

Tafel 1. Höchstmenge Wasserdampf und Wärmeinhalt der Luft bei verschiedenen Temperaturen

°C	g Wasserdampf	kcal	kcal
	kg trockene Luft	kg trockene Luft	m ³ trockene Luft
25	20,0	18,0	23,3
20	14,8	13,8	17,8
15	10,7	10,0	12,9
10	7,7	7,0	9,1
5	5,5	4,5	5,8
0	3,8	2,2	2,8
-5	2,5	0,2	0,3

Kühlt sich gesättigte Luft ab, so kann sie nur noch eine geringe Menge von Wasserdampf halten, der Überschuß wird bei Temperaturen über dem Gefrierpunkt flüssig in Form von Wassertröpfchen als Nebel ausgeschieden.

Erwärmt man gesättigte Luft, so kann sie eine größere Menge Wasserdampf aufnehmen. Diese Tatsache ist auch die Grundlage dafür, daß die Abtrocknung der Kartoffeln mit kälterer Außenluft im Vergleich zur Stapeltemperatur die günstigste und erfolgreichste Belüftungsform ist.

3. Berechnen der Lüftungsdauer

Der Wärmeinhalt der Kartoffeln beträgt 0,81 kcal/kg·grd. Betrachtet man eine Sektion von 600 t Kartoffeln, so

beträgt der Wärmeinhalt bei einer Stapeltemperatur von 13 °C 6318000 kcal. Will man die Stapeltemperatur nur um 1 grd senken, so müssen 486000 kcal abgeführt werden.

Bei einer Luftzufuhr, die in den meisten Anlagen 40 m³/t·h beträgt, läßt sich theoretisch leicht die Lüftungsdauer berechnen, die notwendig ist, um die Temperatur des Stapels um 1 grd zu senken.

Vergleicht man die berechnete Lüftungszeit mit der in der Praxis beobachteten Lüftungsdauer, die allgemein zwischen 8 und 15 Stunden liegt, so kann gesagt werden, daß eine gute Übereinstimmung besteht.

4. Schlußfolgerungen

Wie aus dem Temperaturverlauf, besonders der Monate Januar und Februar, zu entnehmen war, traten während dieser Zeit niedrige Temperaturen, die für die Lüftung von Kartoffeln notwendig sind, selten auf. Deshalb wurden im letzten Winter an den Lüftungswart hohe Anforderungen gestellt, die noch möglichen optimalen Klimaverhältnisse maximal zu nutzen.

Da nun warme Winter immer wieder einmal auftreten können, können in Zukunft nur über den Einsatz von Regelschranken die Klimaverhältnisse der Atmosphäre optimal genutzt werden.

A 9548

Untersuchungsergebnisse zur Wärme- und Stoffabgabe in Kartoffelschüttungen und Folgerungen für die Lüftung in Lageranlagen

Dr.-Ing. K. Bathke, Ingenieurbüro für Energetik in der Landwirtschaft, Rostock

Für eine verlustarme Lagerung pflanzlicher Produkte ist es notwendig, Klima und zugeführte Luftmenge zu optimieren. Voraussetzungen dafür sind gesicherte Kenntnisse über grundlegende Vorgänge des Wärme- und Stoffaustausches zwischen dem Lagergut und der umgebenden Luft. Zu diesem Zweck wurden am Ingenieurbüro für Energetik in der Landwirtschaft (IfEL) in Sievershagen seit 1969 experimentelle und theoretische Untersuchungen an zwangsbelüfteten Kartoffelschüttungen durchgeführt /1/ /2/. Insbesondere sollten Berechnungsgrundlagen geschaffen

werden, mit deren Hilfe die Einflüsse von Luftzustand und -menge auf die Lagerverluste in einer durchströmten Schüttung quantitativ eingeschätzt werden können. Dabei sind vereinfachende Annahmen über das Lagergut und über die Art der Belüftung unumgänglich. So wurden von jeher bestimmte biologische Einflüsse auf die Lagerverluste (z. B. durch Fäulnis) bewußt aus den Betrachtungen ausgeklammert.

