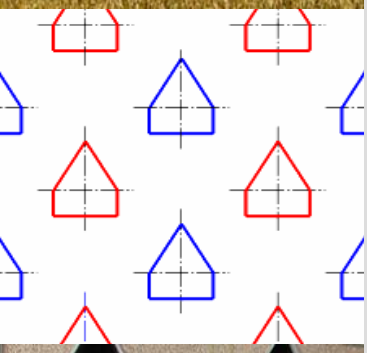
ProSenso.net

ATB Agrartechnik Bornim



Optimierte Steuerung von Getreideschachttrocknern

Optimized Control of Mixed-Flow Grain Dryers

Gefördert vom:

Bundesministerium für Bildung und Forschung

Mit Unterstützung durch:

Projektträger Jülich Forschungszentrum Jülich GmbH

Bornimer Agrartechnische Berichte

Heft 52

Potsdam-Bornim 2005

Optimierte Steuerung von Getreideschachttrocknern

Optimized Control of Mixed-Flow Grain Dryers

Gefördert vom:

Bundesministerium für Bildung und Forschung

Mit Unterstützung durch:

Projektträger Jülich Forschungszentrum Jülich GmbH

Bornimer Agrartechnische Berichte

Heft 52

Potsdam-Bornim 2005

Herausgeber:

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB)
Max-Eyth-Allee 100
14469 Potsdam
☎ 0331 5699-0
Fax 0331 5699-849
E-Mail atb@atb-potsdam.de
Internet www.atb-potsdam.de

Bearbeiter des ATB:

Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Fürll
Dr.-Ing. Jochen Mellmann
HS.-Math. Ingolf-Gerrit Richter
Prof. Dr.-Ing. habil. Werner Maltry

Die Bearbeitung erfolgte im Rahmen des BMBF-Förderprogramms "Forschung für die Umwelt" zum Thema

Agrartechnik - Integrierter Umweltschutz in der Landwirtschaft

„Verbesserung der Umweltverträglichkeit landwirtschaftlicher Produktionsverfahren durch Entwicklung innovativer Sensorik und Gestaltung der Produktionsprozesse im Sinne eines integrierten Umweltschutzes“

Typographische Gestaltung:

Christine Bronowski

November 2005

Herausgegeben vom Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB) mit Förderung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) und Unterstützung des Projektträgers des BMBF, Forschungszentrum Jülich GmbH (PTJ).
BMBF-FKZ: 0339992 Teilprojekt 05 (5558)

Für den Inhalt der Beiträge sind die Autoren verantwortlich.

Eine Weiterveröffentlichung von Teilen ist unter Quellenangabe und mit Zustimmung des Leibniz-Instituts für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. möglich.

ISSN 0947-7314

© Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V., Potsdam-Bornim 2005

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung 5
Abstract 6
1 Einleitung 6
2 Problemstellung und Zielsetzung 7
3 Stand von Wissenschaft und Technik 8
3.1 Mathematische Modellierung von Getreide-Schachttrocknern 8
3.2 Modellbasierte Regelung 9
3.3 In-line-Getreidefeuchte-Messtechnik 9
4 Mathematisches Modell für den Dächerschachttrockner 12
4.1 Einzelkornmodell 14
4.2 Schüttungsmodell 19
5 Experimentelle Untersuchungen 27
5.1 Laborversuche zur Dünnschichttrocknung 27
5.2 Trocknungsversuche am Dächerschachttrockner des ATB 30
5.3 Vergleich Modell - Experiment 38
6 Modellbasiertes Regelungskonzept 42
7 Zusammenfassung 43
8 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse 44
9 Literaturverzeichnis 46
Verzeichnis der Symbole und Indizes 50
Verzeichnis der Bilder und Tabellen 52
Reihe Bornimer Agrartechnische Berichte 53

Optimierte Steuerung von Getreide-Schachttrocknern

Kurzfassung

In Deutschland wird auf mehr als 58 % des Ackerlandes Getreide angebaut. Getreide ist gleichzeitig Hauptfrucht und Haupteinnahmequelle der Landwirte. Mehr als 61% der Getreideernte 2003 wurden als Futtergetreide verwendet; auf Nahrungsgetreide entfielen knapp 25%. Obwohl es das primäre Ziel der Erzeuger ist, Getreide trocken zu ernten, gelingt dies in Mitteleuropa im 10-Jahres-Durchschnitt nur zu etwa 60-70%. In der Getreideproduktion ist überdies ein Wandel hin zu weniger Arten und Sorten zu verzeichnen, der weniger Erntetage zur Folge hat. Hinzu kommt der Trend zu einer sinkenden Anzahl größer werdender Mähdrescher mit erheblich gesteigerter Ernteleistung. Aus betriebswirtschaftlichen Gründen werden zukünftig moderne Großmähdrescher nebeneinander liegende Flächen ernten, die noch nicht die erforderlichen Endfeuchtegehalte erreicht haben, so dass mehr Getreide getrocknet werden muss. Der Getreidequalität sowie der Rückverfolgbarkeit wird mit Inkrafttreten neuer EU-Verordnungen zur Lebensmittelsicherheit immer mehr Aufmerksamkeit gewidmet.

Trocknungsprozesse sind stets sehr energieintensiv: in der Industrie werden bis zu 15 % der eingesetzten Energie für Verfahren der Trocknung verbraucht. Für die Warmlufttrocknung von Weizen, Reis und Mais werden weltweit zunehmend Dächerschachttrockner eingesetzt. Die zum Teil erheblichen Schwankungen der Getreidefeuchte zu Beginn des Trocknungsprozesses am Einlass des Trockners (Trocknereintrag) stellen nach wie vor das größte regelungstechnische Problem dar. Bisherige Steuerungssysteme sind nicht in der Lage, diese Feuchteschwankungen im Laufe des Trocknungsprozesses ausreichend zu verringern. Aufgrund dessen kommt es häufig zur Unter- bzw. Übertrocknung begleitet von Schwankungen der Austrittsfeuchte. Qualitätseinbußen durch thermische Schädigungen oder die Bildung von Mykotoxinen im Getreidelager sind die Folgen.

Ziel des Vorhabens war deshalb, ein adaptives modellbasiertes Automatisierungskonzept zur Regelung der Trockengutfeuchte bei gleichzeitiger Reduzierung des Energieverbrauches und der Staubbelastung zu entwickeln, dessen Ergebnisse auf unterschiedliche Typen von Dächerschachttrocknern und Getreidearten übertragbar sind.

abstract

In Germany, more than 53% of the cultivated area are used for the grain production. Grain is the main fruit and the main source of income of the farmers at the same time. In 2003, more than 61% of the grain harvested were used as feed grain and almost 25% as food grain. Although it is the primary target of each farmer, to harvest grain dry in Central Europe succeeds only to 60-70% on 10-years average. Moreover, in the grain production a change towards a fewer number of species and sorts of grain can be observed resulting in fewer harvest days. In addition, there is a trend towards a decreasing number of combines becoming larger and more effective. In future, for economic reasons modern big combines will harvest more and more fields lying next to each other having not yet reached the moisture content required for harvest. Therefore more and more grain must be dried. Grain quality and traceability are payed more attention with new decrees from the EU coming into effect.

Drying processes are always very energy intensive: up to 15% of the energy used in industry are consumed for drying. For the hot-air drying of wheat, rice, and corn mixed-flow driers are worldwide increasingly used. The grain moisture content at the beginning of the drying process (at the dryer entrance) which is partly fluctuating considerably is still the major automation problem, as ever. Control systems used so far are unable to sufficiently reduce these fluctuations in the course of the drying process. That is why under-drying and over-drying often occur accompanied by fluctuations of the moisture content of the discharged grain. The consequences are quality losses due to thermal damages and the formation of mycotoxines in the grain store.

Therefore, the target of the project was to develop a model-based automation concept for the control of the moisture content of the dried grain which, in parallel, reduces the energy consumption and the dust load. The results can be applied to different types of mixed-flow driers and different kinds of grain.

1 Einleitung

In Deutschland wird auf über 58 % des Ackerlandes Getreide angebaut. Mehr als 61% der Getreideernte 2003 wurden als Futtergetreide verwendet; auf Nahrungsgetreide entfielen knapp 25% (BMVEL, 2004). Getreide ist daher gleichzeitig Hauptfrucht und Haupteinnahmequelle der Landwirte (HOFFMANN, 1998). Obwohl es das primäre Ziel der Erzeuger ist, Getreide trocken zu ernten, gelingt dies in Mitteleuropa im 10-Jahres-Durchschnitt nur zu etwa 60-70%, wobei erhebliche regionale Unterschiede und starke jährliche Schwankungen zu verzeichnen sind (BÖCKELMANN, 2003). In der Getreideproduktion ist überdies ein Wandel hin zu weniger Arten und Sorten zu verzeichnen, der weniger Erntetage zur Folge hat (PLESSE, 2004). Dazu kommt eine geringer werdende Anzahl größerer Mähdrescher mit erheblich gesteigerter Ernteleistung. Aus betriebswirtschaftlichen Gründen werden zukünftig moderne Großmähdrescher nebeneinander

liegende Flächen ernten, die noch nicht die erforderlichen Endfeuchtegehalte erreicht haben, so dass mehr Getreide getrocknet werden muss. Mit dem Inkrafttreten neuer EU-Verordnungen zur Lebensmittelsicherheit, der Lebensmittel-Basis-Verordnung (EU-VO 178/02, 2002) zum 01.01.2005 und der Futtermittelhygiene-Verordnung (EU-VO 183/05, 2005) zum 01.01.2006, wird der Sicherung der Getreidequalität sowie der Rückverfolgbarkeit immer mehr Aufmerksamkeit gewidmet.

Vor dem Hintergrund stark ansteigender Energiekosten fordern die Erzeuger von den Mähdrescher-Herstellern immer leistungsfähigere Druschtechnik, um bei günstiger Witterung noch mehr Getreide trocken ernten zu können. So betragen die jährlichen Ernteleistungssteigerungen der Mähdrescher im Durchschnitt der letzten Jahre ca. 0,5 t/h (BÖCKELMANN, 2003). Der erhöhten Druschkapazität muss eine vergleichbare Trocknerkapazität vorgehalten werden, um in feuchten Erntejahren eine verlustarme Konservierung zu ermöglichen. Die jährlichen Leistungssteigerungen bei Neuanlagen von Getreidetrocknern liegen gegenwärtig nur bei 0,2-0,3 t/h. Diese Differenz kann nur durch verbesserte Prozessführung und verfahrenstechnische Optimierung der Warmlufttrockner kompensiert werden. Auf diesen Gebieten besteht weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Dabei setzt sich der Trend zu noch leistungsfähigeren Warmlufttrocknern fort, wobei Ausführungen als Dächerschachttrockner dominieren (ECKL, 2004; MELLMANN und FÜRLL, 2006).

2 Problemstellung und Zielsetzung

Trocknungsprozesse sind stets sehr energieintensiv: in der Industrie werden bis zu 15 % der eingesetzten Energie für Verfahren der Trocknung verbraucht. Für die Warmlufttrocknung von Weizen, Reis und Mais werden weltweit zunehmend Dächerschachttrockner eingesetzt.

Die zum Teil erheblichen Schwankungen der Getreidefeuchte zu Beginn des Trocknungsprozesses am Einlass des Trockners (Trocknereintrag) stellen nach wie vor das größte regelungstechnische Problem dar. Bisherige Steuerungssysteme sind nicht in der Lage, diese Feuchteschwankungen im Laufe des Trocknungsprozesses ausreichend zu verringern.dessen kommt es häufig zur Unter- bzw. Übertrocknung begleitet von Schwankungen der Austrittsfeuchte. Qualitätseinbußen und Verkaufsverluste durch thermische Schädigungen oder die Bildung von Mykotoxinen im Getreidelager sind die Folgen. In den meisten Fällen wird jedoch bewusst übertrocknet, um sicher zu gehen, dass die mittlere Feuchte der gesamten Trockenware die Zielfeuchte von 14-15% unterschreitet. Legt man eine durchschnittliche Übertrocknung von 2% und einen Getreidetrockner mittlerer Kapazität zugrunde, ergibt sich daraus eine Senkung der jährlichen Trocknerleistung von mehreren hundert Tonnen Getreide. Die entsprechenden Verkaufsverluste und erhöhten Betriebskosten beziffern sich dann auf mehrere zehntausend Euro pro Jahr, so dass sich die Investition in eine innovative modellbasierte Regelung innerhalb weniger Jahre amortisieren würde.

Ziel des Vorhabens war deshalb, ein adaptives modellbasiertes Automatisierungskonzept zur Regelung der Trockengutfeuchte bei gleichzeitiger Reduzierung des Energieverbrauches und der Staubbelastung zu entwickeln, dessen Ergebnisse auf unterschiedliche Typen von Dächerschachttrocknern und andere Getreidearten übertragbar sind.

3 Stand von Wissenschaft und Technik

Der Stand der Technik zur Warmlufttrocknung von Getreide in Dächerschachttrocknern wird unter anderen in MELLMANN und FÜRLL (2003) und MELLMANN und FÜRLL (2006) analysiert.

3.1 Mathematische Modellierung von Getreide-Schachttrocknern

Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik sind in Fachbüchern wie dem Standardwerk von KRISCHER und KAST (1978) oder bei KNEULE (1975) und MALTRY (1975) dargelegt. Grundlegende Prinzipien der mathematischen Modellierung von Getreidetrocknungsprozessen werden von BROOKER *et al.,* (1992), JAYAS *et al.,* (1995) und PABIS *et al.,* (1998) beschrieben. Eine gute Übersicht über mathematische Modelle zur Körnertrocknung ist auch in ZIEGLER (1999) zu finden.

Erste Arbeiten zur experimentellen Untersuchung und Modellierung von Getreide-Dächerschachttrocknern gehen auf MALTRY (1966) und NELLIST (1974) zurück. KLINGER (1977) untersuchte den Einfluss unterschiedlicher Luftkanalformen („Dachformen“) auf die Luft- und Gutströmung. BRUCE (1984) sowie MILLER und WHITFIELD (1984) simulierten den Trocknungsprozess unter der Annahme, dass einzelne Getreideschichten von der Trocknungsluft alternierend im Gleich- und im Gegenstrom durchströmt werden. Der Kreuzstromanteil wurde vernachlässigt. KLEMMER (1989) präsentiert ein mathematisches Modell für den Wärme- und Stoffübergang in einem Dächerschachttrockner, das auf experimentell ermittelten Trocknungsgeschwindigkeiten basiert. Die Übereinstimmung berechneter Ergebnisse mit Messdaten ist allerdings nur befriedigend. CENKOWSKI *et al.* (1990) untersuchten die Strömungsverteilung der Trocknungsluft im Dächerschachttrockner. Diese wird mit Hilfe eines mathematischen Modells unter der Annahme einer ruhenden Schüttung berechnet. LIU und BAKKER-ARKEMA (1997) und BAKKER-ARKEMA und LIU (1997) leiten stochastische Modelle zur Berechnung der Einzelkornfeuchteverteilung in der Getreideschüttung eines Gleichstromtrockners (eindimensionales Modell) und eines Kreuzstromtrockners (zweidimensionales Modell) her. Wie die experimentelle Überprüfung ergab (LIU *et al.,* 1997), stimmen die Versuchsergebnisse mit berechneten Feuchteverteilungen gut überein. Ein zweidimensionales Modell für den stationär betriebenen Dächerschachttrockner wird von GINER *et al.,* (1998) vorgeschlagen. Zur Berechnung der Gut- und Luftströmungen wird der Zwischenraum zwischen den Zuluft- und Abluftkanälen in einzelne Abschnitte für Gleich-, Gegen- und Kreuzstrom unterteilt.

Durch Einbeziehung von Kreuzstromelementen konnte die Berechnung des intensiven Wärme- und Stoffüberganges in der Nähe der Luftkanäle deutlich verbessert werden. In neueren Veröffentlichungen werden überwiegend mathematische Modelle für Deep-bed Trockner und Cross-flow Trockner vorgestellt (z. B. MONTROSS und MAIER, 2000; SITOMPUL *et al.,* 2001; JIA *et al.,* 2002).

3.2 Modellbasierte Regelung

Grundlagen zur modellbasierten Regelung von Getreidetrocknern sind unter anderem in OLESEN (1982), BROOKER *et al.* (1992) sowie NELLIST und BRUCE (1995) zu finden. Für Feedforward- und Feedforward-Feedback Steuerungssysteme werden bisher bevorzugt einfache Modelle verwendet, die den Zusammenhang zwischen Input und Output des Trockners unter stationären Bedingungen beschreiben. Die modellbasierte Regelung erfordert hingegen komplexere mathematische Modelle, mit denen die Dynamik des Trocknungsprozesses berechenbar ist (NELLIST und BRUCE, 1995). Dabei kommen meist adaptive Regelungssysteme zur Anwendung. Diese verwenden Messdaten des Trockners und Rechenergebnisse des mathematischen Modells zur Bestimmung von Modellparametern. Auf diese Weise wird das Modell dem Trockner ständig angepasst. Die bisher entwickelten Systeme wurden jedoch meist erst im Labor- oder Technikumsmaßstab erprobt und konnten u.a. aufgrund fehlender zuverlässiger Messtechnik (insbesondere für die Getreidefeuchte) nicht in die Praxis überführt werden. In der großtechnischen Praxis betriebene modellbasierte Regelungssysteme sind bisher nicht bekannt. Aufgrund der rasanten Entwicklung der Rechentechnik und der Entwicklungsfortschritte in der Messtechnik gewinnt die modellbasierte Regelung jedoch zunehmend an Bedeutung. Dächerschachttrockner sind zudem durch extrem lange Totzeiten gekennzeichnet, deren Beherrschung mit herkömmlichen Mitteln der Regelungstechnik schwierig ist. Dies gelingt nur mit Hilfe einer modellbasierten Verfahrensführung, in der das komplexe dynamische Trocknerverhalten als mathematisches Modell hinterlegt ist.

Zur Automatisierung des Getreide-Trocknungsprozesses werden bislang überwiegend SPS-Steuerungen eingesetzt. Dabei wird meist die Ablufttemperatur als Regelgröße zur Steuerung der Gutfeuchte am Trockneraustrag verwendet (PABIS *et al.,* 1998). Als Stellgröße dient üblicherweise die Durchlaufgeschwindigkeit des Gutes, die durch Ansteuerung der Austragsvorrichtung eingestellt wird. Diese Art der Trocknerregelung ist Stand der Technik und wird in der überwiegenden Mehrzahl der im Betrieb befindlichen Durchlauftrockner angewendet. Aber auch einige Hersteller von Getreidetrocknungsanlagen setzen heute noch diese Regelung ein. Dank weiterer Fortschritte auf dem Messtechnikmarkt wird jedoch in neuerer Zeit zunehmend auf Gutfeuchtesensoren zur Inline-Messung und Regelung der Getreidefeuchte in Dächerschachttrocknern zurück gegriffen (DANTEC, 2005; LAXHUBER, 2005; RIELA 2005).

3.3 In-line-Getreidefeuchte-Messtechnik

Zur kontinuierlichen Online- oder Inline-Messung der Materialfeuchte von Schüttgütern in verfahrenstechnischen Prozessen werden überwiegend das NIR-Messverfahren, das kapazitive und das Mikrowellen-Messverfahren eingesetzt (FREUDENBERGER, 1989; THEISEN, 1995; HEINDL, 1998). Grundlagen zur Materialfeuchtemessung sind unter anderen in WEBER (1995) und KUPFER (1997) zu finden. Die Nah-Infrarot-Spektroskopie hat sich zur Online-Messung und Steuerung der Gutfeuchte beispielsweise in der Grünfuttertrocknung bewährt (GASTEIGER, 1992). Da mit diesem Messverfahren nur die Oberflächenfeuchte erfasst wird, ist es für die kontinuierliche Getreide-Feuchtemessung jedoch ungeeignet.

