

Bild 9. Spur des Knickschleppers und die Bewegung des Momentanpols, links:  $w(t) = w_m \sin(t)$ , rechts:  $w(t) = At + B$ ;  $w_m = 720^\circ$ ,  $t_{\text{end}} = 30 \text{ s}$ ,  $v = 34,72 \text{ cm/s}$ .

## Untersuchungen zum Abscheidegrad und Druckverlustanstieg von Schüttstofffiltern

Von R. Nied, München\*)

DK 621.928.004.1

Für Schüttstofffilter sind die Filtrationsmechanismen am Einzelelement weitgehend bekannt, für das Zusammenwirken im Filterverband liegen jedoch nur wenige Untersuchungsergebnisse vor. In der nachfolgend dargestellten Arbeit werden der Druckverlust und Gesamtabscheidegrad eines Labor-Schüttstofffilters experimentell untersucht. Die Parameter — Höhe der Schüttstoffschicht, Durchmesser der Filterelemente, Luftgeschwindigkeit, Staubbelastung des Rohgases, relative Luftfeuchte — wurden in weiten Bereichen variiert. Gleichungen zur Berechnung von Druckverlust und Gesamtabscheidegrad werden vorgestellt.

Für die finanzielle Förderung dieses Projektes sei der Deutschen Forschungsgemeinschaft auch an dieser Stelle gedankt.

\*) Dipl.-Ing. R. Nied ist wiss. Mitarbeiter von Prof. Dr.-Ing. J. Wessel am Lehrstuhl für Landmaschinen (Direktor: o.Prof. Dr.-Ing. W. Söhne) der Technischen Universität München.

### 1. Einleitung

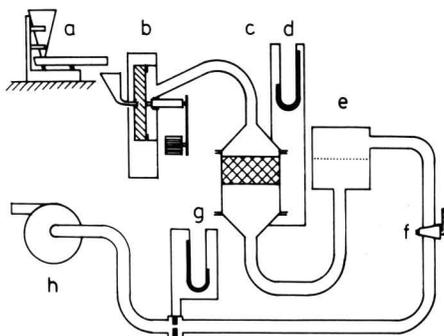
Schüttstofffilter sind Filter, deren Filtermedium aus einer Festkörperpackung besteht. Die Elemente dieser Packung können sowohl regellose Form (Kies, Sand, Koks etc.) als auch definierte geometrische Formen (Kugeln, Ringe, Sattelkörper) aufweisen. Ihre Beständigkeit gegen hohe Gastemperaturen und schleißende Stäube ist höher als bei Faserfiltern. Die Filtrationsmechanismen am Einzelelement sind weitgehend bekannt, für das Zusammenwirken der Grundvorgänge im Filterverband liegen jedoch nur wenige Untersuchungsergebnisse vor.

### 2. Beschreibung der Versuchsanlage und Versuchsmethodik

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde der Einfluß der volumenbezogenen spezifischen Filterbelegung  $W$ , des Filterelementdurchmessers  $d_F$ , der Schütthöhe  $H$ , der auf den freien Querschnitt bezogenen mittleren Anströmgeschwindigkeit  $v_f$  und des Massenstromes des Staubes  $\dot{m}_t$  auf den Gesamtabscheidegrad  $\eta_{\text{ges}}$  und den Druckverlust  $\Delta p$  untersucht. Ferner wurden die relative Luftfeuchte  $\varphi_L$  und die Lufttemperatur  $\vartheta$  bei jedem Versuch mitgemessen. Die Versuchsparameter wurden in folgenden Bereichen variiert:

