

Gegenüber der Bodenheuerwerbung bietet die Heubelüftungstechnik große Vorteile. Um jedoch den Nutzen durch die neue Technik voll ausschöpfen zu können, ist es notwendig, bei der Gebläseauswahl und beim Gebläseeinsatz die jeweils wirtschaftlichste der vielen technisch möglichen Lösungen anzuwenden.

Im folgenden werden einige Ausführungen über verschiedene Teilgebiete der Heubelüftungstechnik gemacht. Nach einer Erläuterung der Gebläseeigenschaften wird in Verbindung mit dem Strömungswiderstand der belüfteten Heuschicht gezeigt, welche Gebläsearten für die Heubelüftung und andere Zwecke der Landwirtschaft jeweils am günstigsten sind. Auf Grund der Messung des Temperaturverlaufs im belüfteten Heustapel werden einige neue Erkenntnisse über den Trocknungsverlauf des Stapels mitgeteilt. Anschließend wird der Einfluß der Himmelsrichtung auf den zweckmäßigen Einbau des Gebläses näher erläutert.

Die gewonnenen Erkenntnisse gestatten schließlich, einige Empfehlungen über Gebläseauswahl und Betriebsweise der Heubelüftungsanlage sowie über den Einbau des Gebläses zu geben.

1. Lufttransport und Gebläseauswahl

1.1. Aufbau und Wirkungsweise einer Heubelüftungsanlage

In Bild 1 ist eine normale Heubelüftungsanlage dargestellt, die aus Ventilator, Kanal und Rost besteht. Der Ventilator saugt aus der Atmosphäre trockene Luft an und fördert sie unter Druckerhöhung in den Kanal und unter den Rost der Belüftungsanlage. Während ihres Durchströmens durch den Stapel nimmt die Luft Feuchtigkeit aus dem Heu auf. In bezug auf die Wasserumsetzungen können im Heustapel drei Heuschichten unterschieden werden. Die untere Schicht besteht aus bereits getrocknetem Heu, das mit der eintretenden Luft keinen nennenswerten Wasseraustausch vornimmt. Darüber liegt die eigentliche, langsam nach oben wandernde Trocknungszone, in der sich die Luft mit Feuchtigkeit belädt und das Heu getrocknet wird. Den Abschluß bildet die Zone noch feuchten Heues, die mit der nunmehr feuchten Luft praktisch im Gleichgewicht steht. Eine bemerkenswerte Feuchtigkeitsumsetzung erfolgt hier nicht mehr. Bei ungünstigen Bedingungen können in der obersten Schicht Kondensationserscheinungen auftreten, die aber dann aufhören, wenn die Trocknungszone bei ihrer Wanderung nach oben die Stapeloberfläche erreicht hat.

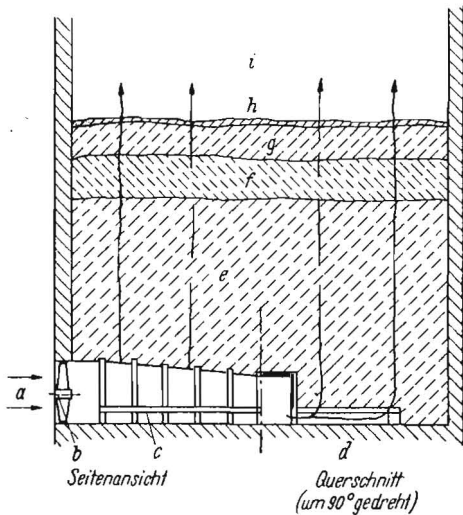


Bild 1. Trocknung in einer belüfteten Heuschicht; die Trocknungszone wandert langsam nach oben (schem.).
a Luft, b Lüfter, c Kanal, d Rost, e trockenes Heu, f Trocknungszone, g feuchtes Heu, h Kondensationszone, i Abluft

Der Druckverlauf der strömenden Luft hängt von den Eigenschaften des Gebläses und den verschiedenen Strömungswiderständen ab. Bild 2 zeigt ganz schematisch den Druckverlauf in einer Belüftungsanlage. Durch das Gebläse entsteht eine Druckerhöhung von etwa 10 bis 20 mm WS; der Gesamtdruck setzt

sich aus dem statischen und dem dynamischen Druck zusammen. Von seinem Höchstwert an fällt der Druck, verursacht durch die Verluste im Kanal, im Rost und im Heu, laufend ab. Der größte Druckabfall herrscht im Heu; bei guter Ausführung der Anlage können die anderen Druckabfälle vernachlässigt werden.

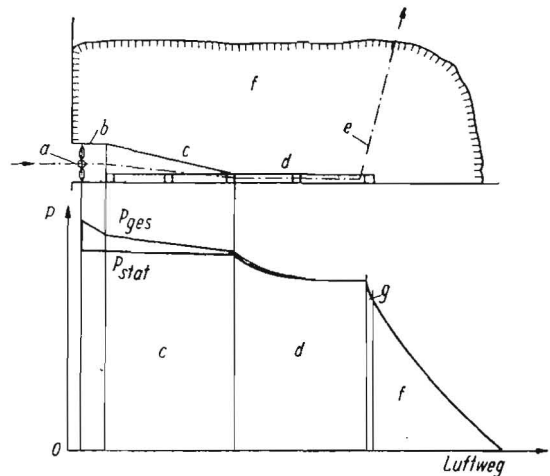


Bild 2. Druckverlauf in einer Heubelüftungsanlage (schem.).
a Lüfter, b Verbindungsstück, c Kanal, d Rost, e Luftweg, f Heu, g Übergang Rost-Heu

1.2. Die Eigenschaften der Gebläse

Von einem zweckmäßig eingesetzten Gebläse wird gefordert, daß es die notwendige Luftmenge bei dem durch den Verbraucher bestimmten Überdruck zu liefern imstande ist, wobei die Energie zum Antrieb des Gebläses möglichst niedrig sein soll. Die aus dem Motor kommende mechanische Energie wird restlos dem Lüfterrad und damit der verarbeiteten Luft mitgeteilt, und zwar als

- Erhöhung des statischen Druckes (potentielle Energie),
- Erhöhung des dynamischen Druckes (Bewegungsenergie),
- Erhöhung der Temperatur durch Reibung und Kompression (Wärmeenergie).

Die Summe aus statischem und dynamischem Druck ist der Gesamtdruck. Was sie bedeuten, läßt sich am besten am Meßverfahren demonstrieren (Bild 3). Das Meßinstrument ist ein mit Wasser gefülltes U-Rohrmanometer, der Meßgeber ein Prandtl-Staurohr. Mißt man den Druck, der zwischen der Außenluft und der am Prandtl-Rohr vorbeistreichenden Luft c herrscht, so wird der statische Druck angezeigt. Wird der Staudruck gegenüber dem Außendruck gemessen a, so ergibt sich der Gesamtdruck. Die Differenz aus beiden Messungen ist der dynamische Druck. Die Differenz aus beiden Messungen ist der dynamische Druck. Die Differenz aus beiden Messungen ist der dynamische Druck. Die Differenz aus beiden Messungen ist der dynamische Druck.