Die Fa. Riela nutzt zur Inline-Messung und Regelung der Getreidefeuchte in ihren Dächerschachttrocknern ein kapazitives Messverfahren (BÖCKELMANN, 2003; GRAMATTE und HÄUSER, 2004; RIELA GmbH, 2005), bei dem ein dachähnlicher Einbau als Anode ausgeführt ist und die Trocknersäule selbst als Kathode dient. Das Trocknungsgut bildet das Dielektrikum. Vorteile dieses Messverfahrens sind das große Messvolumen, welches sich über den gesamten Trocknerquerschnitt erstreckt und über das die Gutfeuchte gemittelt wird, sowie breite Feuchte- und Temperatur-Einsatzbereiche. Dadurch kann diese Messtechnik an beliebigen Positionen im Trockner eingesetzt werden. Nachteilig ist der große Aufwand für die Kalibrierung, die nur im eingebauten Zustand im Trockner für die verschiedenen Trocknungsgüter vorgenommen werden kann. Produktinhomogenitäten können nicht erfasst werden. Auch die Reproduzierbarkeit, Überprüfung und Wartung der Messtechnik sind als problematisch einzuschätzen.

Fa. Laxhuber verwendet in ihren Getreidetrocknern die Trocknersteuerung vom Typ stela FRA 450 auf Basis des Mikrowellen-Inline-Messsystems TRIME®-GW von der Fa. IMKO Micromodultechnik (LAXHUBER, 2001; LATEIN, 2003; Stela Laxhuber GmbH, 2005). Dieser Getreidefeuchtesensor beruht auf einem dielektrischen Messverfahren, bei dem die Laufzeiten von elektromagnetischen Impulsen zur Messung der Dielektizitätskonstanten und damit des Wassergehaltes bestimmt werden (IMKO GmbH, 2005). Der Vorteil dieser Messtechnik liegt in den weiten Einsatzbereichen für Gutfeuchtigkeit (5 bis 45 %) und Umgebungstemperatur (0 bis 127°C). Dadurch kann der Sensor theoretisch an beliebiger Position über der Trocknerhöhe eingesetzt werden. Nach GRAMATTE und NIETHAMMER (2000) können zuverlässige Messwerte jedoch nur bei gleich bleibenden Bedingungen wie Betriebszustand, Gutart und insbesondere Guttemperatur gewonnen werden. Während der Trocknung sind Schwankungen in der Gutfeuchte und Guttemperatur an ein und derselben Messstelle stets zu erwarten, wie beispielsweise am Trocknereintrag. Daher erscheint dieses Messgerät für den Einsatz in der Trocknerregelung nur beschränkt geeignet. Zudem besteht im Bereich des Trocknereintrags ein Feuchte-Messproblem für den TRIME-Sensor. Das eintretende erntefeuchte Getreide unterliegt starken Feuchteschwankungen. Die Gutfeuchte wiederum übt einen starken Enfluss auf die Schüttdichte aus, so dass die Schüttdichte des eingetragenen Gutstromes gleichfalls erheblichen Schwankungen ausgesetzt ist. Auch wenn der Sensor nach

Herstellerangaben im hohen Feuchtebereich ordnungsgemäß arbeitet, kann das angewendete Ein-Parameter-Messverfahren den Schüttdichteeinfluss nicht kompensieren. Nachteilig ist auch der Umstand, dass die Kalibrierung nur im eingebauten Zustand durchgeführt werden kann. Durch den Einsatz der Trocknersteuerung FRA 450 werden zwar Einsparungen durch Reduzierung der Untertrocknung erzielt (LATEIN, 2003). Die Schwankungen der Austrags-Gutfeuchte betragen nach Hestellerangaben jedoch immer noch bis zu ± 0,8 %, was für den Zweck der Getreidetrocknung zu groß ist.

Von der Fa. Tews Elektronik wird ein Mikrowellen-Feuchtemessverfahren angeboten, das bisher erfolgreich zur Steuerung verfahrenstechnischer Prozesse wie Mischen, Pressen, Befeuchten und Trocknen von Schüttgütern sowie zur Qualitätskontrolle eingesetzt wurde, wie z. B. bei Tabak oder Kaffee. Das physikalische Messprinzip basiert auf einem patentierten Mikrowellen-Resonanz-Verfahren, mit dem Feuchte und Dichte (Schüttdichte) des Gutes unabhängig voneinander gemessen werden können (HERRMANN und SIKORA, 1997; TEWS, 2005). Dies wird ermöglicht durch ein Zwei-Parameter-Messverfahren, bei dem sowohl Real- als auch Imaginärteil der Dielektrizitätskonstanten erfasst werden. Der Gutwassergehalt wird dabei über die Verstimmung und Dämpfung der Resonanzfrequenz des Resonators ermittelt. Die automatische Temperaturkompensation des Sensors erlaubt es, bei Temperaturen von etwa 0°C – 110°C (Umgebungstemperatur des Sensors) Messungen mit hoher Genauigkeit durchzuführen. Für den industriellen Einsatz ist der Sensor als Planarsensor ausgeführt und wird zur Gutfeuchtemessung beispielsweise in Apparatewänden (z. B. Schüttgutrinnen, Bunkerwände) installiert. Das Messverfahren wird auch im Laborbereich und als Schnellmessmethode verwendet (RIOU und HERRMANN, 1998). Bei Getreide und Getreideprodukten wird der Sensor bisher in den Feuchtebereichen von 0-15 % und >20 % angewendet. In diesen Feuchtebereichen werden lineare Abhängigkeiten zwischen den Mikrowellenwerten und den Feuchtewerten der Referenzmethode (Trockenschrank, DIN 10350) und damit hohe Messgenauigkeiten erreicht. Für einen Einsatz des Sensors im Gutfeuchtebereich zwischen 15 % und 20 % sind nach Herstellerangaben weitere Entwicklungsarbeiten notwendig.

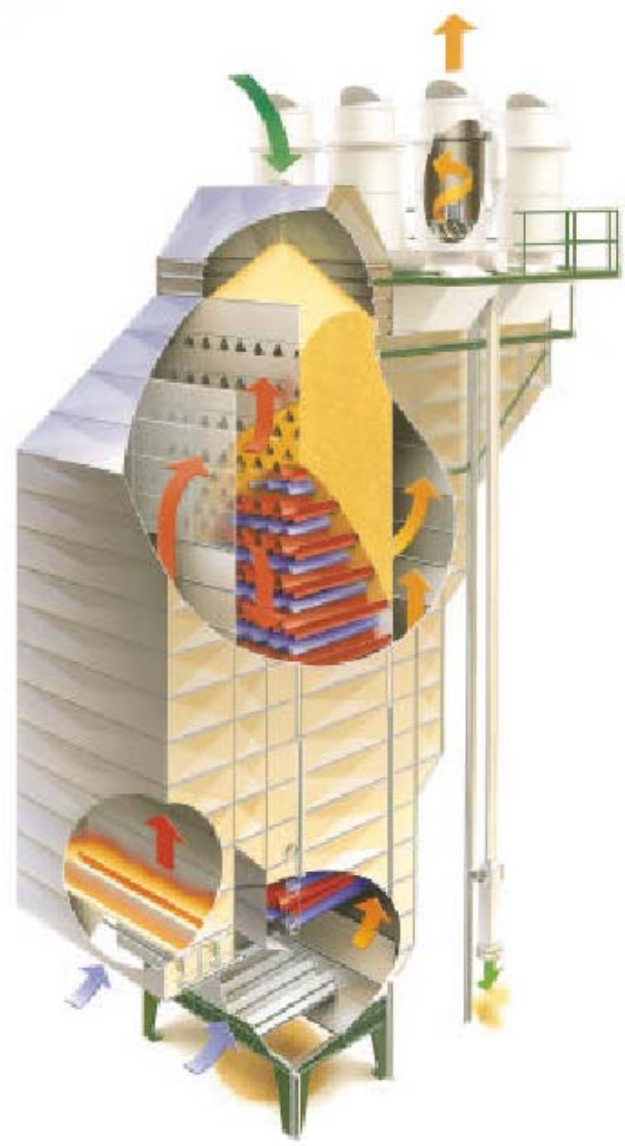
Über weitere Online-Gutfeuchtesensoren berichten unter anderen LAWRENCE et al. (2001), SPITZLEI (2002), KIM et al. (2003), Aco Automation (2005), DANTEC (2005), DÖSCHER & DÖSCHER (2005), Mütec Instruments (2005), NORVIDAN (2005).

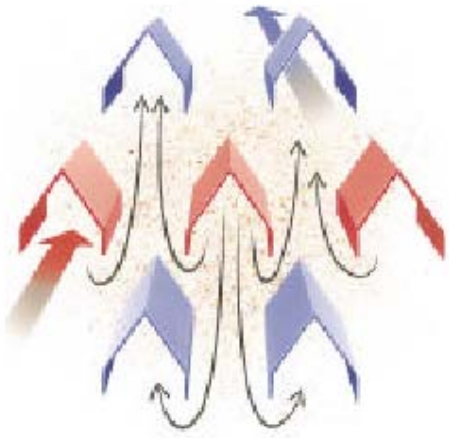
4 Mathematisches Modell für den Dächerschachttrockner

Bei der Warmlufttrocknung von Getreide in einem Dächerschachttrockner werden Trocknungsluftstrom und Gutstrom in einer Mischung aus Gleich-, Gegen- und Kreuzstrom durch den Trockner geführt, siehe **Bild 1**. Aufgrund der komplexen Strömungs-, Wärmeübergangs- und Stofftransportvorgänge ist für die Berechnung dieses Trocknungsprozesses ein mathematisches Modell für die gekoppelte Wärme- und Stoffübertragung zwischen Luft und Gut erforderlich.

Am Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim (ATB) wurde ein mathematisches Modell für die gekoppelte Wärme- und Stoffübertragung in Dächerschachttrocknern am Beispiel von Weizen entwickelt (EILERS, 2003; MELLMANN u.a., 2005). Dieses Modell besteht aus den Teilmodellen für den Wärme- und Stoffübergang im Einzelkorn (Dünnschicht-Modell), mit dem das einzelne Korn in bis zu zehn Schalen unterteilt werden kann, sowie in der Getreideschüttung (Schüttungsmodell). Die Differentialgleichungen für die Luftströmung und den Guttransport sind im Schüttungsmodell miteinander gekoppelt. Im vorliegenden Modellansatz wird die Gutbewegung durch den Trocknerschacht näherungsweise als plug-flow Strömung betrachtet.

Industriell betriebene Dächerschachttrockner arbeiten überwiegend im Satzbetrieb, das heißt, das Getreide wird diskontinuierlich (satzweise) ausgetragen. Das Gut befindet sich dadurch nahezu über die gesamte Trocknungszeit im Ruhezustand. Die Standzeit zwischen zwei Austrägen (Abspeisungen) variiert je nach Hersteller zwischen 3 und 5 Minuten. Die Austragszeit – die Zeitspanne, während der die Austrageinrichtung geöffnet ist – liegt in der Größenordnung von wenigen Sekunden. Auf diese Weise rutscht die Getreideschüttung bei jedem Austrag je nach eingestellter Abspeisemenge um einen bestimmten Betrag der Trocknerhöhe Δh nach unten. Entsprechend dem ausgetragenen Massenstrom muss der Trocknerschacht von oben ständig mit Feuchtgut befüllt werden. Trotz dieses Satzbetriebes kann von einer quasikontinuierlichen Fahrweise gesprochen werden.





a) Schema der Luftführung

b) Rapsplatten an den Abluftdächern

Bild 1: Moderner Dächerschachttrockner der Fa. Cimbria mit Linienbrennern als Heizquelle und senkrecht angeordneten Cyclofanen auf der Abluftseite (Quelle: www.cimbria.com)

Während der Standzeit wird der Trocknungsprozess als Ruheschichttrocknung modelliert, die Austragszeit wird vernachlässigt. Dazu wird die Getreideschüttung als Hintereinanderschaltung einzelner Kornschichten betrachtet. Hierbei wird jede Schicht mit Luft vom Austrittszustand der jeweils vorhergehenden Schicht durchströmt. Unter der Annahme, dass die einzelnen Körner einer Schicht sich bei der Trocknung nicht gegenseitig beeinflussen und alle das gleiche Trocknungsverhalten zeigen, reduziert sich das Problem der Durchströmungstrocknung auf zwei Teilprobleme (ZIEGLER, 1999):

Beschreibung des Trocknungsverhaltens einer einzelnen Schicht durch das eines einzelnen Kornes:

1. Beschreibung des Trocknungsverhaltens einer einzelnen Schicht durch das eines einzelnen Kornes.
2. Übergang auf die Trocknung der gesamten Schüttung durch Hintereinanderschaltung der Trocknungsvorgänge in den einzelnen Schichten.

4.1 Einzelkornmodell

Das Trocknungsverhalten einzelner Getreidekörner kann im Wesentlichen durch zwei Modellvorstellungen dargestellt werden (BROOKER et al., 1992): das kinetische Modell und das Diffusionsmodell. In diesem Zusammenhang wird zur Beschreibung des Trocknungsverhaltens einzelner Körner oder Schichten auch der Begriff „Dünnschichttrocknung“ (thin-layer-drying) verwendet. Der Unterschied zwischen beiden Modelltypen besteht darin, dass Diffusionsmodelle sowohl die inneren als auch die äußeren Transportwiderstände berücksichtigen, während kinetische Modelle die inneren vernachlässigen oder innere und äußere in einem gemeinsamen Koeffizienten zusammenfassen. Daher können nur mit dem Diffusionsmodell Feuchte- und Temperaturgradienten im Korninneren berechnet werden. Mit dem kinetischen Modell dagegen ist nur die zeitliche Änderung des mittleren Kornzustandes berechenbar. Zur Beschreibung des Trocknungsverhaltens eines Einzelkornes wird deshalb im Folgenden das *Diffusionsmodell* ausgewählt.

Die meisten Diffusionsmodelle basieren auf der allgemeinen Herleitung des Wärme- und Stofftransportes im Inneren kapillarporöser Güter nach LYKOW (1955), die auf ein System aus zwei partiellen Differenzialgleichungen für die Wärme- und Stoffübertragung an einem bestimmten Ort im Inneren des Einzelkörpers führt:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla^2 K_{11} X + \nabla^2 K_{12} \vartheta_G \tag{1a}$$

und

$$\frac{\partial \vartheta_G}{\partial t} = \nabla^2 K_{21} X + \nabla^2 K_{22} \vartheta_G \quad . \tag{1b}$$

Die Koeffizienten K_{ij} mit gleichen Indizes werden als Transportkoeffizienten, diejenigen mit unterschiedlichen Indizes als Kopplungskoeffizienten bezeichnet. Das Gleichungssystem (1) gilt unter folgenden vereinfachenden Annahmen:

- Das Volumen des Körpers bleibt während der Trocknung konstant.
- Der Körper bildet ein Vier-Phasen-System aus kapillarporösem Feststoff, Luft, Wasser und Wasserdampf.
- Wasser und Wasserdampf im Körperinneren stehen im Gleichgewicht.
- Innere Verdunstung wird vernachlässigt.
- Der Wärmetransport erfolgt durch Leitung; massegebundener Energietransport und Wärmetransport durch Konvektion werden vernachlässigt.

Nach HUSAIN et al. (1972) dürfen unter den bei der Getreidetrocknung herrschenden Temperatur- und Dampfdruckverhältnissen die Kopplungseffekte (Thermodiffusion nach LYKOW) vernachlässigt werden. Dadurch vereinfachen sich Gleichungen (1a) und (1b) zu

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla^2 K_{11} X \qquad (2a)$$

und

$$\frac{\partial \vartheta_G}{\partial t} = \nabla^2 K_{22} \vartheta_G \quad . \qquad (2b)$$

Die Koeffizienten K_{11} und K_{22} entsprechen der Feuchteleitfähigkeit κ_G bzw. der Temperaturleitfähigkeit a_G des Gutes. Die Feuchteleitfähigkeit kann über die Sorptionsisotherme auch als effektiver Diffusionskoeffizient δ_G gedeutet werden. Bei landwirtschaftlichen Trocknungsgütern nimmt die Temperaturleitfähigkeit im allgemeinen sehr viel größere Werte an als die Feuchteleitfähigkeit ($a_G >> \kappa_G$), so dass die Lewis-Zahl des Gutes

$$Le_G = \frac{a_G}{\kappa_G} \quad \text{bzw.} \quad Le_G = \frac{a_G}{\delta_G} \qquad (3)$$

sehr viel größer als eins ist, insbesondere im hygroskopischen Bereich. Es darf deshalb vereinfachend voraus gesetzt werden, dass das einzelne Korn während der Trocknung

rasch die Lufttemperatur annimmt und Temperaturgradienten im Inneren des Gutes vernachlässigbar sind. Das Gleichungssystem (2) von LYKOW reduziert sich damit auf eine Diffusionsgleichung

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla^2 \delta_G X \quad , \tag{4}$$

die im allgemeinen nur numerisch lösbar ist. Der effektive Diffusionskoeffizient δ_G stellt eine komplexe Größe dar, die verschiedene und sich einander überlagernde Transportarten zusammenfasst. Selbst bei konstanten Randbedingungen ist eine analytische Lösung der Differenzialgleichung (4) nur bei konstantem Koeffizienten möglich. Nach Einführung des Laplace-Operators für die Kugelgeometrie folgt aus Gleichung (4) für δ_G = konst. (PABIS et al., 1998)

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \delta_G \cdot \left(\frac{\partial^2 X}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial X}{\partial r} \right) \qquad \text{mit} \quad X = X(t,r) \qquad 0 \le r \le R. \tag{5}$$

Die Anfangsbedingung zur Lösung dieser Differenzialgleichung

$$X(0,r) = X_0 \quad . \tag{6}$$

bedeutet, dass zum Zeitpunkt t = 0 das gesamte Korn die Anfangsfeuchte X_0 besitzt, und die Randbedingung 1. Art lautet

$$X(t,R) = X^* \qquad \text{für} \quad t > 0. \tag{7}$$

Eine vollständige analytische Lösung für die zeitliche Änderung des mittleren Wassergehaltes $\overline{X}(t)$ wird z. B. von CRANK (1975) angegeben

$$\frac{\overline{X}(t) - X^*}{X_0 - X^*} = \frac{6}{\pi^2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(- \frac{n^2 \pi^2 \delta_G t}{R^2} \right) \quad . \tag{8}$$

Da die einzelnen Glieder der Reihe sehr schnell konvergieren, lässt sich Gleichung (8) vereinfachen zu

$$\frac{\overline{X}(t) - X^*}{X_0 - X^*} = \frac{6}{\pi^2} \cdot \exp\left(- \frac{\pi^2 \delta_G t}{R^2} \right) \quad . \tag{9}$$

Das als Kugel betrachtete Einzelkorn wird im vorliegenden Modell in bis zu 10 Schalen konstanter Dicke unterteilt (N ≤ 10). Für das Zehl-Schalen-Modell (**Bild 2**) ergibt sich mit N = 10 die Dicke einer einzelnen Kugelschale zu

$$\Delta r = \frac{R}{10} = \frac{d_K}{20} \quad . \tag{10}$$

Der Kern j = 1 (innere „Kugelschale“) hat die Form einer Kugel mit dem Durchmesser 2·∆r. Alle weiteren Schalen j = 2,N sind Kugelschalen der Dicke ∆r.

