

Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [1] *Spittel, A.*: Computersimulation der Belüftungskonservierung – eine Methode zur optimalen Konstruktion und Bewirtschaftung von Trocknungsanlagen. Agrartechnik (Berlin) Bd. 36 (1986) Nr. 10, S. 454/56.
- [2] • *Weiss, S. u. K.-E. Miltzer*: Thermische Verfahrenstechnik I. Leipzig: VEB Deutscher Verlag Grundstoffindustrie 1986.
- [3] *Rees, D.V.H.*: Investigations on the drying of herbage at temperatures up to 50 °C. J. British Grassland Society Bd. 29 (1974) S. 47/55.
- [4] *Tuncer, I.K., F. Wieneke u. D. Lehmann*: Das Trocknungsverhalten einiger Futtergräser. Grundl. Landtechnik Bd. 20 (1970) Nr. 2, S. 38/44.
- [5] *Jones, L.*: The effect of stage of growth on the rate of drying of cut grass at 20 °C. Grass and Forage Sc. Bd. 34 (1979) S. 139/44.
- [6] *Johnson, T.R., J.W. Thomas u. C.A. Rotz*: Drying rate of cut forages after spray treatments to hasten drying. J. Dairy Science Bd. 67 (1984) Nr. 8, S. 1745/51.
- [7] *Harris, C.E. u. M.S. Dhanoa*: The drying rates of component parts of inflorescence-bearing tillers of Italian ryegrass. Grass and Forage Sc. Bd. 39 (1984) Nr. 4, S. 271/74.
- [8] *Harris, C.E. u. J.N. Tullberg*: Pathways of water loss from legumes and grasses cut for conservation. Grass and Forage Sc. Bd. 35 (1980) Nr. 1, S. 1/11.
- [9] *Elsaesser, M.*: Auswirkungen der Heubelüftung mit solar erwärmter Trocknungsluft auf Qualitätseigenschaften von Mähweidefutter. Diss. Univ. Stuttgart-Hohenheim, 1984.
- [10] *Menzies, D.J. u. J.R. O'Callaghan*: The effect of temperature on the drying rate of grass. J. agric. Engng. Res. Bd. 16 (1971) Nr. 3, S. 213/22.
- [11] *Lamond, W.J., C.A. Glasbey u. H.B. Spencer*: The effect of conditioner throughput rate on the drying rate of grass. Dep. Note SIN/464, SIAE, Penicuik 1986.
- [12] *Rumney, R.P., C.E. Harris u. M.S. Dhanoa*: The effect of rewetting on some drying characteristics of Italian ryegrass leaves in simulated hay-making conditions. Agric. and Forest Meteorology Bd. 32 (1984) Nr. 2, S. 133/44.
- [13] *Lamond, W.J., E.A. Smith u. P.J. Bowden*: The effect of conditioning on hay drying – a field trial (1983). Dep. Note SIN/442, SIAE, Penicuik 1985.
- [14] *Schneider, A.*: Untersuchungen über das charakteristische Trocknungsverhalten von Luzerne und Zuckerrübenblatt in Einzelschichten und durchströmten Schüttungen. Diss. TU München, 1954.
- [15] *Morris, R.M.*: The rate of water loss from grass samples during hay-type conservation. J. British Grassland Soc. Bd. 27 (1972) S. 99/105.
- [16] *Wilhelm, F.*: Trocknungsverhalten von Briketts aus ange-welktem Halmgut und Trocknungsverhalten von landwirt-schaftlichem Halmgut. Fortschr.-Ber. VDI-Z. Reihe 14, Nr. 18, S. 1/171. Düsseldorf: VDI-Verlag 1973.
- [17] *Hübner, R. u. F. Wagner*: Untersuchungen über den Trock-nungsverlauf von Gräsern und Kleearten. Das wirtschaftseigene Futter Bd. 21 (1975) Nr. 3, S. 247/63.
- [18] *Owen, I.G. u. D. Wilman*: Differences between grass species and varieties in rate of drying at 25 °C. J. agric. Science Bd. 100 (1983) S. 629/36.
- [19] *Jones, L. u. J. Prickett*: The rate of water loss from cut grass of different species dried at 20 °C. Grass and Forage Sc. Bd. 36 (1981) Nr. 1, S. 17/23.
- [20] Normi: Programm zur Auswertung des klassischen kineti-schen Experimentes. TU Dresden, Sektion VVT, WB TVT/UST 1985.

Das Kennfeld eines Getreidesatztrockners

Teil 1: Praktische Versuche

Von Alexander Coenen, Bernd Ciesler und Franz Wieneke, Göttingen*)

DK 664.8.047:633.2.004.12

Satztrockner weisen gegenüber dem Durchlauf-trockner eine geringere Trocknungsleistung und eine relativ hohe Gefahr des Verderbs auf, wenn höhere Getreideschüttungen mit nur mäßig erwärmter Luft (3–5 K) oder geringen Belüftungsgeschwindigkeiten getrocknet werden sollen.

Es erschien deshalb notwendig, das Potential einer Leistungssteigerung der Satz-trocknung von Getreide zu untersuchen. Dazu wurden am Institut für Agrartechnik in Göttingen Versuche zur Ausbildung und Wanderung der Trocknungszone und zu Qualitätsveränderungen in hohen Schüttungen angestellt. Aus dem Einfluß der verschiedenen Trocknungsparameter wurde dann ein Trocknungsmodell für die Satz-trocknung mathematisch formuliert.

*) Dr. A. Coenen ist und Dr. B. Ciesler war wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Agrartechnik der Universität Göttingen; Prof. Dr.-Ing. F. Wieneke ist Direktor dieses Institutes.

1. Einleitung

Über den Verlauf der Feuchteabgabe bei der Satz-trocknung von Getreide liegt eine Vielzahl von Veröffentlichungen vor, die in zwei neueren Arbeiten [1, 2] zusammengestellt sind. Die Erkenntnisse reichen indes nicht aus, ein vollständiges Arbeitskennfeld eines Satz-trockners als Basis für eine Steuerung oder Regelung des Trocknungsprozesses zu erstellen. Insbesondere fehlen Ergebnisse über die Ausbildung und Wanderung der Trocknungszone in Abhängigkeit von den verschiedenen Einflußgrößen.

Diese Größen sollten bei der Trocknung in hohen Schüttungen erfaßt werden und die Grunddaten für ein einfaches Trocknungsmodell liefern, mit dessen Hilfe die Satz-trocknung energiesparender, verlustärmer und mit höherer Leistung als bisher durchgeführt werden kann.

2. Versuchsdurchführung

Zur Lösung der gestellten Aufgabe wurde das Trocknungsverhalten von feuchtem Getreide in hohen Schüttungen bei unterschiedlichen, aber jeweils konstanten Zuluftbedingungen und Belüftungsgeschwindigkeiten untersucht. Systematisch wurde durch Ändern

der Parameter ein weiter Klimabereich abgedeckt: Der Feuchtegrad der Trocknungsluft betrug $x = 8-12 \text{ g/kg}$ bei relativen Feuchten von $\varphi = 40-70 \%$ und die Luftgeschwindigkeiten $v_L = 0,06$ bis $0,45 \text{ m/s}$.

Es stand eine Versuchsanlage mit drei Trocknungsbehältern von 2,0 bis 2,4 m Höhe und 0,3 m Durchmesser zur Verfügung, **Bild 1**. An den Behältern befanden sich im Abstand von 21 cm Entnahmestutzen. Ein Klimagerät sorgte für ausreichende Luftmengen mit konstantem Feuchtegrad ($\pm 0,2 \text{ g/kg}$) und konstanter Temperatur. Ein Ventilator saugte die Luft aus dem Windkessel; sie durchströmte vor dem Eintritt in die Belüftungsbehälter einen Luftkühler. So konnte die im Ventilator erwärmte Luft auf die gewählte Temperatur zurückgekühlt werden, ohne daß sich ihr Feuchtegrad änderte. In den Zuleitungsrohren der einzelnen Trocknungsbehälter wurde die Luft durch Heizwendel so angewärmt, daß die relative Feuchte die für den jeweiligen Behälter gewünschten Werte von 40 %, 55 % und 70 % erreichte.