Literaturhinweise zur vorliegenden Problematik werden in /1/ /2/ und besonders in /3/ gegeben.

Verwendete Formelzeichen

m	auf das Lagergut bezogene (spezifische) zeitlich abgegebene Stoffmenge in g/t·h (Schwund)
q	spezifische zeitlich abgegebene Wärmemenge in kcal/t·h
*	Übergangskoeffizient für Wasserdampf in kg/m ² ·h
a	auf das Schüttvolumen bezogene freie Oberfläche des Schüttguts in m ⁻¹
s	Schüttdichte in t/m ³
h	Schütthöhe in m
V̇	spezifischer Luftdurchsatz in m ³ /t·h
t	Lufttemperatur in °C
φ	relative Luftfeuchte in Prozent
i	Luftenthalpie in kcal/kg
x, x'	absolute Feuchte, Sättigungsfuchte in g/kg
z	Ortskoordinate

Indizes

E, A	Eintritt, Austritt der Schüttung
W	Wasser
Tr	Trockensubstanz
CO ₂	Kohlendioxid
C	Kohlenstoff
ges.	insgesamt

1. Beziehungen der Wärme- und Stoffabgabe in einer belüfteten Schüttung

Während der Lagerung gibt das Gut Atmungswärme und Substanz (H₂O und CO₂) an die umgebende Luft ab. Der dadurch verursachte Schwund setzt sich zusammen aus:

— Atmungsverlusten durch Stärke- bzw. Zuckerabbau (Trockensubstanzverluste m_{Tr})

— Verdunstungsverlusten, die den Hauptanteil am Schwund ausmachen (m_W).

Wird das bei der Atmung frei werdende Wasser zu den Verdunstungsverlusten (m_W) gerechnet und berücksichtigt, daß die Kartoffel Sauerstoff aufnimmt, so liefert von den Atmungsverlusten nur der reine Kohlenstoff einen Beitrag zum Gesamtschwund (m_{ges}):

$$\dot{m}_{ges} = \dot{m}_C + \dot{m}_W \quad (1)$$

1.1. Atmungswärme und Trockensubstanzverluste

Wird vereinfachend angenommen, daß Atmungswärme und CO₂ vollständig an die Luft abgegeben werden, so erhält man

Bild 1
Schwund \dot{m}_w und Zustandsänderung der Luft in einer kontinuierlich durchströmten Schüttung bei $\dot{q} = 20 \text{ kcal/t} \cdot \text{h}$ (Wundheilung), $h = 5 \text{ m}$

