

# Warmlufttrocknung von naturfeuchtem und künstlich befeuchtetem Weizen-Einzelkorn

Institut für Landmaschinen der TH München

Durch den mit der fortschreitenden Mechanisierung der Landwirtschaft verbundenen Einsatz des Mähdeschers zur Getreidernte hat die Getreidetrocknung erheblich an Bedeutung zugenommen. Im Gegensatz zu der althergebrachten Erntemethode kann das Getreide nach dem Mähdrusch nicht mehr in Garben gebunden auf dem Feld oder in der Scheune nachreifen und austrocknen, sondern hier wird dieser natürliche Schwitz- und Austrocknungsprozeß der Nachreife im Augenblick der Ernte unterbrochen, so daß das Getreide häufig künstlich getrocknet werden muß.

Die Feuchtigkeit im Getreidekorn kann nun entweder vom Wachstum herrühren (Vegetationswasser) oder durch Regen oder Tau von außen dem Korn zugeführt sein (Netzfeuchtigkeit). Da erntereifes, naturfeuchtes Getreide nur wenige Tage im Jahr zu Trocknungsuntersuchungen jeder Art zur Verfügung steht, wurde für die meisten bisherigen Untersuchungen (Müller [1], Simmonds und Mitarbeiter [2, 3] u. a.) ausgereiftes, künstlich befeuchtetes Getreide verwendet. Die verschiedene Art der Feuchtigkeitsaufnahme bei naturfeuchtem und künstlich angefeuchtetem Weizen ließ jedoch die Beantwortung der Frage wünschenswert erscheinen, ob Ergebnisse aus Trocknungsversuchen mit angefeuchtetem Getreide auch für naturfeuchten Weizen gültig sind.<sup>1)</sup>

## Die physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Trocknung

Allgemein vollzieht sich die Trocknung nach Krischer [4] in zwei beziehungsweise drei Abschnitten, wie Abbildung 1 zeigt, in der das Produkt aus der Trocknungsgeschwindigkeit  $G_D$  [kg/m<sup>2</sup>h] und einer für das Trocknungsgut charakteristischen Länge  $l$  [m] über dem Feuchtigkeitsgehalt  $X$  [kg Wasser/kg Trockensubstanz] aufgetragen ist.

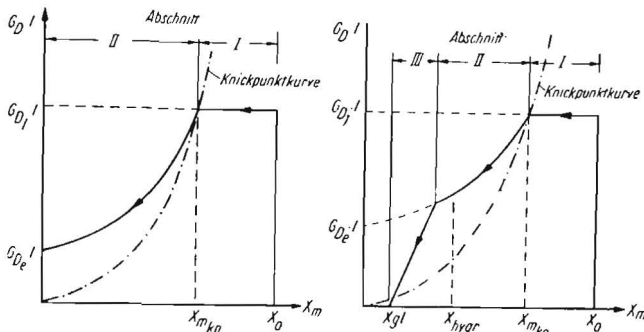


Abb. 1: Verlauf von  $G_D \cdot l$  als Funktion des Feuchtigkeitsgehaltes  $X$  für nichthygroscopische (links) und hygroscopische (rechts) Güter (aus Krischer [4])

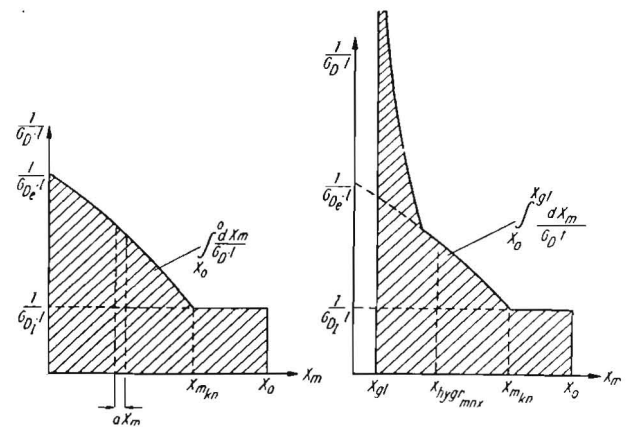


Abb. 2: Ermittlung der Trocknungszeit nach Gl. (2) für nichthygroscopische (links) und hygroscopische (rechts) Güter (aus Krischer [4])

Der I. Trocknungsabschnitt (Abschnitt konstanter Trocknungsgeschwindigkeit) ist dadurch gekennzeichnet, daß die Guts oberfläche feucht wie eine Flüssigkeitsoberfläche ist und durch Flüssigkeitsleitung aus dem Inneren feucht bleibt, so daß die Verdunstung an der Guts oberfläche stattfindet. Bei Wärmeübertragung durch das Trockenmittel und bei Luftgeschwindigkeiten  $> 2$  [m/s] nimmt diese dabei die Kühlgrenztemperatur an. Die Größe der Trocknungsgeschwindigkeit ist somit ausschließlich von den äußeren Trocknungsbedingungen abhängig. Das Ende des I. Trocknungsabschnittes wird erreicht, wenn die Flüssigkeitsleitung durch kapillare oder osmotische Kräfte aus dem Gutsinneren nicht mehr ausreicht, die Oberfläche feucht zu halten. Die Trocknungsgeschwindigkeitskurve zeigt einen Knick (Knickpunkt).

Im II. Trocknungsabschnitt (Abschnitt stetig fallender Trocknungsgeschwindigkeit) findet die Verdunstung nicht mehr beziehungsweise nicht mehr ausschließlich an der Oberfläche, sondern im Gutsinneren statt. Dabei steht der Wanderung des Dampfes nach außen ein Diffusionswiderstand des Gutes entgegen, bis die Oberfläche erreicht ist. Je tiefer der Ort der Verdunstung im Gutsinneren liegt, um so größer sind die dabei zurückzulegenden Weglängen und um so kleiner wird die Trocknungsgeschwindigkeit.

Bei nicht hygroscopischen (grobkapillaren) Gütern geht der II. Trocknungsabschnitt bis zum Ende der Trocknung ( $X = 0$ ) (Abb. 1, links). Bei diesen Gütern bildet sich eine scharfe Grenze zwischen einem trockenen und einem feuchten Gutsteil aus (Trockenspiegel). Bei hygroscopischen Gütern, bei denen jeder Feuchtigkeit der Umgebungsluft eine bestimmte Gleichgewichtsfeuchtigkeit des Gutes entspricht, endet der II. Trocknungsabschnitt, wenn das feuchteste Teilchen des Gutes den maximalen hygroscopischen Feuchtigkeitsgehalt ( $X_{hygr. max}$ ) erreicht (Abb. 1, rechts). Die Trocknungsgeschwindigkeitskurve zeigt einen zweiten Knickpunkt (hygroscopischer Knickpunkt).

Im III. Trocknungsabschnitt nehmen alle Teile des Gutes entsprechend ihrem Feuchtigkeitsgehalt an der Feuchtigkeitsabgabe bis zur Gleichgewichtsfeuchtigkeit  $X_{gl}$  teil. Bei gleichbleibenden Stoffeigenschaften nimmt die Trocknungsgeschwindigkeit linear bis auf Null ab.

Für die Trocknungszeit vom Anfangsfeuchtigkeitsgehalt  $X_0$  bis zum mittleren Endfeuchtigkeitsgehalt  $X_m$  gilt für plattenförmige Güter

$$F \cdot G_D \cdot dt = F \cdot l \cdot \gamma_s \cdot dX_m \quad (1)$$

worin  $F$  = Guts oberfläche,  $G_D$  = Trocknungsgeschwindigkeit (stündlicher Wasserentzug je Einheit der jeweiligen Guts oberfläche),  $t$  = Zeit,  $l$  = charakteristische Länge des Trocknungsgutes (bei einzelnen plattenförmigen Gütern und beidseitiger Trocknung = halbe Schichtdicke, bei Zylinder und Kugel = Radius) und  $\gamma_s$  = Raumgewicht des Trockenstoffes bedeuten.