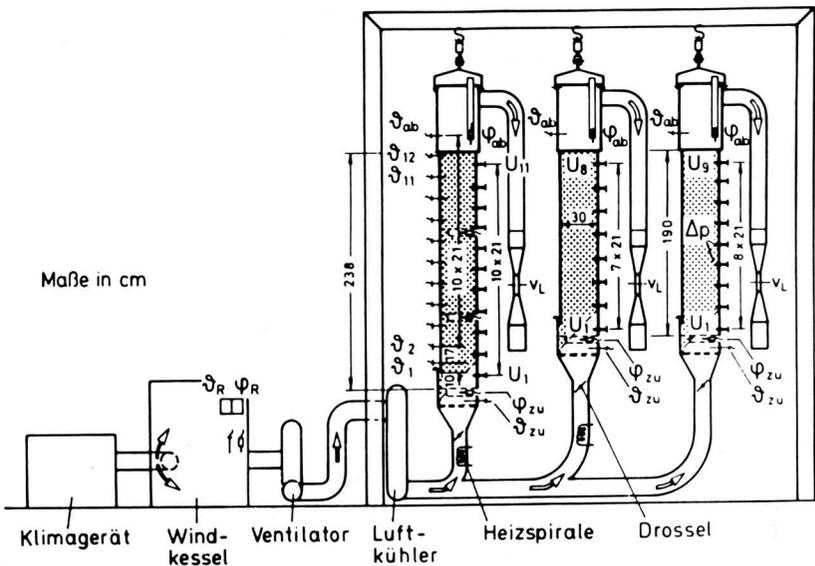


Bild 1. Aufbau und Meßtechnik der Versuchsanlage zur Satz-trocknung von Getreide mit Schütthöhen von 2,0 und 2,4 m.

- $\vartheta_{zu}, \vartheta_1 \dots \vartheta_{12}, \vartheta_{ab}$ Pt 100 Widerstandsthermometer
- $\varphi_{zu} \dots \varphi_{ab}$ LiCl-Fühler
- Δp Manometer
- v_L Venturidüse
- $U_1 \dots U_{11}$ Probenentnahmestutzen
- $\vartheta_R; \varphi_R$ Thermohygrograph für Raumklima

Drosselklappen regelten die Luftgeschwindigkeit für jeden Behälter. Die Messung des Luftdurchsatzes erfolgte in Venturiröhren; sie wurde mit einem Flügelradanemometer kontrolliert. Für die Temperaturmessung waren Widerstandsthermometer (Pt 100) und für die Bestimmung des Feuchtegrads der Luft LiCl-Feuchtefühler in verschiedenen Höhen der Schüttung angebracht.

Die Messung der Temperaturen bzw. Umwandlungstemperaturen (LiCl-Feuchtefühler) in der Umgebung, in der Zu- und Abluft und in der Getreideschüttung wurde über eine zentrale Datenerfassungsanlage mit einem Meßzyklus von 30 s gesteuert. Die relativ langsam ablaufende Trocknung erlaubte für die Langzeitversuche eine Mittelung der Meßdaten über 15 Minuten. Der Belüftungswiderstand wurde mit einem Sperrflüssigkeitsmanometer über der ganzen Schütthöhe erfaßt.

Die Entnahme von Proben aus der Schüttung zur Ermittlung der Getreidefeuchte (ca. 20 g Körner) erfolgte in Zeitabständen, die der zu erwartenden Wanderung der Trocknungszone entsprachen. Die Getreidefeuchte wurde gravimetrisch bestimmt (24 h; 105 °C).

3. Versuchsergebnisse

3.1 Charakteristischer Verlauf von Temperatur, relativer Feuchte, Wasseraufnahme und Getreidefeuchte

Lufttemperatur und Luftfeuchte wurden während des Trocknungsvorganges in verschiedenen Höhen im Getreide gemessen, die daraus resultierende Wasseraufnahme der Luft ermittelt und mit der Abnahme der Getreidefeuchte in den Schüttungen verglichen.

Das Trocknungsmedium Luft nimmt beim Durchstreichen der Schüttung Feuchtigkeit, die von den Körnern abgegeben wird, auf und kühlt dabei aufgrund der erforderlichen Verdampfungsenthalpie ab. In der untersten Getreideschicht ist das Wasseraufnahmevermögen der Luft am größten; beim weiteren Durchstreichen des Getreidestapels vermindert sich die Trocknungsfähigkeit der Luft, bis sie kein Wasser mehr aufnehmen kann. Mit zunehmender Trocknungsdauer wird in den untersten Schichten das Sorptionsgleichgewicht nahezu erreicht, und die Luft durchstreicht die getrockneten Körner nur noch unter minimaler Änderung von Temperatur und relativer Feuchte. Erst in den höheren und noch feuchten Schichten vollzieht sich wieder der Wärme- und Stoffaustausch. **Bild 2** zeigt den Verlauf von Temperatur, relativer Feuchte und Wasseraufnahme der Luft für verschiedene Höhen in der Schüttung.

In **Bild 3** ist für unterschiedliche Trocknungszeiten der Zusammenhang zwischen der Getreidefeuchte und der Schütthöhe bei einem Anfangsfeuchtegrad $X_a = 0,225 \text{ kg}$ pro kg, einer Zulufttemperatur $\vartheta_{zu} = 25 \text{ °C}$ und einer relativen Feuchte der Zuluft $\varphi_{zu} = 40 \%$ bei einer Belüftungsgeschwindigkeit $v_L = 0,2 \text{ m/s}$ exemplarisch dargestellt.

Wie **Bild 2** und **3** zeigen, beginnt das Getreide nach einer Trocknungsdauer von 55 h in der obersten Schicht der Schüttung zu trocknen. Gleichzeitig fällt die relative Feuchte der Abluft ab und ihre Temperatur steigt entsprechend. Der gleiche Zusammenhang ist auch für andere Schütthöhen abzulesen. So beginnt die Trocknung in 154 cm Schütthöhe nach 35 h Trocknungsdauer, und wenn nach 70 h Trocknungsdauer die Gleichgewichtsfeuchte in 70 cm Höhe nahezu erreicht ist, entsprechen Temperatur und relative Feuchte der Luft in dieser Höhe fast der Zulufttemperatur und -feuchte.

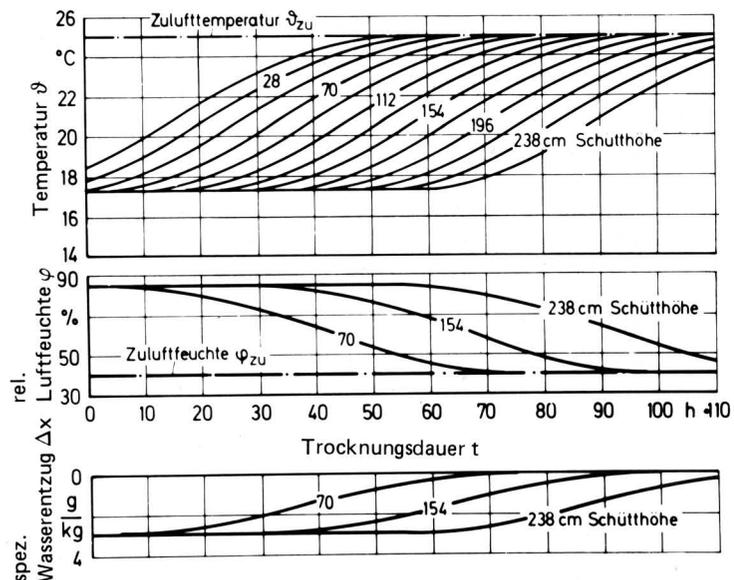


Bild 2. Charakteristischer Verlauf von Temperatur, relativer Luftfeuchte und spezifischem Wasserdampfdruck in verschiedenen Schütthöhen während der Trocknung von Weizen.