Zur Ermittlung der Gebläseeigenschaften wurde im Institut für Landtechnik ein einfacher Gebläseprüfstand gebaut, mit

*) Institut für Landtechnik Potsdam-Bornim der Deutschen Akademie der Landwirtschaftswissenschaften zu Berlin.

dessen Hilfe die die Praxis interessierenden Eigenschaften von mehreren Heubelüftungsgebläsen ermittelt wurden (Bild 4).

Der Prüfstand besteht im wesentlichen aus einem Rohr von 1 m Durchmesser und 12 m Länge, an dessen einem Ende das zu untersuchende Gebläse befestigt wird. Nach dem Passieren des Gleichrichters, der den Drall des Luftstromes beseitigen

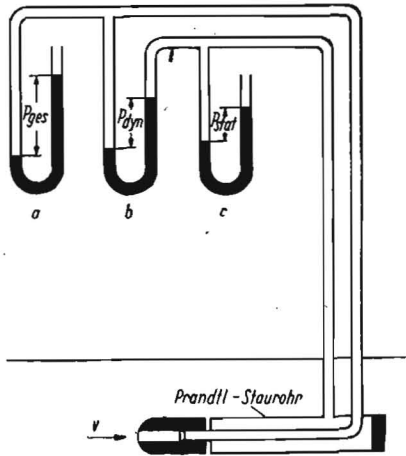


Bild 3. Druckmessung in strömender Luft mit Prandtl-Staurohr und U-Rohr-Manometer.

- a = P_{ges} Gesamtdruck,
- b = P_{dyn} dynamischer Druck,
- c = P_{stat} statischer Druck

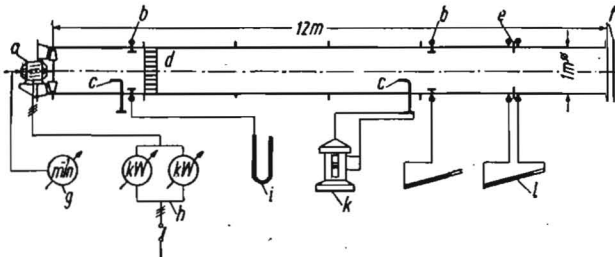


Bild 4. Gebläseprüfstand für Axialgebläse, Meßgeräteanordnung (schem.)
a Gebläse, b Meßplatten für statischen Druck, c Prandtl-Staurohre, d Gleichrichter, e Meßblende, f Stauplatte, g Drehzahlmesser, h Leistungsmesser, i U-Rohrmanometer, k Wassersäulenminimeter, l Schrägröhrmanometer

soll, durchläuft die Luft eine 8 m lange Beruhigungsstrecke. Die eigentliche Luftmengenmessung erfolgt mit Hilfe einer Blende; aus dem Druckunterschied vor und hinter der Blendenöffnung kann man sehr genau die Luftmenge errechnen. Nähere Angaben finden sich in den VDI-Durchflußmeßregeln (DIN 1952). An verschiedenen Stellen des Rohrs wird der statische Druck gemessen. Mit einem Prandtl-Rohr können einzelne Punkte der Strömung abgetastet werden. Zur Druckanzeige dienen U-Rohrmanometer, Schrägröhrmanometer und ein Wassersäulen-Minimeter. Die Luftmenge kann durch eine am Ende des Rohrs befindliche Stauscheibe verändert werden. Der Verbrauch des Gebläses an Elektroenergie wird nach der Zwei-Wattmeter-Methode gemessen. Bei der Messung wird die gesamte Einheit Motor-Gebläse betrachtet.

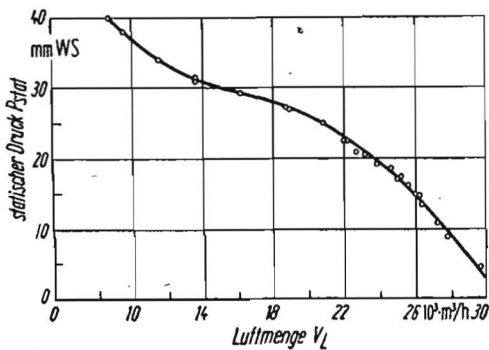


Bild 5. Axialgebläse SK 8 (900 mm \varnothing , 940 U/min) des VEB Turbowerke Meißen, gemessener Druckverlauf

Bild 6. Axialgebläse SK 8 (900 mm \varnothing , 940 U/min) des VEB Turbowerke Meißen, gemessener Leistungsbedarf bei Verwendung eines 3,5-kW-Motors

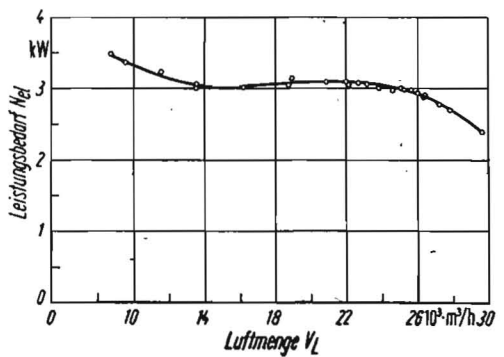


Bild 5 zeigt die auf dem Prüfstand des Instituts ermittelte Kennlinie des in der DDR verwendeten Standardgebläses für die Heubelüftung SK 9 900 mm Dmr. 940 U/min des VEB Turbowerke Meißen.

Es liefert bei 20 mm WS statischem Druck etwa 6,5 m³/s Luft und bei 15 mm WS etwa 7,3 m³/s Luft. Bei höheren Luftmengen sinkt der Luftdruck. In Bild 6 ist der Verbrauch an Elektroenergie bei Verwendung eines 3,5-kW-Motors dargestellt. Kennzeichnend für Axialgebläse ist die relativ gleichmäßige Leistungsaufnahme.

Aus Luftdruck, Luftmenge und Leistungsaufnahme läßt sich der Wirkungsgrad eines Gebläses errechnen. Bild 7 zeigt ihn für das Gebläse SK 8. Wird kein Diffusor verwendet, so kann die kinetische Energie nicht nutzbar gemacht werden. In diesem Falle gilt die Kurve für den statischen Druck. Hält man auch den dynamischen Druck dem Gebläse zugute, so ergeben sich höhere Wirkungsgrade, wie man an der Kurve für den Gesamtdruck erkennen kann. Es werden beim Gebläse SK 8 Maximalwerte des Gesamtwirkungsgrades zwischen 55 und 60% erreicht. Das ist für diese Gebläsegrößenklasse als recht gut anzusehen.

Verwendet man einen Diffusor, so kann man einen Teil der Wirkungsgraddifferenz nutzbar machen. Der Nutzen darf aber hierbei nicht überschätzt werden.

Außer der groben Einteilung in Axial- und Radialgebläse gibt es noch viele Abweichungen der einzelnen Gebläse untereinander; z. B. Schaufel- bzw. Flügelanzahl, Außen- und Innendurchmesser, Eintritts- und Austrittswinkel, Schaufelprofil, Oberflächenrauigkeit usw. Für zwei geometrisch ähnliche Gebläse bleibt jedoch eine bestimmte Kennzahl σ konstant, die sich (nach ECK) aus Drehzahl, Druck und Luftmenge im Wirkungsgradoptimum errechnet:

$$\sigma = \frac{1}{28,5} \frac{V^{0,5}}{(\Delta P/\rho)^{0,75}} \cdot n$$

- V m³/s Luftmenge
- ΔP kp/m² Druck
- n U/min Drehzahl
- ρ kg/m³ Dichte der Luft

Für die Umrechnung auf die auf 1 m³/s und 1 m Wasserhöhe bezogene spezifische Drehzahl n_q gilt:

$$n_q = 158,1 \cdot \sigma$$

Mit Hilfe dieser Kennzahl können Aussagen über den wirtschaftlichen Einsatz von Gebläsen gemacht werden.

