

# Die Belüftungstrocknung von erntefrischem und vorgetrocknetem Körnermais unter thermodynamischem und mikrobiologischem Aspekt

Von Heinz Kuppinger, Hans-Martin Müller und Werner Mühlbauer, Stuttgart-Hohenheim\*)

Mitteilung aus dem Sonderforschungsbereich 140 – Landtechnik "Verfahrenstechnik der Körnerfruchtproduktion" der Universität Hohenheim

DK 631.365:664.8

In den letzten Jahren führten steigende Energiepreise zu einem starken Anstieg der Produktionskosten in der Landwirtschaft, wobei insbesondere Verfahren wie die Körnermaistrocknung betroffen waren. Es wird daher verstärkt an der Entwicklung von Verfahren gearbeitet, mit denen Körnermais mit minimalem Energieaufwand getrocknet werden kann. Eines dieser Verfahren ist die Belüftungstrocknung, die bislang vorwiegend zur Konservierung von Heu und Getreide in der Landwirtschaft eingesetzt wurde.

Im folgenden wird über Belüftungsversuche von erntefrischem und vorgetrocknetem Körnermais berichtet. Bei den Versuchen wurde der Anfangsfeuchtegehalt der Körner und die Luftgeschwindigkeit variiert und der Bedarf an thermischer und mechanischer Energie ermittelt. Zur Beurteilung des Konservierungserfolges wurde der Besatz an verschiedenen Mikroorganismengruppen herangezogen.

## 1. Einleitung

Die Trocknung von Körnermais ist bedingt durch den hohen Feuchtegehalt der Körner bei der Ernte ( $U_1 = 30-45\%$ ) mit einem erheblichen Energieaufwand verbunden. Steigende Energiepreise seit der Energiekrise im Jahre 1973 führten daher zu einem starken Anstieg der Trocknungskosten. Die Anpassung der Kapazität der Trocknungsanlagen an die Bergeleistung der Erntemaschinen bereitet nach wie vor Schwierigkeiten, da die Leistung der vorhandenen Trocknungsanlagen oft nicht ausreicht, die in einem kurzen Zeitraum anfallenden Erntemengen zu konservieren. Während bislang die Entwicklung auf dem Gebiet der Trocknungstechnik dahin ging, die Leistung der Trocknungsanlagen zu steigern, bekommen in Zukunft Trocknungsverfahren, die mit minimalem Energieaufwand arbeiten, eine immer größere Bedeutung.

Die Leistung von Trocknungsanlagen kann in erster Linie durch die Anwendung hoher Trocknungslufttemperaturen gesteigert werden, wodurch gleichzeitig der Energiebedarf vermindert wird [1]. Bei der Trocknung von Körnermais mit hohen Lufttemperaturen ( $\vartheta_L = 80-250\text{ °C}$ ) bereitet allerdings der Entzug der Feuchte im Bereich zwischen  $U = 20\%$  und dem lagerfähigen Zustand

von  $U = 14\%$  erhebliche Schwierigkeiten. Die Trocknungsgeschwindigkeit ist im Feuchtebereich zwischen 14 und 20% wesentlich geringer als zu Beginn der Trocknung, da die Feuchte vom Korninnern an die Kornoberfläche transportiert werden muß. Die geringe Trocknungsgeschwindigkeit führt zu langen Verweilzeiten der Körner im Trockner und ist damit eine der Ursachen für das große Bauvolumen von Trocknungsanlagen. Um die Trocknungsgeschwindigkeit im Bereich der Endtrocknung ( $U = 14-20\%$ ) zu erhöhen, wird meist mit Luftüberschuß getrocknet. Dadurch kann zwar die Verweilzeit der Körner im Trockner verkürzt werden, der thermische Wirkungsgrad des Trockners wird jedoch infolge der geringen Sättigung der Abluft erheblich verschlechtert.

Bei der Trocknung mit hohen Lufttemperaturen können aufgrund der Temperatureinwirkung sowohl Qualität als auch Quantität der Inhaltsstoffe vermindert und die technologischen Eigenschaften verschlechtert werden. Die Veränderung der Nährstoffe tritt insbesondere im Feuchtebereich zwischen 14 und 20% auf [2]. Außerdem können sich durch eine schnelle Abkühlung der Körner nach Beendigung der Trocknung Spannungsrisse im Korn ausbilden, die bei nachfolgenden Förder- und Transportvorgängen zu Bruchkorn führen. Dadurch wird die Weiterverarbeitung der Maiskörner in der Naß- und Trockenmüllerei erheblich beeinträchtigt [3].

Eine andere Möglichkeit zur Senkung des Energiebedarfs bei der Trocknung und zur Erhöhung der Trocknungskapazität stellt die Belüftungstrocknung dar, wie sie in den Jahren zwischen 1950 und 1960 von Segler [4], Dencker [5], Wenner [6] u.a. für die Konservierung von Heu, Getreide, Kartoffeln, Rüben und Gemüse in der Bundesrepublik eingeführt wurde. Die Belüftungstrocknung ist ein Trocknungsverfahren, bei dem Außenluft ( $\vartheta_{L0} = 5-30\text{ °C}$ ) eine ruhende Körnerschüttung durchströmt. Dabei wird das natürliche Trocknungspotential der Luft genutzt, so daß der Energiebedarf für das Verfahren im wesentlichen auf den Gebläseantrieb zur Erzeugung des Luftstroms beschränkt bleibt. Der Trocknungsvorgang verläuft bei der Belüftungstrocknung infolge der niedrigen Lufttemperaturen und der zumeist geringen Luftdurchsätze sehr langsam. Insbesondere bei der Belüftung von sehr feuchtem Körnermais ( $U_1 = 35-45\%$ ) kann es unter Umständen Wochen dauern, bis die Körner auf lagerfähigen Zustand getrocknet sind. Dabei besteht die Gefahr, daß Trockenmasseverluste durch den enzymatischen Abbau der Stärke und die Tätigkeit von Mikroorganismen entstehen. Weiter kann durch die Vermehrung der Mikroorganismen (Bakterien, Schimmelpilze, Hefen) und durch deren Stoffwechselprodukte Geruch, Geschmack, Farbe, Nährstoffgehalt und Keimfähigkeit der Körner verändert werden.

Durch die mikrobiell bedingten Veränderungen können bei Körnermais, der als Futtermittel verwendet wird, die Futteraufnahme und -verwertbarkeit zurückgehen und es können durch Zellabbau- oder Stoffwechselprodukte Krankheiten beim Tier hervorgerufen werden [7, 8]. Bei der Belüftungstrocknung müssen die Bedingungen daher so gewählt werden, daß ein Verderb der Körner durch Mikroorganismen verhindert wird.

Die Verfasser danken der chemisch-technischen Assistentin Fräulein Dorothea Hirschbach für ihre Mitarbeit bei der Durchführung und Auswertung der Versuche.

\*) Dipl.-Ing. Heinz Kuppinger ist wissenschaftlicher Mitarbeiter des Sonderforschungsbereichs 140 – Landtechnik, Dr.rer.nat. Hans-Martin Müller, Dozent für Futtermittelmikrobiologie im Institut für Tierernährung, Dr.-Ing. Werner Mühlbauer Oberingenieur am Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim.

## 2. Bisherige Arbeiten

Experimentelle und theoretische Arbeiten über die Belüftungstrocknung von Körnerfrüchten liegen von verschiedenen Autoren vor. Die thermodynamischen Zusammenhänge wurden in einer grundlegenden Arbeit von *Maltry* [9] geklärt. *Matthies* [10] stellte die Beziehungen für den Strömungswiderstand beim Belüften landwirtschaftlicher Stoffe auf.

Die Arbeiten von *Wenner* [6], *Maltry* [9], *Ekström* und *Norén* [11] u.a. beschäftigen sich mit der experimentellen Untersuchung der Belüftungstrocknung von Weizen. Aus den USA liegen Untersuchungen von *Foster* [12], *Shove* [13], *Converse* [14], *Bartsch* [15] u.a. über die Belüftungstrocknung von Körnermais vor. Bei den in den USA mit Körnermais durchgeführten Belüftungsversuchen wurde der Feuchtegehalt der Körner im Bereich zwischen 18 und 32 % variiert. Kenntnisse der Belüftungstrocknung von sehr feuchtem Körnermais ( $U_1 = 35-45\%$ ), wie er in der Bundesrepublik geerntet wird, und von Mais, der mit hohen Lufttemperaturen auf Feuchtegehalte zwischen 20 und 25 % vorgetrocknet wurde, liegen bislang nicht vor.

Als Kriterien für die Qualitätsbeurteilung wurden bei den in den USA durchgeführten Untersuchungen die Verminderung der Trockenmasse durch Atmungsvorgänge, die Veränderung der Fettsäurezahl und die Zunahme im Besatz an verschiedenen Mikroorganismen herangezogen. *Steele* [16] und *Saul* [17] stellten Beziehungen über den Zusammenhang zwischen dem Feuchtegehalt der Körner, der Korntemperatur und der Trockenmasseveränderung bei der Lagerung von Körnermais auf. Die Ergebnisse können allerdings nicht direkt auf die Belüftungstrocknung übertragen werden, da bei der Belüftung andere Verhältnisse herrschen als bei der Lagerung. Als zulässigen Grenzwert geben *Steele* [16] und *Saul* [17] einen Trockenmasseverlust von 0,5 % an. *Tuite et al.* [18] untersuchten das Wachstum von Mikroorganismen bei der Belüftungstrocknung von Körnermais und fanden bei Feuchtegehalten über 21 % unzulässig starken Pilzbesatz.

Insbesondere war bei den Penicillien und den Aspergillen, unter denen sich eine große Zahl von Toxinbildnern befinden, eine starke Zunahme zu beobachten. Übereinstimmend wird von den amerikanischen Autoren [12, 14, 18] ein Anfangsfeuchtegehalt der Körner von 21 % als maximal zulässiger Feuchtegehalt angegeben, bei dem noch eine sichere Konservierung durch Belüftungstrocknung möglich ist. Da der Verlauf der Belüftungstrocknung von dem Zustand der Trocknungsluft, dem Feuchtegehalt der Körner, der Höhe der Körnerschüttung, dem Luftdurchsatz und einer Reihe weiterer Parameter abhängt, sind eine Vielzahl an Belüftungsversuchen erforderlich. *Flood et al.* [19] stellten daher ein mathematisches Modell für die Belüftungstrocknung auf, mit dem die Trocknungsvorgänge auf elektronischen Rechenanlagen simuliert und optimiert werden können.

