

rührt, daß die meisten landwirtschaftlichen Haufwerke unter Druck ein nichtlineares Kompressionsverhalten zeigen, wodurch die mathematischen Gleichungen äußerst kompliziert werden.

Eine Ermittlung der Druckverhältnisse ist deshalb zum gegenwärtigen Zeitpunkt nur über praktische Versuche möglich. Um aber auf diesem Weg zu Gesetzmäßigkeiten zu kommen, die möglichst umfassend sind und die nicht nur für spezielle Silos und Lagergüter gelten, muß man bei den Untersuchungen zuerst die einfachen Lagerungsfälle behandeln, um dann zu komplizierteren überzugehen. Deswegen wurde von einer einzelnen ebenen Wand und einem körnigen Haufwerk ausgegangen. Zur experimentellen Bestimmung der Drücke wurde eine besondere Druckmeßdose, die nach der Kompensationsmeßmethode arbeitet, entwickelt. Auf die meßtechnischen Probleme wurde etwas näher eingegangen.

Weiterhin wurden einige ausgewählte Ergebnisse der Wanddruck- und der Bodendruckmessungen erläutert. Die Wanddrücke steigen linear mit der Tiefe an und lassen sich durch eine Geradengleichung ausdrücken. Trägt man die entsprechenden Proportionalitätskonstanten über dem Neigungswinkel der Wand auf, so kommt man zu einem charakteristischen Diagramm, über das man unter Umständen Aussagen über das Fließverhalten des untersuchten Gutes machen kann. Die gemessenen Bodendrucke waren in Wandnähe infolge der durch die Wandreibung aufgenommenen Gutkräfte geringer als der hydrostatische Druck. Dieser Druckabfall konnte durch eine logarithmische Funktion wiedergegeben werden. Es wurde gezeigt, daß

man die diesbezüglichen Konstanten in Arbeitsblättern darstellen kann, mit deren Hilfe die Bodendrucke für verschiedene Einfüllhöhen, Wandreibbeiwerte und Wandneigungswinkel bestimmt werden können.

Schließlich wurden die Untersuchungsergebnisse für den untersuchten einfachen Lagerungsfall auf einen komplizierteren, nämlich auf einen mit körnigem Haufwerk gefüllten zylindrischen Silo, übertragen.

Die gezeigten Forschungsergebnisse sind nur eine Auswahl aus dem vorliegenden Versuchsmaterial, das demnächst in einem VDI-Forschungsheft [5] veröffentlicht wird, in dem auch die theoretischen Grundlagen ausführlich behandelt sind.

Schrifttum

- [1] *Wenzel, F.*: Untersuchungen über die Druckverhältnisse in Silozellen. Diss. TH Braunschweig 1963. Ref. in: *Grundl. Landtechn.* **15** (1965) S. 29.
- [2] DIN 1055, Blatt 6: Lastannahmen für Bauten, Druckverhältnisse in Silozellen. Entwurf: September 1962. Berlin: Beuth-Vertrieb 1962.
- [3] *Janssen, H. A.*: Versuche über Getreidedruck in Silozellen. *Z. VDI* **39** (1895) S. 1045/49.
- [4] *Kauderer, H.*: Nichtlineare Mechanik. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer-Verlag 1958.
- [5] *Stroppel, A.*: Spannungszustände in lagernden körnigen Haufwerken in der Nähe einer ebenen Wand. VDI-Forschungsheft 525 Düsseldorf: VDI-Verlag (Erscheint Anfang 1968).

DK 631.243.24:631.363

Versuche über die Luftkühlung gedämpfter Kartoffeln

Von **Rudolf Thaer**, Braunschweig-Völkenrode

Gedämpfte Kartoffeln sollen gekühlt einsiliert werden. In Versuchen, bei denen gedämpfte Kartoffeln mit Luft im Gegenstrom gekühlt wurden, ließ sich die Abhängigkeit des Kühleffektes von verschiedenen Einflußgrößen feststellen. Aus den Versuchen ging weiter hervor, daß bei der gewählten Anordnung die Kühlung der Kartoffeln im wesentlichen als Verdunstungskühlung anzusehen ist und daher ein früher beschriebenes Verfahren zur Berechnung der Verdunstungskühlung benutzt werden kann. Aus der Anwendung dieses Berechnungsverfahrens ergeben sich Hinweise für den Bau von Kühlanlagen für gedämpfte Kartoffeln.

Inhalt

1. Einleitung
2. Die Versuche
 - 2.1. Wahl des Kühlprinzips
 - 2.2. Aufbau der Versuchskühlanlage
 - 2.3. Versuchsdurchführung
 - 2.4. Versuchsergebnisse
 - 2.4.1. Außenversuche
 - 2.4.2. Laborversuche
3. Charakter der Kühlung, Folgerungen
 - 3.1. Anteil des Stoffüberganges an der Kühlung
 - 3.1.1. Wärmebilanzen
 - 3.1.2. Vergleich der Ablufttemperaturen nach Rechnung und Versuch
 - 3.2. Berechnung der fiktiven Übergangsflächen
 - 3.3. Folgerungen
4. Zusammenfassung
5. Schrifttum

Dipl.-Ing. Rudolf Thaer ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für Landmaschinenforschung (Direktor: Prof. Dr.-Ing. W. Baader) der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode. Die Arbeit entstand zum größeren Teil unter dem vorherigen Institutsdirektor Prof. Dr.-Ing. F. Wieneke, jetzt Universität Göttingen.

1. Einleitung

In der Bundesrepublik werden jährlich zu Futterzwecken 2 bis 5 Millionen Tonnen Kartoffeln gedämpft und anschließend einsiliert. Das Dämpfen erfolgt mittels fahrbarer Dämpfanlagen, die von Hof zu Hof wandern, oder aber an zentraler Stelle (Zuckerfabrik, Molkerei). In beiden Fällen gelangen die Kartoffeln normalerweise in noch heißem Zustand in den Silo. *Zimmer* [1] hat festgestellt, daß bei dem üblichen Silierverfahren ungefähr 20 von 100 Nährstoffeinheiten verlorengehen; diese Verluste lassen sich aber um etwa 8 Einheiten vermindern, wenn die Kartoffeln nicht heiß, sondern auf 30°C oder eine niedrigere Temperatur abgekühlt eingelagert werden. *Weise* [2] wies nach, daß dadurch auch die Silagequalität verbessert wird. In den nachfolgend beschriebenen Untersuchungen sollte geklärt werden, wie sich eine Kühlung gedämpfter Kartoffeln zweckmäßig durchführen läßt¹⁾.

2. Die Versuche

2.1. Wahl des Kühlprinzips

Als Kühlmedien kommen Wasser und Luft in Betracht. Aus verschiedenen Gründen, die früher dargelegt wurden [3; 4], ist die Wasserkühlung gedämpfter Kartoffeln als nicht aussichtsreich anzusehen. Deshalb beschränkte man sich bei den Versuchen auf die Luftkühlung und baute eine Versuchsanlage nach dem Gegenstromprinzip zum Einsatz in landwirtschaftlichen Betrieben. Gegenstrom ist leichter zu verwirklichen als Kreuzstrom und ist wirkungsvoller als Gleichstrom. Nachdem Vorversuche gezeigt hatten, daß unzerquetschte Kartoffeln in ihrem Innern sehr lange heiß bleiben, wurden die Hauptversuche

¹⁾ Die Versuche wurden von der Kommission „Futterkonservierung“ der Futter- und Grünlandabteilung der Deutschen Landwirtschafts-Gesellschaft angeregt. Dem Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, das das Forschungsvorhaben finanziell unterstützt hat, sei auch an dieser Stelle gedankt.

nur noch mit zerquetschten Kartoffeln durchgeführt. Durch die Zerkleinerung wird eine größere spezifische Oberfläche geschaffen, die den Wärme- und Stoffübergang begünstigt.

