

FORSCHUNGSBERICHT AGRARTECHNIK

des Arbeitskreises Forschung und Lehre
der Max-Eyth-Gesellschaft (MEG)

45

Heinz Kuppinger

**Untersuchung und Verbesserung
der Querstromtrocknung von Getreide**

Dissertation

Hohenheim 1980

Institut für Agrartechnik
Lehrstuhl Grundlagen der Landtechnik
Universität Hohenheim
Prof. Dr.-Ing. H. D. Kutzbach

UNTERSUCHUNG UND VERBESSERUNG DER QUERSTROMTROCKNUNG VON GETREIDE

Dissertation
zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Agrarwissenschaften

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Heinz Kuppinger
Kornwestheim

Hohenheim 1980

Hauptberichter: Prof.Dr.-Ing.H.D. Kutzbach
Mitberichter: Prof.Dr.Th. Bischoff
Tag der Einreichung: 26. 2. 1980
Tag der mündlichen Prüfung: 20. 3. 1980

C 1980: im Selbstverlag
Bezugsquelle: Institut für Agrartechnik
Universität Hohenheim
Garbenstraße 9
D - 7000 Stuttgart 70

Alle Rechte, auch die der Übersetzung und des Nachdruckes
sowie jede Art der photomechanischen Wiedergabe, auch aus-
zugsweise, bleiben vorbehalten.

V o r w o r t

Die vorliegende Arbeit über die Querstromtrocknung von Getreide entstand am Lehrstuhl Grundlagen der Landtechnik im Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim.

Die Anregung zu dieser Arbeit ergab sich im Rahmen des Forschungsprojektes "Trocknung und Kühlung von Körnerfrüchten" des Sonderforschungsbereichs 140-Landtechnik. Dem Projektleiter, Herrn Dr.-Ing. W. Mühlbauer, gilt mein besonderer Dank für seine großzügige Unterstützung sowie sein stetes Interesse am Fortgang dieser Arbeit.

Herrn Prof.Dr.-Ing. H.D. Kutzbach möchte ich meinen herzlichen Dank für die Betreuung und die wertvollen Anregungen aussprechen, die wesentlich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen haben.

Herrn Prof.Dr. Th. Bischoff danke ich für die Durchsicht der Arbeit und die Übernahme des Korreferats.

Bei allen Mitarbeitern des Instituts für Agrartechnik, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, möchte ich mich an dieser Stelle herzlich bedanken. Insbesondere gilt mein Dank Frau D. Weidmann für ihre sorgfältige Mitarbeit bei der Versuchsdurchführung und -auswertung.

Die Finanzierung dieses Forschungsprojektes erfolgte mit Mitteln der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 140-Landtechnik "Verfahrenstechnik der Körnerfruchtproduktion", der dafür gedankt sei.

Heinz Kuppinger



<u>Inhaltsverzeichnis</u>	Seite
Formelzeichen	7
1. <u>Einleitung</u>	11
1.1 Bisherige Arbeiten zur Querstromtrocknung	13
1.2 Aufgabenstellung und Methodik	14
2. <u>Allgemeine Betrachtung der Trocknung von Körnerfrüchten</u>	16
2.1 Charakterisierung des Trocknungsgutes	16
2.2 Anforderungen an ein Trocknungsverfahren für Getreide	22
2.2.1 Trocknungsleistung	23
2.2.2 Energiebedarf	25
2.2.3 Gleichmäßigkeit der Trocknung	27
2.2.4 Qualität des Trockengutes	28
2.3 Bauformen von Querstromtrocknern	31
3. <u>Analytische Betrachtung des Trocknungsverhaltens von Körnerschüttungen</u>	37
3.1 Das Trocknungsverhalten dünner Körnerschüttungen	37
3.2 Differentialgleichungen zur Beschreibung des Trocknungsverhaltens von Körnerschüttungen	38
3.2.1 Differentialgleichungen zur Beschreibung des Trocknungsverhaltens dicker ruhender Körnerschüttungen	38
3.2.2 Differentialgleichungen zur Beschreibung des Trocknungsverhaltens quer-durchströmter bewegter Körnerschüttungen	41
3.3 Modell zur Vorausberechnung des Trocknungsverhaltens ruhender Körnerschüttungen	46
4. <u>Experimentelle Untersuchung des Trocknungsverhaltens dicker ruhender Körnerschüttungen</u>	50
4.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	50
4.2 Versuchsauswertung	54
4.3 Versuchsergebnisse	55
4.3.1 Einfluß der Lufttemperatur	58
4.3.2 Einfluß der Luftgeschwindigkeit	63
4.3.3 Einfluß der Dicke der Körnerschüttung	65
4.3.4 Einfluß des Anfangsfeuchtegehaltes der Körner	67