Über die zulässigen Keimzahlen der verschiedenen Mikroorganismengruppen liegen für Körnermais bislang keine Werte vor, die durch Tierversuche abgesichert sind. Lediglich *Gedek* [7] gibt für Futtermittel Grenzwerte für Bakterien und Pilze an.

## 3. Aufgabenstellung

Die Klimadaten der Monate Oktober und November, in denen Körnermais in der Bundesrepublik normalerweise geerntet wird, sollen für den Raum Stuttgart analysiert und das Trocknungspotential der Luft ermittelt werden. Aus diesen Werten können näherungsweise Trocknungszeit und Energiebedarf bei der Belüftungstrocknung von Körnermais in Abhängigkeit vom Anfangsfeuchtegehalt der Körner, vom Luftdurchsatz und der Höhe der Körnerschüttung berechnet werden.

In einer experimentellen Untersuchung soll erntefrischer Körnermais in einer Versuchsanlage mit Außenluft, die um 4–8 °C vorgewärmt wurde, belüftet und der zeitliche Verlauf der Trocknung in der Schüttung gemessen werden. Bei den Versuchen ist der Anfangsfeuchtegehalt der Körner und der Luftdurchsatz zu variieren.

Vor Beginn der Trocknung sollen der Besatz an Mikroorganismen (Bakterien, Hefen, Schimmelpilze) und die Keimfähigkeit der Körner bestimmt werden. Um Anhaltspunkte für einen beginnenden Verderb der Körner zu erhalten, wird während der Trocknung die Entwicklung des Mikroorganismenbesatzes in Abhängigkeit von der Schütthöhe ermittelt. Nach Beendigung der Trocknung soll die Qualität des Trocknungsgutes anhand der in der Literatur für Futtermittel angegebenen zulässigen Werte für den Besatz an Mikroorganismen beurteilt werden. Weiter soll untersucht werden, ob durch eine Vortrocknung der Körner auf Feuchtegehalte zwischen 20 und 25 % der Besatz an Mikroorganismen vermindert und dadurch die Vermehrung der Mikroorganismen bei der nachfolgenden Belüftung verzögert oder unterbunden werden kann.

Ziel der Arbeit soll sein, erste Erkenntnisse über die Belüftungstrocknung von sehr feuchtem Körnermais im Hinblick auf Energiebedarf, Leistung und Qualität des Trocknungsgutes zu gewinnen.

## 4. Theoretische Grundlagen

Die thermodynamischen Zusammenhänge bei der Belüftungstrocknung landwirtschaftlicher Produkte wurden von einer Reihe von Autoren beschrieben [4 bis 6, 9]. Im folgenden wird deshalb nur kurz auf die zum besseren Verständnis der Arbeit erforderlichen Grundlagen eingegangen.

Die bei der Trocknung einer feuchten Körnerschüttung auf lagerfähigen Zustand zu entziehende Feuchtemasse kann nach folgender Beziehung berechnet werden\*):

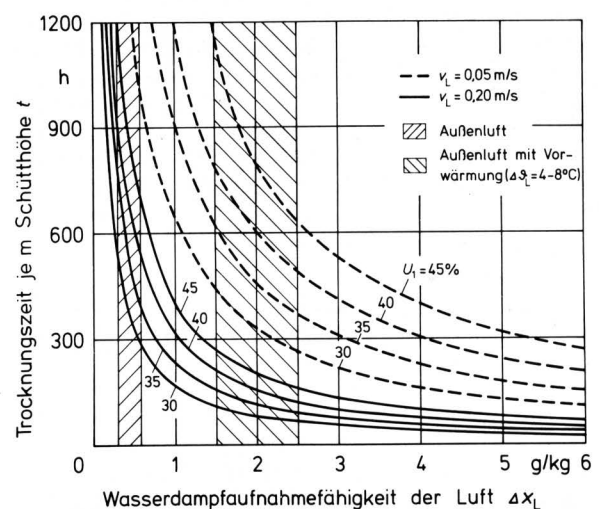
$$m_w = \frac{U_1 - U_2}{100 - U_2} m_1 = \frac{U_1 - U_2}{100 - U_2} F h_1 \rho_{sch1} \quad (1)$$

Die den Körnern entzogene Feuchtemasse muß von der Trocknungsluft aufgenommen werden. Dabei gilt:

$$m_w = (x_{L2} - x_{L1}) m_L = (x_{L2} - x_{L1}) v_L F \rho_L t \quad (2)$$

Durch Gleichsetzen von Gl. (1) und (2) erhält man die Trocknungszeit  $t$ , die erforderlich ist, um eine Körnerschüttung vom Feuchtegehalt  $U_1$  auf den Feuchtegehalt  $U_2$  zu trocknen:

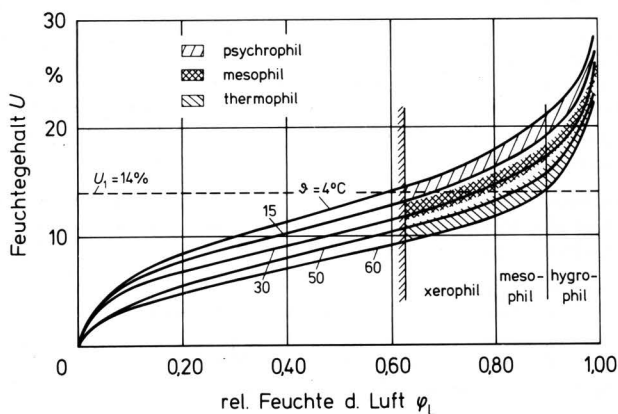
$$t = \frac{U_1 - U_2}{100 - U_2} \cdot \frac{h_1 \rho_{sch1}}{(x_{L2} - x_{L1}) v_L \rho_L} \quad (3)$$



**Bild 1.** Minimale Trocknungszeit je m Schütthöhe bei der Belüftungstrocknung von Körnermais in Abhängigkeit von der Wasserdampfaufnahmefähigkeit der Luft bei verschiedenem Anfangsfeuchtegehalt der Körner und unterschiedlicher Luftgeschwindigkeit.

\*) Zusammenstellung der verwendeten Formelzeichen am Schluß der Arbeit.

Wie Gl. (3) zeigt, ist die Trocknungszeit in erster Linie vom Anfangs- und Endfeuchtegehalt der Körner, der Wasserdampfaufnahmefähigkeit der Luft, ihrer Dichte und Geschwindigkeit abhängig. In Bild 1 ist die nach Gl. (3) berechnete Trocknungszeit in Abhängigkeit von den verschiedenen Trocknungsparametern dargestellt. Herrschen während der Trocknung ungünstige klimatische Bedingungen ( $\Delta x_L < 1,5 \text{ g/kg}$ ), so führt dies bei der Trocknung mit Außenluft zu Trocknungszeiten, bei denen mit einem Verderb der Körner durch Mikroorganismen zu rechnen ist. In diesem Fall muß die Trocknungszeit durch Vorwärmen der Außenluft, was bekanntlich mit einer Erhöhung der Wasserdampfaufnahmefähigkeit der Luft verbunden ist, verkürzt werden. Die Außenluft darf allerdings nur soweit vorgewärmt werden, bis die relative Feuchte der Luft auf  $\varphi_{L1} = 0,55-0,6$  abgesunken ist. Dies entspricht einem Gleichgewichtsfeuchtegehalt der Körner von  $U = 13-14 \%$  in dem bei der Belüftungstrocknung üblichen Temperaturbereich von  $5-15 \text{ }^\circ\text{C}$ , Bild 2. Eine weitere Erhöhung der Temperatur führt zu einer Übertrocknung der Körner und damit zu einer Erhöhung des Energiebedarfs.



**Bild 2.** Sorptionsisothermen von Körnermais nach [20] mit eingezeichneten Bereichen für das Wachstum der verschiedenen Mikroorganismengruppen [21].

Der Energiebedarf bei der Trocknung setzt sich zusammen aus dem Aufwand an thermischer und an mechanischer Energie. Thermische Energie wird bei der Belüftungstrocknung zum Herabsetzen der rel. Feuchte, der Trocknungsluft, mechanische Energie zum Antrieb des Gebläses benötigt. Der Bedarf an thermischer Energie wird üblicherweise auf 1 kg zu entziehende Feuchtemasse bezogen und als spezifischer Wärmebedarf bezeichnet. Der spezifische Wärmebedarf kann aus der Enthalpiedifferenz zwischen der vorgewärmten Trocknungsluft und der Außenluft bezogen auf die von der Trocknungsluft aufgenommene Feuchte berechnet werden:

$$q = \frac{h_{L1} - h_{L0}}{x_{L2} - x_{L0}} \quad (4)$$

Der thermische Energiebedarf bei der Belüftungstrocknung ergibt sich durch Multiplikation der zu entziehenden Feuchtemasse mit dem spezifischen Wärmebedarf zu:

$$Q = m_w q \quad (5)$$

Bei der Trocknung mit Außenluft wird lediglich das natürliche Trocknungspotential der Luft zum Entzug der Feuchte genutzt. In diesem Fall muß für die Trocknung keine zusätzliche thermische Energie zugeführt werden, d.h. der Bedarf an thermischer Energie ist Null. Wird durch eine Vorwärmung der Außenluft die Trocknungszeit verkürzt, so ergibt sich dadurch ein Bedarf an thermischer Energie, der auch durch den Zustand der Abluft beeinflusst wird. Im Hinblick auf eine optimale Energieausnutzung sollten die Trocknungsparameter so gewählt werden, daß die Abluft den Trockner in gesättigtem Zustand verläßt.

Der Bedarf an mechanischer Energie zum Antrieb des Gebläses ist abhängig von der zu entziehenden Feuchtemasse, der Wasserdampfaufnahmefähigkeit und der Dichte der Trocknungsluft sowie dem Druckabfall in der Körnerschüttung:

$$E = \frac{m_w \Delta p}{\Delta x_L \rho_L \eta} \quad (6)$$

Der Druckabfall in der Körnerschüttung ist nach *Matthies* [10] proportional zur Höhe der Körnerschüttung und steigt mit der Luftgeschwindigkeit.

Die Optimierung der Belüftungstrocknung im Hinblick auf minimalen Bedarf an thermischer und mechanischer Energie konnte bislang nicht zufriedenstellend gelöst werden. Die zur Optimierung erforderlichen thermodynamischen und strömungstechnischen Gesetzmäßigkeiten sind schon seit längerer Zeit bekannt. Die für den Konservierungserfolg letztlich entscheidenden Qualitätsveränderungen der Körner während der Belüftung aber wurden in die Betrachtungen bislang nicht mit einbezogen.

