

# Bestimmung des Widerstandsbeiwerts für Kartoffeln und Steine

Prof. Dr. sc. agr. G. Kühn, KDT / Dipl.-Ing.-Päd. K. Scheibe  
Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg, Sektion Mechanisierung der Pflanzenproduktion

## Verwendete Formelzeichen

A	Querschnitt am Diffusor
a	Radius des Glaszylinders
A <sub>A</sub>	Querschnitt der Strömungsausgangsöffnung der Düse
A <sub>E</sub>	Querschnitt der Strömungseingangsöffnung der Düse
A <sub>k</sub>	angeströmter Querschnitt des Feststoffkörpers
A <sub>1</sub>	Querschnitt der Diffusoreingangsöffnung
A <sub>2</sub>	Querschnitt der Diffusorausgangsöffnung
c <sub>w</sub>	Widerstandsbeiwert
c <sub>wk</sub>	Widerstandsbeiwert für Kartoffeln
c <sub>ws</sub>	Widerstandsbeiwert für Steine
D	Durchmesser des Strömungsgleichrichters (gleichzeitig größter Durchmesser des Diffusors)
d	kleinster Durchmesser des Diffusors
d <sub>A</sub>	Durchmesser der Strömungsausgangsöffnung der Düse
d <sub>E</sub>	Durchmesser der Strömungseingangsöffnung der Düse
d <sub>k</sub>	Durchmesser des Feststoffkörpers
F <sub>A</sub>	Auftriebskraft
F <sub>G</sub>	Gewichtskraft
F <sub>MI</sub>	an der Waage angreifende Kraft, bei F <sub>w</sub> = 0
F <sub>MII</sub>	an der Waage angreifende Kraft, bei F <sub>w</sub> = 0
F <sub>w</sub>	Widerstandskraft
g	Fallbeschleunigung
L	Gesamtlänge der Düse
l	Diffusorlänge
L <sub>1</sub>	Länge der Düse von der Eingangsöffnung bis zu ihrem kleinsten Durchmesser
r	Radius der Düse als Funktion von z
r <sub>A</sub>	Radius der Strömungsausgangsöffnung der Düse
r <sub>E</sub>	Radius der Strömungseingangsöffnung der Düse
r <sub>1</sub>	kleinster Radius der Düse
Re	Reynoldszahl des Strömungsmediums
Re <sub>k</sub>	Reynoldszahl für die Umströmung von Feststoffkörpern
U	Umfang am Diffusor
U <sub>1</sub>	Umfang an der Strömungseingangsöffnung des Diffusors
U <sub>2</sub>	Umfang an der Strömungsausgangsöffnung des Diffusors
V̇	Volumenstrom des Strömungsmediums
v̄ <sub>k</sub>	Geschwindigkeit des Feststoffkörpers
v̄ <sub>d</sub>	Eingangsgeschwindigkeit des Strömungsmediums am Diffusor
v̄ <sub>n</sub>	Strömungsgeschwindigkeit des Strömungsmediums
V <sub>k</sub>	Volumen des Feststoffkörpers
v̄ <sub>r</sub>	Anströmgeschwindigkeit des Feststoffkörpers
z	Variable zum Ermitteln der Krümmungsradien der Düse, beginnend am kleinsten Radius der Düse
ρ <sub>n</sub>	Dichte des Strömungsmediums
ρ <sub>k</sub>	Dichte des Feststoffkörpers
α	Neigungswinkel des Diffusors
α <sub>1</sub>	Grenzwinkel für den ablösungsfreien Betrieb eines Diffusors
α <sub>max</sub>	technisch realisierbarer Öffnungswinkel für die Auslegung eines ablösungsfrei arbeitenden Diffusors
φ <sub>g</sub>	größter Neigungswinkel der Düse
ν	kinematische Viskosität
η	dynamische Viskosität

## 1. Problemstellung

Bei den gegenwärtig angewendeten Kartoffelernteverfahren enthält die Kartoffelrohware je nach Bodenart und -zustand einen unterschiedlich hohen Anteil an Fremdbesatz (Steine, Kluten, lose Erde, Kraut). Zum Abtrennen

dieser Beimengungen werden vorwiegend mechanische Sortieranlagen verwendet, deren Funktionssicherheit beim Auslagern in der Lagerware beeinträchtigt wird.

