicher Zusammenhang zwischen Reibungsfaktor und REYNOLDS'scher Kennzahl, wie dies Fig. 5 veranschaulicht.

Die Auswertung der Messungen führte zum Schluss, dass die bekannte Beziehung von LEVA [1] für die Berechnung des Druckverlustes strömender komprimierter Gase in Schütttschichten volle Gültigkeit hat. Die für die Berechnung erforderlichen Form-Oberflächenfaktoren können, wenn jegliche Angaben fehlen, mittels Messungen bei Normaldruck bestimmt werden.

**2. Druckabfallberechnung nach ERGUN [2].** – Zur Berechnung des Druckabfalles strömender Medien in Schütttschichten wurde von ERGUN [2] folgende Gleichung vorgeschlagen:

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \cdot \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} \cdot \frac{\mu \cdot v}{D_a^2} + 1,75 \cdot \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon^3} \cdot \frac{G \cdot v}{D_a}. \quad (3)$$

Der erste Summand auf der rechten Gleichungsseite erfasst den Laminarbereich, der zweite Summand den Turbulenzbereich. Gleichung (3) kann leicht in das Gleichungssystem (4) umgeformt werden:

$$\begin{aligned} f_v &= k_1 + k_2 \cdot \frac{N_{Re}}{1-\epsilon} = \frac{\Delta P \cdot g \cdot D_a^2 \cdot \epsilon^3}{L \cdot \mu \cdot v \cdot (1-\epsilon)^2}, \\ f_k &= k_1 \cdot \frac{N_{Re}}{1-\epsilon} + k_2 = \frac{\Delta P \cdot g \cdot D_a^2 \cdot \epsilon^3}{L \cdot G \cdot v \cdot (1-\epsilon)}. \end{aligned} \quad (4)$$

$f_v$  und  $f_k$  stellen zwei Reibungsfaktoren dar, wobei der erstere bei laminarer, letzterer bei turbulenter Strömung vorwiegt. Sie lassen sich aus der Gleichung von LEVA [1] unter Berücksichtigung des Strömungszustandsfaktors  $n$  sowie unter Einführung der

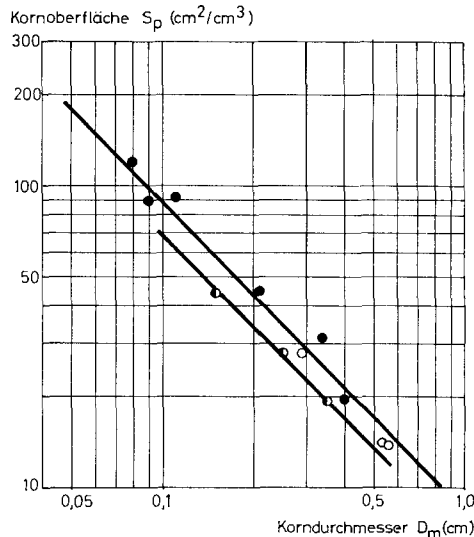


Fig. 6. Kornoberfläche als Funktion des mittleren Partikeldurchmessers

- Aktivkohle-Granulat
- Aktivkohle-Zylinder
- Silicagel-Granulat

REYNOLDS'schen Kennzahl ableiten. Für ein gegebenes Meßsystem sind üblicherweise die Größen  $L, g, \mu, v$  und  $\epsilon$  bekannt. Der Äquivalentdurchmesser  $D_a$  kann nach einer bereits erwähnten Methode bestimmt werden.

a) Messergebnisse für den Äquivalentdurchmesser  $D_a$ . Die experimentelle Bestimmung des Äquivalentdurchmessers nach der Methode von ERGUN [3] lieferte Werte, wie sie in Tabelle 2 zusammengestellt sind. Es zeigte sich dabei, dass folgende Zusammenhänge mit dem mittleren Korndurchmesser  $D_m$  bestehen:

- Kugeln:  $D_a = D_m$
- gebrochenes Silicagel:  $D_a = 0,865 \cdot D_m$
- Aktivkohle-Granulat und -Zylinder:  $D_a = 0,635 \cdot D_m$