Bei der Belüftungstrocknung von Körnermais können durch Einwirken von Mikroorganismen und durch enzymatische Umsetzungen folgende Qualitätsminderungen auftreten:

1. Trockenmasseverluste durch den Abbau von Stärke und Zucker unter Freisetzung von Wärme und Wasser
2. Oxidation von Fetten unter Freisetzung von Fettsäuren
3. Herabsetzung der Keimfähigkeit
4. Verderb der Körner durch unzulässig hohen Besatz an Mikroorganismen.

Entscheidend für den Erfolg der Belüftungstrocknung ist das Ausmaß an Qualitätsveränderungen, die durch Mikroorganismen hervorgerufen werden. Er hängt davon ab, wie stark sich Bakterien und Pilze entwickeln und welche Mengen unerwünschter Stoffwechselprodukte durch sie gebildet werden. Das Wachstum der Mikroorganismen wird beeinflusst von der Temperatur und relativen Feuchte der Umgebungsluft und dem Feuchtegehalt der Körner, außerdem von der Art und Höhe des Ausgangs-Keimbesatzes sowie vom Zustand des Gutes (Risse, Bruchkorn, Beimengungen). In Bild 2 sind zu den Sorptionsisothermen von Körnermais [20] die Bereiche für das Wachstum der verschiedenen Mikroorganismengruppen eingezeichnet. Wie aus dem Bild ersichtlich wird, ist bei einer relativen Feuchte der Luft  $\varphi_L < 0,65$  nicht mehr mit einem Wachstum von Mikroorganismen zu rechnen. Durch die Tätigkeit von Bakterien und Pilzen kann es zu Geruchs- und Geschmacksbeeinträchtigungen kommen und dadurch zu einer Herabsetzung der Futteraufnahme [7, 22]. Ein zu hoher Besatz an Bakterien hat u.a. zur Folge, daß im Darm zu viele Abbau- bzw. Zerfallsprodukte gebildet werden. Dies führt zu Verdauungsstörungen oder zu Erkrankungen des Tieres. Schädliche Wirkungen gehen auch von bakteriellen Stoffwechselprodukten aus, z.B. von verschiedenen Aminen und Toxinen [7].

Das Wachstum von Schimmelpilzen kann mit der Bildung von Mykotoxinen verknüpft sein, unter denen sich sehr stark wirksame Gifte wie beispielsweise das Aflatoxin B<sub>1</sub> und die Trichothecene befinden. Bei den von ihnen bewirkten Schädigungen stehen destruktive Veränderungen von Leber und Niere, des blutbildenden Systems und des Zentralnervensystems im Vordergrund, auch wurden östrogene Wirkungen beobachtet. Das Auftreten einer Mykotoxikose kann zum Tod des Tieres führen [7, 8].

Eine Zunahme des Besatzes an Hefen ist nach *Gedek* [7] als nicht so bedenklich anzusehen wie das Wachstum von Schimmelpilzen, da eine krankmachende Wirkung der Hefen an eine Vermehrung im Organismus gebunden ist. Kommt es allerdings bei der Belüftungstrocknung zu ähnlichen Vorgängen wie nach der Auslagerung von instabilem Gärfutter, d.h. zu einer starken Entwicklung von Hefen, so muß mit einer Entwertung des Futtermittels gerechnet werden. Es kann dann zu Blähungen und Verdauungsstörungen sowie zu starken Durchfällen kommen, das Futter wird nur zögernd aufgenommen oder völlig verweigert [23].



Zur Beurteilung des mikrobiellen Verderbs von Futtermitteln wurden von Gedeck [7] drei sogenannte "Verderbnisstufen" eingeführt. Unverdorben pflanzliche Futtermittel weisen in der Regel einen Bakterienbesatz unter  $10^6/g$  und einen Pilzbesatz unter  $10^3/g$  auf. In der "Verderbnisstufe 1" beträgt der Bakterienbesatz mehrere Millionen je g, der Pilzbesatz liegt zwischen  $10^4$  und  $10^5/g$ . Die "Verderbnisstufe 2" ist durch einen Bakterienbesatz von  $10^6/g$  und durch einen Pilzbesatz von über  $10^5/g$  charakterisiert. Parallel zu der quantitativen Vermehrung erfolgt eine Umschichtung in der Artenzusammensetzung der Mikroflora. In der "Verderbnisstufe 3" nehmen zwar die Keimzahlen der Mikroorganismen gegenüber der "Verderbnisstufe 2" nicht mehr zu, jedoch deuten bereits makroskopisch erkennbare Veränderungen auf einen vollkommenen Verderb des Futtermittels durch Mikroorganismen hin.

## 5. Versuchsaufbau und -durchführung

Die Versuchsanlage zur Untersuchung des Trocknungsverhaltens von Körnermaisschüttungen bei der Belüftung mit Außenluft ist in Bild 3 dargestellt. Die Außenluft wird von einem mittels Elektromotor angetriebenen Radialgebläse (Gesamtwirkungsgrad  $\eta = 0,5$ ) angesaugt und in eine Meßleitung gefördert. Der Luftdurchsatz kann mit einer Normblende gemessen und mit einem Schieber auf den erforderlichen Wert eingestellt werden. Im Rundschaftbehälter strömt die Luft senkrecht von unten nach oben durch die auf einem Sieblochboden ruhende Körnerschüttung. Zur kontinuierlichen Messung der mittleren Trocknungsgeschwindigkeit der Schüttung ist der Rundschaftbehälter an einer Kraftmeßdose mit einem Meßbereich von 0–5 000 N (Genauigkeitsklasse 0,04) aufgehängt. Um eine Kraftübertragung von der Meßleitung auf den Rundschaftbehälter zu verhindern, befindet sich zwischen Meßleitung und Behälter ein biegeweicher Kunststoffschlauch. Die Außenwand des Trocknungsbehälters ist wärmeisoliert, um ähnliche Verhältnisse zu simulieren wie sie in einem Behälter mit großem Durchmesser auftreten. In Abständen von jeweils 0,2 m sind an der Behälterwand Öffnungen zur Entnahme von Körnern angebracht. Die Außenluft wird durch die Verdichtung im Gebläse um 4–8 °C erwärmt. Dadurch kann auf eine zusätzliche Einrichtung zur Luftvorwärmung verzichtet werden. Zur Messung der Temperatur und der relativen Feuchte von Außenluft, Trocknungsluft und Abluft werden Lithiumchloridfühler verwendet. Die Registrierung der Luftzustände und der mittleren Trocknungsgeschwindigkeit erfolgt in analoger Form mit einem Kompensationsdrucker.

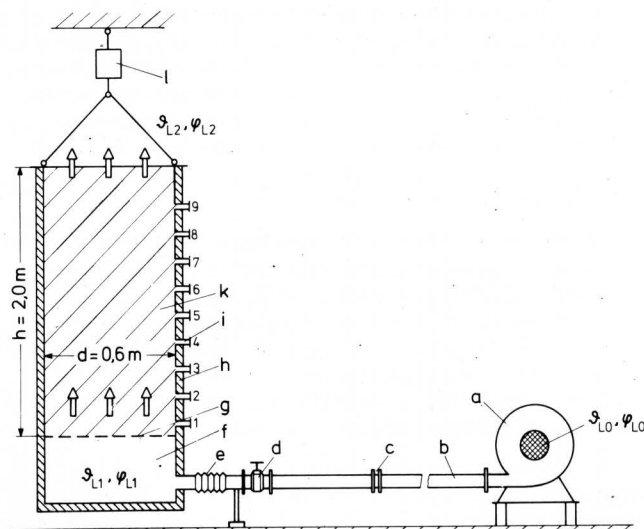


Bild 3. Versuchsanlage zur Ermittlung des Trocknungsverhaltens von Körnerschüttungen bei der Belüftungstrocknung.

- |                      |                         |
|----------------------|-------------------------|
| a Gebläse            | g Sieblochboden         |
| b Meßleitung         | h Wärmeisolation        |
| c Meßblende          | i Probenentnahmestellen |
| d Schieber           | k Körnerschüttung       |
| e Schlauchverbindung | l Kraftmeßdose          |
| f Windkessel         |                         |

Die Trocknungsversuche wurden in den Jahren 1974 bis 1976 mit Körnermais der Sorten Limac, Brillant und Inrakorn durchgeführt<sup>1)</sup>. Die Feuchtegehalte der erntefrischen Körner lagen zwischen 35 und 42 %. Der für die Versuche benötigte Körnermais wurde mit dem Mährescher geerntet und von Spindel-, Stengel- und Lieschblatteilen gereinigt. Unmittelbar nach der Reinigung wurden die Maiskörner in den Belüftungsbehälter gebracht und mit Luftgeschwindigkeiten von  $v_L = 0,05–0,25$  m/s, entsprechend einem auf die Masse an Trockengut bezogenen Luftdurchsatz  $V_L = 17–85$  m<sup>3</sup>/h dt, belüftet.

Bei den Versuchen mit vorgetrocknetem Mais wurden die Körner bei Lufttemperaturen von 200 °C in einem Gleichstromdurchlauf-trockner auf Feuchtegehalte zwischen 20 und 25 % vorgetrocknet. Die maximale Korntemperatur lag dabei zwischen 90 und 110 °C. Die Versuchsanlage und die Versuchsdurchführung sind an anderer Stelle [24] ausführlich beschrieben.

Vor Versuchsbeginn und nach Beendigung der Trocknung wurde von homogenisierten Mischproben der Besatz an verschiedenen Mikroorganismengruppen, der Feuchtegehalt und die Keimfähigkeit der Körner bestimmt. Während der Trocknung wurden zweimal täglich Körner an den in Bild 3 eingezeichneten Entnahmestellen aus der Schüttung entnommen und der Feuchtegehalt der Körner sowie in geeigneten Abständen der Besatz an Bakterien, Hefen und Schimmelpilzen ermittelt. Außerdem wurden von Scherer [25] während der Trocknungszeit die Trockenmasseverluste in der Körnerschüttung untersucht.

Die quantitative Bestimmung der Mikroorganismengruppen erfolgte mit dem Plattenverfahren. Dabei wurden 10 g unzerkleinerte Körner – bei geringem Keimbesatz 50 g Körner – in 90 ml NaCl-Pepton-Lösung nach Müller [26] suspendiert und 20 Minuten auf einem Horizontalschüttler geschüttelt. Von einer geeigneten Verdünnungsstufe wurden jeweils 0,05 ml auf der Oberfläche eines Nährbodens aufgespatelt. Für die einzelnen Gruppen wurden folgende Nährböden verwendet:

- Mesophile, aerobe Bakterien: Standard-I-Nähragar der Fa. Merck;  
 Schimmelpilze und Hefen: Glukose-Malzextrakt-Agar nach Rhaper-Thom [27], mit den Zusätzen Marlophen 810<sup>®</sup> (Tensid) 1 ml/l und Terramycin<sup>®</sup> – Suspension 1 ml/l. Bei schwachem Pilzbesatz wurde zusätzlich noch 1 ml der unverdünnten Suspension mit 10 ml eines Nährbodens nach Schmidt [28] vermischt.