Ein funktions-sicheres Abtrennen des Fremdbesatzes auch unter schwierigen Bedingungen ist auf hydraulischem Wege zu erreichen. Hydraulische Sortieranlagen werden mit Erfolg zum Aufbereiten von Futter- und Industriekartoffeln sowie von Zuckerrüben eingesetzt [1]. Sie zeichnen sich vor allem durch eine hohe Sortiergüte aus.

Für die Speisekartoffelaufbereitung sind die bekannten hydraulischen Sortieranlagen (E 995 A, LTP-62, „Hydrozyklon“) wegen der hohen mechanischen Beanspruchung der Kartoffeln nur bedingt geeignet. Darüber hinaus verursacht der bei den Sortieranlagen LTP-62 und „Hydrozyklon“ zum Aufrechterhalten der Funktion notwendige Flüssigkeitsvolumenstrom von 5 bis 8 m<sup>3</sup> · h<sup>-1</sup> je 1 t · h<sup>-1</sup> Kartoffelmassestrom einen relativ hohen Energiebedarf. Untersuchungen hydraulischer Sortiervorgänge sollten daher bei Sicherung einer hohen Sortiergüte auf das Senken der mechanischen Beanspruchungen der Kartoffeln und auf das Verringern des erforderlichen Flüssigkeitsvolumenstroms gerichtet werden.

## 2. Theoretische Grundlagen

### 2.1. Erkenntnisstand zum Bestimmen des Widerstandsbeiwerts von Feststoffkörpern

Zum mathematischen Beschreiben hydraulischer Sortiervorgänge muß der Widerstandsbeiwert c<sub>w</sub> der zu trennenden Komponenten (Kartoffeln, Steine) bekannt sein, der zumeist als Funktion der Reynoldszahl Re<sub>k</sub> angegeben wird.

Gilfillan und Crowther [2] ermittelten experimentell bei Reynoldszahlen 1,09 · 10<sup>5</sup> ≤ Re<sub>k</sub> ≤ 2,17 · 10<sup>5</sup> für Kartoffeln Widerstandsbeiwerte von 0,64 und für Steine Widerstandsbeiwerte von 0,60 bis 1,00. Beim Sortieren von Kartoffelrohware im Flüssigkeitsstrom treten zumeist Reynoldszahlen auf, die wesentlich kleiner sind. Der vorliegende Beitrag hat die Bestimmung des Widerstandsbeiwerts von Kartoffeln und Steinen für den beim hydraulischen Sortieren besonders interessierenden Bereich 2 · 10<sup>3</sup> ≤ Re<sub>k</sub> ≤ 2,4 · 10<sup>4</sup> zum Gegenstand.

Methoden zum analytischen Ermitteln des Widerstandsbeiwerts sind in der Literatur nur für geometrisch einfach bestimmbare Körper bekannt. Weber [3] gibt Näherungslösungen für den Widerstandsbeiwert von Kugeln für den Bereich 0,2 ≤ Re<sub>k</sub> ≤ 2 · 10<sup>4</sup> an, wobei die Reynoldszahl definiert ist als

$$Re_k = \frac{d_k \vec{v}_r}{\nu} \quad (1)$$

Bei kleinen Reynoldszahlen (Re<sub>k</sub> ≤ 0,2 für Kugeln und Zylinder) überwiegen die Reibungskräfte, so daß sich die Widerstandskraft F<sub>w</sub> mit Hilfe der Navier-Stokes-Gleichungen bestimmen läßt.