1.3. Der Strömungswiderstand des Gutes

Die umfassenden Untersuchungen von MATTHIES ergaben, daß der Druckverlust je m Strömungsweg der durchströmten Schüttgutschicht von den geometrischen Eigenschaften des Gutes, vom Hohlraumvolumen und von der Strömungsgeschwindigkeit abhängig ist. Es ergab sich der formelmäßige Zusammenhang:

$$\Delta P = k \cdot \xi_k \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon^4} \cdot \frac{h}{d_k} \cdot \frac{\rho L w^2}{2 g n} \right)$$

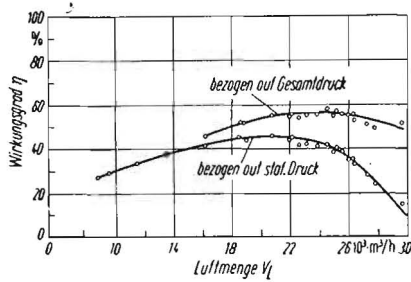


Bild 7
 Axialgebläse SK 8 (900 mm \varnothing , 940 U/min) des VEB Turbowerke Meißen, aus Druckverlauf und Leistungsbedarf errechneter Wirkungsgrad bei Verwendung eines 3,5-kW-Motors

- ΔP kp/m^2 Druckverlust
- k - Stoffkonstante
- ξ_{k_s} - Widerstandsbeiwert von Kugelschüttungen
- ϵ m^3/m^3 Porenvolumen der Schüttung
- h m Schütthöhe
- d_k m äquivalenter Kugeldurchmesser
- ρ_L kg/m^3 Dichte der Luft
- w m/s Luftgeschwindigkeit im frei gedachten Querschnitt

$g_N = 9,81 \frac{\text{kgm}}{\text{kps}^2}$ Umrechnungskonstante

Der Widerstandsbeiwert ξ_{k_s} hängt dabei von der Reynolds-Zahl Re ab:

$$\xi_{k_s} = C_0 \cdot Re^{-n}$$

Der Exponent n liegt zwischen 1 (rein laminare Strömung) und 0 (rein turbulente Strömung). Für Heu liegt er bei 0,45.

Die Betrachtungsweise vereinfacht sich stark, wenn an Stelle der Formel die Widerstandskurve für praktische Fälle in ein Diagramm eingetragen wird (Bild 8).

1.4. Die Einsatzbereiche der Gebläse

Der Betriebspunkt eines Gebläses ergibt sich aus dem Schnittpunkt seiner Kennlinie mit der Widerstandskurve. In Bild 8 wurden die Kennlinien des Axialgebläses SK 8 und des Radialgebläses NE 700 eingetragen. Sie haben einen annähernd übereinstimmenden Kennlinienverlauf.

Ein Vergleich der Kennlinien von Axialgebläse und Radialgebläse zeigt die typischen Unterschiede der zwei Bauarten. Beim Radialgebläse liegt das Gebiet des besten Wirkungsgrades bei höherem Druck und niedrigerer Luftmenge als beim Axialgebläse.

Wie man sieht, ist das Gebläse SK 8 (900 Dmr.) für eine Belüftungsfläche von 100 m^2 und 6 m Stapelhöhe bei einer geforderten Luftmenge von $0,08 \text{ m}^3/\text{m}^2$ etwas zu klein.

Die wirtschaftliche Zuordnung eines Gebläses zum jeweiligen Belüftungszweck kann an Hand des Wirkungsgradverlaufes

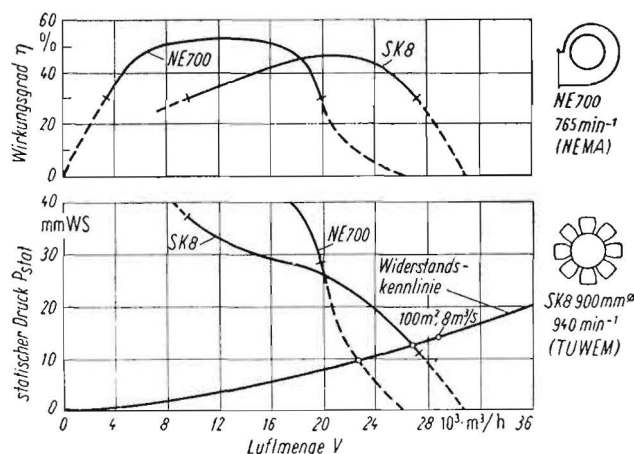


Bild 8. Widerstandskurve einer Heubelüftungsanlage, Druckverlauf und Wirkungsgrad eines Axialgebläses (SK 8) und eines Radialgebläses (NE 700)

vorgenommen werden. Aus Bild 8 ergibt sich anschaulich, daß es völlig abwegig wäre, für die Zwecke der Heubelüftung das Radialgebläse einzusetzen. Der Wirkungsgrad wäre dann katastrophal niedrig, was zu sehr hohen Kosten für den Elektroenergieverbrauch führen würde. Von schwedischer Seite wird darauf hingewiesen, daß die Belüftung von Heu mit einem Radialgebläse (Heufördergebläse) zwar möglich ist, aber eine Vervierfachung der Belüftungskosten verursacht.

In Bild 9 sind die wirtschaftlichen Einsatzbereiche der einzelnen Gebläsebauarten für die verschiedenen Zwecke der Landwirtschaft zusammenfassend dargestellt. Auch hieraus ist eindeutig zu entnehmen, daß die Heubelüftung allein den Axialgebläsen vorbehalten ist.

2. Trocknungsverlauf und Gebläseeinsatz

2.1. Temperaturverlauf im Heustapel

Bei allen Trocknungsvorgängen sind die Wärmeumsetzungen zum Verdampfen von Wasser mit Temperaturänderungen verbunden. Aus den Temperaturänderungen kann man bei Kenntnis der herrschenden Gesetze auf die Wärmeübertragung und die Wasserumsetzungen schließen. Es ist deshalb zu erwarten, daß die Messung der Temperaturen im Heustapel zur Aufklärung des Trocknungsvorganges bei der Heubelüftung beiträgt. Sie wurde von G. ANIANSSON speziell für Heu-

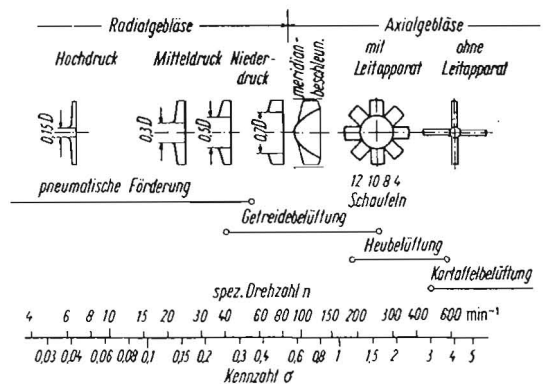


Bild 9. Einsatzbereiche verschiedener Gebläsetypen in der Landwirtschaft in Abhängigkeit von Kennzahl σ bzw. spezifischer Drehzahl n

belüftungsanlagen vorgeschlagen. Wie die Ergebnisse zeigen werden, sind mit dieser Meßmethodik einige neue, bisher nicht bekannte Zusammenhänge ermittelt worden.