Von jeder Versuchsprobe wurden 2 Parallelsuspensionen hergestellt, von jeder Suspension jeweils 3 Parallelkulturen angelegt. Die Kulturen wurden in einem Brutschrank bei 27–28 °C bis zum Erreichen einer konstanten Koloniezahl bebrütet und anschließend ausgezählt.

## 6. Versuchsergebnisse

### 6.1 Analyse der Klimadaten

In Tafel 1 sind die mittleren Werte für die Temperatur und die relative Feuchte sowie die durchschnittliche Wasserdampfaufnahmefähigkeit der Luft für den Raum Stuttgart für die Monate Oktober bis Dezember zusammengestellt [29]. Zum Vergleich wurden in die Tafel die entsprechenden Klimadaten [15] für den Staat Illinois, der im Maisgürtel der USA liegt, eingetragen. Aus Tafel 1 ist ersichtlich, daß die durchschnittlichen Klimawerte in Illinois im Monat Oktober wesentlich günstiger sind als im Raum Stuttgart. Das bedeutet, daß zum Entfernen von 1 kg Wasser durch Belüften in unserer Klimazone im Oktober durchschnittlich 1 750 m<sup>3</sup> Luft, in Illinois dagegen nur 690 m<sup>3</sup> Luft benötigt werden. Wie dieses Beispiel verdeutlicht, sind die Verhältnisse für die Anwendung der Belüftungstrocknung in den USA wesentlich günstiger als in der

1) Die trocknungstechnischen Untersuchungen wurden am Institut für Agrartechnik, die mikrobiologischen Untersuchungen am Institut für Tiernahrung der Universität Hohenheim durchgeführt.

Bundesrepublik, da zum einen die Feuchtegehalte der Körner bei der Ernte mit  $U_1 = 25\text{--}30\%$  niedriger sind als bei uns ( $U_1 = 35\text{--}45\%$ ) und zum anderen das natürliche Trocknungspotential der Luft größer ist. Trägt man die Durchschnittswerte für die Wasserdampfaufnahmefähigkeit der Luft für den Raum Stuttgart (Oktober–Dezember) in Bild 1 ein, so zeigt es sich, daß eine Belüftung mit Außenluft bei den im Raum Stuttgart herrschenden klimatischen Bedingungen, insbesondere bei geringen Luftgeschwindigkeiten ( $v_L = 0,05\text{ m/s}$ ), zu Trocknungszeiten führt, bei denen mit Sicherheit mit einem Verderb der Körner durch Mikroorganismen zu rechnen ist.

Wie aus Bild 1 ersichtlich ist, kann durch Vorwärmen der Außenluft die Trocknungszeit beim Belüften von Körnermais erheblich verringert werden. Der Temperaturerhöhung ist jedoch dadurch eine Grenze gesetzt, daß oberhalb  $15\text{ }^\circ\text{C}$  und bei relativen Feuchten der Luft über  $0,65$  günstige Wachstumsbedingungen für mesophile Mikroorganismen bestehen, vgl. Bild 2. Aus Gründen der Qualitätserhaltung sollte daher bei den im Raum Stuttgart von Oktober bis Dezember herrschenden klimatischen Bedingungen die Vorwärmung maximal  $8\text{ }^\circ\text{C}$  betragen.

Monat	Stuttgart			Illinois (USA)		
	$\bar{\vartheta}_{L0}$ °C	$\bar{\varphi}_{L0}$ %	$\bar{\Delta x}_{L0}$ g/kg	$\bar{\vartheta}_{L0}$ °C	$\bar{\varphi}_{L0}$ %	$\bar{\Delta x}_{L0}$ g/kg
Oktober	8,6	0,83	0,57	14,5	0,66	1,44
November	3,9	0,86	0,40	7,5	0,68	1,05
Dezember	0,3	0,87	0,30	0,7	0,76	0,53

Tafel 1. Mittlere Klimadaten für den Raum Stuttgart [29] und den Staat Illinois (USA) [15] für die Jahre 1965 bis 1975.

## 6.2 Trocknungsverlauf

In Bild 4 bis 10 ist als Beispiel der zeitliche Verlauf der wichtigsten Meßgrößen bei der Belüftungstrocknung dargestellt. Aus Bild 4 ist ersichtlich, daß bei Vorwärmen der Außenluft um ca.  $8\text{ }^\circ\text{C}$  die Temperatur der Trocknungsluft tagsüber für einige Stunden auf Werte über  $20\text{ }^\circ\text{C}$  ansteigt. Durch den Einbau einer Regelungseinrichtung könnte erreicht werden, daß der Lufterhitzer bei Erreichen einer vorgegebenen Temperatur abgestellt wird, wodurch thermische Energie eingespart werden kann. Gleichzeitig kann dadurch die Gefahr des Verderbs durch mesophile und thermophile Mikroorganismen vermindert werden. Bei einer mittleren Temperatur der Außenluft  $\bar{\vartheta}_{L0} = 10,3\text{ }^\circ\text{C}$  kann durch eine Vorwärmung um  $\Delta\vartheta_{L\text{vor}} = 8\text{ }^\circ\text{C}$  die relative Feuchte der Trocknungsluft von  $\bar{\varphi}_{L0} = 0,74$  auf  $\bar{\varphi}_{L1} = 0,44$  abgesenkt werden, Bild 5. Gleichzeitig erhöht sich dadurch die Wasserdampfaufnahmefähigkeit der Luft von durchschnittlich  $1,0$  auf  $2,7\text{ g/kg}$  Luft, Bild 6. Die Temperatur der Abluft  $\vartheta_{L2}$ , Bild 7, entspricht zu Beginn der Trocknung der Kühlgrenztemperatur bei dem vorgegebenen Luftzustand und steigt bei Beendigung des Trocknungsvorganges auf die Temperatur der Trocknungsluft  $\vartheta_{L1}$  an. Aus dem zeitlichen Verlauf der relativen Feuchte der Abluft  $\varphi_{L2}$ , Bild 8, kann auf den Verlauf der Trocknung geschlossen werden. Bevor die Trocknungszone die Oberfläche der Körnerschüttung erreicht hat, verläßt die Abluft den Trockner in nahezu gesättigtem Zustand ( $\varphi_{L2} > 0,95$ ). Nach etwa 4 Tagen Trocknungsdauer erreicht die Trocknungszone die oberste Schicht der Körnerschüttung, wodurch die relative Feuchte der Abluft abnimmt. Nach einer Trocknungszeit von 7 Tagen sind Trocknungsluft und Körner im sorptiven Gleichgewicht. Dies wird dadurch ersichtlich, daß sich sowohl die relative Feuchte der Abluft als auch der mittlere Feuchtegehalt der Körner auf einen konstanten Wert einstellen, Bild 8 und 9. Wie Bild 9 zeigt, ist der mittlere Feuchtegehalt der Körnerschüttung nach 5 Tagen bereits auf  $U = 14\%$  abgesunken. Die Belüftung kann zu diesem Zeitpunkt allerdings noch nicht beendet werden, da die obersten

Schichten der Körnerschüttung noch Feuchtegehalte über  $20\%$  aufweisen, Bild 10. Ein Beenden der Belüftung ist erst nach etwa 6 Tagen möglich, da dann sämtliche Körner auf Feuchtegehalte unter  $16\%$  getrocknet sind. Nach Beendigung der Trocknung betragen die Feuchtedifferenzen zwischen der obersten und der untersten Körnerschicht etwa  $5\%$ .

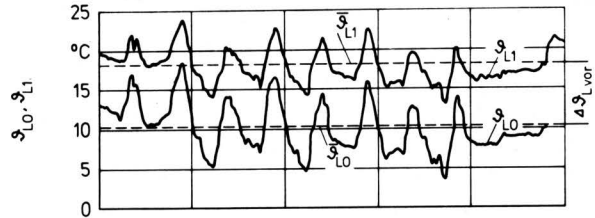


Bild 4. Temperatur der Außenluft  $\vartheta_{L0}$  und der Trocknungsluft  $\vartheta_{L1}$ .

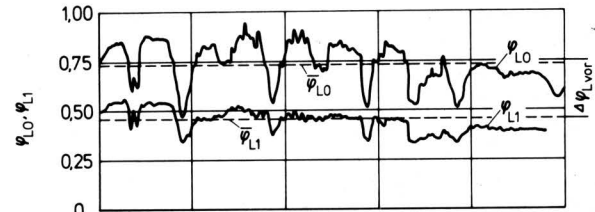


Bild 5. Rel. Feuchte der Außenluft  $\varphi_{L0}$  und der Trocknungsluft  $\varphi_{L1}$ .

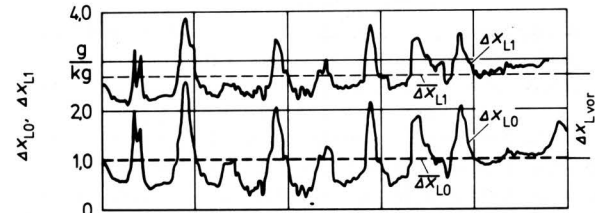


Bild 6. Wasserdampfaufnahmefähigkeit der Außen- und Trocknungsluft  $\Delta x_{L0}$ ,  $\Delta x_{L1}$ .

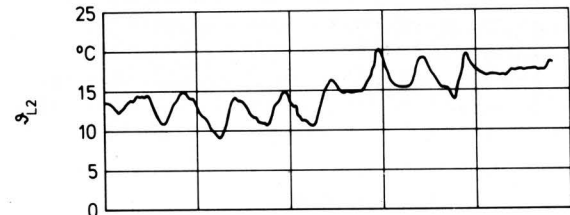


Bild 7. Temperatur der Abluft  $\vartheta_{L2}$ .

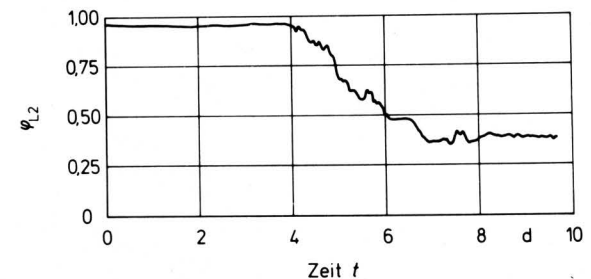


Bild 8. Rel. Feuchte der Abluft  $\varphi_{L2}$ .