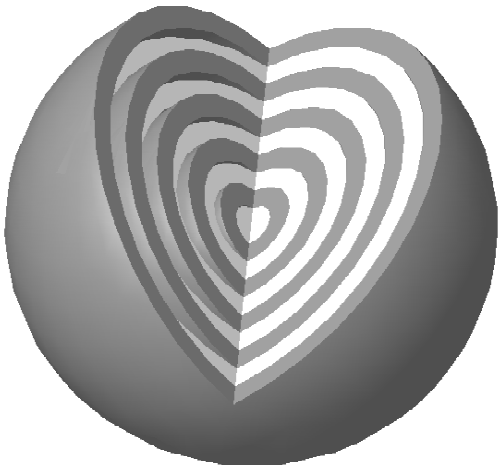


Bild 2: Schema des Einzelkornmodells für N = 10 Kugelschalen konstanter Dicke ∆r = R/10.

Nachfolgend werden Gleichungen zur Berechnung der Gutfeuchten der einzelnen Schalen $X_{i,j}$ für einen Zeitschritt $\Delta t = t_{i+1} - t_i$ angegeben. Dabei ist i die Laufvariable für die Zeit t, der Index j kennzeichnet die Laufvariable für den Radius mit 0 ≤ r ≤ R.

Nach MEIERING (1971) ergibt sich die Gutfeuchte für den Kern j = 1 aus Gleichung (5) mit r = 0 für den Zeitpunkt t_{i+1} zu

$$X_{i+1,j} = \frac{(\Delta r)^2 \cdot X_{i,j} + 6 \cdot \delta_{G,i,j} \cdot X_{i,j+1} \cdot \Delta t}{(\Delta r)^2 + 6 \cdot \delta_{G,i,j} \cdot \Delta t} \quad . \tag{11}$$

Für die benachbarte Kugelschale j = 2 berechnet sich die Gutfeuchte zu

$$X_{i+1,j} = \frac{\left[(\Delta r)^2 - \delta_{G,i,j} \cdot \Delta t\right] \cdot X_{i,j} + \delta_{G,i,j} \cdot \Delta t \cdot \frac{2}{1} \cdot X_{i,j+1}}{(\Delta r)^2 + \delta_{G,i,j} \cdot \Delta t} \quad . \tag{12}$$

Für alle weiteren Schalen j = 3, N gilt die Beziehung

$$X_{i+1,j} = \frac{\left[(\Delta r)^2 - \delta_{G,i,j} \cdot \Delta t\right] \cdot X_{i,j} + \delta_{G,i,j} \cdot \Delta t \cdot \left(\frac{j+1}{j} \cdot X_{i,j+1} + \frac{j-1}{j} \cdot X_{i,j-1} \right)}{(\Delta r)^2 + \delta_{G,i,j} \cdot \Delta t} \quad . \tag{13}$$

Der effektive Diffusionskoeffizient δ_G ist ein Funktion der Gutfeuchte und der Guttemperatur. Aufgrund der Annnahme einer konstanten Guttemperatur im Einzelkorn wird dessen Temperaturabhängigkeit vernachlässigt. Nach MEIERING (1971) gilt für Weizen folgende lineare Beziehung

$$\delta_G \left[\frac{m^2}{s} \right] = 1{,}667 \cdot 10^{-11} + 8{,}333 \cdot 10^{-12} \cdot X \quad , \tag{14}$$

die hier Anwendung findet. Weitere empirische Gleichungen für den effektiven Diffusionskoeffizienten werden unter anderen von DIETL (1995) und PABIS et al. (1998) angegeben.

Die mittlere Gutfeuchte des Einzelkorns $\overline{X}_{i+1}$ nach Ablauf des Zeitschrittes Δt wird aus den Gutfeuchten der zehn einzelnen Kugelschalen entsprechend deren Volumenanteilen ermittelt. Aus der Änderung der mittleren Gutfeuchte des Kornes

$$\Delta\overline{X} = \overline{X}_{i+1} - \overline{X}_i \tag{15}$$

über der Zeit Δt ergibt sich die Trocknungsgeschwindigkeit des Einzelkorns zu

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\Delta \overline{X}}{\Delta t} \quad . \tag{16}$$

Die Trocknungsgeschwindigkeit des Einzelkorns und damit der einzelnen Schicht geht in das nachfolgend beschriebene Schüttungsmodell ein.

4.2 Schüttungsmodell

Die Wärme- und Stoffübertragung zwischen Luft und Gut sowie die Energie- und Massenbilanz um ein Volumenelement der Schüttung sind schematisch im **Bild 3** dargestellt. Unter den Voraussetzungen, dass das Getreide über dem gesamten Trocknerquerschnitt aufgrund der Schwerkraft gleichmäßig nach unten transportiert und die Luft im Gegenstrom geführt wird, wird eine eindimensionale Betrachtungsweise gewählt. Dem Modell liegen folgende vereinfachende Annahmen zugrunde.

Vereinfachende Modellannahmen:

1. Eindimensionale Betrachtungsweise (in axialer Richtung).
2. Die einzelnen Körner sind homogen und von kugelförmiger Gestalt.
3. Die Schüttung ist homogen, die Porosität ist überall gleich groß.
4. Gut und Luft bewegen sich in Kolbenströmung. Randgängigkeiten werden vernachlässigt.
5. Volumenänderungen der Schüttung während der Trocknung sind vernachlässigbar gering.

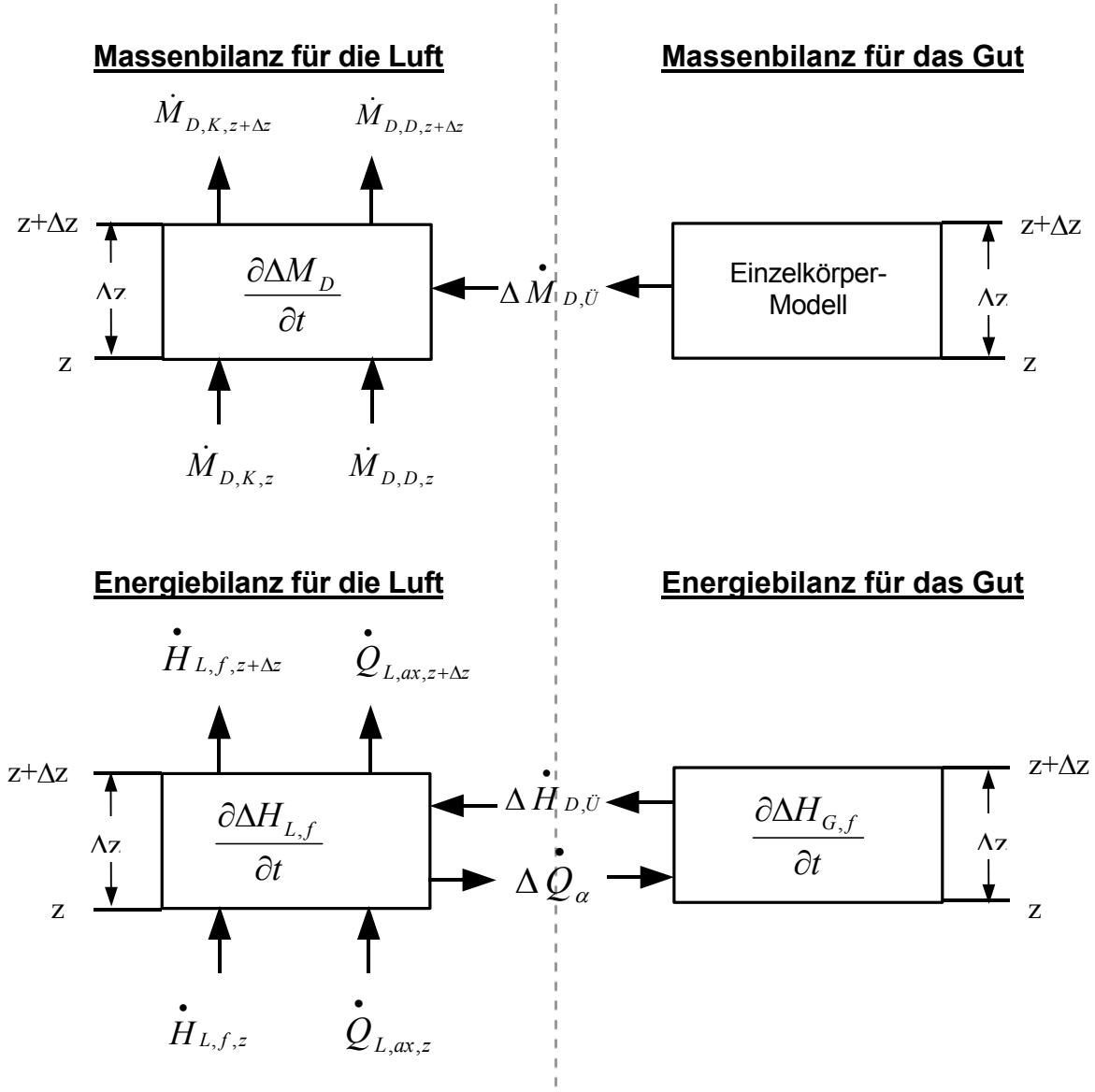


Bild 3: Schüttungsmodell: Wärme- und Stofftransport zwischen Luft und Gut sowie Energie- und Massenbilanz um ein Volumenelement der Schüttung

6. Der Zusammenhang zwischen der Luftfeuchte bei einer bestimmten Temperatur und der dazugehörigen Gleichgewichtsfeuchte des Gutes lässt sich mit Hilfe von Sorptionsisothermen beschreiben.
7. Wärmetransport quer zur Richtung der Luftströmung (radial) kann bei ausreichend wärmegedämmten Trocknerwänden vernachlässigt werden (Annahme adiabater Wände).
8. Zur Berechnung der Zustandsgrößen der Luft kann von einem konstanten Gesamtdruck ausgegangen werden, da dieser sehr viel größer ist als die Strömungsdruckverluste in der Schüttung.
9. Die axiale Dispersion des Wasserdampfes $\dot{M}_{D,D}$ und die axiale Wärmeleitung $\dot{Q}_{L,ax}$ im Lückenvolumen der Schüttung können bei den in Warmlufttrocknern vorherrschenden Strömungsgeschwindigkeiten gegenüber den konvektiven

Transportmechanismen vernachlässigt werden. Die Wärmeleitung zwischen den Körnern über Partikelkontakte wird vernachlässigt.

10. Der Stoffübergangswiderstand in der Grenzschicht der Einzelkörperoberfläche kann gegenüber dem Stofftransportwiderstand im Korninneren vernachlässigt werden. Das heißt, der Stofftransport innerhalb der Körner ist der geschwindigkeitsbestimmende Teilprozess der Getreidetrocknung.
11. Das Verhältnis der Temperaturleitfähigkeit des Gutes zum Diffusionskoeffizienten bzw. zur Feuchteleitfähigkeit im Korninneren (Lewis-Zahl) nimmt insbesondere im hygroskopischen Bereich sehr große Werte an, so dass Temperaturgradienten im Korninneren vernachlässigbar gering sind.
12. Sämtliche Stoffeigenschaften von Luft und Gut sind während eines Berechnungsschrittes der numerischen Lösung konstant.

Im Übrigen gelten die aus der Thermodynamik der feuchten Luft bekannten Beziehungen.

Massenbilanz für den luftgetragenen Wasserdampf

Die Massenbilanz für den von der Luftströmung transportierten Wasserdampf berechnet sich zu (siehe **Bild 3**)

$$\frac{\partial \Delta M_D}{\partial t} = -\frac{\partial \dot{M}_{D,K}}{\partial z} \cdot \Delta z + \frac{\partial \dot{M}_{D,D}}{\partial z} \cdot \Delta z + \Delta \dot{M}_{D,Ü} \quad . \tag{17}$$

Gleichung (17) beschreibt die zeitliche Änderung der im Lückenvolumen des Schütgutelementes enthaltenen Dampfmasse. Diese ist abhängig von dem konvektiven, dem diffusiven und dem von den Körnern übergehenden Dampfstrom. Die im Lückenvolumen des Schüttgutelementes enthaltene Dampfmasse ergibt sich zu

$$\Delta M_D = \psi \cdot \rho_{L,tr} \cdot Y \cdot \Delta V \tag{18}$$

mit $\Delta V = A \cdot \Delta z$. Bei konstanter Porosität, konstanter Dichte der trockenen Luft und konstantem Volumen folgt für deren Änderungsgeschwindigkeit

$$\frac{\partial \Delta M_D}{\partial t} = \psi \cdot \rho_{L,tr} \cdot \frac{\partial Y}{\partial t} \cdot \Delta V \quad . \tag{19}$$

Aufgrund der Luftströmung wird konvektiv der Wasserdampfstrom

$$\dot{M}_{D,K} = w_0 \cdot \rho_{L,tr} \cdot Y \cdot A \tag{20}$$

durch den Strömungsquerschnitt A transportiert. Der örtliche Gradient dieses Dampfstromes berechnet sich zu

$$\frac{\partial \dot{M}_{D,K}}{\partial z} = w_0 \cdot \rho_{L,tr} \cdot \frac{\partial Y}{\partial z} \cdot A \quad . \tag{21}$$

Infolge axialer Diffusion von Wasserdampf in der Luftströmung wird der Dampfstrom

$$\dot{M}_{D,D} = \delta_{ax} \cdot \rho_{L,tr} \cdot \frac{\partial Y}{\partial z} \cdot A \tag{22}$$

hervor gerufen, dessen Gradient sich ergibt zu

$$\frac{\partial \dot{M}_{D,D}}{\partial z} = \delta_{ax} \cdot \rho_{L,tr} \cdot \frac{\partial^2 Y}{\partial z^2} \cdot A \quad . \tag{23}$$

Der innerhalb des Volumenelementes der Schüttung vom Gut an die Luft übertragene Dampfstrom lässt sich berechnen aus

$$\Delta \dot{M}_{D,\ddot{U}} = -(1-\psi) \cdot \rho_{G,TS} \cdot \frac{\partial X}{\partial t} \cdot \Delta V \quad . \tag{24}$$

Nach Einsetzen von (19), (21), (23) und (24) in Gleichung (17) und Umformen ergibt sich die Massenbilanz des Wasserdampfes zu

$$\psi \cdot \rho_{L,tr} \cdot \frac{\partial Y}{\partial t} = -w_0 \cdot \rho_{L,tr} \frac{\partial Y}{\partial z} + \delta_{ax} \cdot \rho_{L,tr} \cdot \frac{\partial^2 Y}{\partial z^2} - (1-\psi) \cdot \rho_{G,TS} \cdot \frac{\partial X}{\partial t} \quad . \tag{25}$$

Wie aus Gleichung (25) ersichtlich ist, kann der Diffusionsterm aufgrund der zweiten Ableitung des Dampfgehaltes der Luft nach dem Weg $\partial^2 Y / \partial z^2$ gegenüber den anderen Termen vernachlässigt werden, wodurch Annahme 9. rechnerisch bestätigt wird.

Energiebilanz für die feuchte Luft

Die zeitliche Änderung der Luftenthalpie im betrachteten Volumenelement ergibt sich aus der Bilanz der ein- und austretenden Energieströme (**Bild 3**) zu

$$\frac{\partial \Delta H_{L,f}}{\partial t} = -\frac{\partial \dot{H}_{L,f}}{\partial z} \cdot \Delta z - \Delta \dot{Q}_{\alpha} + \Delta \dot{H}_{D,\ddot{U}} \quad . \tag{26}$$

Diese setzt sich additiv zusammen aus dem Enthalpiestrom der feuchten Luft, dem von der Luft an das Gut übertragenen Wärmestrom und dem Enthalpiestrom des vom Gut an die Luft übergehenden Wasserdampfes.

Die Enthalpie der feuchten Luft im Lückenvolumen des Schüttgutelementes berechnet sich zu

$$\Delta H_{L,f} = \psi \cdot \rho_{L,tr} \cdot h_{L,f} \cdot \Delta V \quad . \tag{27}$$

Die spezifische Enthalpie der feuchten Luft $h_{L,f}$ wird berechnet nach der Beziehung

$$h_{L,f} = c_{p,L,tr} \cdot \vartheta_L + Y \cdot (r_0 + c_{p,D} \cdot \vartheta_L) \quad . \tag{28}$$

Die Gleichung zur Berechnung der zeitlichen Änderung der Enthalpie der feuchten Luft im betrachteten Volumenelement lautet damit

$$\frac{\partial \Delta H_{L,f}}{\partial t} = \psi \cdot \rho_{L,tr} \cdot \frac{\partial h_{L,f}}{\partial t} \cdot \Delta V \quad . \tag{29}$$

Der Enthalpiestrom der feuchten Luft ergibt sich aus dem Massenstrom der trockenen Luft multipliziert mit der spezifischen Enthalpie der feuchten Luft zu

$$\dot{H}_{L,f} = w_0 \cdot \rho_{L,tr} \cdot h_{L,f} \cdot A \quad . \tag{30}$$

Der Gradient dieses Enthalpiestroms in Strömungsrichtung berechnet sich damit zu

$$\frac{\partial \dot{H}_{L,f}}{\partial z} = w_0 \cdot \rho_{L,tr} \cdot \frac{\partial h_{L,f}}{\partial z} \cdot A \quad . \tag{31}$$

Der konvektive Wärmestrom Luft – Gut wird nach dem Ansatz von Newton

$$\Delta \dot{Q}_\alpha = \alpha \cdot A_V \cdot (\vartheta_L - \vartheta_G) \cdot \Delta V \tag{32}$$

berechnet. Zur Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten α werden die bekannten Kennzahlen für den Wärmeübergang in durchströmten Schüttungen nach dem VDI-Wärmeatlas (VDI-GVC, 2002) angewendet. Der Term A_V charakterisiert die volumetrische Austauschfläche für eine homogene monodisperse Schüttung

$$A_V = \frac{6 \cdot (1 - \psi)}{d_K} \tag{33}$$

mit der Dimension [m^2/m^3]. Es wird angenommen, dass die gesamte Oberfläche des Partikelkollektivs am Wärme- und Stoffaustausch in der Schüttung beteiligt ist. Gegenseitig durch Partikelkontakte verdeckte Oberflächen werden vernachlässigt.

Der vom Gut an die Luft übergehende Dampfstrom $\Delta \dot{M}_{D,Ü}$ bewirkt den Enthalpiestrom

$$\Delta \dot{H}_{D,Ü} = -(1 - \psi) \cdot \rho_{G,TS} \cdot h_D(\vartheta_G) \cdot \frac{\partial X}{\partial t} \cdot \Delta V \quad . \tag{34}$$

Die spezifische Enthalpie des Wasserdampfes

$$h_D(\vartheta_G) = r_0 + c_{p,D} \cdot \vartheta_G \tag{35}$$

muss auf die Guttemperatur ϑ_G bezogen werden, da die Verdunstung definitionsgemäß an der Partikeloberfläche stattfindet und der Wasserdampf mit dieser Temperatur an die Luft abgegeben wird.

