

Zur Verbesserung der Klärung in Dekantierzentrifugen\*

Werner Stahl und Thomas Langeloh\*\*

Zur Auslegung von Dekantierzentrifugen steht von der theoretischen Seite bisher nur das auf das Fliehkraftfeld übertragene Stokesche Gesetz und die daraus abgeleitete Theorie der äquivalenten Klärfläche zur Verfügung. Diese von Smith und Hebb [1] eingeführte Beziehung berücksichtigt nur pauschal die Klärfläche des Dekanters. Andere Auslegungsdaten, wie z. B. die Geometrie der Schnecke oder die Einstellung der Teichtiefe, werden dabei nicht berücksichtigt. Für den Durchsatz gilt nach der Theorie der äquivalenten Klärfläche folgende Beziehung:

$$Q = \frac{4\pi^3}{9} \frac{\Delta \rho}{\eta} x_s^2 n_H^2 L_e r_m^2 \quad (1)$$

Eine Beschreibung der Abscheidung ist mit diesem Gesetz nicht immer möglich. Die Theorie der äquivalenten Klärfläche läßt sich jedoch durch Korrekturfaktoren nicht immer an die Vorgänge in der Zentrifuge anpassen [2].

Bildet man mit Hilfe dieser Theorie ein Wachstumsgesetz, so erhält man für eine bestimmte zu trennende Suspension bei gleicher Zentrifugalbeschleunigung beider Maschinen – ähnliche Vergrößerung der Rotoren vorausgesetzt – eine Durchsatzsteigerung mit der zweiten Potenz des Vergrößerungsfaktors i:

$$Q_{\text{Haupt}} = i^2 Q_{\text{Pilot}} \quad (2)$$

Diese Beziehung steht im Widerspruch zu vielen Ergebnissen der Praxis, wonach bei gleicher Beschleunigungsziffer eine Kapazitätserhöhung mit der dritten Potenz des Vergrößerungsfaktors beobachtet wurde.

Betrachtet man den Verlauf des Durchschlages – d. h. des Feststoffgehalts im Zentrat – als Funktion des Durchsatzes, so erkennt man, daß der Durchschlag bis zu einem gewissen, sehr gut reproduzierbaren Durchsatz  $Q_{\text{krit}}$  zunächst nur schwach und danach sprunghaft ansteigt (Abb. 1). Dieser plötzliche, steile Anstieg läßt sich mit Hilfe der Theorie der äquivalenten Klärfläche nicht erklären;

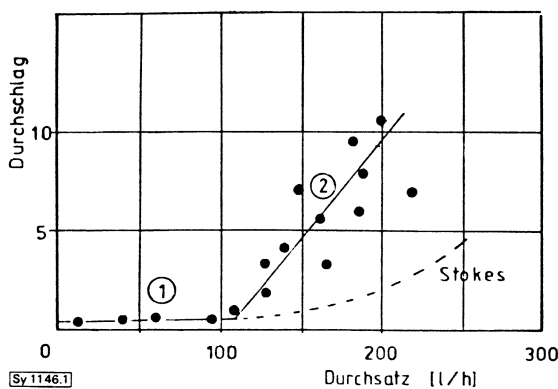
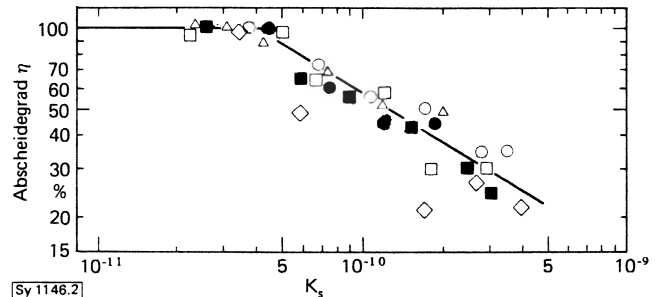


Abb. 1. Verlauf des Durchschlages als Funktion des Durchsatzes.

\* Vortrag auf dem Jahrestreffen der Verfahrens-Ingenieure, 29. Sept. bis 1. Okt. 1982 in Basel.

\*\* Prof. Dr.-Ing. W. Stahl (Vortragender) und Dipl.-Ing. Th. Langeloh, Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik der Univ. Karlsruhe (TH), Kaiserstr. 12, 7500 Karlsruhe.

man würde einen wesentlich flacheren Kurvenverlauf erhalten. Es ist also anzunehmen, daß ab dem kritischen Durchsatz für die Beschreibung der Abscheidung ein anderes Gesetz gültig ist. Folgender Effekt ist dafür verantwortlich: Die mit zunehmendem Durchsatz steigende Schubspannung in der Flüssigkeit auf der Oberfläche der Feststoffgrundsicht in der Trommel veranlaßt die bereits abgesetzten Feststoffteilchen, entlang dem schraubenförmigen Schneckenkanal zum Wehr zu wandern, wo sie dann mit dem Zentrat aus dem Rotor gespült werden.



Sy 1146.2

Abb. 2. Der Abscheidegrad als Funktion der Kennzahl  $K_s$ .

	große Maschine				kleine Masch.	
Symbol	□	○	●	■	◇	△
C-Wert	1000	1000	1000	700	500	1000
Differenzdrehzahl [1/min]	20	15	15	20	20	20,8
Niveau [mm]	90	65	100	90	90	30

An einem bereits abgesetzten Teilchen greifen folgende Kräfte an (Schleppkraftansatz):

$$\text{Anpreßkraft } F_A = \frac{\pi}{6} x^3 \Delta \rho g C, \quad (3)$$

$$\text{Reibungskraft } F_H = f F_A, \quad (4)$$

$$\text{Schleppkraft } F_s = \frac{\pi}{4} x^2 \eta \kappa. \quad (5)$$

Unter der Annahme einer laminar ausgebildeten ebenen Schichtströmung erhält man für den Durchsatz:

$$Q = f \frac{2}{9} g C \frac{\Delta \rho}{\eta} x_s h_{\text{Niv}}^2 b_k \quad (6)$$

Aus Abb. 2 sieht man, daß sich für die Beurteilung verschiedener Maschineneinstellungen und Maschinen die aus dem Schleppkraftansatz gefolgerte Kennzahl

$$K_s = \frac{Q \eta}{n_H^2 h_{\text{Niv}}^2 b_k r \Delta \rho} \quad (7)$$

eignet. Eine analoge Auftragung nach der Theorie der äquivalenten Klärfläche ergibt keine Normierung der Versuchsergebnisse auf eine einzige Kurve.

Nimmt man für zwei verschieden große Maschinen die gleiche Zentrifugalbeschleunigung an, so erhält man aus Gl. (6) für die Umrechnung der Durchsätze:

$$Q_{\text{Haupt}} = i^3 Q_{\text{Pilot}} \quad (8)$$

Diese Abhängigkeit wurde in der Praxis vielfach gemessen. Es zeigt sich, daß die Abscheidung nicht nur von der Sedimentation, sondern

auch vom Wegschleppen bereits abgesetzter Teilchen abhängt. Bei der Auslegung einer Dekantierzentrifuge mit Hilfe der Ergebnisse einer Pilot-Maschine muß daher die Gültigkeit beider Gesetze überprüft werden. Ein mögliches Verfahren wird in der Langfassung dieses Beitrages ausführlich beschrieben. Zusätzlich werden noch die Auswirkung der Schleppwirkung auf die Investitionskosten für Klärdekanter dargestellt und maschinentechnische Folgerungen gezogen.

Eingegangen am 23. November 1982

$b_k$	[m]	Schneckenkanalbreite
$C$		Schleuderziffer
$f$		Reibwert
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	Erdbeschleunigung
$h_{Niv}$	[m]	Niveauhöhe
$i$		Stufensprung
$K_s$	[m]	Kennzahl
$L_e$	[m]	effektive Klärlänge
$n_H$	[U/min]	Hauptdrehzahl
$r$	[m]	Trommelradius

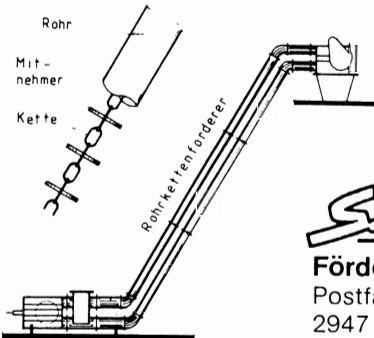
$r_m$	[m]	mittlerer Trommelradius
$Q$	[m <sup>3</sup> /h]	Durchsatz
$x_G$	[m]	Grenzkorndurchmesser
$x_s$	[m]	Schleppkorndurchmesser
$\eta$	[kg/ms]	dynamische Viskosität
$\kappa$	[1/s]	Schergradient
$\Delta \rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichtedifferenz

[1] Smith, F. H.; Hebb, M. H., in: Encyclopedia of Chemical Technology (Kirk, Othmer), Bd. 3, S. 501/521, Interscience, New York 1949.

[2] Müller, H. W.; Schäffer, J.; Conrad, S.: Chem. Tech. (Leipzig) 32 (1980) Nr. 2, S. 76/80.

Schlüsselworte: Dekantierzentrifugen, Klärung, Scale-up.

Das vollständige Manuskript dieser Arbeit umfaßt 49 Seiten mit 25 Abbildungen, 2 Tabellen und 17 Literaturziten. Es ist als Fotokopie oder Mikrofiche MS 1094/83 erhältlich. Eine Bestellkarte finden Sie am Schluß dieses Heftes.



**Programm**  
 Rohrkettenförderer  
 Förderschnecken  
 Gurtförderer  
 Becherwerke  
 Trogkettenförderer  
 Zellenradschleusen

**Schrag** GmbH  
**Förderanlagen**  
 Postfach 1133  
 2947 Friedeburg 1  
 Telefon 0 44 65/14 11  
 Telex 2 51823 srage

## SCHNEIDER-Armaturen

Die neue Generation für Differenzdruck-Meßumformer

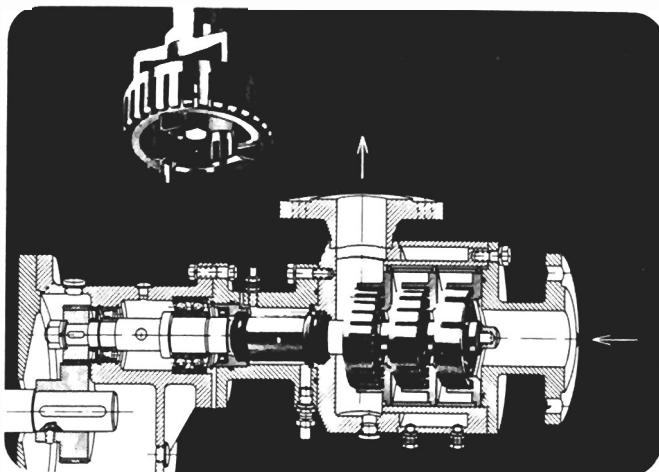


Ventilblöcke und Umschalt-  
 hähne nach DIN 19209  
 Meßblenden-, Ausblase-Ventile  
 und Montagezubehör für  
 komplette Meß-  
 anordnungen  
 Manometer-  
 Armaturen  
 und Zubehör

Armaturenfabrik Franz Schneider  
 D-7107 Nordheim / Heilbronn  
 ☎ (0 71 33) 60 55 <101-0> Telex 07-28850

seit 1875

# DISPERGIEREN · KNETEN · RÜHREN mit IKA®



## ULTRA-TURRAX® · DISPAX-REACTOR®

International zwei feste Begriffe zur Lösung von Dispergierproblemen. Die kompletten Typenreihen für alle verfahrenstechnischen Aufgaben resultieren aus jahrzehntelangen Erfahrungen.

Durch komplexes Zusammenwirken mehrerer Zerkleinerungsmechanismen wird hervorragende Feinverteilung in allen dispersen Systemen erreicht.

## Homogenisieren · Emulgieren · Suspendieren

Maschinengrößen für Chargen bis 6 to, kontinuierlich bis 80 to

- ausgereifte Technik
- große Flexibilität
- geringer Energiebedarf
- hohe Wirtschaftlichkeit

Verlangen Sie auch Prospekte über ULTRA-TURRAX®-Anlagen und IKA-TURBOTRON®-Rührmaschinen



Janke & Kunkel GmbH & Co. KG · IKA-Werk · D 7812 Biengen · Produktionstechnik

Wir stellen aus: K'83 Halle 7 Stand 7 B 30

Zur Verbesserung der Klärung in Dekantierzen-  
trifugen\*

---

Werner Stahl, Thomas Langeloh\*\*

Zusammenfassung

Zur Auslegung von Dekantierzentrifugen steht von der theoretischen Seite bisher im Prinzip nur das auf das Fliehkraftfeld übertragene Stokes'sche Gesetz zur Verfügung. Dies berücksichtigt nur pauschal die Klärfläche des Dekanters; andere Auslegungsdaten des Rotors, wie z.B. die Geometrie der Schnecke oder die Einstellung der Teichtiefe werden dabei nicht berücksichtigt.

Ein besseres Verständnis der Wirkung verschiedener Maschineneinstellungen auf die Klärung im Dekanter und eine sehr gute Übereinstimmung mit einer einfachen Theorie erhält man dann, wenn man davon ausgeht, daß Suspensionspartikel zwar nach der Beschreibung des Stokesschen Gesetzes sedimentieren, sie jedoch in dem aus der Schneckenwendel gebildeten Strömungskanal am Boden nicht liegen bleiben, sondern durch das abströmende Zentrat zum Überlauf gespült werden.

\* Vortrag gehalten auf der Jahrestagung der Verfahreningenieure in Basel am 1. Oktober 1982

\*\* Prof. Dr.-Ing. Werner Stahl (Vortragender)  
und Dipl.-Ing. Thomas Langeloh  
Institut für Mechanische Verfahrenstechnik  
und Mechanik der Universität Karlsruhe (TH).  
Kaiserstr. 12, D-7500 Karlsruhe

## 1. Einleitung und Wissensstand aus Theorie und Praxis

---

Bekanntlich werden Dekantierzentrifugen für den Fall, daß die Feststoffdichte größer als die Flüssigkeitsdichte ist, in vielen Branchen für die unterschiedlichsten Fest-Flüssig-Trennaufgaben eingesetzt. Einer der Gründe dafür dürfte neben der für den Einsatzfall jeweils im Vergleich zu anderen Lösungen nachzuweisenden Wirtschaftlichkeit das weitgehend stabile Betriebsverhalten der Maschine sein; Schwankungen des Zulaufs bezüglich Kornverteilung, Feststoffkonzentration, Zähigkeit u.a. werden von der Maschine "angenommen", es ändern sich lediglich die Trennergebnisse in monotoner Weise. Ein mögliches Betriebsversagen wie es z.B. die Schubzentrifuge bei Schichtdurchbruch zeigt, tritt beim Dekanter nicht auf.

Über die verfahrenstechnische Auslegung wurde von vielen Autoren berichtet, sowohl für die Seite der Feststoffentfeuchtung [1, 2] als auch über die Klärung des Zentrats [3,4,5,6,8,9,10]. Ohne an dieser Stelle auf die einzelnen Beiträge einzugehen, muß man leider feststellen, daß die auf der Theorie der äquivalenten Klärfläche aufbauenden Berechnungsmethoden zur Vorhersage des Feststoffgehalts im Zentrat in keiner Weise allein ausreichen, um Auslegungen für industrielle Zwecke zu treffen.

Dies gilt einerseits für die rein analytische Vorgehensweise, bei der man versucht, aus den Produktdaten (Zähigkeit, Dichteunterschied und Partikelverteilung) im Zusammenwirken mit den konstruktiv festgelegten Maschinenwerten (Durch-

messer und Klärlänge, d.h. der Klärfläche) und den Maschineneinstellwerten (Drehzahl, Differenzdrehzahl, Niveauhöhe) das Klärerergebnis vorherzusagen. Andererseits trifft es aber leider auch noch weitgehend auf die mehr ingenieurmäßige Vorgehensweise zu, nämlich die Übertragung von tatsächlich gemessenen Trennergebnissen eines Pilotdekanterers mit Hilfe von Ähnlichkeitsgesetzen auf eine anvisierte Großausführung.

Die einzige bis heute angewandte Theorie zur Berechnung der Klärung ist bekanntlich das auf das Fliehkraftfeld übertragene Stokessche Gesetz; es beschreibt für den laminaren Bereich die Sedimentation eines starren kugelförmigen Einzelteilchens in einer ruhenden Newtonschen Flüssigkeit.