Für die Trocknungszeit folgt aus (1):

$$t \left| \frac{X_m}{X_0} = l^2 \cdot \gamma_s \int_{X_0}^{X_m} \frac{1}{G_D \cdot l} dX_m \quad (2)$$

Sie kann also durch Auftragen des Kehrwertes von  $G_D \cdot l$  über  $X_m$  als Integral multipliziert mit  $l^2 \cdot \gamma_s$  gewonnen werden (Abb. 2). Für zylinder- beziehungsweise kugelförmige Güter ist die Fläche in Abbildung 2 jedoch nur mit  $\frac{r^2}{2} \cdot \gamma_s$  bzw.  $\frac{r^2}{3} \cdot \gamma_s$  zu multiplizieren. Abbildung 2 zeigt, wie außerordentlich die Trocknungszeit durch den III. Trocknungsabschnitt erhöht wird.

## Die die Trocknung beeinflussenden Stoffeigentümlichkeiten des Weizens

Das Weizenkorn besteht aus dem Stärkekörper, dem Keimling und der Schale, die sich aus 6 Schichten zusammensetzt, und ist aus verschiedenartigen organischen Zellen aufgebaut. Seine Form ist ellipsoidförmig, und eine Furche zieht sich tief in das Innere, so daß ein nierenförmiger Querschnitt entsteht. Im feuchten Zustand ist der Stärkekörper gequollen und weich, die Schale umschließt ihn prall und glänzend. Während der Trocknung schrumpft das Korn stark, der Stärkekörper

<sup>1)</sup> Die Untersuchungen wurden durch das Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten im Rahmen eines Forschungsauftrages an Prof. Dr.-Ing. R. Hege (†) im Institut für Landmaschinen an der Technischen Hochschule München gefördert. Obiger Bericht ist ein Auszug aus der gleichnamigen Dissertation des Verfassers (TH-München 1956).

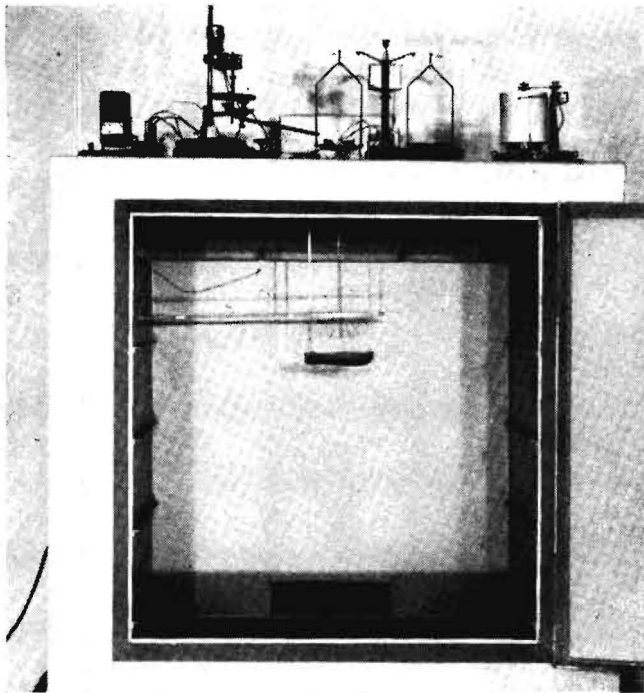


Abb. 3: Ansicht des Trockenschrankes mit automatischer Wägevarrichtung

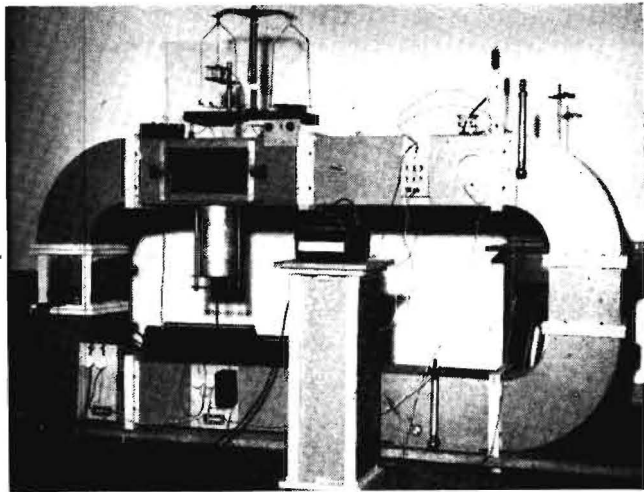


Abb. 4: Ansicht des Umlufttrockners

per wird hart und die Schale stumpf. Durch Temperatureinwirkung wird unter Umständen sowohl seine chemische als auch biologische Struktur beeinflusst, wie Untersuchungen über die Back- und Keimfähigkeitsveränderung zum Beispiel von Lindberg [5] und über die Mahlbarkeit von Schäfer [6] zeigen. Wird voll ausgereifter Weizen später künstlich befeuchtet, so werden die biologische Struktur und der chemische Aufbau des einzelnen Getreidekornes durch das hinzugefügte Wasser nicht beeinträchtigt. Bei naturfeuchtem Getreide dagegen ändert das Korn im Verlauf des Wachstums mit zunehmender Reife nicht nur seinen Feuchtigkeitsgehalt, sondern auch seinen chemischen und biologischen Aufbau, was von vorneherein einen verschiedenartigen Trocknungsablauf erwarten läßt.

#### Vorbereitung der Versuchsproben — Versuchsanlage

Vergleichshalber wurde für alle Versuche mit naturfeuchtem und angefeuchtem Getreide die gleiche Sorte, und zwar Saatweizen „Walthari“, verwendet. Das Anfeuchten erfolgte in einem Weckglas während 72 Stunden Abstehezeit und unter öfterem Schütteln. Über  $X_0 \sim 0,80$  [kg/kg] hinaus nahm Weizen keine Feuchtigkeit mehr auf, er fing bei längerer Abstehezeit zu faulen oder zu gären an.

Zur Aufnahme des Trocknungsverlaufes unter verschiedenen Trocknungsbedingungen wurde für ruhende Luft ein Trockenschrank (Abb. 3) und für bewegte Luft ein Umlufttrockner mit regelbarer Luftgeschwindigkeit (Abb. 4) verwendet. Durch ein Kontaktthermometer wurde bei beiden die Lufttemperatur auf  $\pm 0,2^\circ$  C konstant gehalten. Beim Trockenschrank wurde die Gewichtsabnahme der Probe während der Trocknung durch eine automatische Wägevarrichtung selbsttätig aufgezeichnet, beim Umlufttrockner dagegen durch Wägung in festen Zeitintervallen bestimmt. Die relative Luftfeuchtigkeit im Umlufttrockner wurde durch ein Kontaktfeuchthermometer geregelt, das eine Lüftungsclappe steuert.

Als Probenmenge wurden jeweils 20 g Weizen verwendet, die auf einem dünnrahtigen Sieb in einer Einkornschicht so verteilt waren, daß sich die einzelnen Körner nicht berührten.

#### Die Schrumpfung des Weizenkornes während der Trocknung

Einen Trocknungsverlauf mit einem Konstantabschnitt des Wasserzuges und scharfen Knickpunkt, wie von der Theorie her begründet, darf man nur dann erwarten, wenn das Gut während der Trocknung seine Struktur, chemische Zusammensetzung, Form und Oberfläche nicht ändert. Diese Voraussetzungen treffen für Weizen jedoch nicht zu. So ist Weizen, wie die meisten landwirtschaftlichen Produkte, während der Trocknung einer erheblichen Schrumpfung unterworfen. Die damit verbundene Verkleinerung der Kornoberfläche wurde über die Volumenänderung von angefeuchtem und naturfeuchtem Weizen durch Flüssigkeitsverdrängung bestimmt.