Nach Einsetzen von (29), (31), (32) und (34) in Gleichung (26) und Umformen ergibt sich die Energiebilanz der feuchten Luft um das betrachtete Volumenelement der Schüttung zu

$$\psi \cdot \rho_{L,tr} \cdot \frac{\partial h_{L,f}}{\partial t} = -w_0 \cdot \rho_{L,tr} \cdot \frac{\partial h_{L,f}}{\partial z} - \alpha \cdot A_V \cdot (\vartheta_L - \vartheta_G) - (1-\psi) \cdot \rho_{G,TS} \cdot h_D(\vartheta_G) \cdot \frac{\partial X}{\partial t} \quad . \quad (36)$$

Massenbilanz für das feuchte Trocknungsgut

Während der Trocknung wird der dampfförmige Wassermassenstrom $\Delta\dot{M}_{D,Ü}$ vom Gut an die Luft längs des Weges Δz übertragen, der nach der bereits angegebenen Gleichung (24) berechnet wird zu

$$\Delta\dot{M}_{D,Ü} = -(1-\psi) \cdot \rho_{G,TS} \cdot \frac{\partial X}{\partial t} \cdot \Delta V \quad . \quad (37)$$

Über die Trocknungsgeschwindigkeit $\partial X / \partial t$ wird an dieser Stelle die Kopplung des Schüttungsmodells mit dem Einkornmodell vollzogen.

Energiebilanz für das feuchte Trocknungsgut

Aus der Bilanz der ein- und austretenden Energieströme um das betrachtete Schüttgutelement folgt nach **Bild 3** die Gleichung für die zeitliche Änderung der Enthalpie des feuchten Gutes

$$\frac{\partial \Delta H_{G,f}}{\partial t} = \Delta\dot{Q}_\alpha - \Delta\dot{H}_{D,Ü} \quad . \quad (38)$$

Die Enthalpie des feuchten Trocknungsgutes in dem Volumenelement ergibt sich aus der Masse der Trockensubstanz multipliziert mit der spezifischen Enthalpie des feuchten Trocknungsgutes zu

$$\Delta H_{G,f} = (1-\psi) \cdot \rho_{G,TS} \cdot h_{G,f} \cdot \Delta V \quad . \quad (39)$$

Die spezifische Enthalpie des feuchten Trocknungsgutes berechnet sich zu

$$h_{G,f} = c_{G,TS} \cdot \vartheta_G + X \cdot c_{p,W} \cdot \vartheta_G + R_b \quad . \tag{40}$$

wobei R_b die spezifische Bindungswärme der Feuchte im Trocknungsgut charakterisiert. Die zeitliche Änderung der Enthalpie des feuchten Trockengutes lässt sich damit beschrieben durch

$$\frac{\partial \Delta H_{G,f}}{\partial t} = (1-\psi) \cdot \rho_{G,TS} \cdot \frac{\partial h_{G,f}}{\partial t} \cdot \Delta V \quad . \tag{41}$$

Mit Gleichungen (32), (34) und (41) folgt aus Gleichung (38) die Energiebilanz für das feuchte Trocknungsgut

$$(1-\psi) \cdot \rho_{G,TS} \cdot \frac{\partial h_{G,f}}{\partial t} = \alpha \cdot A_V \cdot (\vartheta_L - \vartheta_G) + (1-\psi) \cdot \rho_{G,TS} \cdot h_D(\vartheta_G) \cdot \frac{\partial X}{\partial t} \quad . \tag{42}$$

Das Schüttungsmodell und das Einzelkornmodell sind über die Trocknungsgeschwindigkeit dX/dt des Einzelkorns bzw. der einzelnen Schicht miteinander gekoppelt. Das Differenzialgleichungssystem, bestehend aus den Gleichungen (16), (25), (36) und (42) wurde mit Hilfe eines Differenzenverfahrens numerisch gelöst (EILERS, 2003; MELLMANN u.a., 2005).

5 Experimentelle Untersuchungen

5.1 Laborversuche zur Dünnschichttrocknung

Zur Ermittlung des Trocknungsverhaltens einzelner Kornschichten und des effektiven Diffusionskoeffizienten für das Einzelkornmodell nach Abschnitt 4.1 wurden Dünnschicht-Trocknungsversuche an einem Laborttrockner durchgeführt (JORDANOV, 2005). Als Versuchsgüter kamen unterschiedliche Partien naturfeuchten Weizens mit Gutfeuchten zwischen 15 und 19% zum Einsatz. Von diesen Weizenpartien wurden Proben von jeweils 1000 Körnern verwendet. Der Aufbau des Labortrockners ist aus **Bild 4** ersichtlich.

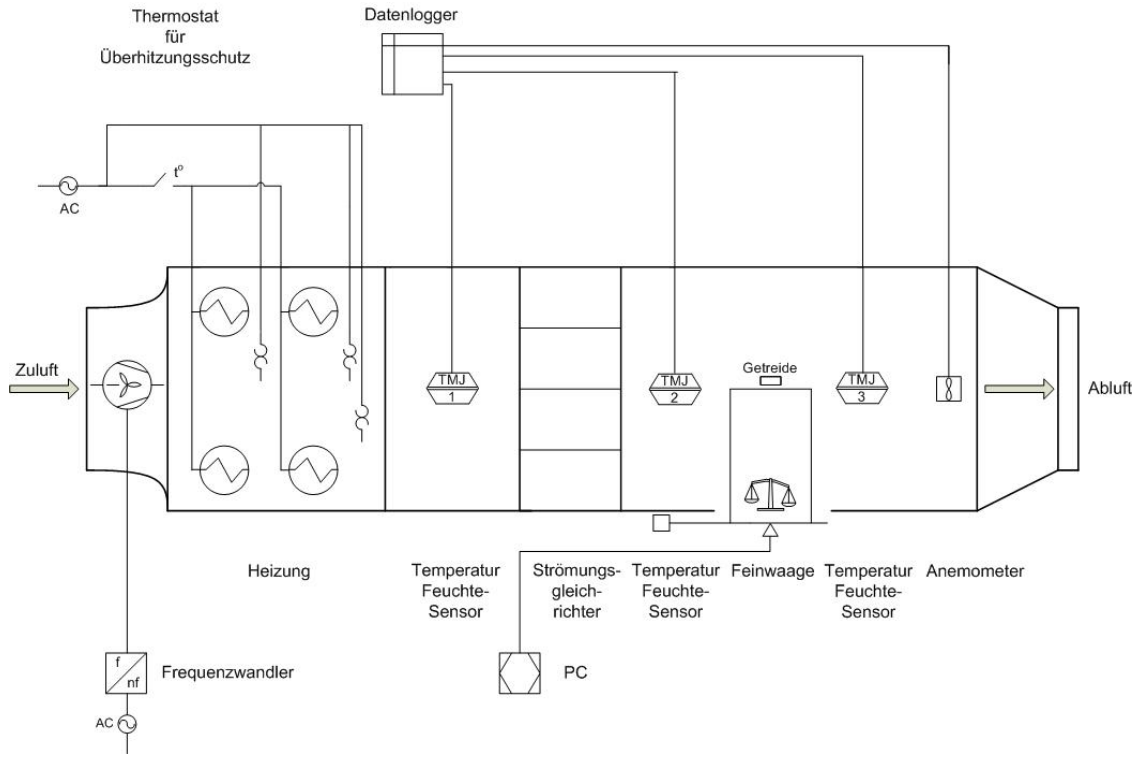


Bild 4: Schema der Laboranlage zur Dünnschichttrocknung

Der Labortrockner besteht aus einem horizontal angeordneten Trocknungskanal mit quadratischem Querschnitt. Das vordere beheizte Segment (ca. 1/3 der Länge) ist aus Stahlblech. Das übrige Trocknersegment besteht aus transparentem Plexiglas, um den Trocknungsvorgang beobachten zu können. Am Lufteintritt ist ein frequenzgesteuerter Axialventilator installiert. Dieser fördert die Zuluft durch das Heizsegment, das mit einzelnen elektrischen Heizelementen bestückt ist, und anschließend durch einen Strömungsgleichrichter. Hinter dem Strömungsgleichrichter befindet der Trocknungsrost zur Aufnahme der 1000-Korn-Probe. Dieser besteht aus einem rechteckigen Rahmen aus dünnem Metalldraht, der mit einer Plastegaze bespannt ist und von einem Drahtgestell getragen ist. Der Trocknungsrost wird nach der Befüllung mit dem Trocknungsgut in

horizontaler Lage auf einer Präzisionswaage positioniert. Am Ende des Trocknungskanals befindet sich der Abluftaustritt.

Mit der Präzisionswaage wird kontinuierlich die Massenabnahme der Getreideprobe über der Trocknungszeit ermittelt. Die Luftzustände (Temperatur, relative Luftfeuchte) vor dem Strömungsgleichrichter sowie vor und nach dem Trocknungsrost werden mit Hilfe von Kombinations-Messfühlern bestimmt. Die Messstelle für die Luftgeschwindigkeit befindet sich in Strömungsrichtung hinter dem Trocknungsrost in einem Bereich ungestörter Strömung. Zusätzlich werden der Zustand der Umgebungsluft und der atmospärische Luftdruck gemessen. Sämtliche Messgrößen werden von einem Computer erfasst.

Tabelle1: Versuche zur Dünnschichttrocknung von Weizen (1000-Korn-Versuche)

Versuch Nr.	Versuchsbedingungen		
	Anfangs-Gutfeuchte	Lufttemperatur	Luftgeschwindigkeit
	F_0 [%]	ϑ_L [°C]	w [m/s]
1 - 3	15,6	45	0,3; 0,4; 0,5
4 - 6	15,6	50	0,3; 0,4; 0,5
7 - 9	15,6	55	0,3; 0,4; 0,5
10 - 12	18,0	45	0,3; 0,4; 0,5
13 - 15	18,0	50	0,3; 0,4; 0,5
16 - 18	18,0	55	0,3; 0,4; 0,5
19 - 21	19,0	45	0,3; 0,4; 0,5
22 - 24	19,0	50	0,3; 0,4; 0,5
25 - 27	19,0	55	0,3; 0,4; 0,5

Insgesamt wurden 27 Dünnschicht-Trocknungsversuche mit naturfeuchtem Weizen durchgeführt, siehe **Tabelle 1**. Zur Variation der Anfangs-Gutfeuchte wurden Weizenpartien mit 15,6%, 18,0% und 19,0% Feuchte verwendet. Da in dem Trockner eine maximale Temperatur von nur etwa 55 °C einstellbar war, wurde die Lufttemperatur in diesem unteren, für die Warmlufttrocknung noch sinnvollen Bereich zwischen 45°C und 55°C in drei Schritten variiert. Die Strömungsgeschwindigkeit der Trocknungsluft ist in Abstufungen von 0,1 m/s zwischen 0,3 m/s und 0,5 m/s verändert worden.

Bild 5 zeigt beispielhaft den gemessenen Trocknungsverlauf einer 1000-Korn-Probe von naturfeuchtem Weizen mit 19 % Anfangsfeuchte für Versuch 27. Wie die Grafik verdeutlicht, wird unter den eingestellten Versuchsbedingungen (Lufttemperatur 55°C,

relative Luftfeuchte 6%, Luftgeschwindigkeit 0,5 m/s) bereits nach einer Trocknungsdauer von etwa 40 Minuten die Zielfeuchte der Getreidetrocknung von 14% (X = 0,163 kg H_2O/kg TS) erreicht. **Bild 6** veranschaulicht den entsprechenden Verlauf der Trocknungsgeschwindigkeit $\Delta X/\Delta t$ in Abhängigkeit vom Gutwassergehalt X für diesen Versuch. Zu erkennen ist ein kurzer 1. Trocknungsanschnitt, der durch eine konstante Trocknungsgeschwindigkeit gekennzeichnet ist. Dieser wurde erreicht durch leichtes Befeuchten der Probe unmittelbar vor Beginn des Versuches mit dem Ziel, den Übergang vom ersten zum zweiten Trocknungsabschnitt zu erfassen.

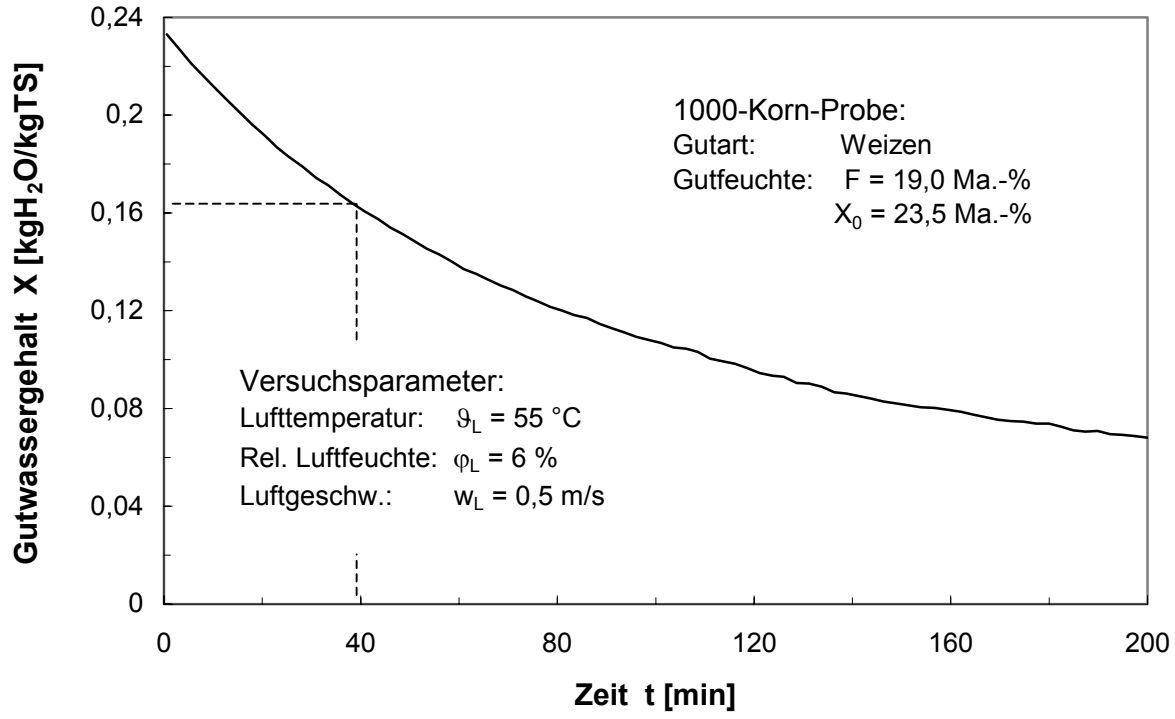


Bild 5: Trocknungsverlauf einer 1000-Korn-Probe von naturfeuchtem Weizen

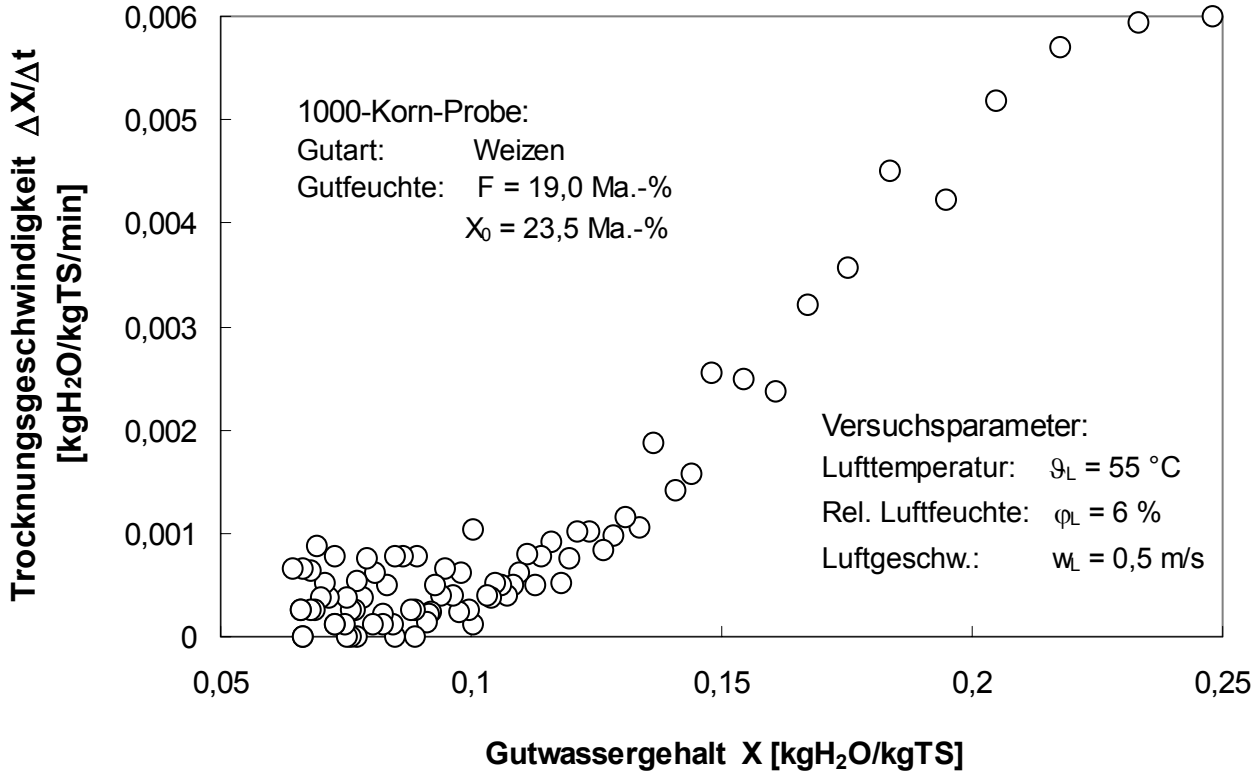


Bild 6: Trocknungsgeschwindigkeit einer 1000-Korn-Probe von naturfeuchtem Weizen als Funktion des Gutwassergehaltes

Zur Ermittlung des effektiven Diffusionskoeffizienten δ_G aus den Experimenten wurde der Ansatz von CRANK (1975) gemäß Gleichung (9) verwendet. Dabei zeigte sich, dass die Ergebnisse mit der von MEIERING (1971) angegebenen empirischen Beziehung, siehe Gleichung (14), mit ausreichender Genauigkeit dargestellt werden können.

5.2 Trocknungsversuche am Dächerschachttrockner des ATB

Zur experimentellen Überprüfung des mathematischen Modells für den Getreide-Schachttrockner nach Kapitel 4. wurden praxisnahe Durchlauf-Trocknungsversuche durchgeführt. Hierzu wurde am ATB eine halbtechnische Dächerschachttrockner-Versuchsanlage aufgebaut (JOST, 2002). Für die Abspeisung des Trockengutes aus dem Trockner wurde eine pneumatisch betriebene Austrageinrichtung entwickelt, mit der in Anlehnung an die großtechnische Praxis ein diskontinuierlicher, satzweiser Betrieb möglich ist (MELLMANN u.a., 2004). Mit diesem System wird ein gleichmäßiger Schüttgutstrom über dem Austragsquerschnitt erzielt. In der Ernteperiode 2004 wurde die Anlage in Betrieb genommen (MELLMANN u.a., 2005b). Der Aufbau der Versuchsanlage ist den **Bildern 7 und 8** zu entnehmen.

Versuchsanlage

Die Trocknungsluft wird mit Hilfe des Ventilators 1 von außen über einen Partikelfilter angesaugt und in den anschließenden Klimakanal gefördert. Hier wird die Luft über drei in Reihe geschaltete elektrische Heizer stufenweise bis auf die gewünschte Trocknungstemperatur erwärmt. Die Parameter Lufttemperatur und Luftgeschwindigkeit werden über eine Steuerung konstant gehalten. Die relative Feuchte der Trocknungsluft stellt sich entsprechend den Außenluftbedingungen nahezu konstant ein. Die beheizte Strecke des Klimakanals und Zuluft-Rohrleitung zwischen Klimakanal und Trockner sind wärmeisoliert. Der Trockner ist durch außen angebrachte Isolierplatten gleichfalls wärmeisoliert. Die erwärmte Luft strömt im oberen Bereich des Trockners in den Zuluftschacht und wird hier auf die einzelnen Zuluftkanäle (Zuluftdächer) verteilt. Über die Zuluftdächer tritt die Luft in den Trockner ein und durchströmt die Getreideschüttung auf einer Länge, die etwa der Entfernung zwischen Zuluftdach und Abluftdach entspricht. Auf der gegenüber liegenden Seite des Trockners befindet sich der Abluftschacht, in den die Abluftdächer einmünden. Hier wird die Luft aus den einzelnen Abluftdächern gesammelt und durch den anliegenden Unterdruck abgesaugt, der durch den Ventilator 2 erzeugt wird. Der Abluftstrom wird über den Ventilator 2 nach außen gefördert.