Gegenüber der technischen Realität im Dekanter unterscheidet sich dieser vereinfachte Modellfall durch folgende Einflüsse, die sich in zwei Gruppen einteilen lassen:

- Produktseitig:
- höhere Feststoffkonzentrationen, dadurch gegenseitige Partikelbeeinflussung
  - nicht kugelige Teilchen
  - Kornverteilungen, kein Gleichkorn
- Maschinenseitig:
- keine kolbenförmige Verschiebung der Flüssigkeit, sondern unbekannte Strömungsprofile
  - Strömungsstörungen durch das Abfließen der Flüssigkeit in den Schneckenkanälen
  - Störungen am Ein- und Ablauf der Klärzone

- Wirkung von Differenzdrehzahl und querschnittsverminderndem sedimentiertem Kuchen, u.a.m.

Viele Autoren haben das Stokesche Gesetz für die Beschreibung der realen Vorgänge im Dekanter durch Einführen von Korrekturfaktoren an die Meßwerte angepaßt. Ohne aber diese Bemühungen abzuwerten, ist doch festzustellen, daß der Wissensstand unbefriedigend ist und daß mit diesem Gesetz viele Erscheinungen nicht zu erklären sind.

Dies wird am deutlichsten, wenn man das aus dieser Theorie hergeleitete Scale-up Gesetz auf seine Leistungsfähigkeit hin überprüft. Vernachlässigt man die verschiedenen Korrekturfaktoren - sie müssen bei ähnlich größer ausgeführtem Dekanter konstant bleiben - so lautet der schon von [3] angegebene Zusammenhang zwischen Durchsatz, noch zulässiger Partikelgröße im Zentrat und den Maschinendaten:

$$Q = \frac{4\pi^3}{9} \cdot \frac{\Delta\rho}{\eta} \cdot x_G^2 \cdot n_H^2 \cdot L_e \cdot \left(r_T - \frac{h_{Niv}}{2}\right)^2 \quad (1)$$

Halten wir die Produktdaten konstant und fragen nur nach dem Einfluß der Geometrie einer um den Stufensprung i größeren Maschine, so ergibt sich daraus durch Verhältnisbildung:

$$\begin{aligned} \frac{Q_{Haupt}}{Q_{Modell}} &= \frac{n_{Haupt}^2}{n_{Modell}^2} \cdot \frac{L_{e_{Haupt}}}{L_{e_{Modell}}} \cdot \frac{\left(r_T - \frac{h_{Niv}}{2}\right)^2_{Haupt}}{\left(r_T - \frac{h_{Niv}}{2}\right)^2_{Modell}} \\ &= \frac{n_{Haupt}^2}{n_{Modell}^2} \cdot i \cdot i^2 \quad (2) \end{aligned}$$

Bei gleicher Zentrifugalbeschleunigung beider Maschinen gilt für die Hauptdrehzahlen

$$\frac{n_{\text{Haupt}}^2}{n_{\text{Modell}}^2} = \frac{1}{i}, \quad \text{da } (r \omega^2)_{\text{Mod}} = (r \omega^2)_{\text{Haupt}} \quad (3)$$

In Wirklichkeit wird bei gleicher Ausnutzung der Festigkeit beider Rotoren nicht die Beschleunigung sondern die Rotorumfangsgeschwindigkeit konstant gehalten. Da die Umfangsspannung im Rotor der Umfangsgeschwindigkeit proportional ist, also  $u \sim r \cdot n = \text{konst}$ , gilt

$$\frac{n_{\text{Haupt}}}{n_{\text{Modell}}} = \frac{1}{i}$$

Korrigiert man die obigen Durchsatzverhältnisse entsprechend, so folgt

$$\frac{Q_{\text{Haupt}}}{Q_{\text{Modell}}} = \frac{i^3}{i} = i^2 \quad \text{bzw.} \quad \frac{Q_{\text{Haupt}}}{Q_{\text{Modell}}} = i \quad (4)$$

je nachdem, ob man den Modellversuch bei gleicher Zentrifugalbeschleunigung oder bei gleicher Umfangsgeschwindigkeit des Rotors angesetzt hatte.

Diese Beziehung steht im Widerspruch zu vielen Ergebnissen der Praxis, wonach bei gleicher Beschleunigungsziffer eine Kapazitätserhöhung mit der 3. Potenz des Durchmessers bei ähnlichen Maschinen beobachtet wurde.

Ein weiteres Ergebnis, das man bei der Anwendung des Stokeschen Gesetzes auf die Vollmantelschneckenzenrifuge erhält, stimmt nachdenklich: Die Niveauhöhe geht nicht in die Kapazität der Maschine ein; sie kann beim Ansatz dieser

Theorie herausgekürzt werden.

Aus der Praxis ist aber die starke Abhängigkeit der Niveauhöhe auf die Durchsatzleistung bekannt. Fast alle Hersteller haben aus dieser bekannten Tatsache den Schluß gezogen, den Konus mit geringem Austragsdurchmesser zu bauen, so daß hohe Niveaueinstellungen gefahren werden können.

Wenden wir uns nach dieser Rückschau auf bekannte Diskrepanzen neuerer Überlegungen zu.

## 2. Experimentelle Untersuchungen

Aus einer großen Zahl von Versuchen mit Dekantern verschiedenster Größen und mit verschiedensten Produkten ist folgendes, in leichten Variationen immer wiederkehrendes, Klärverhalten beobachtet worden (Abb. 1).

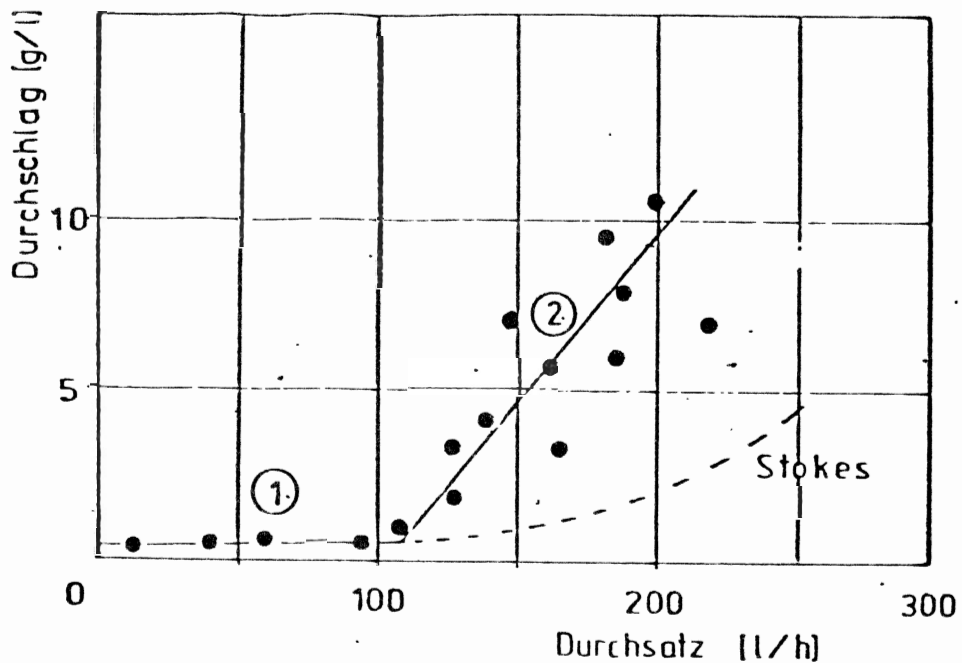


Abb. 1. Der Durchschlag als Funktion des Durchsatzes



Der Feststoffgehalt steigt über dem Suspensionsdurchsatz bei konstant gehaltenen Maschinenparametern zunächst monoton an. Die Kurve kann dabei aus dem Nullpunkt herauslaufen, sie kann aber auch bereits bei einem geringen Feststoffdurchschlag beginnen. Der Grenzwert des Feststoffgehalts bei  $Q \rightarrow 0$  kann nicht gemessen werden; man bestimmt ihn durch Rückextrapolation. Die Meßwerte in diesem ersten Bereich (1) streuen gering; sie sind nach einer Wartezeit, die etwa dem 10 fachen der Flüssigkeitsaufenthaltszeit im Rotor entspricht, konstant geworden. Die Werte sind auch bei Steigerung und Verminderung des Durchsatzes gut reproduzierbar.

Der Feststoffgehalt im Zentrat bei sehr kleinen Durchsätzen konnte in vielen Fällen eindeutig auf den Einfluß der Differenzdrehzahl zurückgeführt werden. Rückt man den Überlastschutz der Maschine aus - die Schnecke hat jetzt die gleiche Drehzahl wie die Trommel - so mißt man für einige Zeit einen niedrigeren Durchschlag, der später natürlich mit steigender Feststofffüllung des Rotors ansteigt. Auf diese Weise kann man sich eine Vorstellung vom Störeinfluß der Schneckenbewegung verschaffen, wenn dieses Ausrücken der Schnecke bei verschiedenen Durchsätzen durchgeführt wird (Abb. 2).

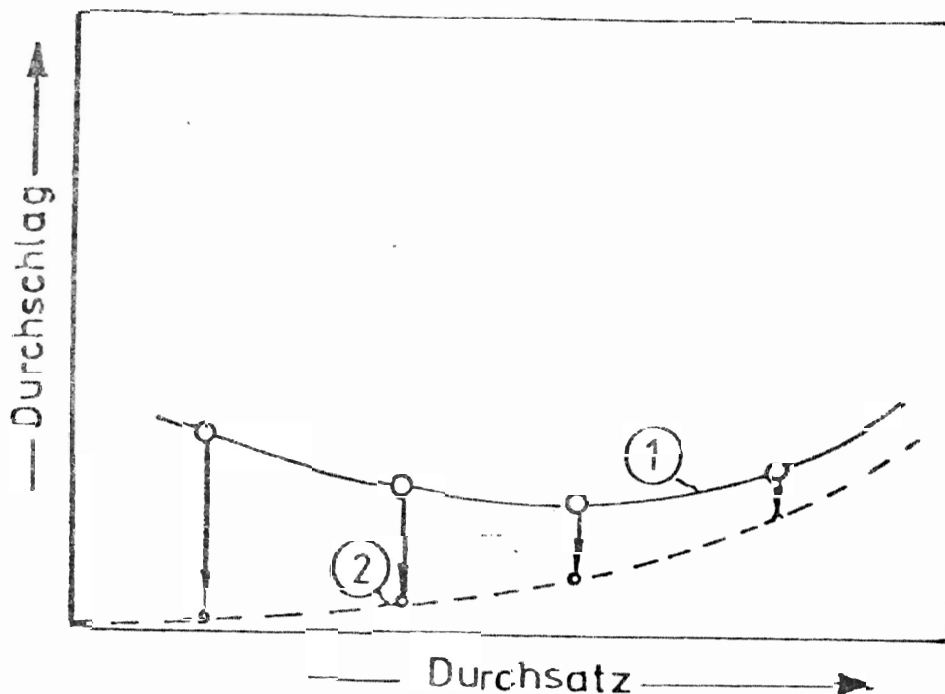


Abb. 2. Der Durchschlag als Funktion des Durchsatzes

1. Kontinuierliche Fahrweise
2. Punktweise erhaltene Kurve durch Abschalten des Überlastschutzes

Ab einem gewissen, sehr gut reproduzierbaren höheren Durchsatz - in Zukunft  $Q_{krit}$  genannt - geht die Kurve in Abb. 1 mit einem ausgeprägten Knick nach oben, wobei je nach Produkt Anstiege des Feststoffgehalts von ein bis zwei Zehnerpotenzen bereits bei  $Q = 1,1 - 1,5 Q_{krit}$  beobachtet werden (Bereich 2). Es fällt ferner auf, daß die Meßwerte jenseits des kritischen Durchsatzes häufig stark streuen, was aber wegen der bei geringen Durchsätzen demonstrierten Genauigkeit nicht als Meßfehler abgetan werden kann. Die Meßwerte liegen häufig zwischen zwei scherenförmig auf den Punkt des kritischen Durchsatzes zulaufenden Geraden (siehe Abb. 1).

Bei einigen Versuchen zeigte sich, daß nahe am kritischen Durchsatz ein Hystereseverhalten zu existieren scheint: Bei sehr langsam erhöhte Durchsätzen ergaben sich manchmal gute Klärer-

gebnisse noch jenseits des  $Q_{krit}$ -Punktes, der dadurch häufig durch Rückextrapolation genauer festgelegt werden konnte als durch direkte Messung (Abb. 3).

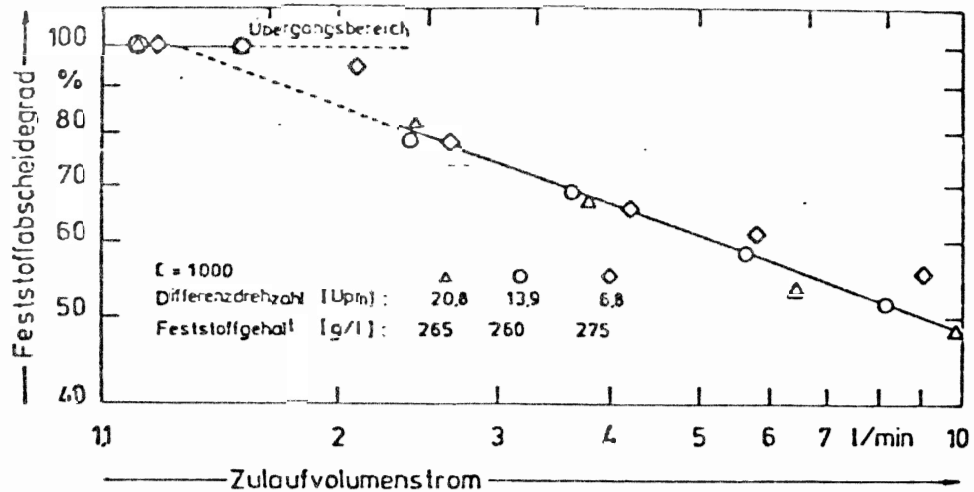


Abb. 3. Undeutlich ausgeprägter Knickpunkt; Fixierung durch Rückextrapolation

Dieser knickartige Verlauf des Feststoffgehalts ist nicht durch den Verlauf der nach dem Stokes'schen Gesetz für verschiedene Durchsätze berechneten Grenzkorngröße zu erklären (Abb. 16a, 16b).

Der beobachtete Effekt ist für die technische Praxis besonders unangenehm, da festgelegte Grenzwerte (Garantien) des Feststoffgehalts sofort um ein Vielfaches überschritten werden.

Neben der zunächst nicht zu beantwortenden Frage nach der physikalischen Ursache dieses Verhaltens, versucht man zunächst durch das Experiment folgende Fragestellungen zu beantworten:

In welcher Weise hängt die Lage des Knickpunkts von den frei veränderlichen Variablen Niveauhöhe, Haupt- und Differenzdrehzahl des Dekanters ab?

Der Knickpunkt konnte durch Niveauerhöhung ins Gebiet höherer Durchsätze verschoben werden, wobei der bereits bekannte steile Verlauf des zweiten Astes auf einem monoton höher ansteigenden Verlauf des Feststoffgehalts ansetzte (Abb. 4).