In den Abbildungen 5 und 6 stellen die voll ausgezogenen, leicht nach unten gekrümmten Kurven die Volumenzunahme durch die mit der Anfeuchtung verbundene Quellung beziehungsweise das mit der Anfangsfeuchtigkeit naturfeuchten Weizens zunehmende Volumen dar, während die nahezu linearen, parallelen Kurven von diesen aus rückwärts die Volumenschrumpfung während der Trocknung wiedergeben. Das Volumen je Gewichtseinheit der Trockensubstanz von naturfeuchtem Getreide ist, solange mit fortschreitender Reife

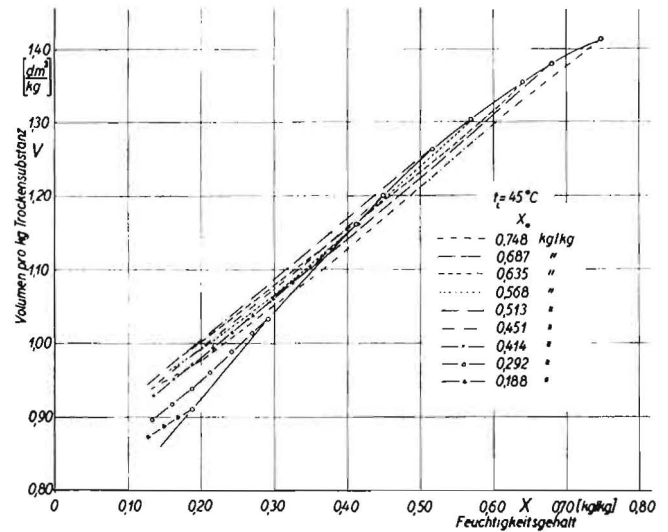


Abb. 5: Schrumpfung von angefeuchtem Weizen während der Trocknung bei verschiedenem Anfangsfeuchtigkeitsgehalt

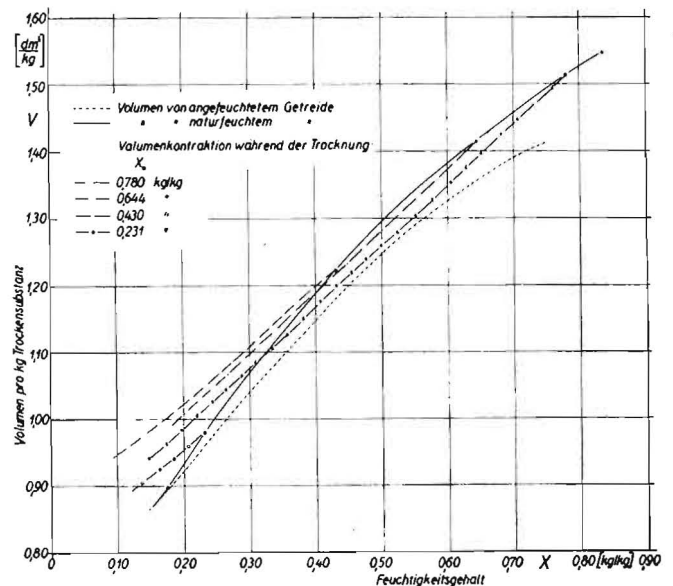


Abb. 6: Schrumpfung von naturfeuchtem Weizen während der Trocknung bei verschiedenem Anfangsfeuchtigkeitsgehalt beziehungsweise Reifegrad

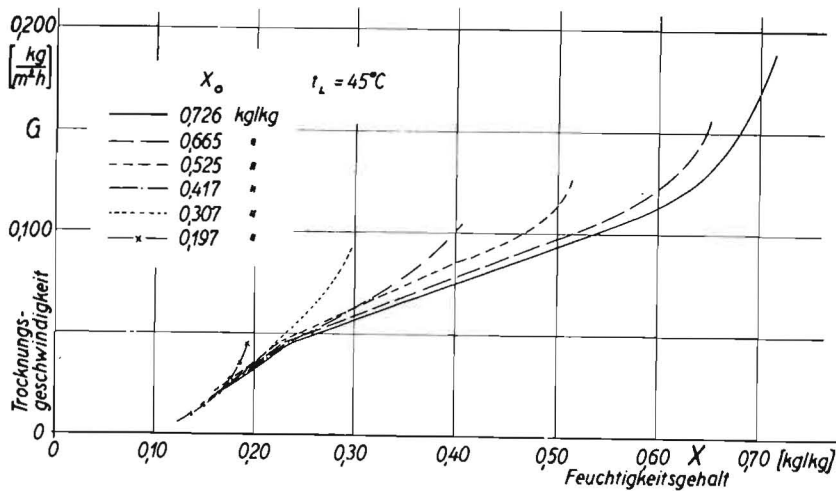


Abb. 7: Trocknungsgeschwindigkeit von angefeuchtetem Weizen bei 45° C Lufttemperatur und verschiedenem Anfangsfeuchtigkeitsgehalt

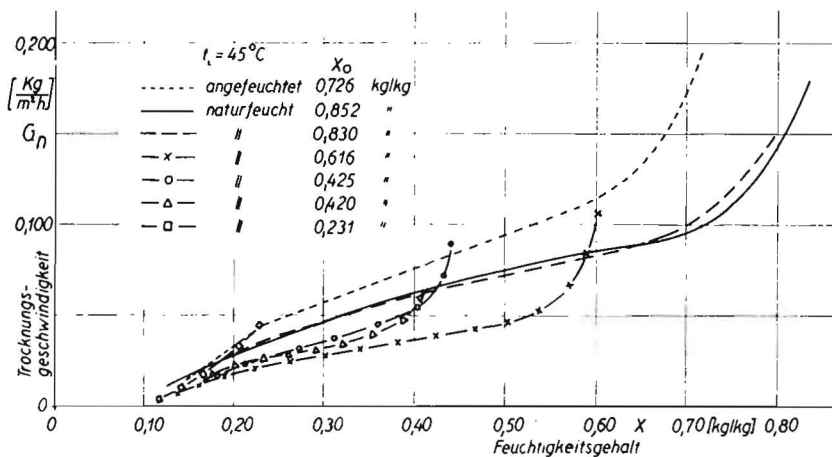


Abb. 8: Trocknungsgeschwindigkeit von naturfeuchtem Weizen bei 45° C Lufttemperatur und verschiedenem Anfangsfeuchtigkeitsgehalt beziehungsweise Reifegrad

Trocknungsgeschwindigkeit bei einer Trockenlufttemperatur von 45° C für angefeuchteten Weizen mit verschiedener Anfangsfeuchtigkeit und Abbildung 8 für naturfeuchten Weizen ebenfalls mit verschiedener, dem unterschiedlichen Reifezustand entsprechenden Anfangsfeuchtigkeit. Sowohl bei angefeuchtetem als auch bei naturfeuchtem Weizen ist bei keinem Feuchtigkeitsgehalt ein Abschnitt konstanter Trocknungsgeschwindigkeit, (I. Trocknungsabschnitt) zu beobachten. Dies bedeutet aber, daß die Trocknung unterhalb  $X_0 \approx 0,75$  [kg/kg] bereits im II. Trocknungsabschnitt stattfindet, was auch Simmonds [2] u. a. festgestellt haben. Die Trocknungsgeschwindigkeitskurven verschiedenen Anfangsfeuchtigkeitsgehaltes nähern sich alle der Verlaufskurve mit dem höchsten Anfangswassergehalt  $X_0 = 0,726$  [kg/kg], während zu Beginn der Trocknung die Unterschiede um so größer sind, je kleiner der Anfangsfeuchtigkeitsgehalt ist.

Hervorgerufen wird diese Erscheinung durch die unterschiedliche Feuchtigkeitsverteilung im einzelnen Getreidekorn. Da die Trocknung im II. Trocknungsabschnitt stattfindet, hat ein Korn der Bezugskurve ( $X_0 = 0,726$  [kg/kg]) noch der Trocknung auf einen beliebigen mittleren Feuchtigkeitsgehalt ein bestimmtes, für seinen Anfangsfeuchtigkeitsgehalt charakteristisches Feuchtigkeitsgefälle im Korninneren, während man annehmen kann, daß die Feuchtigkeit in einem Korn, das bis zu dem gleichen Feuchtigkeitsgehalt angefeuchtet wurde, gleichmäßig verteilt ist.

Wird nun Feuchtigkeit von außen abgeführt, so treten im Falle der Anfeuchtung (Abb. 7) die Diffusionswiderstände sogleich mit beginnender Verlagerung der Verdunstungszone in das Korninnere in Erscheinung, wie der steile Abfall der Trocknungsgeschwindigkeitskurve zu Beginn der Trocknung zeigt. Erst später verlieren die Unterschiede in den Diffusionswiderständen an Gewicht und die Trocknungsgeschwindigkeitskurven verlaufen in die Bezugskurve.

noch Substanzzuwachs stattfindet, größer als bei voll ausgereiftem und von außen angefeuchtetem Korn, wie die in Abbildung 6 noch einmal gestrichelt eingezeichnete Quellungskurve deutlich zeigt.

