

## 5. Zusammenfassung

Unter besonderer Berücksichtigung der Koronaaufladung werden die physikalischen Gesetzmäßigkeiten des Aufladevorganges behandelt. Hierbei wird deutlich, daß für die in Verbindung mit Flachstrahldüsen geltenden Geschwindigkeitsverhältnisse die Effektivität der Aufladung von der Tropfengeschwindigkeit im Aufladebereich beeinflusst wird. Bei kleinen Tropfen und niedrigen Tropfengeschwindigkeiten wird theoretisch die höchste Aufladung erreicht.

In Laborversuchen wird ermittelt, wie verschiedene Einflußgrößen die elektrostatische Aufladung von Spritzflüssigkeiten beeinflussen. Die Versuche bestätigen, daß in Abhängigkeit von den elektrischen Eigenschaften der verwendeten Spritzflüssigkeiten unterschiedlich hohe Aufladungen erzielt werden. Mit feinerer Zerstäubung (d.h. kleineren Tropfengrößen) kommt eine bessere Aufladung der Flüssigkeit zustande. Neben Spritzdruck, Ausflußmenge bzw. Tropfengröße haben Anzahl und Position der Elektroden erheblichen Einfluß. Das beste Ergebnis konnte erzielt werden, wenn anstelle einer Sprühelektrode gleichzeitig mehrere Elektroden symmetrisch zum Spritzstrahl in waagerechter Anordnung angebracht wurden, so daß der Spritzschleier in seiner gesamten Breite vom ionisierten Feld erfaßt wurde.

### Schrifttum

- [ 1 ] Moser, E. u. H. Ganzelmeier: Elektrostatische Aufladung von Spritzflüssigkeiten zur Verbesserung der Applikationstechnik. Grundl. Landtechnik Bd. 30 (1980) Nr. 4, S. 122/25.
- [ 2 ] Moser, E., H. Ganzelmeier u. K. Schmidt: Einflußfaktoren bei der Anlagerung elektrostatisch geladener Spritzflüssigkeiten im chemischen Pflanzenschutz. Nachrichtenbl. Deutsch. Pflanzenschutzd. Bd. 33 (1981) Nr. 10, S. 145/57.
- [ 3 ] Moser, E., K. Schmidt u. D. Hussain: Besserer Pflanzenschutz mit elektrostatischer Aufladung. Teil I. DLG-Mitteilungen Bd. 97 (1982) Nr. 8, S. 442/44.
- [ 4 ] Marchant, J.A.: Electrostatic spraying – some basic principles. Proceedings of the British Crop Protection Conference 1980.
- [ 5 ] Law, S.E.: Electrostatic precipitation of LV and ULV pesticide sprays. Nat. Agric. Library Beltsville, Maryland, August 17/18, 1976.
- [ 6 ] Böhm, J.: Verzögerung der Aufladung von Teilchen in einem Elektrofilter. Staub-Reinhalt. Luft Bd. 28 (1968) Nr. 7, S. 270/73.
- [ 7 ] Moser, E. u. K. Schmidt: Physikalische Eigenschaften und elektrostatische Aufladung von Spritzflüssigkeiten. Grundl. Landtechnik Bd. 33 (1983) Nr. 2, S. 56/59.
- [ 8 ] Zaska, J.: Tropfengrößenanalyse unter besonderer Berücksichtigung der Zerstäubung im chemischen Pflanzenschutz. Diss. TU Berlin 1973.
- [ 9 ] Law, S.E.: Embedded – electrode electrostatic – induction spray – charging nozzle. Theoretical and Engineering Design. Trans. ASAE Bd. 21 (1978) Nr. 6, S. 1096/1104.

---

## Meßeinrichtung zur kontinuierlichen Bestimmung des Trocknungs- und Befeuchtungsverhaltens von Körnerfrüchten bei stationärem Luftzustand

Von Werner Hofacker, Werner Mühlbauer und Wolfgang Erich Mayer, Stuttgart-Hohenheim\*)

DK 664.8.047:531.751

Zur Auslegung und Optimierung von Körner Trocknungsanlagen muß das Trocknungsverhalten der Körner in Abhängigkeit von den Guteigenschaften und den Trocknungsparametern bekannt sein. Diese Zusammenhänge können experimentell durch das Trocknen von Einzelkörnern bzw. dünnen Kornsichten bei konstantem Luftzustand ermittelt werden.

In der vorliegenden Arbeit wird eine Meßeinrichtung zur Bestimmung des Trocknungsverlaufes und der Korntemperatur von Körnerfrüchten beschrieben. Eine Kompensation der von der Luft auf das Gut ausgeübten Kräfte durch konstruktive Maßnahmen erlaubt es, die Gewichtsveränderung der Körner während der Trocknung mit hoher Genauigkeit kontinuierlich zu messen.

Die Meßeinrichtung ist zur Trocknung sämtlicher Körnerfrüchte sowie anderer landwirtschaftlicher Produkte

geeignet. Die Temperatur der Trocknungsluft kann zwischen 5 und 250 °C, die Taupunkttemperatur zwischen 4 und 80 °C und die Luftgeschwindigkeit im Trockner im Bereich von 0,1 bis 1,5 m/s variiert werden.

### Inhalt

1. Einleitung
2. Aufgabenstellung
3. Meßverfahren
  - 3.1 Messung des Trocknungs- und Befeuchtungsverhaltens
  - 3.2 Messung der Korntemperatur
  - 3.3 Messung der Oberflächentemperatur
4. Anlagenbeschreibung
  - 4.1 Luft- und Wasseraufbereitung
  - 4.2 Luftbefeuchter
  - 4.3 Lufterhitzer
  - 4.4 Trockner
  - 4.5 Regelung
  - 4.6 Datenerfassung und -verarbeitung
5. Versuchsergebnisse
6. Zusammenfassung

---

\*) Dipl.-Ing. W. Hofacker, Dr.-Ing. W. Mühlbauer und Dipl.-Ing. W.E. Mayer sind wissenschaftliche Mitarbeiter am Lehrstuhl Grundlagen der Landtechnik (Lehrstuhlinhaber: Prof. Dr.-Ing. H.D. Kutzbach) des Instituts für Agrartechnik der Universität Hohenheim.

## 1. Einleitung

Für die Auslegung und Optimierung von Trocknungsanlagen müssen die im Trockner ablaufenden Wärme- und Stoffübertragungsvorgänge sowie die biologischen und biochemischen Reaktionen im Korn bekannt sein. Die aus Massen- und Energiebilanzen ableitbaren Größen reichen nicht aus, Trocknungsleistung, Energiebedarf und den Zustand der Körner nach der Trocknung bei gegebenen Abmessungen des Trockners und gegebenen Trocknungsbedingungen vorausberechnen zu können.

Zur rechnerischen Bestimmung der im Trockner ablaufenden thermodynamischen Vorgänge wurden mathematische Modelle entwickelt, mit denen Trocknungsprozesse simuliert werden können [1]. Langsam ablaufende Trocknungsvorgänge, wie sie bei der Belüftungstrocknung auftreten, können mit dem Gleichgewichtsmodell [2, 3, 4] beschrieben werden. Dieses Modell erfordert zur Berechnung des Trocknungsverlaufs lediglich die Kenntnis der Gleichgewichtsfeuchte des Trocknungsgutes bei den im Trockner auftretenden Luftzuständen. Der Trocknungsverlauf in Warmlufttrocknern kann mit Hilfe von Schichtenmodellen [5, 6] simuliert werden, wobei das Trocknungsverhalten von Einzelkörnern bzw. dünnen Kornschichten in Abhängigkeit von Guteigenschaften und Trocknungsparametern bekannt sein muß.