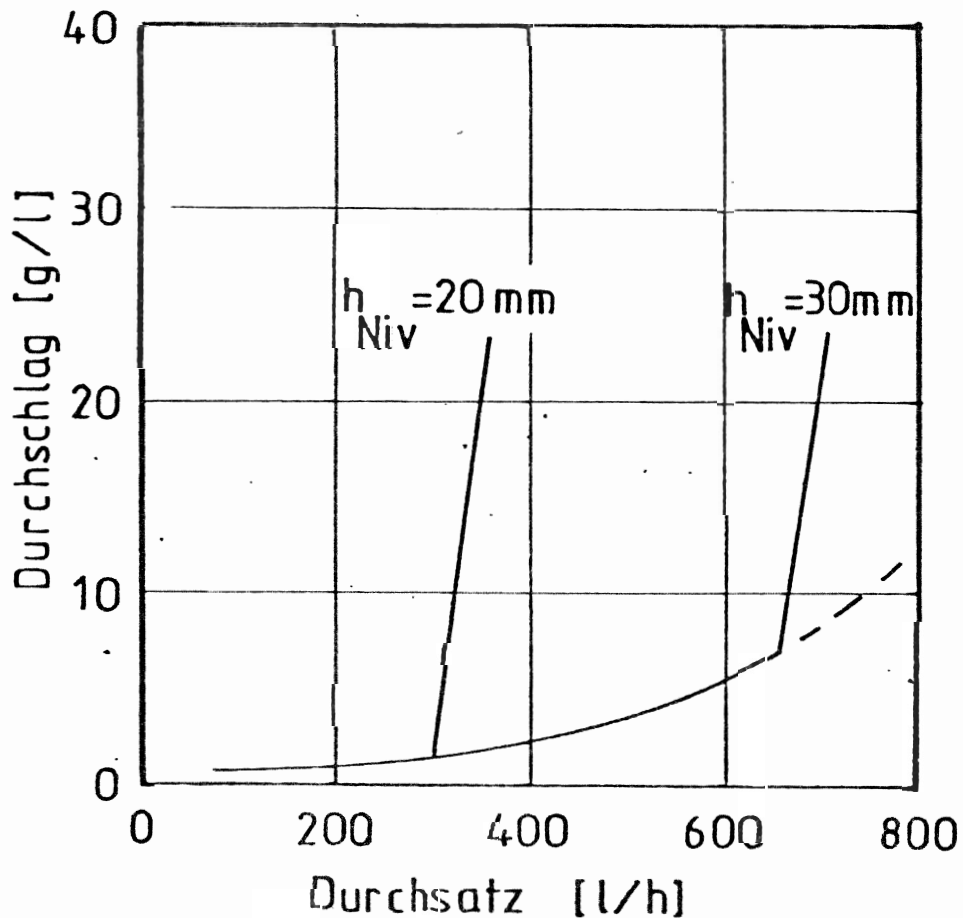


Abb. 4. Der Durchschlag als Funktion des Durchsatzes für zwei verschiedene Niveauhöhen (Kaolin)

Aus eigenen Versuchen [14, 15] sowie einer Auswertung der Ergebnisse von [11 - 13] konnte festgestellt werden, daß der Durchsatz  $Q$  ungefähr proportional zu  $h_{\text{Niv}}^2$  ist (Abb. 5).

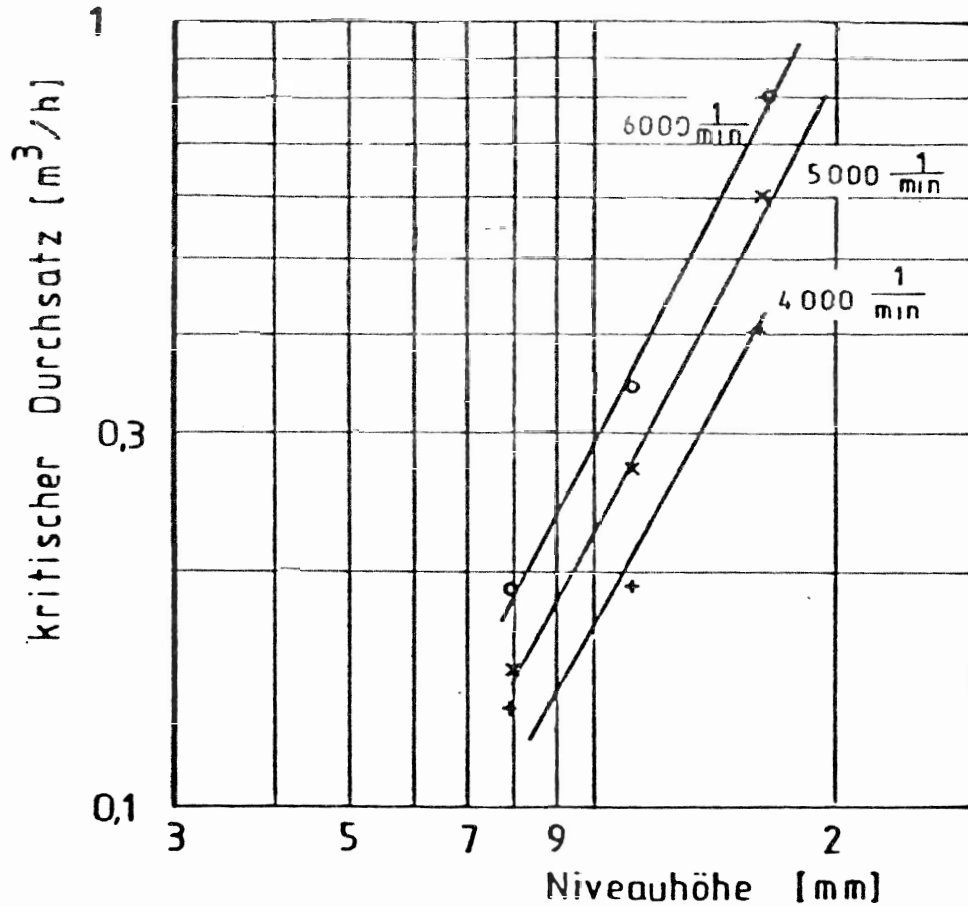


Abb. 5. Der kritische Durchsatz als Funktion der Niveauhöhe (D-Perlen, [11])

Die Abhängigkeit von der Hauptdrehzahl ergab experimentell weniger präzise Ergebnisse. Der Exponent lag aber im Bereich von 2 oder kleiner (Abb. 6).

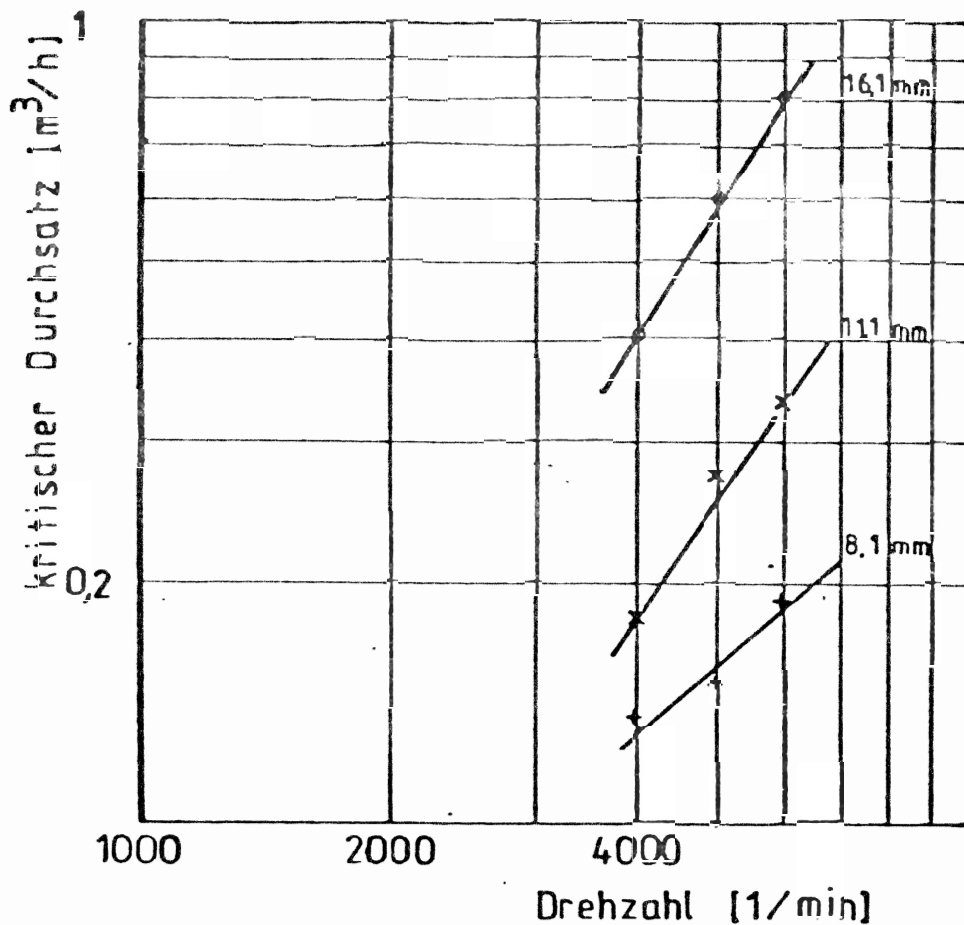


Abb. 6. Der kritische Durchsatz als Funktion der Hauptdrehzahl (D-Perlen, |11|)

Eine Abhängigkeit des kritischen Durchsatzes von der Differenzdrehzahl wurde nur dann festgestellt, wenn diese zu niedrig eingestellt war und damit ein Rückstau des Feststoffs in den Klärteil vorhanden war oder extrem hoch gewählt wurde, wie sie für Kläraufgaben in keinem Fall sinnvoll ist.

Wie aus Abb. 3 zu sehen ist, hat die im Bereich 1:3 veränderte Differenzdrehzahl keinen Einfluß auf den Abscheidegrad.

Auch [12] hat schon festgestellt - wie Abb. 7 zeigt - daß die Differenzdrehzahl die Lage des Knickpunktes nicht zu verändern vermag.

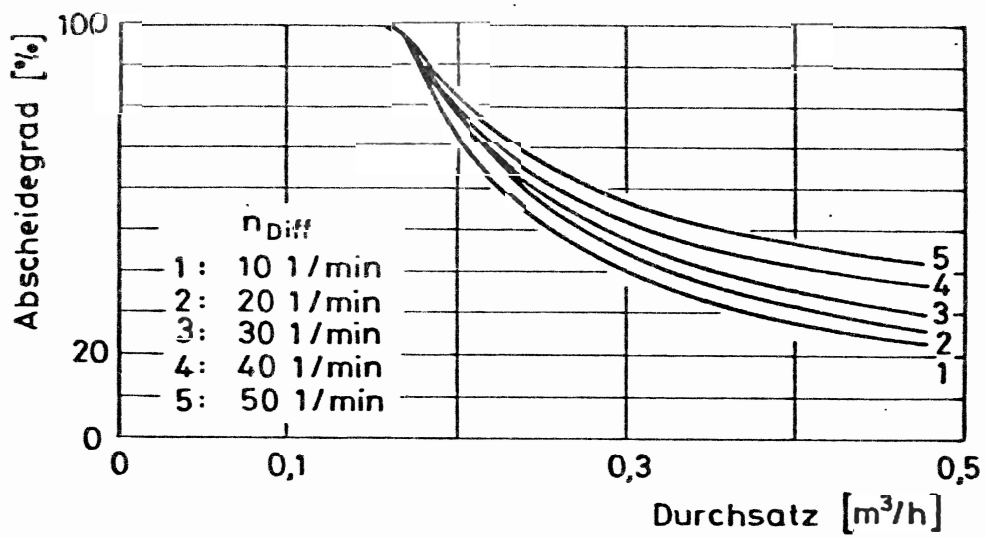


Abb. 7. Einfluß der Differenzdrehzahl auf die Klärung [12]

Statt des Feststoffgehalts im Zentrat ist dort der daraus ableitbare Ausdruck des Abscheidegrades (Feststoffstrom im Zulauf minus Feststoffstrom im Zentrat bezogen auf den Feststoffstrom im Zulauf) aufgetragen, der in der Aufbereitungstechnik auch häufig als Feststoffausbringen bezeichnet wird. Änderungen der Schneckenengeometrie wurden von den Verfassern im Laufe dieser Untersuchungen aus Zeit- und Kostengründen noch nicht durchgeführt. Trotzdem konnte aufgrund der oben beschriebenen eigenen Ergebnisse, der Literaturlauswertung und vieler anderer Erfahrungen, deren Beschreibung hier zu weit führen würde, eine Vorstellung vom physikalischen Vorgang dieses Unstetigkeitsbereichs aufgebaut werden.

### 3. Der Schleppeffekt

Das Vorhandensein einer Unstetigkeit im Klärverhalten von Gegenstromdekantern und ihre quantitative Abhängigkeit läßt den Schluß zu, daß sich dem normalen monoton schlechter werdenden Abscheideverhalten, das näherungsweise zumindest in Gebieten sehr kleiner Feststoffkonzentrationen durchaus durch das Stokessche Gesetz mit den in der Literatur [8- 10] aufgeführten Korrekturfaktoren beschrieben werden kann, ein anderer zusätzlicher Effekt überlagert und dieser, wenn er jenseits  $Q_{krit}$  auftritt, dann das Geschehen völlig beherrscht. Dieses zweite Gesetz löst dann im Sinne einer Ja-Nein Entscheidung das modifizierte Stokessche Gesetz ab.

Es besteht folgende Vorstellung:

Die mit zunehmendem Durchsatz steigende Schubspannung in der Flüssigkeit auf der Oberfläche



der Feststoffgrundschrift veranlaßt die bereits abgesetzten Feststoffteilchen zum Wandern. Sie werden durch den aus den Schneckengängen gebildeten Strömungskanal in spiraliger Richtung mit der Flüssigkeit mitgeschleppt und über das Wehr am Ende des Rotors mit ausgetragen.

Dieses Gleiten oder Rollen der Teilchen auf der Oberfläche der Feststoffgrundschrift in der Trommel ist ein Vorgang, der sowohl von der Teilchengröße und -form, der Zähigkeit der Flüssigkeit, natürlich vom Strömungsprofil, aber auch von Unwägbarkeiten, wie dem Verschleißzustand der Schnecke und dem damit verbundenen Profil der in die Grundschrift eingedrehten Riefen abhängt.

Ein ähnlicher Vorgang des Mitreißen abgesetzter Teilchen kommt in der Natur in jedem Flußbett vor. Die Schleppwirkung verschwindet und es tritt beruhigtes Absetzen auf, wenn die Strömungsgeschwindigkeit des Flusses sinkt; dies ist bei der Mündung ins Meer zu beobachten und führt zur bekannten Deltabildung.

#### 4. Der Rechnungsansatz für den Schleppeffekt

Obwohl dieser Vorgang im Dekanter in Betriebszuständen mit erheblichem Feststoffgehalt im Zentrat sicher als strähnenförmiges Mitreißen von Partikelscharen vorzustellen ist, in denen auch eine Wechselwirkung der Teilchen untereinander auftritt, erscheint es doch berechtigt, für eine erste mathematische Formulierung dieses Vorgangs einige Vereinfachungen zu treffen. Wir nehmen an, daß ein einzelnes kugelförmiges Partikel in einer ausgebildeten laminaren Strömung auf der Innenoberfläche einer mit einer Produkt-

grundschrift überzogenen Trommel liegt und der Zentratströmung im Schneckenkanal ausgesetzt ist.

Da es im Folgenden nicht vorrangig darum geht, Aussagen über den Abscheidegrad im Gebiet  $Q > Q_{krit}$  zu machen, sondern gerade den Grenzfall  $Q_{krit}$  zu lokalisieren, ist die vereinfachte Annahme, daß gerade einige wenige Teilchen nahe dem Überlaufende des Dekanters abgespült werden, sicher gerechtfertigt.