Bei angefeuchtetem Weizen (Abb. 5) folgt die Schrumpfung während der Trocknung nicht der Quellungskurve. So wird bei hohen Anfangsfeuchtigkeitsgehalten das Volumen während der Trocknung zunächst kleiner als dem Quellungsvolumen entspricht, um schließlich im weiteren Verlauf der Trocknung — unter Feuchtigkeitsgehalten  $X \approx 0,40$  bis  $0,30$  [kg/kg] — größer als das Quellungsvolumen zu bleiben. Eine Erklärung hierfür ist in der unterschiedlichen Feuchtigkeitsverteilung im Korn während der Anfeuchtung und Trocknung zu suchen. So wird bei der Befeuchtung von außen zuerst die Schale naß und damit weich und elastisch, so daß sie der Quellung des Stärkekörpers leicht nachgeben kann. Bei der Trocknung wird dagegen zuerst der Schale die Feuchtigkeit entzogen, sie wird hart und unelastisch, und auch dem Stärkekörper wird zuerst außen die Feuchtigkeit entzogen. Es müssen notwendigerweise im Korn Schrumpfspannungen und Hohlräume entstehen. Wie Abbildung 6 zeigt, ist bei naturfeuchtem Weizen ein ganz ähnliches Verhalten zu beobachten.

Nimmt man vereinfachend die Gestalt des Kornes als Zylinder an, der mit zwei Halbkugeln bedeckt ist, so läßt sich die Oberfläche (noch Kneule [7]) berechnen.

#### Einfluß verschiedener Anfangsfeuchtigkeit auf den Trocknungsverlauf

Unter Berücksichtigung der mit der Trocknung verbundenen Oberflächenschrumpfung zeigt Abbildung 7 den Verlauf der

Allgemein ist die Trocknungsgeschwindigkeit von unreifem, grünen Weizen größer als von reiferem Getreide. Dies dürfte darauf zurückzuführen sein, daß die Diffusionswiderstände der Schale mit der Reife zunehmen; denn bei einem Anfangsfeuchtigkeitsgehalt  $X_0 \approx 0,60$  [kg/kg] war deutlich ein Gelbwerden der Schale zu beobachten. Bei diesem Reifegrad liegt die Trocknungsgeschwindigkeitskurve, wie Abbildung 8 zeigt, am tiefsten, d. h. die Trocknungsgeschwindigkeit ist im Verlauf der Trocknung — vom Beginn abgesehen — am kleinsten. Die gleiche Erscheinung tritt auch bei allen anderen Trockenlufttemperaturen auf. Ebenso ist bei allen Trockenlufttemperaturen die Trocknungsgeschwindigkeit für jeden Reifezustand kleiner als die von angefeuchtetem Weizen (in Abb. 8 ist zum Vergleich die Trocknungsgeschwindigkeitskurve von angefeuchtetem Weizen ( $X_0 = 0,726$  [kg/kg]) punktiert eingezeichnet).

Dies ist einleuchtend, wenn man berücksichtigt, daß bei angefeuchtetem Weizen die Schale voll ausgereift und teilweise abgestorben ist und von außen wieder künstlich befeuchtet wird. Bei naturfeuchtem Getreide dagegen stellt sie einen nach lebenden Organismus dar, der sich im allmählichen Aufbau befindet und in seiner Struktur unverletzt ist. So kann man annehmen, daß die lebende Schale, die ja die Aufgabe hat, das Korn vor mechanischen Beschädigungen und dem Austrakken zu schützen, für Feuchtigkeit weniger durchlässig ist als die abgestorbene, künstlich befeuchtete. Außerdem wird auch der den Hauptteil der Kornfeuchtigkeit aufnehmende Stärkekörper erst allmählich im Verlauf des Wachstums aufgebaut, was ebenfalls den vom angefeuchteten Weizen abweichenden Trocknungsverlauf mitbestimmt.

#### Einfluß der Luftgeschwindigkeit

Nach Abbildung 9 hat die Luftgeschwindigkeit zu Beginn der Trocknung, das heißt wenn die Schalenfeuchtigkeit abtrocknet, einen großen Einfluß auf die Trocknungsgeschwindigkeit, während mit fortschreitender Trocknung, wenn nämlich die

Diffusionswiderstände des Gutes wirksam werden, die Kurven zusammenfallen. Das Heraustreten der Kurve für fast ruhende Luft (laminare Luftbewegung) löst auf die Bildung einer Grenzschicht über der Kornoberfläche schließen, durch welche die Dampfmoleküle erst hindurch diffundieren müssen.

### Einfluß der relativen Luftfeuchtigkeit

Da die Wasserhergabe bei der Gleichgewichtsfeuchtigkeit, die der Sorptionsisotherme der gleichen Weizensorte entnommen wurde, zum Erliegen kommt, ist es sinnvoll, die Trocknungsgeschwindigkeit über dem „freien“ Wassergehalt aufzutragen (Abb. 10). Nachdem die Diffusionswiderstände des Korns erst mit zunehmender Trocknung wirksam werden, bestimmen zu Beginn noch die äußeren Trocknungsbedingungen, das heißt hier auch die Luftfeuchte, wesentlich den Verlauf der Trocknung. Nach Abbildung 10 fällt die Trocknungsgeschwindigkeit im III. Trocknungsabschnitt bis zur Gleichgewichtsfeuchtigkeit ( $X - X_{gl} = \text{Null}$ ) nicht, wie es für gleichbleibende Stoffeigenschaften sein müßte, linear ab, wodurch die Trocknungszeit vergrößert wird. Bei naturfeuchtem Getreide ist dies ähnlich, nur kann man die Trocknungsgeschwindigkeit nicht auf einen „freien“ Feuchtigkeitsgehalt ( $X - X_{gl}$ ) beziehen, da jedem Feuchtigkeitsgehalt ein unterschiedlich reifes Getreide entspricht, weshalb jedem Reifezustand entsprechende Sorptionsisothermen zugrundegelegt werden müßten.

### Einfluß der Trockenlufttemperatur

Mit zunehmender Lufttemperatur steigt der Wärmeübergang von der Luft zum Gut und damit die Gutstemperatur. Hierdurch wird bei gleichem Feuchtigkeitsgehalt der Luft das Dampfteildruckgefälle zwischen Gut und Luft größer, wodurch die Trocknungsgeschwindigkeit erhöht wird. Außerdem wächst mit der Gutstemperatur die kapillare Leitfähigkeit. Der starke Einfluß der Lufttemperatur bei angefeuchtem Weizen geht aus Abbildung 11 hervor. Dabei zeigt sich zu Beginn der Trocknung ein abweichender Trocknungsverlauf bei Lufttemperaturen über und unter  $\approx 60^\circ \text{C}$ .

Unterhalb  $\approx 60^\circ \text{C}$  sinkt die Trocknungsgeschwindigkeit zu Beginn der Trocknung steil ab (Abb. 7), oberhalb  $\approx 60^\circ \text{C}$  nimmt sie dagegen wesentlich weniger stark ab, bei niedrigeren Anfangsfeuchtigkeitsgehalten bleibt sie sogar über einen größeren Bereich nahezu konstant (Abb. 12). Dies spiegelt sich auch in der schärferen Einbuchtung der Kurve 3a der mittels Thermolement gemessenen Temperatur des feuchte-

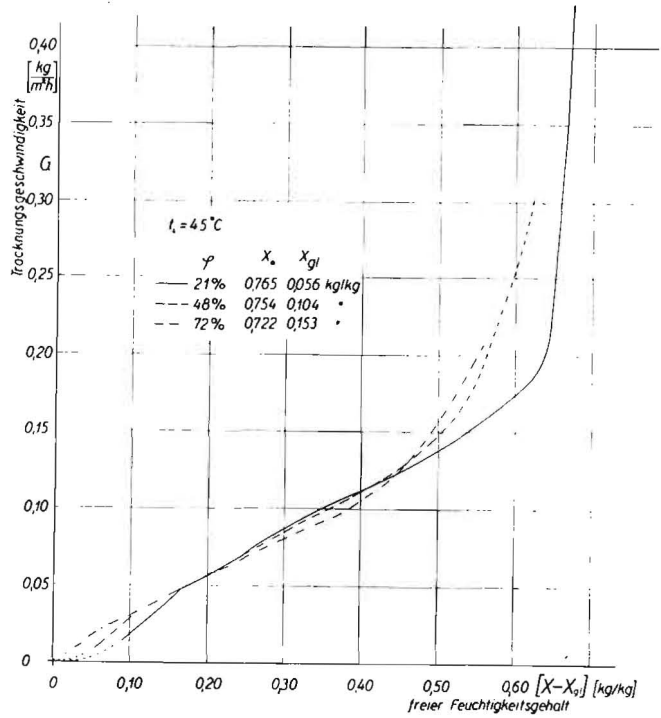


Abb. 10: Trocknungsgeschwindigkeitsverlauf bezogen auf den abtrockenbaren („freien“) Feuchtigkeitsgehalt von angefeuchtem Weizen