Zwischen der Trocknungszeit und der Höhe der getrockneten Körnerschüttung besteht, wie Bild 11 verdeutlicht, nach Beendigung des Anlaufvorganges ein linearer Zusammenhang, was auch von Wenner [6] festgestellt wurde. Dies bedeutet, daß bei einer konstanten Luftgeschwindigkeit die Wandergeschwindigkeit der Trocknungszone innerhalb der Schüttung proportional der zugeführten Luftmenge ist. Weiter konnte festgestellt werden, daß bei einer Erhöhung der Luftgeschwindigkeit die Wandergeschwindigkeit der Trocknungszone proportional erhöht und dadurch die Trocknungszeit entsprechend verkürzt wird.

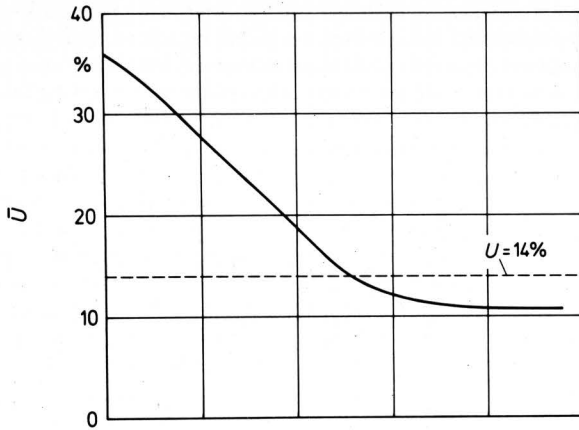


Bild 9. Mittlerer Feuchtegehalt der Körnerschüttung  $\bar{U}$ .

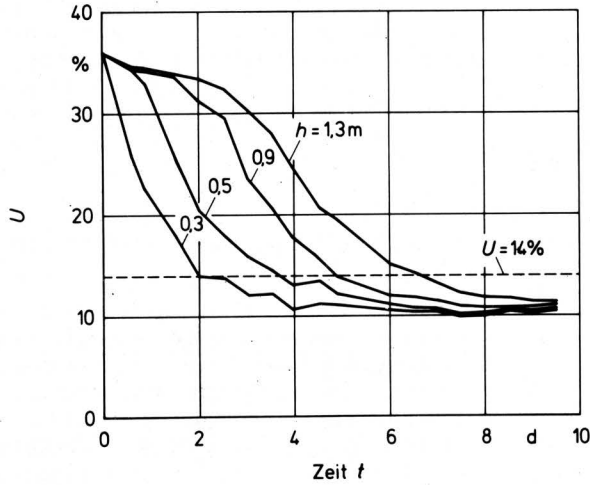


Bild 10. Feuchtegehalt der Körnerschüttung  $U$  in Abhängigkeit von der Schütthöhe.

Anfangsfeuchtegehalt der Körner:  $U_1 = 35\%$   
 Luftgeschwindigkeit:  $v_L = 0,25 \text{ m/s}$   
 Höhe der Körnerschüttung:  $h_1 = 2,0 \text{ m}$   
 Sorte: Limac 1976

Bild 4 bis 10. Zeitlicher Verlauf der Trocknungsdaten bei der Belüftungstrocknung von Körnermais.

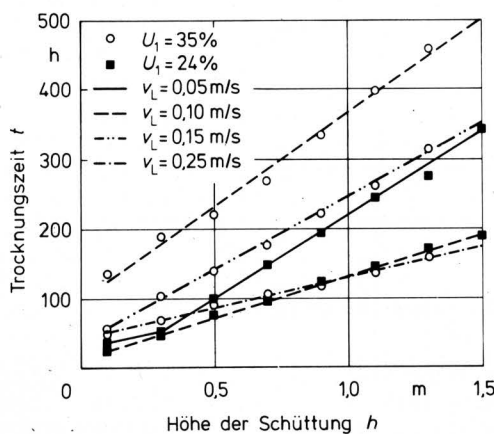


Bild 11. Trocknungszeit in Abhängigkeit von der Höhe der Körnerschüttung für die Belüftungstrocknung von erntefrischem ( $U_1 = 35\%$ ) und vortrocknetem Körnermais ( $U_1 = 24\%$ ) mit verschiedenen Luftgeschwindigkeiten auf lagerfähigen Zustand ( $U_2 = 14\%$ ).  
 Sorte: Limac, Brillant 1976.

### 6.3 Energiebedarf

Der Bedarf an thermischer und mechanischer Energie bei der Belüftungstrocknung von erntefrischem und vortrocknetem Mais ist in Tafel 2 zusammengestellt. Die Werte wurden unter Verwendung der Meßergebnisse mit Gl. (4) und (6) berechnet. Aus Tafel 2 ist ersichtlich, daß mit zunehmender Luftgeschwindigkeit die Trocknungszeit verkürzt wird. Gleichzeitig steigen der Bedarf an thermischer und elektrischer Energie an. Die Erhöhung des Bedarfs an thermischer Energie erklärt sich durch die geringere Abluft sättigung bei höheren Luftgeschwindigkeiten und die Vergrößerung des Bedarfs an mechanischer Energie durch den Anstieg des Strömungswiderstandes in der Körnerschüttung mit der 2. Potenz der Luftgeschwindigkeit.

Vergleicht man den bei der Belüftungstrocknung von erntefrischem Körnermais erforderlichen spezifischen Bedarf an thermischer Energie von  $q = 1925\text{--}4280 \text{ kJ je kg}$  entzogenen Wassers und den spezifischen Bedarf an mechanischer Energie von  $e = 0,16\text{--}3,21 \text{ kWh je dt}$  Trockengut mit Werten wie sie mit handelsüblichen Trocknern ( $q = 5000\text{--}6000 \text{ kJ/kg}$ ;  $e = 1,3\text{--}2,2 \text{ kWh/dt}$  [30]) erreicht werden, so zeigt es sich, daß sowohl der Bedarf an thermischer als auch der Bedarf an mechanischer Energie bei der Belüftungstrocknung wesentlich geringer ist als bei den derzeit üblichen Trocknungsverfahren. Lediglich beim Belüften mit Luftgeschwindigkeiten  $v_L > 0,25 \text{ m/s}$  kann eine Energieeinsparung nicht mehr erzielt werden, vgl. Tafel 2. Die Versuche blieben auf Anfangsfeuchtegehalte der Körner bis  $35\%$  beschränkt, da bereits in Vorversuchen 1974 ermittelt wurde, daß Maiskörner mit einem Feuchtegehalt von  $40\%$  bei einer Luftgeschwindigkeit  $v_L = 0,25 \text{ m/s}$  schon nach den ersten Tagen der Belüftung in den oberen Kornschichten visuell erkennbares Schimmelwachstum aufwiesen.

Besonders vorteilhaft ist aus energetischer Sicht die Kombination eines Durchlauf Trockners mit der Belüftungstrocknung, wobei im Durchlauf Trockner die Körner auf Feuchtegehalte zwischen  $20$  und  $25\%$  getrocknet werden und die Restfeuchte durch Belüften entzogen wird. Versuche zeigten, daß im Durchlauf Trockner der Feuchteentzug im Bereich zwischen  $25$  und  $35\%$  einen wesentlich geringeren spezifischen Energieaufwand erfordert als im Bereich zwischen  $14$  und  $25\%$ . Bei Beschränken der Trocknung auf Feuchtegehalte zwischen  $20$  und  $25\%$  kann der spezifische Aufwand an thermischer Energie im Durchlauf Trockner um ca.  $20\%$  vermindert werden. Bringt man die Maiskörner in ungekühltem Zustand aus dem Durchlauf Trockner in den Belüftungsbehälter, so kann die in den Körnern gespeicherte Wärmeenergie zum Entzug von  $2\text{--}4\%$  Feuchte genutzt werden. Dies ist mit einer der Gründe für den geringeren thermischen Energiebedarf bei der Belüftung von vortrocknetem Mais ( $U_1 = 24\%$ ), vgl. Tafel 2.

Anfangsfeuchtegehalt $U_1$ %	mittl. Endfeuchtegehalt $U_2$ %	Luftgeschwindigkeit $v_L$ m/s	Trocknungszeit $t$ h	spez. Energiebedarf	
				$q$ kJ/kg	$e$ kWh/dt
35	13,3	0,05	310	1925	0,16
35	13,5	0,10	228	2740	0,77
35	12,6	0,15	155	3870	1,59
35	13,7	0,25	88	4280	3,21
24	11,5	0,05	150	2775	0,07
24	13,0	0,10	88	3050	0,25
19	13,0	0,10	45	3360	0,13

Tafel 2. Trocknungszeit, Bedarf an thermischer und mechanischer Energie bei der Belüftungstrocknung von Körnermais in Abhängigkeit vom Anfangsfeuchtegehalt der Körner und der Luftgeschwindigkeit.

Höhe der Körnerschüttung  $h_1 = 1,0 \text{ m}$   
 Sorte: Limac, Brillant 1976



## 6.4 Trocknungsleistung

Die Belüftungstrocknung ist trotz geringer Trocknungsgeschwindigkeiten als ein schlagkräftiges Trocknungsverfahren anzusehen. Dies verdeutlicht folgendes Beispiel:

Wird in einem Rundschachtbehälter mit einem Durchmesser von 5 m eine 1 m hohe Körnerschüttung eingelagert und mit einer Luftgeschwindigkeit von  $v_L = 0,25$  m/s belüftet, so können unmittelbar nach der Ernte etwa 13 t Mais — das entspricht dem Ertrag von 2,5 Hektar — eingelagert und in 3,5 Tagen von  $U_1 = 35$  % auf lagerfähigen Zustand getrocknet werden. Bei einer schichtweisen Einlagerung kann somit bei einer Schütthöhe von 4 m die Ernte von 10 Hektar Körnermais in 14 Tagen konserviert werden. Anlagen dieser Art sind in den USA mit Durchmessern bis 15 m und Schütthöhen bis 6 m im Einsatz.

Durch die Kombination von Durchlauf- und Belüftungstrocknung kann die Leistung des Durchlauftrockners auf das 2–3fache gesteigert werden, da die Trocknung bereits bei Feuchtegehalten zwischen 20 und 25 % beendet wird. Gleichzeitig wird die Verweilzeit der Körner im Trockner verkürzt, die Trocknungszone kann erheblich verkleinert werden. Kürzere Trocknungszone und der Verzicht auf eine Kühlzone verringern das Bauvolumen von Trocknungsanlagen um 30–50 %. Eine Kombination von Durchlauf- mit Belüftungstrocknung bietet sich insbesondere an, wenn die Leistung vorhandener Anlagen ohne großen Kostenaufwand erhöht werden soll.

