

Die Kühlkonservierung landwirtschaftlicher Massengüter

Von Hans Joachim Bauder, Lindau (Bodensee)

Während die Kaltlagerung von Kartoffeln bereits seit geraumer Zeit angewandt wird, kommt neuerdings auch für andere schüttfähige Massenprodukte die Konservierung mit Kälte in Gebrauch. Man bedient sich dabei der herkömmlichen Lagermethoden und verwendet als Übertragungsmedium einen Kaltluftstrom, der in einer Kolbenströmung durch den Gutstapel gefördert und dessen Kühlvermögen dabei völlig ausgeschöpft wird. Dank des geringen Wärmeleitvermögens von Schüttgütern ist nur intermittierende Kühlbehandlung erforderlich. Diese neue Konservierungstechnik wird am Beispiel von Getreide, wo es im Wettbewerb mit der Trocknung zunehmende Verbreitung findet, eingehend erläutert. Darüber hinaus werden weitere Anwendungsmöglichkeiten aufgezeigt, u. a. für die Zuckerrübenlagerung vor der Verarbeitung, wo es um die Einsparung bedeutender Zuckerverluste geht.

Entstehung des Verfahrens

Die Kaltlagerung der Erzeugnisse gärtnerischer und landwirtschaftlicher Betriebe dient sowohl dem Marktausgleich als einer qualitätserhaltenden Bevorratung. Sie wird angewandt für die Aufbewahrung von Obst, Gemüse und Saatkartoffeln in isolierten Kühlräumen.

Neuerdings ergibt sich nun ein weiterer Anlaß zur Kälteanwendung für landwirtschaftliche Erzeugnisse: die Kühlkonservierung von Schüttgütern. Die Eigenart dieser neuen Anwendung besteht darin, daß sie nicht der Konservierung hochwertiger Erzeugnisse, sondern ausgesprochener Massenprodukte dient und daß sie nicht aus der Notwendigkeit einer mehr oder minder langen Kaltlagerung entstand, sondern aus dem Bedürfnis nach einer kurzzeitigen, gekühlten Zwischenlagerung. Die Ursache hierzu bildet die rasch fortschreitende Mechanisierung der Ernteverfahren für eben diese landwirtschaftlichen Massenprodukte, zu denen in erster Linie alle Getreidefrüchte gehören. Zwar ist auch die Hackfrüchtereite heute weitgehend mechanisiert, ohne daß Anlaß zu solcher Behandlung besteht, doch gibt es dafür verschiedene Gründe: einmal werden Hackfrüchte später geerntet und damit bei kühlerem Wetter; zum anderen sind sie grobstückig und ermöglichen dadurch auch noch im Schütthaufen, allein durch Schwerkraft, einen Austausch der Lückenraumluft mit der Umgebung und damit die Abfuhr der Atmungswärme. Das Getreide hingegen, als feinkörniges Schüttgut, erlaubt durch den hohen Strömungswiderstand seiner engen Luftzwischenräume keinen selbsttätigen, konvektiven Wärmeaustausch. Ein Wärmeaustausch ist zum größten Teil nur durch Leitung bis an die Schüttungsoberfläche möglich und erst von dieser sehr viel kleineren Fläche konvektiv an die Umgebungsluft. Je mehr Atmungswärme entwickelt wird, desto steiler steigt auch die Temperatur von der Oberfläche zum Inneren des Haufens an. Da die Atmungsintensität mit der Kornfeuchtigkeit zunimmt, ist bei den häufig hohen Erntefeuchtigkeiten in Mitteleuropa das vom Mähdrusch geerntete Korn in der Schüttung sehr gefährdet und daher auch nicht kurzzeitig lagerfähig: schon ein Temperaturanstieg über 40°C vermindert die Qualität, voran Keim- und Backfähigkeit, empfindlich. Diese Temperatur ist aber bei feuchtem Getreide innerhalb weniger Tage erreicht. Es sollte also möglichst unmittelbar nach dem Drusch getrocknet werden. Gerade das aber ist eine Forderung, die nicht erfüllt werden kann, denn die erforderliche Trocknerkapazität ist nirgendwo vorhanden.

Die Zuordnung von Drusch- und Trocknungskapazität war vor der Einführung des Mähdrusches gar nicht bekannt. Beim Hofdrusch konnten die Garben nach dem Schnitt bereits weitgehend in den Hocken auf dem Felde abtrocknen, bevor sie in die Scheune kamen. Während von dort das Getreide in einem gleichmäßigen und auf viele Wochen verteilten Strom den wenigen vorhandenen Trocknungsbetrieben zufließt, ist es heute gerade umgekehrt. Der Mähdrusch hat die Arbeitskette der Erntebergung zusammen-

gedrängt, die Ernte wird zwar bereits gedroschen, aber eben noch feucht eingebracht. Vielfach wird sogar mit noch größeren Feuchtigkeiten als früher geerntet, da verständlicherweise wegen der beim Mähdrusch erforderlichen vollen Kornreife auch schon kurze Schönwetterperioden genutzt werden, um das Risiko des Auswachsens und Verderbens der Körner auf dem Halm zu vermindern. So fallen insbesondere bei schlechtem Erntewetter oft in wenigen Stunden große Getreidemengen an, die überdies noch so feucht sind, daß sie innerhalb weniger Tage getrocknet sein müssen, wenn nichts verderben soll.

Die Anpassung der Trocknerkapazität an diese Wandlung würde aber nicht nur kostspielige Investitionen verlangen, sondern überdies noch einen Rückgang der Rentabilität des Trocknungsbetriebes bedeuten, denn bei unveränderten Erntemengen würde ihr jährliche Nutzung zurückgehen. Daher darf es nicht verwundern, wenn nirgendwo der Ausbau der Trocknerkapazität mit der raschen Zunahme der Mähdrusch Schritt hielt. Diese Situation kennzeichnen dann die Schlangen von Erntefahrzeugen vor den Lagerhäusern. Aus dieser Zwangslage heraus entstand das Verfahren der Zwischenlagerung mit Hilfe der Kühlkonservierung. Es soll den Zeitraum bis zum Abklingen der Anlieferungsstöße überbrücken bzw. die Nutzungszeit der Trockner wieder auf die frühere Länge bringen. Es löst dieses Problem auf rasche, bequeme und bedeutend wirtschaftlichere Weise als das ein Trocknerausbau vermöchte.

Biologische Verfahrensgrundlagen

In der Selbsterwärmung liegt die Ursache für den Verderb erntefeuchten Getreides. Sie ist in der Hauptsache die Folge eines enzymatischen Stärkeabbaus im Korn, der durch Zuckerverbrennung die notwendige Energie für die Lebenshaltung der Frucht liefert und wegen des Sauerstoffverbrauchs

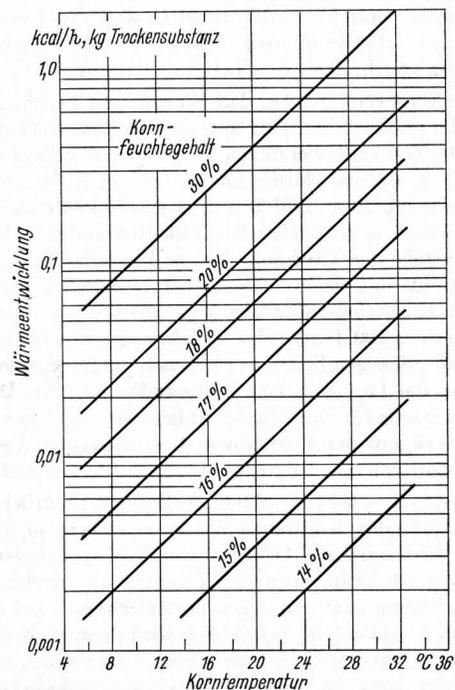


Bild 1. Atmungswärme von Getreide nach Jouin [8].

und der Kohlendioxydbildung als Atmung bezeichnet wird, ein Vorgang, der sich bekanntlich bei der Lagerung sämtlicher Erntegüter abspielt und bei der Kältebedarfsrechnung eine bedeutende Rolle spielt. Die Atmungsintensität ist in hohem Maße von Wassergehalt und Temperatur der Frucht abhängig. Für Getreide zeigt Bild 1 die Funktion, die exponentiellen Charakter hat. Darin liegt die Ursache für die Geschwindigkeit der Selbsterwärmung, die als eine Kettenreaktion abläuft: die durch Verbrennung entstandene Wärme steigert die Temperatur und

Dipl.-Ing. Hans Joachim Bauder ist Leiter der Versuchsabteilung der Firma Escher Wyss GmbH, Werk Lindau (Bodensee).

damit rückwirkend wiederum die Atmung. Da bei der Verbrennung neben Kohlendioxid aber auch noch Wasserdampf frei wird, erfährt der Vorgang noch eine weitere Intensivierung, denn der Wasserdampf steigert die Kornfeuchtigkeit und damit abermals die Atmung.