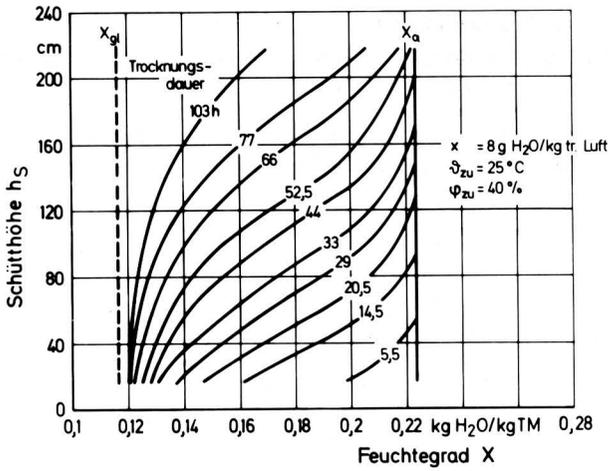


Bild 3. Zusammenhang zwischen Feuchtegrad und Schütthöhe (Feuchteprofile) für unterschiedliche Werte der Trocknungsdauer.

3.2 Ausbildung und Form der Trocknungszone

Mit Beginn der Trocknung bewegt sich die Trocknungsfront in die Schüttung hinein, wobei vorwiegend Feuchte an der Kornoberfläche verdunstet. Anschließend bildet sich in der unteren Schicht die Haupttrocknungszone aus; die Feuchte wird zunehmend dem Korninneren entzogen. Mit weiterer Trocknungsdauer wandern die Bereiche der beginnenden Trocknung und die Haupttrocknungszone in Strömungsrichtung fort, und es schließt sich der Bereich der auslaufenden Trocknung an, während der die Körner bis nahe dem Sorptionsgleichgewicht durchtrocknen, **Bild 4 und 5**.

Die Trocknung hat eine Minderung der Feuchte im Getreide von Anfangsfeuchtegrad X_a bis zum Gleichgewichtsfeuchtegrad X_{gl} zum Ziel. Solange sich die Körner in diesem Bereich der abtrockenbaren Feuchte X_{pot} , d.h. unter X_a , aber noch über X_{gl} , befinden, spricht man von der Trocknungszone.

Trägt man in einem Diagramm Schütthöhe über dem Feuchtegrad eine Kurve gleicher Trocknungsdauer ein, dann zeigt diese Kurve eine charakteristische S-Form, sobald die unterste Schicht annähernd trocken ist. Unter konstanten Zuluftbedingungen wandert diese Kurve während der Trocknung von unten nach oben durch die Schüttung, ohne ihre Steigung zu ändern (**Bild 3**).

3.3 Wanderung der Trocknungszone

Zu Beginn der Trocknung bewegt sich die Trocknungsfront mit großer Geschwindigkeit in die Schüttung hinein; mit fortlaufender Trocknungsdauer fällt ihre Geschwindigkeit ab, um schließlich bei voller Ausbildung der Trocknungszone eine konstante Geschwindigkeit bis zum Ende des Trocknungsprozesses anzunehmen.

Die Fläche unterhalb des Kornfeuchteverlaufs in der Schüttung vergrößert sich bei gleichbleibendem Zuluftzustand und damit gleichbleibendem Sättigungsdefizit der Zuluft um einen konstanten Betrag pro Zeiteinheit, der der verdunsteten Feuchtemasse entspricht (**Bild 3**).

Aus einer solchen Darstellung mit einer hinreichenden Zahl von Kurven gleicher Trocknungsdauer läßt sich für beliebige Zeitpunkte die Feuchteverteilung in der Schüttung ablesen. Ebenso charakterisiert die Feuchtezonenschichtung zu jedem Zeitpunkt die Trocknungszone. Damit ist der Zeitpunkt, zu dem die gesamte Schüttung eine gewünschte Mindestendfeuchte erreicht hat, und auch die Streuung der Getreidefeuchte in der Schüttung um eine mittlere Getreidefeuchte zu entnehmen.

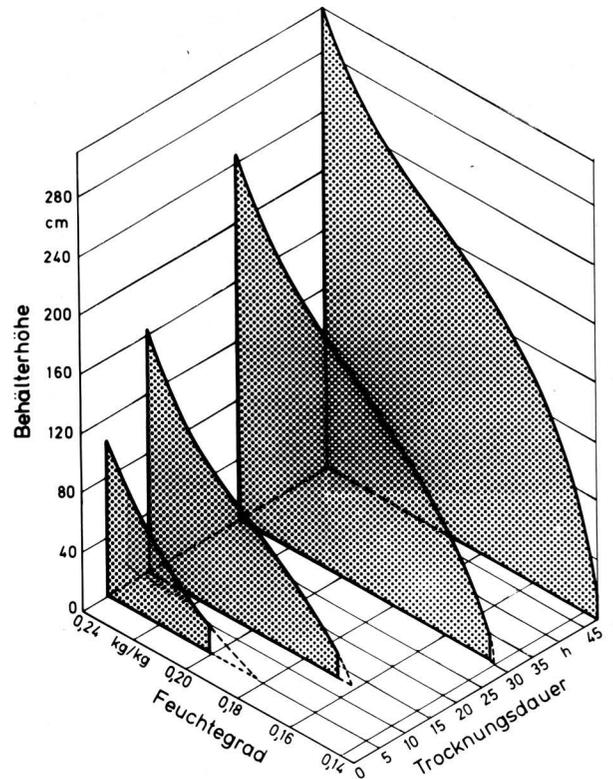


Bild 4. Trocknungszone als Funktion von Schütthöhe, Feuchtegrad und Trocknungsdauer [1].

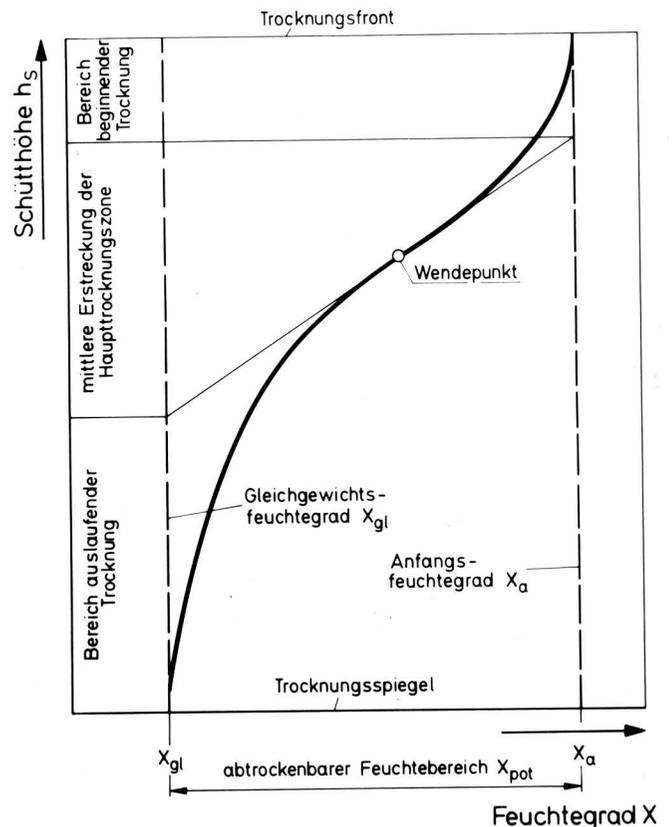


Bild 5. Graphische Bestimmung der mittleren Erstreckung der Haupttrocknungszone in der Getreideschüttung.

3.4 Einfluß der Anfangsfeuchte des Gutes

Zunehmende Anfangsfeuchte des Gutes verlängert die Trocknungsdauer, was sich aus der größeren Wassermenge ergibt, die dem Getreide zu entziehen ist, Bild 6. Dabei erstreckt sich der Bereich anfänglich nahezu konstanter Trocknungsgeschwindigkeit mit zunehmender Anfangsfeuchte über eine längere Trocknungsdauer. Der charakteristische Kurvenverlauf im Bereich des hygroscopischen Zustandes des Materials, also für Feuchtegrade unterhalb von etwa $X = 0,22 \text{ kg/kg}$ bis zum Sorptionsgleichgewicht, wird durch eine größere Anfangsfeuchte des Gutes nicht verändert [1].