## 6.5 Qualität

Vor Beginn und nach Beendigung der Belüftungstrocknung wurde die Keimfähigkeit der Körner bestimmt. Dabei zeigte sich, daß durch die Belüftungstrocknung auch dann noch keine Minderung der Keimfähigkeit hervorgerufen wird, wenn die Schimmelbildung bereits visuell erkennbar ist. Nach den bisherigen Erkenntnissen ist die Keimfähigkeit daher kein geeigneter Bewertungsmaßstab für die Qualität von Maiskörnern, die durch Belüften konserviert wurden. Insbesondere kann die Keimfähigkeit auch nicht für die Beurteilung von Körnern herangezogen werden, die mit hohen Lufttemperaturen in Durchlauftrocknern vorgetrocknet wurden, da bei diesen Körnern vielfach bereits im Durchlauftrockner die Keimfähigkeit vollständig zerstört wird.

Die Ermittlung der Trockenmasseverluste während der Belüftungstrocknung ergab bei der Trocknung von erntefrischen Maiskörnern Verluste zwischen 0,6 und 3,0 %, bei vorgetrockneten Maiskörnern dagegen nur 0,04 % [25]. Die wesentlich geringeren Trockenmasseverluste bei vorgetrocknetem Gut lassen sich neben den niedrigeren Anfangsfeuchtegehalten der Körner und den kürzeren Trocknungszeiten damit erklären, daß durch die Vortrocknung der Körner mit hohen Lufttemperaturen sowohl die Enzymaktivität als auch die Mikroorganismenaktivität stark herabgesetzt werden.

Mikroorganismengruppe	Maiskörner, erntefrisch $U_1 = 35$ %	Maiskörner vorgetrocknet	
		$U_1 = 24$ %	$U_1 = 19$ %
Bakterien	$0,2 \cdot 10^6 - 4,3 \cdot 10^6$	$8,6 \cdot 10^2 - 3,3 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^3$
Hefen	$0,3 \cdot 10^5 - 1,3 \cdot 10^5$	$1,8 \cdot 10^2 - 6,4 \cdot 10^2$	$2,1 \cdot 10^0$
Schimmelpilze	$3,9 \cdot 10^3 - 6,5 \cdot 10^4$	$3,3 \cdot 10^2 - 3,6 \cdot 10^2$	$3,2 \cdot 10^2$

Tafel 3. Keimbesatz (Anzahl je g Trockenmasse von Mais) für die verschiedenen Mikroorganismengruppen bei erntefrischen und vorgetrockneten Maiskörnern.

Sorte: Limac, Brillant 1976

Die Ergebnisse der mikrobiologischen Untersuchungen der erntefrischen Maiskörner sind in Tafel 3 zusammengestellt. Der im Vergleich zu anderen Futtermitteln relativ hohe Keimbesatz steht in Übereinstimmung mit aus der Literatur [31, 32 u.a.] bekannten Angaben. Der hohe Keimbesatz der erntefrischen Maiskörner läßt

vermuten, daß ihre Oberfläche ein guter Nährboden für Mikroorganismen ist. Legt man den von Gedek [7] für Futtermittel festgelegten Bewertungsmaßstab für die gemessenen Werte zugrunde, wäre bereits das erntefrische Gut in die Verderbnisstufe 1 einzuordnen.

Der Keimbesatz und die Zusammensetzung der Ausgangsflora hängen sehr stark vom Zeitpunkt der Ernte und den klimatischen Bedingungen in den Monaten September bis November ab. 1975 konnte bei Maiskörnern mit einem Feuchtegehalt von  $U_1 = 35$  % ein Keimbesatz bis zu Werten von  $10^9$ /g beobachtet werden. Nach Gedek [7] ist Mais mit derart hohem Keimbesatz als vollkommen verdorben anzusehen (Verderbnisstufe 3). Eine Verwendung solcher Maiskörner als Futtermittel ist nur dann zulässig, wenn durch geeignete Maßnahmen wie beispielsweise Trocknung, Wärmebehandlung, Zusatz von chemischen Mitteln oder durch Bestrahlung der Keimbesatz erheblich herabgesetzt werden kann.

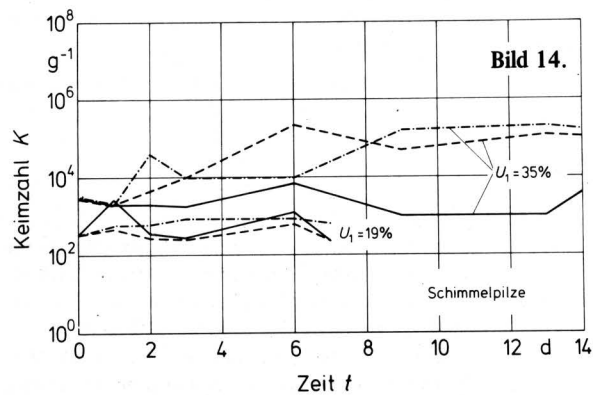
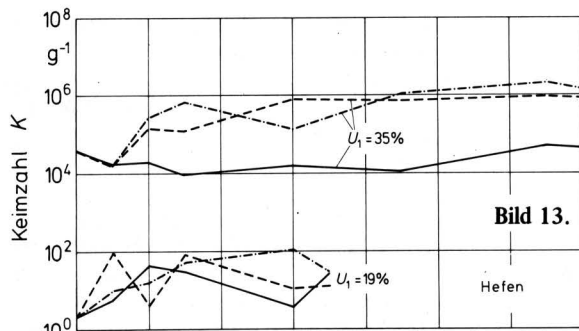
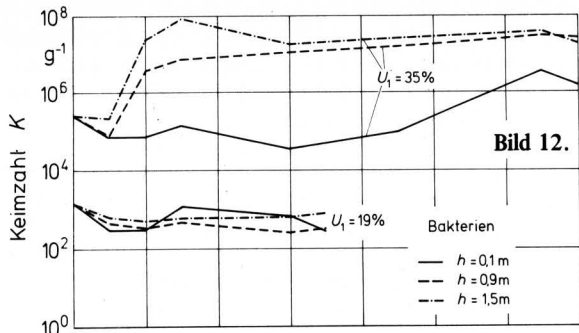
Der Einfluß einer Wärmebehandlung auf die Mikroorganismen ist aus den zusätzlich in Tafel 3 eingetragenen Keimzahlen für vortrockneten Mais ersichtlich. Durch die Vortrocknung der Körner im Durchlauftrockner mit hohen Lufttemperaturen wurde der Keimbesatz der Mikroorganismen um 3–5 Zehnerpotenzen reduziert. Bei den Bakterien dürfte nach der Vortrocknung nur ein Besatz an Sporen übrig geblieben sein, da diese sehr viel hitzeresistenter als die vegetativen Zellen sind. Die Hefen wiesen nach der Vortrocknung auf  $U = 24$  % nur noch einen Restbesatz von  $10^2$  Keimen je g auf; bei der Trocknung auf  $U = 19$  % waren sie nahezu vollständig verschwunden. Tafel 3 zeigt weiter, daß auch der Besatz an Schimmelpilzen durch die Vortrocknung reduziert wurde.

In Bild 12 bis 14 ist als Beispiel die zeitliche Veränderung des Keimbesatzes bei der Belüftungstrocknung von erntefrischem Mais ( $U_1 = 35$  %) und vorgetrocknetem Mais ( $U_1 = 19$  %) dargestellt. Bei der Belüftung von erntefrischem Mais stieg der Keimbesatz (Bakterien, Hefen, Schimmelpilze) in der untersten Schicht ( $h = 0,1$  m) der Körnerschüttung nur geringfügig an. In den oberen Schichten dagegen ( $h \geq 0,9$  m) war bereits in den ersten Tagen ein Anstieg der Keimzahlen um das 10–100fache zu beobachten. Das abweichende Verhalten der untersten Schichten der Körnerschüttung kann mit dem schnellen Erreichen eines geringeren Feuchtegehaltes der Körner erklärt werden, vgl. Bild 10. Ein Anstieg der Bakterienzahl auf Werte über  $10^8$ /g und der Pilze auf mehr als  $10^6$ /g konnte nicht festgestellt werden. Dies wurde auch von anderen Autoren [31, 32] beobachtet und könnte durch Konkurrenzeffekte, die Erschöpfung des verfügbaren Nährstoffes und/oder die Anhäufung von Stoffwechselprodukten bedingt sein [7].

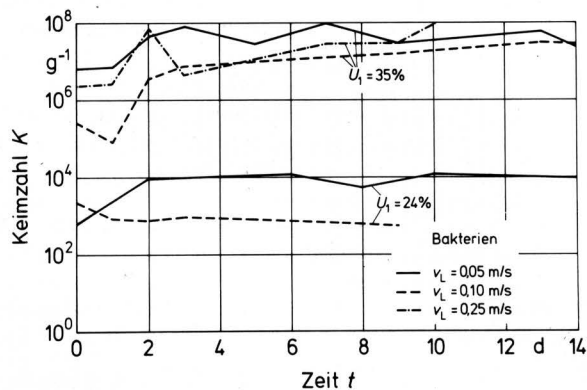
Bei den Versuchen mit vorgetrocknetem Mais war weder bei den Bakterien, noch bei den Hefen und Schimmelpilzen ein nennenswerter Anstieg feststellbar. Dies erklärt sich einerseits aus dem geringen Keimbesatz des vorgetrockneten Ausgangsmaterials, andererseits aus dem gegenüber dem erntefrischen Mais wesentlich niedrigeren Feuchtegehalt der Körner, der nur noch ein minimales Wachstum der vorhandenen Mikroorganismen zuließ.

Die Versuche zeigten weiter, daß bei erntefrischen Maiskörnern mit einem Feuchtegehalt von 35 % bei Schütthöhen über 0,9 m der Anstieg im Besatz an Mikroorganismen unabhängig von der Luftgeschwindigkeit ist. Dies verdeutlicht Bild 15 für den Besatz an Bakterien. Trotz einer Erhöhung der Luftgeschwindigkeit von  $v_L = 0,05$  m/s auf  $v_L = 0,25$  m/s und der damit verbundenen Verringerung der Trocknungszeit auf etwa ein Fünftel nahm der Besatz an Bakterien zu. Die Keimzahlen lagen dabei für alle drei Luftgeschwindigkeiten über dem zulässigen Wert für ein unverdorbenes Futtermittel [7].