Die Messungen selbst sind von REIMER und DEHAME im Rahmen ihrer Diplomarbeit im IFL Potsdam-Bornim durchgeführt worden. Es standen eine Belüftungsanlage unter Dach und eine Belüftungsanlage im Freien (Bild 10) zur Verfügung. Mit Hilfe von Thermoelementen bzw. Widerstandsthermometern wurden die Temperaturen in verschiedenem Abstand vom Rost mit Hilfe von Temperaturschreibern registriert. In Bild 11 ist ein Ausschnitt aus dem Schreibstreifen der Belüftungsanlage im Freien wiedergegeben. Bei näherer Betrachtung erkennt man im Tagesgang der einzelnen Kurven ganz bestimmte Gesetzmäßigkeiten. Besonders auffällig sind die hohen Temperaturspitzen zu Beginn der Belüftungsperiode, wenn nachts das Gebläse abgeschaltet wird. Dabei ist bemerkenswert, daß diejenige Meßstelle, die nachts die höchsten Temperaturen anzeigt, tagsüber bei laufendem Gebläse die niedrigste Temperatur hat. Kurz nach dem Abschalten des Gebläses findet eine ausgeprägte Temperaturumkehr statt, kurzzeitig herrscht überall nahezu die gleiche Temperatur.

Bevor die Deutung und Auswertung des Temperaturverlaufes im Heustapel vorgenommen werden können, sind einige Fragen zu klären:

1. Worauf beruhen die Temperaturdifferenzen zwischen den einzelnen Heuschichten?
2. Welcher Zusammenhang besteht zwischen Temperatur-senkung und Wasseraufnahme der Luft?
3. Welcher Zusammenhang besteht zwischen Temperatur-verlauf und Trocknungsverlauf im Heustapel?

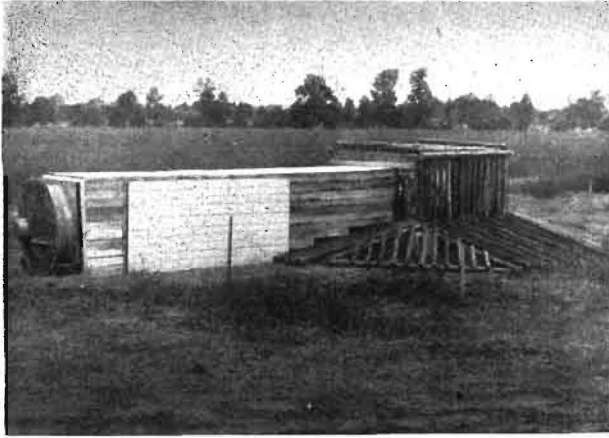


Bild 10. Heubelüftungsanlage für Versuchszwecke im Freien im IFL-Potsdam-Bornim

2.2. Thermodynamische Zusammenhänge

Wenn trockene Luft durch feuchtes Gut strömt, so findet eine Umsetzung von Wärme und Wasser statt. Aus dem Gut wird Wasser verdunstet und von der Luft mitgenommen. Die zur Verdunstung notwendige Wärme wird der Luft entzogen, was eine Abkühlung der Luft zur Folge hat. Betrachtet man die Zustandsänderung der Luft im bekannten Mollier- i, x -Diagramm (Bild 12), so läßt sich daraus ein zahlenmäßiger Zusammenhang zwischen Wasseraufnahme der Luft und Temperatursenkung entnehmen. Die eintretende Luft vom Zustand E strömt durch ein Gut, das entsprechend seiner Sorptionsisotherme mit feuchter Luft der relativen Luftfeuchte φ_a im Gleichgewicht steht.

Die strömende Luft verändert ihren Zustand schließlich bis zum Zustand A , mit dem sie aus dem Stapel austritt. Die Grundgleichung des Mollier- i, x -Diagramms lautet

$$i = (0,24 + 0,46 x) \cdot \vartheta + 597,2 \cdot x$$

i Enthalpie der Luft	[kcal/kg]
x Wassergehalt der Luft	[kg/kg]
ϑ Temperatur	[°C]

Für den Zusammenhang zwischen Temperaturänderung und Wassergehaltsänderung bei einer beliebigen Zustandsänderung ergibt sich daraus:

$$k_x = \frac{\Delta i}{\Delta x} = \frac{597,2 + 0,46 \cdot \vartheta}{0,24 + 0,46 x}$$

Unter den Bedingungen der normalen Konvektionstrocknung verläuft nach der Anlaufzeit die Zustandsänderung der Luft praktisch bei $i = \text{konst.}$ Rechnet man mit einer mittleren

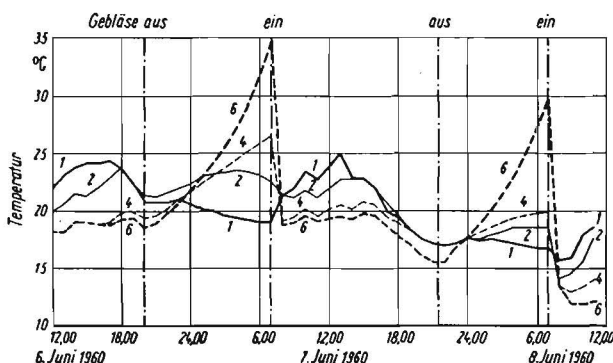


Bild 11. Verlauf der Temperaturen an verschiedenen Stellen im belüfteten Heustapel (Anlage im Freien), Ausschnitt:
 Meßstelle 1: Zuluft
 Meßstelle 2: Heustapel Rostnähe
 Meßstelle 4: Heustapel Mitte
 Meßstelle 6: Heustapel Nähe Oberfläche

Lufttemperatur von 20 °C und einem mittleren Wassergehalt der Luft von 10 g/kg, so kann man den Temperaturgradienten

$$k_x = \left(\frac{\Delta i}{\Delta x} \right) i = - \frac{597,2 + 0,46 \cdot 20}{0,24 + 0,01 \cdot 0,46} = - 2480 \frac{\text{grd}}{\text{kg/kg}}$$

in erster Näherung als eine Konstante ansehen. Für überschlägige Berechnungen genügen folgende Beziehungen:

$$\Delta \vartheta = k_x \cdot \Delta x$$

$$k_x = - 2,5 \text{ grad}/(\text{g/kg})$$

$$1/k_x = - 0,4 (\text{g/kg})/\text{grad}$$

Hiernach entspricht einer Temperatursenkung um 2,5 grad eine Wasseraufnahme der Luft von 1,0 g/kg. Diese Berechnungen

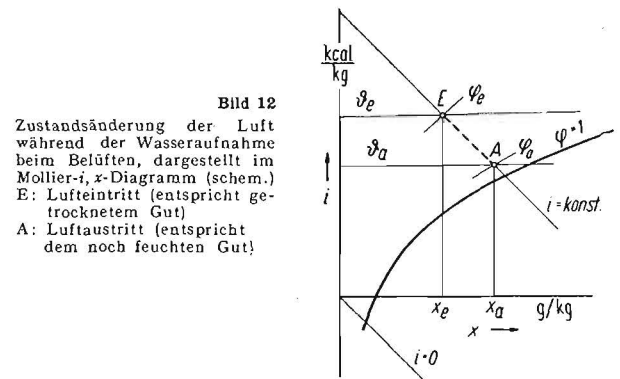


Bild 12
 Zustandsänderung der Luft während der Wasseraufnahme beim Belüften, dargestellt im Mollier- i, x -Diagramm (schem.)
 E: Luftpunkt (entspricht getrocknetem Gut)
 A: Luftaustritt (entspricht dem noch feuchten Gut)

gelten für Luft, die durch den Heustapel strömt, solange das Gebläse eingeschaltet ist.