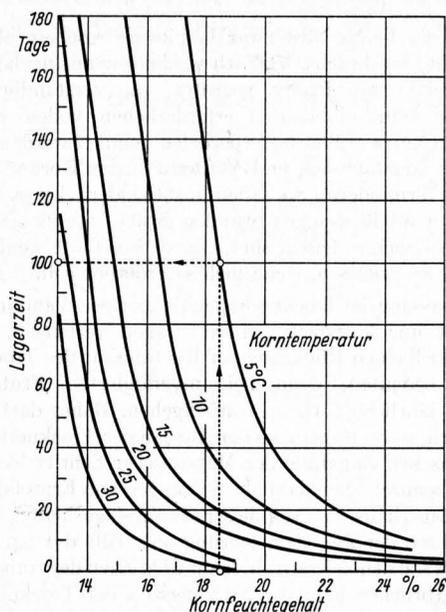


Bild 2. Haltbarkeit bei der Lagerung von Saatgetreide nach Agena [1].

Mit zunehmender Temperatur und Feuchtigkeit wird ferner die Tätigkeit der allgegenwärtigen Mikroorganismen belebt, die dabei gleichfalls Wärme entwickeln. Man hat beobachtet, daß nach einiger Lagerdauer deren Anteil an der Wärmebildung sogar die Enzymatmung überwiegt [12]. Ihre Gefährlichkeit liegt allerdings noch mehr in den toxischen Produkten, die von ihnen in Form von Schimmel gebildet werden. Schließlich tragen auch noch die Getreideschädlinge in Gestalt der Insekten zur Erwärmung bei; für sie gilt, daß — bis zu einer gewissen Grenze — Wärme und Feuchtigkeit ihre Tätigkeit fördern.

Hieraus wird verständlich, daß Wärme und Feuchtigkeit bei weitem alle anderen Einflüsse auf die Qualitätserhaltung überwiegen. Die Zeit spielt bei diesen Vorgängen allerdings eine entscheidende Rolle und darum ist sie der dritte Parameter im Haltbarkeitsdiagramm, **Bild 2**. Aus diesem ersieht man nun sehr deutlich, welche bedeutenden Möglichkeiten in der Kühlkonservierung anstelle der Trocknung liegen: beispielsweise ergibt bei Feuchtgetreide mit einem Wassergehalt von 18,5% die Einhaltung einer Korntemperatur von 5°C eine zulässige Lagerdauer von mindestens 100 Tagen. Das ist schon eine längerfristige Lagerung. Die zulässigen Zeiten werden noch um 20% größer, wenn es sich um die Lagerung von Brotgetreide handelt. Denn das Diagramm wurde für Saatgetreide aufgestellt, bei dem schon ein geringer Rückgang der Keimfähigkeit unzulässig ist. Der Keimling aber wird von den Mikroorganismen zuerst geschädigt.

Wollte man dieselbe Lagerdauer bei den mit natürlicher Kühlung zu erzielenden Korntemperaturen erreichen, so wäre eine vorherige Trocknung auf 14% Wassergehalt anzustreben, denn die mit den Rückkühlzonen der Trockner zu erzielenden Getreideaustrittstemperaturen liegen normalerweise 5 grd über der Kühlluft d. h. Außenluft. Tatsächlich wird denn auch allgemein ein Getreidezustand erst dann als lagerfest angesehen, wenn der Wassergehalt unter 14,5% liegt. Dabei wird jedoch eine noch um 5 grd niedrigere Lagertemperatur, nämlich 15°C angestrebt. Für die Verhältnisse einer bloßen Zwischenlagerung zum obigen Zweck, die ungefähr zwei bis drei Wochen dauert, genügt für Erntefeuchtigkeiten des Getreides bis zu 22% eine Absenkung der Lagertemperatur auf 10°C. Höhere Feuchtigkeiten kommen aber eigentlich nur in Küstennähe vor.

Die eingangs erwähnten ungünstigen Bedingungen des Wärmehaushaltes einer Körnerschüttung mit der umgebenden Luft erweisen sich für die Kühlkonservierung als das Gegenteil, ja sie sind eigentlich einer der Hauptgründe für die Rentabilität des

Verfahrens. Der Lagerraum bedarf nämlich keines besonderen Wärmeschutzes, sondern er kann in der üblichen vielfältigen Weise ausgeführt sein z. B. als Silozelle, als Bodenspeicher, als einfache Schütthalle oder auch als Blechsilo. Die Eigenschaften eines Wärmeisolators verdankt die Getreideschüttung nicht nur der geringen Konvektion der Porenluft, sondern auch dem geringen Wärmeleitvermögen der Korntrockensubstanz, einem relativ zu anderen Früchten sehr niedrigen Wassergehalt und natürlich der annähernden Kugelgestalt der Körner, die nur eine gegenseitige Punktberührung erlaubt.

Die Wiedererwärmung nach der Abkühlung ist also weitgehend unbeeinflusst vom Wärmeeinfall in die Schüttung, sie ist praktisch nur von der Wärmeentwicklung des Getreides selbst abhängig. Daher gelten für die Getreidekühlung andere Gesichtspunkte als für die übliche Produktkühlung im kalten Raum. Es lohnt sich hier, die Abkühlung möglichst weit zu treiben, denn um so stärker wird die Atmungstätigkeit gedrosselt und um so langsamer vollzieht sich die Wiedererwärmung (s. Bild 1). Die Verhältnisse liegen so günstig, daß an die Stelle kontinuierlicher Kühllhaltung die intermittierende Abkühlung treten kann und daß die Intervalle so groß werden, daß für die Dauer der Zwischenlagerung gewöhnlich eine einmalige Abkühlung ausreicht. Den Temperaturanstieg von lagerndem Weizen mit hohem Wassergehalt (20,5%) in einer einfachen hölzernen, oben offenen Zelle, nach Abkühlung auf rd. 8°C, zeigt **Bild 3**. Erwartungsgemäß nimmt der Anstieg mit der Lagerdauer infolge der Rückwirkung der Atmungswärme zu. Er beträgt in den ersten 5 Tagen 0,1 bis 0,25 grd/Tag und zwischen dem 15. und 20. Tag 0,4 bis 0,6 grd/Tag (die beschleunigte Erwärmung der obersten Schicht geht auf eine unvollständige Abkühlung zurück). Als zeitlicher Mittelwert der herrschenden Lagertemperaturen sind etwa 10°C anzusehen, die nach dem früheren Gesagten für die Zwischenkonservierung ausreichen. Wie Bild 3 zeigt, ist selbst in ungünstigsten Fällen hierfür mit einer einmaligen Abkühlung auszukommen.

Physikalische Verfahrensgrundlagen

Die Wirkungsweise der Getreidekühlung zeigt **Bild 4** schematisch am Beispiel einer Silozelle: die angesaugte Frischluft

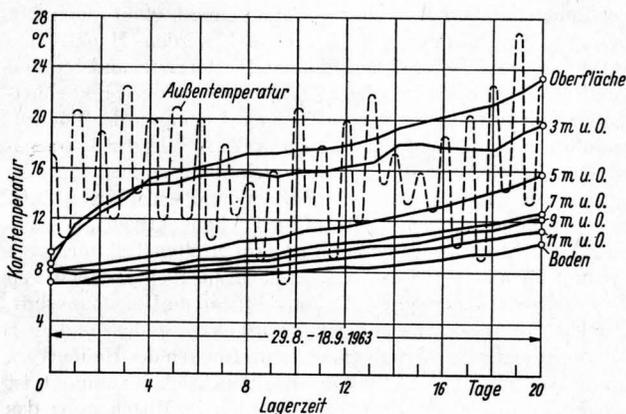


Bild 3. Wiedererwärmung von erntefeuchtem Weizen nach der Kühlung bei Lagerung in der Silozelle. Lagerung von 75 t Weizen mit 20,5% Feuchtegehalt

Verwendete Formelzeichen

c_G	kcal/kg grd	spezifische Wärme des Schüttgutes
c_{pL}	kcal/kg grd	spezifische Wärme der Luft
Δi_L	kcal/kg	Enthalpiezunahme der Luft
i_w	kcal/kg	Wärmeinhalt des Wasserdampfes
l_0	kg/kg	spezifischer Luftbedarf (kg Luft/kg abzukühlendes Schüttgut)
m_L	kg/h	Kühlluft-Mengenstrom
M_G	kg	Menge des Schüttgutes
t	h	Abkühlzeit
Δx_L	kg/kg	Feuchtegehaltszunahme der Luft
ΔX_G	kg/kg	Feuchtegehaltsabnahme des Schüttgutes (einfachheitshalber auf das feuchte Gut bezogen; Fehler wegen sehr kleiner Werte von ΔX vernachlässigbar)
$\Delta \theta_G$	grd	Abkühlung des Schüttgutes
$\Delta \theta_L$	grd	fühlbare Lufterwärmung
φ	—	relative Luftfeuchtigkeit

wird im Luftkühler auf die gewünschte Endtemperatur des Getreides abgekühlt, wobei gleichzeitig Wasserdampf ausgeschieden wird und sodann über geeignete Verteiler im Zellenboden dem Getreide zugeführt. Die Verteiler müssen eine gleichmäßige Luftverteilung über den ganzen Zellenquerschnitt gewährleisten. Unter dieser Voraussetzung kann sich eine ebene Austauschzone ausbilden, die allen Wärme- und Stoffaustauschvorgängen bei gleichmäßiger Durchströmung von Schüttgütern eigentümlich ist. Diese Abkühlungszone durchwandert in Strömungsrichtung der Luft allmählich die ganze Zellenhöhe. Die Kühlung ist dann beendet, wenn diese Zone die Schüttungsfläche durchlaufen hat. Im folgenden werden schrittweise die verschiedenen Vorgänge beim Ablauf dieses Prozesses beschrieben, ausgehend vom einfachsten Fall.