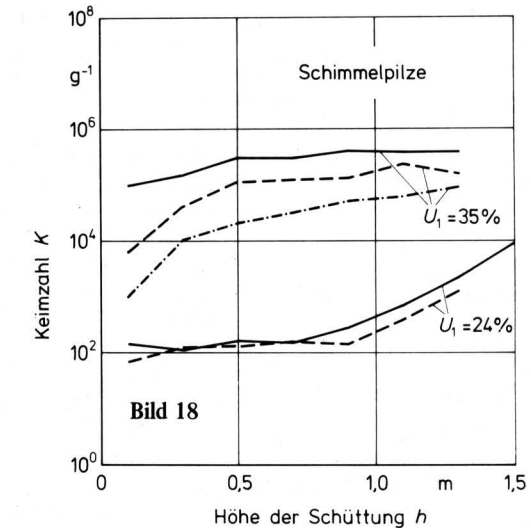
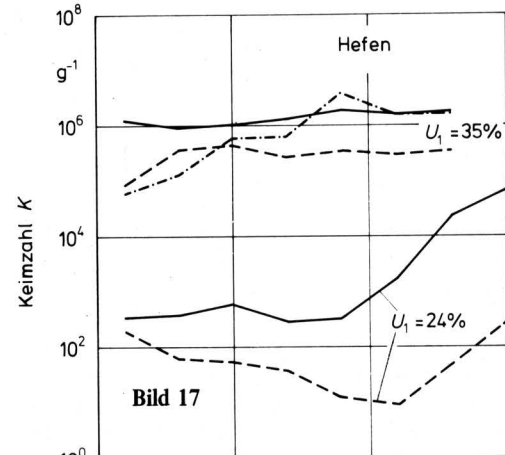
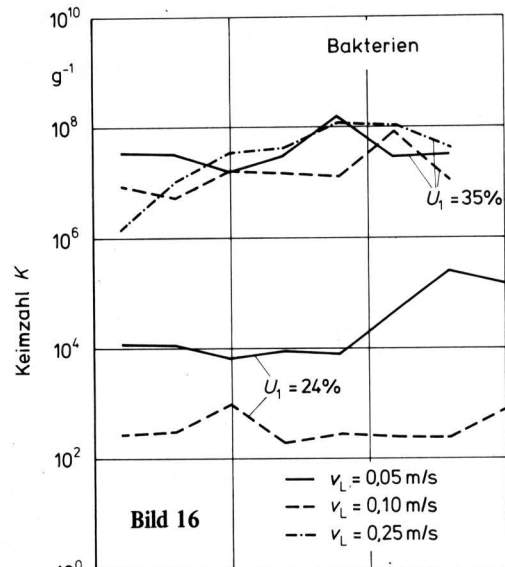
Im Gegensatz dazu konnte bei den vorgetrockneten Körnern ein Einfluß der Luftgeschwindigkeit festgestellt werden. Bei der Luftgeschwindigkeit  $v_L = 0,05$  m/s war ein Ansteigen im Keimbesatz zu beobachten, bei  $v_L = 0,1$  m/s nahm der Besatz ab. In beiden Fällen blieb jedoch der Bakterienbesatz unter dem zulässigen Wert.



**Bild 12 bis 14.** Zeitlicher Verlauf der auf die Trockenmasse bezogenen Keimzahlen von Bakterien, Hefen und Schimmelpilzen bei der Belüftungstrocknung von erntefrischem ( $U_1 = 35\%$ ) und vortrocknetem Körnermais ( $U_1 = 19\%$ ) in verschiedenen Höhen der Körnerschüttung.  
Luftgeschwindigkeit  $v_L = 0,1 \text{ m/s}$   
Sorte: Limac, Brillant 1976.



**Bild 15.** Zeitlicher Verlauf der auf die Trockenmasse bezogenen Keimzahl von Bakterien für verschiedene Luftgeschwindigkeiten bei der Belüftungstrocknung von erntefrischem ( $U_1 = 35\%$ ) und vortrocknetem Körnermais ( $U_1 = 24\%$ ).  
Höhe der Körnerschüttung  $h_1 = 0,9 \text{ m}$   
Sorte: Limac 1976.



**Bild 16 bis 18.** Auf die Trockenmasse bezogene Keimzahlen von Bakterien, Hefen und Schimmelpilzen nach Beendigung der Belüftungstrocknung in Abhängigkeit von der Höhe der Körnerschüttung und der Luftgeschwindigkeit bei erntefrischem ( $U_1 = 35\%$ ) und vortrocknetem Körnermais ( $U_1 = 24\%$ ).

erntefrischer Körnermais		
$U_1 = 35\%$	$v_L = 0,05 \text{ m/s}$	$t = 28 \text{ d}$
$U_1 = 35\%$	$v_L = 0,1 \text{ m/s}$	$t = 18 \text{ d}$
$U_1 = 35\%$	$v_L = 0,25 \text{ m/s}$	$t = 9 \text{ d}$
vortrockneter Körnermais		
$U_1 = 24\%$	$v_L = 0,05 \text{ m/s}$	$t = 16 \text{ d}$
$U_1 = 24\%$	$v_L = 0,1 \text{ m/s}$	$t = 9 \text{ d}$

Sorte: Limac, Brillant 1976



Zur Beurteilung des Konservierungserfolges hinsichtlich qualitativer Veränderungen der Maiskörner durch Mikroorganismen wurde nach Beendigung der Trocknung der Keimbefall für Bakterien, Hefen und Schimmelpilze ermittelt, wie er sich in den einzelnen Schichten der Körnerschüttung eingestellt hatte, Bild 16 bis 18. Der Anstieg im Befall an Bakterien auf  $10^7$ – $10^8$ /g sowie an Schimmelpilzen und an Hefen auf  $10^5$ – $10^6$ /g auf den getrockneten Körnern entspricht Verderbnisstufe 1 bis Verderbnisstufe 2 [7]. Bedenklich erscheint dabei vor allem die Vermehrung von Schimmelpilzen, unter denen sich wahrscheinlich auch Penicillien befinden, da bei zunehmendem Befall mit dieser Pilzgruppe mit der Bildung von Mykotoxinen zu rechnen ist. Die Vermehrung der Hefen kann dagegen als unbedenklich angesehen werden [7], es sei denn, es haben sich ähnliche Vorgänge abgespielt, wie sie beim aeroben Verderb instabiler Körnermaissilagen beobachtet wurden [23]. Bei den auf 24 % vorgetrockneten Maiskörnern blieb auch bei der Luftgeschwindigkeit  $v_L = 0,05$  m/s der Befall an Mikroorganismen innerhalb der zulässigen Werte für unverdorbene Futtermittel [7].

Nach dem bisherigen Stand der Untersuchungen ist die Belüftungstrocknung von erntefrischem Mais mit Feuchtegehalten über 35 % aus mikrobiologischer Sicht nicht empfehlenswert. Als erfolgversprechend sind die Belüftungsversuche mit vorgetrocknetem Mais ( $U_1 = 20$ – $25$  %) zu beurteilen, da das geringfügige Wachstum von Mikroorganismen unbedenklich erscheint. Es muß jedoch darauf hingewiesen werden, daß damit noch keine endgültige Aussage über den Grad des mikrobiellen Verderbs gemacht werden kann, da die Qualität des durch Belüften konservierten Maises noch von einer Reihe anderer Faktoren abhängig ist, deren Einfluß bei den bisherigen Untersuchungen nicht berücksichtigt werden konnte.

## 7. Zusammenfassung

Erste Versuche der Belüftungstrocknung von Maiskörnern zeigen, daß erntefrischer Körnermais bei den untersuchten Trocknungsbedingungen und den in der Bundesrepublik herrschenden klimatischen Bedingungen gemessen am Befall an Bakterien und Pilzen nicht ohne mikrobiellen Verderb durch Belüften getrocknet werden kann.

Bei einer Vortrocknung der Körner mit hohen Lufttemperaturen auf Feuchtegehalte von  $U = 20$ – $25$  % und der anschließenden Belüftungstrocknung bis zur Lagerfähigkeit konnten sowohl aus thermodynamischer als auch aus mikrobiologischer Sicht erfolgversprechende Ergebnisse erzielt werden. Bei diesem Verfahren läßt sich die Kapazität der Durchlauf Trockner auf das 2–3fache steigern, wobei gleichzeitig der Energiebedarf und die Gefahr der Qualitätsminderung der Körner reduziert werden. Anschließend wird im Belüftungsbehälter die Restfeuchte bei geringem spezifischen Energiebedarf und ohne Verderb der Körner durch Mikroorganismen entzogen. Ein weiterer Vorteil des Verfahrens ist, daß die Körner ähnlich wie beim Dryeration-Verfahren langsam abgekühlt werden und somit die Ausbildung von Spannungsrissen durch zu schnelles Abkühlen verhindert werden kann. Voraussetzung für diese Verfahrenskombination ist allerdings die Anpassung des diskontinuierlichen Arbeitsvorganges der Belüftungstrocknung an die kontinuierliche Betriebsweise des Durchlauf Trockners.

Über eine Eignung des Verfahrens für die Praxis können beim derzeitigen Stand der Untersuchungen noch keine endgültigen Aussagen gemacht werden. Hierzu müssen weitere Untersuchungen durchgeführt werden, wobei insbesondere Mykotoxinbestimmungen und Tierversuche im Vordergrund stehen sollen.