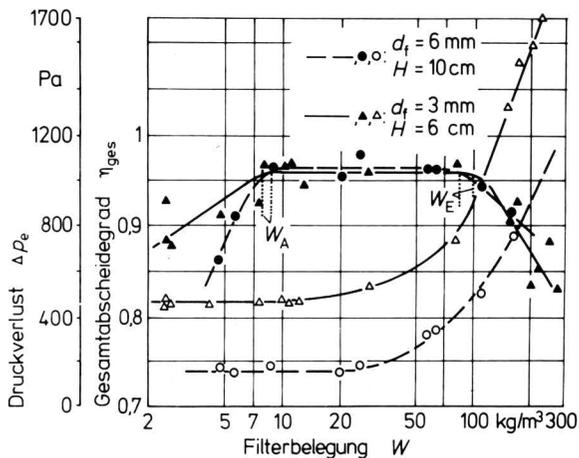
0,5 kg/m <sup>3</sup>	< W < 330 kg/m <sup>3</sup>
2 cm	< H < 10 cm
0,4 m/s	< v <sub>f</sub> < 1,1 m/s
(entsprechend 40 m <sup>3</sup> /h)	< $\dot{V}_{L,n}$ < 110 m <sup>3</sup> /h)
0,56 · 10 <sup>-4</sup> kg/s	< $\dot{m}_t$ < 22,2 · 10 <sup>-4</sup> kg/s
(entsprechend 5 g/m <sup>3</sup> )	< $\zeta_{R,n}$ < 40 g/m <sup>3</sup> )
11 %	< $\varphi_L$ < 65 %.

Den Aufbau der Versuchsanlage zeigt **Bild 1**. Als Filterelemente wurden Glaskugeln mit den Durchmessern  $d_F = 1,2; 3$  und  $6$  mm verwendet. Das disperse Medium war Kalkstein mit einer Korngröße von  $2 \mu\text{m}$  bis  $30 \mu\text{m}$  ( $10\% > 14 \mu\text{m}$ ;  $90\% > 3,9 \mu\text{m}$ ) und einer Dichte von  $\rho = 2,72 \text{ g/cm}^3$ . Nähere Angaben zur Versuchsanlage und Versuchsmethodik sind einer früheren Veröffentlichung des Autors [1] zu entnehmen.



**Bild 1.** Versuchsanordnung zur Messung von Gesamtabscheidegrad und Druckverlust von Schüttungsschichtfiltern.

- a Vibrorinne
- b Kanalradsichter; Laufraddurchmesser  $D = 17 \text{ cm}$   
Drehzahl  $n = 2500 \text{ 1/min}$
- c Schüttungsschichtfilter; Anströmfläche  $F = 0,02545 \text{ m}^2$
- d U-Rohr-Manometer zur Druckverlustmessung
- e Schlauchfilter als Endabscheider
- f Drosselorgan zur Durchflußregelung
- g Meßstelle mit Meßblende und U-Rohr-Manometer für den Durchfluß
- h Ringgebläse

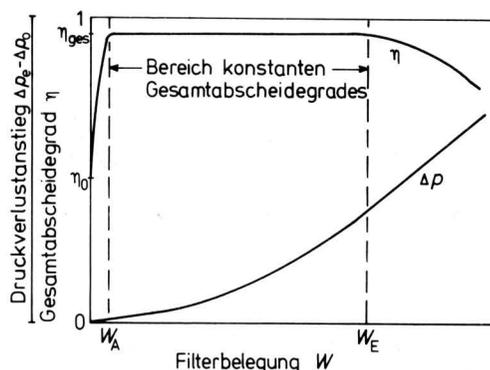


**Bild 2.** Gesamt-Abscheidegrad  $\eta_{\text{ges}}$  (●, ▲) und Druckverlust  $\Delta p_e$  (○, △) in Abhängigkeit von der Filterbelegung  $W$  mit Variation von Filterelementdurchmesser  $d_F$  und Schütthöhe  $H$ ; Anströmgeschwindigkeit  $v_f = 1,0 \text{ m/s}$ , Massenstrom des dispergierten Kalksteins  $\dot{m}_t = 5,5 \cdot 10^{-4} \text{ kg/s}$ , relative Luftfeuchte  $\varphi_L = 27 \%$ .