Für eine Kugel gilt

$$\vec{F}_w = 6 \pi \eta \frac{d_k \vec{v}_r}{2} \quad (2)$$

Mit zunehmender Reynoldszahl (Durchmesser-Vergrößerung des Körpers, Vergrößerung von v̄<sub>r</sub>) verringern sich die Reibungskräfte, während die Druckkräfte ansteigen, so daß Gl. (2) nicht mehr anwendbar ist. Die Widerstandskraft F<sub>w</sub> ergibt sich nunmehr als

$$\vec{F}_w = c_w A_k \frac{\rho_n \vec{v}_r^2}{2} \quad (3)$$

### 2.2. Kräfte- und Geschwindigkeitsansatz zum Bestimmen des Widerstandsbeiwerts

Die Ermittlung des Widerstandsbeiwerts c<sub>w</sub> für Kartoffeln und Steine erfolgte in einem räumlich und zeitlich stationären Strömungsfeld. Für den stationären Zustand gilt folgender Kräfteansatz (Bild 1):

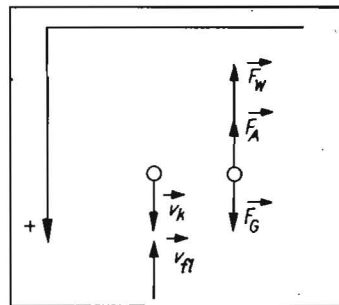


Bild 1. Kräfte- und Geschwindigkeitsansatz für stationäre Umströmung kugelförmiger Feststoffkörper

$$\vec{F}_G = V_k \rho_k g \quad (4)$$

$$\vec{F}_A = V_k \rho_n g \text{ und Gl. (3) für } \vec{F}_w \quad (5)$$

Mit der Geschwindigkeit v̄<sub>k</sub> der Feststoffkörper und der Strömungsgeschwindigkeit v̄<sub>n</sub> ergibt sich die Anströmgeschwindigkeit v̄<sub>r</sub> der Feststoffkörper zu

$$\vec{v}_r = \vec{v}_n - \vec{v}_k \quad (6)$$

Wird der zu untersuchende Körper zum experimentellen Ermitteln des Widerstandsbeiwerts an einer Waage fixiert, ist seine Geschwindigkeit v̄<sub>k</sub> = 0, so daß für die Anströmgeschwindigkeit gilt

$$\vec{v}_r = \vec{v}_n \quad (6a)$$

Für die an der Waage angreifende Kraft F<sub>MI</sub> ergibt sich die Gleichgewichtsbedingung zu

$$\vec{F}_G - \vec{F}_A - \vec{F}_w - \vec{F}_{MI} = 0 \quad \text{oder} \quad (7)$$

$$V_k \rho_k g - V_k \rho_n g - c_w A_k \frac{\rho_n}{2} \vec{v}_r^2 = \vec{F}_{MI} \quad (7a)$$

Für die Strömungsgeschwindigkeit v̄<sub>n</sub> = 0 wird die Widerstandskraft F<sub>w</sub> = 0, so daß an der Waage die Differenzkraft F<sub>MII</sub> zwischen Gewicht- und Auftriebskraft wirkt. Für die Gleichgewichtsbedingung gilt nunmehr

$$\vec{F}_G - \vec{F}_A - \vec{F}_{MII} = 0 \quad \text{oder} \quad (8)$$

$$V_k \rho_k g - V_k \rho_n g = \vec{F}_{MII} \quad (8a)$$

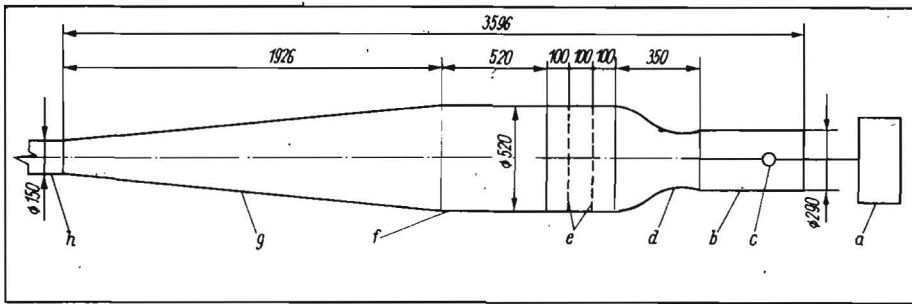


Bild 2. Schema der Versuchsanordnung:

a Waage, b Glaszylinder, c Versuchskörper, d Düse, e Sieb, f Röhrengleichrichter, g Diffusor, h Zuführleitung