Abb. 8 zeigt die Kräfteverhältnisse an diesem Teilchen. Es wird mit der Anpreßkraft  $F_A$  auf die Unterlage gepreßt.

$$F_A = \frac{\pi}{6} x^3 \cdot \Delta\rho \cdot g \cdot C \quad (5)$$

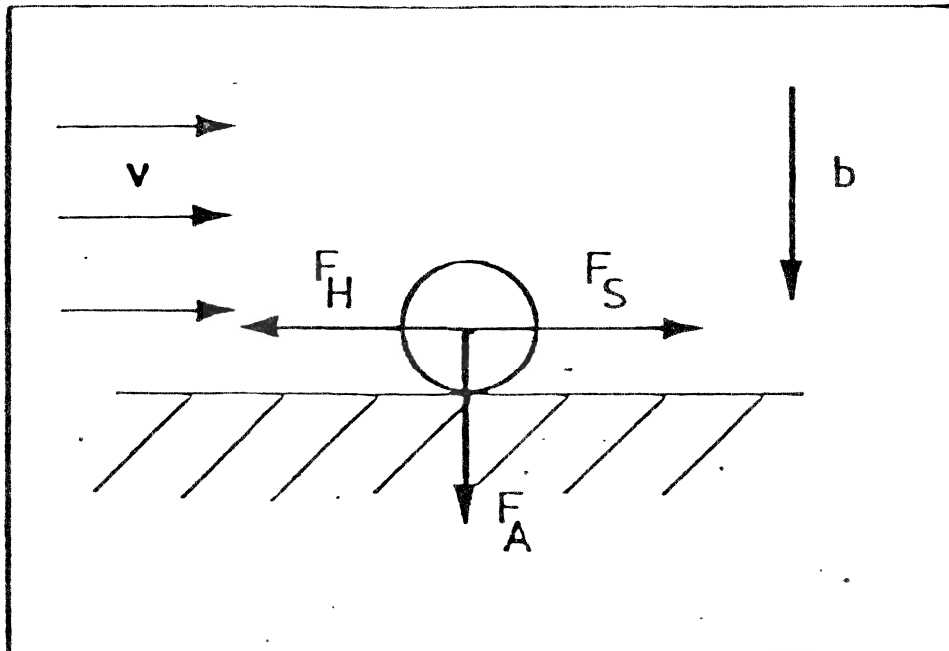


Abb. 8. Kräftebilanz an einem bereits abgesetzten Teilchen (Schleppkraftansatz)

Zwischen Teilchen und Unterlage herrsche eine der Gleit- oder Rollbewegung entgegengerichtete Reibungskraft  $F_H$ , die der Einfachheit halber nach dem Coulombschen Reibungsgesetz als proportional zur Anpreßkraft angenommen wird.

$$F_H = f \cdot F_A \quad (6)$$

Für die Schleppkraft auf ein liegendes kugeliges Teilchen in einer Scherströmung gilt:

$$F_S = \frac{\pi}{4} \cdot x^2 \cdot \eta \cdot \kappa \quad (7)$$

Anströmfläche  
d. Teilchens

Viskosität  
d. Flüssig-  
keit

Scherge-  
fälle  
 $\left(\frac{du}{dz}\right)$

Eine Beziehung zwischen dem Zentratdurchsatz des Dekanters und dem Schergefälle am Boden ergibt sich unter Annahme einer laminaren ausgebildeten ebenen Schichtströmung (Parabelprofil) zu

$$\kappa = \left(\frac{du}{dz}\right)_{z=0} = \frac{3 \cdot v_m}{h_{Niv}} = \frac{3 \cdot Q_{Zentrat}}{h_{Niv} \cdot h_{Niv} \cdot b_K} \quad (8)$$

Aus der Skizze (Abb. 9) wird deutlich, daß sich die Kanalbreite aus den Schneckendaten ergibt zu:

$$b_K = G \cdot \cos \alpha - z_s \cdot d_s \quad (9)$$

damit wird

$$\kappa = \frac{3 \cdot Q}{h_{Niv}^2 \cdot (G \cos \alpha - z_s \cdot d_s)} \quad (10)$$

Setzt man diesen Ausdruck jetzt in das obige Kräftegleichgewicht für die Horizontalrichtung ein, so folgt:

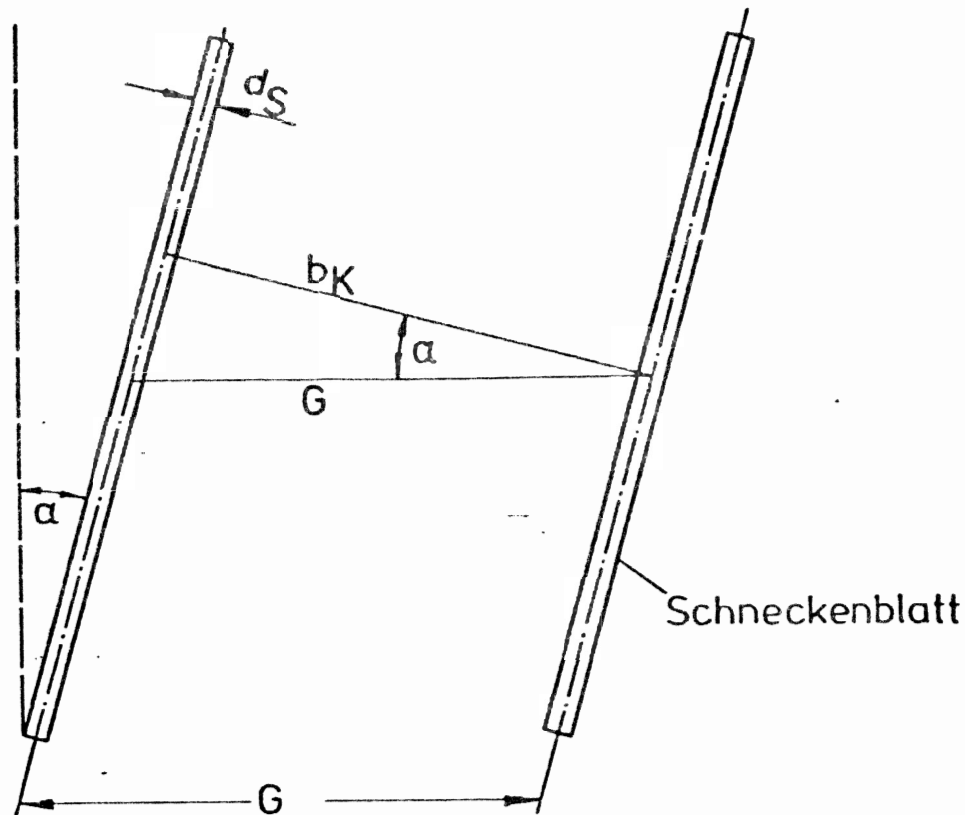


Abb. 9. Der Zusammenhang zwischen Kanalbreite und Schneckenengeometrie

$$F_H = F_S$$

$$f \cdot \frac{\pi}{6} \cdot x^3 \cdot \Delta\rho \cdot g \cdot C = \frac{\pi}{4} \cdot x^2 \cdot \eta \cdot \frac{3 \cdot Q_{\text{Zentrat}}}{h_{\text{Niv}}^2 (G \cdot \cos\alpha - z_S d_S)} \quad (11)$$

$$Q_{\text{Zentrat}} = f \cdot \frac{2}{9} \cdot g \cdot C \cdot \frac{\Delta\rho}{\eta} \cdot x \cdot h_{\text{Niv}}^2 (G \cdot \cos\alpha - z_S d_S) \quad (12)$$

Man kann diese Gleichung auch nach der Partikelgröße auflösen und erhält:

$$x_S = \frac{Q_{\text{Zentrat}} \cdot 9 \cdot \eta}{2 \cdot f \cdot g \cdot C \cdot \Delta\rho \cdot h_{\text{Niv}}^2 (G \cdot \cos\alpha - z_S d_S)} \quad (13)$$

Die Schleppekorngröße gibt - wie der Grenzkorndurchmesser nach dem Stokesschen Gesetz für die

Sedimentation - an, welche Teilchen gerade noch auf der Grundsicht haften und welche Teilchen mit dem Zentrat aus der Maschine gespült werden.

Der Reibwert berechnet sich mit

$$f = \frac{Q_{\text{Zentrat}} \cdot g \cdot \eta}{x_s \cdot 2 \cdot g \cdot C \cdot h_{\text{Niv}}^2 \cdot (G \cdot \cos \alpha - z_s \cdot d_s) \cdot \Delta \rho} \quad (14)$$

Die Gegenüberstellung der beiden Gesetze macht die Analogie deutlich:

$Q = \text{konst} \cdot \frac{\Delta \rho}{\eta} \cdot x_G^2 \cdot C \cdot g$	$\cdot L_e \cdot (r_T - \frac{h_{\text{Niv}}}{2})$	Stokes
$Q = \text{konst} \cdot f \cdot \frac{\Delta \rho}{\eta} \cdot x_s \cdot C \cdot g$	$\cdot h_{\text{Niv}}^2 (G \cdot \cos \alpha - z_s \cdot d_s)$	Schleppkraft
$x_G = \text{konst} \cdot \sqrt{\frac{\eta}{\Delta \rho}} \cdot \sqrt{\frac{Q}{C}}$	$\cdot \sqrt{\frac{1}{L_e (r_T - h_{\text{Niv}}/2)}}$	Stokes
$x_s = \text{konst} \cdot \frac{1}{f} \cdot \frac{\eta}{\Delta \rho}$	$\cdot \frac{Q}{C} \cdot \frac{1}{h_{\text{Niv}}^2 (G \cdot \cos \alpha - z_s \cdot d_s)}$	Schleppkraft
Produkt- daten	Einstell- daten	Maschinendaten

Wir müssen also mit zwei voneinander unabhängigen Grenzkorngrößen operieren, wobei die jeweils größere den Durchsatz limitiert.

Der Reibwert  $f$  ist natürlich nicht analytisch durch Messung zu ermitteln; er muß, falls nötig, aus einem Dekanterversuch bestimmt werden. In Verbindung mit der Kornverteilung der Zulauf-suspension können nun folgende möglichen Betriebszustände auftreten:

- Ist  $x_{\text{min}} < x_s < x_G$  bzw.  $x_{\text{min}} < x_G < x_s$ , dann ist der Abscheidegrad grundsätzlich schon

kleiner als 100 % (Abb. 10). Beim kritischen Durchsatz ist die Grenzkorngröße gleich der Schleppkorngröße, d.h. beide Gesetze gelten gleichzeitig. Für Durchsätze kleiner  $Q_{krit}$  gilt das Stokessche Gesetz und für größere Durchsätze beschreibt der Schleppkraftansatz die Abscheidung.

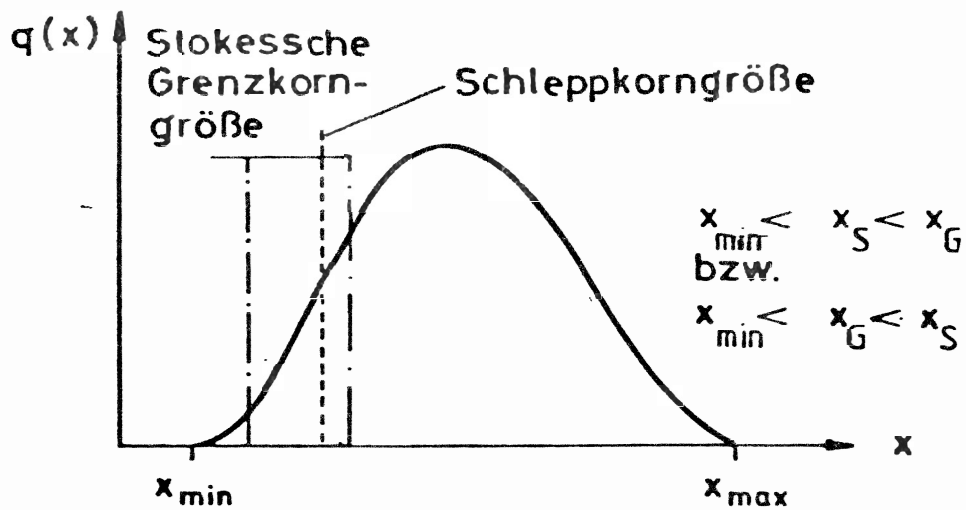


Abb. 10.  $x_{min} < x_S < x_G$  bzw.  
 $x_{min} < x_G < x_S$

Zur Bestimmung von  $f$  kann man dann aus der Stokesschen Gleichung die Partikelgröße ausrechnen und in die Gleichung (14) einsetzen. Dies setzt aber voraus, daß das Stokessche Gesetz ohne Korrekturen die richtige Partikelgröße liefert.

- Der zweite praktisch wichtigere Fall ist gegeben, wenn  $x_G < x_S < x_{\min}$  bzw.  $x_S < x_G < x_{\min}$  (Abb. 11). Man hat dabei zunächst eine vollkommene Abscheidung, bis bei einer weiteren Durchsatzerhöhung  $x_S$  gleich  $x_{\min}$  bzw.  $x_G = x_{\min}$  wird.

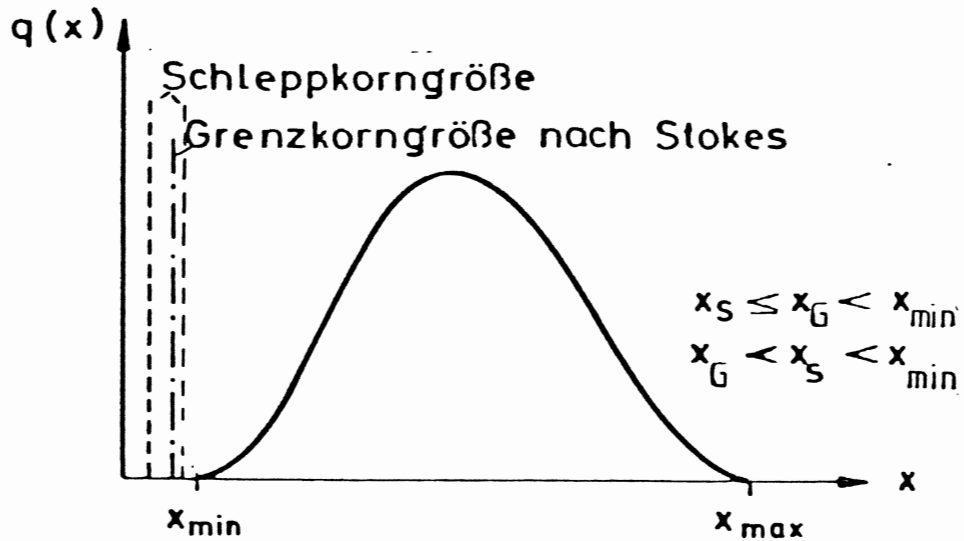


Abb. 11.  $x_S < x_G < x_{\min}$  bzw.  
 $x_G < x_S < x_{\min}$

Für den Fall, daß  $x_S = x_{\min} > x_G$  setzt man zur Berechnung des Reibwertes  $\bar{f}$  mit Gleichung (14) für  $Q$  den kritischen Durchsatz  $Q_{\text{krit}}$  und für  $x_S$  den kleinsten Partikeldurchmesser des Feststoffes  $x_{\min}$  ein (Abb. 12). In diesem Fall wird die Abscheidung nur durch den Schleppkraftansatz beschrieben.

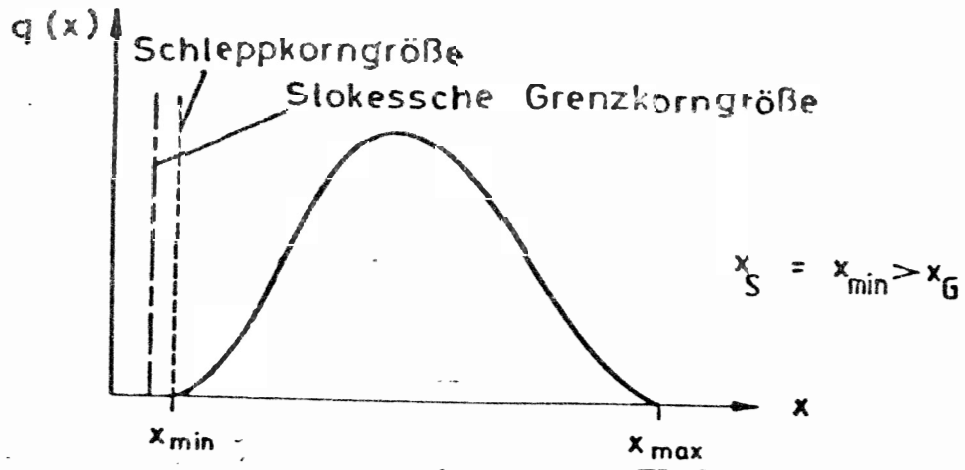


Abb. 12.  $x_S = x_{\min} > x_G$

Die Überschneidung der beiden Gesetze entsteht durch die unterschiedliche Abhängigkeit des Grenzkorndurchmessers ( $x_G \sim \sqrt{Q}$ ) und des Schleppkorndurchmessers ( $x_S \sim Q$ ) vom Durchsatz.

Von diesem Wissensstand aus lassen sich jetzt 5 wichtige Themenkreise gedanklich weiterverfolgen:

- Vergleich der Theorie mit den MeÙergebnissen
- Versuch einer Vorhersage des Abscheidegrads für Bereiche  $Q > Q_{\text{krit}}$
- Scale-up-Methoden bei Berücksichtigung der Schleppwirkung
- Betriebstechnische Konsequenzen für den Einsatz von Dekantern



- Konstruktive Konsequenzen für die Konstruktion von neuen, und die Nachbesserung von existenten Dekantern.

5. Vergleich der Theorie mit den Meßergebnissen

Setzt man sich als erstes Ziel, die Betriebs-einstellungen eines einzigen Dekanterns ineinander umrechnen zu können, so kann man diese Theorie überprüfen, indem man einen Kennwert

$$\frac{Q}{n_H^2 \cdot h_{Niv}^2}$$

bildet. Dies zeigt nochmals Abb. 13a für die schon erwähnten Ergebnisse von |11|.