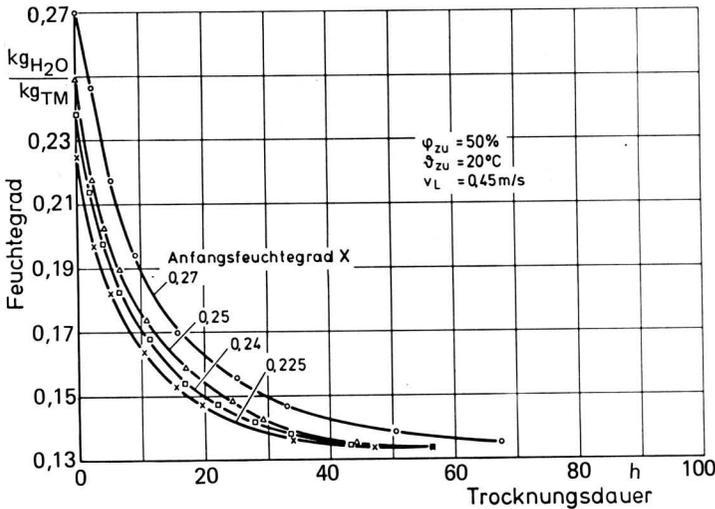


Bild 6. Trocknungsverlauf einer 16 cm dicken Schicht Weizen bei unterschiedlichen Anfangsfeuchten des Gutes.

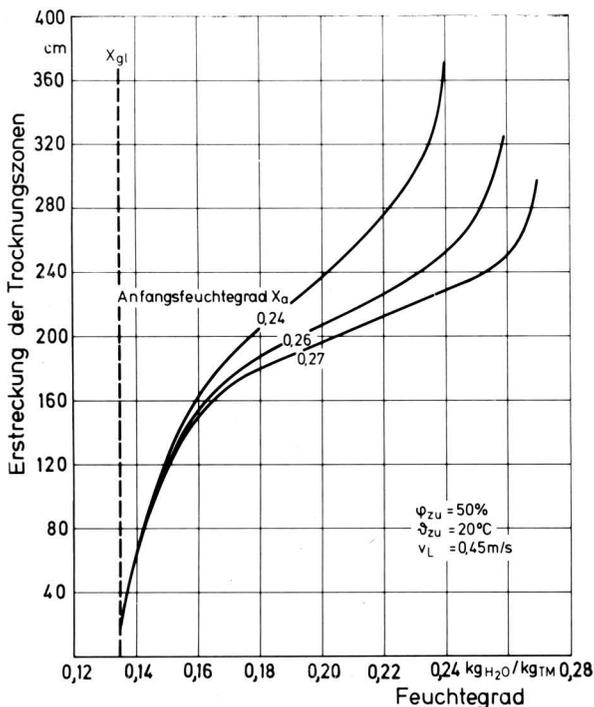


Bild 7. Funktionale Abhängigkeit zwischen Feuchtegrad und Schütthöhe (Feuchteprofil) bei konstanter Trocknungsdauer und unterschiedlichen Werten der Anfangsfeuchte von Weizen zur Bestimmung der Erstreckung der Trocknungszone.

Bei höherer Anfangsfeuchte, aber gleichen Zuluftbedingungen überspannt die Trocknungszone einen entsprechend größeren abtrockenbaren Feuchtebereich, Bild 7. Die in Bild 8 über der Luftgeschwindigkeit aufgetragene Wandergeschwindigkeit der Trocknungszone zeigt, daß mit steigender Anfangsfeuchte des Gutes die durchschnittliche Wandergeschwindigkeit der Trocknungszone abnimmt.

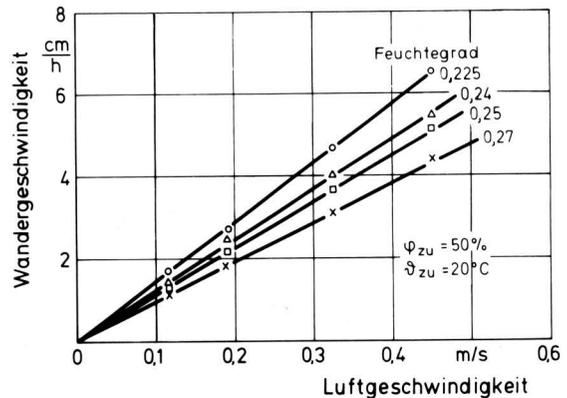


Bild 8. Durchschnittliche Wandergeschwindigkeit der Haupttrocknungszone in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Anfangsfeuchten des Gutes.

3.5 Einfluß der Luftgeschwindigkeit

Zur Untersuchung des Einflusses der Luftgeschwindigkeit auf den Trocknungsvorgang in hohen Schüttungen wurde die Luftgeschwindigkeit von 0,06 m/s über 0,2 m/s auf 0,4 m/s gesteigert, ohne die anderen Trocknungsparameter zu ändern.

Mit zunehmender Luftgeschwindigkeit wird die Zeit für den Austausch zwischen der Luft und den einzelnen Kornschichten verkürzt. Da die Diffusionsgeschwindigkeit des Wassers im Korn begrenzt ist, kommt es in den unteren Schichten nicht zu einer vollständigen Sättigung der Luft. Je höher die Luftgeschwindigkeit gewählt wird, um so mehr Kornschichten werden in die Trocknung einbezogen, die Trocknungszone erstreckt sich über einen größeren Bereich der Schütthöhe, Bild 9. Bei geringen Schütthöhen kann die Wasseraufnahmekapazität der Luft nicht vollständig ausgenutzt werden; andererseits durchstreicht bei steigender Luftgeschwindigkeit in der Zeiteinheit mehr Luft den Getreidestapel, die Trocknungsgeschwindigkeit erhöht sich, die Gesamttrocknungszeit wird verringert und der Getreidestapel schneller getrocknet.

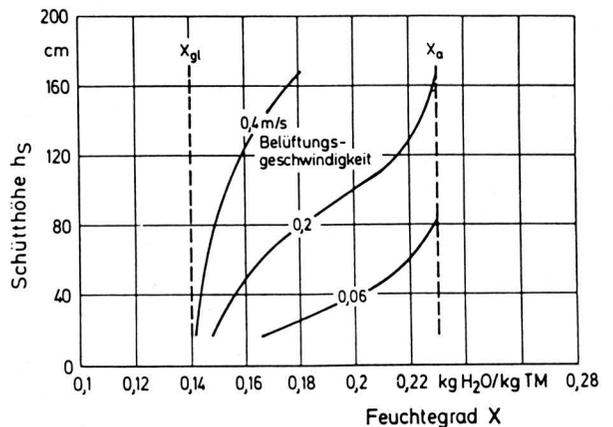


Bild 9. Funktionale Abhängigkeit zwischen Feuchtegrad und Schütthöhe (Feuchteprofil) für eine Trocknungsdauer von 40 h und unterschiedliche Werte der Luftgeschwindigkeit zur Bestimmung der Erstreckung der Trocknungszone.

Eine Steigerung der Luftgeschwindigkeit wird aus energetischer Sicht durch den erheblich steigenden Leistungsbedarf des Gebläses begrenzt.

Den Einfluß der Luftgeschwindigkeit auf den spezifischen Energiebedarf q_w zeigt Bild 10. Diese Größe gibt den Aufwand an Energie \dot{Q} bezogen auf die abgeführte Wassermasse m_w an:

$$q_w = \dot{Q}/m_w \quad (\text{kJ/kg}) \quad (1).$$

Da die Versuche die Belüftungstrocknung mit Umgebungsluft beschreiben, wird bei \dot{Q} hier lediglich die zur Luftförderung eingesetzte Energie berücksichtigt.