2.2. Aufbau der Versuchskühlanlage

Die für die Versuche gebaute Kühlanlage²⁾, Bild 1, bestand im wesentlichen aus einem glatten Förderband, einem darüber gesetzten Blechtunnel annähernd quadratischen Querschnitts und einem Gebläse. Die aus der Dämpfanlage kommenden heißen Kartoffeln fallen im zerquetschten Zustand kontinuierlich durch einen Einlauftrichter auf das Förderband. Der vom Gebläse erzeugte Luftstrom wird im Kanal im Gegenstrom über die Kartoffeln hinweggeleitet, am Kanalende scharf umgelenkt und schließlich nach oben abgeführt. Miterissene Kartoffelteilchen machen infolge ihrer Trägheit diese Richtungsänderung nicht mit, sondern prallen gegen die Umlenkfläche und fallen auf das Band zurück.

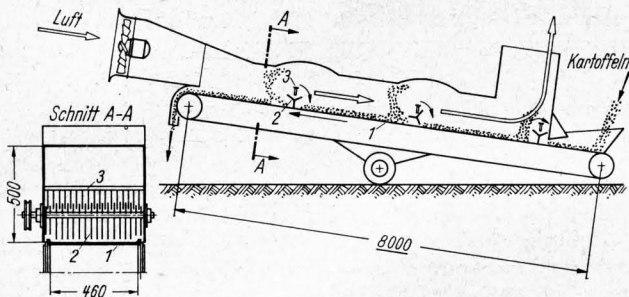


Bild 1. Versuchsanlage zur Kühlung gedämpfter Kartoffeln.

- 1 Gummiförderband
- 2 Wendestern
- 3 Reinigungskamm

In den Kanal sind drei Wendevorrichtungen eingebaut, die das Gut zur Erhöhung der Kühlwirkung in den Luftstrom werfen und es gleichzeitig wenden. Sie bestehen aus je einer Welle mit drei Zinkenreihen und einem Reinigungskamm darüber (Schnitt A-A). Bei den Außenversuchen wurde ein Axialgebläse verwendet, bei den Laborversuchen aus versuchstechnischen Gründen ein Radialgebläse verwendet.

2.3. Versuchsdurchführung

Die Kühlanlage wurde zunächst in Außenversuchen zusammen mit einer fahrbaren, kontinuierlich arbeitenden Dämpfanlage in zwölf landwirtschaftlichen Betrieben eingesetzt. Angaben über Versuchsbedingungen und Versuchsvarianten finden sich in Tafel 1. Lufttemperatur und -feuchte mußten als gegebene und wechselnde Bedingungen hingenommen werden. Zumeist herrschte bei den Versuchen sonniges Herbstwetter mit Nebelbildung morgens und abends.

²⁾ Die Kühlanlage wurde von H. Mannebeck entworfen. Die Versuche planten und leiteten H. Mannebeck und F. Röhrs [3].

Tafel 1. Versuchsbedingungen und -varianten bei den Außenversuchen.

Versuchsbedingungen	
Versuchsmaterial:	Über- und Untergrößen verschiedener Speisekartoffelsorten Stärkegehalt ungefähr 16%
Kartoffeltemperatur am Einlauf:	97—98°C
Kanallänge:	6,7 m
Versuchsvarianten	
Kartoffeldurchsatz:	0,2—0,7 kg/s
Luftvolumenstrom:	1,8—3,5 m³/s
Bandgeschwindigkeit:	6,5; 9,6; 17 und 33 cm/s
eingesetzte Wendeeinrichtungen:	0; Nr. 1 und Nr. 1 bis 3
	Drehzahlen niedrig hoch
Wendeeinrichtung Nr. 1 (am Kartoffeleinlauf)	115 U/min 165 U/min
Wendeeinrichtung Nr. 2 (in der Mitte)	152 U/min 296 U/min
Wendeeinrichtung Nr. 3 (am Kartoffelauslauf)	177 U/min 248 U/min

Durch anschließende Laborversuche sollte geklärt werden, wie sich der Luftzustand — insbesondere hohe Temperatur und Feuchte — auf den Kühleffekt auswirkt. Die Luft wurde mit Hilfe eines regelbaren Heizaggregates auf die jeweils gewünschte Temperatur und durch Zugabe von Dampf auf die gewünschte Feuchtigkeit gebracht, Bild 2. Hinter der Dampfzugabestelle strömte die Luft durch einen Diffusor mit zwei Turbulenzgittern und ein Meßrohr mit einem Gleichrichter in den Kühlkanal (Versuchsbedingungen und Varianten in Tafel 2). Der Luftstrom 3 m³/s wurde für Kartoffeldurchsätze $\geq 0,2$ kg/s, der Luftstrom 3,8 m³/s für Durchsätze $\leq 0,2$ kg/s benutzt. Bei niedrigen Kartoffeldurchsätzen war das Kühlband nur unvollständig mit Kartoffeln bedeckt, im Minimum zu etwa 50%.

Bei den Versuchen wurden die folgenden Größen gemessen:

1. Temperatur und Feuchte der Zuluft,
2. Temperatur und Feuchte der Abluft (nur bei den Laborversuchen),
3. Luftgeschwindigkeit,
4. Kartoffeldurchsatz am Kartoffelauslauf,
5. Eintritts- und Austrittstemperatur der Kartoffeln und
6. Wassergehalt der Kartoffeln vor ihrem Eintritt und nach ihrem Austritt.

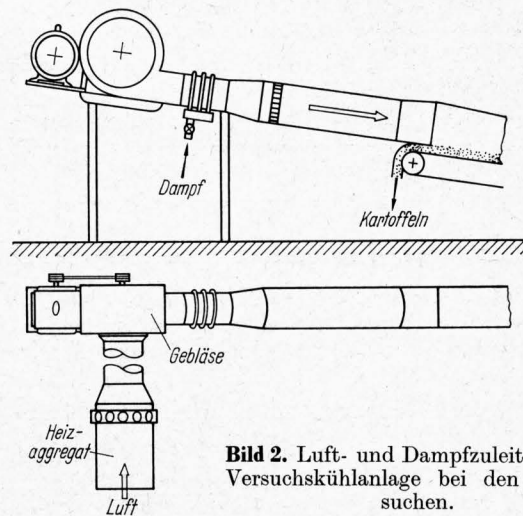


Bild 2. Luft- und Dampfzuleitung für die Versuchskühlanlage bei den Laborversuchen.

2.4. Versuchsergebnisse³⁾

2.4.1. Außenversuche

In den Außenversuchen sollte zunächst unter zusätzlicher bzw. ausschließlicher Benutzung offener Förderbänder festgestellt werden, wie weit sich gedämpfte Kartoffeln in freier

³⁾ Während der Versuche stand noch nicht fest, wie weit die Kartoffeln abgekühlt werden müssen. Deshalb sind Versuche mit sehr verschiedenen Endtemperaturen durchgeführt worden.

Tafel 2. Versuchsbedingungen und -varianten bei den Laborversuchen.