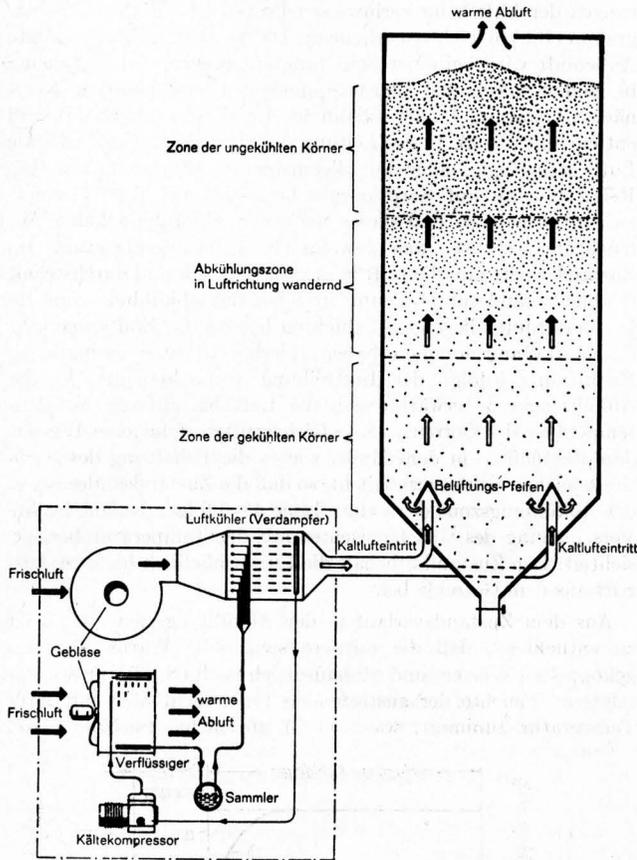


Bild 4. Wirkungsschema der Getreidekühlung in der Silozelle.

Für die Abkühlung dicker, nichthygroskopischer Schüttgutschichten durch einen Luftstrom mit über den ganzen Schichtquerschnitt gleicher Geschwindigkeit (Kolbenströmung) gilt bei völligem Temperaturexaustausch, d. h., wenn das Schüttgut auf die Lufttemperatur abgekühlt wird und die Luft mit der Anfangstemperatur des Schüttgutes abströmt, und unter der vereinfachenden Annahme einer vernachlässigbar kleinen Kühlzonendicke, folgende Wärmebilanz:

$$c_G M_G = c_{pL} m_L t \quad (1)$$

Hierin bedeuten M_G die Menge des Schüttgutes in kg, c_G seine spezifische Wärme in kcal/kg grd, m_L den Mengenstrom der Luft in kg/h, c_{pL} ihre spezifische Wärme in kcal/kg grd und t die Abkühlzeit in h. Die Temperaturdifferenzen sind auf beiden Gleichungsseiten dieselben und können daher weggelassen werden. Hieraus erhält man als Ausdruck für den spezifischen Luftbedarf

$$l_0 = \frac{m_L t}{M_G} = \frac{c_G}{c_{pL}} \quad (2)$$

Die Entwicklung biologischer Wärme blieb unberücksichtigt, da sie bei Getreide in der Größenordnung von 1% der spezifischen Wärme liegt. Diese beträgt bei Getreide in grobem Durchschnitt $c_G = 0,5$ kcal/kg grd. Damit erhält man für den vorher definierten Luftbedarf bei $c_{pL} = 0,24$ kcal/kg grd den Wert $l_0 = 0,5/0,24$ oder rd. 2 kg Luft je kg abzukühlenden Getreides.

Der Umfang der Temperaturerniedrigung hat darauf keinen Einfluß.

Dieser Luftbedarf ist insofern nicht richtig, als Getreide ein hygroskopisches Gut darstellt, das daher mit der Luft nicht nur im Wärme- sondern auch im Stoffaustausch steht. Die Gleichgewichtszustände folgen keiner einfachen Gesetzmäßigkeit, man entnimmt sie einschlägigen Sorptionstabellen oder -diagrammen, **Bild 5**. Beim Eintritt hat die gekühlte Luft eine ziemlich hohe relative Feuchtigkeit, die sich jedoch mit zunehmender Wärmeaufnahme beim Durchgang durch das Getreide verringert. Dadurch entsteht ein Partialdruckgefälle von den feuchten Grenzflächen der Körner zur Luft und es setzt eine entsprechende Verdunstung ein. Aus dem Korninneren wird Feuchtigkeit nachgesogen und dadurch mit dem Wärmeübergang ein Wasserdampfübergang vollzogen, der simultan mit dem Temperaturexaustausch bis zum Sorptionsgleichgewicht erfolgt. Die erforderliche Verdunstungswärme kann nur aus dem Wärmeinhalt des Getreides bezogen werden, da wegen der Temperaturlage des Austauschvorgangs die Luft dazu nicht in der Lage ist. Es handelt sich um den häufigen Fall der gegenseitigen Verdunstungskühlung, bei dem sich die Grenzschicht und infolgedessen auch das Gutsinnere abkühlt. Das Getreide erfährt also eine zusätzliche Abkühlung, der Luftbedarf wird dadurch geringer.

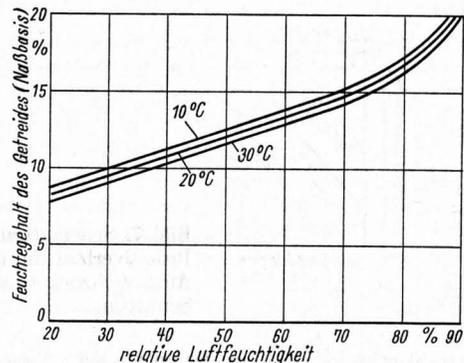


Bild 5. Sorptionsgleichgewicht von Weizen nach Sprenger [11].

Die Wärmebilanz für diesen gekoppelten Wärme- und Stoffaustausch lautet:

$$\Delta\theta_G c_G M_G = (\Delta\theta_L c_{pL} + \Delta x_L i_w) m_L t \quad (3)$$

Hierin sind $\Delta\theta_G$ die Getreideabkühlung und $\Delta\theta_L$ die fühlbare Lufterwärmung, Δx_L die Feuchtegehaltzunahme der Luft und i_w der Wärmeinhalt des Wasserdampfes. Der Klammerausdruck stellt die Enthalpiezunahme Δi_L der Luft dar. Da noch immer gilt, daß $\Delta\theta_G = \Delta\theta_L$ ist, kann man Gl. (3) auch folgendermaßen schreiben:

$$c_G M_G = (\Delta i_L / \Delta\theta_L) m_L t \quad (4)$$

Man kann den neuen Klammerausdruck auch als die mittlere spezifische Wärme c_{mL} beim Austauschprozeß unter Einschluss des Stoffüberganges ansehen und erhält damit eine Gleichungsform, die Gl. (1) entspricht. Der spezifische Luftbedarf für den gekoppelten Austausch kann damit wie folgt angegeben werden:

$$l_0 = \frac{m_L t}{M_G} = \frac{c_G}{c_{mL}} \quad (5)$$

Aus der Definition der mittleren spezifischen Wärme

$$c_{mL} = \frac{\Delta\theta_L c_{pL} + \Delta x_L i_w}{\Delta\theta_L} \quad (6)$$

ist zu erkennen, daß der Luftbedarf nicht mehr unabhängig von der Abkühlung ist wie noch in Gl. (2). Allerdings darf der Einfluß von $\Delta\theta_L$ nicht unabhängig von Δx_L beurteilt werden, denn beide ändern sich gleichsinnig.