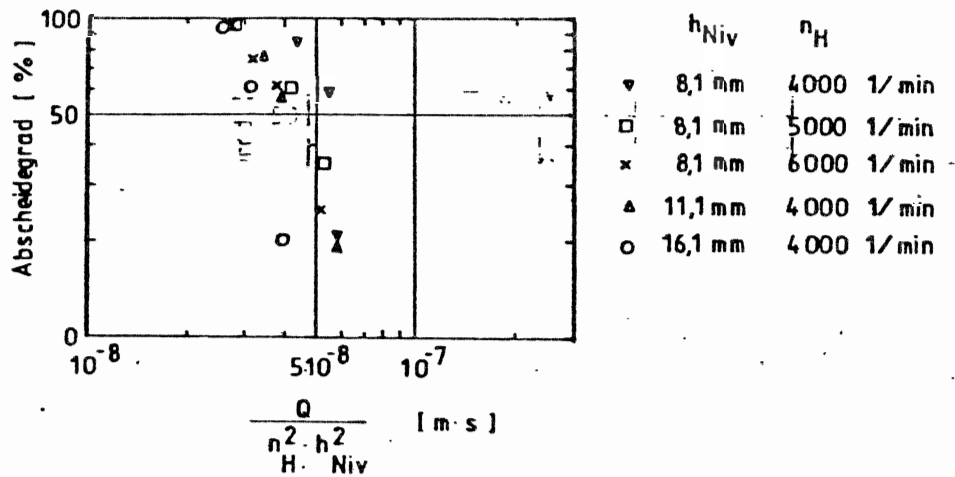


Abb. 13a. Darstellung der Versuchsergebnisse von von Kannenberg über den Parameter

$$\frac{Q}{h_{Niv}^2 \cdot n_H^2}$$

Wenn man bedenkt, daß mit der veränderten Hauptdrehzahl wegen der konstanten Getriebeübersetzung sich auch die Differenzdrehzahl im Verhältnis von 1 : 1,15 geändert hat und daß durch die Niveauänderung im Bereich 1 · 2 gleichzeitig das Strömungsprofil leicht verändert wird (Haftbedingung nicht nur am Boden sondern auch an den Schneckenflanken), so ist die vorhandene Abweichung immer noch als sehr gering anzusehen.

Die analoge Auftragung nach der Theorie der äquivalenten Klärfläche würde, wie Abb. 13b zeigt, keine Übereinstimmung bringen.

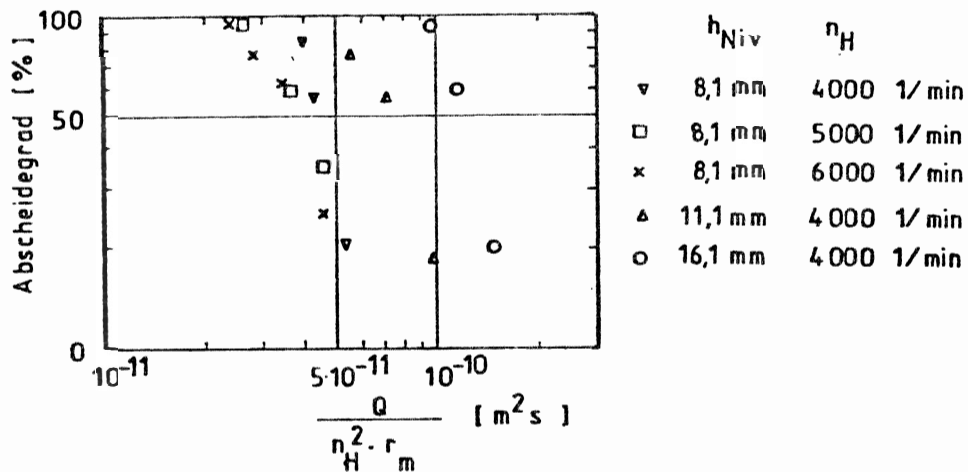


Abb. 13b. Darstellung der Versuche von Kannenberg über den Parameter

$$\frac{Q}{n_H^2 \cdot r_m}$$

Ein anderes Ergebnis mit einer Betriebsmaschine von über 600 mm Durchmesser, betrieben mit einer geflockten Suspension eines sehr feinen mineralischen Schlammes, zeigt über einer erweiterten Kennziffer aufgetragen, für die angegebenen Variationen von C-Wert, Niveauhöhe und der hier aus betrieblichen Gründen sich ändernden Zähigkeit der Flüssigkeit recht brauchbare Ergebnisse für die Bedingungen eines während der Produktion durchgeführten Feldversuchs (Abb. 14).

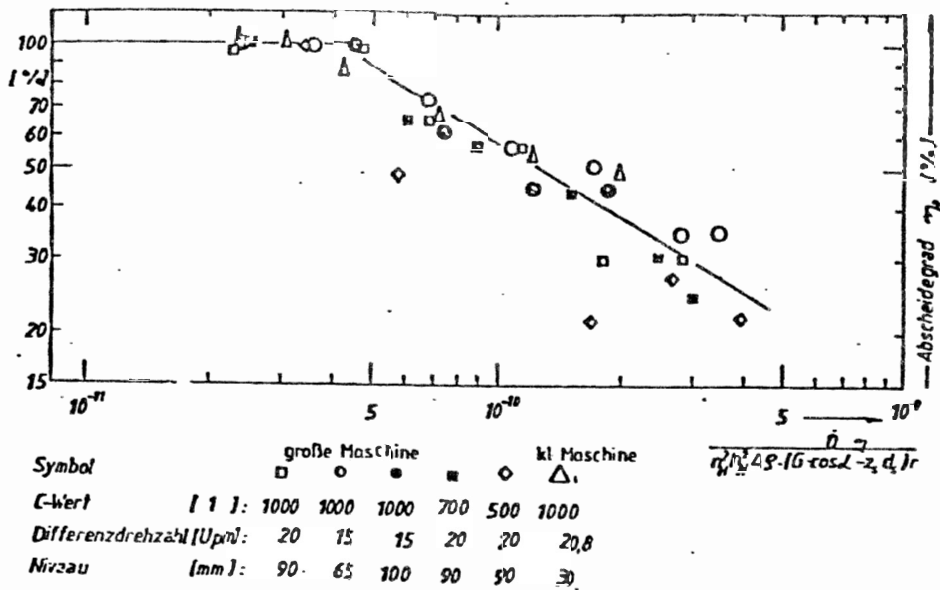


Abb. 14. Der Abscheidegrad als Funktion von

$$\frac{O \cdot n}{r_m^2 \cdot n_H^2 \cdot h_{Niv}^2 \cdot \Delta \rho \cdot (G \cdot \cos \alpha - z_s \cdot d_s)}$$

für eine mineralische Suspension

Man beachte, daß in diesem Diagramm ebenfalls die vorher durchgeführten Pilotversuche mit einem kleinen Dekanter dargestellt sind.

Obwohl die Beziehung zwischen Schergefälle und Zentratdurchsatz nur für den laminaren Fall hergeleitet wurde, hat sich bisher diese quadratische Abhängigkeit von der Niveauhöhe auch bei Kanal-Reynoldszahlen bis über 15 000 gezeigt. Die Niveauhöhen wurden dabei von  $h_{Niv} = 0,08 \cdot r_T$  bis zu  $0,31 \cdot r_T$  variiert.

Der Einfluß der Strömungsform im Schneckenkanal bedarf einer Überprüfung durch die vorgesehenen Forschungsarbeiten. Es ist zu erwarten, daß der Exponent mit steigenden Reynoldszahlen kleiner als zwei wird (Einfluß der Turbulenz).

Es läßt sich also als vorläufiges Ergebnis sagen, daß zur Beurteilung verschiedener Maschineneinstellungen eines Dekanters der Knickpunkt des Abscheidegrades die Kennzahl

$$\frac{Q_{krit} \cdot \eta}{n_H^2 \cdot h_{Niv}^2 \cdot (G \cdot \cos \alpha - z_s \cdot d_s) \Delta \rho \cdot r} = K_s$$

geeignet ist.

#### 6. Versuch der Vorhersage des Abscheidegrads für Bereiche $Q > Q_{krit}$

---

Obwohl nur in wenigen technischen Anwendungsfällen ein Abscheidegrad kleiner als 100 % toleriert werden kann und deshalb der Verlauf der Kurve für den Praktiker von viel geringerer Bedeutung als die Kenntnis der Lage des Knickpunkts ist, soll dieser doch kurz angedeutet werden.

Mit steigendem Durchsatz verschiebt sich  $x_s$  in der Kornverteilung ins Gebiet größerer Partikeldurchmesser und je nach Verlauf der Verteilungs-

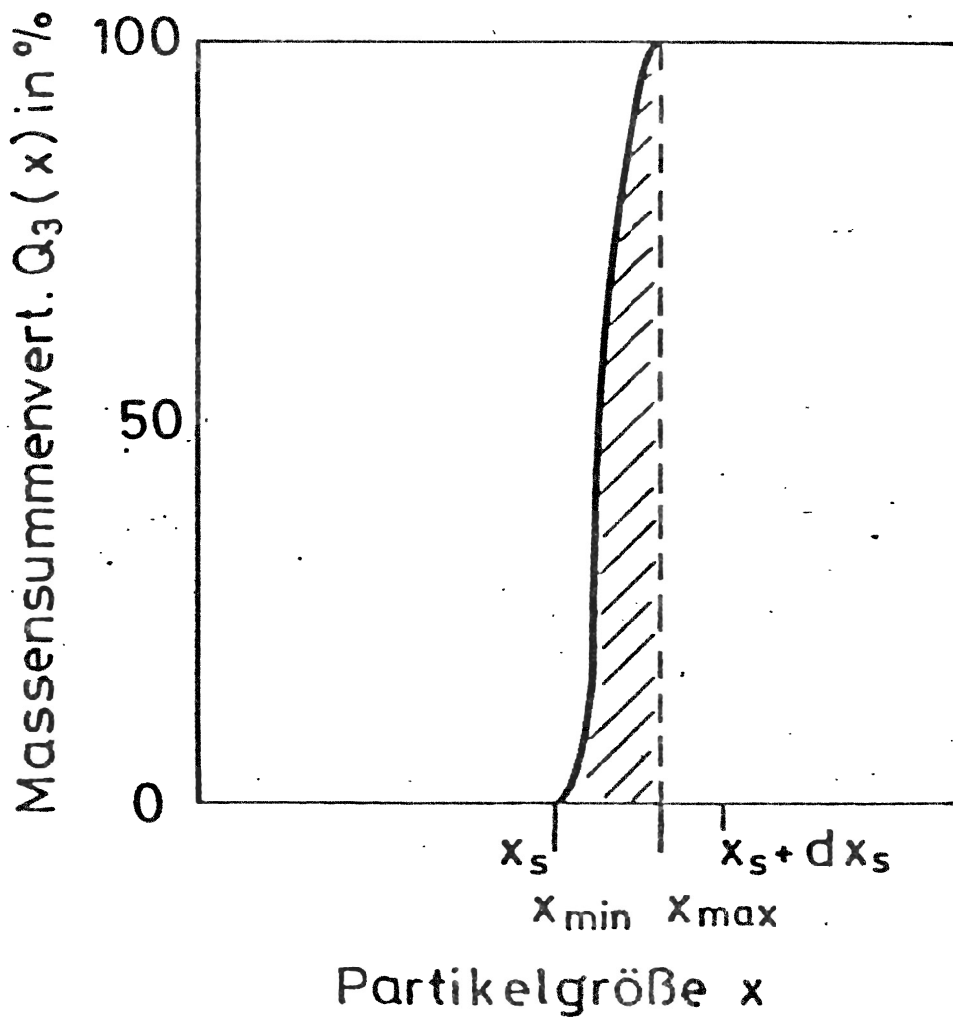
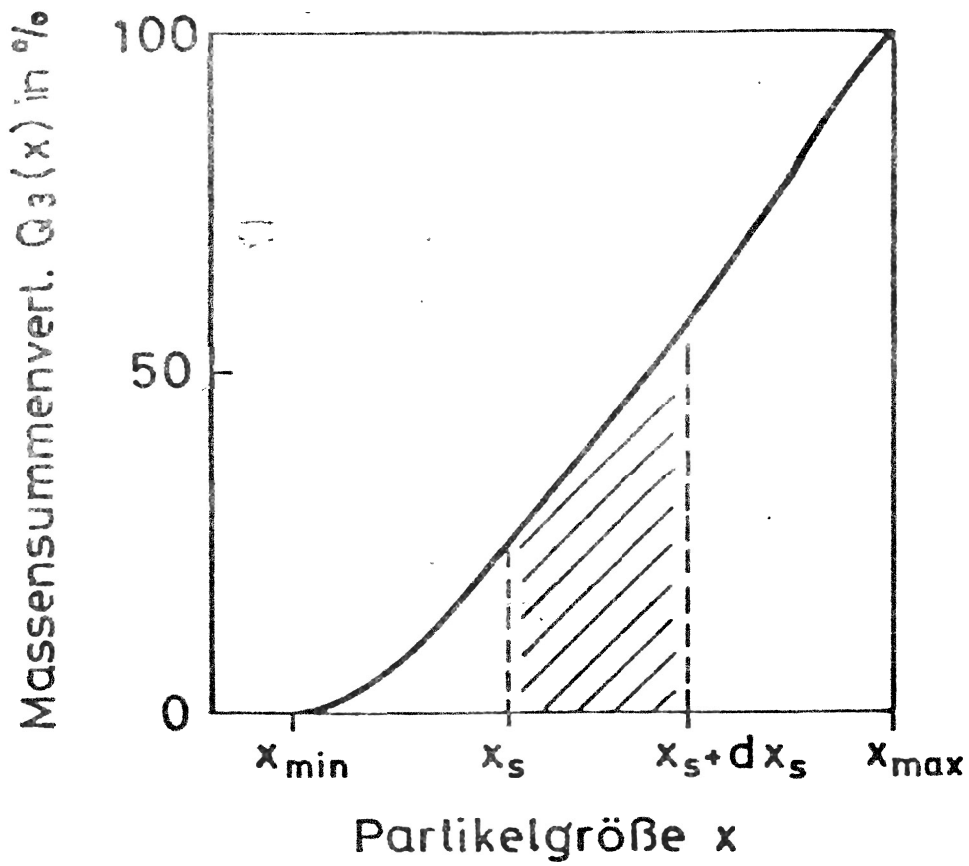


Abb. 15. Auswirkungen der Verschiebung des Schleppkörndurchmessers bei verschiedenen Partikelverteilungen

kurve (siehe Abb. 15), wird man dabei eine schnellere oder langsamere Zunahme des Feststoffgehalts im Zentrat beobachten. Im Grenzfall absoluten Gleichkorns wäre zu erwarten, daß beim Schnitt von  $x_s$  mit  $x_{prod}$  die Klärung schlagartig zusammenbricht, d.h. der Abscheidegrad vom kritischen Durchsatz ab senkrecht abfällt.

Dieses Klassierverhalten tritt bei technischen Suspensionen natürlich nicht so scharf auf; vor allem bei höheren Feststoffkonzentrationen wird Feingut mit dem gröberen Korn zusammen absinken und in den sedimentierten Kuchen eingelagert.

Trotzdem kann diese Berechnungsweise als Näherung verwendet werden, wie die Ergebnisse der Abb. 16 zeigen, die aus Messungen von Kannenberg [11] stammen.

Kannenberg stellte schon 1962 fest, daß die gemessenen Abscheidekurven mit den nach der Stokeschen Theorie zu erwartenden Kurven weder in den absoluten Werten, noch in der Tendenz zusammenfallen.

Rechnet man die Ergebnisse nach dem Schleppekraftansatz durch, wobei man bei der verwendeten schmalen Fraktion für den Knickpunkt  $x_{min} = x_s$  setzt, so beschreiben die Rechenwerte den Verlauf sehr exakt (Abb. 16).