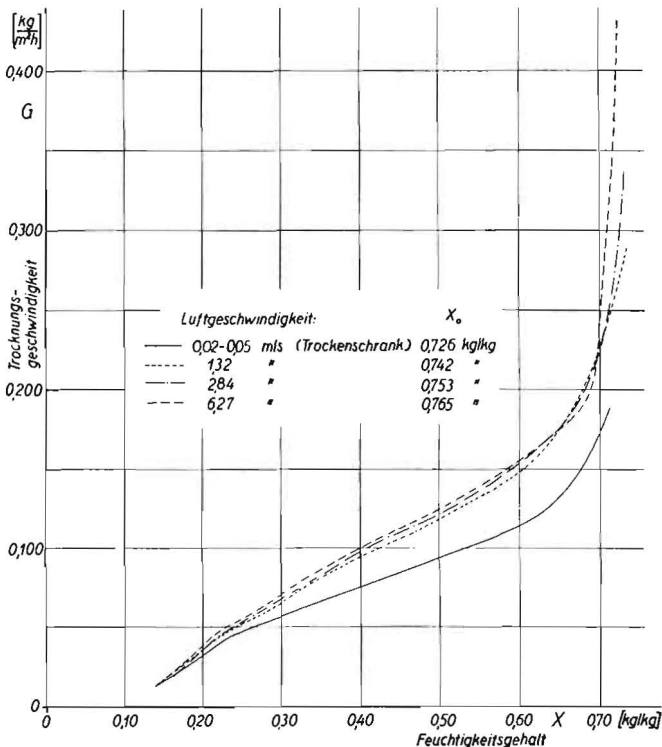


Abb. 9: Einfluß der Luftgeschwindigkeit auf die Trocknungsgeschwindigkeit von angefeuchtem Weizen

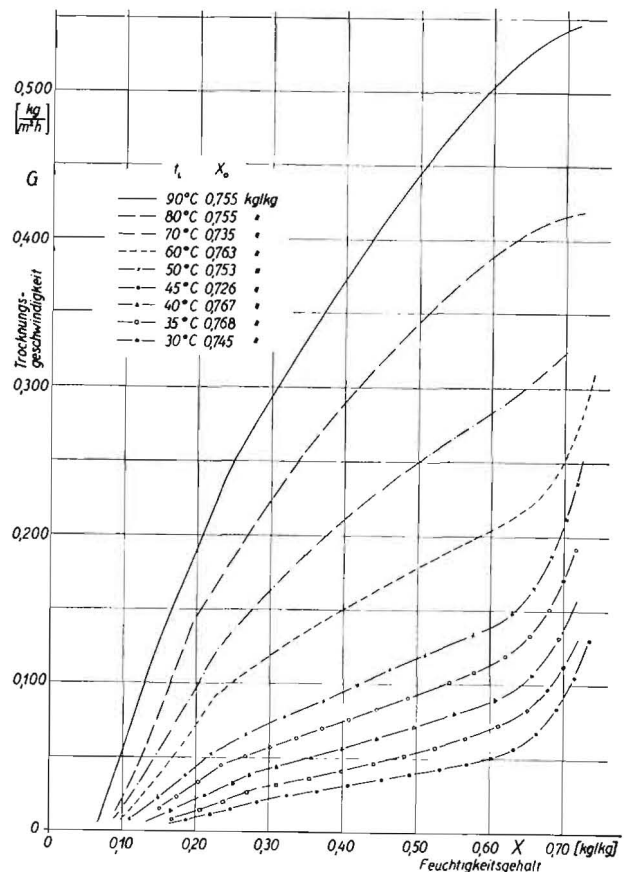


Abb. 11: Einfluß der Lufttemperatur auf die Trocknungsgeschwindigkeit von angefeuchtem Weizen bei hohen Anfangsfeuchtigkeitsgehalten

sten Korns in Abbildung 13 wider, die ja nach Aufwärmung im „Konstant“-Abschnitt verhalten muß. Bei Verdunstung an der Kornoberfläche müßte sich hier die Kühlgrenztemperatur beziehungsweise bei kleineren Luftgeschwindigkeiten als 2 [m/s] die entsprechende Beharrungstemperatur einstellen. Da die in dieser Periode gemessenen Temperaturen jedoch größer sind, ist der Ort der Verdunstung offenbar an einer

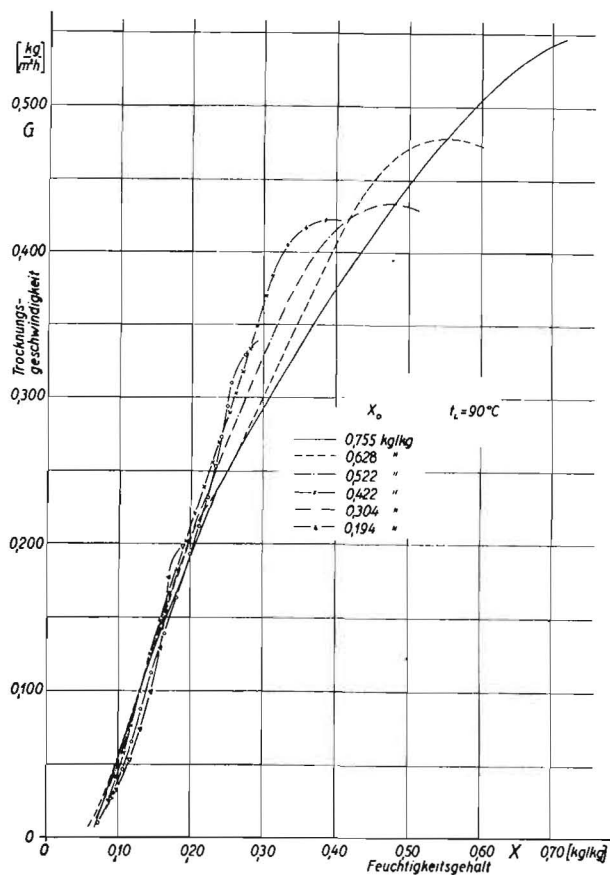


Abb. 12: Trocknungsgeschwindigkeit von angefeuchtetem Weizen bei 90°C Lufttemperatur und verschiedenem Anfangsfeuchtigkeitsgehalt

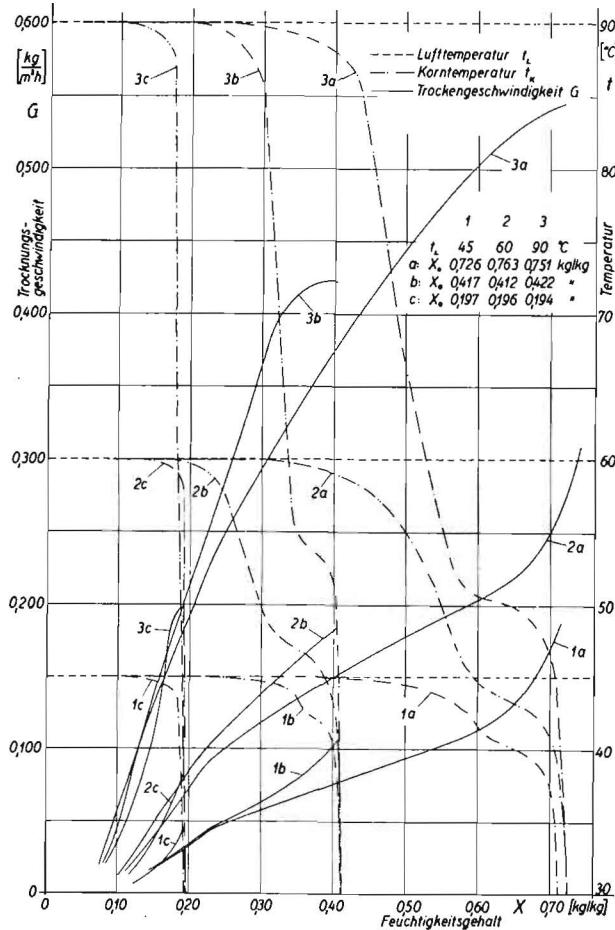


Abb. 13: Temperaturverlauf im Weizenkorn während der Trocknung bei verschiedenen Lufttemperaturen und Anfangsfeuchtigkeitsgehalten (Luftgeschwindigkeit 0,02 bis 0,05 [m/s])  
 Lufttemperatur: 90°C 60°C 45°C  
 Kühlgrenztemperatur: 33,5°C 27,3°C 24,0°C  
 Beharrungstemperatur: 36,7°C 30,5°C 26,3°C

