

Es sei abschließend darauf hingewiesen, daß bei der heute üblichen Belüftung mit Außenluft ohne Einsatz von Kälte-technik die Erreichung physiologisch und physikalisch bedingter kleinster Verluste häufig nicht möglich ist. Außerdem ist für eine optimale Lagerung die automatische Einhaltung des Klimas unerlässlich /7/.

#### 4. Zusammenfassung

Es werden Grundlagen zur Berechnung von Schwund, Temperatur- und Feuchteänderung in zwangsbelüfteten Kartoffelschüttungen angegeben und Schlußfolgerungen für praktische Lagerbedingungen gezogen. Richtwerte für wärmetechnische Kennzahlen von Kartoffeln wurden in einer speziellen Klimaanlage ermittelt.

Die Ergebnisse gestatten unter vereinfachenden Annahmen eine Optimierung der Lagerbedingungen und sind grundsätzlich auch auf anderes Lagergut übertragbar.

#### Literatur

- /1/ —: Wärmetechnische Kennzahlen für Kartoffeln. IfEL Rostock-Sievershagen, Zwischenbericht 06/70(F), 04/71(F), 03/72(F).
- /2/ —: Wärme- und Stoffaustausch in pflanzlichen Schüttungen (Kartoffeln). IfEL Rostock-Sievershagen, Teilabschlußbericht 01/73(F).
- /3/ —: Mechanisierung der Kartoffelproduktion. Gesetzmäßigkeiten des Wasser- und Substanzverlustes bei belüfteten und unbelüfteten Kartoffelstapeln (Literaturanalyse). IML Potsdam-Bornim, Jan. 1971.
- /4/ Bakker-Arkema, Fred W./W. G. Bickert/R. V. Morey: Gekoppelter Wärme- und Stoffaustausch während des Trocknungsvorgangs in einem Behälter mit Getreide. Landtechnische Forschung 17 (1967) H. 6, S. 175-180.
- /5/ Wolosow, Ju.: Kenntnisse der biologischen Besonderheiten der Kartoffelknollen — Grundlage einer rationellen Lagerungstechnologie (russisch). Aus Ju. Wolosow: Chronemie Kartoffelja, Moskau (1970) S. 1-40.
- /6/ —: Ing.-Büro für Kartoffelwirtschaft Groß Lüsewitz, Abschlußbericht 1971, Untersuchungen zur Lagerverlustbestimmung in ALV-Anlagen.
- /7/ Redenz, G./J. Ochmann: Entwicklung einer Steuer- und Regelanlage zur Belüftung von Kartoffellagern. IfEL Rostock-Sievershagen, Forschungsbericht 1971. A 9454

## Strömungstechnische Untersuchungen von lagernden Schüttgütern

Dipl.-Ing. H. Jahnke, KDT, Bauakademie der DDR, Institut für Heizungs-, Lüftungs- und Sanitärtechnik  
o. Prof. Dr.-Ing. habil. M. Hackeschmidt, Hochschule für Verkehrswesen „Friedrich List“ Dresden

Die folgenden Ausführungen sollen über einen wichtigen Teilabschnitt der Untersuchungen zum Problem der Be- und Entlüftung von lagernden Schüttgütern informieren. Im Vordergrund der praktischen Anwendung standen bei den Untersuchungen die Forderungen, die aus der Be- und Entlüftung von lagernden Speisekartoffeln in Sektionslagern entstehen.

Für dieses Lagerungsverfahren sollten die Strömungsverhältnisse im Kartoffelstapel und das Zusammenwirken von Lüftungssystem und Strömung im Kartoffelstapel sorgfältig und möglichst umfassend untersucht werden.

Aus den Ergebnissen werden Vorschläge für die Verbesserung der Be- und Entlüftung von bestehenden Kartoffellagern und für die Erarbeitung von neuen Projekten abgeleitet.

Die Anwendung der hier dargestellten ersten Ergebnisse ist nicht auf Kartoffeln beschränkt. Sie ist bei allen prinzipiell ähnlichen Fällen möglich, z. B.: Be- und Entlüftung von lagernden Zuckerrüben, Trocknung von lagerndem Getreide,

Be- und Entlüftung bei der Lagerung von Kohlsorten, Be- und Entlüftung von Zuckersilos.