Versuchsbedingungen	
Versuchsmaterial (Kartoffeln):	
Lieferung G	Stärkegehalt 15,9%
Lieferung H	Stärkegehalt 13,2%
Lieferung I	Stärkegehalt 10,7%
Kartoffeltemperatur am Einlauf:	80—90°C
Kanallänge:	6,7 m
3 Wendeeinrichtungen:	hohe Drehzahlen (siehe Tafel 1)
Bandgeschwindigkeit:	6,5 cm/s
Versuchsvarianten	
Kartoffeldurchsatz:	0,1—0,8 kg/s
Luftvolumenstrom:	3 und 3,8 m³/s
Temperatur der eintretenden Kühlluft:	12, 18 und 25°C
relative Feuchte der eintretenden Kühlluft:	50, 70 und 90%

Konvektion abkühlen. **Tafel 3** zeigt, daß auf diesem Wege keine ausreichende Kühlung zu erreichen ist. Daher wurden die übrigen Versuche nur noch mit eingeschaltetem Gebläse, also mit erzwungener Konvektion durchgeführt. Die bei voller Gebläseleistung erreichten Kartoffelendtemperaturen sind auf **Bild 3** über dem Kartoffeldurchsatz dargestellt. Die Kartoffelendtemperatur steigt mit dem Durchsatz stark an. Zu einem kleinen Teil ist dieser Anstieg allerdings darauf zurückzuführen, daß mit steigendem Kartoffeldurchsatz der Luftstrom absank.

Bild 4 zeigt Ergebnisse von Versuchsreihen, in denen bei konstantem Kartoffeldurchsatz der Luftstrom variiert wurde. Zwischen den Versuchsreihen bestehen Unterschiede in der Drehzahl der Wendesterne und in der Bandgeschwindigkeit. Der Abfall der Kartoffelendtemperatur mit steigendem Luftstrom verläuft in den verschiedenen Versuchsreihen sehr ähnlich. Bei

langsam laufenden Wendesternen (Kurven d und e) lagen die Kartoffelendtemperaturen wesentlich höher als bei schnell laufenden. Zwar waren gleichzeitig die Lufttemperaturen höher, doch sind nach späteren Versuchen die großen Unterschiede im Kühleffekt nicht auf die Unterschiede der Lufttemperaturen, sondern auf die stärkere Bewegung und Auflockerung des Gutes bei höheren Wendesternendrehzahlen zurückzuführen. Ein kleiner Einfluß der Bandgeschwindigkeit tritt in Erscheinung: die niedrigste Geschwindigkeit (Kurve a) bringt die stärkste Kühlung.

Die Bedeutung der Wendeeinrichtungen geht noch deutlicher aus einer Versuchsreihe hervor, in der die Wendesterne teilweise oder ganz stillgelegt waren, **Tafel 4**. Aufgrund dieser Feststellungen sind die übrigen Außen- und die Laborversuche nur mit schnell laufenden Wendesternen gefahren worden.

Tafel 3. Kühlung in freier Konvektion.
Kartoffeldurchsatz etwa 0,5 kg/s

Lufttemperatur °C	Fördereinrichtungen	Bandgeschwindigkeiten m/s	Temperatur der Kartoffeln °C
24	Kühlband	0,33	80 (am Bandende)
24	Kühlband plus 5 m langes Förderband	0,33 1	70 (im Silo)
5—8	Kühlband plus 2 je 5 m lange Förderbänder	0,10 1	60 (im Silo)
3—6	2 je 5 m lange Förderbänder	1	75 (im Silo)

Tafel 4. Einfluß der Wendeeinrichtungen auf die Kartoffelendtemperatur.

Zulufttemperatur 6°C
Luftdurchsatz 3,8 kg/s
Wendesternendrehzahlen, hoch (s. Tafel 1)
Bandgeschwindigkeit 6,5 cm/s

Kartoffeldurchsatz kg/s	Zahl der laufenden Wendesterne		
	0	1 (am Kartoffeleinlauf)	3
	Kartoffelendtemperatur		
	°C	°C	°C
0,33	50	39	32
0,56	56	48	39

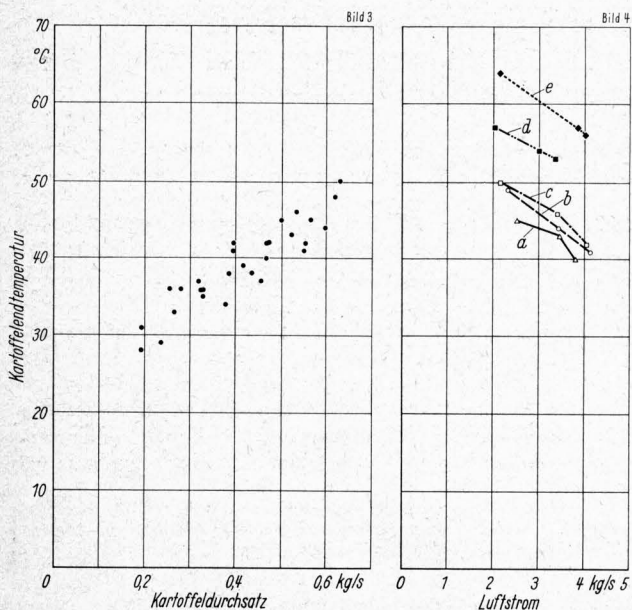


Bild 3. Kartoffelendtemperatur in Abhängigkeit vom Kartoffeldurchsatz (Außenversuche).

Lufttemperatur 11 bis 21°C
relative Luftfeuchte 40 bis 70%
Bandgeschwindigkeit 6,5 und 9,6 cm/s
Luftstrom 3,3 bis 4,2 kg/s
(je nach Kartoffeldurchsatz)

Bild 4. Kartoffelendtemperatur in Abhängigkeit vom Luftstrom bei verschiedenen Bandgeschwindigkeiten und Drehzahlen der Wendesterne (Außenversuche).

Kurve	a	b	c	d	e
Kartoffeldurchsatz kg/s	0,57	0,57	0,58	0,50	0,48
Bandgeschwindigkeit cm/s	6,5	9,6	17	17	33
Drehzahlen der Wendesterne (s. Tafel 1)	hoch	hoch	hoch	niedrig	niedrig
Lufttemperatur °C	9	9	10	20	15
relative Luftfeuchte %	65	65	60	65	80

2.4.2. Laborversuche

Bei der Auswertung der Laborversuche stellte sich heraus, daß die Versuche mit den stärkearmen Kartoffeln der Lieferung I im Bereich größerer Durchsätze einen geringeren Kühleffekt und allgemein auch eine größere Streuung der Versuchswerte aufweisen als die Versuche mit den stärkereicheren Kartoffeln. Die Ursachen für das unterschiedliche Kühlverhalten ist darin zu suchen, daß stärkearme Kartoffeln ein breiiges, stärkereiche