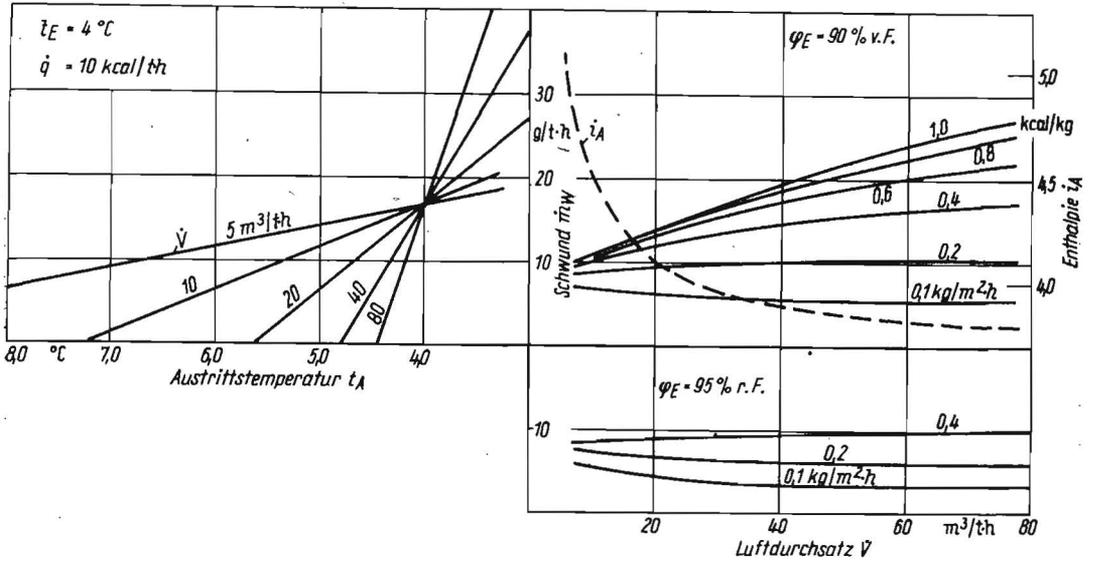
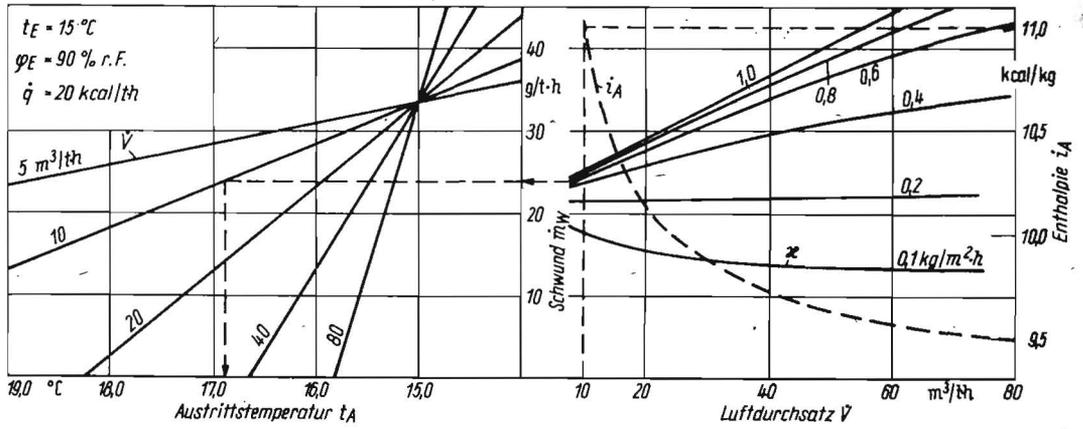


Bild 2
Schwund \dot{m}_w und Zustandsänderung der Luft in einer kontinuierlich durchströmten Schüttung bei $\dot{q} = 10 \text{ kcal/t} \cdot \text{h}$ (Hauptlagerperiode), $h = 5 \text{ m}$

bei einer Reaktionswärme von 750 kcal je Mol abgebauter Glucose (Trockensubstanz Tr):

$$\dot{m}_{Tr} = 2,5 \cdot \dot{m}_C = 0,24 \dot{q} = 0,68 \cdot \dot{m}_{CO_2} \quad (2)$$

mit den oben angegebenen Maßeinheiten für die vier Größen. Atmungsverluste und -wärme lassen sich somit sehr einfach aus der in einer Probeschüttung ermittelten CO_2 -Abgabe abschätzen. Sie sind hauptsächlich nur von der Temperatur abhängig und physiologisch bedingt.

1.2. Verdunstungsverluste und Zustandsänderung der Luft

Eine einfache Abschätzung der Verdunstungsverluste ist nicht möglich, da sie in komplizierter Weise abhängig sind von Luftzustand, -menge, Art der Belüftung, Lagerung und von Eigenschaften des Lagerguts selbst. Grundsätzlich lassen sich die Zusammenhänge jedoch ähnlich wie bei Trocknungsvorgängen mit Hilfe der Bilanz- und Übertragungsgleichungen für Wärme und Wasserdampf in einer durchströmten Schüttung [4] darstellen. Unter vereinfachenden Annahmen sind die Ergebnisse auch auf praktische Verhältnisse übertragbar.