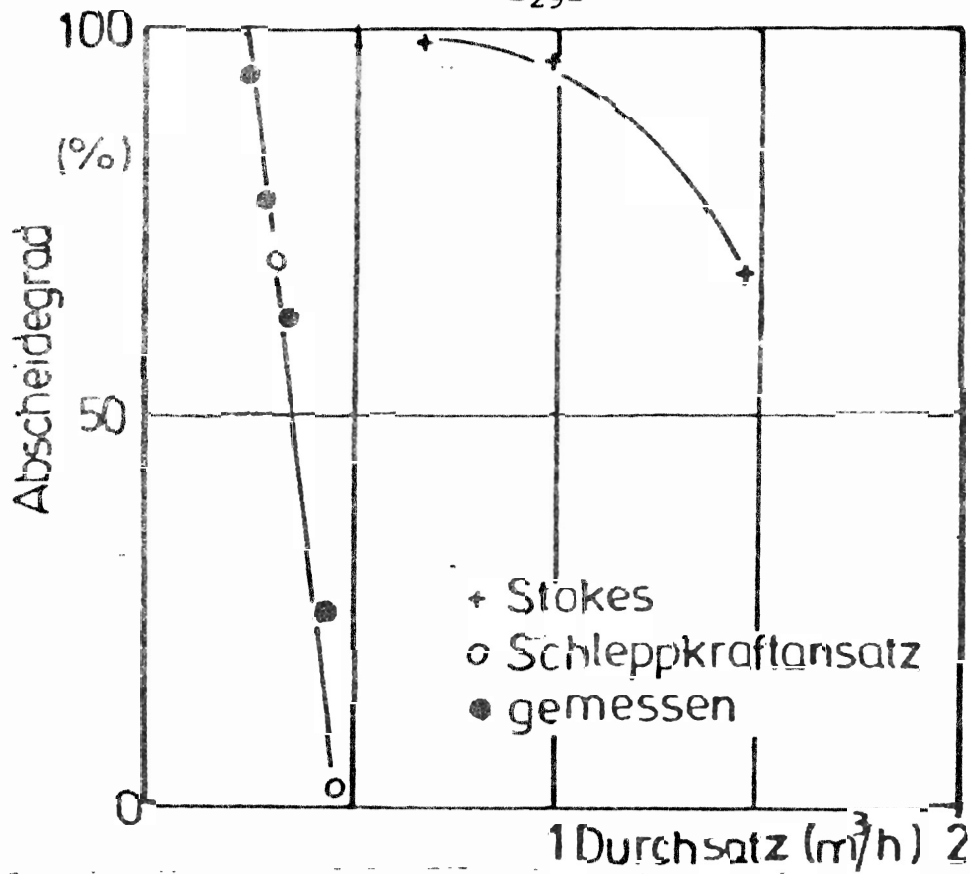


Abb. 16a. Der Abscheidegrad als Funktion des Durchsatzes  $n_H = 6000$  1/min,  $h_{Niv} = 8,1$  mm

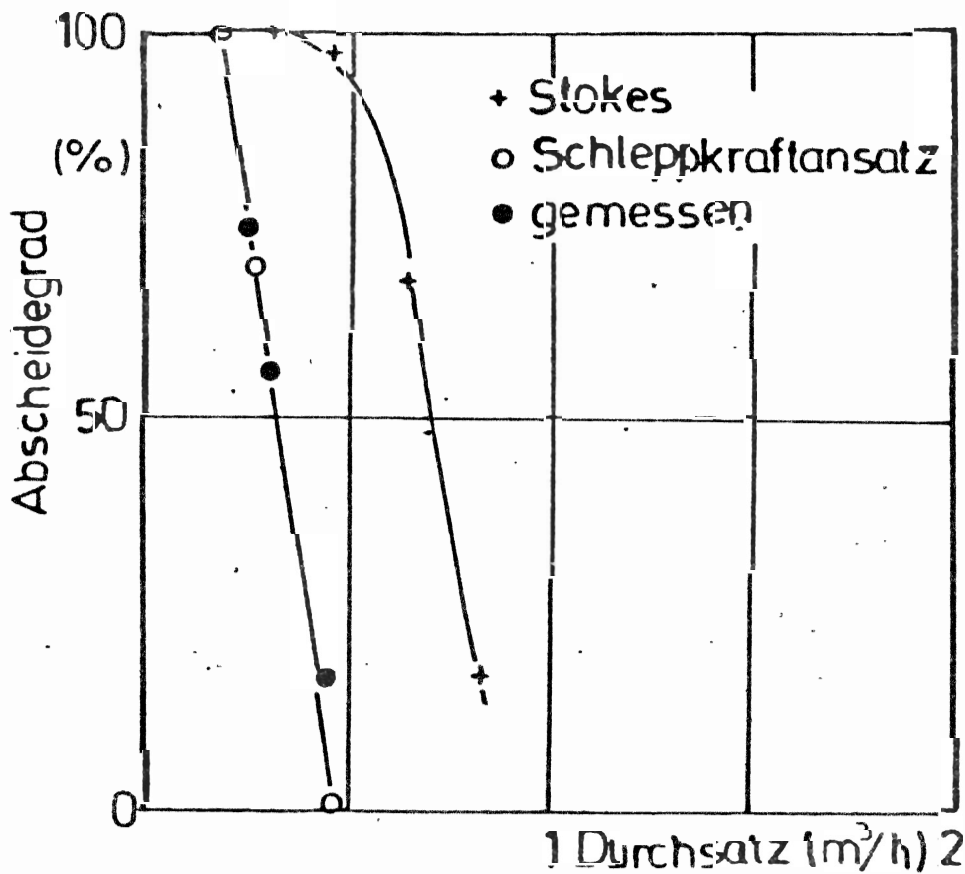


Abb. 16b. Der Abscheidegrad als Funktion des Durchsatzes  $n_H = 4000$  1/min,  $h_{Niv} = 11,1$  mm

## 7. Scale-up Methoden bei Berücksichtigung der Schleppwirkung

Bei der gegenwärtigen Unkenntnis des Schleppreibwertes für verschiedene Produkte und Maschinenbedingungen ist es unumgänglich, den Knickpunkt in einem Pilotversuch zu finden und die Lage des Knickpunktes auf Maschinen anderer Größen, Geometrien und Betriebseinstellungen zu übertragen. Dies hat aber auch den Vorteil, daß der auftretende Schleppeffekt unter Maschinenbedingungen global gemessen wird und auf Annahmen oder ungenaue Labormessungen des Wertes  $f$  und den damit denkbaren Übertragungsfehlern verzichtet werden kann.

Der oben abgeleitete Ausdruck für den kritischen Durchsatz läßt sich unter Zusammenziehen der beim Scale-up ja unveränderten Produktdaten schreiben als

$$Q_{\text{krit}} = \text{konst} \cdot \underbrace{C \cdot T}_{S} \quad (15)$$

$S =$  äquivalente Traktionszahl

wobei

$$C = \frac{r\omega^2}{g}$$

$$T = \frac{h^2}{Niv} \cdot (G \cdot \cos\alpha - z_s d_s) = \text{Traktionszahl; sie faßt alle konstruktiven Werte zusammen}$$

Das Produkt aus beiden soll die äquivalente Traktionszahl genannt werden.

Verarbeitet man eine Suspension in zwei verschiedenen großen Dekantierzentrifugen bei gleichen Beschleunigungen, so ergibt sich bei der um den



$$Q_{\text{krit}} = w_{\text{st}} \cdot \underbrace{C \cdot A}_{\Sigma} \quad (18)$$

$\Sigma$  = äquivalente Klärfläche

Neben diesen - wie eingangs erwähnt - bisher ausschließlich verwendeten Kennwerten A bzw.  $\Sigma$  für einen Dekanter wird man nun unabhängig davon auch noch die analogen Kenngrößen T und S benutzen müssen, um der Kapazitätsbegrenzung durch das Wegschleppen von Teilchen gerecht zu werden.

Je größer der Wert T eines Dekanters, desto mehr kann der Durchsatz erhöht werden, ohne daß Mitreißen der Teilchen eintritt.

Abb. 17 zeigt die Daten einiger von verschiedenen Herstellern gebauter Dekanter unterschiedlicher Größe. Die maximale Niveauhöhe wurde mangels genauer Dateneinheitlich für alle Maschinen so festgelegt, daß zwischen maximaler Niveauhöhe

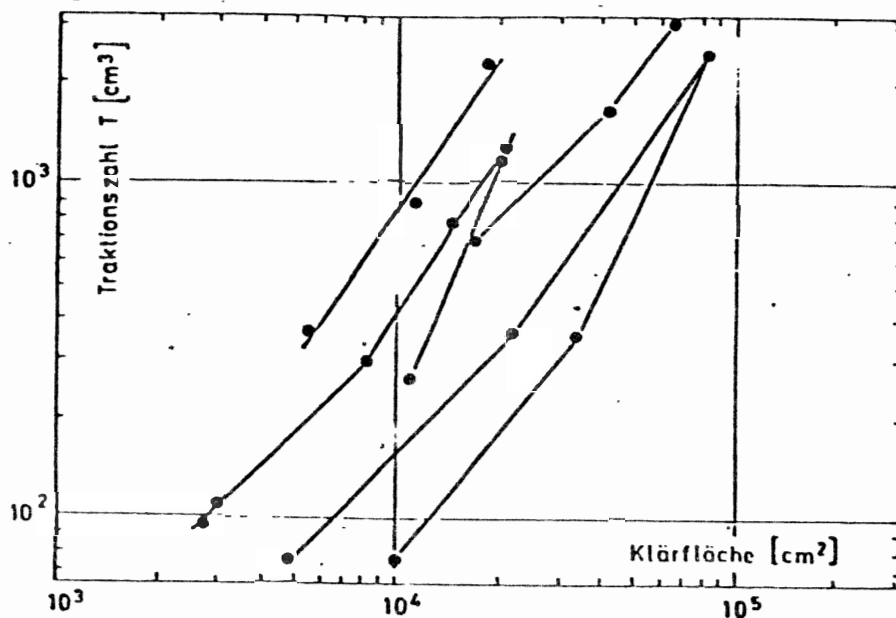


Abb. 17. Die Traktionszahl als Funktion der Klärfläche für verschiedene Dekanter

und dem Feststoffaustragsradius eine Differenz von 10 % des zylindrischen Trommelradius vorhanden ist. Verschieden große Maschinen derselben Hersteller sind mit einer Geraden verbunden.

Für verschieden große Maschinen absolut ähnlicher Geometrie, wie sie z.B. in Abb. 18 mit zwei fiktiven Baureihen der Normreihe R 10, d.h. mit einem Stufensprung benachbarter Größen von  $i = 1,25$  durchgerechnet wurde, erhält man im doppeltlogarithmischen Maßstab eine Gerade der Steigung 1,5, da die Ordinate mit der 3. Potenz, die Abszisse mit der 2. Potenz des Stufensprungs wächst.

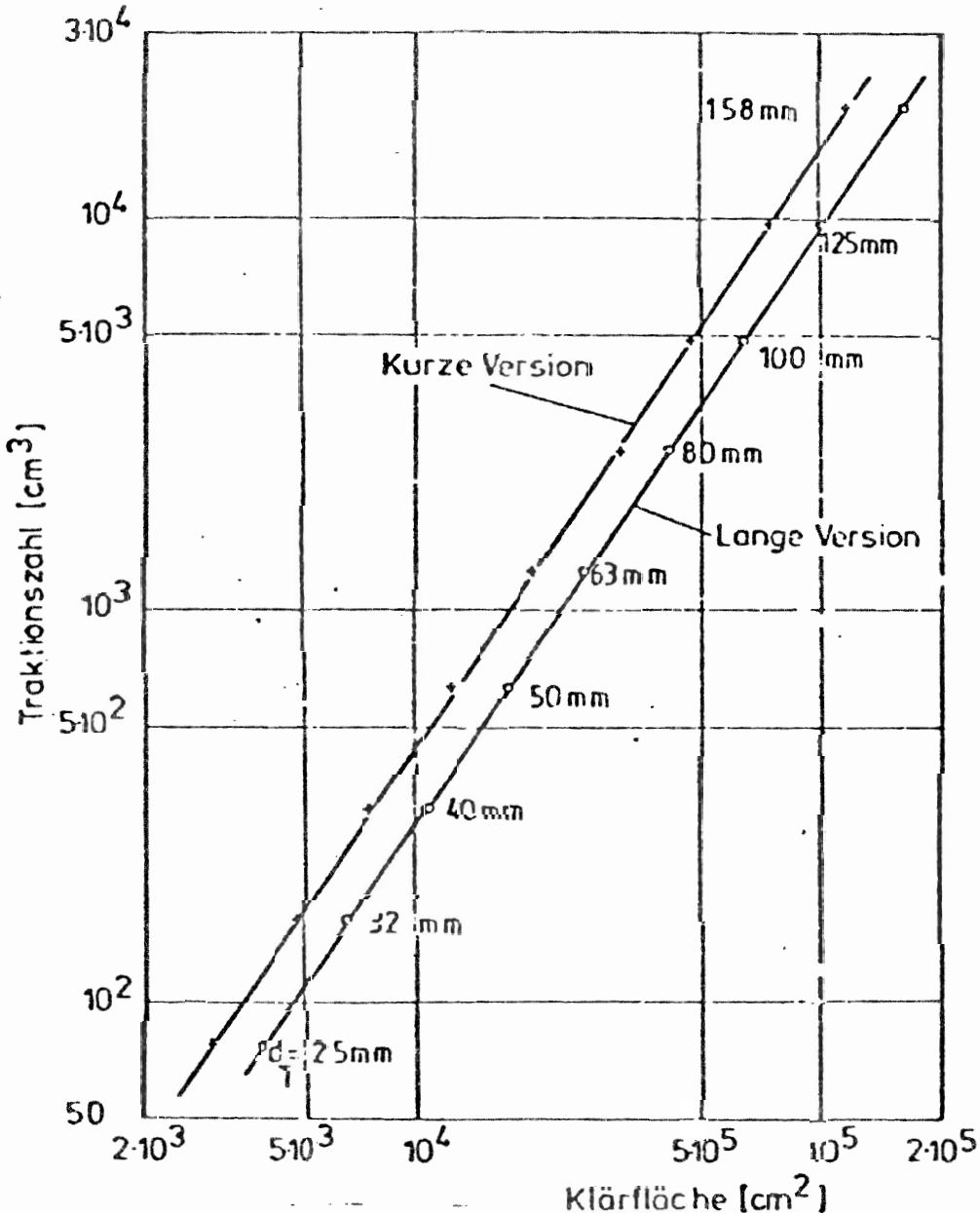


Abb. 18. Die Traktionszahl als Funktion der Klärfläche für die angenommene Dekanterbaureihe.

Im Anhang sind in Tabelle 1 für zwei fiktive Bau-  
reihen, die sich untereinander nur durch die  
Klärlänge unterscheiden, die Traktionszahl, die  
äquivalente Traktionszahl, die Klärfläche und  
die äquivalente Klärfläche aufgelistet.

Dabei wurden folgende realistische Annahmen ge-  
troffen:

$$h_{Niv,max} = 0,15 \cdot d_T$$

$$G = 0,25 \cdot d_T$$

$$d_s = 0,015 \cdot d_T$$

$$L_{zyl} = 1,5 \text{ bzw. } 2,0 d_T$$

Wegen der geometrischen Ähnlichkeit ist der  
Schneckensteigungswinkel ( $\operatorname{tg} \alpha = \frac{G}{2 \cdot \pi \cdot r_T} = 0,0796$ )  
mit  $\alpha = 4,55$  grad für alle Größen konstant; der  
 $\cos \alpha$  wird deshalb näherungsweise gleich 1 ge-  
setzt.

In Abb. 19 sind dieselben ausgeführten Maschinen  
und in Abb. 20 die beiden fiktiven Maschinen-  
baureihen eingezeichnet.

Wie erwähnt, sinkt bei größer werdendem Durch-  
messer wegen der Materialfestigkeit der C-Wert;  
dies wirkt sich in dieser Darstellung so aus,  
daß die Abszisse linear, die Ordinate quadra-  
tisch mit dem Stufensprung zunimmt.