Die Zusammenhänge sind aus dem i, x -Diagramm, **Bild 6**, besser zu ersehen. Vor seiner Behandlung ist jedoch eine weitere Vereinfachung zu berichtigen, die eingangs angenommen worden war, nämlich die vernachlässigbar kleine Kühlzonendicke. In Wirklichkeit ist das nur ganz zu Anfang des Abkühlungsprozesses der Fall, während mit dem Vordringen der Kühlfront die Kühlzone immer dicker wird. In dieser Zone, **Bild 7**, findet der eigentliche Austauschvorgang statt, der ja nicht sprunghaft vor sich gehen kann, da hierfür eine unendlich große Wärme- und Stoff-

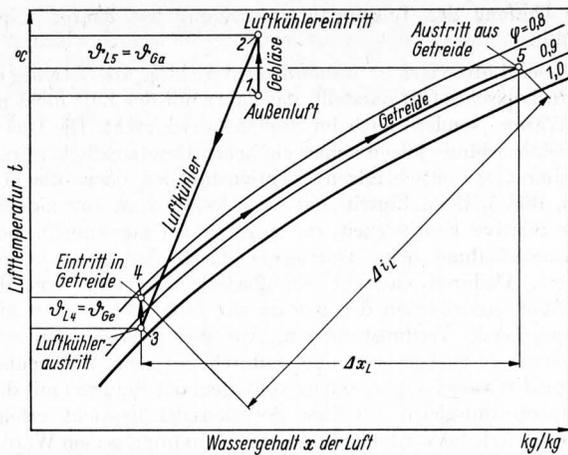


Bild 6. Luftzustände beim Kühlprozeß in i, x -Diagramm.

mittl. spez. Wärme der Luft bei Durchströmung des Getreides $c_{mL} = \frac{\Delta i_L}{\vartheta_{Ga} - \vartheta_{Ge}}$

Stoffaustausch dabei $\Delta X_G = \frac{c_G (\vartheta_{Ga} - \vartheta_{Ge})}{\Delta i_L / \Delta x_L}$

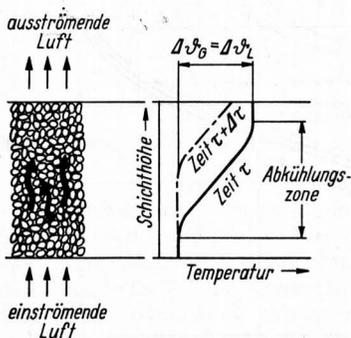


Bild 7. Schematischer Prozeßverlauf in der Austauschzone der Schüttung.

übergangszahl erforderlich wäre. Deren endliche Werte verursachen vielmehr einen allmählichen Übergang vom Anfangs- zum Endzustand von Luft und Körnern. Diese bilden die obere und untere Begrenzung der Kühlzone, die nun langsam die ganze Höhe der Schüttung durchwandert. Solange beide Grenzen noch unterhalb der Schüttungsoberfläche liegen, sind die Voraussetzungen des Gleichgewichts in Gl. (3) erfüllt, da oberhalb der Kühlzone alles Getreide noch völlig warm, unterhalb dagegen bereits völlig gekühlt ist. Damit wird das Kühlvermögen der Luft völlig ausgeschöpft und sie durchströmt die unter und über der Kühlzone liegenden Getreideschichten ohne Zustandsänderung. Erreicht die Kühlzone mit ihrer Obergrenze aber die Schüttungsoberfläche, so beginnt die Austrittstemperatur der Luft zu fallen, ihr Kühlvermögen wird immer weniger ausgenutzt und in einem lange dauernden Prozeßschwanz sinkt die Austrittstemperatur schließlich auf die Eintrittstemperatur ab; es findet kein Wärme- und auch kein Stoffaustausch mehr statt, das Ende der Abkühlung ist erreicht, Bild 8.

Den Verlauf der Abkühlungskurven in den verschiedenen Höhen des bereits bei der Wiedererwärmung (Bild 3) als Beispiel angeführten Holzsilos zeigt Bild 9. Aus der zunehmenden Verflachung der Kurven mit der Höhe bzw. mit der Kühlzeit ist zu ersehen, daß die Kühlzone ständig stärker wird, denn die Anzahl der von einer bestimmten Zeitkoordinate geschnittenen Höhenlinien wird immer geringer. Da der Kurvenlauf annähernd punktsymmetrisch zum Halbwertspunkt (Bild 8) verläuft, läßt sich folgern, daß die Wärmebilanz nach Gl. (3) die Kühlzeit bis zum Halbwertspunkt, d. h. die verlustlose Kühldauer, liefert. Würde sich nämlich, wie in Gl. (3) vorausgesetzt, der Wärmeübergang sprunghaft bzw. ohne Kühlzone vollziehen, so nähme die Temperatur den in Bild 8 gestrichelt angedeuteten, treppenförmigen Verlauf.

Die rechnerische Bestimmung der gesamten Kühlzeit, also unter Einschluß des Prozeßschwanzes, ist indessen ungleich aufwendiger. Klapp [9] hat dafür als erster ein System partieller Differentialgleichungen in dimensionsloser Schreibweise angegeben, von dem Lösungstafeln allerdings erst für die Verhält-

nisse von grobstückigen Schüttungen (z. B. Rüben) vorliegen. Eine halbempirische, ebenfalls dimensionslose Darstellung beschreiben Isaacs und Scheuermann [7] allerdings auf die Belange der Trocknung zugeschnitten.

In Laboratoriumsversuchen mit trockenem Weizen fand Foster [5] bei einer totalen Kühlzeit von 23 Stunden und einer Abkühlung von 26°C auf 10°C — was den üblichen Verhältnissen gut entspricht — eine um 25% längere Kühlzeit als die entsprechend Gl. (3) zu bestimmende. Der Verfasser fand bei zahlreichen Beobachtungen an ausgeführten Anlagen ebenfalls Werte in dieser Größenordnung. Es sei noch darauf hingewiesen, daß die Werte von totalen und verlustlosem Luftbedarf die gleiche Relation besitzen.

Der Zusammenhang des Luftbedarfes mit den Zustandsänderungen der Luft beim verlustlosen Prozeß ist aus dem i, x -Diagramm (Bild 6) leicht zu erkennen: Die im Zustand 1 angesaugte Außenluft wird bei einer Schaltung entsprechend dem Schema in Bild 4 durch das Wärmeäquivalent der Gebläsearbeit zunächst erwärmt (1—2), sodann im Luftkühler abgekühlt und entfeuchtet (2—3). In der Leitung zur Silozelle erwärmt sich die Luft geringfügig, aber im allgemeinen ausreichend, um ihre Relativfeuchte auf Sorptionsgleichgewicht mit dem Getreide zu erniedrigen, so daß dieses nach der Abkühlung keine Anfeuchtung erfährt, was gewöhnlich unerwünscht wäre. Im Zustand 4 tritt nun die Luft in das Getreide ein und durchströmt es ohne Veränderung bis zum Erreichen der Abkühlungszone, da ja die darunter liegenden Schichten bereits die Endtemperatur $\vartheta_{Ge} = \vartheta_{L4}$ angenommen haben (hierbei ist eine geringfügige Erwärmung infolge der Luftreibung vernachlässigt). In der Abkühlungszone erwärmt sich die Luft bis auf die Anfangstemperatur des Getreides ϑ_{Ga} . Gleichzeitig erfolgt eine Wasserdampfaufnahme in dem Maße, wie es die Erhaltung des Sorptionsgleichgewichtes ermöglicht, so daß die Zustandsänderung in der Abkühlungszone etwa einer Linie 4—5 folgt, die eine leichte Verschiebung des Gleichgewichtes mit der Temperatur berücksichtigt. Den Zustand 5 behält die Luft schließlich bis zum Austritt aus dem Getreide bei.

Aus dem Zustandsverlauf in der Abkühlungszone (4—5) ist zu entnehmen, daß die mittlere spezifische Wärme für den gekoppelten Wärme- und Stoffaustausch nach Gl. (6) nur mit der relativen Feuchte der austretenden Luft, nicht aber mit ihrer Temperatur zunimmt, was aus Gl. (6) nicht ersichtlich war.

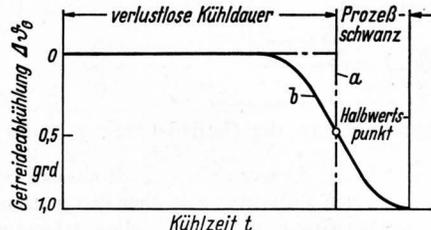


Bild 8. Schematischer Temperaturverlauf an der Schüttungsoberfläche.

- a Temperaturverlauf bei sprunghaftem Austausch
- b Temperaturverlauf bei Ausbildung einer Abkühlungszone

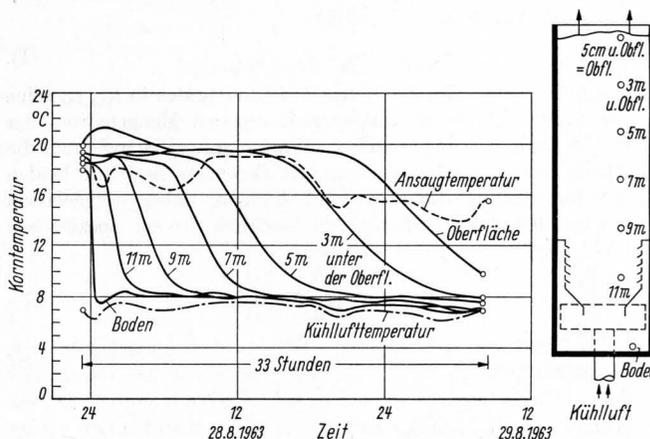


Bild 9. Verlauf der Abkühlungskurven in einer Silozelle. Kühlung von 75 t Weizen mit 20,5% Feuchtegehalt

Dennoch bleibt der spezifische Luftbedarf nicht unbeeinflusst von der Getreideanfangstemperatur, denn abweichend vom Verhalten feuchter Luft allein nimmt die relative Feuchte der im Gleichgewicht mit dem Wassergehalt der Körner stehenden Luft bei Erwärmung der Körner zu. Man erhält also sowohl mit höherem Wassergehalt als auch mit höherer Anfangstemperatur des Getreides eine Verminderung des Luftbedarfs. Diese Abhängigkeit zeigt **Bild 10**. Der Einfluß des Kornfeuchtegehaltes wird mit höheren Werten wegen der dort exponentiell ansteigenden Sorptionsisothermen geringer. Er erreicht bei 22% seine Grenze, da diese sich dort asymptotisch der Wasserdampfsättigung der Luft nähern.