tiefer gelegenen Stelle zu suchen, an der Gleichgewicht herrscht zwischen der Feuchtigkeitsmenge, die durch Leitung aus dem Korninneren nachgeliefert wird, und derjenigen, die dort wegdiffundiert. Ist die Nachlieferung aus dem Korninneren zur Bildung einer Schicht flüssiger Phase, hier also offenbar unter der Oberfläche, nicht mehr ausreichend, verlagert sich die Verdunstung rascher als bei niedrigeren Korntemperaturen in das Korninnere, um ebensoviel rascher steigt die Korn-temperatur bis auf die Lufttemperatur, und die Trocknungs-geschwindigkeit sinkt steil ab. Nach biochemischen Untersu-chungen von Schäfer [6] wird bei Korntemperaturen von 55 bis 60°C das sonst zähe Plasma in den rechteckigen Zellen der Aleuronschicht der Schale fest, so daß es sich beim Quer-schneiden und Schälen wie „Pflastersteine“ aus den Zellwän-den löst, was der Trennung beim Mahlen Vorschub leistet. Die mit zähem Plasma gefüllten Zellen bildeten zunächst eine geschlossene, nachgiebige Haut, die man sich für Flüssigkeit schwach durchlässig vorstellen kann, während der durch Er-wärmen festgewordene Zelleninhalt der Schrumpfung offen-bar nicht nachgeben kann. Er reißt die Zellwände auf und löst sich von ihnen, so daß Kapillaren und Hohlräume entstehen, die eine Flüssigkeitsleitung aus dem Korninneren möglich machen. Aus dieser Strukturänderung eines bestimmten Scha-lenbereichs dürfte sich primär der anders geartete Trock-nungsverlauf bei hohen Korntemperaturen erklären; sekundär mag hier noch eine mit der Schrumpfung verbundene Pres-sung der Schale auf den Stärkekörper hinzukommen; außer-dem wird die Feuchtigkeitsleitung aus dem Korninneren durch die mit zunehmender Temperatur geringere Zähigkeit des Wassers unterstützt. — Bei naturfeuchtem Getreide ist ein ähnliches Verhalten zu beobachten.

#### Vergleich des Trocknungsverlaufes von angefeuchtetem und naturfeuchtem Getreide

Bei der schon erörterten Strukturverschiedenheit ist ein Ver-gleich des Trocknungsverlaufes von angefeuchtetem und naturfeuchtem Weizen streng genommen nicht angebracht. Naturfeuchtes Getreide steht jedoch nur während einer sehr kurzen Zeitspanne im Jahr zur Verfügung. Trocknungsver-suche mit ungefeuchtetem Weizen dagegen können jederzeit durchgeführt werden. Deshalb ist es wertvoll, zu wissen, wie weit größenordnungsmäßig die Trocknungsgeschwindigkeiten und damit die die Praxis interessierenden Trocknungszeiten von naturfeuchtem Getreide und künstlich befeuchtetem von-einander abweichen.

Bei der Trocknung vom Anfangsfeuchtigkeitsgehalt  $X_0$  auf den Endfeuchtigkeitsgehalt  $X_m$  gilt unter Annahme gleichen Raum-gewichtes des Trockenstoffes  $\gamma_s$  und gleicher Kornform für die Trocknungszeit von angefeuchtetem und naturfeuchtem Wei-zen nach Gl. (2)

$$t \left| \frac{X_m}{X_0} = k \cdot z \int_{X_0}^{X_m} \frac{1}{G} dX_m \right. \quad (2a)$$

wobei  $k$  eine von den Trocknungsbedingungen unabhängige Konstante ist und  $z$  die Anzahl der Körner je kg Trockensub-stanz bedeutet. Bei angefeuchtetem Weizen ist  $z$  bei jedem Anfangsfeuchtigkeitsgehalt gleich groß und nur von der Sorte abhängig, während die Anzahl der Körner je kg Trockensub-stanz bei naturfeuchtem Getreide mit steigender Feuchte be-ziehungsweise Unreife größer wird.

Ist  $z_n = \psi \cdot z_a$  (Index „n“ = naturfeucht „a“ angefeuchtet), wobei  $\psi$  vom Anfangsfeuchtigkeitsgehalt beziehungsweise Reifegrad des naturfeuchten Getreides abhängt, so ergibt sich für die Trocknungszeit von naturfeuchtem Weizen

$$t_n \left| \frac{X_m}{X_0} = \psi \cdot \frac{G_a}{G_n} \cdot t_a \right| \frac{X_m}{X_0} \quad (3)$$

Mit Gl. (3) könnte die Trocknungszeit von naturfeuchtem Wei-zen aus Versuchen mit angefeuchtetem berechnet werden, sofern  $G_a/G_n$  und  $\psi$  von der Feuchtigkeitsabnahme während der Trocknung, der Trockenlufttemperatur und der Anfangs-feuchtigkeit unabhängig wäre. Es läßt sich jedoch für jeden

Anfangsfeuchtigkeitsgehalt  $X_0$  ein mittleres Verhältnis von  $G_a/G_n$  ( $[G_a/G_n]_m$ ) bestimmen, sofern man die untere Grenze  $X_m =$  Endfeuchtigkeitsgehalt festlegt. Für den praktischen Gebrauch erscheint es vorteilhaft, hierfür den Wert für eine sichere Lagerfähigkeit des Getreides  $X_m = 0,18$  [kg/kg] (bezogen auf Naßgewicht:  $X' \approx 15\%$ ) zu wählen, da nur die Trocknung bis zu diesem Feuchtigkeitsgehalt von Interesse ist. Somit gilt für die Trocknungszeit von naturfeuchtem Getreide von einem beliebigen Anfangsfeuchtigkeitsgehalt  $X_0$  bis zum Endfeuchtigkeitsgehalt  $X_m = 0,18$  [kg/kg]:

$$t_n \left| \frac{X_m = 0,18}{X_0} \right. = \psi \cdot \left[ \frac{G_a}{G_n} \right]_m \cdot t_a \left| \frac{X_m = 0,18}{X_0} \right. \quad (3a)$$

wobei  $\psi$  für kleinere Anfangsfeuchtigkeiten als  $0,40$  [kg/kg]  $\approx 1$  beträgt, und  $[G_a/G_n]_m$  für die Trockenlufttemperatur und Anfangsfeuchtigkeit  $X_0$  der Abbildung 14 zu entnehmen ist. Hieraus ergeben sich folgende Aufschlüsse: Die Trocknungszeit von naturfeuchtem Weizen ist allgemein länger als bei angefeuchtem, wobei der Verlängerungsfaktor zwischen 1 und 2 liegt. Je feuchter das Getreide (in dem für die praktische Getreidetrocknung überhaupt nur sinnvollen Bereich von  $X_0 \approx 0,20$  bis  $0,40$  [kg/kg]) und je niedriger die Trockenlufttemperatur ist, um so größer ist der Verlängerungsfaktor.