Bei abgeschaltetem Gebläse tritt eine andere Erscheinung in den Vordergrund, die den Temperaturverlauf im Heustapel nach ihren eigenen Gesetzmäßigkeiten beeinflusst.

In den noch lebenden Zellen von frisch aufgebrachtem Heu wird durch biologische Umsetzungen Wärme frei. Unter günstigen Umständen erhitzt sich das Heu sogar bis zur Selbstentzündung. Jedem Praktiker ist bekannt, daß die Selbsterwärmung um so intensiver auftritt, je feuchter das gelagerte Heu ist.

Das bestätigen auch die gemessenen Temperaturkurven unserer Messung (Bild 11). Betrachtet man die fächerförmige Staffelung der Selbsterwärmungskurven, so erkennt man, daß die höchsten Temperaturen an der Meßstelle 6 auftreten, die in der obersten, noch nicht getrockneten Schicht liegt. Darüber hinaus soll hier ausdrücklich auf den ständig steiler werdenden Temperaturanstieg in den gefährdeten Heuschichten hingewiesen werden. Er zeigt, daß die Selbsterwärmung bei höheren Temperaturen immer intensiver wird. Eine Erwärmung des Heues auf über 35 °C ist mit einer Nährwertminderung verbunden. Schaltet man das Gebläse wieder ein, nachdem die Temperaturen in den feuchten Schichten angestiegen waren, so ist ein zusätzlicher starker Trocknungseffekt zu beobachten.

Weiterhin erkennt man aus dem Temperaturverlauf, daß sich die Temperatur der trocknenden Heuschicht (Meßstelle 4) im Verlaufe der Zeit immer mehr von der Temperatur des feuchten Gutes (6) entfernt. Die geringer werdende Temperaturdifferenz zwischen Zuluft und Meßstelle 4 läßt darauf schließen, daß der Ort der Wasseraufnahme der Luft, der zuerst vorwiegend zwischen Meßstelle 1 und Meßstelle 2 lag, im Verlaufe der fortschreitenden Belüftung zwischen Meßstelle 2 und 4 gelangt. Er macht auch hier nicht halt, sondern wandert weiter. Der Ort der Wasseraufnahme der Luft ist aber gleichzeitig die Stelle, wo das Heu trocknet. Mit Hilfe der Temperaturmessung kann man deshalb auf einfache Weise das Wandern der Trocknungszone im Heustapel verfolgen. Diejenigen Heuschichten, deren Temperaturen der Zulufttemperatur ent-

sprechen, sind bereits trocken, während die Temperaturen der feuchten Heuschichten mit der Ablufttemperatur übereinstimmen. Liegt die Temperatur einer Heuschicht zwischen Zuluft- und Ablufttemperatur, so wandert gerade die Trocknungszone durch die betreffende Schicht.

Zum Vergleich dient eine entsprechende Darstellung der Temperaturkurven in einer Weizenschüttung (Bild 13), die mit Luft konstanten Zustands belüftet wurde. Hier läßt sich der charakteristische Kurvenverlauf besser erkennen.

Bei den Kurven der Heubelüftung ist eine Tatsache auffällig: Strömt trockene Luft durch den Stapel, so sind die feuchten Schichten beträchtlich kühler als die Zuluft. Die Temperaturdifferenzen betragen mitunter über 6 grad. Strömt dagegen feuchte Nachtluft durch bereits getrocknetes Heu, so ist kein

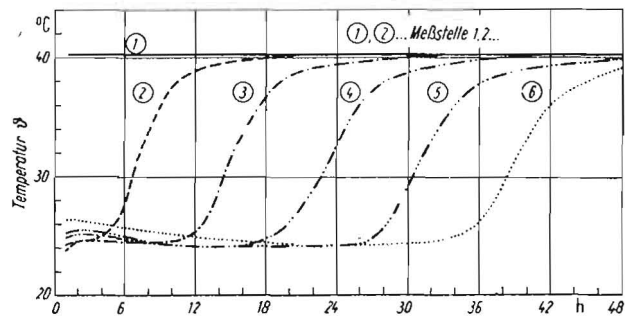


Bild 13. Verlauf der Temperaturen in einer Weizenschüttung bei Belüftung mit trockener Luft konstanten Zustands (Laborversuch)
 Daten: Gut X_T 0,48 kg/kg Luft θ_L 40,2 °C
 X_{Tr} 0,088 bis 0,100 kg/kg θ_K 24,2 °C
 Luftmenge: Gutmenge L_0/G_0 1,5 kg/kg

2. Weil das bereits getrocknete Heu der feuchten einströmenden Luft nur unwesentlich Wasser entzieht, wirkt die Zone bereits trockenen Heues nicht als wirkungsvoller Puffer oder Speicher zum Ausgleich des Luftzustands. Die Trocknungszone wandert bei feuchter Zuluft praktisch nicht vorwärts bzw. die feuchte Luft durchströmt trockenes wie feuchtes Heu nahezu unverändert.

Zur Ergänzung sei hier mitgeteilt, daß auch bei Untersuchungen über das Verhalten von Weizen bei Belüftung mit feuchter Luft ein ganz ähnliches Ergebnis gefunden wurde.

2.4. Statistische Auswertung der Wasseraufnahme der Luft

Um genauere Angaben über die tatsächliche Wasseraufnahme der Luft zu erhalten, wurde von REIMER/DEHAME in der genannten Arbeit der Temperaturverlauf statistisch ausgewertet.

Die zur Auswertung herangezogene Größe war dabei die Temperaturdifferenz zwischen Zuluft und Abluft während der Belüfungszeit. Es sei hier daran erinnert, daß eine Temperatursenkung um 2,5 grad eine Wasseraufnahme der Luft um 1,0 g/kg bedeutet. Die gesamte Belüfungszeit wurde von Stunde zu Stunde ausgewertet.