Verwendete Formelzeichen

a	m	Seitenlänge des quadratischen Kühlkanalquerschnitts
c_K	kcal/kg grad	spezifische Wärme der austretenden Kartoffeln
c_D	kcal/kg grad	spezifische Wärme des Luft-Dampfgemisches bei konstantem Druck
c_W	kcal/kg grad	spezifische Wärme des Wassers
F_{11}	m ²	fiktive Übergangsfläche
i	kcal/kg	spezifische Enthalpie (bei Luft-Dampfgemisch auf die Masse der Trockenluft bezogen)
l	$= \dot{m}_L / m_K$	Luftzahl
\dot{m}	kg/s	Massenstrom (Durchsatz)
$\Delta \dot{Q}_K$	kcal/s	Differenz zwischen dem mit \dot{m}_{K1} eintretenden und austretenden Wärmestrom
$\Delta \dot{Q}_L$	kcal/s	Differenz zwischen dem mit dem Luft-Dampfgemisch eintretenden und austretenden Wärmestrom
$\Delta \dot{Q}_t$	kcal/s	Vergrößerung des Wärmestromes entsprechend der Temperaturerhöhung der Luft
\dot{Q}_W	kcal/s	von \dot{m}_W in die Kühlanlage eingebrachter Wärmestrom
r	kcal/kg	spezifische Verdampfungsenthalpie des Wassers
r_0	kcal/kg	spezifische Verdampfungsenthalpie des Wassers bei 0°C
t	°C	Temperatur
x	kg/kg	Feuchtegrad der Luft
Z	—	Trockensubstanzgehalt eines Gutes
α	kcal/m ² s grad	Wärmeübergangszahl
κ	—	Kühlziffer
ξ	—	Wärmeverhältnis
σ	kg/m ² s	Verdunstungskoeffizient
φ_L	%	relative Luftfeuchte

Indizes

ε	Kartoffeloberfläche (Phasengrenze)
K	Kartoffeln
L	Luft (+ Dampf)
W	Wasser
I	Luft Eintrittsseite
II	Luft Austrittsseite

dagegen ein flockiges Dämpfgut ergeben, **Bild 5**. Das breiige Gut besitzt eine geringere spezifische Oberfläche und macht eine Wärmeleitung über eine größere Teilchendicke notwendig. Zwischen den beiden anderen Lieferungen G und H war hinsichtlich der Kühlung kein Unterschied zu beobachten, weshalb in den folgenden Diagrammen die Ergebnisse dieser beiden Lieferungen zusammengefaßt sind.

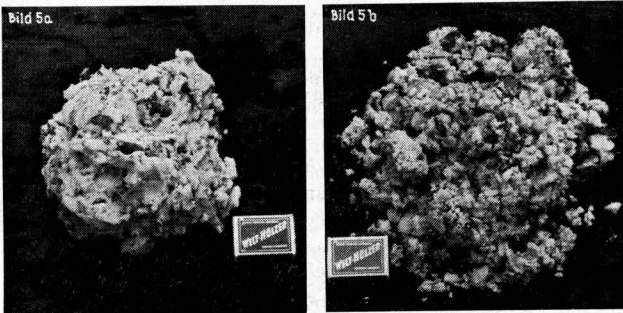


Bild 5. Stärkearmes (links) und stärkereiches (rechts) Dämpfgut.

In **Bild 6** ist für die Lieferung I und in **Bild 7** für die Lieferungen G und H die Kartoffelendtemperatur in Abhängigkeit vom Kartoffeldurchsatz dargestellt, wobei die Luftzustände durch Symbole charakterisiert sind. Diese Bilder stimmen mit Bild 3 befriedigend überein. Betrachtet man den Bereich kleiner und mittlerer Kartoffeldurchsätze, also niedriger Kartoffelendtemperaturen, so läßt sich anhand der Symbole ein gewisser Einfluß des Luftzustandes erkennen: niedrige Lufttemperatur und Luftfeuchte begünstigen die Kühlung.

Zur Übersicht über alle Versuche mit den stärkereichen Kartoffeln (G und H) wurden deren Endtemperaturen über der Luftzahl l , d. h. über dem auf den Kartoffeldurchsatz bezogenen Luftstrom, aufgetragen, **Bild 8**. Hier zeigt die Luft mit den niedrigsten Feuchtgraden ($x_{LI} = 18^\circ\text{C}$, $\varphi_{LI} = 50\%$ und 70%) die stärkste und die mit dem höchsten Feuchtgrad x_I ($t_{LI} = 25^\circ\text{C}$, $\varphi_{LI} = 90\%$) die schwächste Kühlwirkung, während Luft mit dazwischenliegenden Feuchtgraden auch in ihrer Kühlwirkung dazwischen liegt. Im Bereich hoher Luftzahlen und damit niedriger Kartoffelendtemperaturen t_{KI} entspricht mit einer Ausnahme einem niedrigeren Feuchtgrad x_I eine niedrigere Endtemperatur t_{KI} . — Es fällt auf, daß die Meßpunkte bei Vergrößerung von l sich nicht der Kühlgrenztemperatur [5] oder doch wenigstens der Zulufttemperatur, sondern höheren Temperaturen asymptotisch zu nähern scheinen; auf diesen Punkt wird später eingegangen.

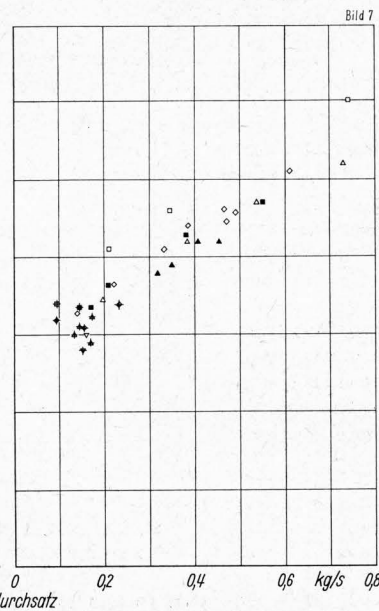
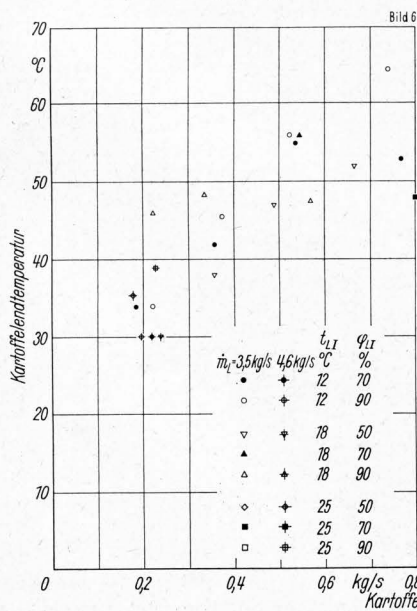


Bild 6 und 7. Kartoffelendtemperatur in Abhängigkeit vom Kartoffeldurchsatz (Laborversuche).

Bild 6. Stärkearme Kartoffeln (Lieferung I)

Bild 7. Kartoffeln mit mittlerem Stärkegehalt (Lieferung G und H)

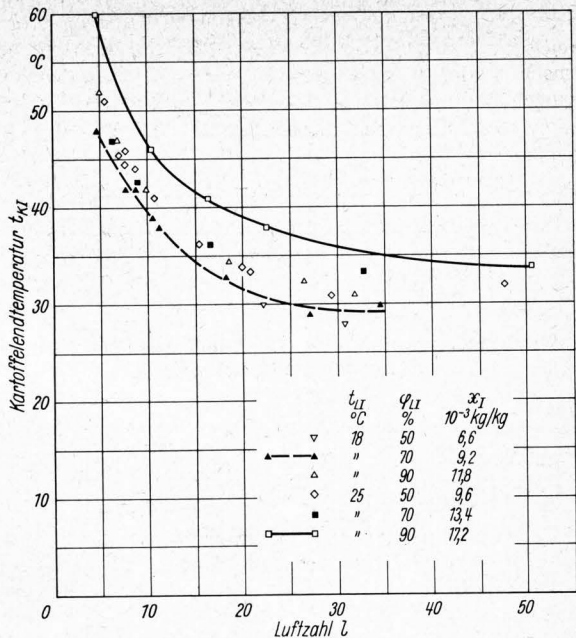


Bild 8. Kartoffelendtemperatur in Abhängigkeit von der Luftzahl (Laborversuche mit Kartoffeln mittleren Stärkegehaltes).