Zunehmende Luftgeschwindigkeit steigert den spezifischen Energiebedarf stärker als linear. Bei einer Schütthöhe von 2 m bleibt er bei gegebener Luftgeschwindigkeit annähernd konstant, bis die Trocknungszone aus der Schüttung wandert. Die Temperatur- und Feuchteunterschiede der Zuluft haben in diesem Bereich nur einen geringen Einfluß auf das Herauswandern der Trocknungszone. Dann vermindert sich die Ausnutzung des Trocknungspotentials stetig, und der spezifische Energiebedarf steigt im weiteren Trocknungsverlauf exponentiell an.

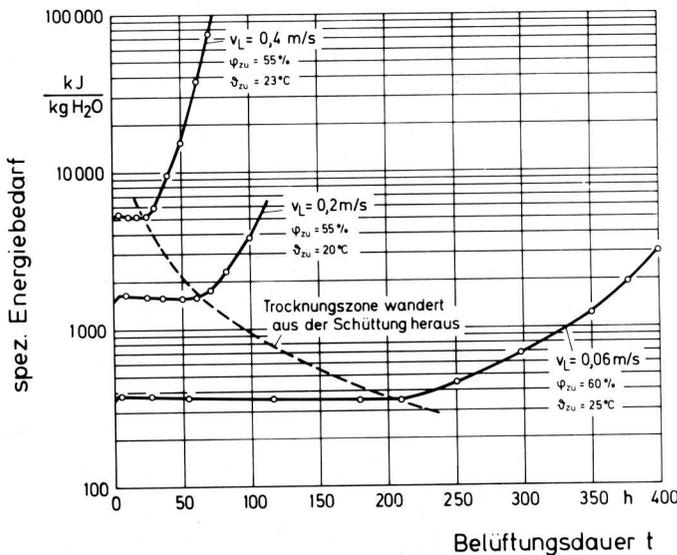


Bild 10. Spezifischer Energiebedarf (auf die abgeführte Wassermasse bezogene Energie für den Betrieb der Lüftung) in Abhängigkeit von der Belüftungsdauer bei unterschiedlichen Luftgeschwindigkeiten; Weizen, Schütthöhe $h_s = 2$ m, Anfangsfeuchtegrad $X_a = 0,23$.

3.6 Einfluß der Trocknungstemperatur bei unterschiedlichen Zuluftfeuchten

Zustandsänderungen des Trocknungsmediums Luft können unterschiedliche Auswirkungen auf den Trocknungsverlauf haben. Drei Möglichkeiten werden betrachtet:

1. Temperaturerhöhung bei gleichbleibendem Feuchtegrad und somit abnehmender relativer Feuchte, Bild 11 oben.
2. Temperaturerhöhung mit steigendem Feuchtegrad, aber konstanter relativer Feuchte, Bild 11 Mitte.
3. Keine Temperaturveränderung, aber Erhöhung des Feuchtegrads mit entsprechender Erhöhung der relativen Feuchte, Bild 11 unten.

3.6.1 Konstanter Feuchtegrad der Zuluft

Eine Temperaturerhöhung der Zuluft bei gleichbleibendem Feuchtegrad ist das in der Praxis übliche Verfahren, um das Sättigungs-

defizit der Außenluft zu erhöhen und die Trocknung zu beschleunigen. Wie aus dem h,x -Diagramm (Bild 11 oben) ersichtlich, senkt eine Erwärmung bei konstantem Feuchtegrad die relative Luftfeuchte, und es steigt das Wasseraufnahmevermögen Δx der Luft. Die Temperaturerhöhung der Zuluft erhöht auch die Ablufttemperatur und damit den Dampfdruck am Korn; steigendes Partialdruckgefälle zwischen Korn und Luft verstärkt die Wassernachlieferung aus dem Korn.

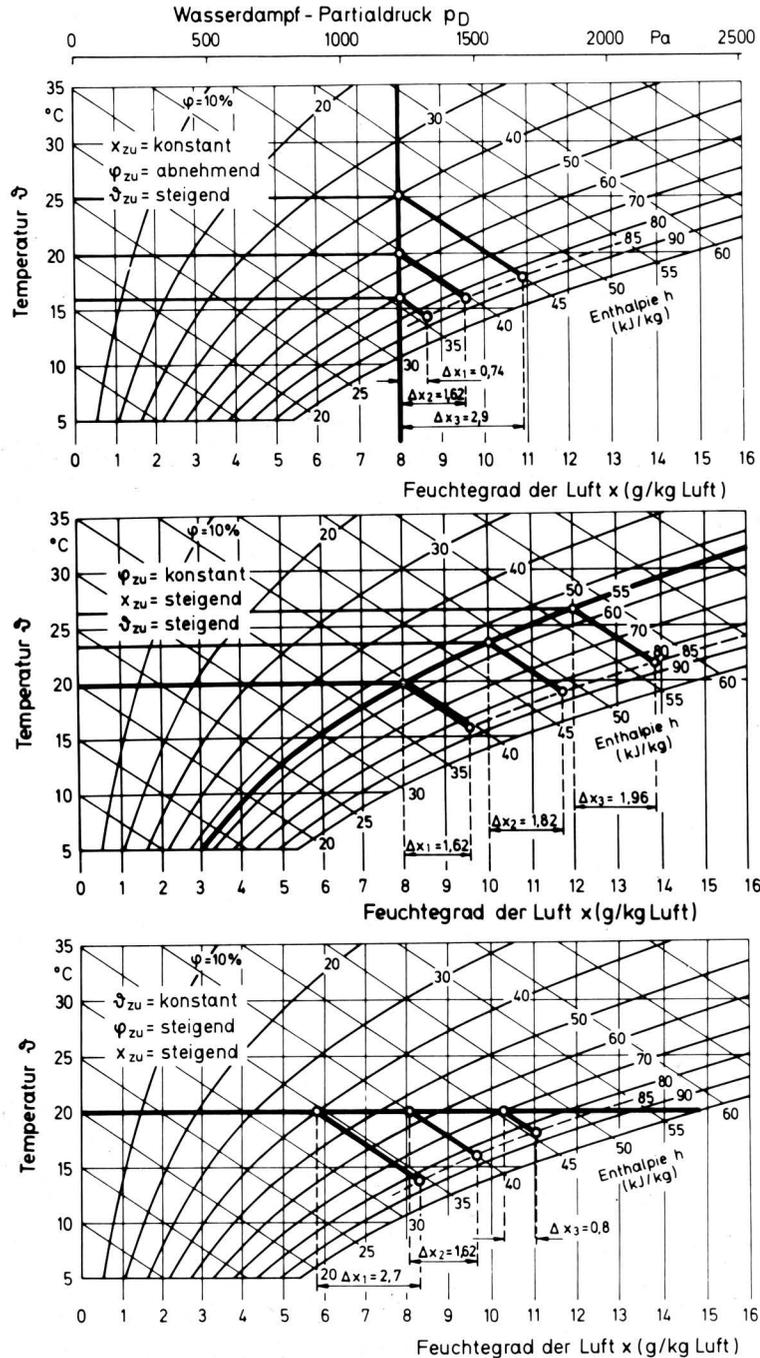


Bild 11. Sättigungsdefizit der Luft bei jeweils drei verschiedenen Zuständen der Zuluft und einer angenommenen relativen Feuchte der Abluft $\varphi_a = 85\%$.

- oben: bei unterschiedlichen Temperaturen ϑ_{zu} und konstantem Feuchtegrad x
- Mitte: bei konstanter relativer Feuchte φ_{zu} und unterschiedlichen Werten von ϑ_{zu} und x_{zu}
- unten: bei konstanter Zulufttemperatur ϑ_{zu} und unterschiedlichen Werten von x_{zu} und φ_{zu}

Hierzu wurde eine Versuchsreihe mit konstantem Feuchtegrad der Zuluft von 8 g/kg und Temperaturen von 16 °C, 20 °C und 25 °C durchgeführt, **Bild 12**. Die Erwärmung senkt die relative Luftfeuchte von 70 % auf 55 % bzw. 40 %. Dadurch steigt bei konstanter relativer Feuchte der Abluft von 85 % das Sättigungsdefizit von 0,7 g/kg bei 70 % auf 2,95 g/kg bei 40 %.