Eine vergleichende Untersuchung der im Schrifttum [7, 8, 9, 10] beschriebenen Gleichungen zur Berechnung des Trocknungsverhaltens von Körnerfrüchten zeigte, daß die Gleichungen nur für eng begrenzte Bereiche der Stoff- und Trocknungsparameter gültig sind und die damit berechneten Trocknungsverläufe teilweise erheblich voneinander abweichen [11, 12]. Insbesondere wurde der Einfluß der relativen Feuchte der Trocknungsluft und der Luftgeschwindigkeit bei den Gleichungsansätzen nicht in dem erforderlichen Umfang berücksichtigt [13]. Weiter können die im Temperaturbereich 5–30 °C bei der Belüftungstrocknung, der Kühlkonservierung und der Belüftung von lagernden Körnerschüttungen auftretenden Trocknungs- und Befeuchtungsvorgänge mit den Gleichungsansätzen nicht berechnet werden. Über den Verlauf der für Qualitätsveränderungen maßgeblichen Korntemperatur liegen nur wenige experimentelle und theoretische Untersuchungen vor [14].

Die derzeit bekannten Untersuchungsergebnisse reichen nicht aus, Trocknungsvorgänge, wie sie beispielsweise bei der Ruheschichttrocknung oder bei Gleich-, Gegen- und Querstromtrocknern ablaufen, mit den Schichtenmodellen mit ausreichender Genauigkeit zu berechnen.

## 2. Aufgabenstellung

Ziel der vorliegenden Arbeit<sup>1)</sup> ist die Entwicklung einer Versuchsanlage, mit der das Trocknungs- und Befeuchtungsverhalten von Körnerfrüchten bei konstantem Luftzustand experimentell untersucht werden kann. Mit dieser Versuchsanlage soll der zeitliche Verlauf des Feuchtegrades der Körner in Abhängigkeit von der Temperatur, der relativen Feuchte und der Geschwindigkeit der Luft kontinuierlich bestimmt werden. Um eine Beeinflussung der Messung durch die von der Luft auf die Körner ausgeübten Strömungskräfte zu verhindern, ist vorgesehen, die Strömungskräfte durch konstruktive Maßnahmen zu kompensieren. Messungen der Temperatur im Innern und an der Oberfläche der Körner sollen Aufschluß über die Wärmeübertragungsmechanismen und Hinweise auf die während der Trocknung ablaufenden biochemischen Reaktionen geben. Mit der Versuchsanlage sollen insbesondere die bislang weitgehend ungeklärten Einflüsse von relativer Feuchte und Luftgeschwindigkeit auf das Trocknungsverhalten von Körnerfrüchten geklärt werden.

<sup>1)</sup> Diese Arbeiten wurden im Rahmen eines Forschungsvorhabens durchgeführt, das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert wird. Für die Bereitstellung der Mittel sei an dieser Stelle gedankt.

Die Versuchsanlage soll so ausgelegt werden, daß damit das Trocknungs- und Befeuchtungsverhalten sämtlicher Körnerfrüchte bei allen bei der Warmluft- und Belüftungstrocknung, der Körnerkühlung sowie dem Belüften lagernder Körnerschüttungen auftretenden Luftzuständen untersucht werden kann.

Die mit der Anlage ermittelten Zusammenhänge zwischen den Trocknungsparametern und dem zeitlichen Verlauf des Feuchtegrades der Körner und der Korntemperatur sind Voraussetzung für die Aufstellung und Verifizierung einer Gleichung, mit der das Trocknungsverhalten von Einzelkörnern bzw. dünnen Kornschichten berechnet werden kann. Diese Gleichung ist wiederum Grundlage zur Simulation von Trocknungsvorgängen, wie sie in Warmluft- und Belüftungstrocknungsanlagen ablaufen.

## 3. Meßverfahren

### 3.1 Messung des Trocknungs- und Befeuchtungsverhaltens

Die von den Körnern während der Trocknung oder Befeuchtung abgegebene bzw. aufgenommene Feuchtemasse kann entweder direkt durch die Messung der Gewichtsveränderung der Körner oder indirekt über die Messung der Veränderung des Feuchtegrades der Luft beim Durchströmen der Körner bestimmt werden.

Der Feuchtegrad der Luft kann jedoch nicht direkt gemessen werden, sondern muß aus anderen Größen wie Temperatur, Taupunkttemperatur, relativer Feuchte, Kühlgrenztemperatur oder der Extinktion von infrarotem Licht durch Wassermoleküle berechnet werden [15, 16].

Bei der Trocknung von Einzelkörnern ist insbesondere im Temperaturbereich unter 30 °C die Trocknungsgeschwindigkeit so gering, daß die Feuchtegradveränderung im Bereich von  $10^{-5}$  kg/kg trockener Luft liegt. Derartig geringe Feuchtegradänderungen sind selbst bei hohem apparativem Aufwand nicht meßbar. Im Temperaturbereich 100–250 °C steigt zwar die Veränderung des Feuchtegrades der Luft auf Werte bis zu  $10^{-2}$  kg/kg an, die Messung von Taupunkttemperatur, Kühlgrenztemperatur oder der relativen Feuchte ist in diesem Temperaturbereich mit der erforderlichen Genauigkeit aber nicht möglich.

Aus den hier aufgeführten Gründen kann die Feuchtegradveränderung der Körner mit der erforderlichen Genauigkeit nur gravimetrisch bestimmt werden. Hierzu bieten sich folgende Verfahren an:

1. Diskontinuierliche Messung des Gewichts der Körner außerhalb des Luftstromes [17] bzw. bei abgeschaltetem Luftstrom [18].
2. Kontinuierliche Messung des Gewichts der Körner im Luftstrom [19, 20].

Diskontinuierliche Meßverfahren sind insbesondere bei schnell ablaufenden Trocknungsvorgängen nur bedingt zur Bestimmung des Trocknungsverlaufs geeignet, da bei der Wägung der Körner außerhalb des Luftstroms bzw. bei abgeschaltetem Luftstrom der Trocknungsvorgang unterbrochen wird, wobei es zu einer Beeinträchtigung der Messung kommen kann.

Bei der kontinuierlichen Messung des Gewichts der Körner im Luftstrom wirken im allgemeinen sowohl die Gewichtskraft der Körner als auch die von der Luft auf die Körner ausgeübten Strömungskräfte auf die Waage. Da sich das Volumen der Körner während der Trocknung verändert, sind die Strömungskräfte zeitlich nicht konstant. Die Strömungskräfte können zwar durch Wägung der Körner bei abgeschaltetem Luftstrom bestimmt werden, dies führt jedoch wie bei den diskontinuierlichen Meßverfahren zu einer Unterbrechung des Trocknungsvorganges und damit zu einer Beeinträchtigung des Meßergebnisses.