Die Anwendung der Ergebnisse soll höchste Wirtschaftlichkeit der jeweiligen technischen Anlage bei niedrigen Investitions- und Betriebskosten gewährleisten. Das Institut für Heizungs-, Lüftungs- und Sanitärtechnik hat sich immer bemüht, seiner Verantwortung für den wissenschaftlich-technischen Fortschritt und die praktische Anwendung der Ergebnisse zu entsprechen, um damit einen wichtigen Beitrag für die Erfüllung der vom VIII. Parteitag beschlossenen Hauptaufgabe zu leisten.

### 1. Aufgabenstellung

Die Aufgabe der theoretischen und experimentellen Untersuchungen besteht in:

- der Überprüfung der in den Sektionslagern mit 6 m Sektionsbreite installierten Lüftungssysteme
- der Ermittlung einer optimalen Betriebsweise für das Lüftungssystem bei 6 m Sektionsbreite
- der Ausarbeitung einer Lösung für das Lüftungssystem von Sektionslagern mit 12 m Sektionsbreite
- der Ermittlung einer optimalen Betriebsweise für diesen Lagertyp.

### 2. Prinzipielles zum Lösungsweg

Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen kann mit großer Sicherheit angenommen werden, daß die Luftströmung im Schüttgutstapel turbulent ist. Sie kann deshalb nicht mit den Gesetzen der linearen Filterströmung beschrieben werden.

Eine vernünftige praktikable Lösung läßt sich nur dann angeben, wenn von der Bewegungsgleichung der nichtlinearen (turbulenten) Filterströmung ausgegangen wird.

### 3. Zur Modellierung

Für die schnelle Gewinnung von anwendungsbereiten Ergebnissen wurden folgende Vereinfachungen vorgenommen:

- die Schüttung besteht aus Kugeln gleichen Durchmessers
- das Porenvolumen wird als konstant in der Schüttung angenommen
- die Veränderung des Luftzustands bleibt unberücksichtigt (isotherme Verhältnisse).

#### Verwendete Formelzeichen

$\xi$	örtlicher Gesamtdruck-Verlustbeiwert
$\bar{\xi}$	Gesamtdruck-Verlustbeiwert des Strömungssystems
$p$	Druck in $N \cdot m^{-2}$
$\rho$	Massendichte in $kg \cdot m^{-3}$
$V$	Leerraumgeschwindigkeit in $m \cdot s^{-1}$
$Re$	Reynoldszahl
$A$	Durchströmfläche in $m^2$
$d_K$	äquivalenter Kugeldurchmesser in $m$
$K_E$	Energiestrom-Ungleichförmigkeitsfaktor
$k_q$	quadratischer Filterwiderstandsbeiwert in $m \cdot s^{-1}$
$l$	Kanallänge in $m$
$r$	Radius in $m$
$U$	Umfang des Kanalquerschnittes, der an den Filter grenzt, in $m$
$\alpha$	Parameter
$\beta$	Parameter
$\epsilon$	relatives Porenvolumen
$x$	Flächenverhältnis

#### Indizes

$a$	äußere Filterfläche
Darcy	lineare Filterströmung
$e$	Eintritt —
$g$	Gesamt —
$y$	$\perp x, x'$
$0$	Grenzfläche Filter/Kanal
$\sim$	(über dem Formelzeichen) Mittelwert

Im folgenden werden nur die besonders den Praktiker interessierenden Ergebnisse und Zusammenhänge dargestellt. Eine ausführliche Darstellung wird in der Schriftenreihe der Bauakademie der DDR veröffentlicht.

### 3.1. Gesamtdruck—Verlustbeiwert

Für den Gesamtdruck—Verlustbeiwert des gesamten Filterströmungssystems, einschließlich des Verteilungs- bzw. Sammelkanals gilt folgende Gleichung:

$$\xi_0 \text{ Filter} = \frac{(\tilde{p}_0 - p_a) \text{Darcy}}{K_{E0} \frac{\rho}{2} v_0^2} \left[ 1 + \frac{\tilde{v}_0}{kq} f \left( \frac{r_a}{r_0} \right) \right] + 1 - \frac{K_{Ea}}{K_{E0}} \left[ \frac{r_0}{r_a} \right]^{2n} \quad (1)$$

Diese Gleichung kann vereinfacht werden zu:

$$\xi_0 \text{ Filter, Lit} \approx \frac{(\tilde{p}_0 - p_a) \text{Darcy}}{\frac{\rho}{2} \tilde{v}_0^2} \left[ 1 + \frac{\tilde{v}_0}{kq} f \left( \frac{r_a}{r_0} \right) \right] \quad (2)$$

Wie die in Tafel 1 dargestellten Ergebnisse zeigen, verringern sich mit zunehmender Reynoldszahl der Gesamtdruck-Verlustbeiwert  $\xi_0 \text{ Filter, Lit}$  und das Längenverhältnis degressiv.