Bild 7: Dächerschachttrockner-Versuchsanlage des ATB

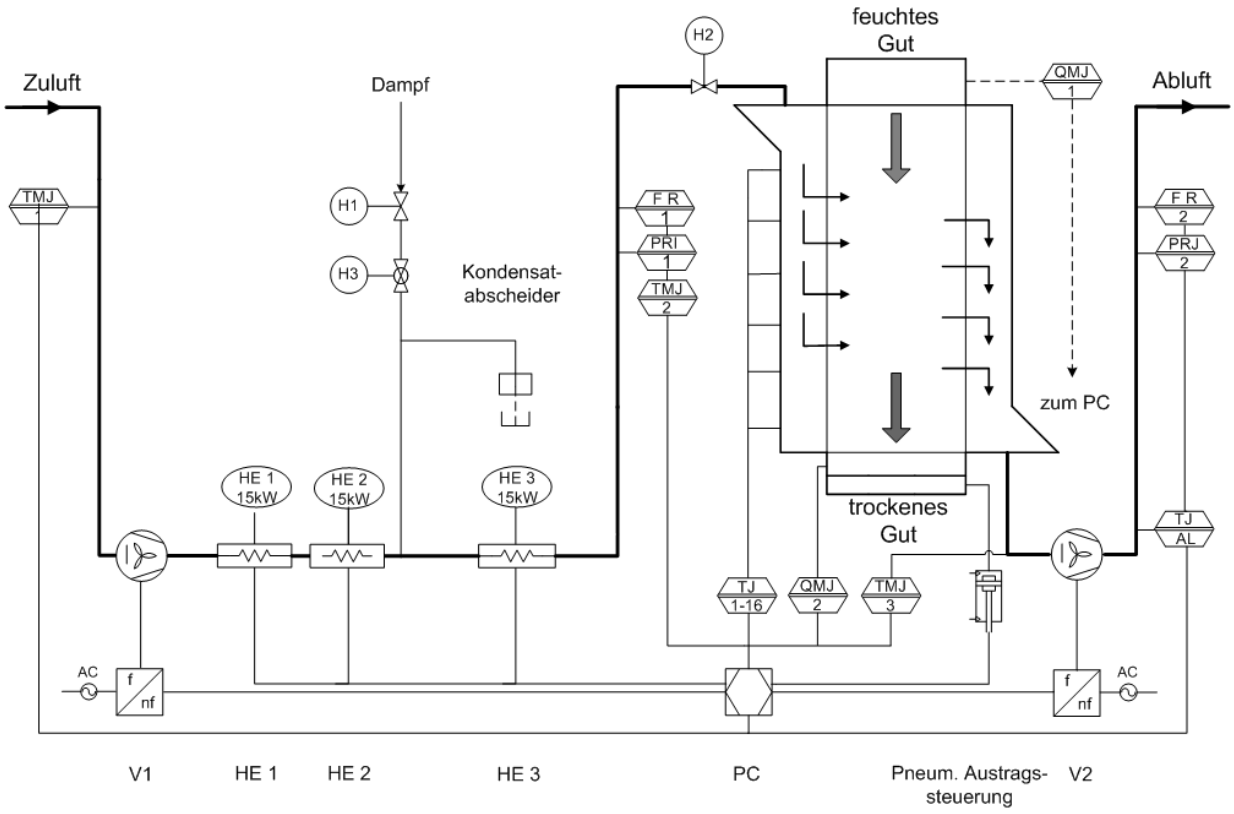


Bild 8: Fließbild der Dächerschachttrockner-Versuchsanlage

Das feuchte Getreide wird dem Trockner von oben über den Einfülltrichter zugeführt. Der Schwerkraft folgend, rutscht es diskontinuierlich nach unten und durchläuft dabei die von den Zuluft- und Abluftdächern durchzogene Trocknungszone. Am Fuß des Dächerschachttrockners befindet sich eine pneumatisch betriebene Austrageinrichtung. Mit dieser Austrageinrichtung kann ein satzweiser, quasi-kontinuierlicher Betrieb des Trockners nachgebildet werden. Die Standzeiten und die Öffnungszeiten sind variabel einstellbar. Unterhalb des Trockners befindet sich ein Auffangbehälter zur Aufnahme der ausgetragenen Trockengut-Chargen.

Die Temperaturen und die relativen Feuchten der angesaugten Außenluft, der Trocknungsluft und der Abluft werden kontinuierlich aufgezeichnet. Vor und nach dem Trockner befinden sich jeweils Messeinrichtungen zur Erfassung der Strömungsgeschwindigkeiten der Trocknungsluft (Zuluft) und der Abluft. Die Temperaturen der Zuluft werden an jeweils zwei Messstellen über der Trocknerhöhe im Zuluftschacht und in den Zuluftdächern bestimmt. Die Temperaturen innerhalb der Getreideschüttung werden an insgesamt sechs Messstellen über der Trocknerhöhe erfasst. Die Temperatur der ausströmenden Abluft wird in jeder Abluftdachreihe gemessen. Die Gutfeuchte des erntefrischen Getreides am Trocknereintrag wird mit Hilfe von Probenahmen und deren Auswertung an einem Gutfeuchte-Schnellbestimmer (Typ GRANOMAT, Fa. Pfeuffer) erfasst. Die Gutfeuchte des Trockengutes wird in-line mit Hilfe eines Mikrowellen-Gutfeuchtemessgerätes vom Typ TRIME®-GW2 der Fa. IMKO ermittelt. Der Gutfeuch-

tesensor wurde zwischen Trocknungszone und Austrageinrichtung installiert und ragt ca. 15 cm in die Schüttung hinein. Zusätzlich wird von jeder Austragscharge eine Gutprobe gezogen. Die Gutfeuchten dieser Proben, wie auch der Proben vom Guteintrag, werden sowohl mittels Gutfeuchte-Schnellbestimmer als auch nach der DIN-Referenzmethode im Trockenschrank (DIN 10350, 1967) gemessen. Durch Vergleich mit den Referenz-Messwerten werden GRANOMAT und TRIME-Messgerät nachträglich kalibriert. Die Massen der ausgetragenen Getreidechargen werden mit Hilfe eines Waage ermittelt. Sämtliche Messgrößen der Trocknungsanlage werden von einem Industrie-PC erfasst. Dieser übernimmt gleichzeitig die Ansteuerung der Ventilatoren, Luftklappen, Heizer und der Austrageinrichtung. Damit werden insgesamt mehr als 35 Mess- und Steuersignale durch den Computer verarbeitet. Mit Hilfe von Steueralgorithmen können sowohl die Trocknungslufttemperatur als auch die Luftgeschwindigkeit konstant gehalten werden.

Trocknungsversuche

Insgesamt wurden 7 Trocknungsversuche mit naturfeuchtem Weizen durchgeführt, siehe **Tabelle 2**. Als Versuchsgüter kamen unterschiedliche Weizenpartien mit Gutfeuchten zwischen 16% und 20% zum Einsatz. Für die Planung der Experimente war es notwendig, das Getreide über mehrere Wochen vorzuhalten. Das erntefeuchte Gut wurde daher in eine Kühlzelle in Säcken eingelagert und bis zum Versuchstermin bei Temperaturen zwischen 8°C und 10°C aufbewahrt.

Tabelle 2: Trocknungsversuche am Dächerschachttrockner des ATB

Versuch Nr.	Datum	Gutart	Ausgangs-gutfeuchte	Gut-durchsatz	Zuluft-temperatur	Luft-geschwind. *)
			F [%]	M_G [kg/h]	ϑ_L [°C]	$w_{L,\psi}$ [m/s]
1	01.09.04	Weizen	20	0	70	0,25
2	02.09.04	Weizen	20	100	70	0,25
3	08.09.04	Weizen	16	200	70	0,25
4	22.09.04	Weizen	16	150	70	0,25
5	19.10.04	Weizen	16	100	70	0,25
6	07.10.05	Weizen	16	100	60	0,25
7	26.10.05	Weizen	16	200	60	0,25

*) im Lückenvolumen der Schüttung

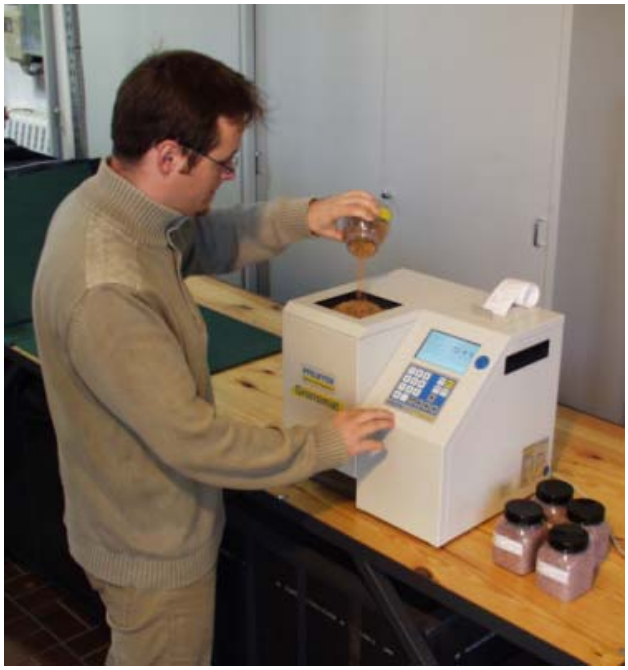


Bild 9: Arbeiten während der Trocknungsversuche: a) Messung der Gutfeuchte am Getreidefeuchte-Schnellbestimmer GRANOMAT (Fa. Pfeuffer); b) Justierung eines Thermoelementes

Zunächst wurde in einem Batch-Versuch (Versuch 1) die instationäre Trocknung einer ruhenden Weizenschüttung untersucht. Ziel dieses Versuches war es, das Trocknungsverhalten in den einzelnen Höhenabschnitten der Trocknungszone zu ermitteln. Dabei zeigte sich, dass das Gut bevorzugt etwa in der Mitte des Schachtes trocknet. Am geringsten war die Trocknungsgeschwindigkeit im oberen Abschnitt des Trockners, der durch hohe Gutfeuchten und niedrige Guttemperaturen gekennzeichnet ist.

Die Versuche 2 bis 7 wurden im Satzbetrieb unter quasistationären Bedingungen gefahren. Die Standzeit betrug 5 min, die Abspeisezeit – d. h. die Zeitspanne, in der das Getreide den Trockner über die Austrageinrichtung verlässt – lag im Bereich weniger Sekunden. Lufttemperatur, relative Luftfeuchte und Luftgeschwindigkeit sind in allen Versuchen konstant gehalten worden. Der Gutdurchsatz wurde zwischen 50 kg/h und 200 kg/h variiert. Versuch 2 war aufgrund von Problemen mit der Austrageinrichtung (Verstopfung durch Verunreinigungen) und des Ausfalls eines Messfühlers nicht auswertbar.

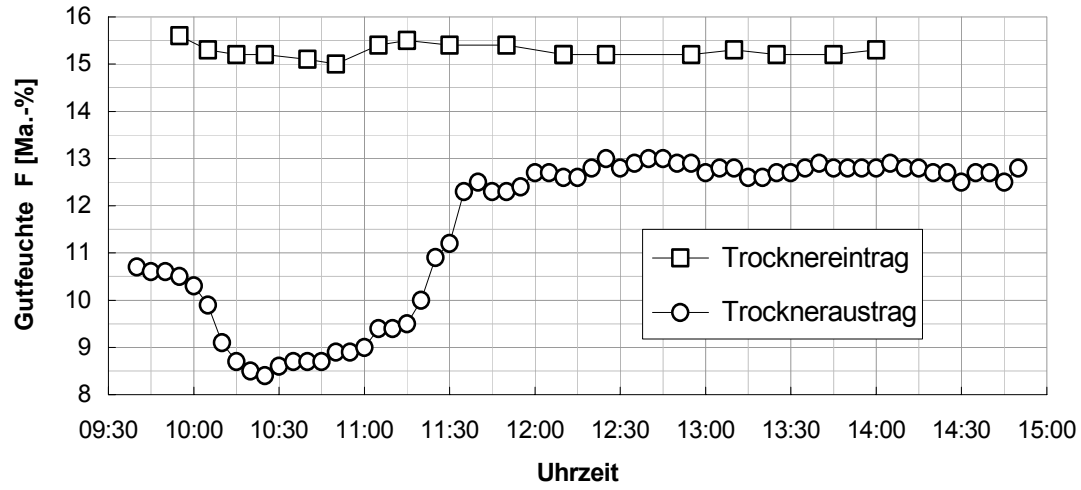
Im **Bild 10** sind beispielhaft für einen Trocknungsversuch (Versuch 7) die gemessenen zeitlichen Verläufe der Gutfeuchten vor und nach der Trocknung, der mittleren Abluftemperatur und der mittleren relativen Abluftfeuchte in der Abluftleitung nach dem Trockner sowie verschiedener Ablufttemperaturen in einzelnen Abluftdachreihen über der Trocknerhöhe dargestellt. Als Trocknungsgut wurde naturfeuchter Weizen mit einer mittleren Feuchte von 15,3 % verwendet (Die ursprüngliche Gutfeuchte lag bei 16 % und verlor während der mehrwöchigen Lagerung in der Kühlzelle rund 0,7 %). Der Getreidedurchsatz wurde auf ca. 200 kg/h eingestellt. Die Temperatur der Trocknungsluft betrug 60 °C, die relative Zuluftfeuchte 5,3 %. Der Luftvolumenstrom ist so gewählt

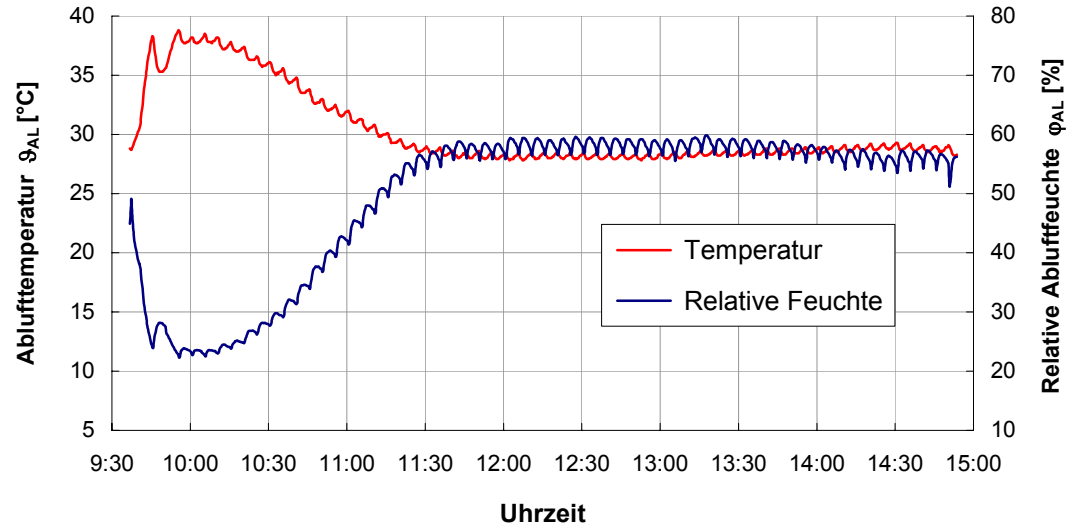
worden (etwa 450 m^3/h), dass eine Strömungsgeschwindigkeit im Lückenvolumen der Schüttung von 0,25 m/s erreichte wurde.

Etwa 2 Tage vor Versuchsbeginn wurde das Versuchsgut (18 Säcke = 900 kg) aus der Kühlzelle ausgelagert und zum Temperieren in der Versuchshalle deponiert. Am 26.10.2005 wurde der Versuch 7 gegen 08:30 Uhr begonnen. Zum Anfahren der Trocknungsanlage wurde der Schachttrockner zunächst mit einer Anfangs-Trocknerfüllung aus trockenem Weizen befüllt, um naturfeuchtes Versuchsgut einzusparen. Gegen 09:10 Uhr wurden Ventilatoren und Heizer in Betrieb genommen. Nach einer Aufheizzeit von einer halben Stunde wurde um 09:40 Uhr mit der Abspeisung des Trockengutes begonnen und die Austrageinrichtung in Betrieb gesetzt. Alle 5 Minuten wurden etwa 16,5 kg Gut ausgetragen. Von jedem Austrag wurde eine Probe gezogen. Die Gutfeuchte dieser Proben wurde während des Versuches mit Hilfe des Getreidefeuchte-Schnellbestimmers GRANOMAT gemessen. Nach dem Versuch wurde die Gutfeuchte der Proben im Trockenschrank bestimmt, um den GRANOMAT mit der Referenzmethode zu kalibrieren. Die Kalibrierung ergab zwischen 0 und 0,5 % höhere Feuchtewerte des Schnellbestimmers gegenüber den Trockenschrank-Werten. Die Referenzdaten dienten gleichfalls der Kalibrierung des Inline-Getreidefeuchte-Sensors TRIME-GW2, der am Austrag des Trockners installiert ist.

Im **Bild 10a** sind die zeitlichen Verläufe der Gutfeuchten am Trocknereintrag und -austrag (vor und nach der Trocknung) dargestellt. Die Gutfeuchten von jedem Sack des eingetragenen, naturfeuchten Weizens wurden bereits vor Versuchsbeginn anhand je einer repräsentativen Probe bestimmt. Daraus ergab sich eine mittlere Gutfeuchte von 15,3 ± 0,3 %. Gegen 09:55 Uhr wurde mit dem Eintrag des Feuchtgutes begonnen. Um 14:00 Uhr wurde das letzte Gut eingefüllt. Die Eintragsfeuchte blieb somit während der gesamten Versuchsdauer nahezu konstant. Die Zeitabstände zwischen den Einträgen wurden so gewählt, dass die Füllhöhe im Einfülltrichter des Trockners maximal um ± 0,2 m schwankte, um Auswirkungen auf den Schüttgutaustrag und die Luftdurchströmung zu vermeiden. Der dargestellte zeitliche Verlauf der Gutfeuchte nach der Trocknung (Austrag) wurde durch Messung der Gutfeuchte der Austragsproben im Trockenschrank ermittelt. Wie das Diagramm verdeutlicht, war die zum Anfahren der Anlage benötigte Anfangs-Trocknerfüllung trockenen Weizens etwa gegen 11:30 Uhr ausgetragen, ersichtlich an dem typischen Knick im Verlauf der Austragsgutfeuchte. Ab diesem Zeitpunkt war der Trockner vollständig mit Frischgut durchspült. Infolge dessen stellte sich anschließend im ausgetragenen Trockengut eine nahezu konstante Gutfeuchte von knapp 13 % ein. Dieser markante Zeitpunkt ist auch aus **Bild 10b** ersichtlich. Die Kurvenverläufe der mittleren Ablufttemperatur und der mittleren relativen Abluftfeuchte spiegeln während der ersten zwei Versuchsstunden die (bewusste) Übertrocknung der trockenen Anfangs-Trocknerfüllung dar. Erst ab 11:30 Uhr stellt sich erwartungsgemäß ein stationärer Trocknerbetrieb ein. Anhand von **Bild 10c** lässt sich die durch den Trocknerschacht von oben nach unten hindurch wandernde Grenzschicht zwischen Trockengut und Feuchtgut verfolgen. In diesem Diagramm sind die in verschiedenen

Abluftdachreihen gemessenen Ablufttemperaturen dargestellt. Der Trockner verfügt insgesamt über 7 Abluftdachreihen. Pro Dachreihe wird die Ablufttemperatur innerhalb jeweils eines Abluftdaches mittels Thermoelement gemessen. Die Dachreihen sind von oben nach unten fortlaufend (von 1 bis 7) durch nummeriert. Wie die Grafik zeigt, passiert der Übergang Trockengut-Feuchtgut die oberste Abluftdachreihe 1 bereits um 10:20 Uhr. Erwartungsgemäß wird die unterste Abluftdachreihe 7 gegen 11:30 Uhr erreicht. Nach Passieren dieses Übergangs stellen sich jeweils stationäre Temperaturverhältnisse ein. In den **Bildern 10b und 10c** sind signifikante Schwankungen in den Kurvenverläufen erkennbar, die durch die einzelnen Gutabspeisungen hervor gerufen werden. Eine Ausnahme bildet der Temperaturverlauf der obersten Abluftdachreihe 1 (**Bild 10c**), die ausschließlich von feuchtem Frischgut gleichmäßiger Temperatur- und Feuchteverteilung umspült wird. Dagegen strömen um tiefer liegende Dachreihen unterschiedlich feuchte Gutpartien, die bereits in darüber liegenden Trocknerabschnitten getrocknet (an den Zuluftdächern liegend) oder zum Teil auch wiederbefeuchtet (an den Abluftdächern liegend) wurden. Diese gemessenen Temperatur- und Feuchteverteilungen bilden die Grundlage für eine weitere Präzisierung des mathematischen Modells.