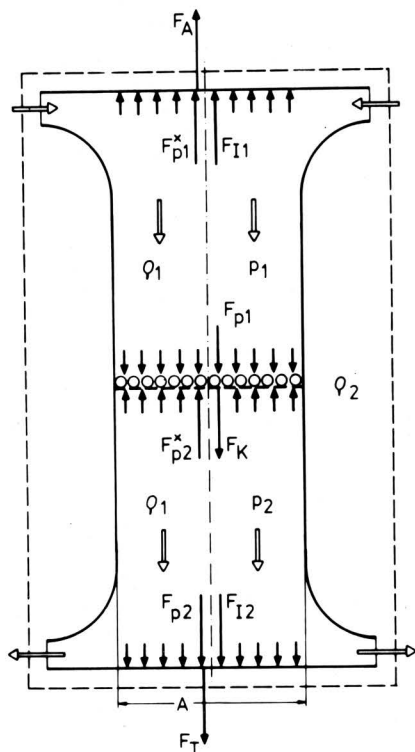
Da die Zusammenhänge zwischen dem Trocknungsverlauf und der Änderung der Strömungskräfte nicht bekannt sind, kann deren Einfluß auf das Meßergebnis rechnerisch nicht berücksichtigt werden. Im folgenden wird ein neu entwickeltes Meßverfahren beschrieben, bei dem die Strömungskräfte durch konstruktive Maßnahmen kompensiert werden. Die Meßanordnung mit den auftretenden Kräften ist in Bild 1 dargestellt. Die Vorrichtung ist an

einer Waage aufgehängt und wird von oben nach unten von der Luft durchströmt. Die Körner werden auf einem Sieb, das sich in der Mitte des zylindrischen Teils der Vorrichtung befindet, dem Luftstrom ausgesetzt. Um das Auftreten horizontaler Kräfte auszuschließen, ist die Vorrichtung rotationssymmetrisch aufgebaut.

Die Luft strömt zunächst aus einem Ringkanal horizontal in die Meßanordnung ein, wird in vertikale Richtung umgelenkt und tritt nach Durchströmen der Körner und einer weiteren Umlenkung wieder horizontal aus.

Auf die Waage wirken dabei folgende vertikale Kräfte:

1. Das Gewicht der Meßanordnung  $F_T$
2. Das Gewicht der Körner  $F_K$
3. Die Druckkräfte  $F_{p1}$ ,  $F_{p1}^*$ ,  $F_{p2}$  und  $F_{p2}^*$
4. Die durch die Umlenkung der Luft erzeugten Kräfte  $F_{I1}$  und  $F_{I2}$
5. Die Auftriebskraft  $F_A$  infolge Dichtedifferenzen zwischen dem Innern und der Umgebung der Meßanordnung.



**Bild 1.** Meßanordnung zur kontinuierlichen Wägung einer durchströmten Körnerschicht mit Kompensation der von der Luft auf die Körner ausgeübten Kräfte.

Für das in Bild 1 dargestellte System kann folgende Kräftebilanz aufgestellt werden:

$$F = -F_T - F_K - F_{p1} + F_{p1}^* - F_{p2} + F_{p2}^* + F_{I1} - F_{I2} + F_A \quad (1)$$

Die Druckkräfte  $F_{p1}$  und  $F_{p1}^*$  sowie  $F_{p2}$  und  $F_{p2}^*$  sind dem Betrage nach gleich groß, da die Drücke  $p_1$  und  $p_2$  auf gleich große Flächen wirken. Weiter heben sich die durch die Umlenkung des Luftstroms erzeugten Kräfte  $F_{I1}$  und  $F_{I2}$  auf, unter der Voraussetzung, daß sich die Dichte der Luft und die Luftgeschwindigkeit beim Durchströmen der Körner nicht verändern. Unter diesen Voraussetzungen vereinfacht sich Gl. (1) zu:

$$F = -F_T - F_K + F_A \quad (2)$$

wobei sich die Gewichtskraft  $F_K$  der Körner und die Auftriebskraft  $F_A$  darstellen lassen als

$$F_K = g (m_{TS} + m_W) \quad (3)$$

und

$$F_A = g V (\rho_2 - \rho_1) \quad (4)$$

Damit kann die auf die Waage ausgeübte Kraft  $F$  nach folgender Beziehung berechnet werden:

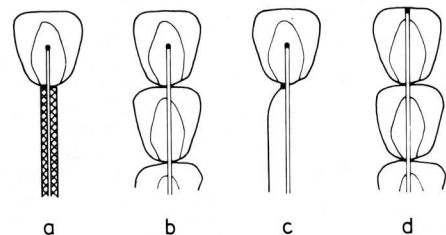
$$F = -F_T - g (m_{TS} + m_W) + g V (\rho_2 - \rho_1) \quad (5)$$

Aus Gl. (5) geht hervor, daß die Kraft  $F$  nur von einer zeitlich veränderlichen Größe abhängig ist, der Feuchtemasse  $m_W$ , vorausgesetzt, daß durch konstruktive Maßnahmen der Dichteunterschied zwischen dem Innern der Meßanordnung und der Umgebung zeitlich konstant gehalten werden kann.

### 3.2 Messung der Korntemperatur

Zur Messung der Korntemperatur muß der Sensor durch eine Bohrung in das Korn eingeführt werden. Um Verfälschungen des Meßergebnisses durch die Masse des Sensors und Wärmeleitung durch die Meßleitung zu verhindern, muß die Masse des Sensors im Vergleich zur Kornmasse klein sein und die Meßleitung gegenüber der Trocknungsluft isoliert werden. Bei Kornabmessungen zwischen 1,5 mm (bei Raps) und maximal 12 mm (bei Mais) scheiden Widerstandsthermometer und Halbleiterfühler aufgrund ihrer Abmessungen aus. Thermoelemente haben zwar im Vergleich zu den Widerstandsthermometern eine geringere Genauigkeit, diese kann jedoch durch Kalibrierung mittels eines Temperaturnormals soweit verbessert werden, daß der Meßfehler kleiner als 0,2 K ist.

In Bild 2 sind verschiedene Verfahren zur Verhinderung der Wärmeleitung durch die Meßleitungen zur Meßstelle dargestellt. Durch die Wärmeisolation der Meßleitung mit wärmedämmenden Materialien (a) kann nur kurzzeitig der Wärmestrom unterbunden werden. Bessere Ergebnisse können erzielt werden, wenn die Isolation aus dem gleichen Material besteht, wie die Umgebung der Meßstelle, da dann in der Isolation die gleichen physikalischen Vorgänge ablaufen, wie in dem Korn, dessen Temperatur zu messen ist. Dies kann durch Körner gleicher Abmessungen und gleichen Feuchtegrades erreicht werden, die auf die Meßleitung aufgefädelt werden (b) [20, 21]. Ein ähnlicher Effekt kann durch ein Peltier-Element erreicht werden (c), welches die Temperatur der Meßleitung an der Kornoberfläche durch Wärmezu- oder Wärmeabfuhr auf der Temperatur der Meßstelle hält.



**Bild 2.** Verfahren zur Messung der Temperatur im Innern (a-c) und an der Oberfläche (d) von Körnerfrüchten mittels Thermoelementen.