### 3. Versuchsergebnisse

In **Bild 2** sind der Gesamtabscheidegrad  $\eta_{\text{ges}}$  und der Druckverlust  $\Delta p_e$  über der Filterbelegung  $W$  aufgetragen. Die Parameter  $d_F$  und  $H$  wurden aus zahlreichen Versuchen so gewählt, daß sich ein annähernd gleicher maximaler Gesamtabscheidegrad ergab. Wie die zugehörigen Druckverlustkurven belegen, ist die Anordnung der  $6 \text{ mm}$ -Kugeln in einer  $10 \text{ cm}$  hohen Schüttung bei Vergleich von Druckverlust und Abscheidung der  $6 \text{ cm}$  hohen Packung mit  $3 \text{ mm}$  Kugeldurchmesser überlegen. Wie bereits dieses Beispiel zeigt, sind der Abscheidegrad und der Druckverlust durch geeignete Variation der Parameter wesentlich zu beeinflussen. Eine qualitative Beschreibung der dabei auftretenden Vorgänge wird von *Wessel und Nied* [1] vorgeschlagen:

Der Verlauf von Druckverlust und Abscheidegrad legt eine Einteilung des Abscheidevorganges in drei Bereiche nahe, siehe **Bild 3**. Im ersten steigt der Gesamtabscheidegrad  $\eta_{\text{ges}}$  von seinem Anfangswert  $\eta_0$  auf seinen Maximalwert an; der Druckverlust verläuft in diesem Bereich nahezu konstant. Im zweiten Bereich bleibt der Abscheidegrad auf seinem Maximalwert, der Druckverlust nimmt progressiv mit der Filterbelegung zu. Der dritte Bereich ist schließlich durch den schlechter werdenden Abscheidegrad bei linearem Druckverlustanstieg gekennzeichnet.



**Bild 3.** Schema des Verlaufes von Abscheidegrad und Druckverlust in den drei Bereichen der Filtration.

### 4. Theoretische Analyse

Auf der Grundlage dieser Modellvorstellung wurde ein Berechnungsverfahren entwickelt, das die Bestimmung von Druckverlust und Gesamtabscheidegrad im zweiten Bereich, der für die praktische Anwendung von Bedeutung ist, ermöglichen soll. Zunächst ist die Lage dieses zweiten Bereiches mit Hilfe der beiden Punkte  $W_A$  und  $W_E$  zu bestimmen.  $W_A$  bezeichnet hierbei die Filterbelegung, bei der der Gesamtabscheidegrad bei der jeweiligen Parametergruppierung sein Maximum erreicht. Das Ende des Bereiches des konstanten, höchsten Gesamtabscheidegrades wird bei der Filterbelegung  $W_E$  erreicht. Die empirisch mit Hilfe der multiplen Regression [2] aus zahlreichen Versuchsergebnissen gewonnenen Gleichungen für  $W_A$  und  $W_E$  lauten:

$$W_A = 572 \frac{v_f^{0,889} d_F^{1,164}}{\dot{m}_t^{0,122} H^{1,075} \varphi_L^{0,536}} \quad (1)$$

$$W_E = 203,6 \frac{\dot{m}_t^{0,198} H^{0,505}}{v_f^{0,679} d_F^{0,486} \varphi_L^{0,067}} \quad (2)$$

Das multiple Bestimmtheitsmaß  $B$  für diese Beziehungen ergab sich zu:

$$B_{W_A} = 86,3 \%$$

$$B_{W_E} = 80,3 \%$$

Der Druckverlustanstieg  $\Delta p_e - \Delta p_0$  zeigt im betrachteten Bereich 2 einen progressiven Anstieg mit der Filterbelegung  $W$ . Der folgen- de Potenzansatz, der ebenfalls mit der Methode der multiplen Re- gressionsrechnung bestimmt wurde, gibt dies wieder:

$$\Delta p_e - \Delta p_0 = 2,22 \cdot 10^{-2} \frac{H^{1,386} W^{1,137}}{v_f^{0,386} \dot{m}_t^{0,003} d_F^{1,651} \varphi_L^{0,344}} \quad (3)$$