Bei der Darstellung der statistischen Verteilung erwies es sich als zweckmäßig, die gesamte Belüfungszeit in drei Abschnitte zu unterteilen. Der erste Abschnitt umfaßt diejenige Zeit, in der das Gebläse ununterbrochen Tag und Nacht läuft. Der zweite Abschnitt umfaßt die Zeit, in der nachts das Gebläse abgeschaltet wird und die Trocknungszone noch nicht die Stapeloberfläche erreicht hat. Der dritte Abschnitt schließlich umfaßt die Nachttrocknung, während der die Trocknungszone

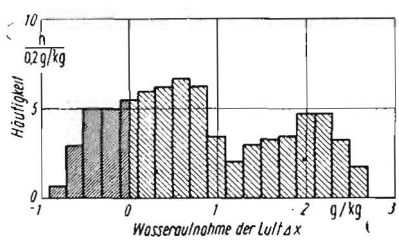


Bild 14. Statistische Verteilung der Wasseraufnahme der Luft im 1. Belüftungsabschnitt (Gebläse ununterbrochen eingeschaltet) (75,5 Betriebsstunden, 2. bis 5. Juni 1960)

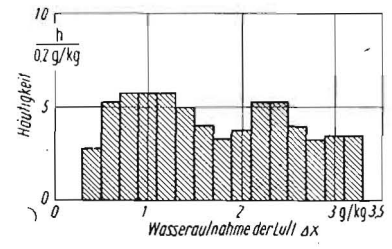


Bild 15. Statistische Verteilung der Wasseraufnahme der Luft im 2. Belüftungsabschnitt (Gebläse tagsüber eingeschaltet) (69 Betriebsstunden, 6. bis 10. Juni 1960)

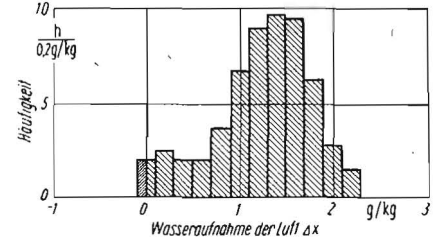


Bild 16. Statistische Verteilung der Wasseraufnahme der Luft im 3. Belüftungsabschnitt (Nachttrocknung) (61 Betriebsstunden, 11. bis 12. Juni 1960)

oder nur ein verschwindend kleiner Temperaturanstieg (maximal 2 grad) zu beobachten. Auf Grund des gefundenen Zusammenhangs zwischen Temperatursenkung und Wasseraufnahme der Luft führt diese Beobachtung zu folgenden Aussagen:

1. Die Wiederbefeuchtung der bereits getrockneten Heuschichten durch feuchte Abend- oder Nachtluft ist entgegen der bisher bestehenden Meinung gering. Der Zustand des gesamten Heustapels wird demnach durch zu spätes Abschalten des Gebläses am Abend nur unwesentlich verschlechtert.

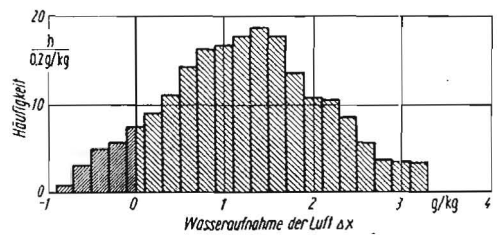


Bild 17. Statistische Verteilung der Wasseraufnahme der Luft während der gesamten Belüfungszeit (205,5 Betriebsstunden, 2. bis 22. Juni 1960)

aus der Stapeloberfläche tritt; in diesem Zeitabschnitt treten keine allzu großen Wassermengen mehr auf.

Die folgenden vier Abbildungen zeigen die statistische Verteilung der Wasseraufnahme der Luft für die Belüftungsanlage im Freien. Eine Klasse umfaßt dabei 0,2 g/kg Wasseraufnahme, das entspricht 0,5 grad Temperaturdifferenz. Das typische Kennzeichen der statistischen Verteilung im ersten Belüftungsabschnitt (Bild 14) sind die zwei deutlich durch eine Senke voneinander getrennten Wasseraufnahmebereiche. Der Bereich hoher Wasseraufnahme rührt von dem guten Trocknungsvermögen der Luft um die Mittagszeit her. Der etwas größere Bereich bei geringerer positiver und auch negativer Wasseraufnahme (Wiederbefeuchtung!) ist das Ergebnis der langen Belüftung in den Abend- und Nachtstunden. Wie man sieht, erreicht die maximale Befeuchtung nicht einmal 1 g/kg, der Flächenanteil der Befeuchtung beträgt nur einen Bruchteil der Gesamtfläche. Der zweite Abschnitt der Belüftung zeigt ein ziemlich ausgeglichenes Bild (Bild 15). Die Senke zwischen den Gebieten hoher (mehr als 2 g/kg) und niedriger Wasseraufnahme (unter 1,5 g/kg) deutet darauf hin, daß es zwischen den Perioden sehr guten und nur mäßig guten Trockenwetters lediglich eine relativ kurze Übergangszeit gibt. Bei richtiger Bedienung der Anlage gibt es überhaupt keine Wiederbefeuchtung, wenn man den Stapel als Ganzes betrachtet. Während

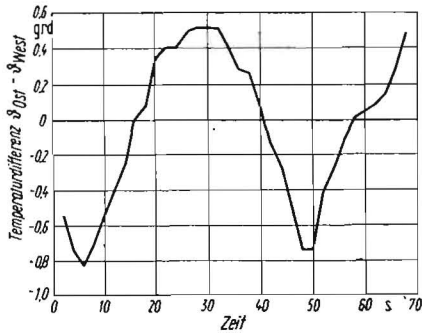


Bild 18
Verlauf der Temperaturdifferenz zwischen Gebläse-Ostseite und Gebläse-Westseite. Ostseite sonnenbeschienen, leichter Westwind

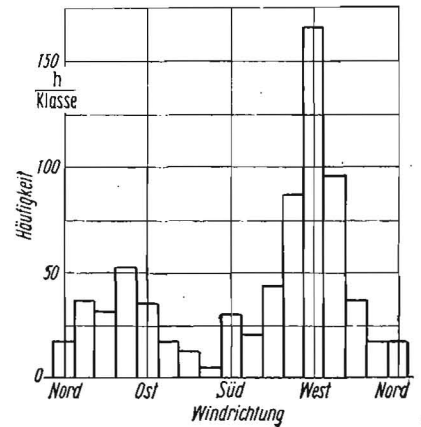


Bild 19
Statistische Verteilung der Windrichtung Juni 1960 (nach WILKE)

des dritten Abschnitts wurden zur Belüftung nur ausgesprochene Schönwetterstunden herangezogen (Bild 16). Das kleine Gebiet geringerer Trocknung zeigt deutlich, daß sich bei nahezu trockenem Stapel immer weniger Stunden des Tages nutzbringend zur Trocknung ausnutzen lassen. Die Darstellung der Gesamtzeit zeigt eine nahezu ideale Häufigkeitsverteilung (Bild 17), ohne daß sich die typischen Kennzeichen der einzelnen Belüftungsabschnitte erkennen lassen.

2.5. Einfluß der Himmelsrichtung

In allen bisher veröffentlichten Vorschriften über den Bau von Belüftungsanlagen wird gesagt, „daß es sich empfiehlt, die Lüfter bevorzugt an der nach Süden gelegenen Wand einzusetzen“. Als Begründung hierfür wird die Ausnutzung der Sonnenstrahlung angeführt.

Im Rahmen seiner Diplomarbeit untersuchte WILKE im Institut für Landtechnik Potsdam-Bornim, in welchem Umfang die Himmelsrichtung des Gebläseeinbaues überhaupt die Belüftungstrocknung beeinflussen kann. Die dabei gewonnenen Ergebnisse führen zu einigen Empfehlungen über den Lüftereinbau, die in gewissen Punkten von den bisherigen Empfehlungen abweichen.