- a Isolation der Meßleitung mit wärmedämmenden Materialien
- b, d Isolation der Meßleitung mit Körnern gleicher Größe und gleichen Feuchtegehalts
- c Heizung bzw. Kühlung der Meßleitung an der Kornoberfläche auf die Temperatur der Meßstelle (Peltier-Element)

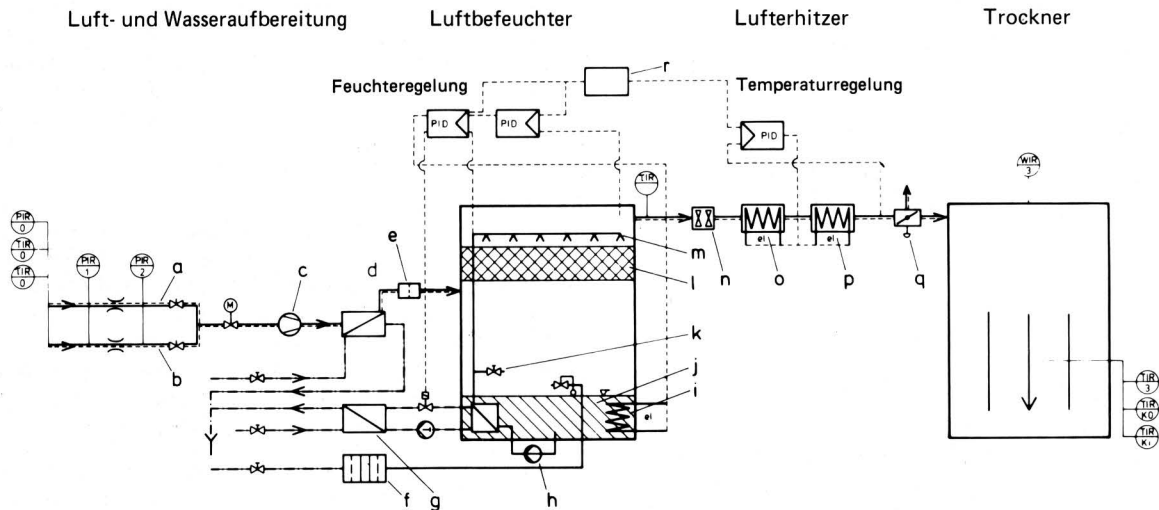
### 3.3 Messung der Oberflächentemperatur

Die Temperatur der Kornoberfläche kann mit einem Thermoelement gemessen werden, dessen Sensor durch das Korn bis unter die Kutikula geführt wird [20] (d in Bild 2). Dieses Verfahren ist insbesondere dann geeignet, wenn die Temperatur an einem bestimmten Punkt der Kornoberfläche gemessen werden soll.

Zur Beschreibung der Wärme- und Stoffübergangsvorgänge muß jedoch eine mittlere Oberflächentemperatur herangezogen werden, da aufgrund des örtlich unterschiedlichen Stoffübergangs die Kornoberfläche keine einheitliche Temperatur aufweist. Die mittlere Oberflächentemperatur kann mit einem berührungslos arbeitenden Infrarotthermometer gemessen werden, dessen Meßfeld gleichzeitig die Oberflächentemperatur mehrerer Körner erfaßt und mittelt. Voraussetzung dafür ist, daß der Emissionsfaktor der Kornoberfläche bekannt ist und sich während der Messung nicht verändert. Der Emissionsfaktor kann mit absolut trockenen Körnern bestimmt werden, indem gleichzeitig die Oberflächen- und Innentemperatur bei thermischem Gleichgewicht bestimmt werden.

## 4. Anlagenbeschreibung

Die Anlage zur Untersuchung des Trocknungs- und Befeuchtungsverhaltens von Körnerfrüchten besteht aus den Einrichtungen zur Klimatisierung der Trocknungsluft<sup>2)</sup> und dem Trockner, Bild 3.



**Bild 3.** Schematische Darstellung der Versuchsanlage mit Meß- und Regelungseinrichtungen.

- |  |                           |
|--|---------------------------|
| a Meßleitung $\phi$ 50 mit Normblende  | j Wasserbad               |
| b Meßleitung $\phi$ 100 mit Normblende | k Bypass                  |
| c Radialventilator                     | l Füllkörperschüttung     |
| d Luftkühler                           | m Sprühdüsen              |
| e Luftfilter                           | n Mischer                 |
| f Ionenaustauscher                     | o Luftherhitzer I         |
| g Kältemaschine                        | p Luftherhitzer II        |
| h Umwälzpumpe                          | q Umschaltklappe          |
| i elektr. Wasserbadheizung             | r digitaler Sollwertgeber |

### 4.1 Luft- und Wasseraufbereitung

Die Trocknungsluft wird von einem Radialventilator angesaugt und der Volumenstrom der Luft mittels Meßleitung und Normblende bestimmt. Der Volumenstrom der Luft kann im Bereich 14,7–220 m<sup>3</sup>/h variiert werden. Dies entspricht Luftgeschwindigkeiten im Trockner von 0,1–1,5 m/s. Die Einstellung des Volu-

menstroms auf den geforderten Wert erfolgt mit einem elektrisch betriebenen Schieber. Zur Messung des Volumenstroms nach DIN 1952 ist es notwendig, die Reynoldszahl im Bereich  $2 \cdot 10^4 < Re < 10^7$  zu halten. Um dieser Forderung zu entsprechen, wurden zwei manuell umschaltbare Meßleitungen mit 50 und 100 mm Durchmesser installiert. Für Lufttemperaturen im Trockner unterhalb der Umgebungstemperatur wird die Luft nach dem Radialventilator in einem Luft-Wasser-Wärmetauscher auf ca. 10 °C abgekühlt. Über einen Filter gelangt die Luft in den Luftbefeuchter. Das für die Befeuchtung notwendige Wasser wird der Wasserversorgung entnommen und der Anlage über einen Ionenaustauscher zugeführt.

### 4.2 Luftbefeuchter

Der Luftbefeuchter besteht aus einem Wasserbad, Sprühdüsen und einer Füllkörperschüttung. Das Wasserbad kann mit einer elektrischen Heizung und einer wassergekühlten Kältemaschine auf Temperaturen von 4,0–80 °C temperiert werden. Das demineralisierte Wasser wird von einer Kreiselpumpe aus dem Wasserbad angesaugt und durch den Wärmetauscher der Kältemaschine gefördert. Die Verteilung des temperierten Wassers in der Füllkörperschüttung erfolgt mittels Sprühdüsen. Nach Passieren der Füllkörperschüttung rieselt das Wasser in das Wasserbad zurück. Um bei Wasserbadtemperaturen unterhalb der Taupunkttemperatur der Umgebungsluft ausreichend Wärme aus dem Wasserbad abführen zu können, wird

der überwiegende Teil des durch den Wärmetauscher der Kältemaschine laufenden Wassers über einen Bypass dem Wasserbad wieder zugeführt. Die Luft tritt unterhalb der Füllkörperschüttung in den Befeuchter ein und durchströmt die Schüttung im Gegenstrom. Aufgrund der großen spezifischen Oberfläche der Schüttung stellt sich ein thermodynamisches Gleichgewicht zwischen Wasser und Luft ein. Die Luft wird dabei vollständig gesättigt.

### 4.3 Luftherhitzer

Nach Austritt aus dem Luftbefeuchter wird die Luft mit zwei statischen Mischern gemischt und anschließend in dem zweistufigen Heizregister auf Temperaturen von 5–250 °C erwärmt. Zwischen Luftherhitzer und Trockner ist eine pneumatisch betriebene Umschaltklappe angebracht, mit der die Luft wahlweise ins Freie oder durch den Trockner geleitet werden kann.

<sup>2)</sup> Die Anlage zur Klimatisierung der Trocknungsluft wurde in Zusammenarbeit mit Fa. Weiss Technik, Gießen, entwickelt.



#### 4.4 Trockner

Auf der Grundlage der in 3.1 beschriebenen Kompensation der Kraftwirkungen der Luft auf die Körner wurde die in Bild 4 dargestellte Anlage entwickelt. Die Luft, die im Luftbefeuchter und Lufterhitzer auf den gewünschten Zustand gebracht wird, strömt über einen Diffusor in eine Ringkammer, die mit verstellbaren Luftleitblechen ausgerüstet ist. Um in der Meßanordnung eine gleichmäßige Verteilung der Luftgeschwindigkeit zu erreichen, wurde zusätzlich zu den Luftleitblechen ein Lochblech eingebaut, welches einen Druckabfall in der Strömung erzeugt. Durch diesen Strömungswiderstand werden Ungleichmäßigkeiten in der Geschwindigkeitsverteilung der Luft weitgehend ausgeglichen. Die Luft durchströmt, wie in 3.1 beschrieben, die Meßanordnung und wird anschließend an deren Außenseite entlangeführt, um Temperaturgradienten in der Luft zu vermeiden. Damit wird auch sichergestellt, daß die Dichte innerhalb und außerhalb der Anordnung gleich ist. Die ganze Anlage ist mit einer 80–100 mm dicken Steinwollschicht isoliert, die an der Innenseite mit einer Dampfsperre versehen ist. Die Abluft wird in einem Abluftkanal gesammelt und tritt nach oben aus der Anlage aus.