Das multiple Bestimmtheitsmaß  $B$  für die Beziehung lautet:

$$B = 94,1 \%$$

Der Anfangsdruckverlust  $\Delta p_0$  läßt sich nach *Mersmann* [3] für das durchströmte, trockene Festbett berechnen zu:

$$\Delta p_0 = \xi \frac{\rho_L v_f^2}{2} \cdot \frac{1}{d_F} \cdot \frac{1 - \epsilon}{\epsilon^3} H \quad (4)$$

mit

$$\xi = \frac{300}{Re} + 3,50$$

$$\text{für } Re = \frac{v_f d_F}{(1 - \epsilon) \nu} \leq 10^3.$$

Für die Berechnung des Gesamtabscheidegrades  $\eta_{ges}$  wurden theo- retische Erkenntnisse herangezogen. Da die Anströmgeschwindig- keit  $v_f$  relativ groß war und die Körnung des verwendeten Kalk- staubes bei  $d_p > 1 \mu\text{m}$  lag, kann als maßgeblicher Filtrationseffekt die Trägheitsabscheidung angenommen werden. Für den Auftreff- grad eines einzelnen, kugelförmigen Filterelementes gilt dann nach *Langmuir* und *Blodgett* [4] bei zäher Umströmung folgende Be- ziehung:

$$\eta_T = \left[ 1 + \frac{0,75 \ln(2 \cdot \text{Stk})}{\text{Stk} - 1,214} \right]^{-2} \quad (5)$$

$$\text{mit } \text{Stk} = \frac{v_f d_p^2 \rho_p}{18 \eta_L d_F}$$

In der differentiellen Schichtdicke  $dH$  einer Filterpackung der Höhe  $H$  ändert sich die Konzentration  $c$  eines staubhaltigen Gases:

$$-dc = \frac{6(1 - \epsilon) dH}{\pi d_F^3} \cdot \frac{\pi d_F^2}{4} \eta_E c \quad (6)$$

Wird Gl. (6) in den Grenzen  $c_{ein}$  bis  $c_{aus}$  integriert, so erhält man:

$$\int_{c_{ein}}^{c_{aus}} \frac{1}{c} dc = 1,5 \frac{(1 - \epsilon)}{d_F} \eta_E \int_0^H dH \quad (7)$$

$$\ln(c_{aus}/c_{ein}) = -1,5 \cdot \frac{(1 - \epsilon)}{d_F} H \eta_E \quad (8)$$

$$\text{mit } c_{aus}/c_{ein} = 1 - \eta(d_p) \quad (9)$$

ergibt sich:

$$\ln[1 - \eta(d_p)] = -1,5 \cdot \frac{(1 - \epsilon)}{d_F} H \eta_E \quad (10)$$

Nach *Löffler* [5] setzt sich der Abscheidegrad eines Elementes aus dem Auftreffgrad  $\eta_T$  multipliziert mit der Haftwahrscheinlichkeit  $h_W$  zusammen:

$$\eta_E = \eta_T \cdot h_W \quad (11)$$

Für den betrachteten Bereich 2 der Filtration wird angenommen, daß alle auf die Oberfläche eines Filterelementes auftreffenden Staubteilchen haften, also  $h_W = 1$  ist. Man erhält somit:

$$\eta_E = \eta_T \quad (12)$$

Setzt man Gl. (12) in Gl. (10) ein, ergibt sich für eine bestimmte Korngröße  $d_p$  der Fraktionsabscheidegrad einer Schütttschicht:

$$\eta(d_p) = 1 - \exp \left[ -1,5 \frac{(1 - \epsilon)}{d_F} H \left( 1 + \frac{0,75 \ln(2 \cdot \text{Stk})}{\text{Stk} - 1,214} \right)^{-2} \right] \quad (13)$$

Zur Ermittlung des Gesamtabscheidegrades  $\eta_{ges}$  muß über die Häufigkeitsverteilung  $h(d_p)$  des abzuschheidenden Staubes inte- griert werden:

$$\eta_{ges} = \int_{d_{min}}^{d_{max}} \eta(d_p) \cdot h(d_p) d d_p \quad (14)$$