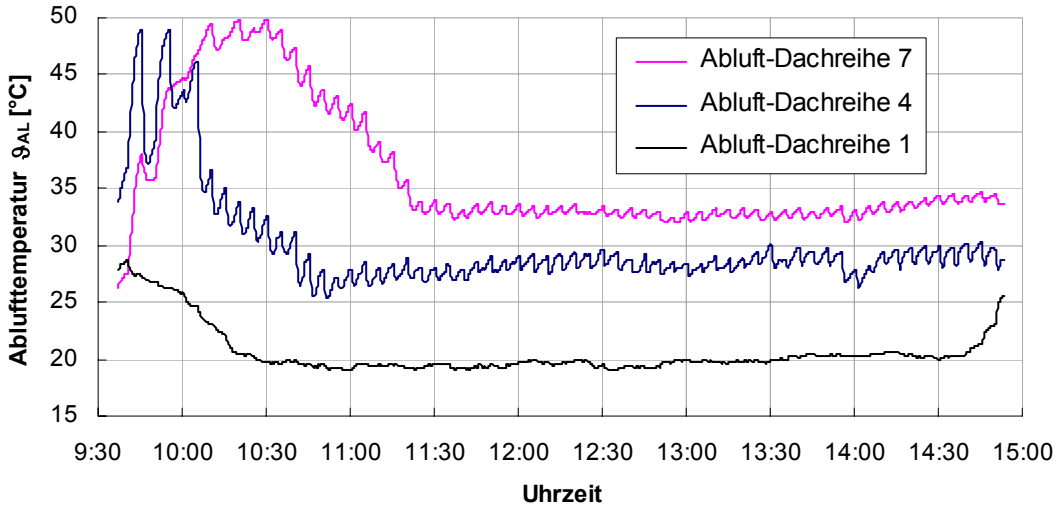


Bild 10: Gemessene zeitliche Verläufe für Versuch 7: a) Gutfeuchte vor und nach der Trocknung; b) mittlere Ablufttemperatur und mittlere relative Abluftfeuchte; c) Temperaturen in verschiedenen Abluftdachreihen über der Trocknerhöhe

M_G = 200 kg/h; F_0 = 15,3 %; ϑ_L = 60 °C; φ_L = 5,3 %; $w_{L,0}$ = 0,25 m/s

5.3 Vergleich Modell – Experiment

Zur Überprüfung des vorliegenden Trocknungsmodells (Kapitel 4) wurden die Messergebnisse von Trocknungsversuchen an der Dächerschachttrockner-Versuchsanlage des ATB mit den Ergebnissen von Modellberechnungen verglichen. Im Folgenden werden dazu beispielhaft die Ergebnisse des Versuches 5 heran gezogen, siehe **Tabelle 2**. Als Trocknungsgut wurde naturfeuchter Weizen mit einer mittleren Feuchte von 15,7 % verwendet. Der Getreidedurchsatz wurde auf ca. 100 kg/h eingestellt. Die Temperatur der Trocknungsluft betrug 70 °C, die relative Zuluftfeuchte 3 %. Der Luftvolumenstrom ist so gewählt worden, dass eine Strömungsgeschwindigkeit im Lückenvolumen der Schüttung von 0,25 m/s erreichte wurde. Das Versuchsgut (ca. 700 kg) wurde 24 h vor dem Trocknungsversuch aus der Kühlzelle ausgelagert. Bei diesem Versuch wurde der Trockner, im Unterschied zu Versuch 7, gleich zu Beginn mit dem feuchten Weizen befüllt. Zum Anfahren der Anlage und Aufheizen des Trockners wurden die Ventilatoren und Heizer in Betrieb genommen. Nach etwa zwei Stunden ist die Abspeisung in Betrieb gesetzt worden. Die Standzeit betrug 5 Minuten, die Abspeisezeit pro Austrag wenige Sekunden. Pro Abspeisung wurden im Durchschnitt 8,3 kg Gut ausgetragen.

Im **Bild 11** sind die zeitlichen Verläufe der gemessenen und berechneten Getreidefeuchten am Trockneraustrag dargestellt. Die Messwerte wurden mit Hilfe des Inline-Getreidefeuchte-Sensors TRIME-GW2 aufgezeichnet. **Bild 12** zeigt einen Ausschnit aus dem gemessenen Gutfeuchteverlauf. Während der Aufheizphase, in der das Getreide ruhte, zeigte der Sensor die Ausgangsfeuchte des Weizens an. Wie die Grafik zeigt, fällt die Gutfeuchte nach Inbetriebnahme der Abspeisung diskontinuierlich ab, bis sie nach etwa 2 Stunden einen nahezu konstanten Wert erreicht. Dieser Versuchsabschnitt ist durch starke Schwankungen der Trockengutfeuchte gekennzeichnet. Während dieser Zeitspanne wurde die während der Aufheizphase im Ruhezustand instationär getrocknete Anfangs-Trocknerfüllung ausgetragen. Der Grund für diese Schwankungen ist, dass bei der instationären Trocknung einer ruhenden Schüttung im Dächerschachttrockner das Getreide in den einzelnen Höhenabschnitten sehr unterschiedlich getrocknet wird, wie beim Versuch 1 bereits festgestellt wurde. Die Nachrechnung dieser Trocknungsphase erweist sich als schwierig, wie der Vergleich mit Messwerten zeigt; sie ist aber auch nicht relevant, da dieser Fall in der Praxis nur während der Anfahrphase auftreten kann. Für die Regelung großtechnischer Trockner ist dagegen der stationäre Betrieb von Bedeutung. Dieser wird nach etwa 4 Stunden und 20 Minuten erreicht. Wie der Vergleich der Graphen im **Bild 11** verdeutlicht, stimmen Modell und Experiment im Bereich des stationären Betriebes gut überein. Nach etwa 5 Stunden und 40 Minuten wurde der Trocknungsversuch beendet.

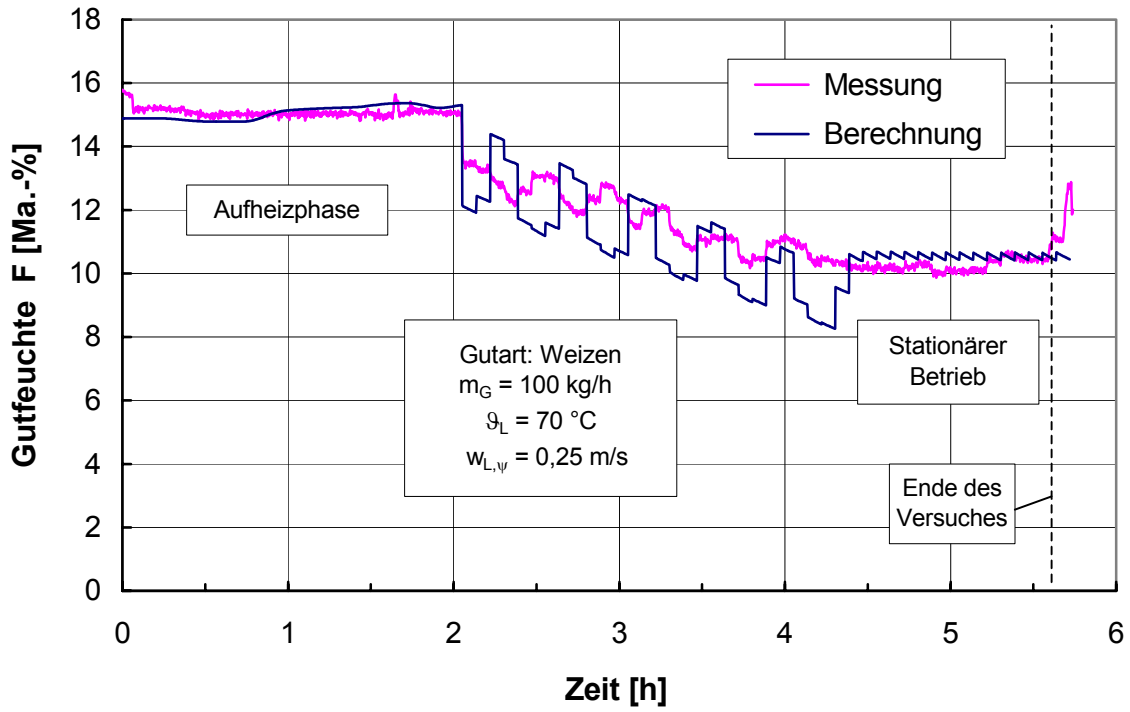


Bild 11: Vergleich zwischen gemessener und berechneter Gutfeuchte von Weizen am Trockneraustrag (Versuch 5)

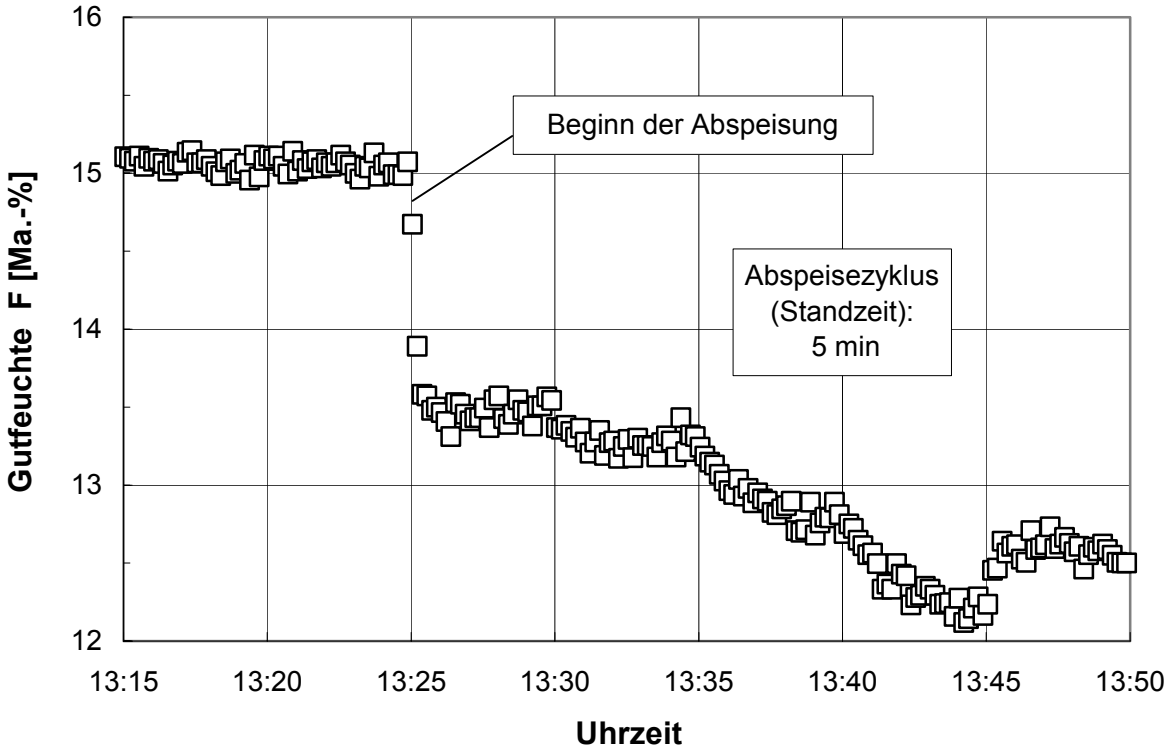


Bild 12: Ausschnitt des Gutfeuchteverlaufes am Trockneraustrag, gemessen mit dem Inline-Getreidefeuchte-Sensor TRIME®-GW2 (Versuch 5)

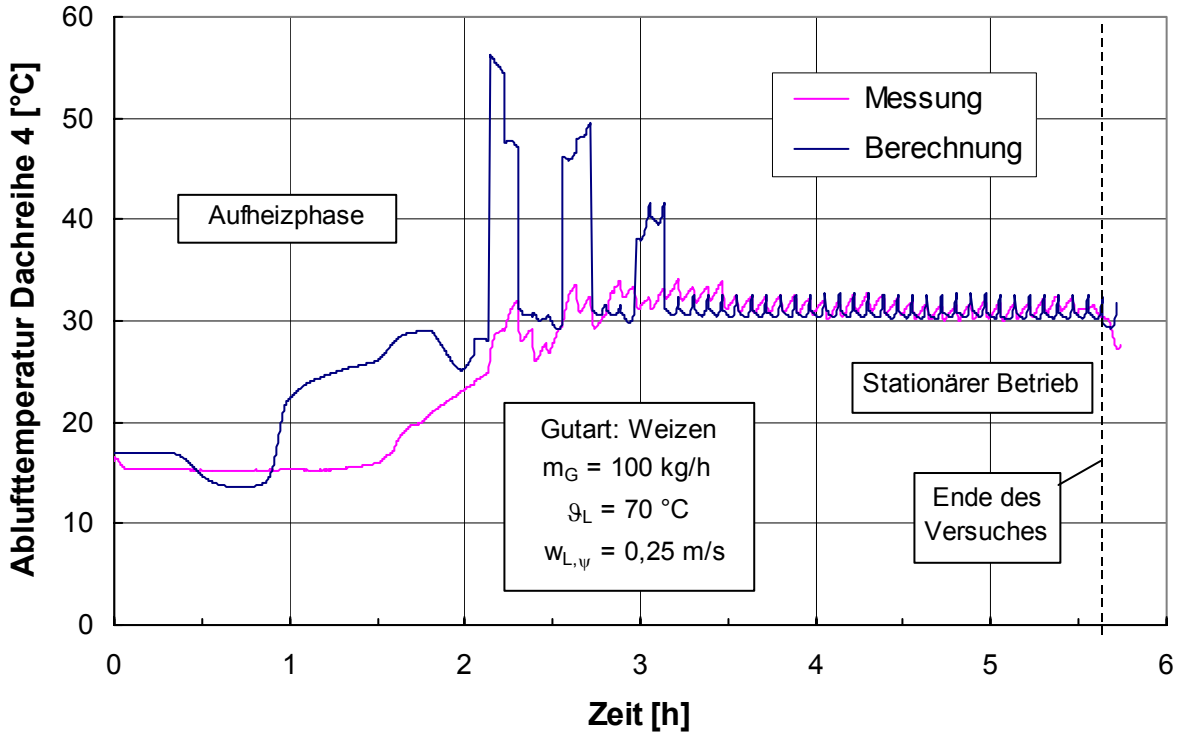


Bild 13: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Temperaturen der Abluft in der 4. Abluftdachreihe (Versuch 5)

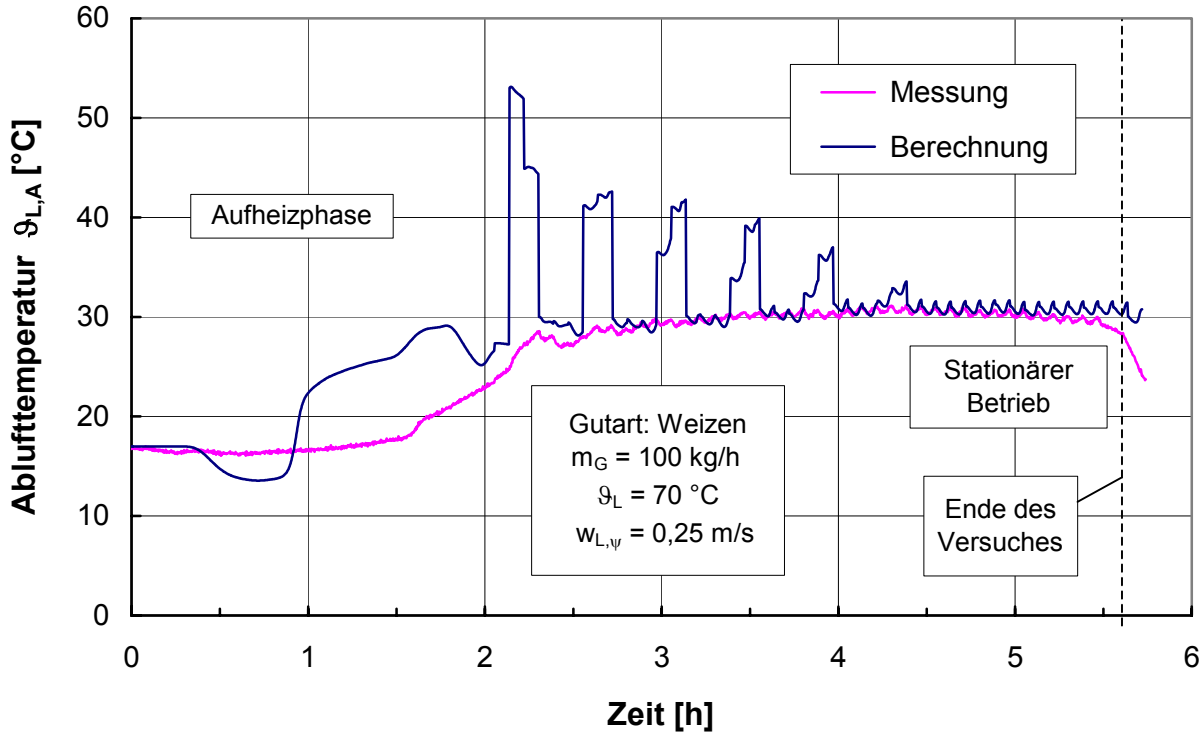


Bild 14: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten mittleren Ablufttemperaturen nach dem Trockner (Versuch 5)

In den **Bildern 13** und **14** sind für den Versuch 5 die gemessenen und berechneten Temperaturen in der Abluftdachreihe 4 und des gesamten Abluftstromes dargestellt. Die Abluftdachreihe 4 befindet sich ca. in der Mitte der Trocknerschachthöhe. Das Thermoelement ragt etwa 20 cm in das zur Trocknerbreite mittig liegende Abluftdach hinein. Die mittlere Ablufttemperatur des gesamten Abluftstromes wird nach dem Trockner gemessen (siehe **Bild 8**). Auch hier zeigt sich, dass Messung und Berechnung im Bereich des stationären Betriebes gut überein stimmen. Die berechneten Temperaturverläufe im Bereich der instationären Trocknung demonstrieren, dass das mathematische Modell gegenüber äußeren Störeinflüssen empfindlicher reagiert als der reale Trockner. Hauptstörgröße ist hier die ungleichmäßige Feuchteverteilung über der Trocknerhöhe, die durch die Ruheschichttrocknung verursacht wurde. Die resultierende Feuchteverteilung ist von der Lage der einzelnen Schüttgutpartien abhängig. Während an den Zuluftdächern liegendes Getreide übertrocknet wird, kommt es in der Nähe der Abluftdächer zu einer Wiederbefeuchtung. Daraus ergeben sich beim Durchlauf dieses Gutes durch den Trocknerschacht zum Teil erhebliche Schwankungen in den gemessenen Verläufen der Ablufttemperatur, der relativen Abluftfeuchte und der Gutfeuchten am Austrag, wie die **Bilder 11** bis **14** verdeutlichen. Zwar stimmen die Orte der Temperatursprünge überein, die berechneten Temperaturausschläge übertreffen die gemessenen jedoch bei Weitem. Die Ursache für diese Abweichungen zwischen Messung und Berechnung liegt vor allem in der vereinfachten Berechnung des Schüttgutflusses im Trocknerschacht, der bisher als Kolbenströmung angenommen wird. Dadurch wird die Kontaktierung zwischen Luft und Gut sehr vereinfacht beschrieben, was auch Auswirkungen auf die Berechnung der Wärme- du Stoffübertragung zwischen beiden Medien hat. Das Modell für die Schüttgutströmung sollte daher in nachfolgenden Vorhaben präzisiert werden.