Die Körner werden auf einem Sieb mit einem Durchmesser von 250 mm durch eine Schleuse in die Meßanordnung gebracht. Eine Körnerprobe von 300 g entspricht beispielsweise bei Raps 52 000 Körnern, bei Weizen 6 600 Körnern und bei Mais 880 Körnern. Durch die gewählte Probengröße wird sichergestellt, daß bei biologischen Gütern vorhandenen Inhomogenitäten von Einzelkörnern sich nur gering auf das Trocknungsverhalten der Probe auswirken.

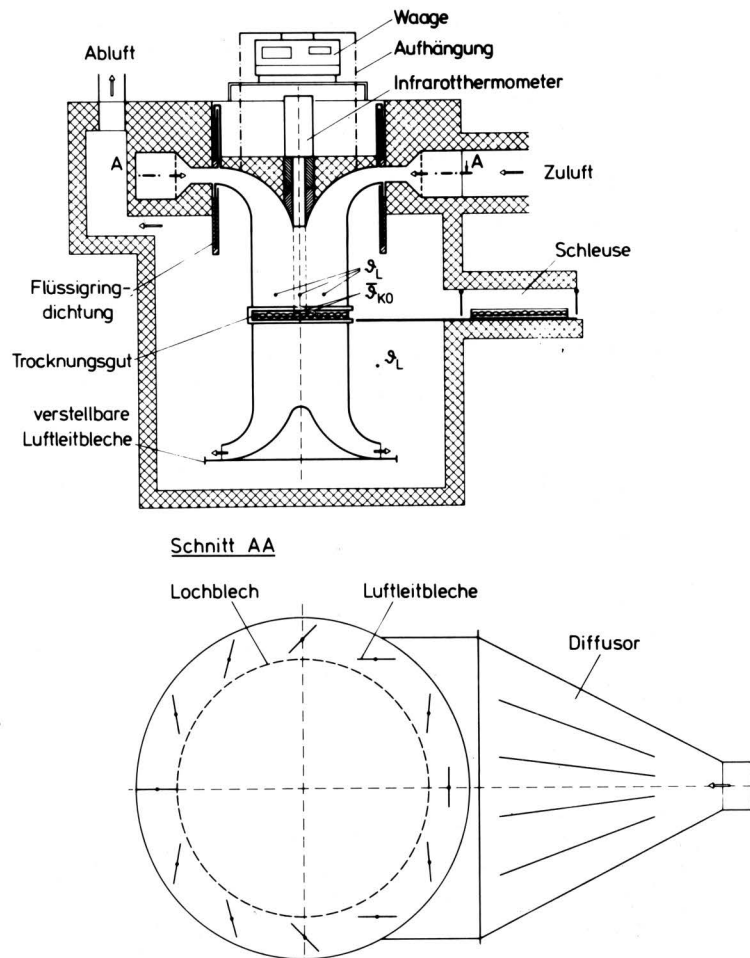
Die Meßanordnung ist mit beiden Umlenkungen an einer Waage aufgehängt. Der Übergang zum Ringkanal ist gegen die Umgebung mit zwei Flüssigringdichtungen abgedichtet. Durch diese Art der Abdichtung können keine Reibungskräfte auftreten, die die Gewichtsmessung stören. In der oberen Umlenkung ist ein Infrarotthermometer eingebaut, mit welchem die Oberflächentemperatur der Körner gemessen wird. Das Meßfeld des Infrarotthermometers hat 30 mm Durchmesser und umfaßt beispielsweise ca. 100 Weizenkörner.

#### 4.5 Regelung

Zur Realisierung der geforderten Genauigkeit und Zeitkonstanz von Temperatur und relativer Feuchte der Trocknungsluft, wurden stetige PID-Regler eingesetzt. Der Aufbau der Regeleinrichtungen und die Anordnung der zur Regelung von Temperatur und Taupunkttemperatur eingesetzten Meßfühler ist aus Bild 3 ersichtlich.

Die Temperatur der Trocknungsluft wird nach dem Lufterhitzer mit einem Pt 100-Meßwiderstand gemessen. Über eine Linearisierung und Meßbereichsanpassung wird das Temperatursignal einem PID-Regler zugeführt, welcher über einen Thyristorsteller die Heizleistung der Lufterhitzer regelt.

Die Taupunkttemperatur der Trocknungsluft beim Austritt aus dem Befeuchter hängt im wesentlichen von der Wasserbadtemperatur und der Temperatur der Luft beim Eintritt in den Befeuchter sowie dem durchgesetzten Luftvolumen ab. Aufgrund der Trägheit des Systems kann mit einem PID-Regler kein stabiles Zeitverhalten erreicht werden. Daher wurde die Regelung als Kaskadenregler aufgebaut. Die Taupunkttemperatur am Luftaustritt des Befeuchters wird mit einem Feuchtthermometer gemessen, da an dieser Stelle die Luft vollständig gesättigt ist. Das Feuchtthermometer besteht aus einem Pt 100-Meßwiderstand, der über ein Tropfinfusionsgerät kontinuierlich mit auf Lufttemperatur temperiertem Wasser befeuchtet wird. Das Signal des Fühlers wird über eine Linearisierung und eine Meßbereichsanpassung dem Führungsregler als Ist-Wert zugeführt. Gleichzeitig wird die Wassertemperatur in den Sprühdüsen mit einem Pt 100-Meßwiderstand gemessen und das Temperatursignal im Folgeregler zusammen mit dem Ausgangssignal des Führungsreglers verarbeitet. Der Regler regelt über einen Thyristorsteller die elektrische Wasserbadheizung und über ein Magnetventil den Kältemitteldurchsatz der Kältemaschine.



**Bild 4.** Versuchsanlage zur kontinuierlichen Messung des Trocknungsverhaltens, der Temperatur im Innern und an der Oberfläche von Körnerfrüchten.

Die Sollwerte von Temperatur und Taupunkttemperatur werden einem digitalen Sollwertgeber eingegeben, der ein entsprechendes Analogsignal den Sollwerteingängen der Regler zuführt.

#### 4.6 Datenerfassung und -verarbeitung

Die Anordnung der Meßwertaufnehmer ist aus den Bildern 3 und 4 ersichtlich; die Meßgrößen sowie die eingesetzten Meßverfahren sind in **Tafel 1** zusammengestellt. Die von der Meßdatenerfassungsanlage erfaßten Daten werden direkt über eine Datenfernübertragungseinrichtung in einen Prozeßrechner eingelesen. Im Prozeßrechner werden die zur Versuchsüberwachung notwendigen Größen

- Versuchsdauer
- Temperatur der Trocknungsluft
- relative Feuchte der Trocknungsluft
- Luftgeschwindigkeit im Trockner
- Gewicht der Körner
- Oberflächentemperatur der Körner

berechnet und auf einem Drucker ausgegeben. Zur Kontrolle des Trocknungsprozesses wird das Gewicht der Körner während des Versuches mit einem Plotter aufgezeichnet.