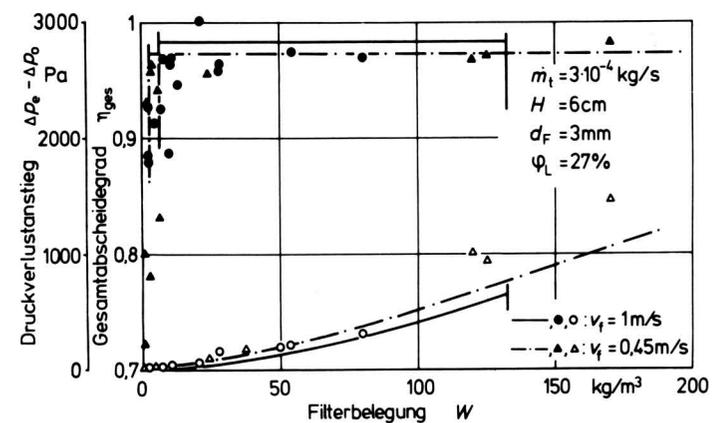
Mit Gl. (13) erhält man:

$$\eta_{ges} = \int_{d_{min}}^{d_{max}} \left\{ 1 - \exp \left[ -1,5 \frac{(1 - \epsilon)}{d_F} H \left( 1 + \frac{0,75 \ln(2 \cdot \text{Stk})}{\text{Stk} - 1,214} \right)^{-2} \right] \right\} \cdot h(d_p) d d_p \quad (15)$$

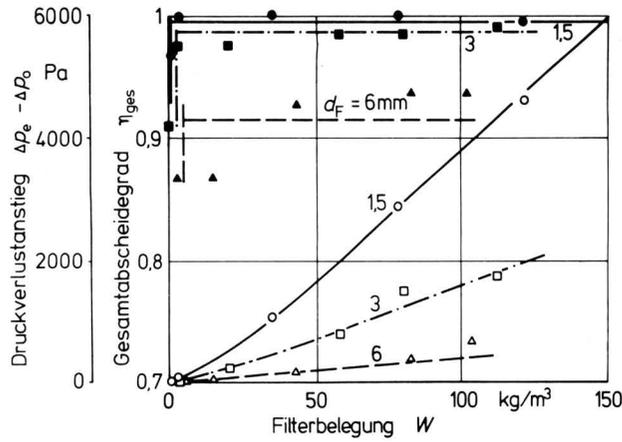
Die Häufigkeitsdichteverteilung des Staubes  $h(d_p)$  ist experimen- tell zu ermitteln. Damit ist eine geschlossene Lösung von Gl. (15) nicht mehr möglich. Mit Hilfe eines programmierbaren Rechners wurde Gl. (15) numerisch gelöst.

## 5. Vergleich von Theorie und Versuchsergebnissen

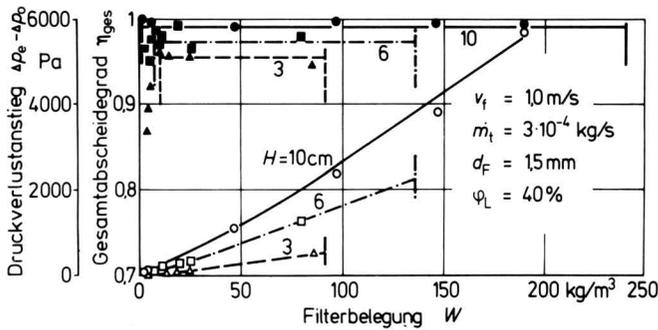
In **Bild 4 bis 6** sind die mit Gln. (3) und (15) berechneten Druck- verlust- und Abscheidegradkurven mit den Grenzen  $W_A$  und  $W_E$  nach Gln. (1) und (2) über der Filterbelegung  $W$  aufgetragen. Als Parameter wurden in **Bild 4** die auf den freien Querschnitt bezoge- nen mittleren Anströmgeschwindigkeiten  $v_f = 1,0 \text{ m/s}$  und  $v_f = 0,45 \text{ m/s}$  gewählt. Der Gesamtabscheidegrad erreicht bei der größeren Anströmgeschwindigkeit sein Maximum erst bei einer höheren Filterbelegung und fällt früher wieder ab. Gleichzeitig ist jedoch der Maximalwert größer. Der Anfangsdruckverlust ist bei  $v_f = 1,0 \text{ m/s}$  größer, **Tafel 1**, der Druckverlustanstieg hingegen flacher.