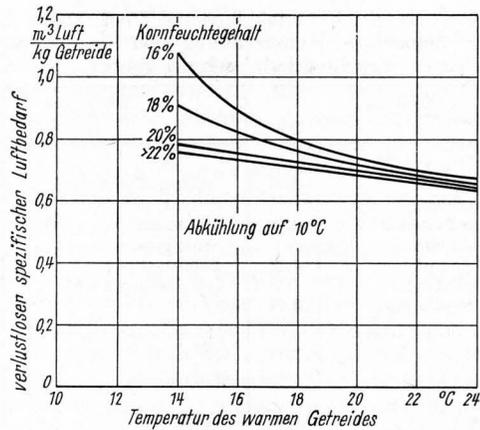


Bild 10. Verlustloser spezifischer Luftbedarf zur Getreidekühlung.

Für mittlere Verhältnisse der Kühlkonservierung von erntefeuchtem Getreide kann ein Wassergehalt von 20%, eine Anfangstemperatur von 20°C und Abkühlung auf 10°C angenommen werden. Damit erhält man aus **Bild 10** einen verlustlosen, spezifischen Luftbedarf von rd. 0,7 m³ Luft/kg Getreide. Beim Vergleich mit dem aus Gl. (2) errechneten Luftbedarf ohne Stoffaustausch ergibt sich, daß dieser mit 2 kg/kg oder 1,67 m³/kg mehr als doppelt so hoch wäre.

Auf den Luftbedarf wirkt sich jedoch nicht nur der Feuchtegehalt des Getreides, sondern auch die Feuchtigkeit der Kaltluft aus, mit der diese in die Abkühlungszone eintritt. Befindet sich nämlich der Zustand der eintretenden Kaltluft nicht im Sorptionsgleichgewicht mit dem warmen Getreide, so kommt es zunächst zu einer adiabatischen Zustandsänderung der Luft. Ist die Luft trockener, so erfolgt eine adiabatische Befeuchtung, bei der sich die Luft sogar noch abkühlt. Diese Abkühlung reicht bis zur Kühlgrenze, als die man sich hier nicht die Temperatur des feuchten Thermometers vorstellen darf, sondern wegen der unvollständigen Sättigung der feuchten Kornoberflächen eben den Schnittpunkt der Taulinie mit der Gleichgewichtsfeuchte anstatt mit der Sättigungslinie im i, x -Diagramm. Diese zusätzliche Verdunstungskühlung ermöglicht entweder eine tiefere Kühlung des Getreides oder auch eine kürzere Kühlzeit bzw. geringeren Luftbedarf bei gleicher Abkühlung, indem man das Ende des Prozeßschwanzes nicht mehr abzu-

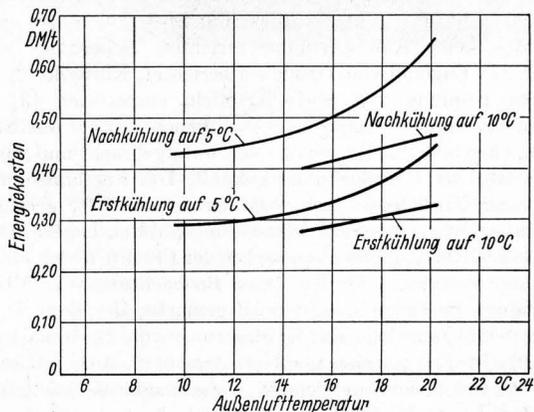


Bild 11. Spezifische Energiekosten der Getreidekühlung in der Silozelle.

Kornfeuchtegehalt 18%
Strompreis 0,10 DM/kWh

warten braucht. Umgekehrt bewirkt feuchtere Kaltluft eine Anfeuchtung des Getreides durch Kondensation des Wasserdampfes bis zum Sorptionsgleichgewicht, wobei infolge der freiwerdenden Kondensationswärme die Luft erwärmt wird. Hieraus resultiert eine geringere Abkühlung des Getreides, die auch mit einer erhöhten Luftmenge nicht auszugleichen ist.

Das Luftbedarfsdiagramm in **Bild 10** berücksichtigt diese Einflüsse nicht. Es basiert auf einer gleichbleibenden Eintrittsfeuchte der Kaltluft von 90%, wie sie etwa der Schaltung des Kältesatzes nach **Bild 4** entspricht. Der Einfluß ist jedoch bei 16% Kornfeuchtegehalt noch gering (etwa 1 grad höhere Endtemperatur).

Schließlich ist dem i, x -Diagramm zu entnehmen, daß der mit der Kühlung des Getreides verknüpfte Trocknungseffekt in der gleichen Weise wie der Luftbedarf von den Feuchtegehalten des Getreides und der Kaltluft abhängt. Seine Größe erhält man aus der Stoffbilanz, derzufolge die dem Getreide entzogene Feuchtigkeit ΔX_G gleich der Zunahme der absoluten Luftfeuchtigkeit Δx_L sein muß:

$$\Delta X_G M_G = \Delta x_L m_L t \quad (7)$$

Durch Umformung mit Hilfe der Gl. (5) und (6) erhält man:

$$\Delta X_G = \frac{c_G \Delta \theta_L}{\Delta i_L / \Delta x_L} \quad (8)$$

Der Wasserentzug unter den oben dargelegten mittleren Verhältnissen bei der Kühlung von erntefeuchtem Getreide beträgt nach Gl. (8) rd. 0,5%. In exakten Laboratoriumsversuchen hat *Foster* [5] jedoch gefunden, daß die theoretischen Werte nur zu etwa 70 bis 80% erreicht werden.

Einen Anhalt über die Betriebskosten der Getreidekühlung gibt **Bild 11**, worin unter Erstkühlung die Abkühlung von 24°C auf 10 bzw. 5°C zu verstehen ist, während die Nachkühlung sich auf eine vorausgegangene Wiedererwärmung um 4 grad bezieht. Der Wassergehalt des zu kühlenden Getreides ist in allen Fällen mit 18% eingesetzt. Für die Feuchtigkeit der Außenluft sind die Monatsmittel in Deutschland zugrundegelegt, die den jeweiligen, hier ebenfalls als Monatsmittel zu interpretierenden Lufttemperaturen zugeordnet sind.

Die vorstehenden Ausführungen beziehen sich hinsichtlich der Zahlenwerte auf das Beispiel der Kühlkonservierung von Getreide. Hinsichtlich der dargelegten Zusammenhänge zwischen dem Verhalten des Kühlgutes und des Kühlmittels können sie jedoch Anspruch auf allgemeine Gültigkeit für die Kühlkonservierung schüttfähiger Erntegüter erheben. Es sind insbesondere Untersuchungen an Zuckerrübenstapeln bekannt geworden [13], die dies bestätigen.

Anwendungen der Kühlkonservierung

Getreidekonservierung

Die Vorzüge des Verfahrens für die Bergung der Getreideernte wurden bereits eingangs angedeutet. Sie bestehen vor allem in einer zügigen Annahme des erntefeuchten Getreides unter Umgehung des Engpasses, zu dem die Trocknung bei den Erfassungsbetrieben geworden ist. Das feuchte Gut kann ohne Gefahr sofort in Silozellen eingespeichert werden, wo es soweit abgekühlt wird, wie es sein Zustand und die geplante Lagerdauer erfordern. Die Abkühlung erfolgt im Vergleich zum Zeitaufwand für die Trocknung sehr rasch, da höchstens ein Drittel der Luftmenge erforderlich ist. Dadurch ist auch bei großen Zellenhöhen das Verfahren noch wirtschaftlich durchzuführen. Die Einsparungen, die mit der Kühlkonservierung anstelle der Erweiterung der Trocknungskapazität zu erreichen sind, zeigt **Tafel 1**. Danach beträgt die Ersparnis 2,10 bis 1,25 DM/t, was nicht gering wiegt, gemessen an den durchschnittlichen, gesamten Trocknungskosten eines Durchlauftrockners mit etwa 4,40 DM/t (die zusätzliche Einsparung durch den Trocknungseffekt bei der Kühlung ist hierin noch nicht berücksichtigt).

Die Kühlkonservierung von Getreide blieb aber nicht auf die Zwischenlagerung beschränkt, sondern fand breiten Eingang auch in die langfristige Lagerung, wo sie insbesondere bei der Konservierung von mittelfeuchtem Getreide (16 bis 17% Feuchtegehalt) die Trocknung verdrängt, denn dafür ist diese wenig wirtschaftlich. Allerdings ist bei dieser Anwendung nicht mit einmaliger

Tafel 1. Kostenvergleich von Zwischenkühlung und sofortiger Trocknung.