6 Modellbasiertes Regelungskonzept

Am Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim (ATB) wurde am Beispiel der Getreideart Weizen ein modellbasiertes Regelungskonzept für Dächerschachttrockner entwickelt, dessen prinzipieller Aufbau im **Bild 15** dargestellt ist. Bei der modellbasierten Regelung ist – im Unterschied zu anderen Regelungsprinzipien – das Modell der Regelstrecke von vornherein Bestandteil des Reglers selbst, weshalb diese als modellbasiert (Internal Model Control - IMC) bezeichnet wird. Die Regelstrecke entspricht dem Getreide-Dächerschachttrockner. Das dynamische Modell der Regelstrecke wird der realen Regelstrecke parallel geschaltet. Die Regelgröße Y des Trocknungsprozesses ist die Getreidefeuchte am Trockneraustrag, die kontinuierlich in-line gemessen wird. Aufgrund der Parallelschaltung wird nicht die Regelgröße Y, sondern die Differenz zwischen der gemessenen und der vom Modell voraus berechneten Regelgröße Y-Ŷ zurück geführt. Führungsgröße W ist die angestrebte Zielfeuchte des Trockengutes. Regeleingriffe werden über die Stellgröße U vorgenommen. Im vorliegenden Regelungskonzept ist dies die Austragsgeschwindigkeit des Gutes, die durch Ansteuerung der Austrageinrichtung variiert wird. Hauptstörgröße D der Regelstrecke ist die Gutfeuchte am Trocknereintrag, die gleichfalls kontinuierlich erfasst wird, jedoch messtechnisch gegenwärtig noch ein Problem darstellt. Weitere zu kompensierende Störgrößen können zeitlich veränderliche Parameter wie Trocknungslufttemperatur, Umgebungsbedingungen und Trocknungseigenschaften des Gutes sein. Zur In-line Messung der Getreidefeuchte an mindestens zwei Stellen im Trockner (Trocknereintrag und –austrag) kommen innovative Mikrowellen-Sensoren zum Einsatz.

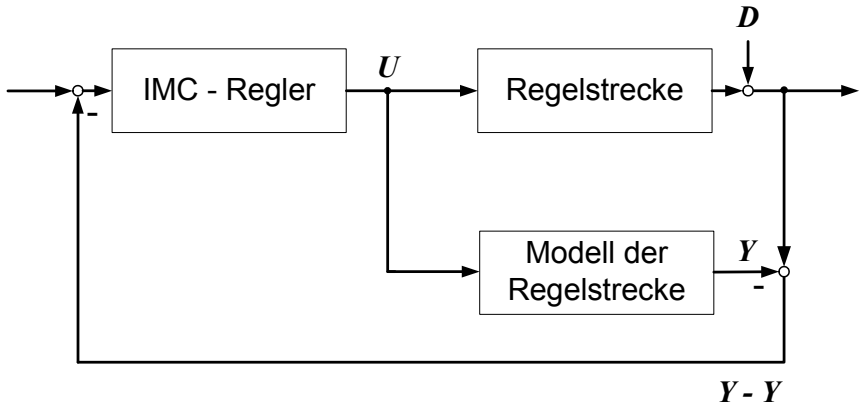


Bild 15: Struktur des IMC-Regelkreises

Grundlage dieser modellbasierten Regelung bildet ein dynamisches Modell für den Warmluft-Trocknungsprozess. Im Dächerschachttrockner werden Trocknungsluft und Getreide in einer Mischung aus Gleich-, Gegen- und Kreuzstrom (mixed-flow) durch den Trockner geführt. Zur Berechnung dieser komplexen Strömungs-, Wärmeübergangs-

und Stofftransportvorgänge wurde ein mathematisches Modell für die gekoppelte Wärme- und Stoffübertragung zwischen Luft und Gut hergeleitet, siehe Kapitel 4. Der Feuchtetransport im Einzelkorn ist der zeitbestimmende Teilprozess der Trocknung und wird daher mit Hilfe eines Mehrschalen-Modells für die Wärme- und Stoffübertragung berechnet.

Das neue Regelungssystem kann auf die Trocknung anderer Getreidearten und körniger Agrarprodukte angewendet werden. Die stoffspezifischen Daten der einzelnen Güter können als Datensätze in das Modell eingegeben werden. Das System ist gleichfalls auf Dächerschachttrockner anderer Bauart und unterschiedlicher Dächergeometrie übertragbar. Mit Hilfe der modellbasierten Regelung ist eine dokumentierte Trocknung im Sinne der Rückverfolgbarkeit und Produkthaftung möglich.

7 Zusammenfassung

Die zum Teil erheblichen Schwankungen der Getreidefeuchte zu Beginn des Trocknungsprozesses am Einlass des Trockners (Trocknereintrag) stellen nach wie vor das größte regelungstechnische Problem bei Dächerschachttrocknern dar. Bisherige Steuerungssysteme können diese Feuchteschwankungen im Laufe des Trocknungsprozesses nicht ausreichend verringern. dessen kommt es häufig zur Unter- bzw. Übertrocknung begleitet von Schwankungen der Austrittsfeuchte. Qualitätseinbußen durch die Bildung von Mykotoxinen im Getreidelager oder thermische Schädigungen sind die Folgen. Ziel des Vorhabens war deshalb, ein adaptives modellbasiertes Automatisierungskonzept zur Regelung der Trockengutfeuchte bei gleichzeitiger Reduzierung des spezifischen Energieaufwandes und der Staubbelastung zu entwickeln.

Im vorliegenden Vorhaben wurde dazu ein mathematisches Modell für die gekoppelte Wärme- und Stoffübertragung bei der Warmlufttrocknung von Getreide in Dächerschachttrocknern hergeleitet. Dieser Berechnungsansatz besteht aus den Teilmodellen für den Wärme- und Stoffübergang im Einzelkorn (Dünnschicht-Modell) sowie in der Getreideschüttung (Schüttungsmodell). Das Gesamtmodell wurde mit Hilfe der Programmiersprache Delphi in ein Simulationsprogramm überführt. Für die Überprüfung des Modells wurde am ATB eine halbtechnische Dächerschachttrockner-Versuchsanlage errichtet. Um einen gleichmäßigen Durchfluss des Gutes über dem gesamten Trocknerquerschnitt und damit gleiche Verweilzeiten zu erreichen, war es notwendig eine neue Austrageinrichtung für den Trockner vorzusehen. Hierzu wurde ein pneumatisch betriebener Schlitzbodenaustrag entwickelt, erfolgreich erprobt und in Betrieb genommen. Dieses Austragsprinzip wird in abgewandelter Form auch von mehreren Trocknerherstellern angewendet und hat sich in der großtechnischen Praxis bewährt. Für die kontinuierliche Messung der Gutfeuchte des Trockengutes wurde am Trockneraustrag ein Inline-Mikrowellen-Getreidefeuchtesensor installiert. Sämtliche Mess- und Steueraufgaben an der Versuchsanlage werden von einem Industrie-PC übernommen.

In den Ernteperioden 2004 und 2005 wurden praxisnahe Trocknungsversuche an der Dächerschachttrockner-Versuchsanlage mit erntefeuchtem Weizen durchgeführt. Zur Modelltestung wurden die gemessenen zeitlichen Verläufe der Getreidefeuchte am Trockneraustrag, der mittleren Ablufttemperatur, der mittleren relativen Abluftfeuchte sowie der Ablufttemperaturen in verschiedenen Abluftdachreihen über der Trocknerhöhe mit den berechneten Ergebnissen verglichen. Wie die Vergleiche ergaben, stimmen Messung und Berechnung im Bereich des stationären Trocknerbetriebes relativ gut überein. Die berechneten Temperaturverläufe im Bereich der instationären Trocknung – während des Durchlaufes der Anfangs-Trocknerfüllung – demonstrieren, dass das mathematische Modell gegenüber äußeren Störeinflüssen empfindlicher reagiert als der reale Trockner. Auch wenn dieser Bereich für die Trocknerregelung nicht von praktischer Relevanz ist, weisen die relativ hohen Abweichungen auf Modellvereinfachungen hin, die überprüft werden sollten. Die Ursache für diese Abweichungen zwischen Messung und Berechnung liegt vor allem in der vereinfachten Berechnung des Schüttgutflusses im Trocknerschacht, der bisher als Kolbenströmung angenommen wird. Dadurch wird die Kontaktierung zwischen Luft und Gut sehr vereinfacht beschrieben, was auch Auswirkungen auf die Berechnung der Wärme- du Stoffübertragung zwischen beiden Medien hat. Daher ist insbesondere das Schüttguttransportmodell zu präzisieren.

Das entwickelte Regelungssystem konnte bisher weder an der ATB-Versuchsanlage noch an einem industriellen Trockner getestet werden. Daher wurde von der Einreichung eines Europa-Patentes (wie im Projektantrag geplant) zur modellbasierten Regelung eines Dächerschachttrockners abgesehen. Zur Präzisierung des Prozessmodells – unter Einbeziehung eines verbesserten Modells für dem Schüttguttransport – sowie experimentellen Testung und Praxisüberführung des Regelungskonzeptes wurde vom ATB ein Nachfolgeprojekt beantragt.

8 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Mit der neuartigen sensorgestützten, modellbasierten Verfahrensführung wird eine gleichmäßige Gutfeuchte am Trockneraustrag angestrebt, wodurch Unter- und Übertrocknung des Getreides minimiert werden. Dadurch wird die Entwicklung von Mykotoxinbildnern gehemmt, thermische Schädigungen und Verkaufsverluste werden vermindert. Wird beispielsweise die Übertrocknung durch Einsatz der neuen Trocknerregelung um 1-2 % gesenkt (Trocknung auf 15 % anstatt auf 13-14 %), würde sich diese Investition bereits nach wenigen Jahren amortisieren. Durch die erzielte, größere Homogenität in der Gutfeuchte wird die Qualität des Produktes erhöht. Durch eine dokumentierte Trocknerführung wird die Rückverfolgbarkeit einzelner Getreidepartien gewährleistet, die seit dem 01. Januar 2005 gesetzlich vorgeschrieben ist.

Die Ergebnisse werden sämtlichen Herstellern und Betreibern von Dächerschachttrocknern zur Verwertung angeboten. Neben der Einsparung fossiler Brennstoffe wird die Umwelt durch Reduzierung der spezifischen CO_2- und Staubemissionen ent-

lastet. Dadurch werden die Verkaufsverluste und Trocknungskosten gesenkt. Die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Agrarbetriebe, der Getreidetrockenwerke und der Trocknerhersteller wird gestärkt.

Die Ergebnisse zur sensorgestützten, modellbasierten Verfahrensführung von Getreide-Schachttrocknern sind auch auf andere Nacherntеprozesse in der Kette der Getreideproduktion (vor und nach der Trocknung) wie die Kühlung, Belüftungstrocknung und Lagerung übertragbar. Wie bei der Getreide-Warmlufttrocknung, ist die Produktqualität bei diesen Prozessen gleichfalls von den verfahrenstechnischen Einflussgrößen Temperatur, Gutfeuchte und Verweilzeit abhängig. Diese komplexen Zusammenhänge sind nur mit Hilfe mathematischer Modelle voraus berechenbar. Mit dem Ziel der Qualitätssicherung und Gewährleistung der Rückverfolgbarkeit sollte daher auch für diese Prozesse eine modellbasierte Verfahrensführung angestrebt werden. Hierzu ist weiterer Forschungsbedarf erforderlich. Aufbauend auf den Vorhabensergebnissen plant das ATB dazu Anschlussvorhaben zur Lösung dieser Aufgabenstellungen.

9 Literaturverzeichnis

ACO AUTOMATION COMPONENTS (2005): Internet (www.acoweb.de)

BAKKER-ARKEMA F.W., LIU Q. (1997): Stochastic Modelling of Grain Drying: Part 3: Analysis of Crossflow Drying. J. Agric. Eng. Res. 66: 281-286

BMVEL (2004): Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. BMVEL

BÖCKELMANN M. (2003): Qualitätssicherung durch dokumentierte Trocknung. Mühle + Mischfutter 140(23): 689-691

BROOKER D.B., BAKKER-ARKEMA F.W., HALL C.W. (1992): Drying and Storage of Grains and Oilseeds. Van Nostrand Reinhold, New York

BRUCE D.M. (1984): Simulation of Multiple-Bed Concurrent-, Counter-, and Mixed-Flow Grain Driers. J. Agric. Eng. Res. 30: 361-372

CENKOWSKI S., MIKETINAC M.J., KELM A.W. (1990): Airflow patterns in a mixed-flow dryer. Can. Agric. Eng. 32: 85-90

CRANK J. (1975): The Mathematics of Diffusion. 2. Auflage, Oxford University Press, Oxford

DANTEC (2005): Computer control system for continuous and semi-continuous grain dryers. Dantec Electronics Ltd., Waterloo, Canada

DIETL C. (1995): Numerische und experimentelle Untersuchungen zum Trocknungsverhalten kapillarporöser, hygroskopischer Stoffe. VDI-Fortschrittberichte, Reihe 3, Nr. 393, VDI-Verlag, Düsseldorf

DIN 10350 (1967): Bestimmung des Feuchtegehaltes von Getreide und Getreideerzeugnissen. Beuth Verlag, Berlin

DÖSCHER & DÖSCHER INGENIEURBÜRO GMBH (2005): Internet (www. doescher.com)

ECKL J. (2004): Trends bei der Lagerung von Getreide. GetreideMagazin 9(1): 57-59

EILERS F. (2003): Mathematische Modellierung der Warmluft-Getreidetrocknung unter Berücksichtigung des Wärme- und Stoffübergangs im Einzelkorn. Diplomarbeit, FHTW Berlin / Institut für Agrartechnik Bornim e.V. (ATB)

EU-VO 178/2002: „Lebensmittel-Basis-Verordnung“. Das Europäische Parlament und der Rat der EU, 28. Januar 2002, ABl. L 31/1 vom 01.02.2002

EU-VO 183/2005: Futtermittelhygiene-Verordnung. Das Europäische Parlament und der Rat der EU, 12. Januar 2005, ABl. L 35/1 vom 08.02.2005

FREUDENBERGER A. (1989): Möglichkeiten der Feuchtemessung bei verfahrenstechnischen Trocknungsprozessen. Chem.-Ing.-Technik 61(12): 953-957

FÜRLL C. (1969): Aussetzender Betrieb von Trommeltrocknungsanlagen. Deutsche Agrartechnik 19(6): 278-280

GASTEIGER A. (1992): Online-Feuchtemessung. Die Mühle + Mischfuttertechnik 129(51/52): 749

GINER S.A., BRUCE D.M., MORTIMORE S. (1998): Two-Dimensional Simulation Model of Steady-state Mixed-Flow Grain Drying. Part 1: The Model. J. Agric. Eng. Res. 71: 37-50

GINER S.A., BRUCE D.M., MORTIMORE S. (1998): Two-Dimensional Simulation Model of Steady-state Mixed-Flow Grain Drying. Part 2: Experimental Validation. J. Agric. Eng. Res. 71: 51-66

GOTTSCHALK K. (1997): Lagerung von Kartoffeln mit Klimatisierungsautomaten. Bornimer Agrartechnische Berichte Heft 13: 125-135

GRAMATTE W., HÄUSER S. (2004): RIELA Durchlauftrockner GDT 200. DLG-Prüfbericht Nr. 5360, DLG Groß-Umstadt

GRAMATTE W., NIETHAMMER F. (2000): In-line Feuchteerfassungssystem TRIME®-GW. DLG Prüfbericht Nr. 4866, DLG Groß-Umstadt

GRÖGER T. (2005): Partikelsimulationen zur Optimierung verfahrenstechnischer Anlagen. Mühle + Mischfutter 142(1): 12-13

GÜNZEL W., MALTRY W. (1979): Rationalisierung der Lüftung in Lagerhäusern für Speisezwiebeln. Gartenbau 26(8): 229-231

HEINDL A., HEINDL T. (1998): Kontinuierliche Feuchtemessung zur Regelung von Bandtrocknern. Z. Arzn. Gew. Pfl. 3: 146-154

HERRMANN R., SIKORA J. (1997): Mikrowellen-Feuchtemeßtechnik mit Resonatoren und ihre Anwendung. Sonderdruck aus: Kupfer, K.: Materialfeuchtemessung. Expert Verlag, Renningen, Kapitel 17: 291-310

HOFFMANN T. (1998): Gestaltung von Technik und Verfahren für die Ernte und Konservierung von Getreide auf der Grundlage witterungsbedingter Kornfeuchten. Dissertation, Humboldt-Universität Berlin

HUSAINA., Chen C.S., Clayton J.T., Whitney L.F. (1972): Mathematical Simulation of Mass and Heat Transfer in High Moisture Foods. Trans. ASAE 15: 732-736

IMKO MICROMODULTECHNIK GMBH ETTLINGEN (2005): Internet (www.imko.de),

JAYAS D.S., WHITE N.D.G., MUIR W.E. (1995): Stored-Grain Ecosystems. Marcel Dekker Inc., New York

JIA C., YANG W., WU B. (2002): Mathematical Modelling and Glass Transition Mapping for Rice Drying in a Cross-flow Dryer. ASAE Annual International Meeting, Hyatt Regency Chicago, Illinois, USA, July 29-31, ASAE Paper No. 02-6073: 1-23

JORDANOV A. (2005): Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Warmlufttrocknung von Getreide. Diplomarbeit, Technische Universität Sofia / Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V. (ATB)

JOST O. (2002): Umstellung einer Dächerschachttrockner-Versuchsanlage von Belüftungs- auf Warmluftbetrieb. Diplomarbeit, Fachhochschule Wismar / Institut für Agrartechnik Bornim e. V. (ATB)

KIM K.B., LEE J.W., LEE S.S., NOH S.H., KIM M.S. (2003): On-line measurement of grain moisture content using RF imperance. Trans. ASAE 46(3): 861-867