### Zusammenfassung

Die Trocknung des Getreidekornes wird weitgehend durch seine gewachsene Struktur bestimmt. Außerdem schrumpft es stark während der Trocknung und seine physikalischen Eigenschaften werden durch Wärmeeinwirkung beeinflusst. Vor allem findet bei Korntemperaturen über  $\approx 50^\circ\text{C}$  ein Denaturieren des Plasmas der Aleuronschicht statt, wodurch eine dem I. Trocknungsabschnitt vergleichbare Trocknungsperiode mit höherer Trocknungsgeschwindigkeit entsteht. Bei Korntemperatur unter  $\approx 50^\circ\text{C}$  erfolgt dagegen die Trocknung von Anfang an im II. Trocknungsabschnitt. Da die höheren Temperaturen die natürlich gewachsene Kornstruktur antasten, darf aus diesem Bericht wenigstens für die landwirtschaftliche Praxis oder die Kornhäuser auf keinen Fall die Empfehlung hergeleitet werden, mit solchen Temperaturen zu arbeiten, weil die Apparate dann mehr leisten würden.

### Résumé:

Dr.-Ing. N. Dietrich:

„Wärmelufttrocknung von naturfeuchtem und künstlich befeuchtem Weizen-Einzelkorn.“

Da naturfeuchtes Getreide für Trocknungsuntersuchungen jeder Art nur während einiger Tage im Jahr zur Verfügung steht, wurden Trocknungsversuche mit naturfeuchtem und künstlich angefeuchtem Weizen der gleichen Sorte unter gleichen Trocknungsbedingungen durchgeführt. Ein Vergleich der Ergebnisse ermöglicht den Rückschluß auf den zu erwartenden Trocknungsablauf von naturfeuchtem Weizen, sofern Versuche mit angefeuchtem Weizen vorliegen. Untersucht wurde hierbei der Einfluß der mit der Trocknung verbundenen Schrumpfung, der Luftgeschwindigkeit, der Luftfeuchte und der Lufttemperatur. Besonders die Lufttemperatur ist für die Größe der Trocknungsgeschwindigkeit bestimmend. Bei Korntemperaturen über und unter  $50^\circ\text{C}$  tritt ein unterschiedlicher Trocknungsablauf in Erscheinung, der in Anlehnung an die Auffassung von Schäfer auf Denaturieren des Plasmas in der Aleuronschicht zurückzuführen ist. Bei Korntemperaturen unter  $50^\circ\text{C}$  sinkt die Trocknungsgeschwindigkeit im Anfang der Trocknung rasch ab, während sie bei höheren Temperaturen als  $50^\circ\text{C}$  über einen gewissen Bereich nahezu konstant bleibt, womit sich eine Art „erster Hauptabschnitt“ andeutet. Die Trocknungszeiten von naturfeuchtem und angefeuchtem Weizen von beliebigem Anfangsfeuchtigkeitsgehalt bis zur sicheren Lagerfähigkeit ( $X' = 15\%$ , bezogen auf Naßgewicht) weichen um so mehr von einander ab, je größer die Anfangsfeuchtigkeit und je niedriger die Lufttemperatur ist. Der Verlängerungsfaktor liegt dabei zwischen 1 und 2 und ist in einem Diagramm für verschiedene Temperaturen und Anfangsfeuchtigkeitsgehalte dargestellt.

Dr. Ing N. Dietrich:

“On the Drying of Naturally and Artificially Moistened Wheat Grains.”

Since naturally moist grain is only available for all types of drying investigations for a few days in each year, investigations were made on naturally moist and artificially moistened grain of identical type and under identical drying conditions. A comparison of the results obtained enabled inferences to be made concerning the nature of the drying cycle that might be expected to take place with naturally moist grain. The following factors were specially examined during these investigations:— contraction of the grain due to drying, the velocity of the air current used for drying, the moisture content of the air and the ambient air temperature. The air temperature is of particular importance in determining the rate of drying. There is a great difference in the progress of the drying process if the grain temperature is under or over  $50^\circ\text{C}$ , which according to Schäfer, is due to the denaturing of the plasma in the aleurone layer. At temperatures below  $50^\circ\text{C}$  the rate of drying drops appreciably at the commencement of the drying process, whilst, at temperatures over  $50^\circ\text{C}$ , it remains practically constant, which seems to indicate the formation of a kind of a “First Primary Period”. The time required for drying of naturally and artificially moistened wheat at any chosen temperature until it is dry enough to be safely stored ( $X' = 15\%$ ) varies in proportion to the moisture content of the grain at the commencement of the drying process and the ambient air temperature. The factor of linear elongation lies between 1 and 2 in this case. A diagram showing the value of this factor for various temperatures and initial moisture content is included.

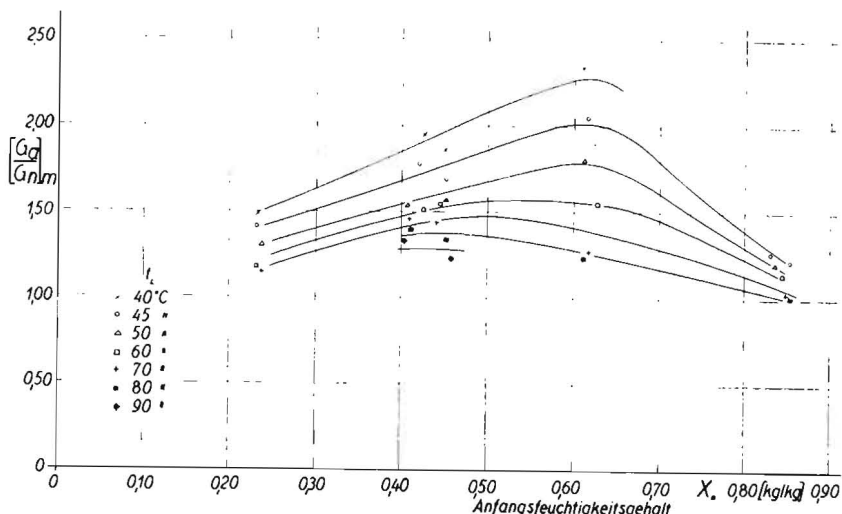


Abb. 14: Verhältnis der mittleren Trocknungsgeschwindigkeit von angefeuchtem und naturfeuchtem Weizen bei der Trocknung bis zum Endfeuchtigkeitsgehalt  $X_m = 0,18$  [kg/kg] in Abhängigkeit vom Anfangsfeuchtigkeitsgehalt beziehungsweise Reifegrad

Dem Unterschied im biologischen und chemischen Aufbau von naturfeuchtem Weizen gegenüber voll ausgereiftem, künstlich von außen befeuchtem entspricht ein abweichender Trocknungsablauf. Die Trocknungszeiten von naturfeuchtem und künstlich befeuchtem Weizen weichen um so mehr voneinander ab, je größer die Anfangsfeuchtigkeit und je niedriger die Trockenlufttemperatur ist.

### Schrittum:

- [1] Müller, W.: Verdunstung und Wärmeübergang beim Getreidetrocknen. Diss. Zürich 1943.
- [2] Simmonds, W. H. C., G. T. Ward und Ewen McEwen: The Drying of Wheatgrain. Part I: The Mechanism of Drying. Trans. Instn. Chem. Engrs. 31 (1953) H. 3 S. 265/278.
- [3] Simmonds, W. H. C., G. T. Ward und Ewen McEwen: The Drying of Wheatgrain. Part II: Through-Drying of Deep Beds. Trans. Instn. Chem. Engrs. 31 (1953) H. 3 S. 279/288.
- [4] Krischer, O.: Fortschritte der Verfahrenstechnik 1952/53. Weinheim/Bergstr. 1954. S. 235/244.
- [5] Lindberg, J. E.: Versuche über Wärmebehandlung von Weizen. Getreide u. Mehl 3 (1953) H. 3 S. 17/22.
- [6] Schäfer, W.: Über das Verhalten des Weizenkorns bei der Konditionierung. Diss. Braunschweig 1953.
- [7] Kneule, Fr.: Trocknung bei Berücksichtigung der veränderlichen Stoffaustauschfläche. ZVDI 91 (1949) H. 19 S. 506.
- [8] Cleve, H. und H. J. Hoffmann: Temperaturmessungen im Getreidekorn. Mühle 89 (1952) H. 27 S. 435/442.

Dr.-Ing. N. Dietrich:

«Séchage par air chaud de grains de blé possédant encore leur humidité naturelle et de grains mouillés artificiellement.»