Als Einflußgrößen für den Zustand der angesaugten Luft kommen in Frage:

1. die durch die Sonnenstrahlung in unmittelbarer Nähe des Gebläses erwärmte Luft,
2. die Möglichkeit des Ansaugens von Abluft bei ungünstiger Windrichtung.

Zuerst soll untersucht werden, wie hoch überhaupt die Temperaturerhöhung der Luft durch die Sonnenstrahlung werden kann. Dabei ist zu berücksichtigen, daß durch den stets vorhandenen Wind nicht nur Luft aus der unmittelbaren Umgebung des Gebläses angesaugt wird, sondern auch aus entfernteren Gebieten. Auf Grund verschiedener Annahmen läßt sich die Temperatursteigerung der angesaugten Luft durch den Einfluß der Sonnenstrahlung größenordnungsmäßig berechnen.

Die Strahlungsenergie im Juni an einer Ostwand bei wolkenlosem Himmel beträgt $q_{\text{rag}} = 3400 \text{ kcal/m}^2 \cdot 24 \text{ h}$. Nimmt man an, daß die Strahlung etwa 8 h auf die Ostwand einwirken kann, so ergibt sich eine mittlere stündliche Wärmemenge von $q_h = 425 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$. Nimmt man nun noch an, daß sich die durch das Gebläse hervorgerufene Ansaugströmung und die natürlichen Windbewegungen nach einem quadratischen Gesetz überlagern, so ergeben sich die folgenden möglichen Temperaturerhöhungen in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit

$w = 0,1$	0,3	0,5	1,0	3,0	5,0 m/s
$\Delta\vartheta = 6,1$	2,1	1,25	0,6	0,21	0,13 grad

Da man bei strahlendem Sonnenschein im Juni stets mit Luftbewegungen von 1 m/s und mehr rechnen kann, ist der Temperaturgewinn durch die Sonnenstrahlung praktisch kleiner als 1 grad.

Zur Bestätigung dieser Berechnung dient eine speziell für diesen Zweck angestellte Messung.

Mit Hilfe von zwei Kupfer-Konstantan-Thermoelementen und einem empfindlichen Galvanometer (1 grad entspricht 7,3 Skalentellen) wurde die Temperaturdifferenz zwischen sonnenbeschienener Ostseite und beschatteter Westseite gemessen. Auf beiden Seiten befanden sich Belüftungsanlagen im Betrieb. Es herrschte schwacher, stoßweiser Westwind. Das Ergebnis (Bild 18) zeigt, daß die tatsächlichen Temperaturschwankungen in der erwarteten Größenordnung liegen. Ferner ist zu erkennen, daß zeitweilig der Einfluß der Strahlung auf der Ostseite überwiegt (Temperaturdifferenz positiv), zeitweilig aber durch die kühle, feuchte Abluft, die nach Osten getragen wird, die Temperaturdifferenz negativ wird. Dieser Einfluß ist sogar noch größer als der Strahlungseinfluß. Man erkennt also aus der ganz einfachen Temperaturmessung, daß es bedeutungsvoller ist, beim Einbau der Gebläse die Windrichtung zu berücksichtigen als die Richtung des größten Sonnenscheins. Außerdem muß man bedenken, daß die Sonnenstrahlung nur bei unbewölktem Himmel wirken kann, während die Windrichtung während der gesamten Belüftungsperiode ihren Einfluß ausübt.

Wie groß der Einfluß der Hauptwindrichtung werden kann, zeigt eine Häufigkeitsverteilung der Windrichtung für den Monat Juni (Bild 19). Hier ist ganz eindeutig abzulesen, daß wir in Mitteldeutschland (Potsdam) im Juni vorwiegend mit Westwind rechnen müssen. Daneben hat nur der Ostwind einige Bedeutung.

3. Empfehlungen für die Praxis

Aus den im vorstehenden vorgetragenen Tatsachen und Versuchsergebnissen ergeben sich für die Praxis in bezug auf die Gebläse, die Betriebsweise und den Aufbau von Heubelüftungsanlagen einige Empfehlungen, die dazu beitragen sollen, die Technik der Heubelüftung noch wirtschaftlicher zu gestalten.

3.1. Gebläse-Standardreihe

Um alle vorkommenden Größen von Heulagerflächen mit passenden Gebläsen ausrüsten zu können, wird eine Standardreihe von Heubelüftungsgebläsen vorgeschlagen, die etwa folgende Abstufung haben soll:

Standardgröße	1	2	3
stat. Druck [mm WS]	15	20	20
Luftmenge [m ³ /s]	7,5	10	13
Leistungsbedarf [kW]	≈ 3	≈ 5	≈ 7
Belüftungsfläche [m ²]	80...100	100...130	130...160
Stapelhöhe [m]	5	6	6
Drehzahl [min ⁻¹]	940	max 940	max 940

Die Standardgröße 1 entspricht dem bisher üblichen Gebläse SK 8 (900 mm Dmr., 940 U/min). Der Gesamtwirkungsgrad der Gebläse 2 und 3 soll mindestens 60% betragen.

Noch größere Gebläse als Größe 3 sind unnötig, weil die Gesamtkosten für eine solche Anlage größer würden als mit zwei kleineren Gebläsen.

3.2. Automatisierung

Die Auswertung der Temperaturmessung in Heubelüftungsanlagen hat gezeigt, daß die bereits getrockneten Schichten bei Belüftung mit feuchter Luft nur in äußerst geringem Umfang Wasser aufnehmen. Bei zu spätem Abschalten am Abend wird der Zustand des Heustapels praktisch nicht verschlechtert. Das bedeutet, daß man völlig ohne Schaden für das belüftete Heu auf eine ständige Messung der relativen Luftfeuchtigkeit verzichten und das Schalten nur nach Zeit vornehmen kann, beispielsweise von früh 9 Uhr bis abends 20 Uhr. Für eine Automatisierung des Belüftungsbetriebes bringen diese Tatsachen eine wesentliche Vereinfachung mit sich.

Man kann nämlich das recht komplizierte und störanfällige automatische Schalten nach der jeweils herrschenden Luftfeuchtigkeit durch den Betrieb mit einer Schaltuhr ersetzen. Auf der Schaltuhr wird hierfür lediglich die Einschaltzeit und die Ausschaltzeit eingestellt. Es ist geplant, ab 1963 alle Heubelüftungsgebläse vom Hersteller aus mit einer solchen Schaltuhr auszurüsten. Das ist ein wirtschaftlich voll vertretbarer Aufwand für die hier vorliegende Möglichkeit der Automatisierung.

Zur Kontrolle der Übertemperatur im Heustapel ist ein schnellanzeigendes Thermometer zu entwickeln, das von der Kontrollperson in die gefährdeten Heupartien eingestochen und abgelesen wird. Eine von der Übertemperatur des Heues gesteuerte automatische Gebläseeinschaltung wird abgelehnt, weil sie zu aufwendig und zu umständlich ist.