	Kühlung und Trocknung		sofortige Trocknung		
		DM	DM/t	DM	DM/t
vorhandene Einrichtung Anschaffungen	Trockner Kühlsatz für 70 t/Tag Anschlußleitung	18 000 300		Trockner 3-t.-Trockner	42 500
Jahresfestkosten	$0,155 \cdot 18\,300 =$	2 840		$0,155 \cdot 42\,500 =$	6 600
Jahreskapazität	$45 \cdot 70 = 3\,150\text{ t}$			(wie Kühlsatz 3 150 t)	
spez. Festkosten	$2\,840\text{ DM}/3\,150\text{ t} =$		0,90	$6\,600\text{ DM}/3\,150\text{ t} =$	2,10
spez. Betriebskosten			0,35		
spez. Kühlkosten			1,25		

Abkühlung auszukommen, sondern es muß gewöhnlich mehrmals nachgekühlt werden, bis schließlich die Außentemperatur mit fortschreitender Jahreszeit genügend abgesunken ist. Aber auch getrocknetes Getreide bedarf bis dahin mehrmaliger Belüftung. Einen Kostenvergleich der beiden Methoden zeigt **Tafel 2**, wonach auch hier eine Ersparnis von rd. 0,50 DM/t mit der Kühlung zu erreichen ist. Besonders vorteilhaft ist diese für die Lagerung in billigen Flachspeichern, die zunehmend Verbreitung finden wegen des mehrmaligen Umschlages, für den diese im Laufe eines Jahres bei Verwendung für verschiedene Erntegüter die Möglichkeiten bieten. Allerdings erfordert die Luftzuführung einen höheren Aufwand als bei der Zellenlagerung. Es werden hierfür Belüftungskanäle mit Austrittsöffnungen auf der ganzen Länge am Speicherboden verlegt, **Bild 12**, an die nacheinander — meist im Zuge der Einlagerung — das Kühlgerät angeschlossen wird. Die ungleich größeren Strömungsquerschnitte, die dem Kaltluftstrom im Vergleich zur Zelle geboten werden und außerdem die wesentlich niedrigeren Schütthöhen (4 bis 5 m) bedingen einen viel geringeren Strömungswiderstand und damit einen geringeren Energieaufwand, so daß die höheren Anlagekosten für die Kanäle wieder ausgeglichen werden. Mit einem gegenseitigen Abstand der Kanäle gleich der Schütthöhe erhält man im allgemeinen weder Kaltluftverluste noch tote Zonen.

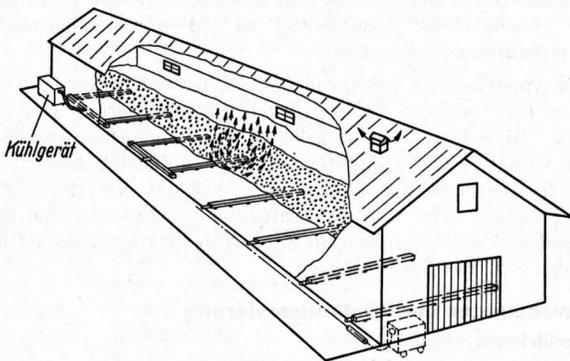


Bild 12. Kühlkonservierung von Getreide im Flachspeicher.

Zuckerrübenkonservierung

Die durchweg guten Erfahrungen, die überall mit der Kühlkonservierung von Getreide gemacht werden [4; 6; 15], legen die Frage nahe, ob sich das Verfahren mit Vorteil auch auf andere Erntegüter anwenden läßt. Wie erwähnt, wurden bereits Untersuchungen an Zuckerrüben angestellt. Bei der Rüben-ernte liegen heute Verhältnisse vor, die denen bei der Getreide-ernte nicht unähnlich sind: Die Zuckerfabriken sind zur Zwischenlagerung gezwungen.

Veranlassung hierzu bildet die Verkürzung der Rodedauer dank weitgehender Mechanisierung der Ernte und andererseits das Bestreben der Fabriken, die Kampagne zu verlängern, um die Anlagen besser auszunützen. Neben diesen Ursachen treten offenbar noch andere, u. a. daß es bei der Ernte ein bestimmtes Ertragsoptimum von relativ kurzer Dauer gibt.

Die Zuckerfabriken haben sich bereits auf diese Verhältnisse eingestellt und große Lagerplätze eingerichtet. Mit der Lagerung sind aber Verluste verbunden, von denen der bei der Atmung verbrannte Zucker am schwersten wiegt. Da die Lebenstätigkeit und damit die Atmung mit zunehmender Lagertemperatur stark ansteigt, werden bereits mancherorts die Rübenstapel durch

Tafel 2. Kostenvergleich von Kühlung und Trocknung bei längerer Lagerung. 3monatige Konservierung von Getreide mit 18% Feuchtegehalt nach der Ernte.

	Kühlung		Trocknung	
		DM/t		DM/t
Erstkühlung auf 5°C, im Juli	0,40		Brennstoffkosten**)	1,07
1. Nachkühlung, Anfang August	0,56		Stromkosten für Trocknung	0,45
2. Nachkühlung, Ende August	0,56		Stromkosten für Belüftung (viermal je 2 kWh)	0,80
3. Nachkühlung, Mitte September	0,48		Energiekosten, gesamt	2,32
Energiekosten (Strom), gesamt*)	2,00		Lohnkosten	2,00
Festkosten bei jährlicher Kühlung von 1000 t	1,80		Festkosten	—
Gesamtkosten	3,80		Gesamt-Trocknungskosten	4,32

*) bei Strompreis 0,10 DM/kWh **) bei Heizölpreis 0,13 DM/l

Einblasen von Außenluft kühlgelassen. Nach Untersuchungen am Institut für Landtechnik der Universität Bonn [2] lassen sich je 1 grad Temperaturabsenkung die Zuckerverluste um 33 g je Tonne eingelagerter Rüben und Tag vermindern. Fachleute sind der Ansicht, daß man durch die Zwangsbelüftung pro Tag und Tonne 150 bis 200 g Zuckerverluste einsparen kann.

Eine weitere Verringerung des Zuckerverlustes liegt im Bereich des Möglichen, wenn anstelle der normalen Außenluft maschinell gekühlte Luft für die Zwangsbelüftung verwendet wird. Es wurde von Versuchen mit durch Planen abgedeckten Stapeln und Umwälzung der Kaltluft berichtet, bei denen die Zuckerverluste auf 0,005% je Tag zurückgingen [14]. Zur richtigen Einschätzung der wirtschaftlichen Bedeutung muß man diese Werte auf die Größenordnung eines Zuckerpreises von etwa DM 800,— je Tonne, eine mindestens zweimonatige Lagerung und Lagerkapazitäten zwischen 20 000 und 100 000 t übertragen.

Kartoffelkonservierung

Zu den wichtigsten landwirtschaftlichen Massengütern gehört die Kartoffel, die für die Konservierung mit intermittierender Kühlung viel eher geeignet ist als die Rübe wegen ihres günstigeren Oberflächenverhältnisses. Aber selbst geschlossene Kaltlagerräume sind bisher nur in bescheidenem Umfang und nur für die Saatzucht eingerichtet worden. Für Speisekartoffeln werden praktisch keine Kaltlagerräume errichtet. Neuerdings wurde jedoch aus England von Versuchen berichtet, Körnerkühlgeräte für die Kühlung von Speisekartoffeln einzusetzen [3]. Die Kartoffeln waren in improvisierten offenen Lagern aus Strohhallen, eingefaßt mit Bitumenpapier, untergebracht und wurden durch fahrbare Getreidekühler gekühlt. Die Ergebnisse waren sehr zufriedenstellend; man fand einen um 50% geringeren Wasserverlust als in vergleichbaren, ungekühlten Lagern. Damit konnte auch das Zusammenquetschen der Früchte in den unteren Schichten vermieden werden. Diese Beobachtung wurde bereit vor Jahren in einem Großversuch gemacht, der dem Einfluß hoher Schüttung bei der Kaltlagerung von Speisekartoffeln galt [10]. Die Erkenntnisse sind besonders für die intermittierende Kühlung von Bedeutung, denn für diese sind große Schütthöhen erforderlich, um das Kühlvermögen der Luft auszuschöpfen. Der Einsatz von Körnerkühlgeräten für einen solchen Verwendungszweck rückt damit in den Bereich der realen und zweifellos vielerorts gebotenen Möglichkeiten.