KLINGER J. (1977): Einige thermodynamische und strömungstechnische Untersuchungen zur Modellierung der Vorgänge in Dächerschachttrocknern für Getreidekörner. Dissertation, TU Dresden

KLEMMER K.-D. (1989): Verfahrenstechnische Untersuchungen zur Modellierung des Stoff- und Wärmeüberganges in einem Dächerschachttrockner für Getreide. Dissertation, TU Dresden

KNEULE F. (1975): Das Trocknen. Verlag H.R. Sauerländer & Co., Aarau und Frankfurt/Main

KRISCHER O., KAST W. (1978): Trocknungstechnik. Band 1: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin

KUPFER K. (1997): Materialfeuchtemessung. Expert Verlag, Renningen-Malmsheim

LATEIN T., BLUME P., KÖHLER K., RUF R. (2003): Erfahrungen mit einer Trocknersteuerung im Feldeinsatz. Mühle + Mischfutter 140(16/17): 481-484

LAWRENCE K.C., FUNK D.B., WINDHAM W.R. (2001): Dielectric Moisture Sensor for Cereal Grains and Soybeans. Trans. ASAE 44(6): 1691-1696

LAXHUBER T. (2001): Europas größte Mais-Trocknungsanlage. Mühle + Mischfutter 138(23): 772

LIU Q., MONTROSS M.D., BAKKER-ARKEMA F.W. (1997): Stochastic Modelling of Grain Drying: Part 1: Experimental Investigation. J. Agric. Eng. Res. 66: 267-273

LIU Q., BAKKER-ARKEMA F.W. (1997): Stochastic Modelling of Grain Drying: Part 2: Model Development. J. Agric. Eng. Res. 66: 275-280

LYKOW A.W. (1955): Experimentelle und theoretische Grundlagen der Trocknung. VEB Verlag Technik, Berlin

MALTRY W. (1966): Einige Untersuchungen zur Aufklärung des Verhaltens von Getreide im Dächer-Schachttrockner. Archiv für Landtechnik 5(3): 223-264

MALTRY W. (1970): Beitrag zur Automatisierung der Heißlufttrocknung. Deutsche Agrartechnik 20(10): 489-492

MALTRY W. (1975): Wirtschaftliches Trocknen. Verlag Theodor Steinkopff Dresden

MALTRY W., PÖTKE E., SCHNEIDER B. (1975): Landwirtschaftliche Trocknungstechnik. 2. Auflage, VEB Verlag Technik, Berlin

MALTRY W., GOHR A. (1983): Automatisierung der Belüftung in Lagern für Kartoffeln. Agrartechnik 33(5): 211-213

MALTRY W., ZIEGLER T. (1994): Simulation der instationären Trocknung von Saatgutschüttungen unter Nutzung von Sonnenenergie. Mühle und Mischfuttertechnik 131(5): 55-56

MEIERING A.G. (1971): Der gekoppelte Wärme- und Stoffaustausch bei der Verarbeitung von Nahrungsmitteln unter besonderer Berücksichtigung der Trocknung von Körnerfrüchten. VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 14, Nr. 14, VDI-Verlag Düsseldorf

MELLMANN J., FÜRLL C. (2003): Körnerkonservierung. in: Matthies H.J., Meier F. (Hrsg.): Jahrbuch Agrartechnik, Band 15, VDMA Landtechnik/VDI-MEG/KTBL, S. 155-158

MELLMANN J., MODEL N., MALTRY W. (2003): Mathematical Modelling of Mixed-Flow Grain Drying. Proceedings of the 3rd CEE AgEng Res. and Develop. Conf. of Central and Eastern Europ. Institutes of Ag. Eng., Gödöllö, Hungary, 11-13 Sept. 2003, pp. 113 – 117

MELLMANN J., JOST O. (2003): Verfahren und Schachttrockner zum Trocknen von rieselfähigen Schüttgütern. Patententwurf vom 30.11.2003, Akz. 103 57 410.7, Institut für Agrartechnik Bornim e.V. (ATB), Potsdam

MELLMANN J., FÜRLL C. (2004): Neuartiges Regelungssystem sichert Getreidequalität. Agrarfinanz, 52(6): 24-25

MELLMANN J., MALTRY W., MODEL N. (2004): Optimierte Steuerung von Getreide-Schachttrocknern. Zwischenbericht, Leibniz-Institut für Agrartechnik Bornim e.V. (ATB), Potsdam

MELLMANN J., RICHTER I.G., MALTRY W. (2005a): Mathematisches Modell zur Getreidetrocknung in einem Schachttrockner als Grundlage für eine modellbasierte Regelung. VDI-GVC Gemeinsame Fachausschuss-Sitzung „Mechanische Flüssigkeitsabtrennung“ und „Trocknungstechnik“, Fraunhofer IKTS, Dresden, 09.-11. März 2005

MELLMANN J., RICHTER I.G., MALTRY W. (2005b): Optimierte Steuerung von Getreide-Schachttrocknern. Zwischenbericht, Leibniz-Institut für Agrartechnik Bornim e.V. (ATB), Potsdam

MELLMANN J., FÜRLL C. (2006): Körnerkonservierung. in: Matthies H.J., Meier F. (Hrsg.): Jahrbuch Agrartechnik, Band 18, VDMA Landtechnik/VDI-MEG/KTBL (Druck in Vorbereitung)

MILLER P.C.H., WHITFIELD R.D. (1984): The Predicted Performance of a Mixed-Flow Grain Dryer. J. Agric. Eng. Res. 30: 373-380

MONTROSS M.D., MAIER D.E. (2000): Simulated performance of conventional high-temperature drying, dryeration, and combination drying of shelled corn with automatic conditioning. Trans. ASAE 43: 691-699

MÜTEC INSTRUMENTS GMBH (2005): Internet (www.muetec.de)

NELLIST M.E. (1974): The drying of ryegrass seeds in deep layers. Ph.D. Thesis, Univ. of Newcastle-upon-Tyne (unpubl.)

NELLIST M.E., BRUCE D.M. (1995): Heated-Air Grain Drying. In: Jayas D.S., White N.D.G., Muir W.E.: Stored-Grain Ecosystems. Marcel Dekker Inc., New York

NORVIDAN OVERSEAS A/S (2005): Internet (www.norvidan.dk)

OLESEN H.T. (1982): Korntørring (Getreidetrocknung). Innovation, Develpoment, Engineering ApS, Thisted

PABIS S., JAYAS D.S., CENKOWSKI S. (1998): Grain Drying. Theory and Practice. John Wiley & Sons Inc., New York

PLESSE H.-J. (2004): Qualität im Korn sichern. dlz 55(7): 62-64

RATH P. (1992): Ergebnisse der Erprobung des Mikrowellen-Feuchtemeßgerätes MW 2300 für Getreidekörner und Mehl. Firmenschrift, Tews Elektronik GmbH, Hamburg

RIELA GETREIDE- & MISCHFUTTERTECHNIK GMBH (2005): Internet (www.riela.de)

SITOMPUL J.P., ISTADI, WIDIASA I.N. (2001): Modeling and simulation of deep-bed grain dryers. Drying Technology 19(2): 269-280

SPITZLEI M. (2002): Prozeßautomatisierung und Optimierung durch Online-Feuchtemessung. Mühle + Mischfutter 139(20): 579-580

STELA LAXHUBER GMBH MASSING (2005): Internet (www.stela.de)

TEWS ELEKTRONIK GMBH HAMBURG (2005): Internet (www.tews-elektronik.com)

THEISEN K.-H. (1995): Mit Mikrowellen Feuchte im Prozeß messen. Verfahrenstechnik 29(3): 66-68

VDI-GVC (2002): VDI-Wärmeatlas. 9. Auflage, Springer-Verlag Berlin

WEBER D. (1995): Technische Feuchtemessung. Vulkan Verlag, Essen

ZIEGLER T. (1999): Modellierung und Simulation der solar unterstützten Schüttguttrocknung am Beispiel Weizen. Dissertation, TU Dresden

ZIEGLER T., RICHTER I.G., PECENKA R., MALTRY W., GOTTSCHALK K., MÜLLER S. (2000): Optimierung solar unterstützter Trocknungsverfahren für landwirtschaftliche Produkte einschließlich integrierter hygroskopischer Kurzzeitspeicher. Forschungsbericht zum BMBF-Projekt 0338923H, Institut für Agrartechnik Bornim e.V., Januar 2000

Verzeichnis der Symbole und Indizes

a	m^2/s	Temperaturleitfähigkeit
A	m^2	Fläche
A_V	m^2/m^3	volumetrische Austauschfläche
c_G	J/(kgK)	spezifische Wärmekapazität des Gutes
c_p	J/(kgK)	spezifische isobare Wärmekapazität
C	-	Konstante
d	m	(äquivalenter) Durchmesser
h	J/kg	spezifische Enthalpie
H	J	Enthalpie
$\dot{H}$	J/s	Enthalpiestrom
i, j	-	Laufvariablen der Zeit t bzw. des Radius r
K_{ij}	m^2/s	Koeffizienten in Gleichungen (1) und (2)
M	kg	Masse
$\dot{M}$	kg/s	Massenstrom
N	-	Anzahl der Kugelschalen
p	Pa	Druck, Partialdruck
$\dot{Q}$	W	Wärmestrom
r	m	Koordinate Radius, $0 \le r \le R$
Δr	m	Radius-Schritt, Schalendicke
r_0	J/kg	spezifische Verdampfungsenthalpie des Wassers bei 0 °C
r_b	J/kg	spezifische Bindungswärme
R	m	Radius
R	J/(kgK)	individuelle Gaskonstante
R_b	J/kg	spezifische Bindungswärme, bezogen auf Trockensubstanz
t	s	Zeit
Δt	s	Zeitschritt
T	K	thermodynamische Temperatur
V	m^3	Volumen
w	m/s	Geschwindigkeit innerhalb der Schüttung
w_0	m/s	Geschwindigkeit bezogen auf den leeren Querschnitt
X	kg/kg	Wassergehalt des feuchten Gutes, bezogen auf Trockensubstanz
$\overline{X}$	kg/kg	Mittlerer Wassergehalt
X*	kg/kg	Gleichgewichtsfeuchte
Y	kg/kg	Wassergehalt der feuchten Luft, bezogen auf trockene Luft
z	m	Ortskoordinate (in axialer Richtung)

Δz	m	Ortsschritt

Griechische Buchstaben

α	W/(m^{2}K)	Wärmeübergangskoeffizient
δ	m^2/s	Diffusionskoeffizient
ϑ	°C	Celsius-Temperatur
κ	m^2/s	Feuchteleitkoeffizient
λ	W/(mK)	Wärmeleitfähigkeit
ν	m^2/s	kinematische Viskosität
ρ	kg/m^3	Dichte
φ	-	relative Feuchte
ψ	-	Porosität

Indizes

0	Anfang; bei 0°C; bezogen auf leeren Querschnitt
ax	axial, in axialer Richtung
b	Bindung
D	Dampf; durch Diffusion
f	feucht
G	Gut
i	Laufvariable für die Zeitschritte
j	Laufvariable für die Radius-Schritte (Kugelschalen), j = 1, N
K	Kugel (Einzelkorn); durch Konvektion
L	Luft
p	konstanter Druck
s	Sättigung
S	Schüttung
tr	trocken
TS	Trockensubstanz
Ü	durch (Stoff-) Übergang
W	Wasser
α	konvektiv
*	Gleichgewicht

Verzeichnis der Bilder und Tabellen

Bild 1 Moderner Dächerschachttrockner der Fa. Cimbria mit Linienbrennern als Heizquelle und senkrecht angeordneten Cyclofanen auf der Abluftseite.

a) Schema der Luftführung; b) Rapsplatten an den Abluftdächern.

Bild 2 Schema des Einzelkornmodells für N = 10 Kugelschalen konstanter Dicke $\Delta r = R/10$

Bild 3 Schüttungsmodell: Wärme- und Stofftransport zwischen Luft und Gut sowie Energie- und Massenbilanz um ein Volumenelement der Schüttung

Bild 4 Schema der Laboranlage zur Dünnschichttrocknung

Bild 5 Trocknungsverlauf einer 1000-Korn-Probe von naturfeuchtem Weizen

Bild 6 Trocknungsgeschwindigkeit einer 1000-Korn-Probe von naturfeuchtem Weizen als Funktion des Gutwassergehaltes

Bild 7 Dächerschachttrockner-Versuchsanlage des ATB

Bild 8 Fließbild der Dächerschachttrockner-Versuchsanlage

Bild 9 Arbeiten während der Trocknungsversuche: a) Messung der Gutfeuchte am Getreidefeuchte-Schnellbestimmer GRANOMAT (Fa. Pfeuffer); b) Justierung eines Thermoelementes

Bild 10 Gemessene zeitliche Verläufe für Versuch 7: a) Gutfeuchte vor und nach der Trocknung; b) mittlere Ablufttemperatur und mittlere relative Abluftfeuchte; c) Temperaturen in verschiedenen Abluftdachreihen über der Trocknerhöhe.

$M_G = 200$ kg/h; $F_0 = 15{,}3$ %; $\vartheta_L = 60$ °C; $\varphi_L = 15$ %; $w_{L,0} = 0{,}25$ m/s.

Bild 11 Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Gutfeuchten von Weizen am Trockneraustrag (Versuch 5)

Bild 12 Ausschnitt des Gutfeuchteverlaufes am Trockneraustrag, gemessen mit dem Inline-Getreidefeuchte-Sensor TRIME® -GW2 (Versuch 5)

Bild 13 Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Temperaturen der Abluft in der 4. Abluftdachreihe (Versuch 5)

Bild 14 Vergleich zwischen gemessenen und berechneten mittleren Ablufttemperaturen nach dem Trockner (Versuch 5)

Bild 15 Struktur des IMC-Regelkreises

Tabelle 1 Versuche zur Dünnschichttrocknung von Weizen (1000-Korn-Versuche)

Tabelle 2 Trocknungsversuche am Dächerschachttrockner des ATB

In der Reihe
Bornimer Agrartechnische Berichte

sind bisher erschienen:

Heft 1	Technik und Verfahren der Landschaftspflege	1992
Heft 2	Beiträge zur Lagerung und Verarbeitung pflanzenbaulicher Produkte	1993
Heft 3	Technik und Verfahren in der Tierhaltung	1993
Heft 4	Technik und Verfahren der Landschaftspflege und für die Verwendung der anfallenden Materialien	1994
Heft 5	Verfahrenstechnik der Aufbereitung, Lagerung und Qualitätserhaltung pflanzlicher Produkte	1994
Heft 6	Biokonversion nachwachsender Rohstoffe und Verfahren für Reststoffbehandlung	1994
Heft 7	Preußische Versuchs- und Forschungsanstalt für Landarbeit und Schlepperprüffeld in Bornim 1927 bis 1945	1995
Heft 8	Qualitätssicherung und Direktvermarktung	1996
Heft 9	Konservierende Bodenbearbeitung auf Sandböden	1996
Heft 10	Anwendung wärme- und strömungstechnischer Grundlagen in der Landwirtschaft	1996
Heft 11	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 1996	1996
Heft 12	Aufbereitung und Verwertung organischer Reststoffe im ländlichen Raum	1996
Heft 13	Wege zur Verbesserung der Kartoffelqualität durch Verminderung der mechanischen Beanspruchung	1997
Heft 14	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 1997	1997
Heft 15	Technische und ökonomische Aspekte der Nutztierhaltung in großen Beständen	1997
Heft 16	11. Arbeitswissenschaftliches Seminar	1997
Heft 17	Nachwachsende Rohstoffe im Land Brandenburg Stand Aktivitäten und Perspektiven einer zukunftsfähigen und umweltgerechten Entwicklung	1998
Heft 18	Qualität von Agrarprodukten	1998
Heft 19	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 1998	1998
Heft 20	Beiträge zur teilflächenspezifischen Bewirtschaftung	1998
Heft 21	Landnutzung im Spiegel der Technikbewertung – Methoden Indikatoren, Fallbeispiele	1998

Heft 22	Kriterien der Nachhaltigkeit in der Verfahrensentwicklung für die Nutztierhaltung	1999
Heft 23	Situation und Trends in der Landtechnik / Erneuerbare Energien in der Landwirtschaft	1999
Heft 24	Institut für Landtechnik der Deutschen Akademie der Landwirtschaftswissenschaften zu Berlin 1951 bis 1965	1999
Heft 25	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 1999 / 2000	2000
Heft 26	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2001	2001
Heft 27	Approaching Agricultural technology and Economic Development of Central and Eastern Europe	2001
Heft 28	6th International Symposium on Fruit, Nut, and Vegetable Production Engineering	2001
Heft 29	Measurement Systems for Animal Data and their Importance for Herd Management on Dairy Cow Farms	2002
Heft 30	Produktion, Verarbeitung und Anwendung von Naturfasern	2002
Heft 31	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2002	2002
Heft 32	Biogas und Energielandwirtschaft - Potenzial, Nutzung, Grünes Gas^{TM}, Ökologie und Ökonomie	2003
Heft 33	Sozioökonomische Aspekte zu Perspektiven des Offenlandmanagements	2003
Heft 34	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2003	2003
Heft 35	Energieholzproduktion in der Landwirtschaft Potenzial, Anbau, Technologie, Ökologie und Ökonomie	2004
Heft 36	High-Tech Innovationen für Verfahrensketten der Agrarproduktion. Statusseminar 2003	2004
Heft 37	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2004	2004
Heft 38	Die Landmaschinenprüfung in der DDR 1951-1991 und ihre Vorgeschichte	2004
Heft 39	Energieverlust und Schimmelpilzentwicklung bei der Lagerung von Feldholz-Hackgut	2005
Heft 40	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2005	2005
Heft 41	Demonstration der Langzeitwirkung bedarfsorientierter Fungizidbehandlung mit dem CROP-Meter	2005

Heft 42	Biochemicals and Energy from Sustainable Utilization of herbaceous Biomass (BESUB)	2005
Heft 43	Ozontes Waschwasser zur Qualitätssicherung leichtverderblicher Produkte - Entwicklung einer *Fuzzy-Logic*-Steuerung des Waschprozesses	2005
Heft 44	Messsystem zur Bewertung des Unkrautvorkommens	2005
Heft 45	Anwendung der Thermographie zur Optimierung der Belüftungssteuerung bei der Lagerhaltung landwirtschaftlicher Produkte	2005
Heft 46	Membranbioreaktor zur Aufbereitung von Schlachthofabwässern	
	Prozesssteuerung von Biogasanlagen mit Kofermentation	2005
Heft 47	Verschleißeinfluss auf das Förderverhalten von Drehkolbenpumpen	2005
Heft 48	Qualitätserhaltung und Qualitätssicherung von Bioobst und Biogemüse in der Nachernte	2005
Heft 49	Miniaturisiertes Datenerfassungs-System zum Implantieren in Früchte und zur Messung ihrer mechanischen Belastung durch Ernte- und Nachernteverfahren	2005
Heft 50	Prozesskontrolle der Qualität von frischem Obst und Gemüse mit Hilfe eines Multigas-Sensors	2005
Heft 51	Entwicklung eines Echtzeitsensors für die Stärkebestimmung bei Kartoffeln als funktionaler Bestandteil eines optoelektronischen Verleseautomaten	2005
Heft 52	Optimierte Steuerung von Getreide-Schachttrocknern	2005

Interessenten wenden sich an:

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V.
Max-Eyth-Allee 100
14469 Potsdam

Tel.: (0331) 5699-820
Fax.: (0331) 5699-849
E-Mail: atb@atb-potsdam.de

Schutzgebühr: 13,- €