3.3. Gebläseeinbau und Himmelsrichtung

Theoretische Überlegungen und praktische Messungen haben gezeigt, daß der Einfluß der Sonnenstrahlung auf die Luft erwärmung bei an verschiedenen Gebäudeseiten angebrachten Gebläsen nur sehr gering ist. Demzufolge braucht bei der Wahl der Seite des Gebläseeinbaues auf die Hauptrichtung der Sonneneinstrahlung keine Rücksicht genommen zu werden. Von größerem Einfluß ist die Gefahr des Wiederansaugens bereits verbrauchter Luft. Die Größe des Einflusses hängt wesentlich von den jeweiligen örtlichen Bedingungen ab. Es kann jedoch keine verbrauchte Luft angesaugt werden, wenn das Gebläse in der gleichen Richtung liegt, aus der der Wind kommt. Hieraus leitet sich die Empfehlung ab, das Gebläse nach der Hauptwindrichtung zu legen. In Mitteldeutschland ist deshalb das Gebläse möglichst an der Westseite des Gebäudes anzubringen. Ist das nicht möglich, so ist die Ost- oder Südseite zu wählen. Muß das Gebläse aus baulichen Gründen an der Nordseite angebracht werden, so ist zu berücksichtigen, daß auf Grund der geschilderten Nachteile die Trocknungswirkung um schätzungsweise 10 bis 15% vermindert wird. Der Einfluß der Einbaurichtung darf aber keinesfalls zu hoch eingeschätzt oder dramatisiert werden.

4. Zusammenfassung

Es wurden die grundlegenden Eigenschaften von Radial- und Axialgebläsen dargelegt und ihre zweckmäßige Verwendung für verschiedene Zwecke der Landwirtschaft erläutert. Auf Grund eigener Messungen konnten für das Heubelüftungsstandardgebläse SK 8 (900 mm Dmr.) nähere Angaben gemacht werden. Mit Hilfe von Temperaturmessungen im Heustapel wurden einige Erkenntnisse über den Verlauf der Trocknung im Heustapel und die statistische Verteilung des Wasseraufnahmevermögens der Luft gewonnen. Dabei wurde festgestellt, daß der Befeuchtung des trockenen Heues durch feuchte Nachtluft nur geringe Bedeutung zukommt.

Bei Untersuchungen über den Einfluß der Himmelsrichtung auf den Trocknungserfolg in Heubelüftungsanlagen ergab sich, daß die Wiederansaugung bereits verbrauchter Abluft größere Bedeutung hat als die Sonneneinstrahlung.

Für die Praxis werden drei Empfehlungen gegeben:

1. Außer dem bereits gebräuchlichen Gebläse SK 8 (900 mm Dmr.) sind zwei größere Typen für die Heubelüftung vorzuziehen.
2. Zur Automatisierung des Belüftungsbetriebes genügt eine Schaltuhr, die zu festen Tageszeiten ein- und ausschaltet. Eine Steuerung nach der relativen Luftfeuchtigkeit ist nicht notwendig.
3. Beim Einbau der Gebläse ist vor allem Rücksicht auf die Hauptwindrichtung zu nehmen. Die Reihenfolge des günstigsten Gebläseeinbaues ist: Westen, Osten, Süden.

Literatur

- ANIANSOON, G.: Hur skultorkar planeras och bygges. Jordbrukstekniska Institutet (Uppsala/Schweden), Mitt. Nr. 267/1956.
- ECK, B.: Ventilatoren, 3. Aufl., Springer, Berlin 1957.
- FALTIN, H.: Meßverfahren und Meßgeräte der Kraft- und Wärmewirtschaft, Knapp, Halle 1955.
- GRAMBERG, A.: Technische Messungen, 7. Aufl., Springer, Berlin 1953.
- MALTRY, W.: Der Einfluß des Klimas auf die Dimensionierung von Heubelüftungsanlagen. Tagungsberichte 22, Vorträge der wissenschaftl. Jahrestagung 1959 des Instituts für Landtechnik Potsdam-Bornim der Deutschen Akademie der Landwirtschaftswissenschaften zu Berlin.
- MALTRY, W.: Reisebericht Schweden 1959 (unveröffentlicht).
- MALTRY, W.: Ermittlung einiger trockenungsphysikalischer Eigenschaften von Weizen und deren thermodynamische Auswertung in einem i, x -Trocknungsdiagramm. Diss. TU Dresden 1961.
- MATTHIES: Der Strömungswiderstand beim Belüften landwirtschaftlicher Erntegüter. VDI-Forschungsheft 454, Düsseldorf 1956.
- PÖTKE, E., u. a.: Wirtschaftliche Heuwerbung durch Belüftungstrocknung, VEB Verlag Technik Berlin 1960.
- REIMER, G., und DEHAME, H.-D.: Vergleichende Untersuchungen von Heubelüftungsanlagen. Diplomarbeit Humboldt-Universität Berlin 1960.
- SEGLER, G.: Gebläsauswahl für Heubelüftungsanlagen. Landtechnik München 1957.
- WILKE, W.: Einfluß der Himmels- und Windrichtungen auf den Trocknungserfolg in Heubelüftungsanlagen. Diplomarbeit Humboldt-Universität Berlin 1960.
- DIN 1952: VDI-Durchflußmeßregeln.

A 4670

Wirtschaftliche Heuwerbung durch Belüftungstrocknung

„Nachdem bisher über das Heubelüftungsverfahren nur gelegentlich in wissenschaftlichen Schriften und Fachzeitschriften berichtet worden ist, die nicht jedem interessierten Praktiker zur Verfügung stehen, wird mit dieser Broschüre über die Heubelüftungstrocknung den Genossenschaftsbauern, Agronomen, Innenmechanisatoren, Projektanten und Bauausführenden im ländlichen Bauwesen, den Berufs- und Fachschülern der Landwirtschaft und anderen Interessierten das Wissenswerte über das Heubelüftungsverfahren vermittelt. Im einzelnen finden sie darin den derzeitigen Stand des Verfahrens, den Ablauf der Vorwelkperiode, das Beschicken der Anlage und den Verlauf der Belüftungsperiode beschrieben. Auf die Auswahl der Lüfter, den günstigsten Einbauort, die Wahl des Belüftungssystems, die Bauausführung sowie die Bau- und Betriebskosten wird eingehend hingewiesen.

Mit diesem Heft 7 der Schriftenreihe „Wie mechanisieren wir die Innenwirtschaft unserer LPG“ werden allen Betrieben unserer sozialistischen Landwirtschaft jene Kenntnisse vermittelt, die zur Planung, Einrichtung und Benutzung von Heubelüftungsanlagen erforderlich sind.

Im vorstehenden Ausschnitt aus dem Vorwort des Ministeriums für Landwirtschaft, Erfassung und Forstwirtschaft der DDR, Abteilung Mechanisierung, der Broschüre

„Wirtschaftliche Heuwerbung durch Belüftungstrocknung“
(14,7 × 21 cm, 72 Seiten, 29 Bilder, 13 Tafeln, broschiert, 2,40 DM)

wird die besondere Bedeutung dieses modernen Konservierungsverfahrens für Heu noch einmal unterstrichen.

Das Heftchen von Dr. PÖTKE war schnell vergriffen, inzwischen ist es aber in einer Nachauflage wieder erhältlich. Interessenten können es unter der Bestell-Nr. 1/2/2944 über alle Buchhandlungen beziehen.

AK 4780