**Bild 4.** Gemessener Gesamtabscheidegrad  $\eta_{ges}$  ( $\bullet$ ,  $\blacktriangle$ ) und Druck- verlustanstieg  $\Delta p_e - \Delta p_0$  ( $\circ$ ,  $\triangle$ ) in Abhängigkeit von der Filterbe- legung  $W$  mit der Anströmgeschwindigkeit  $v_f$  als Parameter im zweiten Bereich der Filtration. Die Kurvenzüge geben das Ergeb- nis der Rechnung wieder.



**Bild 5.** Gesamtabscheidegrad  $\eta_{ges}$  (●, ■, ▲) und Druckverlustanstieg  $\Delta p_e - \Delta p_0$  (○, □, △) aufgetragen über der Filterbelegung  $W$  bei variiertem Filterelementdurchmesser  $d_F$ . Die eingezeichneten Linien entsprechen dem berechneten Kurvenverlauf im zweiten Bereich der Filtration; Höhe der Schüttschicht  $H = 10$  cm; Anströmgeschwindigkeit  $v_f = 0,4$  m/s, Massenstrom  $\dot{m}_t = 3 \cdot 10^{-4}$  kg/s; relative Luftfeuchte  $\varphi_L = 40$  %.



**Bild 6.** Gesamtabscheidegrad  $\eta_{ges}$  (●, ■, ▲) und Druckverlustanstieg  $\Delta p_e - \Delta p_0$  (○, □, △) in Abhängigkeit von der Filterbelegung  $W$ . Eingezeichnete Kurven wurden nach Gln. (1), (2), (3) und (15) berechnet bei variiertem Schütthöhe  $H$ .

$d_F$ mm	$H$ cm	$v_f$ m/s	$\Delta p_0$ Pa
1,5	3	1,0	388
1,5	10	1,0	1107
1,5	10	0,4	375
3	6	1,0	424
3	6	0,45	94
3	10	0,4	146
6	10	0,4	88
6	10	1,0	150

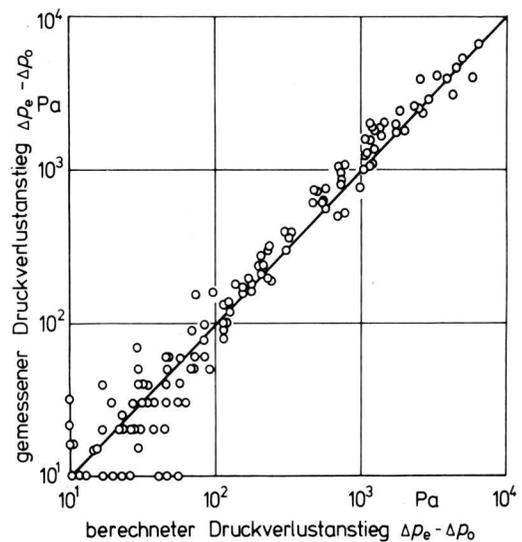
**Tafel 1.** Einige gemessene Anfangsdruckverlustwerte mit den zugehörigen Parametern.

Die Kurven in Bild 5 unterscheiden sich durch verschiedene Filterelementdurchmesser  $d_F$ . Im zweiten Bereich steigt mit abnehmendem  $d_F$  der Abscheidegrad an, gleichzeitig verschieben sich  $W_A$  zu niedrigeren und  $W_E$  zu höheren Werten hin, Tafel 2. Der Anfangsdruckverlust  $\Delta p_0$  steigt mit kleiner werdendem  $d_F$  an, der Druckverlustverlauf wird steiler.