Aus Messungen der Luftzustände längs des Kühlkanals ging hervor, daß bei weitem der stärkste Wärmeaustausch unmittelbar vor dem Luftaustritt vor sich ging, wo die soeben eingetretenen heißen Kartoffeln von der ersten Wendeeinrichtung aufgelockert wurden.

3. Charakter der Kühlung. Folgerungen

Nachdem die Versuche erfolgversprechende Ergebnisse gebracht haben, soll nun der dem verwendeten Verfahren zugrunde liegende Kühlvorgang näher betrachtet werden.

3.1. Anteil des Stoffüberganges an der Kühlung

3.1.1. Wärmebilanzen

Als erstes sei geklärt, ob der Stoffübergang, also das Verdunsten des den Kartoffeln anhaftenden oder in ihnen befindlichen Wassers, maßgeblich an der Kühlung beteiligt ist. Aufschluß darüber ist durch Aufschlüsselung der Wärmebilanzen der Versuche zu erwarten. In diesen Wärmebilanzen sowie in den späteren Rechnungen ist vorausgesetzt, daß die Kühlung in der Versuchsanlage adiabatisch verlaufen ist. Überschläglichs gab der Kühlkanal 100 bis 200 kcal/h durch Konvektion und höchstens 100 kcal/h durch Strahlung nach außen ab. Diese Werte sind gegenüber den insgesamt umgesetzten Wärmemengen — zwischen 40 000 und 100 000 kcal/h — vernachlässigbar klein.

Geht in einer Kühlanlage je Zeiteinheit die Wassermenge \dot{m}_W vom Kühlgut in den Luftstrom über, so lautet die Stoffbilanz (vgl. **Bild 9**):

$$\dot{m}_W = \dot{m}_{KII} - \dot{m}_{KI} = (x_{II} - x_I) \dot{m}_L \quad (1).$$

Die Gegenüberstellung der ein- und aus-tretenden Wärmeströme liefert unter Benutzung von Gl. (1)

$$\Delta \dot{Q}_K = \Delta \dot{Q}_L - \dot{Q}_W \quad (2),$$

wenn

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{Q}_K &= c_K (t_{KII} - t_{KI}) \dot{m}_{KI} \\ \Delta \dot{Q}_L &= (i_{LII} - i_{LI}) \dot{m}_L \\ \dot{Q}_W &= c_W t_{KII} (x_{II} - x_I) \dot{m}_L \end{aligned} \right\} \quad (3).$$

Die durch Temperaturerhöhung der Luft erklärbare Änderung des Wärmestromes der Luft ist

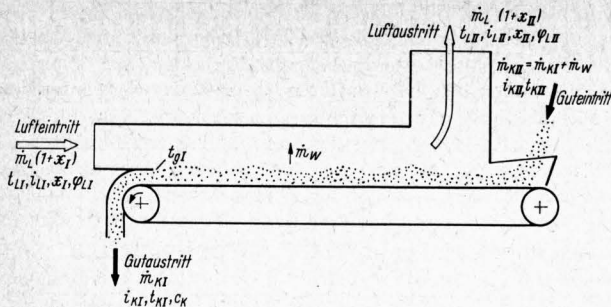


Bild 9. Formelzeichen für die Ein- und Austrittsgrößen der Kartoffeln und der Luft.

$$\Delta Q_t = c_p (t_{LII} - t_{LI}) \dot{m}_L (1 + x_L) \quad (4)$$

Für die Aufstellung der Wärmebilanzen wurden folgende Werte der spezifischen Wärmen benutzt:

$$c_W = 1,0 \text{ kcal/kg grd,}$$

$$c_p = 0,24 \text{ kcal/kg grd,}$$

$$c_K = 0,85 \text{ kcal/kg grd.}$$

$c_K = 0,85 \text{ kcal/kg grd}$ findet sich als Pauschalwert in [6; 7]⁴⁾.

In den Laborversuchen wurden aufgrund der Messungen der Kartoffeltemperatur und des Luftzustandes am Ein- und Austritt die Quotienten $(\Delta \dot{Q}_L - \dot{Q}_W) / \Delta \dot{Q}_K$, die nach Gl. (2) gleich 1 sein müßten, und die Quotienten $\Delta \dot{Q}_t / \Delta \dot{Q}_K$ gebildet. Die Mittelwerte aus allen Laborversuchen mit Luftzahlen unter 25 sind in **Tafel 5 und 6** zusammengestellt. Bei größeren Luftzahlen waren die Streuungen sehr groß. Sieht man vom Luft-

Tafel 5. Wärmebilanzen nach Gl. (2), ausgedrückt durch den Quotienten $(\Delta \dot{Q}_L - \dot{Q}_W) / \Delta \dot{Q}_K$.

Alle Laborversuche mit $l < 25$

ϕ_{LI} \ / t_{LI}	12°C	18°C	25°C
50%	—	0,97	1,07
70%	1,04	0,99	1,06
90%	1,10	0,97	1,22

Gesamtmittel 1,05. Standardabweichung der Einzelversuche von den Tafelwerten durchschnittlich 0,11.

Tafel 6. Anteil der Lufterwärmung am gesamten Wärmeübergang ausgedrückt durch den Quotienten $\Delta \dot{Q}_t / \Delta \dot{Q}_K$.

Alle Laborversuche mit $l < 25$

ϕ_{LI} \ / t_{LI}	12°C	18°C	25°C
50%	—	0,19	0,18
70%	0,29	0,24	0,22
90%	0,38	0,28	0,34

Gesamtmittel 0,26. Standardabweichung der Einzelversuche von den Tafelwerten durchschnittlich 0,06.

zustand 25°/90% ab, so ist nach Tafel 5 die Wärmebilanz trotz der verhältnismäßig rohen Versuche in den Durchschnittswerten gut erfüllt. Nach Tafel 6 kann durch die Temperaturerhöhung der Luft nur ein Viertel der Wärmeübertragung erklärt werden. Der Wärmeübergang wurde also hauptsächlich durch Verdunstung bewirkt.

⁴⁾ Die spezifische Wärme von Kartoffeln hängt von ihrem Trockensubstanzgehalt Z ab. Riedel [8] gibt

$$c_K = 1,00 - 0,56 Z \text{ kcal/kg grd für rohe Kartoffeln und}$$

$$c_K = 1,00 - 0,62 Z \text{ kcal/kg grd für gekochte Kartoffeln}$$

an. Darin ist Z in Gewichtsbruchteilen einzusetzen. $c_K = 0,85 \text{ kcal/kg grd}$ gilt demnach für gekochte Kartoffeln mit einem Trockensubstanzgehalt von $Z = 0,24$. Nach [9] erhält man den Trockensubstanzgehalt durch Addition von 5,75% zum Stärkegehalt. Also ist für die Kartoffeln der Laborversuche $Z = 0,217$; 0,190 bzw. 0,165 zu setzen. Daraus ergeben sich die spezifischen Wärmen 0,87; 0,88 bzw. 0,90 kcal/kg grd.

Geprüft wurde auch die Erfüllung der Stoffbilanz nach Gl. (1). Im Mittel der Versuche steht einer aus Trockenproben bestimmten Änderung des Feuchtegehaltes von 1% eine aus den Luftwerten errechnete von 1,1% gegenüber. Die Einzelwerte streuen stark.