Sämtliche während des Versuches gemessenen und berechneten Größen werden auf einer Magnetplatte zur Auswertung abgespeichert. Bei der nachfolgenden Versuchsauswertung werden zunächst die den Trocknungsverlauf beschreibenden Größen wie Feuchtegehalt und Feuchtegrad der Körner, differentielle und integrale Trocknungsgeschwindigkeit berechnet und grafisch dargestellt. Das gewonnene Datenmaterial ist Grundlage für die Aufstellung einer Gleichung zur Berechnung des Trocknungsverhaltens von Körner-

früchten, wobei die Abhängigkeit des Trocknungsverhaltens sowohl von Gut- als auch von Trocknungsparametern berücksichtigt werden soll.

Meßgröße	Meßverfahren	Meßgenauigkeit
Feuchtegrad der Körner $X_1, X_2$	Präzisionswaage, Trockenschrank 24 h, $\vartheta_L = 105\text{ °C}$ , ganze Körner	$\pm 0,5\%$
Temperatur der Trocknungsluft $\vartheta_L$	Pt 100-Meßwiderstand	$\pm 0,2\text{ K}$
Kühlgrenztemperatur der Luft nach Befeuchter $\vartheta'_L$	Pt 100-Meßwiderstand, befeuchtet	$\pm 0,2\text{ K}$
Volumenstrom der Trocknungsluft $\dot{V}_L$	Normblende (DIN 1952)	$\pm 5\%$
Druck vor der Blende $p_{B1}$	Druckmeßdose	$\pm 7\text{ Pa}$
Druck nach der Blende $p_{B2}$	Druckmeßdose	$\pm 7\text{ Pa}$
absoluter Druck d. Luft $p_A$	Druckmeßdose	$\pm 100\text{ Pa}$
Temperatur der Luft vor der Blende $\vartheta_{L0}$	Pt 100-Meßwiderstand	$\pm 0,2\text{ K}$
Entzogene Feuchtemasse $\Delta m_W$	elektronische Präzisionswaage	$\pm 0,2\text{ g}$
Temperatur im Korninnern $\vartheta_{Ki}$	NiCr-Ni-Thermoelement, Isolation mit Körnerkette	mit Kalibrierung $\pm 0,2\text{ K}$
Temperatur an der Kornoberfläche $\vartheta_{KO}$	Infrarotthermometer <sup>1)</sup>	$\pm 2\text{ K}$

1) Typ Infrapyr, Keller Spezialtechnik Pyrowerk GmbH, 4530 Ibbenbüren – Laggenbeck

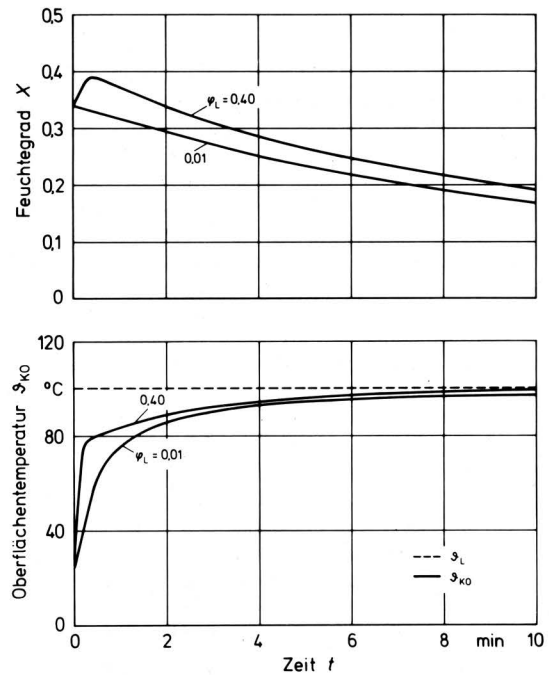
Tafel 1. Zusammenstellung der Meßgrößen, Meßverfahren und Meßgenauigkeiten.

### 5. Versuchsergebnisse

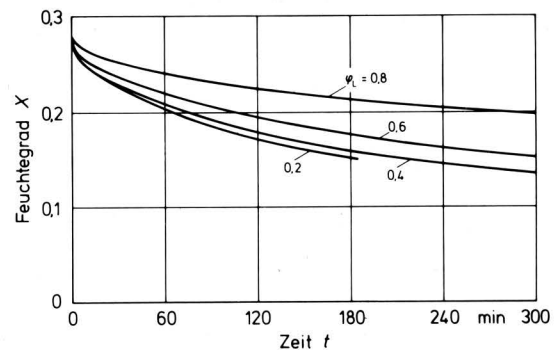
In den folgenden Bildern sind ausgewählte Versuchsergebnisse dargestellt, die beispielhaft den Einfluß der relativen Feuchte und der Geschwindigkeit der Trocknungsluft auf den Verlauf des Feuchtegrades während der Trocknung zeigen.

**Bild 5** zeigt den Verlauf des Feuchtegrades sowie der Temperatur an der Oberfläche von Weizenkörnern bei unterschiedlicher Feuchte der Trocknungsluft. Bei einer relativen Feuchte der Trocknungsluft  $\varphi_L = 0,01$  setzt der Trocknungsvorgang unmittelbar nach Versuchsbeginn ein. Erhöht man die relative Feuchte der Luft auf  $\varphi_L = 0,40$ , so liegt die Taupunkttemperatur der Trocknungsluft mit  $\tau_L = 76\text{ °C}$  weit über der Oberflächentemperatur der Körner zu Versuchsbeginn. Dies hat zur Folge, daß zunächst Wasser an der Oberfläche der Körner auskondensiert und der Feuchtegrad der Körner über den Anfangsfeuchtegrad  $X_1$  ansteigt. Dabei steigt die Temperatur an der Kornoberfläche schnell an, bis die Taupunkttemperatur erreicht ist. Im Vergleich zum Temperaturverlauf bei der Trocknung mit niedriger relativer Feuchte verläuft der Temperaturanstieg wesentlich schneller, da dem Korn nicht nur durch konvektive Wärmeübertragung Energie zugeführt wird, sondern gleichzeitig an der Oberfläche die Verdampfungsenthalpie des kondensierenden Wassers freigesetzt wird. Nach Erreichen der Taupunkttemperatur verdunstet zunächst das an der Oberfläche kondensierte Wasser, bis der Anfangsfeuchtegrad  $X_1$  erreicht ist. Anschließend beginnt das Korn selbst zu trocknen.

Wie **Bild 5** zeigt, beeinflusst die relative Feuchte der Trocknungsluft den Trocknungsverlauf nicht nur zu Beginn der Trocknung, sondern während der gesamten Trocknungsdauer. Dieser Einfluß ist umso stärker, je niedriger die Temperatur der Trocknungsluft ist.



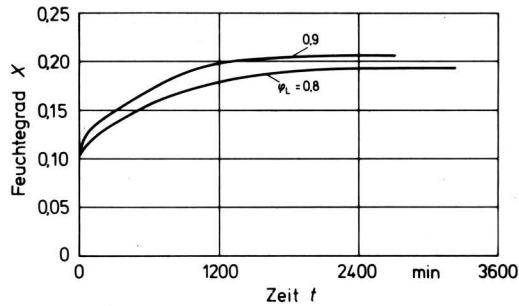
**Bild 5.** Zeitlicher Verlauf des Feuchtegrades und der Temperatur an der Oberfläche bei der Trocknung von Weizenkörnern bei unterschiedlicher relativer Feuchte der Trocknungsluft;  $\vartheta_L = 100\text{ °C}$ ,  $v_L = 0,25\text{ m/s}$ ,  $X_1 = 0,34$ .