Ohne an dieser Stelle auf die mathematischen Beziehungen einzugehen, sei auf eine besondere Problematik hingewiesen: Die Höhe des Schwunds \dot{m}_w hängt wesentlich von dem Übertragungskoeffizienten α für Wasserdampf ab, der für eine differentiell dünne Schicht einer Schüttung wie die Verdunstungszahl in der Lufttechnik definiert werden kann:

$$\dot{m}_w(z) = \alpha \cdot \frac{a}{s} (x' - x) \quad (3)$$

Wie ein Vergleich berechneter und experimentell ermittelter α -Werte ergab, ist es nicht möglich, diese Größe mit Hilfe der bekannten Ähnlichkeitskriterien für den Wärme- und Stoffaustausch zu bestimmen. In α ist einerseits das Verhältnis der wirklichen zur geometrischen Austauschoberfläche und andererseits der Widerstand der Kartoffelschale gegen den Wassertransport enthalten. Man kann α deshalb formal als eine Stoffdurchgangszahl auffassen, die wesentlich kleiner als die entsprechende Verdunstungszahl ist. Insbesondere verringert sie sich mit zunehmender Verkorzung der Schale während der Lagerung. α muß experimentell ermittelt werden. Das ist jedoch allein wegen der notwendig genauen Feuchtemessung (≤ 1 Prozent r. F.) sehr schwierig. Noch nicht vollständig geklärt ist deshalb auch die Abhängigkeit der Stoffdurchgangszahl von der Luftgeschwindigkeit.

Aus versuchstechnischen Erwägungen und im Interesse einer einfacheren und übersichtlichen Darstellung wurde vorläufig der Fall der kontinuierlich belüfteten Schüttung behandelt, d. h. Luftdurchsatz und -zustand sind zeitlich konstant.¹ Das ist praktisch nur bei vollklimatisierter Lagerung möglich. Die Ergebnisse sind jedoch sinngemäß auch auf die heute übliche diskontinuierliche Belüftung übertragbar, wenn die zugeführte Luftmenge auf die gesamte Lagerzeit (Belüftungsphase + Ruhepause) bezogen wird.

Als konstante Parameter wurden vorgegeben: $a = 70 \text{ m}^{-1}$; $s = 0,65 \text{ t/m}^3$; $h = 5 \text{ m}$. Die Ergebnisse sind bei gleichem Luftdurchsatz \dot{V} ohne große Fehler auch auf andere Schütthöhen übertragbar.

¹ Ansätze zur diskontinuierlichen Belüftung finden sich in [2]

Der gewählte Bereich für κ und \dot{q} ergab sich aus eigenen Untersuchungen und durch Vergleich mit Literaturangaben. Die Ergebnisse wurden in Diagrammform dargestellt und erlauben die Bestimmung des Schwunds durch Verdunstung \dot{m}_W und der Ausgangslufttemperatur und -feuchte für unterschiedliche Eingangsluftwerte, Stoffdurchgangszahlen κ , Atmungswärmen und beliebige Luftdurchsätze.

Zwei charakteristische Fälle zeigen die Bilder 1 und 2. Dabei entsprechen Atmungswärme und Temperatur im Bild 1 ungefähr der Wundheilperiode und im Bild 2 der Hauptlagerperiode. Zur Erläuterung ist für ein willkürlich vorgegebenes $\kappa = 0,4 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ im Bild 1 ein Anwendungsbeispiel eingezeichnet. Für $\dot{V} = 10 \text{ m}^3/\text{t} \cdot \text{h}$ erhält man:

$$\begin{aligned} \dot{m}_W &= 24 \text{ g/t} \cdot \text{h} \\ t_A &= 16,9 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

und aus $i_A = 11 \text{ kcal/kg}$ und dem i, x -Diagramm

$$\varphi_A = 96 \text{ Prozent}$$

Bei vorgegebenem $\dot{V} = 5 \text{ m}^3/\text{t} \cdot \text{h}$ wäre unter gleichen Bedingungen

$$\dot{m}_W = 22,5 \text{ g/t} \cdot \text{h} \text{ und } t_A = 19,5 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Das bedeutet, daß eine weitere Herabsetzung des Luftdurchsatzes in diesem Fall den Schwund nur wenig senkt, weil damit andererseits die Temperatur in der Schüttung erhöht wird. Der optimale Luftdurchsatz liegt somit bei den hier vorgegebenen Parametern etwa bei $10 \text{ m}^3/\text{t} \cdot \text{h}$.