### 3.2. Stromverteilung — minimales Flächenverhältnis

Dieser Fall liegt dann vor, wenn die Zuluft unter der Schüttung zugeführt wird (analog gilt für die Stromsammlung die Umkehrung).

Die Voraussetzung der ebenen Filterströmung in jedem Schnitt besteht annähernd nur dann, wenn das Verhältnis

$$\chi = \frac{A_e}{A_0} \quad (3)$$

einen bestimmten Wert nicht unterschreitet.

Für Gl. 3 ergibt sich nach Vereinfachungen die Näherungsformel

$$\chi_{\min} \approx \frac{1}{\sqrt{\xi_0}} \quad (4)$$

### 3.3. Stromsammlung

Aufgrund der Tatsache, daß das der Stromsammlung entsprechende Lüftungssystem am häufigsten angewendet wird,

Tafel 1. Gesamtdruck—Verlustbeiwert und Längenverhältnis in Abhängigkeit von der Reynoldszahl

Re	1	10	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup>
$\tilde{v}_0$ 3,04 m · s <sup>-1</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-1</sup>	1
$\xi_0 \text{ Filter, Lit}$	96509	103391	1780	9/9	835
$\chi_{\min, \text{zul}}$	0,0032	0,0097	0,0237	0,0329	0,0346
$\left(\frac{1}{r_0}\right)_{\min, \text{zul}}$	155	52	21	15	15

Tafel 2. Berechnete Abmessungen eines Sammelkanals in Abhängigkeit von der Reynoldszahl

Re	1	10	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup>
$\xi_0 \text{ Filter, Lit}$	96509	103391	1780	919	835
$\frac{\alpha}{\sqrt{\beta}}$	0,256	0,780	1,886	2,625	2,755
$\frac{\tilde{\alpha}}{\sqrt{\beta}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}}$	0,7			0,35	
$A_{0y}$ m <sup>2</sup>	23,6			11,8	
$\tilde{v}_{0y}$ m · s <sup>-1</sup>	0,28			0,56	

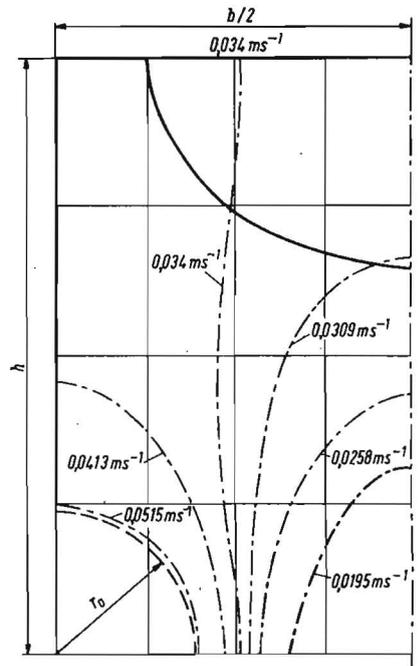


Bild 1. Isotachen für die ausgeführte Lösung ( $h/b = 0,833$ ;  $h = 5$  m,  $b = 6$  m,  $l = 30$  m,  $V = 11000$  m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup>)

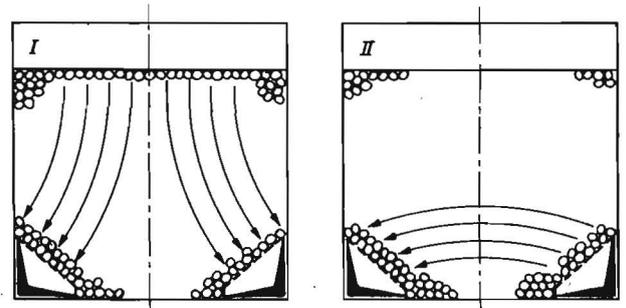


Bild 2. Schematische Darstellung der Belüftung von lagernden Schüttgütern nach dem Verfahren des Wechselbetriebs: I Betriebsweise I – Sauglüftung, II Betriebsweise II – Saug-Drucklüftung

sind hier weitergehende Untersuchungen durchgeführt worden.