Die Trocknungszone erstreckt sich mit zunehmender Temperatur über eine größere Höhe der Schüttung, wie **Bild 12** zeigt. Bei der relativen Feuchte von 40 % für die Zuluft reicht die Trocknungszone in dieser Versuchsreihe nach 16 h bis 160 cm Schütthöhe. Bei gleichen Versuchsbedingungen aber mit einer relativen Feuchte der Zuluft von 55 % wird diese Höhe nach 20 h erreicht, bei 70 % erst nach 30 h. Durch das Senken der relativen Feuchte der Zuluft wird aber auch die Gleichgewichtsfeuchte, wie aus **Bild 12** hervorgeht, deutlich gesenkt. Die Luft nimmt mehr Wasser aus einer Getreideschicht auf; deswegen kann die Erstreckung und Wanderungsgeschwindigkeit der Trocknungszone bei einer Temperaturerhöhung mit konstantem Feuchtegrad nicht entsprechend dem Ansteigen des Wasseraufnahmevermögens zunehmen.

In einer weiteren Versuchsreihe wurde bei der Erwärmung die relative Feuchte der Zuluft konstant bei 40 %, 55 % und 70 % gehalten. Dazu wurde beispielsweise bei $\varphi = 40\%$ der Feuchtegrad der Zuluft von 8 g/kg auf 10 g/kg bzw. 12 g/kg gesteigert, was jeweils eine entsprechend höhere Temperatur zur Folge hatte (**Bild 11** Mitte). Die maximale relative Feuchte der Abluft lag bei allen Versuchen nicht über 85 %. Eine Temperaturerhöhung bei konstanter relativer Feuchte der Zuluft bewirkt eine geringfügige Erhöhung des Wasseraufnahmevermögens der Luft.

In **Bild 13** sind die Kurven gleicher Trocknungsdauer bei einer konstanten relativen Feuchte der Zuluft von 55 % und unterschiedlichen Temperaturen dargestellt. Der zeitlich unterschiedliche Austritt der Trocknungszone aus der Schüttung erklärt sich daraus, daß die einzelnen Versuchsvarianten unterschiedliche Anfangsfeuchten aufweisen und so bei hohen Anfangsfeuchten mehr Wasser aus dem Körnerstapel ausgetragen werden mußte. Die Endfeuchte sinkt hier bei den einzelnen Varianten mit steigenden Temperaturen nur geringfügig, im Gegensatz zu den in **Bild 12** dargestellten Versuchen mit konstantem Feuchtegrad und unterschiedlicher relativer Feuchte der Zuluft, bei denen sich der Gleichgewichtsfeuchtegrad der Körner aufgrund seiner Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte stärker veränderte.

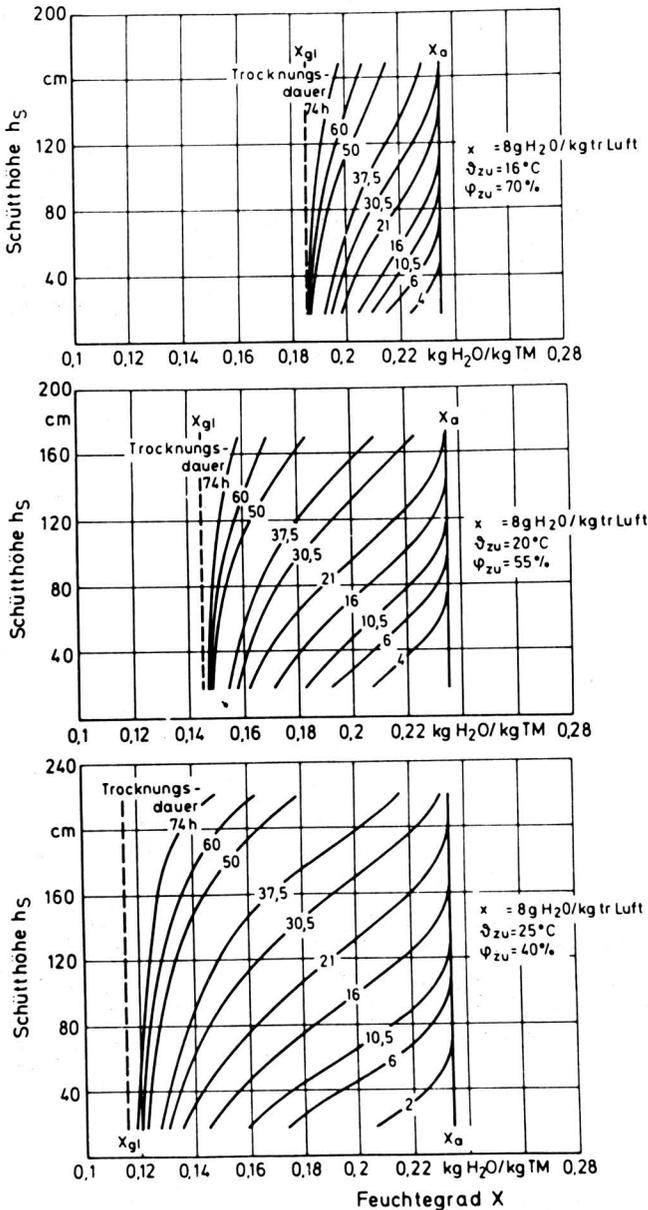


Bild 12. Feuchteprofile (Kurven gleicher Trocknungsdauer) bei der Belüftungstrocknung mit konstantem Feuchtegrad der Zuluft ($x = 8 \text{ g/kg}$), aber unterschiedlichen Werten von Temperatur und relativer Feuchte der Zuluft; $v_L = 0,4 \text{ m/s}$.

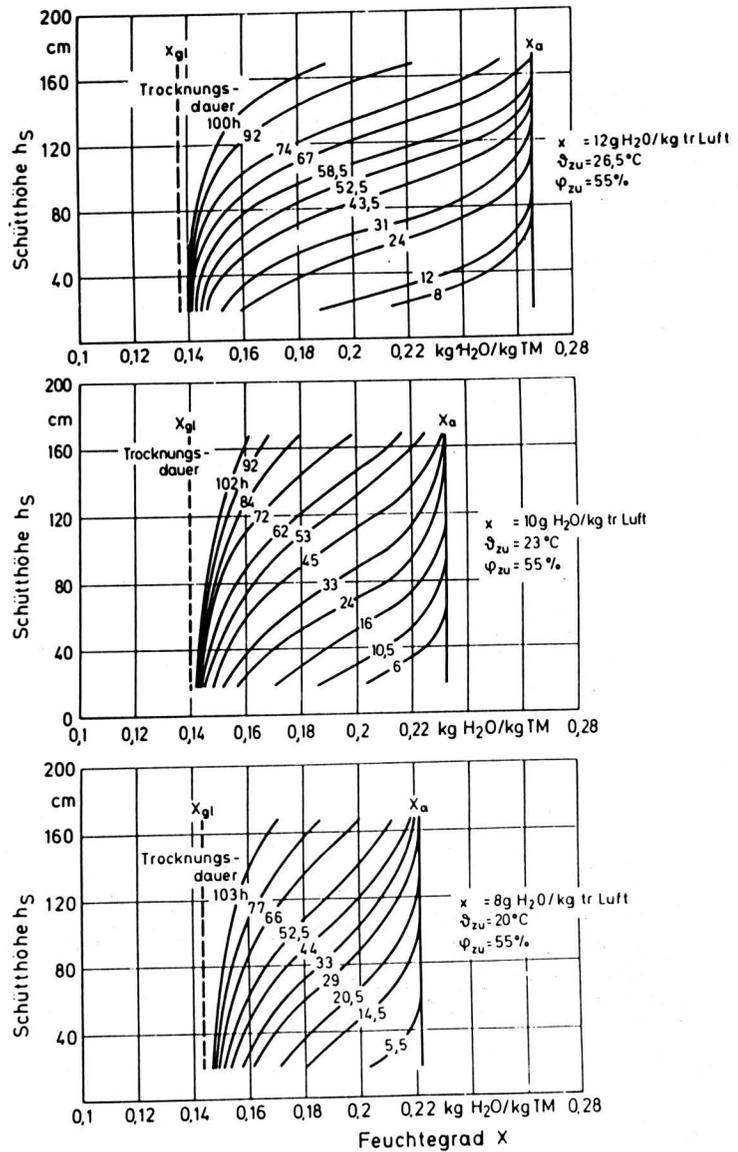


Bild 13. Feuchteprofile (Kurven gleicher Trocknungsdauer) bei der Belüftungstrocknung mit konstanter relativer Feuchte der Zuluft ($\varphi = 55\%$), aber unterschiedlichen Werten von Temperatur und Feuchtegrad der Zuluft; $v_L = 0,2 \text{ m/s}$.