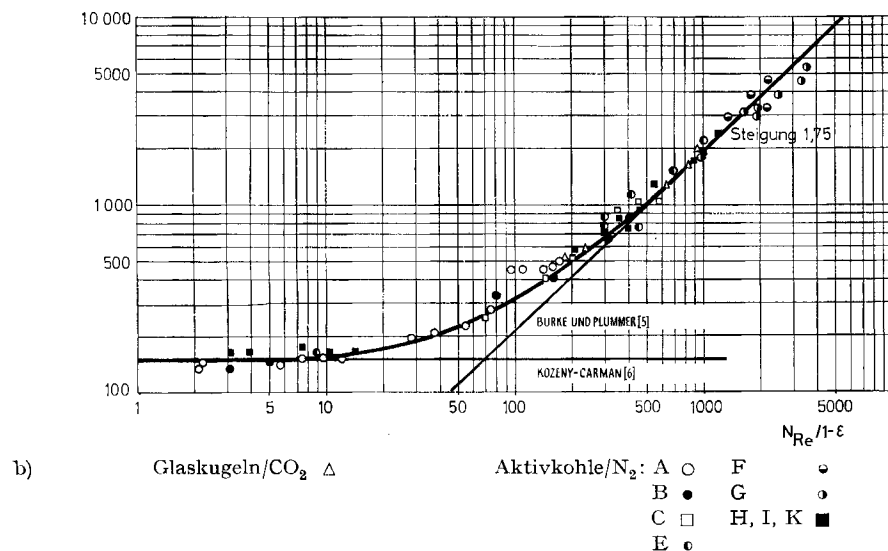
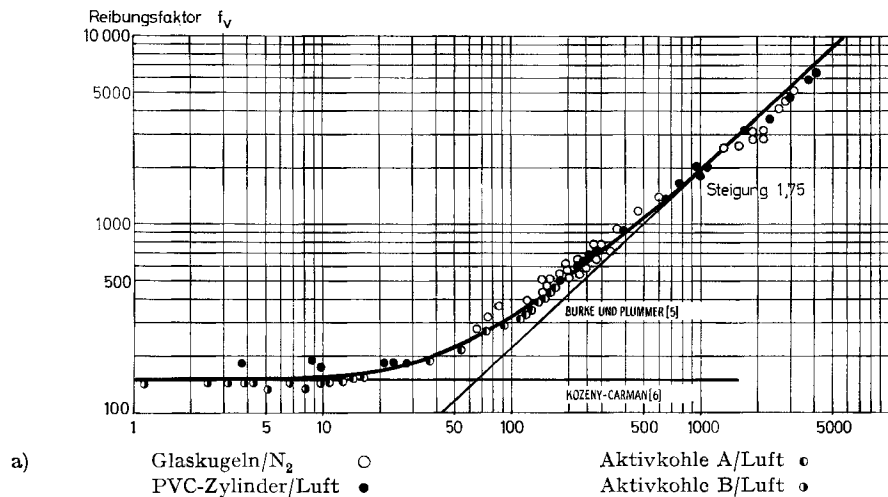


Fig. 7. Reibungsfaktor nach ERGUN als Funktion der Strömungskennzahl  
Messdruck = 1–21 ata



Die erwähnte Methode liefert primär die Kornoberfläche, die zum Äquivalentdurchmesser  $D_a$  definitionsgemäss durch die Relation  $D_a = 6/S_p$  verknüpft ist. Die Abhängigkeit der experimentell ermittelten Kornoberflächen vom mittleren Korndurchmesser ist aus Fig. 6 ersichtlich.

b) *Auswertung der Messergebnisse nach ERGUN* [2]. Mit Hilfe der Äquivalentdurchmesser war es in der Folge möglich, die Druckabfallmessungen nach ERGUN in bezug auf die geltenden Reibungsfaktoren auszuwerten. Diese liefern mit der Strömungskenngrösse  $N_{Re}/(1 - \varepsilon)$  einen Zusammenhang, wie er aus Fig. 7 hervorgeht.

Die Auswertung der Messwerte zeigte demzufolge, dass die Beziehung von ERGUN zur Berechnung des Druckabfalles strömender Gase auch bei erhöhtem Druck Gültigkeit besitzt. Die zur Berechnung erforderlichen Äquivalentdurchmesser können experimentell bei Normaldruck bestimmt werden.

#### ZUSAMMENFASSUNG

Es wurden Untersuchungen über den Druckverlust strömender Gase in Schütt-schichten bei Absolutdrucken von 1–21 ata durchgeführt. Die Untersuchungen führten zur Bestimmung von Reibungs- und Form-Oberflächen-Faktoren für geometrisch definierte und undefinierte Partikel mit poröser und unporöser Kornstruktur.

Es wurden weiter für verschiedene Materialien unterschiedlicher Kornform und Korngrösse Äquivalentdurchmesser bestimmt.

Es konnte gezeigt werden, dass die bisher nur bei Normaldruck geprüften Beziehungen zur Berechnung des Druckabfalles auch bei erhöhtem Druck volle Gültigkeit besitzen.

Technisch-chemisches Laboratorium  
Eidg. Technische Hochschule, Zürich

#### LITERATURVERZEICHNIS

- [1] M. LEVA, M. GRUMMER, M. WEINTRAUB & M. POLLCHIK, Chem. Engng. Progr. 43, 549, 633, 713 (1947).
- [2] S. ERGUN, Chem. Engng. Progr. 48, 89 (1952).
- [3] S. ERGUN, Progr. analyt. Chemistry 24, 388 (1952); Analyt. Chemistry 23, 151 (1951).
- [4] H. HERBST, Kolloid-Beih. 42, 273 (1935).
- [5] S. P. BURKE & W. B. PLUMMER, Ind. Engng. Chemistry 20, 1196 (1928).
- [6] J. KOZENY, Sitz.-Ber. Akad. Wiss. Wien (Abt. IIa) 136, 271 (1927); P. C. CARMAN, Trans. Instn. chem. Engr. (London) 15, 150 (1937).