Durch Differenzbildung von Gl. (7) und (8) ergibt sich die Widerstandskraft  $\vec{F}_W$  als

$$\vec{F}_{MI} - \vec{F}_{MIU} = \vec{F}_G - \vec{F}_A - \vec{F}_W - (\vec{F}_G - \vec{F}_A) \quad (9)$$

$$\vec{F}_W = \vec{F}_{MI} - \vec{F}_{MIU} \quad (9a)$$

und der Widerstandsbeiwert  $c_w$  als

$$c_w = \frac{2(\vec{F}_{MIU} - \vec{F}_{MI})}{A_k \rho_{fl} \vec{v}_i^2} \quad (10)$$

### 3. Experimentelle Untersuchungen

#### 3.1. Versuchsanordnung

Die Versuchseinrichtung bestand aus einem Glaszylinder, in dem die Messungen erfolgten. Dem Glaszylinder waren zum Erzeugen eines stationären Strömungsfeldes eine Düse, zwei Siebe, ein Röhrengleichrichter und ein Diffusor vorgeschaltet (Bild 2). Zum Messen der Widerstandskraft diente eine Oberschalenwaage mit einer Meßgenauigkeit von  $\pm 0,01$  g. Der zu untersuchende Körper wurde an einem Rundstab (Durchmesser 2 mm) befestigt, der mit der Unterflurwägeeinrichtung der Waage verbunden war.

Um den Wandeinfluß auf die Strömung im Meßbereich weitestgehend auszuschließen, darf ein bestimmter Durchmesser des Zylinders nicht unterschritten werden. Nach Thomschke [4] wird der Wandeinfluß bei einem Abstandsverhältnis  $a/d_k = 3$  vernachlässigbar. Dementsprechend wurde ein Zylinderdurchmesser von 290 mm gewählt.

#### Düse

Um ein „Abreißen“ der Strömung an der Wandung beim Austritt der Flüssigkeit aus der Düse zu vermeiden, ist ein Durchmesserverhältnis (Düseneingang zu Düsenausgang) von 3:1 erforderlich [5]. Aus dem Durchmesser der Düsenausgangsöffnung, der gleich dem Durchmesser des Glaszylinders sein mußte, ergaben

sich der Querschnitt der Düseneingangsöffnung zu

$$A_E = 3 A_A = \frac{3}{4} \pi d_A^2 = 0,198 \text{ m}^2 \quad (11)$$

und der entsprechende Düsendurchmesser zu  $d_E = 502$  mm.

Für die Gesamtlänge einer Düse gilt nach [5] die Bedingung (Bild 3)

$$L \leq L_1 + (L_1/6) \quad \text{mit} \quad (12)$$

$$L_1 \leq 2,5 (r_E - r_1) \quad \text{und} \quad (13)$$

$$r_1 = r_A/1,01, \quad (14)$$

so daß  $L \geq 312$  mm zu wählen war.

Um fertigungstechnisch bedingten Toleranzen Rechnung zu tragen, wurde eine Gesamtlänge der Düse von 350 mm gewählt. Zur Gewährleistung einer ablösungsfreien Strömung in der Düse war ferner zu berücksichtigen, daß der größte Neigungswinkel  $\varphi_B$  nur Werte  $\leq 38^\circ$  annehmen darf [5]. Die Berechnung der in Verbindung mit den Neigungswinkeln erforderlichen Krümmungsradien erfolgte nach [5] (Bild 3) zu

$$\frac{r - r_1}{r_E - r_1} = \left(\frac{z}{L_1}\right)^3 \left[2 \left(\frac{z}{L_1}\right)^3\right] \quad (15)$$

Um in der Düse ein weitestgehend „geglättetes“ Geschwindigkeitsprofil zu erreichen, wurden vor der Düseneingangsöffnung zwei Siebe angeordnet.