3.1.2. Vergleich der Ablufttemperaturen nach Rechnung und Versuch

Zur Klärung, in welchem Umfange der Kühlvorgang als Verdunstungskühlung betrachtet werden kann, soll jetzt die Erwärmung der Luft, die bei reiner Verdunstungskühlung zu erwarten ist, mit den gemessenen Lufterwärmungen verglichen werden.

Im Anhang von [4] sind in Anlehnung an Klenke [10] verschiedene Arten der Lufterwärmung bei der Verdunstungskühlung aufgeführt. Zur Nachrechnung der Versuche wurde für ungesättigte Luft der dort mit B, für gesättigte Luft der dort mit B' bezeichnete Fall gewählt. Beide gelten unter der Voraussetzung, daß das Wasser, das im Luftstrom kondensiert, auf das Kühlgut zurückfällt. Dies ist wegen der Wendestufen naheliegender als der Fall, daß das Kondensat vom Luftstrom vollständig mitgeführt wird. B' bedeutet, daß sich der Luftzustand auf der Sättigungslinie des i, x -Diagrammes bewegt.

Im Falle B läßt sich die Lufterwärmung aus der Abkühlung des Gutes nach der Formel

$$dt_L = \frac{di_K}{c_p l} \left[1 - (1 - \xi) \frac{r_0 - i_{wg}}{r_g} \right] \quad (5)$$

mit

$$\xi = \frac{c_p t_g - t_L}{r_g x_g - x_L}$$

berechnen [4]. Bei B' kann die Endtemperatur der Luft mit Hilfe der Wärmebilanz Gl. (2) im i, x -Diagramm durch mehrfache Approximation ermittelt werden. Die so errechneten Lufterwärmungen sind in **Bild 10 und 11** über den gemessenen Werten aufgetragen, auf Bild 10 für den Fall, daß die Luft während der Kühlung nach der Rechnung die Sättigung erreicht (Rechnung für B bis zur Sättigungsgrenze, dann B'), auf Bild 11 für ungesättigte Abluft (Fall B). Außerdem finden sich auf den Bildern die Lufterwärmungen, die bei ausschließlich trockenem Wärmeübergang, also ohne Verdunstung zu erwarten wären.

In den Versuchen, in denen es nach der Rechnung zur Sättigung kommt (Bild 10), ist eine gute Übereinstimmung zwischen

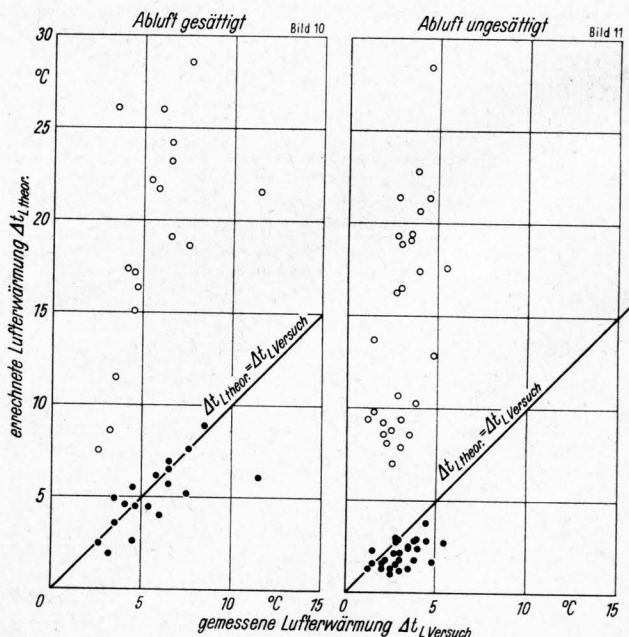


Bild 10 und 11. Aus der Abkühlung der Kartoffeln errechnete Lufterwärmungen über den gemessenen Werten. Laborversuche mit $l < 25$.

Volle Punkte: Fall B + B' (Bild 10) bzw. B (Bild 11)

Offene Punkte: Ansatz für ausschließlich trockenen Wärmeübergang

den gerechneten und den Versuchswerten festzustellen. Dagegen liegen die Temperaturen für den trockenen Wärmeübergang viel zu hoch. Bei den Versuchen mit ungesättigter Luft fällt der Vergleich zwischen den Versuchswerten und den Rechenwerten weniger gut aus (Bild 11). Die Rechnungen nach B ergeben im Durchschnitt eine um 1,1°C niedrigere Ablufttemperatur, als gemessen wurde. Zur Wertung dieses Unterschiedes müssen die Wärmebilanzen herangezogen werden. In ihnen entspricht ein Unterschied von 1,1°C einem Fehler von 10%, also erträglicher Größe. Für diesen Fehler kommen, abgesehen von Versuchsungenauigkeiten, vornehmlich folgende Ursachen in Betracht: Einmal ist es wahrscheinlich, daß der Ansatz B den Kühlvorgang nicht vollständig beschreibt; diese Annahme wird durch *Klenke* [10] gestützt, der bei Wassertemperaturen über 37°C ähnliche Unterschiede zwischen Rechnung und Versuch fand. Zum anderen ist die Guts Oberfläche vielleicht nicht immer vollständig feucht gewesen, so daß auch Wärmeübergang ohne Verdunstung stattgefunden hat. Dies kann aber, wenn überhaupt, nur in sehr geringem Umfange der Fall gewesen sein; denn auf Bild 11 sind die Abstände der Punkte rein trockenen Wärmeüberganges von der 45°-Linie sehr viel größer als die der Punkte nach Ansatz B. Die Bilder 10 und 11 weisen also die Kartoffelkühlung im wesentlichen als Verdunstungskühlung aus.

3.2. Berechnung der fiktiven Übergangsfläche

Die soeben getroffene Feststellung legt es nahe, zur Berechnung der Kartoffelkühlung das in [4] entwickelte Verfahren anzuwenden. Die dort auf Tafel 1 für die Anwendung des Verfahrens genannten Bedingungen waren in den Versuchen alle erfüllt: Die Luftströmung war turbulent, was sich durch einfache Rechnungen bestätigen läßt. Die Gutsfeuchte bestand zwar nicht nur aus Wasser, aber *Görling* [11] hat nachgewiesen, daß die im Kartoffelsaft gelösten Stoffe bei den hier interessierenden Feuchtegraden der Kartoffeln keine merkliche Dampfdruckabsenkung verursachen, die Feuchte sich also wie Wasser verhält. Daß die Guts Oberfläche in den Versuchen ständig oder fast ständig feucht gewesen ist, wurde soeben dargelegt. Von der Erfüllung der übrigen Bedingungen der genannten Tafel kann man sich durch deren Vergleich mit den Versuchsdaten leicht überzeugen.

Das Berechnungsverfahren erlaubt es, die Größe der in den einzelnen Versuchen wirksam gewesenen Übergangsflächen zu berechnen. Da diese nicht meßbar sind, seien sie hier als fiktive Übergangsflächen bezeichnet. Ihre Berechnung soll aus zwei Gründen erfolgen. Erstens kann mit ihr eine gewisse Kontrolle ausgeübt werden, ob das Rechenverfahren und die Versuchsergebnisse zueinander passen; denn alle Versuche müssen unabhängig vom Luftzustand und von der Luftzahl unter sonst gleichen Bedingungen auf etwa die gleiche fiktive Übergangsfläche führen. Zweitens gibt das Verhältnis zwischen der fiktiven Übergangsfläche und der Oberfläche des Kühlbandes einen Anhaltswert für ähnliche Konstruktionen wie die Versuchsanlage.