Die im Bild 2 eingetragene zweite Kurvenschar für $\varphi_E = 95 \text{ Prozent r. F.}$ soll den Einfluß der Eingangfeuchte auf Schwund und Luftzustand deutlich machen. An den Verläufen der Kurve für i_A und den Geraden zur Bestimmung von t_A ändert sich nichts.

2. Experimentelle Ermittlung der wärmetechnischen Kennzahlen für Kartoffeln

Im vorhergehenden Abschnitt wurde nachgewiesen, daß in einer kontinuierlich belüfteten Schüttung der Schwund, die Temperatur- und die Feuchteänderung wesentlich durch κ und \dot{q} bestimmt werden. Zur experimentellen Ermittlung dieser Größen werden gegenwärtig regelmäßige Wägungen und CO_2 -Messungen bei 14-kg-Proben durchgeführt. Zu dem Zweck wurde eine spezielle Klimaanlage für 20 Behälter entwickelt, die sich durch hohe Temperaturkonstanz (Änderung $< 1/10$ grad. über lange Zeiträume) auszeichnet und auch Untersuchungen an anderen Fruchtarten gestattet.

Bisherige Messungen und Vergleiche mit geeigneten Werten aus der Literatur /5/ gestatten nur eine ungefähre Angabe

Tafel 1. Richtwerte für wärmetechnische Kennzahlen bei Kartoffeln

Lagerperiode	t °C	κ kg/m ² · h	\dot{q} kcal/t · h	\dot{m}_{Tr} g/t · h	\dot{m}_{CO_2} g/t · h	\dot{m}_C g/t · h
September (Wundheilung, Abtrocknung)	15	$\geq 1,0$	20 ... 30	5 ... 7	7 ... 10	2 ... 3
Oktober	4	0,3 ... 0,4	15 ... 18	4	6	2
Nov.—April	4	0,1 ... 0,2	10 ... 15	2,5 ... 4	3,5 ... 5	1 ... 2

Tafel 2. Richtwerte für den Schwund durch Verdunsten (\dot{m}_W) und die Temperaturänderung in einer Schüttung

\dot{V} m ³ /t · h	t_E °C	φ_E % r. F.	\dot{m}_W in g/t · h			t_A^1 °C
			10 kcal/t · h	20 kcal/t · h	30 kcal/t · h	
7	15	80	16,5 ± 1,5	24,0 ± 2,5	34,0 ± 4,0	15 ... 18
			12,0 ± 1,5	21,5 ± 2,5	30,5 ± 4,0	16 ... 19
7	4	80	10,5 ± 2,0	17,5 ± 2,5	24,5 ± 4,5	5 ... 10
			8,5 ± 1,5	15,5 ± 3,0	22,5 ± 4,5	
			7,5 ± 1,5	14,0 ± 3,0	21,5 ± 4,5	6 ... 11

¹ Bei Abschätzung von t_A wurde berücksichtigt, daß hohe Atmungswärmen in der Regel mit hohen κ einhergehen.

für größere Zeiträume (Tafel 1). Besonders problematisch ist die Ermittlung von κ , kleine Meßfehler der relativen Feuchte bewirken bei den notwendig kleinen Probeschüttungen große Streuungen von κ (etwa ± 60 Prozent bei $\Delta\varphi = \pm 3$ Prozent r. F.).

3. Schlußfolgerungen

Aus den Bildern 1 und 2 und den experimentellen Untersuchungen können unmittelbare Schlußfolgerungen für eine optimale Lagerung gezogen werden.

Erste Ergebnisse deuten darauf hin, daß κ insbesondere während der Hauptlagerperiode nur wenig von der Luftgeschwindigkeit abhängt. Das würde bedeuten, daß sich der Schwund während der Hauptlagerperiode (Bild 2) im Gegensatz zur Wundheilung (großes κ , Bild 1) nur schwach mit dem Luftdurchsatz ändert. Entscheidend für eine verlustarme Lagerung ist dann die Einhaltung einer hohen Eingangfeuchte bei niederen Lagertemperaturen (Tafel 2). Der Luftdurchsatz kann bei hohen Eintrittsfeuchten (≥ 95 Prozent) groß sein, ohne dabei eine merkliche Erhöhung des Schwunds zu bewirken (s. Bild 2).