#### Röhrengleichrichter

Im Abstand von 100 mm vor dem ersten Sieb befand sich ein als Röhrengleichrichter ausgebildeter Strömungsgleichrichter. Die Länge eines Röhrengleichrichters soll  $2D$  betragen [6]. In Verbindung mit den Sieben, die ebenfalls eine Gleichrichterwirkung ausüben, wurde  $l = D$  als ausreichend angesehen. Die Gesamtlänge des Gleichrichters wurde dementsprechend auf 520 mm festgelegt.

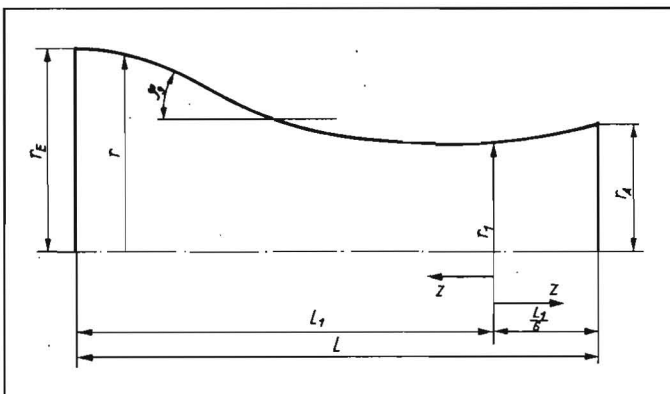


Bild 3  
Abmessungen der Düse

#### Diffusor

Zwischen den Strömungsgleichrichter und die Zuführrohrleitung für die Flüssigkeit wurde ein Diffusor geschaltet. Für eine ablösungsfreie Strömung in einem Diffusor (Bild 4) gilt nach [7, 8]

$$\frac{1}{U} \frac{dA}{dx} \leq \tan \alpha_1 \quad (16)$$

Der Umfang U und der Querschnitt A sind Funktionen von x:

$$U = f(x) = 2\pi \left( \frac{d}{2} + x \tan \alpha \right); \quad (17)$$

$$A = f(x) = \frac{\pi}{4} (d + 2x \tan \alpha)^2 \quad (18)$$

Das Maximum von  $(1/U)/(dA/dx)$  liegt bei  $x = 0$ . Damit ergibt sich

$$0,5 \tan \alpha_{\max} \leq \tan \alpha_1 \quad \text{oder} \quad (19)$$

$$\tan \alpha_{\max} \leq 2 \tan \alpha_1 \quad (19a)$$

Der Grenzwinkel  $\alpha_1$  ist abhängig von der Reynoldszahl des Strömungsmediums am Eingangsquerschnitt  $A_1$ . Die Reynoldszahl für den Eingangsquerschnitt ist definiert als

$$Re = \frac{d \vec{v}_d}{\nu} = \frac{d \dot{V}}{\nu A_1} \quad (20)$$

Bei einem für die Versuchsdurchführung erforderlichen Volumenstrom von  $\dot{V} = 100 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  und einem Durchmesser am Eingangsquerschnitt des Diffusors von  $d = 150$  mm bildet sich am Diffusoreingangsquerschnitt eine Strömung mit  $Re = 2,33 \cdot 10^5$  aus. Für diesen Wert der Reynoldszahl darf für eine ablösungsfreie Strömung im Diffusor ein Grenzwinkel von  $\alpha_1 = 3,1^\circ$  nicht überschritten werden [9] (Bild 5). Gl. (20) ergibt für den technisch zu realisierenden Öffnungswinkel des Diffusors  $\alpha_{\max} \leq 6,3^\circ$ . Für die Auslegung des Diffusors wurde ein Winkel  $\alpha = 5,5^\circ$  gewählt. Die Gesamtlänge des Diffusors ergab sich damit zu

$$l = \frac{D - d}{2 \tan \alpha} = 1926 \text{ mm} \quad (21)$$

#### 3.2. Versuchsdurchführung

Für die Versuche wurden aus einer losen Kartoffelschüttung der Sorte Adretta 100 Kartoffelknollen im Bereich von 55 mm bis 65 mm Quadratmaß ausgewählt. Entsprechend erfolgte die Auswahl der für die Versuche vorgesehenen 100 Steine eines D-Standorts.