Die fiktive Übergangsfläche beträgt nach [4]

$$F_{fi} = \frac{\dot{m}_K}{\sigma} \kappa \quad (6)$$

κ wurde in [4] als „Kühlziffer“ bezeichnet und durch

$$\kappa = c_K \int_{t_{KI}}^{t_{KII}} \frac{dt_K}{r_g (x_g - x_L)} \quad (7)$$

definiert. In x_L gehen der Feuchtegrad der Zuluft und die Luftzahl ein, außerdem ist κ von der Anfangs- und Endtemperatur des Kühlgutes und dem Temperaturverlauf in ihm abhängig. Daß von den Parametern des Luftzustandes sich am besten der Feuchtegrad mit der Kühlwirkung in Verbindung bringen läßt, ging ja schon aus Bild 8 hervor.

Zur Bestimmung der Kühlziffern wurden die in [4] befindlichen Diagramme benutzt mit der Unterstellung, daß die Oberflächentemperatur des Gutes gleich seiner mittleren Temperatur gesetzt werden kann. Dies ist nur eine grobe Näherung; in Wirklichkeit

hat die Oberflächentemperatur sicherlich unter der mittleren Temperatur gelegen. Über diese Differenz lassen sich aber keine Angaben machen.

Für den Verdunstungskoeffizienten σ gilt nach [4] unter den hier vorliegenden Voraussetzungen

$$\sigma = \frac{a}{c_p} \quad (8)$$

Zur Bestimmung von a wurde die in [12] angegebene Formel für die Nußeltzahl ausgebildeter turbulenter Rohrströmung herangezogen. Mit den Stoffwerten der Luft im Anhang von [13] ergab sich für das Rohr mit dem quadratischen Querschnitt a^2 die Formel

$$\sigma = 3,4 \cdot 10^{-3} \frac{\dot{m}_L^{0,8}}{a^{1,8}} \text{ [kg/m}^2 \text{ s]} \quad (9)$$

Da die Luftgeschwindigkeit proportional \dot{m}_L/a^2 ist, steigt der Verdunstungskoeffizient also etwa mit der 0,8ten Potenz der Luftgeschwindigkeit an. Bei großen Querschnittsänderungen ist außerdem noch der Faktor $1/a^{0,2}$ zu berücksichtigen.

Bild 12 gibt die Ergebnisse der Rechnungen nach den Gln. (6) bis (9) für die Versuche mit den stärkereichereren Kartoffeln wieder. Es sind die aus der Abkühlung der Kartoffeln mit den Parametern der Zuluft berechneten Übergangsflächen über dem Kartoffeldurchsatz dargestellt. Auf dem Bild zeigt die fiktive Übergangsfläche keine Abhängigkeit vom Durchsatz, wenn dieser über 0,25 kg/s liegt. Die Übergangsfläche schwankt im wesentlichen zwischen 5 und 6,5 m². Dabei liegen die Werte für die Zulufttemperatur 18°C etwas höher als diejenigen für 25°C. Die Streuung ist aber zu groß, um daraus Schlüsse ziehen zu können.

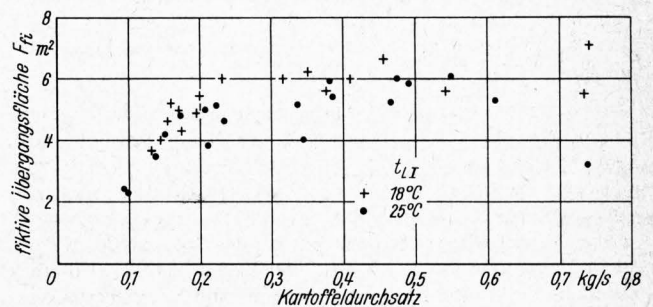


Bild 12. Fiktive Übergangsflächen der Laborversuche mit den stärkereichereren Kartoffeln.

Bei niedrigen Durchsätzen fällt F_{fi} in Richtung auf den Koordinatenursprung ab. In den betreffenden Versuchen war, wie schon früher gesagt, das Kühlband nur unvollständig mit Gut bedeckt. Dadurch wurde die Übergangsfläche etwa proportional zum Durchsatz verringert. Hiermit läßt sich auch erklären, daß sich auf Bild 8 die Kartoffelendtemperatur bei großen Luftzahlen asymptotisch Werten nähert, die oberhalb der Kühlgrenze liegen. Die hohen Luftzahlen sind nämlich im wesentlichen durch niedrige Durchsätze erreicht. Es handelt sich also ebenfalls um die Versuche, in denen das Band nur unvollständig bedeckt und daher die Zunahme der Luftzahl mit einer etwa proportionalen Verkleinerung der Übergangsfläche gekoppelt war.

Die für die Versuche mit stärkearmen Kartoffeln berechneten fiktiven Übergangsflächen streuen sehr stark. In den Tendenzen ergibt sich das gleiche Bild wie für die stärkereichereren Kartoffeln. Die fiktive Übergangsfläche liegt in diesem Fall im Durchschnitt bei etwa 5 m².

Nach diesen Rechnungen betrug also die fiktive Austauschfläche, bei voll bedecktem Band und arbeitenden Wendestern, etwa das Doppelte der beaufschlagten Fläche des Transportbandes. Wegen des Temperaturgefälles im Gut muß man aber damit rechnen, daß sie in Wirklichkeit noch größer gewesen ist.

3.3. Folgerungen

Aus den bisherigen Ausführungen geht hervor, daß die Kühlung zerquetschter gedämpfter Kartoffeln im wesentlichen als Verdunstungskühlung eines wasserfeuchten Gutes zu betrachten

ist, ferner daß das in [4] für diesen Zweck entwickelte Berechnungsverfahren in seiner Anwendung auf die Versuche plausible Ergebnisse liefert. Demnach ist, sofern die als Voraussetzungen genannten Grenzen eingehalten sind, das Berechnungsverfahren für die Kartoffelkühlung brauchbar, und es können auch die in [4] dargelegten Zusammenhänge und Folgerungen übertragen werden. So zeigen für feststehende Luftgeschwindigkeiten die dort gebrachten Diagramme zur Ermittlung der Kühlziffer auch die Abhängigkeit der Übergangsfläche von den Parametern des Luftzustandes und den Oberflächentemperaturen der Kartoffeln an ihrem Ein- und Austritt.

Die von [4] zu übernehmenden Folgerungen lauten zusammengefaßt:

1. Mit der Verdunstungskühlung wird ein wesentlich größerer Kühleffekt erzielt als mit einer Kühlung, die sich nur des trockenen Wärmeüberganges bedient.
2. Zum Erreichen einer wirksamen Kühlung ist es sehr wichtig, daß die Oberflächentemperatur annähernd gleich der mittleren Guttemperatur ist.
3. Die Kühlung im Gegenstrom ist wesentlich günstiger als diejenige im Gleichstrom.
4. Eine Erniedrigung der geforderten Endtemperatur um jeweils 10°C verlangt etwa eine Vergrößerung der Austauschfläche auf das Doppelte oder noch mehr. Bei den in Deutschland üblichen Lufttemperaturen führt eine Kühlung auf Temperaturen unterhalb 30°C zu einem großen Aufwand.

Der mit der Versuchsanlage bei einer Kühlung auf 30°C erreichte Kartoffeldurchsatz ist noch nicht befriedigend. Jedoch ließ die Analyse der Versuchsergebnisse verschiedene Verbesserungsmöglichkeiten sichtbar werden, die zu einer größeren Kapazität der Anlage bei gleichbleibenden oder kleineren Abmessungen führen werden.