Für Geschwindigkeitsverteilung beim Eintritt in den Sammelkanal gilt:

$$\frac{v_{0y}}{\tilde{v}_e} = \frac{\frac{\tilde{\alpha}}{\sqrt{\beta}} \cos h \left[ \frac{\tilde{\alpha}}{\sqrt{\beta}} \frac{x'}{l} \frac{U_{0(x')}}{U_e} \right]}{\frac{1}{A_e/U_e} \sin h \left[ \frac{\tilde{\alpha}}{\sqrt{\beta}} \right]} \quad (5)$$

Für den Parameter  $\frac{\tilde{\alpha}}{\sqrt{\beta}}$  ergibt sich als 0. Näherung:

$$\left[ \frac{\tilde{\alpha}}{\sqrt{\beta}} \right]^{(0)} \approx 1,5 \frac{1}{\Lambda_e} \frac{U_e}{\sqrt{\xi_0}} \frac{\Lambda_e}{A_{x_0}} \quad (6)$$

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse von Reichardt/Tollmien /1/ ist Gl. 6 die Ausgangsgleichung für die Bestimmung der Abmessungen eines Sammelkanals. Ergebnisse einer durchgeführten Nachrechnung sind in Tafel 2 zusammengefaßt.

### 4. Experimentelle Untersuchungen

Die Strömungsverhältnisse in der Schüttung wurden an physikalisch unähnlichen (elektrisch leitendes Papier) und ähnlichen Modellen untersucht.

Die letzteren dienen, wegen ihrer meßtechnischen Kompliziertheit nur im beschränkten Umfang, zur Bestätigung der Untersuchungen am unähnlichen Modell.

Die Strömungsverhältnisse werden durch den Verlauf der Strömungsgeschwindigkeit in der Schüttung dargestellt (Isotachen, Bild 1).

Die Untersuchungen wurden für verschiedene Größen des Verhältnisses Schütthöhe ( $h$ ) zu Abstand der Stromquellen — Stromsenken ( $b$ ) durchgeführt. Es sind insgesamt drei Betriebsarten technisch realisierbar (Bild 2):

- Betriebsweise I — Kanal A > Saugbetrieb ( $\cong$  Senken)  
Kanal B >
- Betriebsweise II Kanal A — Saugbetrieb ( $\cong$  Senke)  
Kanal B — Druckbetrieb ( $\cong$  Quelle)
- Betriebsweise III Kanal A > Druckbetrieb  
Kanal B > ( $\cong$  Quellen)

Aus den in ausgeführten Lagern durchgeführten Untersuchungen und einer großen Anzahl von Beratungen mit Lagerarbeitern und Fachleuten konnte die Hypothese abgeleitet werden, daß im Bereich der Symmetrielinie des Querschnitts einer Sektion ein dreieckförmiger, stark gefährdeter Bereich vorliegt. Die Grundlinie dieses Dreiecks wird mit etwa 1,5 bis 2 m bestimmt.

Für diese Abmessungen ergeben sich die Isotachen in Bild 1 mit einer zum gefährdeten Bereich gehörenden, d. h. ihn eingrenzenden, „Grenzisotache“  $\bar{v}_{\min} \approx 0,02 \dots 0,03$  m/s bei Betriebsweise I und  $h/b = 0,833$ .

Durch die modelltechnischen Untersuchungen wurde festgestellt, daß es ein Verhältnis  $h/b$  gibt, bei dem auf der Symmetrielinie die Grenzisotachen für die Betriebsweisen I und II einen gemeinsamen Punkt haben.

Dieses zugehörige Verhältnis beträgt ungefähr

$$\left[ \frac{h}{b} \right]_{\text{min. Fäulnis}} \approx 0,6.$$

Das heißt, bei Anwendung von wechselndem Betrieb entsprechend Betriebsweise I und II wird der gesamte Schüttquerschnitt optimal belüftet. Es gibt keinen gefährdeten Bereich.

Dieses Verfahren („Wechsellüftung“) wurde als Patent der DDR unter der Nr. WPB 65 g/169451 registriert.

Bei  $h/b > 0,6$  ist keine Überschneidung zugehöriger Grenzisotachen vorhanden, wohl aber bei  $h/b < 0,6$ .

Aus diesem Grund scheiden Projektlösungen mit  $h/b < 0,6$  prinzipiell aus.

Bei Überschneidung zugehöriger Grenzisotachen verbleibt zeitweise auch bei Wechsellüftung ein Gebiet, in dem  $\bar{v} < \bar{v}_{\min}$  ist.