Die an der Unterflurwägeeinrichtung befestigten Versuchskörper ragten im Durchschnitt 200 mm in den Glaszylinder hinein (Bild 2). Weber, Hallee und Brauer [3, 10, 11] wiesen nach, daß Feststoffkörper in strömenden gasförmigen oder flüssigen Medien eine pendelnde Bewegung ausführen, wobei sie bestrebt sind, sich mit der Projektion ihrer größten Querschnittsfläche senkrecht zur Strömung einzustellen. Dementsprechend wurden die Kartoffelknollen und Steine im Glaszylinder so angeordnet, daß die Projektion ihrer größten Querschnittsfläche senkrecht zur Strömung lag.

Zunächst erfolgte bei ruhender Flüssigkeit für jeden Körper die Bestimmung des Betrags der Kraft  $F_{MI}$  [Gl. (8)]. Anschließend wurde bei Anströmgeschwindigkeiten von 0,05 bis  $0,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  in Stufen von  $0,05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  der Betrag der Kraft  $F_{MI}$  ermittelt [Gl. (7)].

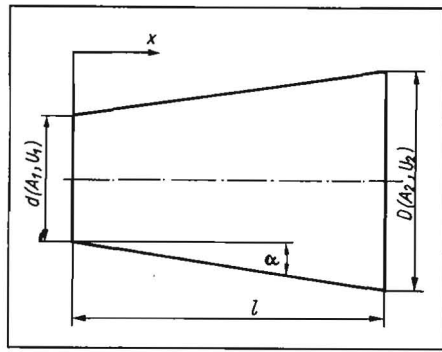


Bild 4. Abmessungen des Diffusors

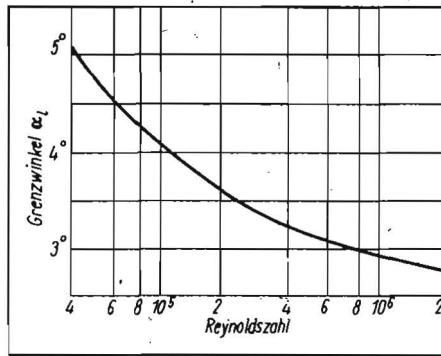


Bild 5. Grenzwinkel für den ablösungsfreien Betrieb eines Diffusors als Funktion der Reynoldszahl

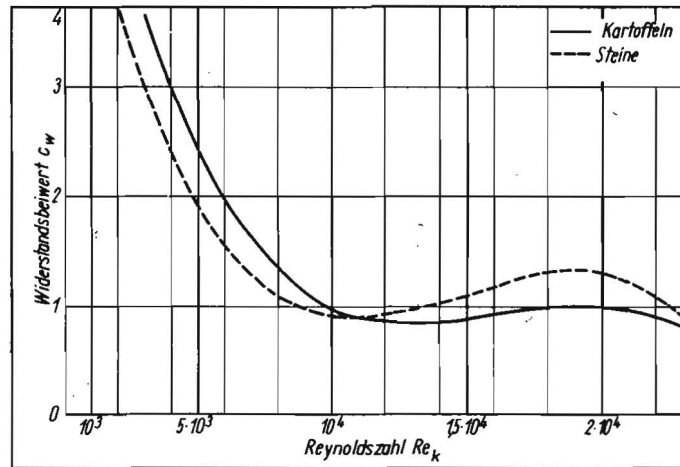


Bild 6. Widerstandsbeiwert für Kartoffeln und Steine als Funktion der Reynoldszahl

### 3.3. Versuchsauswertung und -ergebnisse

Aus den Beträgen der experimentell ermittelten Kräfte  $F_{MII}$  und  $F_{MI}$  wurde durch Differenzbildung [Gl. (9)] für jeden Körper die Widerstandskraft  $F_W$  errechnet. Aus der Widerstandskraft erfolgte die Berechnung des Widerstandsbeiwerts entsprechend Gl. (10).