So ist eine Verbesserung dadurch zu erzielen, daß für eine immer gleichmäßige Bedeckung des Bandes gesorgt wird, einmal durch gute Verteilung des Gutes über die Bandbreite, zum anderen durch niedrige Bandgeschwindigkeit. Weiter wird es sich empfehlen, die wirksame Kühlfläche durch eine noch stärkere und häufigere Aufwirbelung des Gutes zu vergrößern. Diese Maßnahme hat gleichzeitig den Vorteil, daß die Differenz zwischen der Durchschnittstemperatur und der Oberflächentemperatur des Kühlgutes klein bleibt und immer wieder feuchte Gutsflächen dem Luftstrom ausgesetzt werden. Eine Verbesserung wird es auch bedeuten, wenn der Luftstrom bis an die Quetsche herangeführt wird; er kühlt dann das Gut, schon wenn es von der Quetsche frei auf das Band herabfällt⁵⁾. Eine mehrmalige Umlenkung des Luftstromes in dem Kühler bringt vielleicht eine Vergrößerung der Kapazität bzw. Verkleinerung der Anlage.

Außerdem ist an eine Steigerung der Luftgeschwindigkeit über die in den Versuchen benutzte zu denken, da der Verdunstungskoeffizient mit deren 0,8ten Potenz ansteigt. Diese Steigerung kann aber nur dann in entsprechendem Maße wirksam werden, wenn die Gutsfläche feucht bleibt. Versuche von Görling [11] deuten darauf hin, daß bei einer Steigerung der Verdunstungsintensität der Feuchtenachschub aus dem Gutsinneren bald nicht mehr im gleichen Maße ansteigt.

Ein Weg zur Feuchthaltung der Kühlgutoberfläche, damit immer die größtmögliche Verdunstung gewährleistet ist, kann nötigenfalls darin bestehen, daß das Gut in verschiedenen Querschnitten der Kühlanlage mit Wasser besprüht wird. Dabei darf aber nur etwa soviel Wasser zugegeben werden, wie im Verlaufe des Kühlens verdunstet; denn eine nasse Silage ist unerwünscht.

Zur vollständigen Klärung des Problems müßten die Versuche von Görling entsprechend erweitert und durch Betrachtungen über das Temperatur- und Feuchtefeld in gedämpften Kartoffeln ergänzt werden, etwa wie sie Kröll [14] für rieselfähiges Gut in Trockentrommeln angestellt hat.

⁵⁾ Diese Anregung stammt von Dipl.-Ing. F. Schoedder.

4. Zusammenfassung

Für die Kalteinlagerung gedämpfter Kartoffeln wurden Versuche mit einer Kühlanlage durchgeführt, in der die Kartoffeln nach dem Dämpfen und Quetschen im Gegenstromprinzip durch Luft gekühlt wurden. Die erreichten Kartoffelendtemperaturen zeigten sich in starkem Maße vom Kartoffel- und Luftdurchsatz und der Aufwirbelung des Gutes durch eingebaute Wendeeinrichtungen abhängig. Weitere Einflußgrößen stellten Lufttemperatur und -feuchte sowie Durchlaufgeschwindigkeit des Gutes dar.

Aus der Wärme- und der Stoffbilanz der Versuche konnte gefolgert werden, daß die Kühlung des Gutes zum größten Teil auf der Verdunstung des an den Kartoffeln haftenden oder in ihnen befindlichen Wassers beruht. Mit einem in [4] gebrachten Ansatz für die Verdunstungskühlung ließen sich die gemessenen Ablufttemperaturen in befriedigender Weise erklären. Aus diesen Feststellungen folgt, daß für die Berechnung von Anlagen zur Kartoffelkühlung das in [4] beschriebene Berechnungsverfahren geeignet ist. Seine Anwendung auf die Versuche zeigte, daß in ihnen die für den Wärme- und Stoffübergang maßgebende Oberfläche des Gutes etwa das Doppelte der bedeckten Kühlbandfläche betragen hat.

Auch die in [4] gezogenen Schlußfolgerungen können übertragen werden. Eine Kartoffelkühlung, die auf Verdunstung beruht, ist sehr viel wirkungsvoller als eine Kühlung, die nur das Temperaturgefälle zwischen Gut und Kühlmedium nutzt, bei der also beispielsweise Gut und Kühlluft durch eine Wand getrennt sind. Sehr wichtig ist es, daß dem Luftstrom durch entsprechende Bewegung des Gutes immer wieder neue Gutsflächen ausgesetzt werden. — Schließlich werden noch einige weitere Gesichtspunkte zur optimalen Gestaltung derartiger Kühlanlagen genannt.

5. Schrifttum

- [1] Zimmer, E.: Untersuchungen über Kartoffeleinsäuerung 1961—1962. Das wirtschaftseigene Futter **9** (1963) H. 2, S. 114/29.
- [2] Weise, F.: Untersuchungen über Kartoffeleinsäuerung. Der Einfluß der Anfangstemperatur auf den Gärverlauf gedämpfter Kartoffeln. Das wirtschaftseigene Futter **10** (1964) H. 4, S. 323/33.
- [3] Thær, R., H. Mannebeck und F. Röhrs: Ein Verfahren zur Kühlung gedämpfter Kartoffeln vor dem Einsäuern. Das wirtschaftseigene Futter **10** (1964) H. 2, S. 151/62.
- [4] Thær, R.: Ein Berechnungsverfahren für die Verdunstungskühlung wasserfeuchter Güter. Grundl. Landtechn. **17** (1967) Nr. 5, S. 180/88.
- [5] Krischer, O.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. 2. Aufl. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer-Verl. 1963. S. 28.
- [6] Wenner, L.: Technische Hilfsmittel für die Futterbereitung und Fütterung. In: Handbuch der Landtechnik. Hrsg. v. C. H. Dencker. Hamburg, Berlin: Verlag P. Parey 1961. S. 976.
- [7] Somnitsch, N.: Mechanisierung der Viehwirtschaft. Berlin: VEB-Verl. Technik 1956.
- [8] Riedel, L.: Briefl. Mitt. v. 13. 7. 1967 aus der Bundesforschungsanstalt für Lebensmittelfrischhaltung, Karlsruhe.
- [9] Kröner, W., und W. Völksen: Die Kartoffel, die wichtigsten Eigenschaften der Knolle als Lebensmittel und Rohstoff. Sammlung „Die Ernährung“ Heft 9. Leipzig: Barth-Verl. 1950.
- [10] Klenke, W.: Die Wärme- und Stoffübertragung bei der Verdunstungskühlung und die Beurteilung von Kühltürmen. Diss. TH Braunschweig 1964.
- [11] Görling, P.: Untersuchungen zur Aufklärung des Trocknungsverhaltens pflanzlicher Stoffe. VDI-Forsch.-heft 458. Düsseldorf: VDI-Verl. 1956.
- [12] HÜTTE, des Ingenieurs Taschenbuch. 28. Aufl. Bd. 1. Theoretische Grundlagen. Berlin: Verl. W. Ernst & Sohn 1955. S. 497.
- [13] Gröber, Erk und Grigull: Die Grundgesetze der Wärmeübertragung. 3. Aufl., 3 Neudr. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer-Verl. 1963.
- [14] Kröll, K.: Die Vorgänge in Trocknungs- und Erwärmungstrommeln für rieselfähige Güter. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer-Verl. 1950.