Eine Änderung der Umfangsgeschwindigkeit eines  
Dekanters bewirkt in Abb. 20 eine Verschiebung  
des Betriebspunktes mit der Steigung 1. Für die  
Hochrechnung vom Pilotversuch, bei dem natür-  
lich die Stelle des kritischen Durchsatzes ein-  
deutig lokalisierbar sein muß, wird der für die  
anvisierte Maschine mögliche Grenzdurchsatz ge-

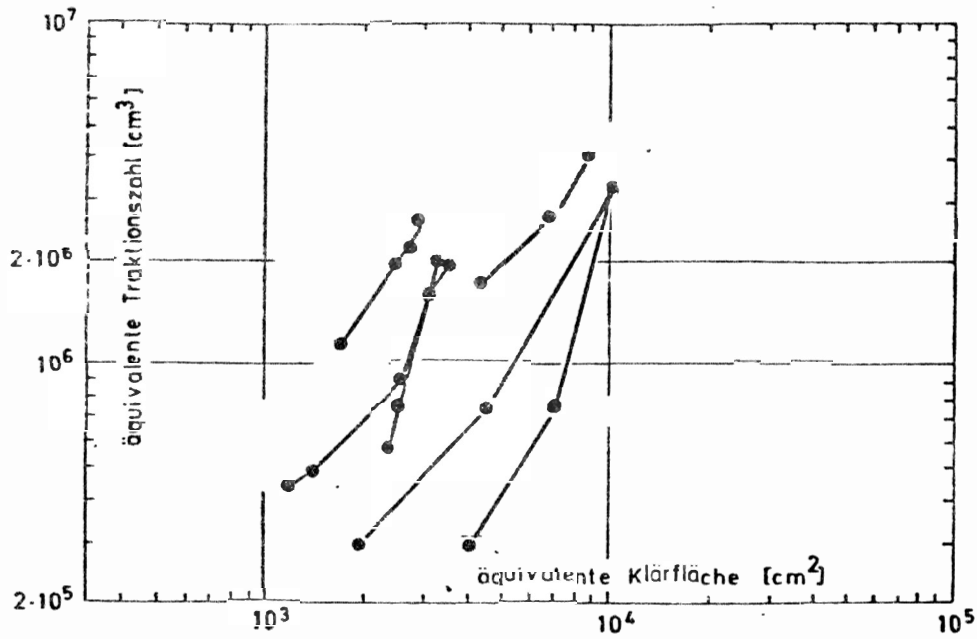


Abb. 19. Die äquivalente Traktionszahl als Funktion der äquivalenten Klärfläche für verschiedene Dekanter

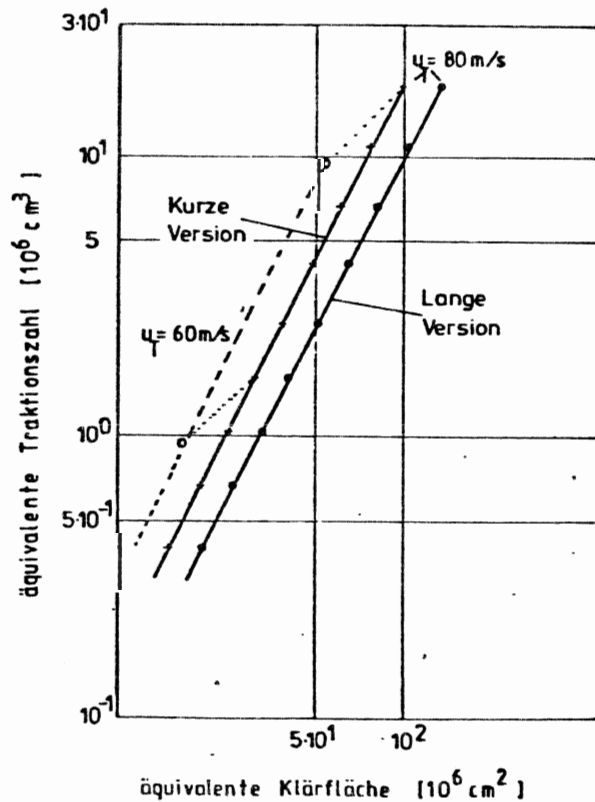


Abb. 20. Die äquivalente Traktionszahl als Funktion der äquivalenten Klärfläche für die angenommene Dekanterbaureihe

funden und entschieden, ob die gewünschte Kapazität durchgesetzt werden kann oder es wird umgekehrt aus dem geforderten Durchsatz eine verfügbare Maschinengröße ausgewählt, deren kritischer Durchsatz höher liegen würde als die geforderte Kapazität.

Es empfiehlt sich dabei die Versuche mit dem Pilotdekanter schon mit dem C-Wert des anvisierten Großdekanters anzusetzen, um evtl. vorhandene von der Beschleunigung abhängige Produktinflüsse auszuschalten.

Damit ist zunächst nur die Sicherheit gewonnen worden, daß der Klärvorgang auf der großen Maschine ohne störende Schleppwirkung abläuft; wie groß allerdings dabei der Feststoffgehalt im Zentrat sein wird, kann aus dem auf der Pilotmaschine gefahrenen Betriebsbereich nicht unmittelbar übertragen werden.

Die um  $n.i$  größere Maschine hat bei gleichem C-Wert einen um  $(n.i)^3$  größeren kritischen Durchsatz; die Klärflächenbelastung  $\frac{Q}{A}$  (beim selben C-Wert) steigt aber deshalb beim großen Dekanter auf höhere Werte an.

Dieser Bereich höherer Klärflächenbelastung - ohne in die Schleppwirkung hineinzukommen - ist im Modelldekanter nicht fahrbar; es können deshalb auf experimenteller Basis keine Aussagen über den weiteren Verlauf des Feststoffdurchschlags über den Punkt 1 hinaus erhalten werden (Abb. 21a).

Wenn man den weiteren Verlauf nicht nur durch Extrapolation festlegen will, so muß man hier auf eine Abschätzung zurückgreifen, die auf dem Stokesschen Gesetz basiert.

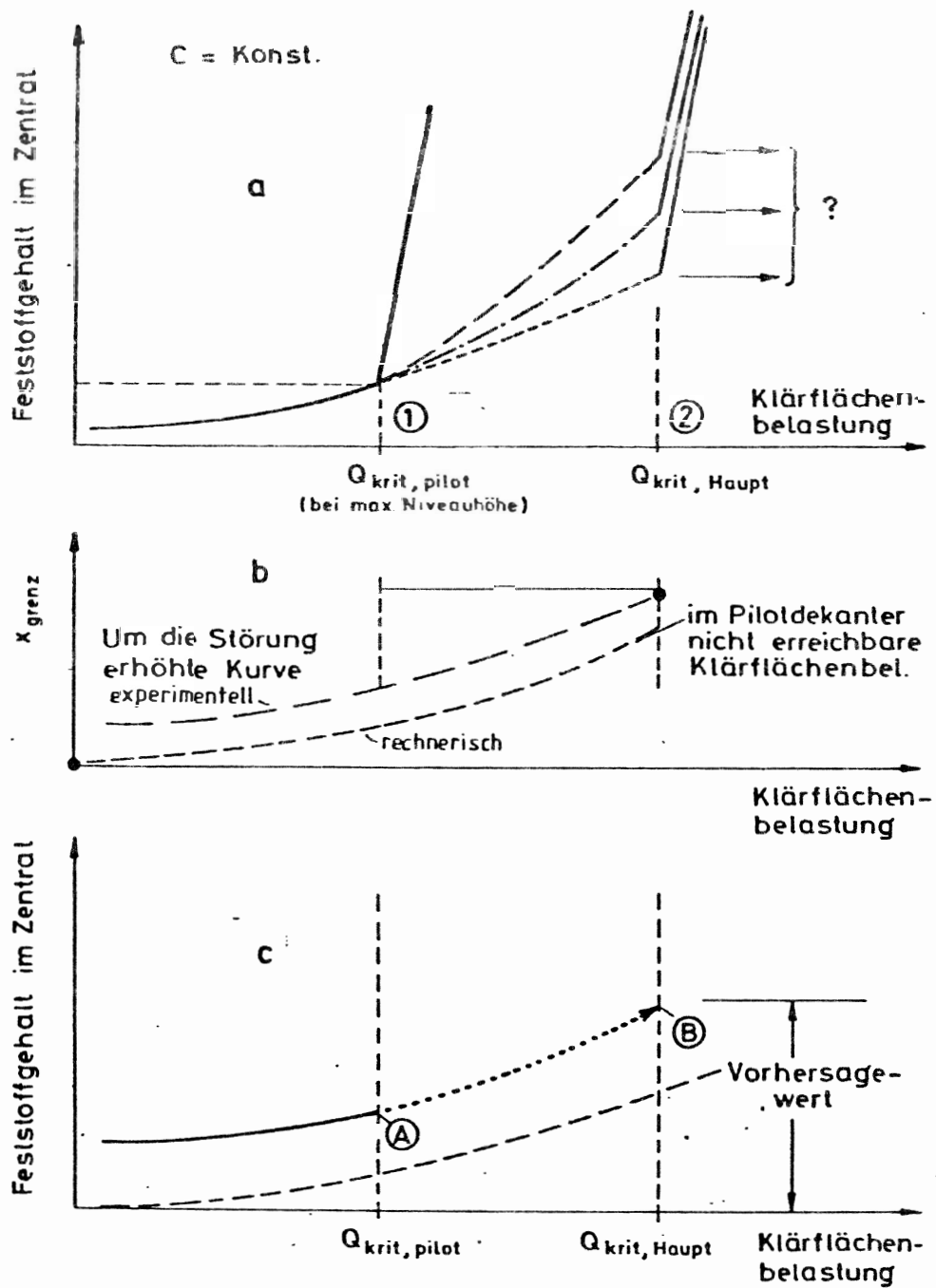


Abb. 21. Zur Hochrechnung von Pilotversuchen

Man errechnet sich die Grenzkorngröße als Funktion der Klärflächenbelastung und trägt diese Wertepaare übereinander auf (Abb. 21b). Gemäß dem in Kap. 6 beschriebenen Verfahren errechnet man daraus über die Kornverteilungskurve den Feststoffdurchschlag im Zentrat.

Er wird ebenfalls über der Klärflächenbelastung aufgetragen (Abb. 21c). Die Kurve liegt sicher tiefer als die gemessene. Sie kann aber jetzt rein rechnerisch bis zum Wert  $\left(\frac{Q_{\text{krit, Haupt}}}{A}\right)$  bestimmt werden.

Anhand dieser Leitlinie fällt nun die doch noch durchzuführende Extrapolation der experimentellen Werte von A zu B etwas weniger gewagt aus als ohne dieses theoretische Hilfsmittel (Abb. 21c).

Basierend auf einigen Erfahrungen kann man die Empfehlung aussprechen, daß die gleiche Störwirkung der Schneckendifferenzbewegung auf die Klärung etwa bei gleicher Differenzumfangsgeschwindigkeit, nicht bei gleicher Differenzdrehzahl zwischen Maschinen verschiedener Größe erreicht wird.

Aus diesem Grund ist es empfehlenswert, die Pilotversuche mit einer um den später gewählten Vergrößerungsmaßstab höheren Differenzdrehzahl anzusetzen.

In jedem Fall muß natürlich sichergestellt sein, daß die Differenzdrehzahl wenigstens so hoch ist, daß in der Maschine kein Feststoffrückstau entsteht.

### 8. Auswirkung der Schleppwirkung auf die Investitionskosten für Klärdekanter

Die vorliegenden Erkenntnisse, nämlich daß die Klärwirkung in Dekantierzentrifugen meist von der Schleppwirkung begrenzt wird, und die dargelegte Quantifizierung, lassen jetzt auch eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Investitionskosten für Dekanter zu. Die Preise verschieden großer aber ähnlicher Dekanter einer Baureihe lassen sich in einer doppelt-logarithmischen Auftragung näherungsweise durch die Funktion

$$\log P = \log P_0 + m \cdot \log (d - d_0)$$

beschreiben (siehe Abb. 22).  $P_0$  ist dabei der Preis eines aus der Serie beliebig gewählten Dekanters des Zylinderdurchmessers  $d_0$ . Der Gradient  $m$  wird je nach Baureihe individuell verschieden sein und hat auf den grundsätzlichen Verlauf des Folgenden keinen Einfluß.

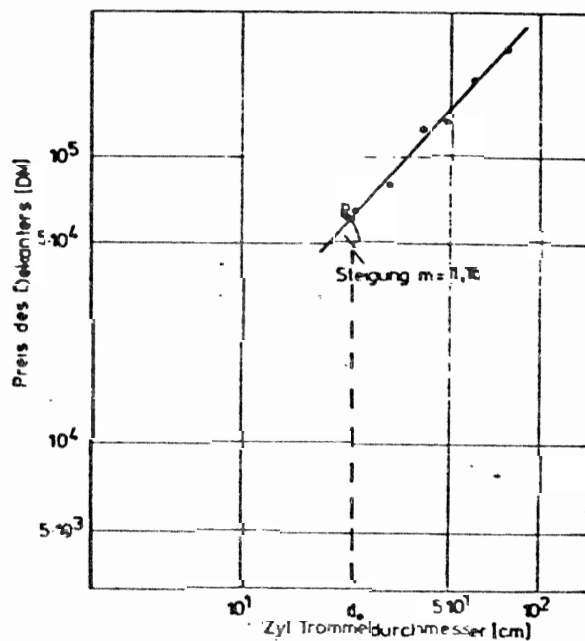


Abb. 22. Der Kostenverlauf für eine Dekanterbaureihe



Es wird angenommen, daß aus Verfahrensgründen (gleiche erzielbare Restfeuchte, gleicher spez. Flockungsmittelbedarf, usw.) alle Dekanter mit gleichen Zentrifugalbeschleunigungen gefahren werden.

Berechnet man nun jeweils zusammengehörige Werte von T und P, so ergibt sich mit dem beliebig gewählten Startpunkt des kleinsten Dekantere (P<sub>0</sub> = Einheitswert) der oben festgelegten fiktiven Dekanterserie A bis I und drei frei gewählten Steigungswerten von m = 1,15 und m = 1,3 und m = 1,5 die folgende Tabelle 2.

$$\log P = \log P_0 + m \cdot \log (d - d_0)$$

Typ	A	B	C	D	E	F	G	H	I
d <sub>T</sub>	25	32	40	50	63	80	100	125	158
T	77,3	162,2	316,8	618,8	1237,7	2534	4950	9668	19524
$\frac{T_i}{T_A}$	1	2,098	4,098	8,00	16,01	32,78	64,03	125,07	252,57
P m=1,15	1=P <sub>0</sub>	1,972	2,532	2,60	2,817	3,001	3,156	3,3	3,42
P m=1,3	1=P <sub>0</sub>	2,1	2,53	2,817	3,054	3,262	3,438	3,6	3,74
P m=1,5	1=P <sub>0</sub>	2,26	2,764	3,097	3,37	3,61	3,812	4	4,165
$\frac{T_i \cdot P_i}{T_A \cdot P_0}$ bei 1,5	1	1,064	1,742	3,077	5,683	10,92	20,28	37,9	73,85
bei 1,3	1	1,0	1,62	2,84	5,242	10,05	18,624	34,74	67,53
bei 1,5	1	0,928	1,483	2,58	4,751	9,08	16,8	31,26	66,71

Bildet man dann das Verhältnis maximaler Durchsatz pro Preis einer beliebigen Maschine zu maximalem Durchsatz pro Preis der kleinen Maschine und trägt es über den Trommelradius auf, so sieht man, daß in allen drei unterschiedlichen Preisprogressionen der Kennwert für die "Preiswürdigkeit" sehr steil ansteigt (Abb. 23).

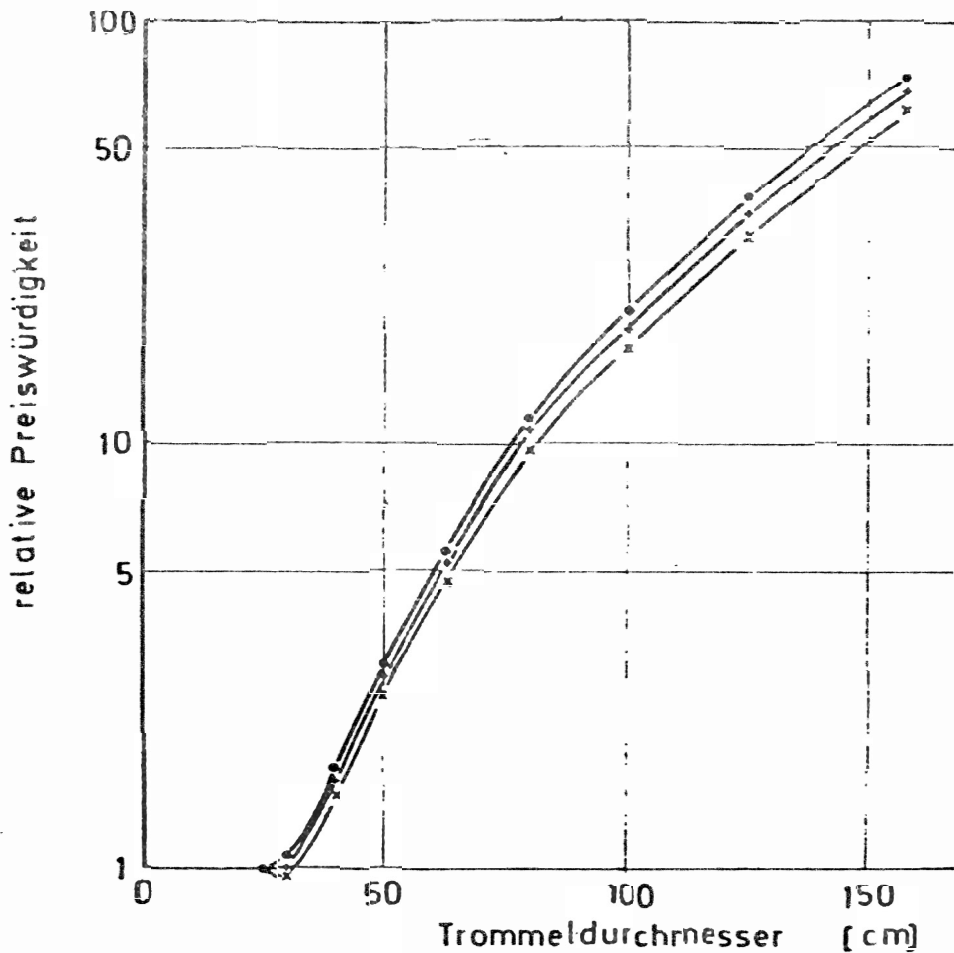


Abb. 23. Die relative Preiswürdigkeit verschieden großer Klärdekanter

Daraus läßt sich ableiten, daß - von der Seite der Investitionskosten betrachtet - eine Aufsplittung der Produktionsrate in zwei oder mehrere Maschinen absolut unwirtschaftlich ist, es sollte jeweils die Gesamtkapazität von einer einzigen großen Maschine verarbeitet werden.