3.6.3 Konstante Temperatur bei unterschiedlichem Feuchtegrad der Zuluft

Mit zunehmendem Feuchtegrad steigt die relative Luftfeuchte an, das Wasseraufnahmevermögen der Luft sinkt und die Dampfdruckdifferenz zwischen Korn und Luft nimmt ab (Bild 11 unten).

In einer weiteren Versuchsreihe wurde die Temperatur der Zuluft bei 20 °C konstant gehalten, die relative Feuchte lag bei 55 % bzw. 70 %, Bild 14. Die Schütthöhe betrug in beiden Versuchen 1,90 m und die Luftgeschwindigkeit 0,2 m/s.

Die Feuchte der Abluft veränderte sich in beiden Versuchen in den ersten 50 h der Trocknung nicht und lag bei etwa 85 %. Erst nach ca. 55 h, als die Trocknungszone aus dem Körnerstapel austrat, fiel sie bis fast auf die Werte der Zuluft ab. Beim Versuch mit 55 % relativer Feuchte (untere Darstellung) lag der spezifische Wasserentzug in den ersten 55 h konstant bei $\Delta x = 1,6 \text{ g/kg}$. Danach verringerte sich der Wasserentzug mit dem Auswandern der Trocknungszone.

Eine Erhöhung der relativen Feuchte der Zuluft von 55 % auf 70 % bei konstanter Temperatur von 20 °C bewirkte ein Absinken des spezifischen Wasserentzuges um die Hälfte von $\Delta x = 1,6 \text{ g/kg}$ auf $\Delta x = 0,8 \text{ g/kg}$. Der höhere spezifische Wasserentzug bei dem Versuch mit 55 % bewirkte jedoch nicht, daß die Trocknungszone doppelt so schnell aus der Getreideschüttung austrat, da bedingt durch die niedrigere relative Feuchte der Zuluft das Sorptionsgleichgewicht tiefer lag als in dem Versuch mit $\varphi = 70 \%$ (Bild 14); so daß mehr Wasser abgeführt werden mußte.

Diese Versuche zeigen, daß sowohl Temperatur als auch relative Feuchte und Feuchtegrad der Trocknungsluft Einfluß nehmen auf Trocknungsgeschwindigkeit und Endfeuchte.

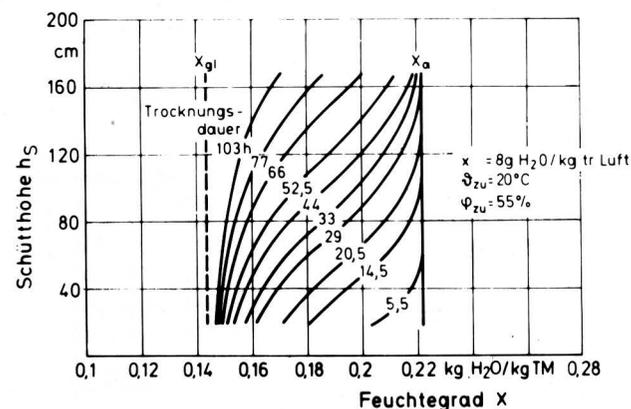
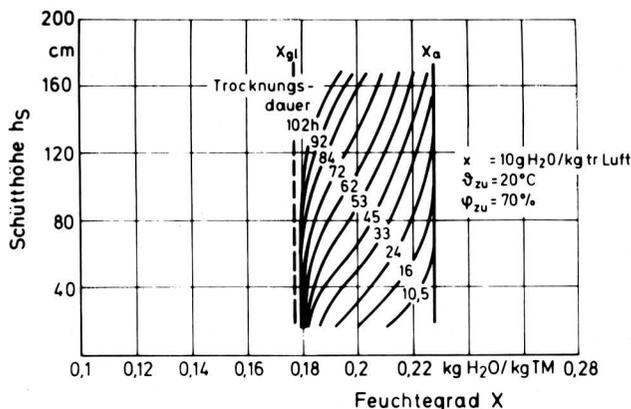


Bild 14. Feuchteprofile (Kurven gleicher Trocknungsdauer) bei der Belüftungstrocknung mit konstanter Zulufttemperatur ($\varphi_{zu} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$), aber unterschiedlichen Werten von Feuchtegrad und relativer Feuchte der Zuluft; $v_L = 0,2 \text{ m/s}$.

4. Kennfeld des Satzrockners

Nach den vorstehenden Versuchsergebnissen lassen sich die Einflüsse der verschiedenen Größen auf den Trocknungsprozeß in ihrer charakteristischen Tendenz in einem Kennfeld zusammenfassen, Bild 15.

4.1 Erstreckung der Trocknungszone

Mit zunehmender Luftgeschwindigkeit (Bild 15a) vermindert sich die Zeit für den Austausch zwischen Kornoberfläche und Luftmolekülen, so daß die weitgehende Luftsättigung nur über eine größere Schichtstärke erfolgen kann. Durch die im Verlauf der Trocknung bei abnehmendem Feuchtegehalt zunehmenden Diffusionswiderstände im Korn wächst die Erstreckung der Trocknungszone mit steigender Luftgeschwindigkeit stärker als linear.

Durch eine Erhöhung der Zulufttemperatur bei konstantem Feuchtegrad (Bild 15b) vergrößert sich der Bereich der aus dem Korn abtrockenbaren Feuchte und damit die zu verdunstende Wassermasse, so daß die Erstreckung der Trocknungszone zunimmt. Dies bedingt, entsprechend dem degressiven Zuwachs der zu verdunstenden Wassermasse, auch einen gleichartigen Zuwachs bei der Erstreckung der Trocknungszone.

Die Trocknung bei gleicher relativer Feuchte der Zuluft, jedoch steigenden Temperaturen und steigendem Feuchtegrad (Bild 15c) bewirkt eine geringfügige Erhöhung des Sättigungsdefizits der Luft. Dabei wird eine stärkere, progressive Zunahme des Dampfdrucks am Korn gegenüber dem Wasserdampfpartialdruck der Luft erreicht und somit eine verstärkte Wassernachlieferung an die Kornoberfläche. Dies führt seinerseits zu einer geringeren Erstreckung der Trocknungszone mit degressiver Tendenz, wogegen sich das mit der Erhöhung des Feuchtegrads ansteigende Sättigungsdefizit nur geringfügig auswirkt.

Bei konstanter Lufttemperatur bewirkt eine zunehmende relative Feuchte der Zuluft (Bild 15d) ein geringer werdendes Sättigungsdefizit der Trocknungsluft und ein Abnehmen der Dampfdruckdifferenz zwischen Korn und Luft. Gleichzeitig verringert sich die abtrockenbare Wassermasse entsprechend dem kleiner werdenden Bereich der abtrockenbaren Feuchte, so daß die Stärke der Trocknungszone dieser degressiven Tendenz folgend geringer wird.