$v_f$ m/s	$\dot{m}_t$ $10^{-4}$ kg/s	$d_F$ mm	$H$ cm	$\varphi_L$ %	$W_A$ kg/m <sup>3</sup>	$W_E$ kg/m <sup>3</sup>	$\eta_{ges}$
0,4	1,3	1,5	10	22	1,08	332	0,995
0,8	2,2	1,5	10	29	1,36	260	0,987
1,1	2,9	1,5	10	24	1,76	240	0,980
0,4	1,3	1,5	3	24	4,20	184	0,989
0,4	3	1,5	3	11	4,00	260	0,992
1,1	3	1,5	3	20	7,36	136	0,967
1,1	9	1,5	3	11	7,72	176	0,960
0,4	1	3	10	11	2,84	272	0,994
0,4	3,3	3	10	15	2,24	344	0,994
1,1	2,5	3	10	23	4,72	172	0,993
1,1	9	3	10	26	3,48	204	0,992
0,4	1,5	3	6	31	3,64	184	0,989
0,4	4	3	6	24	2,84	268	0,987
0,8	0,9	3	6	30	6,12	124	0,990
1,1	1,0	3	6	27	6,20	140	0,989
1,1	0,9	3	6	28	4,96	172	0,990
0,8	1,7	6	6	23	12,40	88	0,912
0,8	0,9	6	6	25	11,76	128	0,922
1,1	1,1	6	6	23	16,80	92	0,935
1,1	1,0	6	6	22	13,20	124	0,931
0,4	1,2	6	6	21	8,00	152	0,864
0,4	4,0	6	6	22	7,28	164	0,886
0,4	1,3	6	10	23	5,24	144	0,948
0,8	2,0	6	10	21	8,00	136	0,971
1,1	2,5	6	10	23	8,84	120	0,976

**Tafel 2.** Aufstellung einiger berechneter Werte für  $W_A$  (nach Gl. (1)),  $W_E$  (nach Gl. (2)) und  $\eta_{ges}$  (nach Gl. (15)) mit den im Versuch variierten Parametern.

In Bild 6 wurde als Parameter die Höhe der Schüttschicht  $H$  gewählt. Es zeigt sich, daß mit zunehmendem  $H$  das Maximum des Gesamtabscheidegrades bei steilerem Druckverlustanstieg größer wird, ebenso erweitert sich der 2. Bereich der Filtration. Wie aus den eingezeichneten Meßpunkten in Bild 4 bis 6 sowie aus Bild 7 und 8 ersichtlich, stimmen Theorie und Experiment gut überein.



**Bild 7.** Gemessener Druckverlustanstieg  $\Delta p_e - \Delta p_0$  aufgetragen über dem nach Gl. (3) berechneten. Eingezeichnete Linie ist Solllinie.

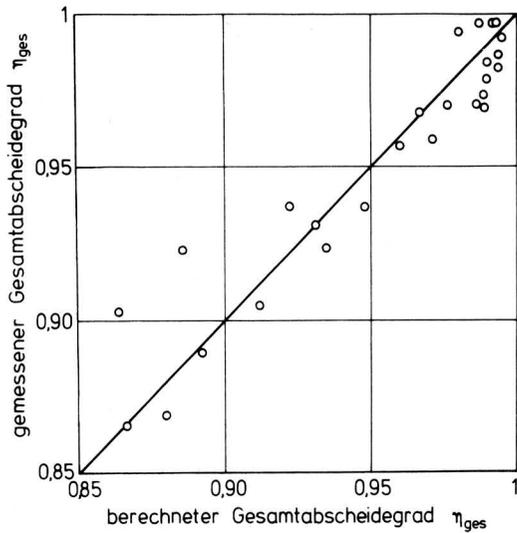


Bild 8. Gemessener Gesamtabscheidegrad  $\eta_{ges}$  aufgetragen über dem nach Gl. (15) berechneten. Eingezeichnete Linie ist Solllinie.