Zum Bestimmen des angeströmten Körperquerschnitts diente das in der Praxis häufig angewendete „Verfahren der volumengleichen Kugel“ [12 bis 16], nach dem der Durchmesser eines Feststoffkörpers berechnet wird zu

$$d_k = \sqrt[3]{\frac{6 V_k}{\pi}} \quad (22)$$

und der angeströmte Körperquerschnitt zu

$$A_k = \frac{\pi}{4} \sqrt[3]{\frac{6 V_k}{\pi}} \quad (23)$$

Die Meßergebnisse wurden mit dem Ziel, die Abhängigkeit des Widerstandsbeiwerts von der Reynoldszahl mathematisch zu beschreiben, einer Regressionsanalyse unterzogen (Bild 6). Die entsprechenden Regressionsgleichungen lauten für

**Kartoffeln**  
 $c_{wK} = 6,2817 - 0,0011 Re_k + 7,03 \cdot 10^{-8} Re_k^2 - 1,45 \cdot 10^{-12} Re_k^3; B = 0,81 \quad (24)$

**Steine**  
 $c_{wS} = 5,4305 - 0,001 Re_k + 7,44 \cdot 10^{-8} Re_k^2 - 1,66 \cdot 10^{-12} Re_k^3; B = 0,74. \quad (25)$

Die Abhängigkeit des Widerstandsbeiwerts von der Reynoldszahl weist folgende grundlegende Tendenz auf:

Der Widerstandsbeiwert für Kartoffeln fällt von etwa 3,6 bei  $Re_k = 3 \cdot 10^3$  auf 0,98 bei  $Re_k = 1 \cdot 10^4$  ab und bleibt dann bis  $Re_k = 2,1 \cdot 10^4$  nahezu konstant  $\approx 1$ .

Bei Steinen fällt der Widerstandsbeiwert von etwa 3,0 bei  $Re_k = 3 \cdot 10^3$  auf 0,9 bei  $Re_k = 1 \cdot 10^4$  ab und steigt bis  $Re_k = 1,95 \cdot 10^4$  auf 1,34 an.

Weiterhin ist festzustellen, daß für Reynoldszahlen  $< 10^4$  der Widerstandsbeiwert für Kartoffeln größer ist als der für Steine und daß sich die Verhältnisse für  $Re_k > 10^4$  umkehren. Für dieses Ergebnis gibt es beim derzeitigen Erkenntnisstand keine befriedigende Erklärung.

### 4. Schlußfolgerungen

Die beim hydraulischen Sortieren von Kartoffelrohware genutzten Geschwindigkeitsunterschiede der zu trennenden Komponenten werden maßgeblich durch Dichteunterschiede der betreffenden Körper verursacht.

Der Widerstandsbeiwert übt ebenfalls einen Einfluß auf die Geschwindigkeit der Körper aus, wobei die Strömungsbedingungen den Grad des Einflusses bestimmen.

Für Strömungsbedingungen im Bereich  $Re_k < 10^4$  ist der Widerstandsbeiwert für Kartoffeln größer als der für Steine, d. h. der Bewegung von Kartoffeln wirkt eine größere Widerstandskraft entgegen als der von Steinen. Die daraus resultierenden Geschwindigkeitsunterschiede der zu sortierenden Komponenten führen zu einer positiven Beeinflussung des Sortiervorgangs.

Im Bereich  $Re_k > 10^4$  ist der Widerstandsbeiwert für Steine größer als der für Kartoffeln, so daß die Sortiervorgänge durch den Widerstandsbeiwert ungünstig beeinflusst werden.

### 5. Zusammenfassung

Ausgehend von der Analyse der auf einen Körper im stationären Strömungsfeld wirkenden Kräfte wird das Erfordernis zur experimentellen Bestimmung des Widerstandsbeiwerts von Feststoffkörpern bei der Untersuchung und Optimierung von Vorgängen in hydraulischen Kartoffelsortieranlagen abgeleitet.