4.2 Wandergeschwindigkeit der Trocknungszone

Die Kurve gleicher Trocknungsdauer beschreibt den Verlauf der Kornfeuchte in der Schüttung für einen bestimmten Zeitpunkt. Die Fläche unterhalb des Kornfeuchteverlaufs in der Schüttung vergrößert sich bei gleichbleibendem Zuluftzustand und damit gleichbleibendem Sättigungsdefizit der Luft um einen konstanten Betrag pro Zeiteinheit, der der verdunsteten Feuchtmasse entspricht. Bedingt durch die geometrische Form der Kurve tritt die Front der Trocknungszone zu Beginn der Trocknung schnell in die Schüttung ein. Nach dem vollständigen Einfahren der Trocknungszone in die Schüttung bewegt sich ihre Front mit konstanter Geschwindigkeit bis zum Ende des Trocknungsprozesses durch die Schüttung.

Die Wandergeschwindigkeit nimmt mit der Luftgeschwindigkeit linear zu (Bild 15e). Eine Temperatursteigerung bei konstantem Feuchtegrad oder konstanter relativer Feuchte (Bild 15 f und g) erhöht die Wandergeschwindigkeit entsprechend der Zunahme des Sättigungsdefizits der Trocknungsluft. Dagegen verringert sich das Wasseraufnahmevermögen der Luft bei zunehmender relativer Luftfeuchte und konstanter Temperatur; somit sinkt auch die Wandergeschwindigkeit der Trocknungszone (Bild 15 h). Linearität liegt zwischen den Zuluftparametern und der Wandergeschwindigkeit nicht vor, da sich das Sättigungsdefizit der Luft nicht linear mit der Temperatur, dem Feuchtegrad und der relativen Feuchte erhöht.

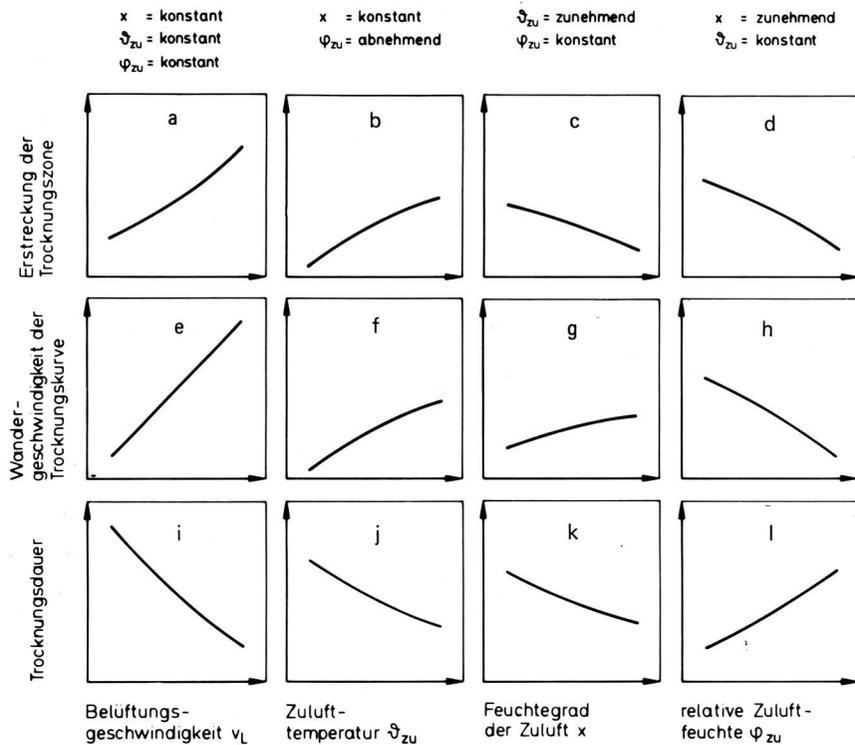


Bild 15. Kennfeld eines Getreidesattrockners.

4.3 Die Trocknungsdauer

Die Trocknungsdauer ist grundsätzlich umgekehrt proportional zur Wandergeschwindigkeit und erfährt eine gewisse Modifizierung durch die Erstreckung der Trocknungszone und das Austreten der Trocknungszone aus der Schüttung. Mit steigender Belüftungsgeschwindigkeit (Bild 15 i) durchstreicht pro Zeiteinheit mehr Luft die Schüttung und die Dauer des Trocknungsprozesses verkürzt sich. Bei einer Temperaturerhöhung mit konstantem Feuchtegrad bzw. konstanter relativer Feuchte (Bild 15 j und k) verkürzt sich die Trocknungszeit entsprechend der Zunahme des Sättigungsdefizits der Trocknungsluft. Bei zunehmender relativer Feuchte und konstanter Temperatur (Bild 15 l) sinkt das Wasseraufnahmevermögen der Luft, was eine Verlängerung des Trocknungsvorganges zur Folge hat.

Schrifttum

- [1] Ciesler, B.: Untersuchungen zum Trocknungsverlauf und zur Entwicklung eines Trocknungsmodells der Getreidesattrocknung. Diss. Univ. Göttingen 1986.
- [2] Coenen, A.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Kühlzwischenlagerung und Belüftungssattrocknung von Weizen. Diss. Univ. Göttingen 1987.

Technologieentwicklung und Technologietransfer in der Agrartechnik der Entwicklungsländer

Von Jürgen Zaske, Frankfurt*)

DK 631.17

Durch eine vernünftige Preispolitik werden die Landwirte in Entwicklungsländern in die Lage versetzt, in zunehmendem Maße wirkungsvollere Produktionsmittel einzusetzen. Dabei spielen neben Düngemitteln, verbessertem Saatgut und — in gewissem Maße — auch Pflanzenbehandlungsmitteln, technische Hilfsmittel — Werkzeuge, Maschinen und Geräte — eine bedeutende Rolle. Der mit dem Einsatz neuer technischer Hilfsmittel verbundene Technologietransfer wird an Beispielen für den sogenannten Nord-Süd- wie auch für den Süd-Süd-Technologietransfer beschrieben; verschiedene Förderinstrumente für die Technologieentwicklung und den Technologietransfer in Kooperationen zwischen Institutionen, aber auch Unternehmen werden aufgezeigt.

1) Vortrag gehalten auf der VDI/MEG-Tagung Landtechnik, 28.10.1988 in Neu-Ulm.

*) Dr.-Ing. J. Zaske ist Geschäftsführer des Fachbereichs Landtechnik bei der DLG (Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e. V.); bis 31.12.1988 war er Leiter der Abteilung Agrartechnik, Agroindustrie, Technische Planung bei der Deutschen Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, Eschborn.

1. Einleitung

Die stagnierende oder häufig rückläufige landwirtschaftliche Produktion in Entwicklungsländern ist in großem Maße auf eine verfehlte Preispolitik zurückzuführen. Sobald durch politische Kurskorrekturen höhere Erzeugerpreise durchgesetzt werden, sind die Landwirte eher bereit, sich nicht auf Subsistenzproduktion zu beschränken, sondern für den Markt zu produzieren. Höhere Einkommen bedeuten dann sowohl Anreiz als auch die finanzielle Möglichkeit zum verstärkten Produktionsmitteleinsatz.

Düngemittel, verbessertes Saatgut und Pflanzenschutzmittel kommen vermehrt zum Einsatz. Aber auch Maschinen und Geräte für die Feldwirtschaft, den Nacherntebereich und die Bewässerung werden stärker nachgefragt [1].

Geeignete, leistungsfähigere Technologien lassen sich zum Teil im weltweiten Angebot identifizieren. Allerdings muß der Import entsprechender "Hardware" in der Regel durch Know-how-Transfer, Ausbildung der Anwender, Beratung etc. sowie Schaffung geeigneter Rahmenbedingungen (Werkstätten, Ersatzteilwesen) ergänzt werden.

Vielfach müssen Maschinen und Geräte an die spezifischen Einsatzbedingungen erst angepaßt werden. Das gilt insbesondere auch, wenn eine lokale Fertigung bzw. Teilfertigung angestrebt wird. In besonderen Fällen sind völlige Neuentwicklungen erforderlich.