Etant donné que l'on ne dispose de grains à l'état d'humidité naturelle que pendant quelques jours dans l'année, on a effectué des essais de séchage dans des conditions identiques, avec des grains de la même variété de blé, dont les uns possédaient encore leur humidité naturelle tandis que les autres ont été mouillés artificiellement. Une comparaison des résultats permet d'établir les courbes de séchage probables du blé à humidité naturelle quand on exécute des essais avec des grains mouillés artificiellement. L'auteur a examiné l'influence du rétrécissement consécutif au séchage, de la vitesse de l'air, de l'humidité d'air et de la température de l'air. Ce dernier facteur influe en particulier sur la vitesse de séchage. Les courbes de séchage diffèrent suivant que la température est supérieure ou inférieure à 50° C. Cette différence peut provenir, d'après Schäfer, d'une dénaturation du plasma de la couche d'aleurone. La vitesse de séchage abaisse au début rapidement quand la température est inférieure à 50° tandis qu'elle se maintient à peu près constante pendant une première phase de séchage quand la température est supérieure à 50°. La durée de séchage, depuis la teneur d'humidité initiale jusqu'à l'état de conversion, du blé à humidité naturelle diffère d'autant plus de la durée de séchage du blé mouillé artificiellement que l'humidité initiale a été plus élevée et la température de l'air plus basse. Le facteur de prolongement est situé entre 1 et 2 et est représenté par un diagramme des différentes températures et teneurs d'humidité initiales.

Ing. Dr. N. Dietrich: «El secado de granos sueltos de trigo con humedad natural o artificialmente humedecidos, por aire caliente.»

Como para los ensayos de secado de toda clase se dispone de trigo con humedad natural solamente durante unos pocos días al año, se hicieron ensayos de secado lo mismo con trigo de humedad natural, como también con trigo artificialmente humedecido de la misma clase, aplicándose las mismas condiciones de secado. La comparación de los resultados permite deducciones en cuanto al proceso de secado de trigo con humedad natural, siempre que se conozcan los resultados conseguidos con trigo humedecido. Se ha investigado la influencia de la contracción, consecuencia del secado, de la velocidad de la corriente de aire, su grado higrométrico y de temperatura. Es en primer lugar la temperatura del aire la que influye en la rapidez del secado. Siendo la temperatura del trigo superior a 50° C ó inferior, el proceso de secado será distinto, debido, según las opiniones de Schäfer, a la denaturalización del plasma en la capa de aleurón. La velocidad de secado baja rápidamente al principio del secado, siendo la temperatura del trigo inferior a 50° C, quedando en cambio aproximadamente constante dentro de cierto margen, cuando la temperatura sea superior a 50° C, con lo que se indica una especie de fase inicial. El tiempo de secado de trigo con humedad natural difiere del de trigo humedecido, con cualquier contenido inicial de agua, hasta llegar a la condición de almacenado seguro ( $x' = 15\%$ ), tanto más, cuanto mayor sea el grado de humedad inicial y cuanto más baja la temperatura del aire. El factor de prolongación se encuentra entre 1 y 2, habiéndose le representado en un diagrama para varias temperaturas y para varios grados de humedad inicial.

## Rundschau

### Eine neue Freikolben-Gasturbine für Ackerschlepper

Gasturbinen großer Leistungen werden bekanntlich seit Jahren mit Erfolg in Industrie und Wirtschaft verwendet. Durch die in letzter Zeit bekannt gewordenen Versuche ist die Gasturbine auch für das Kraftfahrzeug ins Blickfeld gerückt worden; sie wird versuchsweise bereits mit Leistungen bis herab zu 50 PS eingebaut [1].

Die von H. Meyer [2] geäußerte Annahme, daß die Gasturbine auch einmal im Ackerschlepper Verwendung finden wird, ist durch verschiedene Berichte aus ausländischen Zeitschriften über eine neue Entwicklung bei der Ford Motor Comp. rascher bestätigt worden, als erwartet werden konnte [3, 4, 5, 6].

Im März 1957 wurde in Birmingham, USA, auf einer Spezialschau für die Presse die neue Ford-„Freikolben-Gasturbine“, eingebaut in den Schlepper „Typhoon“ (Taifun), im Betrieb vorgeführt. Der Leiter der Entwicklungsabteilung der Ford Motor Comp. erklärte, daß der Taifun mit der neuen Antriebsmaschine nicht etwa als Versuchs-Kuriosität anzusprechen sei, sondern daß die Firma hoffe, einen Ackerschlepper mit der Freikolben-Gasturbine auf den Markt zu bringen, sobald die Arbeiten endgültig abgeschlossen seien. Die angebahnte Entwicklung bedeute einen wesentlichen Beitrag zur Herabsetzung der Kosten für Schlepper in landwirtschaftlichen Betrieben.

Bevor auf die Ford-„Freikolben-Gasturbine“ näher eingegangen wird, sollen einige Betrachtungen über die verschiedenen Bauarten von Gasturbinen vorangestellt werden. Von den verschiedenen möglichen und verwirklichten Arbeitsprozessen der Gasturbine mit Gleichdruckverbrennung kommt für das Kraftfahrzeug nur ein Verfahren in Frage, bei dem (Abb. 1) Luft

in einem Kompressor 1 verdichtet und dann zur Brennkammer 2 geführt wird. Hier wird Kraftstoff eingespritzt. Die Brenngase expandieren in der nachgeschalteten Turbine 3. Ein Teil ihrer Leistung dient zum Antrieb des Kompressors, während der Überschuß als Nutzleistung abgegeben wird.

Nachteilig für den Kraftfahrzeugbetrieb ist bei dieser Bauart der Drehmomentverlauf mit fallender Drehzahl. Es sinken nämlich das Drehmoment und somit die Leistung rasch ab. Eine wesentlich bessere Charakteristik wird bei einer Anlage mit zwei getrennten Gasturbinen erzielt (Abb. 2). Die eine Gasturbine treibt lediglich den Luftkompressor an, stets mit der ihnen beiden gemäßen Drehzahl. Die andere wirkt ausschließlich auf die Triebräder des Kraftfahrzeugs. Das Drehmoment steigt mit fallender Drehzahl an. Das Anfahrtdrehmoment ist etwa dreimal so groß wie das Drehmoment bei Höchstleistung. Es ergibt sich somit ein Drehmomentverlauf, der noch günstiger ist als beim Dieselmotor.

Die dritte Bauart ist die Freikolben-Gasturbine (Abb. 3); sie wird treffender in der Literatur auch mit Gasturbine mit vorgealtetem Freikolbengaserzeuger bezeichnet. Solche Freikolben-Verbrennungskraftmaschinen mit großen Leistungen werden im Ausland bereits mit Erfolg in Lokomotiven, Schiffen, Elektrizitätswerken eingebaut [7]. Völlig neuartig jedoch ist ihre Verwendung als Antriebsmaschine für Ackerschlepper.

Die Freikolben-Gasturbine besteht aus zwei Bauelementen, dem Freikolbengaserzeuger 1 und der Gasturbine 2. Der Gaserzeuger, der nach dem Zweitakt-Dieserverfahren mit Gleichstromspülung arbeitet, übernimmt die Funktion des Kompressors und der Gasturbine nach Abbildung 2. Der Kraftzylinder a

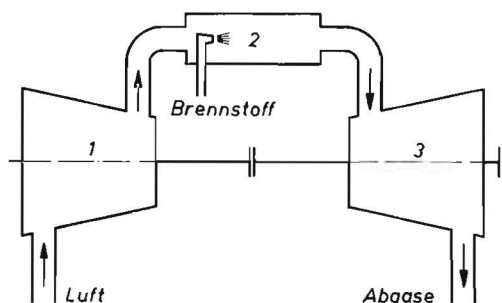


Abb. 1: Arbeitsprozeß der Gasturbine mit Turboverdichter

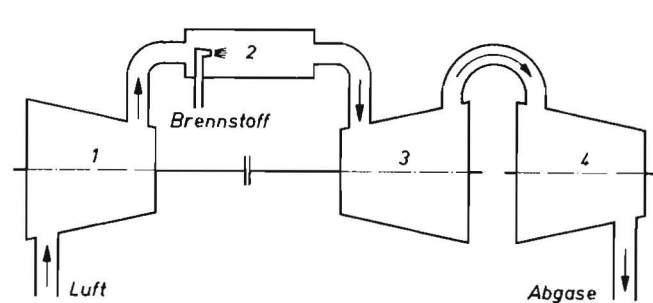


Abb. 2: Wie Abb. 1, jedoch mit zwei getrennten Turbinen