Ausführungen von Kühlgeräten

Serienmäßig hergestellte Kältesätze für die Kühlkonservierung gibt es mangels anderer Anwendungen bis heute nur für Getreide. Sie würden für andere Güter im Prinzip sicher gleich ausgeführt werden können. Konstruktiv werden sich jedoch die Körnerkühlgeräte in einem wesentlichen Bauteil von Geräten für grobstückige Güter unterscheiden, nämlich im Kaltluftgebläse. Hierfür wird wegen der hohen erforderlichen Pressungen bei Getreide gewöhnlich ein Mitteldruck-Radialgebläse verwendet. Dieses beeinflusst die konstruktive Gestaltung des ganzen Gerätes insofern, als solche Gebläse kleine Ansaug- und Ausblasquerschnitte besitzen, die für eine verlustarme Erweiterung auf die wesentlich größeren Luftkühlerquerschnitte je nach der Reihenfolge im Luftweg sehr unterschiedliche Längen benötigen. Den teuren und platzraubenden Diffusor vermeidet man bei der Reihenfolge Luftkühler—Gebläse. Man nimmt damit allerdings thermodynamisch einen Nachteil in Kauf: die Wiedererwärmung infolge der Gebläsearbeit muß durch eine entsprechend tiefere Kühlung der Luft zuvor ausgeglichen werden. Das aber bedeutet eine tiefere Verdampfungstemperatur und dadurch eine geringere spezifische und auch volumetrische Kälteleistung. Andererseits besitzt diese Schaltung unter Umständen einen Vorteil, dann nämlich, wenn das Gerät vorwiegend für die Kühlung von getrocknetem Getreide eingesetzt wird. Die Nachwärmung durch die Gebläsearbeit verhindert dann eine Anfeuchtung des Getreides durch die sonst annähernd gesättigt eintretende Kaltluft. Für den Normalfall der eigentlichen Kühlkonservierung ist indessen die umgekehrte Schaltung, d. h. die Reihenfolge Gebläse—Luftkühler, geeigneter, weil nicht nur der thermodynamische Vorteil der höheren Verdampfungstemperatur genützt wird, sondern auch der Vorteil des mäßigen Trocknungseffektes.

Ein Körnerkühlgerät in der letztgenannten Ausführung zeigt **Bild 13** beim Einsatz an einer Silozelle. Deutlich ist der Diffusor zwischen Radialgebläse und Luftkühler zu erkennen, der hier in platzsparender Weise in einer Kanallenkung untergebracht ist. Das Gerät ist fahrbar zur bequemen Ortsveränderung. Nur große Geräte werden stationär ausgeführt, so daß Luftkanäle anstelle der Faltschläuche erforderlich werden. Fahrbare Geräte werden bis zu Tagesleistungen von etwa 150 t

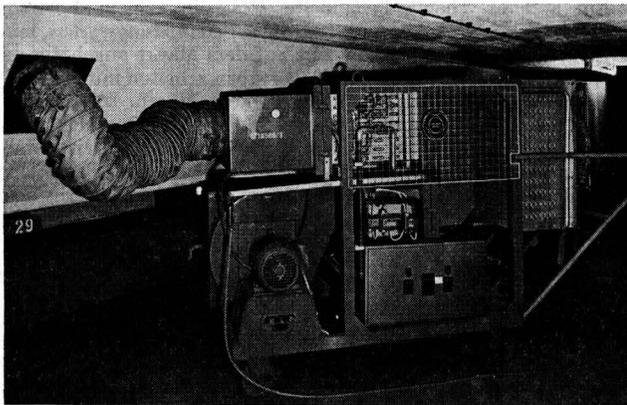


Bild 13. Körnerkühlgerät für 60 Tagestonnen bei Anschluß an Silozelle.

(Bauart Escher Wyss)

gebaut. Sie besitzen luftgekühlte Verflüssiger, die jedoch so angeordnet werden, daß die warme Abluft nicht vom Kaltluftgebläse angesaugt werden kann. Die Leistungen der Kältesätze haben eine Größenordnung von 0,1 bis 0,15 PS je Tonne und Tag gekühlten Getreides.

Ein Körnerkühlgerät für kleinere Leistungen und für gleichzeitiges Kühlen und Trocknen zeigt **Bild 14**. Kühl- und Trocknungsteil sind mit zweistufigen Axialgebläsen ausgerüstet, die eine für die verschiedenen Schaltungen (Parallelbetrieb von Heizen und Kühlen, Serienbetrieb, alleiniges Kühlen oder auch Heizen) funktional besonders geeignete Bauweise ermöglichen. Es ist für den Einsatz in landwirtschaftlichen Großbetrieben bestimmt.

Zusammenfassung

Mit der Entwicklung der Kühlkonservierung steht ein neues Lagerverfahren für Massengüter zur Verfügung, das sowohl für die kurzzeitige Zwischenlagerung erntefeuchter Produkte bis zur Vollkonservierung oder Verarbeitung geeignet ist als auch für eine längerfristige Vorratshaltung. Es ist gegenüber den bekannten Kaltlagerverfahren dadurch gekennzeichnet, daß es ohne Kälteisolierung des Lagerraumes und nur mit intermittierender Kühlung auskommt. Für Körnerfrüchte eignet sich das Verfahren besonders gut, da die biologischen und die technologischen Voraussetzungen gleichermaßen günstig sind: die erforderliche Abkühlung ist gering, der Wärmeaustausch beim Kühlen intensiv und die Geschwindigkeit der Wiedererwärmung niedrig. So ist mit einem geringen Energieaufwand auszukommen, der sowohl bei der Zwischenlagerung wie auch bei der längerfristigen Lagerung deutliche Kostenvorteile gegenüber dem bisher ausschließlichen Konservierungsverfahren, der Trocknung, bietet.

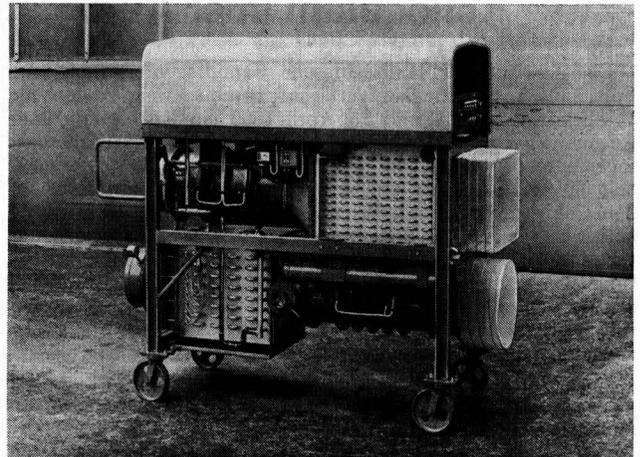


Bild 14. Körnerkühlgerät für 30 Tagestonnen, kombiniert mit Trocknungsteil.

(Bauart Escher Wyss)

Die Intensität des Wärmeaustausches beim Kühlprozeß beruht auf der Koppelung mit einem gleichzeitigen Stoffaustausch zwischen Luft und Gut, der in zweifacher Weise die Wirkung des Verfahrens verbessert, einmal durch den zusätzlichen Wärmeentzug infolge Verdunstungskühlung und zum anderen durch den damit verbundenen Trocknungseffekt. Das Wärmeaufnahmevermögen der Kühlluft wird dadurch z. B. bei Feuchtgetreide praktisch verdoppelt gegenüber dem bloßen Austausch fühlbarer Wärme. Hingegen ist die Anfangstemperatur bei der Abkühlung von untergeordneter Bedeutung für den Energieaufwand. Das Verfahren unterscheidet sich also in wesentlichen Punkten von den Gegebenheiten üblicher Kühlprozesse.

Schrifttum

- [1] *Agena, M. U.*: Untersuchungen über die Kälteeinwirkungen auf lagernde Getreidefrüchte mit verschiedenem Wassergehalt. Diss. Univ. Bonn 1961.
- [2] *Bagert, K.*: Die Belüftung von Zuckerrübenmieten. Diss. Univ. Bonn 1960.
- [3] *Cherry, M.*: Potatoes without damage. *Farmer and Stockbreeder* **80** (1966) Nr. 3984, S. 39 und 41 (19. April 1966).
- [4] *Cherry, M.*: The chill sets in. *Progress and problems in grain cooling*. *Farmer and Stockbreeder* **80** (1966) S. 58/61, 62. (1. November 1966).
- [5] *Foster, G. H.*: Moisture changes during aeration of grain. *Transactions ASAE* **10** (1967) Nr. 3, S. 344/47, 351.
- [6] *Ihne, H.*: Vor- und Nachteile der Kühlkonservierung von Getreide. *Mühle* **104** (1967) H. 42, S. 542/44.
- [7] *Isaacs, G. W.*, und *A. Scheuermann*: Die Berechnung von landwirtschaftlichen Trocknungsanlagen mit dicken Schüttgutschichten. *Landtechn. Forsch.* **14** (1964) H. 4, S. 111/20.