### Verwendete Formelzeichen

e	Spezifischer Bedarf an mechanischer Energie
E	Bedarf an elektrischer Energie
F	Belüftungsfläche
h	Höhe der Körnerschüttung
$h_L$	Spezifische Enthalpie der Luft
K	Keimbefall (Anzahl je g Trockenmasse)

m	Gutmasse
$m_L$	Luftmasse
$m_w$	Feuchtemasse
$\Delta p$	Druckabfall in der Körnerschüttung
q	Spezifischer Wärmebedarf
Q	Wärmebedarf
t	Trocknungszeit
U	Feuchtegehalt der Körner bezogen auf Feuchtemasse
$\bar{U}$	Mittlerer Feuchtegehalt der Körner bezogen auf Feuchtemasse
$v_L$	Luftgeschwindigkeit
$\bar{V}_L$	Volumendurchsatz der Luft
$x_L$	Feuchtegrad der Luft
$\Delta x_L$	Wasserdampfaufnahmefähigkeit der Luft
$\bar{\Delta x}_L$	Mittlere Wasserdampfaufnahmefähigkeit der Luft
$\vartheta_L$	Lufttemperatur
$\bar{\vartheta}_L$	Mittlere Lufttemperatur
$\Delta \vartheta_{Lvor}$	Temperaturerhöhung der Luft durch Vorwärmung
$\rho_L$	Dichte der Luft
$\rho_{Sch}$	Schüttdichte der Körner
$\varphi_L$	Relative Feuchte der Luft
$\bar{\varphi}_L$	Mittlere relative Feuchte der Luft
$\eta$	Gesamtwirkungsgrad von Gebläse mit Antriebsmotor
Indizes	
0	Zustand der Umgebung
1	Zustand vor der Trocknung
2	Zustand nach der Trocknung

## Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [ 1 ] Isaacs, G.W. u. W. Mühlbauer: Möglichkeiten und Grenzen der Energieeinsparung bei Körnermaistrocknungsanlagen. Landtechnik Bd. 30 (1975) Nr. 2, S. 397/401.
- [ 2 ] Huss, W., W. Mühlbauer, A. Dessouky u. I. Deubelius: Temperatur-Zeit-Grenzbereiche für eine minimale Proteinschädigung bei der Trocknung von Körnermais mit hohen Lufttemperaturen. 30. Tagung der Gesellschaft für Ernährungsphysiologie der Haustiere, Göttingen 24.–26.3.1976.
- [ 3 ] Thompson, A. u. G.H. Foster: Stress cracks in artificially dried corn. USDA-Marketing Research Report Nr. 631, 1963.
- [ 4 ] Segler, G.: Technische Probleme der Belüftung von landwirtschaftlichen Ernteprodukten. Vorträge der wissenschaftlichen Jahrestagung 1959 des Instituts für Landtechnik Potsdam-Bornim.
- [ 5 ] Dencker, G.H., H. Heidt u. H.L. Wenner: Einrichtungen auf dem Hofe zur Lagerung und Trocknung von Erntedruschgetreide. KTL-Flugschrift 1, 2. Aufl., Wolftratshausen 1958.
- [ 6 ] Wenner, H.L.: Die Voraussetzungen für die Lagerung und Belüftung von feucht geerntetem Getreide. KTL-Schriftenreihe "Berichte über Landtechnik" Nr. 45, Wolftratshausen 1955.
- [ 7 ] Gedek, B.: Futtermittelverderb durch Bakterien und Pilze und seine nachteiligen Folgen. Übersicht Tierernährung (1973) Nr. 1, S. 45/56.
- [ 8 ] •Purchase, J.F.H.: Mycotoxins. Amsterdam, Oxford, New York: Elsevier Scient. Publ. Comp., 1974.
- [ 9 ] Maltry, W.: Einige Trocknungsversuche an Weizen. Archiv für Landtechnik Bd. 3 (1962) Nr. 2, S. 145/64.
- [ 10 ] Matthies, H.J.: Der Strömungswiderstand beim Belüften landwirtschaftlicher Erntegüter. VDI-Forschungsheft Nr. 454, Düsseldorf: VDI-Verlag 1956.
- [ 11 ] Ekström, N. u. O. Norén: Studier över kallluftstorkning av spannaal. Jodbrukstekniska Institutet, Uppsala (Schweden), Spezialmeddelande, S. 23 (1974).

- [ 12 ] *Foster, G.H.*: Minimum air flow requirements for drying grain with unheated air. Agr. Engng. Vol. 34 (1953) Nr. 10, S. 681/84.
- [ 13 ] *Shove, G.C.*: Low temperature drying of shelled corn. ASAE-Paper Nr. 70-830 (1970).
- [ 14 ] *Converse, H.H. et al.*: Aeration of high moisture corn. Trans. ASAE Vol. 17 (1974) Nr. 4, S. 696/99.
- [ 15 ] *Bartsch, J.A. u. M.F. Finner*: A low temperature grain drying experiment in an artificially reproduced environment. Trans. ASAE Vol. 19 (1976) Nr. 3, S. 378/81.
- [ 16 ] *Steele, J.L. et al.*: Deterioration of shelled corn as measured by carbon dioxide production. Trans. ASAE Vol. 12 (1969) Nr. 5, S. 685/89.
- [ 17 ] *Saul, R.A.*: Deterioration rate of moist shelled corn at low temperatures. ASAE-Paper Nr. 70-302 (1970).
- [ 18 ] *Tuite, J., G.H. Foster u. R.A. Thompson*: Moisture limits for storage of corn aerated with natural and refrigerated air. ASAE-Paper Nr. 70-306 (1970).
- [ 19 ] *Flood, C.A. et al.*: Simulation of a natural-air corn drying system. Trans. ASAE Vol. 15 (1972) Nr. 1, S. 156/62.
- [ 20 ] *Rodriguez-Arias, J.H. et al.*: Heat of vaporisation for shelled corn. Cereal Chem. Bd. 40 (1963) S. 676/83.
- [ 21 ] *Moreau, C.*: Moisissures toxiques dans l'alimentation. Paris: Edition P. Lechevalier 1968.
- [ 22 ] *Spicher, G.*: Die Mikrobiologie des Getreides und der Getreideprodukte. Bodenkultur Bd. 24 (1973) Nr. 4, S. 371/89.
- [ 23 ] *Gross, F. u. K. Riebe*: Gärfutter. Stuttgart: Verlag Ulmer 1974.
- [ 24 ] *Mühlbauer, W.*: Untersuchungen über die Trocknung von Körnermais unter besonderer Berücksichtigung des Gleichstromverfahrens. Fortschr.-Ber. des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft; Selbstverlag des Verfassers, Lehrstuhl für Landtechnik, Universität Hohenheim 1974.
- [ 25 ] *Scherer, R.*: Atmungsverluste bei der Trocknung von Körnermais. Unveröffentl. Forschungsbericht, Universität Hohenheim 1977.
- [ 26 ] *Müller, H.-M. et al.*: Propionsäure als Konservierungsmittel für Feuchtmals. Landw. Forschung Bd. 32 (1976) S. 118/25.
- [ 27 ] *Raper, K.B. u. Ch. Thom*: A manual of the penicillia. New York, London: Hafner Publ. Comp. 1968.
- [ 28 ] *Schmidt, H.L.*: Über Vorkommen und Häufigkeit von hohen Pilzkeimgehalten sowie einzelner Pilzarten in Futtermitteln. Landw. Forschung Bd. 28 (1975) S. 224/34.
- [ 29 ] Dt. Wetterdienst: Agrarmeteorologischer Monatsbericht für den Raum Stuttgart. Agrarmeteorol. Beratungsstelle Hohenheim Bd. 26 (1975) Nr. 10/12.
- [ 30 ] *Strehler, A.*: Was kostet das Trocknen von Körnermais? Lohnunternehmen (1970) Nr. 8, S. 250/54.
- [ 31 ] *Müller, H.-M. et al.*: Verteilungsgüte und Konservierungserfolg bei der kontinuierlichen Aufbringung von Propionsäure auf Feuchtmals. Wirtschaftseig. Futter Bd. 22 (1976) S. 136/41.
- [ 32 ] *Burmeister, H.R. et al.*: Microbiology of ensiled high-moisture corn. Appl. Microbiol. Bd. 15 (1967) S. 49/54.
- [ 33 ] *McMahon, M.E., P.A. Hartmann, R.A. Saul u. L.H. Tiffany*: Deterioration of high moisture corn. Appl. Microbiol. Bd. 30 (1975) S. 103/109.

## Bodenwiderstand und Arbeitseffekt eines Grubberwerkzeugs

Von Reinhard Reich, Stuttgart-Hohenheim\*)

Mitteilung aus dem Sonderforschungsbereich 140 – Landtechnik "Verfahrenstechnik der Körnerfruchtproduktion" der Universität Hohenheim

DK 631.316:631.51

Die Kenntnis der Betriebseigenschaften von Bodenbearbeitungswerkzeugen bildet die Voraussetzung für den optimalen Einsatz dieser Werkzeuge. Dies gilt sowohl für den Arbeitseffekt, d.h. für die Wirkung des Werkzeugs auf den Boden, als auch für das Zusammenwirken von Werkzeug bzw. Gerät und Schlepper, das durch die bei der Arbeit auftretenden Kräfte bestimmt wird.

In diesem Aufsatz wird über Untersuchungen an Grubberwerkzeugen berichtet.

### 1. Einleitung

In der landwirtschaftlichen Bodenbearbeitung werden zum Aufbrechen des Bodens und Zerkleinern der Schollen Geräte in erstaunlicher Vielfalt eingesetzt. Obwohl die an den verschiedenen Geräten verwendeten Werkzeuge in ihrer Gestalt und Anordnung voneinander abweichen, lassen sie sich im allgemeinen auf einen durch den Boden bewegten Keil oder eine Platte zurückführen. Die Erfassung und Deutung der Vorgänge beim Bodenaufbruch ist

seit Jahrzehnten ein Schwerpunkt landtechnischer Forschung, wobei das Problem von verschiedenen Seiten angegangen wurde.

*Möller* [1] untersuchte in Feldversuchen den Zugkraftbedarf und den Arbeitseffekt von Grubbern mit verschiedenen Werkzeugen. *Plötner* [2], *Willat u. Willis* [3] verwendeten Einzelwerkzeuge bei ihren Feldversuchen.

Da bei Feldversuchen durch die Inhomogenität des Bodens starke Streuungen der Meßwerte auftreten, wurden viele Versuche, teilweise mit Modellwerkzeugen, in der Bodenrinne durchgeführt. *Vornkahl* [4], *Payne u. Tanner* [5] untersuchten einfache Modellwerkzeuge, bei denen verschiedene Parameter systematisch variiert werden konnten.

Während sich die vorstehend genannten Arbeiten überwiegend mit den sichtbaren Wirkungen eines Werkzeugs befassen, wurde in anderen Arbeiten versucht, Beziehungen zwischen den durch das Werkzeug im Boden erzeugten Spannungen und dem daraus resultierenden Bodenbruch herzustellen.

Ausgehend von dem experimentell ermittelten Bruchvorgang konnte *Söhne* [6] den Bodenwiderstand einer geneigten Platte näherungsweise berechnen. *O'Callaghan* [7] übertrug Gleichungen aus dem Erdbau auf die Bodenbearbeitung mittels ebener Platten. Gerechnete und gemessene Widerstände zeigen gute Übereinstimmung.

*Hettiaratchi u. Reece* [8] geben Gleichungen für den dreidimensional betrachteten Bodenaufbruch vor einer ebenen Platte an.

\*) Dipl.-Ing. Reinhard Reich ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Sonderforschungsbereich 140 (Fachgebiet: Verfahrenstechnik der Pflanzenproduktion) der Universität Hohenheim.