**Bild 6.** Einfluß der relativen Feuchte der Trocknungsluft auf den zeitlichen Verlauf des Feuchtegrades bei der Trocknung von Gerstenkörnern;  $\vartheta_L = 40\text{ °C}$ ,  $v_L = 0,5\text{ m/s}$ ,  $X_1 = 0,28$ .

**Bild 6** zeigt den Trocknungsverlauf von Gerstenkörnern mit der relativen Feuchte der Trocknungsluft als Parameter. Mit zunehmender relativer Feuchte verlangsamt sich der Trocknungsvorgang immer stärker, bis letztlich das Sorptionsgleichgewicht erreicht ist und kein Stoffaustausch mehr stattfindet.

Der gleiche Effekt konnte bei der Aufnahme von Befeuchtungskurven festgestellt werden. Dies verdeutlicht **Bild 7**, das den Befeuchtungsverlauf von Maiskörnern bei  $20\text{ °C}$  und einer relativen Feuchte der Zuluft von  $\varphi_L = 0,80$  und  $\varphi_L = 0,90$  wiedergibt. Nach 30 Stunden (1800 min) stellte sich das sorptive Gleichgewicht zwischen Luft und Gut ein. Wie dieses Beispiel zeigt, können aufgrund des stabilen Langzeitverhaltens der Präzisionswaage mit der Versuchsanlage auch Sorptionsisothermen aufgenommen werden.

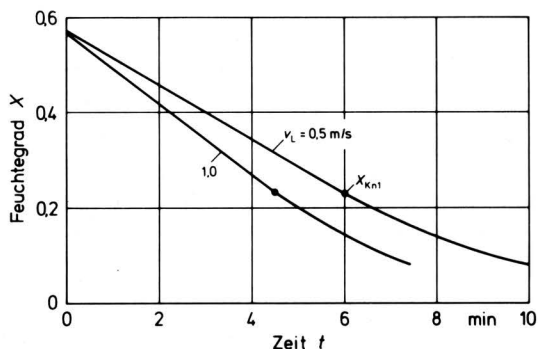


**Bild 7.** Zeitlicher Verlauf des Feuchtegrades bei der Befeuchtung von Maiskörnern mit Luft unterschiedlicher relativer Feuchte;  $\vartheta_L = 20\text{ °C}$ ,  $v_L = 1\text{ m/s}$ ,  $X_1 = 0,11$ .

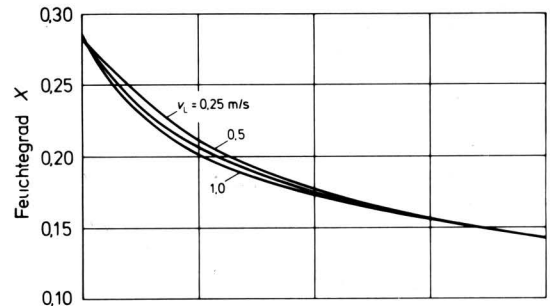
Die hohe Meßgenauigkeit erlaubt auch die gesicherte Feststellung der verschiedenen Trocknungsabschnitte. Dies verdeutlicht **Bild 8**, in dem der Trocknungsverlauf von Maiskörnern bei  $200\text{ °C}$  und unterschiedlicher Luftgeschwindigkeit dargestellt ist.

Weiter konnte der von *Pabis* [22] auf unterschiedliche Wärmeübergangszahlen zurückgeführte Einfluß der Luftgeschwindigkeit im 2. Trocknungsabschnitt experimentell bestätigt werden. Wie **Bild 9** am Beispiel der Trocknung von Gerstenkörnern zeigt, beeinflusst zu Beginn der Trocknung die Luftgeschwindigkeit den Trocknungsverlauf. Mit fortschreitender Trocknung nimmt dieser Einfluß ab. Darauf weist auch der Verlauf der Temperatur der Kornoberfläche hin. Die Temperatur der Oberfläche steigt bei höherer Luftgeschwindigkeit schneller an.

Diese Versuchsergebnisse zeigen, daß mit der neu entwickelten Versuchsanlage das Trocknungsverhalten von Körnerfrüchten sehr genau untersucht werden kann. Der bisher nicht oder nur wenig untersuchte Einfluß von relativer Feuchte und Geschwindigkeit der Trocknungsluft kann quantitativ erfaßt werden. Die theoretische Bewertung der Versuchsergebnisse bleibt weiteren Veröffentlichungen vorbehalten.



**Bild 8.** Einfluß der Luftgeschwindigkeit auf den zeitlichen Verlauf des Feuchtegrades der Körner und die Lage des 1. Knickpunktes bei der Trocknung von Maiskörnern;  $\vartheta_L = 200\text{ °C}$ ,  $\varphi_L = 0,01$ ,  $X_1 = 0,57$ .



**Bild 9.** Einfluß der Luftgeschwindigkeit auf den zeitlichen Verlauf des Feuchtegrades und der Oberflächentemperatur bei der Trocknung von Gerstenkörnern;  $\vartheta_L = 80\text{ °C}$ ,  $\varphi_L = 0,10$ ,  $X_1 = 0,28$ .

## 6. Zusammenfassung

Zur Untersuchung des Trocknungs- und Befeuchtungsverhaltens von Körnerfrüchten wurde eine Meßeinrichtung entwickelt, die eine kontinuierliche Wägung der Körner während der Trocknung ermöglicht. Durch konstruktive Maßnahmen wurde eine Beeinflussung der Wägung durch die Volumenveränderung der Körner ausgeschlossen.

Die Einrichtungen zur Klimatisierung der Trocknungsluft wurden so konzipiert, daß sowohl die beim Belüften und Kühlen als auch die bei der Belüftungs- und Warmlufttrocknung von Körnerfrüchten auftretenden Luftzustände eingestellt werden können. In der Versuchsanlage kann die Temperatur der Trocknungsluft im Bereich  $5\text{--}250\text{ °C}$ , die Taupunkttemperatur im Bereich  $4\text{--}80\text{ °C}$  und die Luftgeschwindigkeit im Trockner im Bereich  $0,1\text{--}1,5\text{ m/s}$  variiert werden. Die Regelgenauigkeit bezüglich der Taupunkttemperatur und der Temperatur der Trocknungsluft ist besser als  $1\%$ . Die Konstanz von Temperatur und Geschwindigkeit der Luft über den Querschnitt des Trockners ist besser als  $0,2\text{ K}$  bzw.  $0,05\text{ m/s}$  bei  $v_L = 1\text{ m/s}$ . Die Messung des Gewichts der Körner ist genauer als  $0,5\%$ . Die Oberflächentemperatur kann mit einem Infrarotthermometer mit einer Genauigkeit von  $\pm 2\text{ K}$  gemessen werden, die Genauigkeit der Messung der Korninnentemperatur mittels Thermoelementen beträgt  $0,2\text{ K}$ .

Wiederholungsmessungen mit gleichem Gut und bei konstanten Trocknungsparametern zeigten, daß die Versuchsergebnisse sehr gut reproduzierbar sind.

Die Erfassung der Meßwerte erfolgt mit einem Meßwerterfassungssystem, das mit einem Prozeßrechner gekoppelt ist und eine unmittelbare Auswertung nach Versuchsende zuläßt.

Das mit der Versuchsanlage gewonnene Datenmaterial ist Grundlage für ein mathematisches Modell, mit dem das Trocknungsverhalten von Körnerfrüchten in Abhängigkeit von der Gutart, dem Feuchtegrad der Körner, der Temperatur und der relativen Feuchte der Trocknungsluft sowie der Luftgeschwindigkeit beschrieben werden kann.