## 6. Zusammenfassung

An einem Labor-Schütttschichtfilter mit Glaskugeln als Filterelementen wurden Untersuchungen über den Einfluß der wichtigsten Parameter (Höhe der Schütttschicht  $H$ , Filterelementdurchmesser  $d_F$ , Anströmgeschwindigkeit  $v_f$ , Massenstrom des Staubes  $\dot{m}_t$ , Filterbelegung  $W$  und relative Luftfeuchte  $\varphi_L$ ) auf den Gesamtabscheidegrad  $\eta_{ges}$  und den Druckverlustanstieg  $\Delta p_e - \Delta p_0$  vorgenommen. Aus den Ergebnissen konnten teils empirisch mit Hilfe der multiplen Regressionsanalyse, teils auch durch theoretische Betrachtungen Beziehungen für den Gesamtabscheidegrad  $\eta_{ges}$  und den Druckverlustanstieg  $\Delta p_e - \Delta p_0$  im zweiten Bereich der Filtration gefunden werden. Die gefundenen Beziehungen, die Gln. (1), (2), (3) und (15), weisen eine befriedigende Übereinstimmung mit dem Experiment auf.

### Verwendete Formelzeichen

$c_{ein}$		Feststoffkonzentration im einströmenden Rohgas
$c_{aus}$		Feststoffkonzentration im ausströmenden Reingas
$d_F$	m	Filterelementdurchmesser
$d_p$	m	Partikeldurchmesser des Staubes

$h(d_p)$		Häufigkeitsdichteverteilung des Staubes
$h_w$		Haftwahrscheinlichkeit
$H$	m	Höhe der Schütttschicht
$\dot{m}_t$	kg/s	Massenstrom des Staubes
$\Delta p$	Pa	Druckverlust
$\Delta p_e$	Pa	Enddruckverlust
$\Delta p_0$	Pa	Anfangsdruckverlust
$v_f$	m/s	auf den freien Querschnitt bezogene mittlere Anströmgeschwindigkeit
$\dot{V}_{L,n}$	m <sup>3</sup> /h	Volumenstrom der Luft bei Normalzustand
$W$	kg/m <sup>3</sup>	volumenbezogene spezifische Filterbelegung
$\zeta_{R,n}$	g/m <sup>3</sup>	Rohgasbeladung, bezogen auf Normalzustand
$\eta_T$		Auftreffgrad eines Filterelementes bei Trägheitsabscheidung
$\eta_E$		Abscheidegrad eines Filterelementes
$\eta(d_p)$		Fractionsabscheidegrad einer Filterpackung
$\eta_{ges}$		Gesamtabscheidegrad
$\vartheta$	°C	Temperatur
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte
$\varphi_L$	%	relative Luftfeuchte
$\nu$	m <sup>2</sup> /s	kinematische Viskosität
$\eta$	Pa s	dynamische Viskosität
$\epsilon$		Porosität

### Schrifttum

- [ 1 ] *Nied, R. u. J. Wessel:* Beitrag zur Staubabscheidung in ruhenden trockenen Kugelschüttungen. Chemie-Ing.-Techn. Bd. 50 (1978) Nr. 5, S. 402/403.
- [ 2 ] *Soom, E.:* Varianzanalyse, Regressionsanalyse und Korrelationsrechnung. Blaue TR-Reihe Heft 102; Verlag Technische Rundschau Bern, Stuttgart 1972.
- [ 3 ] *Mersmann, A.:* Skriptum Mechanische Verfahrenstechnik. München 1975.
- [ 4 ] *Langmuir, I. u. K.B. Blodgett:* Report No. RL-225, General Electr. Res. Lab., Schenectady, N.Y. (1944/45).
- [ 5 ] *Löffler, F.:* Apparate und Verfahren der industriellen Gasreinigung (Hrsg. von *Weber/Brocke*) Bd. 1: Feststoffabscheidung, S. 145 ff. München Wien: R. Oldenbourg Verlag 1973.