- [8] *Jouin, C.*: Grundlegende Kalkulationen für die Belüftung des Getreides. *Getreide und Mehl* **14** (1964) H. 6, S. 64/70.
- [9] *Klapp, E.*: Mathematische Behandlung der Vorgänge bei der Belüftung von Zuckerrübenstapeln. *Z. f. d. Zuckerindustrie* **12** (1962) S. 246/50.
- [10] *Nicolaisen-Scupin, L. und N.*: Versuche zur Feststellung des Einflusses hoher Schüttung bei der Kaltlagerung von Speisekartoffeln. *Kältetechnik* **6** (1954) S. 311 und 335.
- [11] *Schäfer, W., und L. Altrogge*: Wissenschaft und Praxis der Getreidekonditionierung. Detmold: Schäfer 1960. S. 20.
- [12] *Scholz, B.*: Atmungsverluste bei Weizen in Abhängigkeit von der Temperatur, Lagerzeit und Wassergehalt des Getreides. Diss. Univ. Bonn 1960.
- [13] *Vajna, S., K. Bagert und H. Heidt*: Zwangsbelüftung von Zuckerrübenstapeln. *Z. f. d. Zuckerindustrie* **9** (1959) S. 87/99.
- [14] *Vajna, S.*: Ergebnisse halbtechnischer Versuche mit einer neuen Rübenlagerungsmethode. *Z. f. d. Zuckerindustrie* **10** (1960) S. 401/10.
- [15] Zentrale Untersuchungsstelle für Getreidelagerung und -umschlag, Magdeburg-Frohse: Neue Methoden der Vorkonservierung von Getreide mit Körnerkühlgeräten. *Agroforum* (1967) Heft 2.

Bildnachweis: Bild 3, 4, 6, 9 bis 14 sind Werkbilder der Fa. Escher Wyss GmbH, Lindau.

AUS FORSCHUNG UND LEHRE

DK 621-5

Kolloquium über Automatisierung in der Landtechnik

Das Institut für landtechnische Grundlagenforschung der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode veranstaltete am 24. und 25. April 1969 ein Kolloquium über Automatisierung in der Landtechnik, an dem 80 Entwicklungsingenieure der deutschen Landmaschinenindustrie teilnahmen. Seit einigen Jahren arbeitet das Institut schwerpunktmäßig auf dem Gebiet der Automatisierung. Dieses Forschungsgebiet wurde aufgenommen, weil bei dem zu erwartenden vielschichtigen Strukturwandel in der Landwirtschaft die Technik durch Automatisierung von Arbeits- und Produktionsprozessen einen wichtigen Beitrag leisten kann. In Zukunft werden viele technische Neuerungen in der Landtechnik durch das Streben nach Automatisierung, d. h. Erleichterung der Arbeit, gekennzeichnet sein.

Das Kolloquium war als eine Gesprächs- und Diskussionsveranstaltung zwischen den Ingenieuren der Landmaschinenindustrie und den wissenschaftlich arbeitenden Ingenieuren des Institutes gedacht. Die Mitarbeiter des Institutes berichteten über bearbeitete und laufende Forschungsvorhaben, wobei die diesen Forschungsvorhaben zugrunde liegenden Vorstellungen und Ideen den Ausgangspunkt für den Gedankenaustausch bildeten.

Das Kolloquium wurde vom Direktor des Institutes, Professor Dr.-Ing. W. Batel, mit einem Vortrag über „Einfluß technischer Produktionsmittel auf die Struktur landwirtschaftlicher Betriebe unter besonderer Berücksichtigung der Automatisierung“ eingeleitet. Batel vertrat die Auffassung, daß in modernen Industriestaaten eine anhaltende Durchdringung der landwirtschaftlichen Produktion mit technischen Produktionsmitteln (einschließlich des technischen know-how) erfolgen muß, wenn die Einkommenserwartungen erfüllt werden sollen. Die Geschwindigkeit dieses Vorganges wird letztlich vom technischen Fortschritt diktiert. Die zwangsläufige Folge dieser Entwicklung ist — von Ausnahmen abgesehen — eine stete Vergrößerung der Betriebseinheiten, was durch Schaubilder belegt wurde. Diese Strukturänderung, die auch eine Automatisierung einschließt, wird sich im Bereich der Verarbeitung schneller vollziehen als in der Pflanzenproduktion.

Über eine elektro-hydraulische Tiefenregelung für Anbaupflüge berichtete Horst Hesse. In seinem Vortrag: „Ein elektro-hydraulisches System zur Regelung der Pflugtiefe“ wurden der Aufbau und die Funktion eines im Institut entwickelten Regelungssystems erklärt. Der wesentliche Vorteil elektro-hydraulischer Regelungssysteme liegt in der Flexibilität ihres Aufbaues und in der Einfachheit, Meßwerte zu übertragen und zu verarbeiten sowie darin, daß alle Bedienungs- und Kontrollelemente zentral zusammengefaßt werden können. Dadurch wird eine bedeutende Vereinfachung und Erleichterung der Bedienung erreicht. Vor allem bei der zu erwartenden zunehmenden Komplexiertheit von Regelungssystemen in der Landtechnik kommt den elektro-hydraulischen Systemen zunehmend Bedeutung zu.

Horst Hesse und Rudolf Möller referierten dann über zwei neu aufgenommene Forschungsvorhaben. In seinem Vortrag „Zweikomponentenregelung von mehrscharigen Anbaupflügen“ legte Hesse dar, daß bei mehrscharigen Anbaupflügen, die auf unebenen Böden mit konventionellen Regelungen geregelt werden, besonders am hinteren Körper große Tiefenschwankungen auftreten, was auf den starren Drei-Punkt-Anbau zurückzuführen ist. Dem kann mit einer Zweikomponentenregelung begegnet werden. Bei dieser Regelung wird die Pflugtiefe am vorderen und hinteren

Körper gemessen. Mit dem Meßwert am vorderen Körper wird der vorhandene Hubzylinder betätigt, während mit dem Meßwert am hinteren Körper ein Zylinder verstellt wird, der anstelle des Oberlenkers eingebaut werden soll. Die ersten experimentellen Untersuchungen dieses Systems werden noch im Jahre 1969 durchgeführt.

Wie bei Aufsattelpflügen die Triebachsbelastung erhöht werden kann, darüber berichtete Möller in seinem Vortrag „Triebachslasterhöhung bei Aufsattelpflügen“. Bei Aufsattelpflügen wird — im Gegensatz zu geregelten Anbaupflügen — nicht die maximal mögliche Triebachsbelastung erreicht. Es wird heute versucht, die Triebachsbelastung mit Hilfe von Federn vorzunehmen; die Einstellung solcher Federn ist aber nur schwer möglich. Es soll deshalb versucht werden, die Triebachslast mit Hilfe eines hydraulischen Zylinders, der als Oberlenker verwendet wird, zu erhöhen. Der Zylinder soll dabei mit Hilfe eines Druckservoventils mit bestimmtem Druck beaufschlagt werden, so daß er wie ein Zugglied wirkt. Da hierbei die Grenze für die Triebachsbelastung durch die Lenkfähigkeit (Vorderachsentlastung) gegeben wird, ist daran gedacht, die Vorderachslast zu messen und den Druck im Oberlenkerzylinder automatisch mit dem Servoventil einzustellen.

Ein anderes Thema behandelte Hesse in seinem Vortrag „Ein automatisches Nachführungs- und Vereinzlungssystem mit kapazitiven Fühlern“. Die zur Zeit auf dem Markt angebotenen Systeme zur Vereinzlung von Zuckerrüben arbeiten mit elektromechanischen Kontakt- oder Leitfähigkeitsfühlern. Im Institut wurde ein Vereinzlungssystem entwickelt und untersucht, das mit kapazitiven Fühlern arbeitet. Mit diesen Fühlern ist unter bestimmten Bedingungen eine berührungslose Abtastung der Pflanzen möglich, so daß das Problem der Höhenführung der Fühler über den Pflanzen weniger schwierig wird.

Mit den gleichen Fühlern wurde ein System zur automatischen Nachführung von Werkzeugen an Pflanzenreihen entwickelt und untersucht. Die Messung der Lage des Werkzeugrahmens relativ zur Pflanzenreihe wird mit zwei kapazitiven Fühlern durchgeführt, wobei je einer links und rechts von der Reihe angeordnet ist. Das Nachführsystem ist so aufgebaut, daß immer, wenn einer der Fühler ein Signal abgibt, ein Stellschritt konstanter Größe zur Korrektur der Fehler in die entsprechende Richtung vorgenommen wird. Damit wurde bei Versuchen in einer Bodenrinne eine Führungsgenauigkeit erreicht, bei der alle Pflanzen innerhalb eines Bereichs (Schonzone) von ± 40 mm um die Werkzeugmitte liegen.

Gerhard Jahns berichtete über „Ein Leit- und Regelungssystem zur automatischen Lenkung von Landmaschinen“. Aus der Vielzahl möglicher Leitsysteme wurde zunächst ein System mit Leitkabel und induktiver Abtastung gewählt und im Institut aufgebaut. Dieses Leitkabel-System wird bereits auf Erprobungsbahnen und bei Flurförderern mit Erfolg angewendet. Das Regelungssystem zur automatischen Lenkung ist als elektro-hydraulisches Drei-Punkt-System ausgeführt. Im Institut soll zunächst durch Messung der Bewegung eines Fahrzeugs relativ zu dem Leitkabel die Übertragungsfunktion des Fahrzeugs ermittelt werden, da erst dann die Wahl und optimale Auslegung eines Reglers für die automatische Lenkung erfolgen kann. Solche Regler werden adaptive Regler sein müssen, die sich selbstständig verschiedenen Betriebsbedingungen, wie der Änderung der Fahrgeschwindigkeit, der Reibungskoeffizient zwischen Reifen und Fahrbahn