Andererseits zeigen die oben behandelten Theorien, daß die Steigerungsmöglichkeiten durch

Gangverbreiterung, Niveauerhöhung und Klärflächenerweiterung bei kleinen und mittleren Maschinen besonders groß sind.

## 9. Maschinentechnische Folgerungen

### 9.1 Gleich- und Gegenstromdekanter

Die oben erwähnten Gesetzmäßigkeiten gelten zunächst nur für den Gegenstromdekanter, bei dem sich die feineren Teilchen auf eine durch die Schnecke überschliffene ebene und sehr glatte Grundsicht absetzen. Der Gleichstromdekanter bietet den der Anströmung ausgesetzten Feinstteilchen einen besseren Schutz gegen Abspülen. Da beim Gleichstromdekanter der größte Teil des Feststoffs von der Aufgabebzone am Ende des Zylinders über die ganze Zylinderlänge transportiert wird und dabei einen Kuchen formt, der den Zylindermantel vorwiegend bedeckt, finden die später sedimentierenden Feinstteilchen in diesem Fall eine weniger glatte, eher hügelige Kuchenoberfläche vor, in deren Unebenheiten sie vor einem weiteren Abspülen geschützt sind. Dieser Vorgang dürfte die Hauptursache für die bekannt gewordenen hohen Klärleistungen der Gleichstrommaschinen sein, wenn man bei einem echten Vergleich zum Gegenstromdekanter alle anderen Parameter konstant läßt.

### 9.2 Niveauerhöhung

Obwohl die Gleichung 14 ausweist, daß der Knickdurchsatz mit weiterer Niveauerhöhung gesteigert werden könnte, ergeben sich doch folgende Begrenzungen:

- Der mittlere Beschleunigungswert nimmt mit steigender Niveauhöhe ab; damit vermindert sich die Wirksamkeit der Zentrifuge.
- Entsprechend einer weiteren Niveauerhöhung müßte der Konus verlängert werden, um den Schlamm über das Niveau herauszuheben. Wegen der Probleme bei der Förderung dünn-pastöser Schlämme kann der Konuswinkel im allgemeinen nicht mehr erhöht werden. Dies führt aber zu einer längeren, teureren und im dynamischen Verhalten labileren Maschine.
- Obwohl Versuche bis zu Werten von  $\frac{h_{Niv}}{r_T} = 0,31$  die quadratische Abhängigkeit gezeigt haben, ist dieses Gebiet sehr hoher Niveaueinstellungen noch nicht genügend abgesichert. Es wäre möglich, daß der Exponent von  $h_{Niv}$  unter den Wert 2 abfällt.

Eine Erhöhung des Niveaus muß also im Zusammenwirken mit anderen Vorgängen gesehen werden und ist im Einzelfall sorgfältig abzustimmen.

### 9.3 Erhöhung der Schneckensteigung

Die Vergrößerung der Schneckensteigung geht fast linear in die Durchsatzsteigerung ein. Jedoch sind auch bei dieser Änderung Nebenbedingungen zu beachten.

Im Bereich des Konus benötigt man besonders bei der Förderung von pastösen Schlämmen möglichst flache, enge Schneckengänge. Eine Erweiterung auf der Klärseite hat also ein konisches Übergangsgebiet des Schneckenkanals zur Folge, in dem die im Bereich der Aufgabzone (Gegenstrom-dekanter) noch hohen Strömungsgeschwindigkeiten kontinuierlich herabgesetzt werden. Dieser Über-

gang der Schneckensteigung wird sicher nur sanft erfolgen können, um Strömungsablösungen an den Kanalwänden zu vermeiden [16].

#### 9.4 Verändern des Strömungsprofils im Schneckenkanal

Entsprechend dem Kräfteansatz, siehe Abb. 8, kommt es darauf an, den Schergradienten am Boden herabzudrücken. Dies könnte durch Einbauten entsprechend Bild 24 erreicht werden [17].

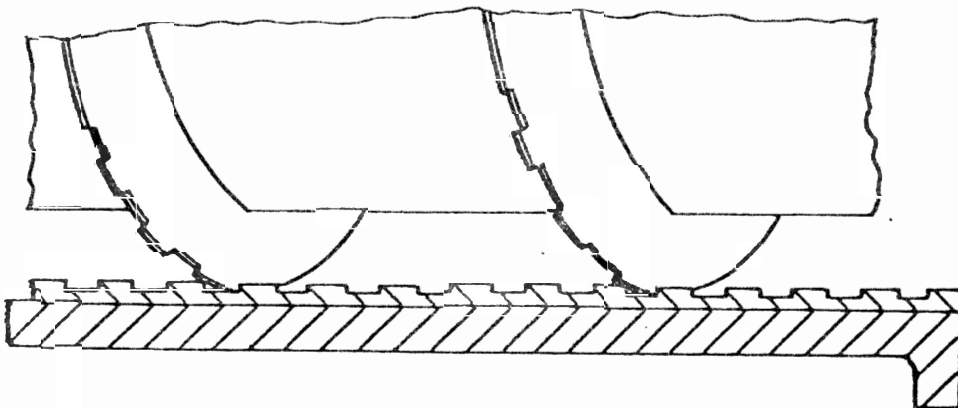


Abb. 24. Abstufungen in der Grundsicht eines Dekanters

#### 9.5 Abstoppen der mitgeschleppten Teilchen

In einer Serie von Querrillen, Stoßkanten o.ä. (Abb. 25), die nahe dem Trommelende angebracht werden und die von der rotierenden Schnecke in die Grundsicht bei jeder Umdrehung nachgezogen werden, könnten mitgeschleppte Teilchen

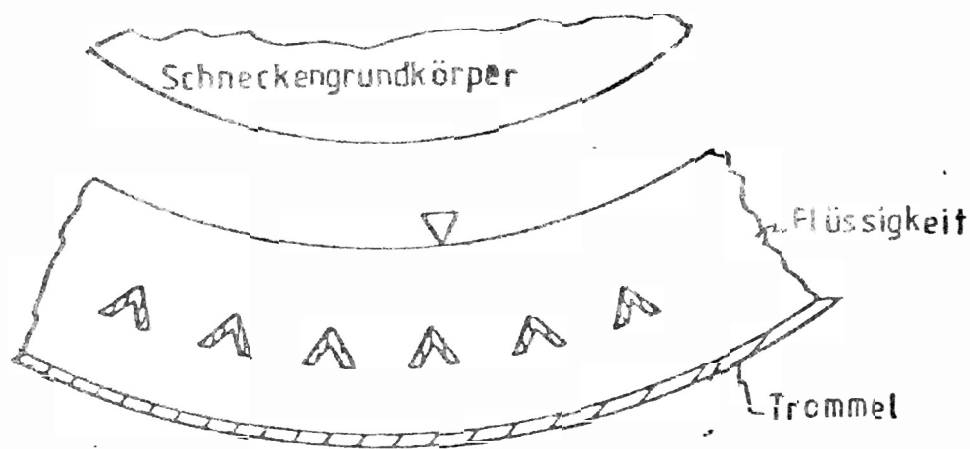


Abb. 25. Profilleisten

festgehalten und trotzdem - zu einem kleinen Kuchen vor dem Schneckenblatt zusammengeschaßt - ohne von der Strömung wieder angegriffen zu werden zum Feststoffauswurf transportiert werden. Solche Konfigurationen wurden in einem Kanal im Erdfeld bereits getestet, und es wurde gegenüber einem glatten Grund eine erhebliche Steigerung festgestellt.

#### 9.6 Führung des Zentrats außerhalb der Schneckenkanäle

Um die Strömungsgeschwindigkeiten des Zentrats im Rotor herabzusetzen, ist schon von verschiedenen Autoren vorgeschlagen worden, der Flüssigkeit einen axialen Weg vorzugeben und sie nicht in den Spiralkanal zu zwingen. Die konstruktiven Lösungen führen zu Bandschnecken, Einbauten mit axialen Führungskanälen und perforierten Schnecken-

blättern. Obwohl viele solcher Vorschläge auch aus der Patentliteratur seit langem bekannt wurden, sind den Autoren vergleichende Untersuchungen nicht bekanntgeworden. Diese Lösungen haben sich auch nicht in der Praxis verbreitet.

10. Schlußwort

Um verlässliche Aussagen zu erarbeiten, müssen Dekanter sehr unterschiedlicher Größe in Labor- und Betriebsversuchen durchgemessen werden.

Diese Aufgabe haben wir uns am Institut in den nächsten Jahren zum Ziel gesetzt. Wir hoffen dabei auf eine fachliche Resonanz aus der Industrie und auf das Verständnis der mit der Forschungsförderung betrauten Personen und Institutionen.

Anhang:

Tabelle 1

Typ	Durchmesser des Zyl. cm	Niveauhöhe cm	Ganghöhe cm	Gangzahl	Blattdicke cm	Fraktionszahl $\gamma$ cm <sup>3</sup>	Klarlänge L <sub>gl</sub> kurz lang Version		Klarfläche A kurze lange Version		t <sub>gl</sub> s 300m/s	Schleppzahl 5 · 10 <sup>6</sup> cm <sup>3</sup>	Äquivalente Klarfläche kurze lange Version	
							cm	cm	cm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>			cm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>
A	25	3,75	6,25	2	0,375	77,4	37,5	50	2945	3927	5220	0,404	15,374	20,499
B	32	4,8	8,0	2	0,48	162	48	64	4825	6434	4175	0,67719	20,015	26,862
C	40	6,0	10	2	0,6	316	60	80	7540	10053	3262	1,033	24,595	32,793
D	50	7,5	12,5	2	0,75	618	75	100	11781	15708	2610	1,615	30,748	40,998
E	63	9,45	15,75	2	0,945	1237	94,5	125	18703	24746	2071	2,543	38,738	51,217
F	80	12,0	20	2	1,2	2534	120	160	30159	40214	1631	4,133	49,189	65,586
G	100	15,0	25	2	1,5	4950	150	200	47123	62832	1305	6,460	61,491	81,996
H	125	18,75	31,25	2	1,875	9668	187,5	250	73631	98174	1044	10,093	76,871	102,49
I	158	23,7	39,5	2	2,37	19524	234	320	106151	158839	870	16,986	101,05	130,19

Literaturverzeichnis

- |1| Redecker, D.: Chem.-Ing.-Tech. 52 (1980)  
Nr. 52, S. 814/880
- |2| Stahl, W.: Chem.-Ing.-Tech. 4/ (1975) Nr.20,  
S. 853
- |3| Smith, F.H., Hebb, M.H., in: Encyclopedia of  
Chemical Technology (Kirk, Othmer),  
Bd. 3, S. 501-521, Interscience  
New York 1949
- |4| Ambler, Ch.M.: Chem.Eng.Prog. 48 (1952)  
Nr. 48, S. 151/158
- |5| Ambler, Ch.M.: Ind.Eng.Chem. 53 (1961) Nr.6,  
S. 430/433
- |6| Trawinski, H., in: Encyclopädie der techni-  
schen Chemie (Bartholomé, E.,  
Biekert, E., Hellmann, H., Ley, H.)  
Bd. 2, S. 204/223, Verlag Chemie,  
Weinheim 1972
- |7| Gösele, W.: Habilitationsschrift, Uni-  
versität Stuttgart, 1971
- |8| Frampton, G.A.: Chem.Proc.Eng. (1963),  
S. 402/412
- |9| Müller, H.-W., Schaffner, J.: Conrad, S.:  
Chem.Techn. 32.Jg., (1980) Nr. 2,  
S. 76/80
- |10| Alt, C., Faust, T.: Strömungs- und Absatz-  
vorgänge in Vollmantel-Schneckenzen-  
trifugen, Arbeitsbericht über Al 93/15  
und Al 93/18, Institut für Mechanische  
Verfahrenstechnik, Universität  
Stuttgart 1981
- |11| Kannenberg, H.-H.: Messung des Abscheide-  
grades einer Vollmantel-Schneckenzen-  
trifuge, Diplomarbeit, Fakultät für  
Maschinenwesen und Elektrotechnik,  
Technische Hochschule Braunschweig 1962.
- |12| Anton, H.: Messung des Abscheidegrades einer  
Vollmantelschneckenzentrifuge, Diplom-  
arbeit, Fakultät für Maschinenwesen und  
Elektrotechnik, Technische Hochschule  
Braunschweig 1962
- |13| Hesse, H.: Untersuchung des Abscheidegrades  
eines Dekanters, Diplomarbeit, Fakultät  
für Maschinenwesen und Elektrotechnik,  
Technische Hochschule Braunschweig 1962



- |14| Burger, M.: Aufbau des Versuchsstandes für eine Dekantierzentrifuge und Aufnahme typischer Kennlinien, Diplomarbeit, Fakultät für Chemieingenieurwesen, Universität Karlsruhe 1980
- |15| Langeloh, T.: Untersuchung der Klärung in Dekantierzentrifugen, Diplomarbeit, Fakultät für Chemieingenieurwesen, Universität Karlsruhe 1981
- |16| P 3 139 345.4, Dekanter-Vorrichtung, Stahl, W.
- |17| P 3 142 805.3, Dekantierzentrifuge, Stahl, W.

Nomenklatur

A	Klärfläche	$m^2$
C	Schleuderziffer	-
D	Durchschlag	$g/l$
$d_S$	Dicke des Schneckenblatts	m
$d_T$	Rotordurchmesser	m
f	Reibungsfaktor	-
$F_A$	Anpreßkraft	N
$F_H$	Haftkraft	N
$F_S$	Schleppkraft	N
g	Erdbeschleunigung	$m/s^2$
$h_{Niv}$	Niveauhöhe	m
$L_e$	Länge zwischen Einlauf und Überlauf	m
$n_H$	Hauptdrehzahl	1/min
P	Preis	DM
$P_o$	Preiseinheitswert	DM
$Q_{Susp}$	Suspensionsdurchsatz	$m^3/h$
$Q_{Zentrat}$	Zentratdurchsatz	$m^3/h$
$Q_{krit}$	kritischer Durchsatz	$m^3/h$
$Q_3(x)$	Massensummenverteilung	$m^3$
$r_T$	Trommelradius	m
S	äquivalente Traktionszahl	$m^3$
T	Traktionszahl	$m^3$
$v_m$	mittlere Geschwindigkeit	$m/s$
$w_{St}$	Stokessche Sinkgeschwindigkeit	m
x	Teilchendurchmesser	m
$x_G$	Grenzkorndurchmesser	m
$x_{min}$	kleinster Teilchendurchmesser der Kornverteilung	m
$x_S$	Schleppkorndurchmesser	m
$z_S$	Anzahl der Schneckengänge	-
$\Delta\rho$	Dichtedifferenz zwischen Feststoffdichte und Flüssigkeitsdichte	$kg/m^3$
$\eta$	dynamische Viskosität der Flüssigkeit	$Ns/m^2$
$\omega$	Winkelgeschwindigkeit	$rad/s$
$\alpha$	Schneckensteigungswinkel	grd