Zur Durchführung experimenteller Untersuchungen werden Berechnungsgrundlagen für einen Strömungskanal zusammengestellt und eine Versuchseinrichtung entwickelt.

Im Ergebnis einer statistischen Verrechnung experimenteller Versuchsdaten wird der Widerstandsbeiwert für Kartoffeln und für Steine in einem geschlossenen Kurvenzug in Abhängigkeit von der Reynoldszahl dargestellt.

Der Verlauf der Funktion  $c_w = f(Re_k)$  macht deutlich, daß bei Strömungsbedingungen  $Re_k < 10^4$  der Sortierprozeß bei der Kartoffelaufbereitung infolge unterschiedlicher Widerstandsbeiwerte der zu sortierenden Komponenten (Kartoffeln, Steine) günstig beeinflusst wird.

### Literatur

- [1] Scheibe, K.; Kühn, G.: Hydraulisches Dichtesortieren von Kartoffelrohware. agrartechnik, Berlin 31 (1981) 11, S. 496—499.
- [2] Gilfillan, G.; Crowther, A. J.: The Behaviour of Potatoes, Stones and Clods in a Vertical Airstream (Das Verhalten von Kartoffeln, Steinen und Kluten in einem senkrechten Luftstrom). J. agric. Engin. res. — Brit. Soc. of res. in agric. Engin., Silsoe/Bedford 4 (1959) 1, S. 9—15.
- [3] Weber, M.: Strömungsfördertechnik. Mainz: Otto-Krauskopf-Verlag GmbH 1974.
- [4] Thomschke, H.: Experimentelle Untersuchungen der stationären Umströmung von Kugeln und Zylindern in Wandnähe. TH Karlsruhe, Dissertation 1971.
- [5] Wille, R.: Beiträge zur Phänomenologie der Freistrahlen. Zeitschrift für Flugwissenschaften, Braunschweig 11 (1963) 6, S. 222—233.
- [6] Bonfig, K. W.: Technische Durchflußmessung mit besonderer Berücksichtigung neuartiger Durchflußmeßverfahren. Essen: Vulkan-Verlag 1977.
- [7] Autorenkollektiv: Technische Strömungsmechanik II (Verfahrenstechnik). Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1978.
- [8] Albring, W.: Angewandte Strömungslehre. Dresden: Steinkopff-Verlag 1970.
- [9] Eck, B.: Technische Strömungslehre. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer-Verlag 1961.
- [10] Hallee, N. D.: Aerodynamic Properties of Potatoes and Associated Soil Materials (Aerodynamisches Verhalten von Kartoffeln und Bodenkluten). Transaction of ASAE, St. Joseph, Mich. (1972) 2, S. 303—307.
- [11] Brauer, H.: Grundlagen der Ein- und Mehrphasenströmungen. Aarau und Frankfurt (M): Verlag Sauerländer 1971.
- [12] Matthies, H.-J.: Der Strömungswiderstand beim Belüften landwirtschaftlicher Erntegüter. Düsseldorf: VDI-Forschungsheft 454, 1965.
- [13] Pahl, H. H.; Schädel, G.; Rumpf, H.: Zusammenstellung von Teilchenformbeschreibungsmethoden. Aufbereitungstechnik, Wiesbaden 14 (1973) 5, S. 257—262; 14 (1973) 10, S. 672—683.
- [14] Brauer, H.; Mewes, D.: Strömungswiderstand sowie stationärer Stoff- und Wärmeübergang an Blasen und Tropfen. Chemie-Ingenieur-Technik, Weinheim 44 (1972) 15, S. 953—956.
- [15] Ludwig, J.: Sinkversuche mit Festteilchen verschiedener Gestalt in Flüssigkeiten. Chemiker-Zeitung, Heidelberg 79 (1955) 22, S. 774—777.
- [16] Gaessler, H.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen über die Strömungsvorgänge beim Transport von Festteilchen durch horizontale Rohrleitungen. TH Karlsruhe, Dissertation 1967.