Bei eingetretener Fäulnis tritt ein Ausbreitungsvorgang ein. Die den Zustand davor charakterisierende Minimalgeschwindigkeit ist geringer als die obige. Demzufolge wird auch das optimale Verhältnis für hinreichende Belüftung kleiner sein.

$$\left[ \frac{h}{b} \right]_{\text{optim. Belüftung}} < \left[ \frac{h}{b} \right]_{\text{min. Fäulnis}}$$

Entsprechend den modelltechnischen Untersuchungen darf angenommen werden, daß dieses notwendige optimale Verhältnis schätzungsweise

$$\left[ \frac{h}{b} \right]_{\text{optim. Belüftung}} \approx 0,5$$

beträgt.

Die bei den Betriebsweisen I und II durchzusetzenden Volumenströme sind unterschiedlich.

Bei  $h/b = 0,833$ , das für die ausgeführten Sektionslager mit einer Sektionsbreite von 6 m zutrifft, ist der Unterschied sehr groß (Bild 3).

Das würde die Installation eines zweistufigen Axiallüfters oder eines zweiten, normalen erforderlich machen.

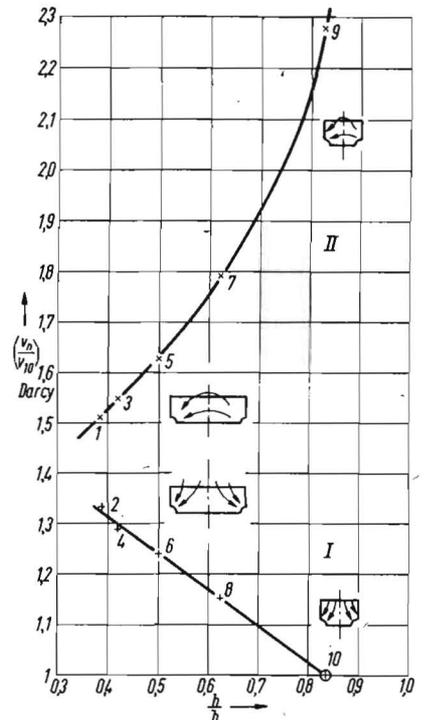


Bild 3. Volumenstromverhältnisse in Abhängigkeit vom Parameter  $h/b$ ; I beidseitiger Saug-Betrieb, II Saug-Druck-Betrieb n Versuchsnummer (1...10)

Für eine Sektionsbreite von 12 m ergibt sich  $h/b = 0,5$ ; d. h. der optimale Wert.

Für die Lösung der dringenden praktischen Probleme reichten die vorgenommenen Näherungen in jedem Fall aus. Den Abschluß der Arbeiten konnten sie aber nicht bilden. Bekanntlich erschwert die Nichtlinearität eines Strömungsfeldes dessen Berechnung und Aufmessung so erheblich, daß geschlossene Lösungen nur bei sehr einfachen Berandungen und Randbedingungen möglich sind.

Bei komplizierten Randverläufen von Massenstromfeldern lassen sich das Superpositions-gesetz und ausschließlich passive elektrische Modelle nur in der Geschwindigkeits- oder Stromdichteebene anwenden, weil durch Transformation die nichtlineare Ausgangsdifferentialgleichung linear wird.

In dieser Richtung werden die Untersuchungen fortgesetzt.

#### Literatur

- /1/ Reichardt, H./W. Tollmien: Die Verteilung der Durchflußmenge in einem ebenen Verzweigungssystem. Mitteilung aus dem Max-Planck-Institut für Strömungsforschung. Nr. 7, Göttingen 1952

A 9552

#### Fachtagung „Metallspritztechnik 1974“

Der Fachunterausschuß Metall- und Keramikspritzen im Fachausschuß Schweißtechnik des Fachverbandes Maschinenbau der Kammer der Technik veranstaltet am 31. Oktober 1974 in Leipzig die Fachtagung „Metallspritztechnik 1974“.

Folgende Themen sind vorgesehen:

- Effektive Anwendung des Metall-, Keramik- und Plasmaspritzens zum Verschleißschutz
- Einrichtungen zum Aufbau von Metallspritzanlagen
- Technik des Metall-, Keramik- und Plasmaspritzens
- Ausbildung und Arbeitsschutz
- Erläuterung vorhandener Unterlagen
- Fragen der Bedarfsermittlung

Weitere Auskünfte erteilt:

Kammer der Technik, FV Maschinenbau  
108 Berlin, Clara-Zetkin-Str. 115/117

AK 9562