Eine zu geringe Belüftung führt bei einer entsprechend hohen Atmungswärme zu einer starken Erwärmung im Lager, die dann ihrerseits wieder eine Schwunderhöhung bewirken kann. Die zur Einhaltung eines bestimmten Temperaturniveaus notwendige Luftmenge erhöht sich mit der Feuchte.

Bei kleinen Luftmengen ($< 5 \cdot 10 \text{ m}^3/\text{t} \cdot \text{h}$) nähert sich der Schwund einem Grenzwert, der in einem weiten Bereich der Stoffdurchgangszahlen κ nur wenig von κ selbst abhängt und eine Funktion der Lufttrittstemperatur, der -feuchte und der Atmungswärme ist.

Die Ergebnisse sind deshalb auch auf anderes Lagergut übertragbar, ohne daß die genauen Größen κ und a bekannt sind.

Für $\kappa = 0,1 \dots 1,0 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ ergaben sich die in Tafel 2 genannten Verluste \dot{m}_W , wobei die angegebenen mittleren Werte etwa für $\kappa = 0,2 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ gelten.

Aus den in den Tafeln 1 und 2 angegebenen Werten für \dot{m}_C und \dot{m}_W ergibt sich entsprechend der Gleichung (1) ein kleinster Gesamtschwund (bei $\dot{q} = 10 \text{ kcal/t} \cdot \text{h}$) von etwa $\dot{m}_{\text{ges}} = 7 \cdot 8 \text{ g/t} \cdot \text{h}$. Es ist bemerkenswert, daß dieser Wert den bei praktischen Untersuchungen in ALV-Anlagen /6/ ermittelten günstigsten Werten der Stoffabgabe sehr nahekommt.

Aus den Tafeln 1 und 2 ist abzulesen, welchen verlustmindernden Einfluß eine möglichst schnelle Abkühlung auf optimale Lagertemperaturen hat. Es sollten folgende Werte zugrunde gelegt werden:

$$\begin{aligned} \text{bei } \varphi_E = 90 \text{ Prozent r. F. } t_E = 15 \text{ }^\circ\text{C: } & \dot{m}_W = 25 \text{ g/t} \cdot \text{h} \\ & (\dot{q} = 20 \text{ kcal/t} \cdot \text{h}) \\ & \dot{m}_C = 3 \text{ g/t} \cdot \text{h} \\ \text{Gesamtschwund} & = 28 \text{ g/t} \cdot \text{h} \\ \text{bei } & t_E = 4 \text{ }^\circ\text{C: } \dot{m}_W = 7 \text{ g/t} \cdot \text{h} \\ & (\dot{q} = 10 \text{ kcal/t} \cdot \text{h}) \\ & \dot{m}_C = 1,5 \text{ g/t} \cdot \text{h} \\ \text{Gesamtschwund} & = 8,5 \text{ g/t} \cdot \text{h} \end{aligned}$$

Rechnet man diese Größen auf eine 550-t-Sektion eines Lagerhauses um, so würde das bei einer Verkürzung der Periode hoher Lagertemperaturen (Wundheilung) um eine Woche einer Senkung der Verluste um 2 t entsprechen.

Insgesamt kann eingeschätzt werden, daß aus den theoretischen und experimentellen Ergebnissen trotz der vereinfachenden Annahmen wichtige Schlußfolgerungen für die praktische Lagerung gezogen werden können. Unberücksichtigt bleibt bei dieser Betrachtungsweise die Stoffabgabe bei den instationären Abkühl- und Aufwärmvorgängen, die jedoch zeitlich kurz sind im Vergleich mit der Gesamtzeit.

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

ξ	örtlicher Gesamtdruck-Verlustbeiwert
$\bar{\xi}$	Gesamtdruck-Verlustbeiwert des Strömungssystems
p	Druck in $N \cdot m^{-2}$
ρ	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
α	Parameter
β	Parameter
ϵ	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