## Verwendete Formelzeichen

A	Querschnittsfläche
F	auf die Waage wirkende Kraft
F <sub>A</sub>	Auftriebskraft
F <sub>I1</sub> , F <sub>I2</sub>	Kräfte durch die Umlenkung der Luft
F <sub>p1</sub> , F <sub>p1</sub> <sup>*</sup> , F <sub>p2</sub> , F <sub>p2</sub> <sup>*</sup>	Druckkräfte
F <sub>K</sub>	Gewichtskraft der Körner
F <sub>T</sub>	Gewichtskraft der Meßanordnung
g	Erdbeschleunigung
m <sub>TS</sub>	Masse der Trockensubstanz der Körner
m <sub>W</sub>	Feuchtemasse der Körner
Δm <sub>W</sub>	entzogene Feuchtemasse
p <sub>A</sub>	absoluter Druck der Luft
p <sub>B1</sub>	Druck vor der Blende
p <sub>B2</sub>	Druck nach der Blende
p <sub>1</sub>	Druck vor der Körnerschicht
p <sub>2</sub>	Druck nach der Körnerschicht
t	Zeit
V	Volumen der Meßanordnung
Ḃ <sub>L</sub>	Volumenstrom der Luft
v <sub>L</sub>	Geschwindigkeit der Trocknungsluft
X <sub>1</sub>	Anfangsfeuchtegrad der Körner
X <sub>2</sub>	Endfeuchtegrad der Körner
ϑ <sub>Ki</sub>	Temperatur im Korninnern
ϑ <sub>KO</sub>	Temperatur an der Kornoberfläche
ϑ <sub>L</sub>	Temperatur der Trocknungsluft
ϑ <sub>L</sub> <sup>'</sup>	Kühlgrenztemperatur
ϑ <sub>L0</sub>	Temperatur der Luft vor der Blende
ρ <sub>1</sub>	Dichte der Luft in der Meßanordnung
ρ <sub>2</sub>	Dichte der Luft außerhalb der Meßanordnung
τ <sub>L</sub>	Taupunkttemperatur der Trocknungsluft
ϕ <sub>L</sub>	relative Feuchte der Trocknungsluft

## Schrifttum

- [ 1 ] *Morey, R.V., H.M. Keener, T.L. Thompson, G.M. White u. F.W. Bakker-Arkema*: The present status of grain drying simulation. ASAE-Paper No. 78-3009, St. Joseph, Michigan, 1978.
- [ 2 ] *Sharp, J.R.*: A review of low temperature drying simulation models. J. Agric. Engng. Res. Bd. 27 (1982) Nr. 2, S. 169/90.
- [ 3 ] *Thompson, T.L.*: Temporary storage of high-moisture shelled corn using continuous aeration. Trans. ASAE Bd. 15 (1972) Nr. 2, S. 333/37.
- [ 4 ] *Muir, W.E. u. G.W. Ingram*: Description of a computer program for optimizing harvesting and in-bin drying of barley in northern Britain. Dept. Note SIN/189, Scot. Inst. agric. Engng., July 1975 (unpubl.).
- [ 5 ] *Bakker-Arkema, F.W., L.E. Lerew, S.F. Deboer u. M.G. Roth*: Grain drying simulation. Res. Bul., Mich. State Univ., 1972.
- [ 6 ] *O'Callaghan, J.R., D.J. Menzies u. P.H. Bailey*: Digital simulation of agricultural drier performance. J. Agric. Engng. Res. Bd. 16 (1971) Nr. 3, S. 223/44.
- [ 7 ] *Misra, M.K. u. D.B. Brooker*: Thin layer drying of shelled corn. ASAE-Paper No. 78-3002, St. Joseph, Michigan, 1978.
- [ 8 ] *van Rest, D.J. u. G.W. Isaacs*: Exposed-layer drying rates of grain. Trans. ASAE Bd. 11 (1968) Nr. 2, S. 236/39.
- [ 9 ] *Ross, I.J. u. G.M. White*: Thin layer drying characteristics of white corn. Trans. ASAE Bd. 15 (1972) Nr. 1, S. 175/79.
- [ 10 ] *Henderson, S.M.*: Progress in developing the thin-layer drying equation. Trans. ASAE Bd. 17 (1974) Nr. 6, S. 1167/68.
- [ 11 ] *Misra, M.K. u. D.B. Brooker*: Thin-layer drying and rewetting equations for shelled yellow corn. Trans. ASAE Bd. 23 (1980) Nr. 5, S. 1254/60.
- [ 12 ] *Daiber, Th.*: Einfluß der Lufttemperatur, der relativen Feuchte und der Luftgeschwindigkeit auf das Trocknungsverhalten von Einzelkornschichten von Mais. Diplomarbeit, Institut Chem. Verfahrenstechnik, Universität Stuttgart, 1982.
- [ 13 ] *Westermann, P.W., G.W. White u. I.J. Ross*: Relative humidity effect on the high-temperature drying of shelled corn. Trans. ASAE Bd. 16 (1973) Nr. 6, S. 1136/39.
- [ 14 ] *Scheuermann, A. u. W. Mühlbauer*: Das Trocknungsverhalten von Einzelkornschichten von Körnermais bei hohen Lufttemperaturen. Grundl. Landtechnik Bd. 20 (1970) Nr. 1, S. 11/15.
- [ 15 ] *Meiering, A.G.*: Der gekoppelte Wärme- und Stoffaustausch bei der Verarbeitung von Nahrungsmitteln unter besonderer Berücksichtigung der Trocknung von Körnerfrüchten. Fortschr.-Ber. VDI-Z. Reihe 14, Nr. 14. Düsseldorf: VDI-Verlag 1971.
- [ 16 ] *Gummel, P., G. Zabeschek u. E.U. Schlünder*: Experimentelle Bestimmung der Trocknungsgeschwindigkeit von durchströmten Haufwerken durch die kontinuierliche Messung der Abluftfeuchte. Verfahrenstechnik Bd. 10 (1976) Nr. 12, S. 766/69.
- [ 17 ] *Troeger, J.M. u. W.V. Hukill*: Mathematical description of the drying rate of fully exposed corn. Trans. ASAE Bd. 14 (1971) Nr. 6, S. 1153/62.
- [ 18 ] *Daudin, J.-D.*: Modelisation d'un sechoir a partir des cinetiques experimentales de sechage. Dissertation, Ecole Nationale Superieure des Industries Agricoles et Alimentaires, Paris, 1982.
- [ 19 ] *Bruce, D.M. u. R.A. Sykes*: Apparatus for determining mass transfer coefficients at high temperatures for exposed particulate crops, with initial results for wheat and hops. J. Agric. Engng. Res. Bd. 28 (1983) Nr. 5, S. 385/400.
- [ 20 ] *Mühlbauer, W.*: Untersuchung über die Trocknung von Körnermais unter besonderer Berücksichtigung des Gleichstromverfahrens. Forschungsbericht des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft, Frankfurt, Heft 1; Selbstverlag des Verfassers, Lehrstuhl für Landtechnik, Univ. Hohenheim 1974.
- [ 21 ] *Cleve, H. u. H.J. Hoffmann*: Temperaturmessung im Getreidekorn. Die Mühle Bd. 89 (1952) Nr. 27, S. 435/42.
- [ 22 ] *Pabis, S.*: Grain drying in thin layers. Proc. Agr. Engng. Symposium, National College of Agr. Engineering, Silsoe, Bedford (England), 1976, Paper-No. 1/C/4.