	Seite
4.4 Vergleich des mit dem Berechnungsverfahren ermittelten Trocknungsverlaufs mit den experimentellen Ergebnissen	68
4.5 Folgerungen aus den Versuchsergebnissen	70
5. <u>Experimentelle Untersuchung des Trocknungsverhaltens von Körnerschüttungen bei der Querstromtrocknung</u>	73
5.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	73
5.2 Versuchsauswertung	77
5.3 Versuchsergebnisse	78
5.3.1 Einfluß der Lufttemperatur	85
5.3.2 Einfluß der Luftgeschwindigkeit	89
5.3.3 Einfluß der Trocknerbreite	92
5.3.4 Einfluß des Anfangsfeuchtegehaltes der Körner	94
5.4 Folgerungen aus den Versuchsergebnissen	96
6. <u>Experimentelle Untersuchung zur Modifizierung der Querstromtrocknung</u>	99
6.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	99
6.2 Versuchsergebnisse	102
6.2.1 Einstufige Querstromtrocknung mit unterschiedlicher Fließgeschwindigkeit der Körner	102
6.2.2 Zweistufige Querstromtrocknung mit Luftumkehrung	106
6.2.3 Wärmerückgewinnung aus der Abluft	114
6.3 Beurteilung der modifizierten Querstromverfahren	121
7. <u>Folgerungen für die Praxis</u>	124
8. <u>Zusammenfassung</u>	126
9. <u>Schrifttum</u>	129

Formelzeichen

a_{effK}	m^2/s	effektive Temperaturleitfähigkeit des Einzelkorns
a_{effS}	m^2/s	effektive Temperaturleitfähigkeit der Schüttung
A, B		Konstanten
A_{KO}	m^2/kg	spez. Oberfläche der Körner bezogen auf 1 kg Trockenmasse
$A_{\text{s,y}}$	m^2	Fläche der Trocknungszone in s,y-Ebene
$A_{\text{y,z}}$	m^2	Fläche der Trocknungszone in y,z-Ebene
c_{KX}	$\text{kJ}/\text{kg K}$	spez. Wärme des feuchten Korns bezogen auf die Trockenmasse
c_{pD}	$\text{kJ}/\text{kg K}$	spez. Wärme des Wasserdampfes bei konstantem Druck
c_{pL}	$\text{kJ}/\text{kg K}$	spez. Wärme der trockenen Luft bei konstantem Druck
c_{pLX}	$\text{kJ}/\text{kg K}$	spez. Wärme der feuchten Luft bei konstantem Druck
e	kWh/kg	spez. mechanischer Energiebedarf
F/F_1	%	relativer Feuchtklebergehalt bezogen auf Feuchtklebergehalt F_1 der Vergleichsprobe
g_{D}	$\text{kg}/\text{kg min}$	Trocknungsgeschwindigkeit bezogen auf Trockenmasse
h_{L}	kJ/kg	Enthalpie der Luft
L/L_1	%	relativer Lysingehalt bezogen auf Lysingehalt L_1 der Vergleichsprobe
m_{K2}	kg	getrocknete Kornmasse
\dot{m}_{K2}	kg/h	Trockengutdurchsatz
\dot{m}_{L}	kg/h	Luftdurchsatz
m_{TS}	kg	Trockenmasse

m_W	kg	Feuchtemasse (Wasser)
\dot{m}_W	kg/h	zeitlich entzogene Feuchtemasse bzw. Trocknungsleistung
p	N/m^2	Gesamtdruck
p_D	N/m^2	Dampfdruck
$p_{D'}$	N/m^2	Sättigungsdampfdruck
Δp_S	N/m^2	Druckabfall in der Körnerschüttung
q_W	kJ/kg	spez. Wärmebedarf
Δq_W	kJ/kg	spez. Wärmeeinsparung
Q_B	kJ	Wärmemenge zum Abtrennen der gebundenen Feuchte
Q_K	kJ	Wärmemenge, die in den Körnern gespeichert ist
Q_L	kJ	Wärmemenge, die in der Luft gespeichert ist
\dot{Q}_L	kJ/h	Wärmestrom der Luft
Q_X	kJ	Wärmemenge zum Verdunsten der Feuchte
r	kJ/kg	Verdampfungswärme des freien Wassers
r_B	kJ/kg	Bindungswärme des gebundenen Wassers
r_{WB}	kJ/kg	Verdampfungswärme des gebundenen Wassers
R_D	kJ/kg K	Gaskonstante
s	m	Schichthöhe der Körnerschüttung bzw. Trocknerbreite
s_1	m	Schichtdicke der Körnerschüttung im Ausgangszustand
t	min	Zeit
Δt	min	Zeitintervall
$\Delta t_{1,2}$	min	Gesamttrocknungszeit
T	K	absolute Temperatur
T_L	K	absolute Temperatur der Luft

U	%	Feuchtegehalt der Körner
U_1	%	Anfangsfeuchtegehalt
U_2	%	Endfeuchtegehalt
ΔU_2	%	Endfeuchtegehaltsdifferenz
U_G	%	Grenzfeuchtegehalt zwischen gebundener und freier Feuchte
v/v_1	%	relatives spezifisches Backvolumen bezogen auf spez. Backvolumen v_1 der Vergleichsprobe
v_K	m/h	Fließgeschwindigkeit der Körner
Δv_K	m/h	Fließgeschwindigkeitsänderung der Körner
v_{K2}	m/h	Fließgeschwindigkeit der getrockneten Körner
v_L	m/s	Luftgeschwindigkeit
v_{L1}	m/s	Geschwindigkeit der Trocknungsluft
ΔV_S	m ³	Volumenkontraktion der Körnerschüttung
V_{K1}	m ³	Ausgangsvolumen der Körnerschüttung
x_L	kg/kg	Feuchtegrad der Luft
x_{L1}	kg/kg	Feuchtegrad der Trocknungsluft
x_{L2}	kg/kg	Feuchtegrad der Abluft
$x_{L \max}$	kg/kg	maximaler Feuchtegrad der Luft
Δx_L	kg/kg	Wasserdampfaufnahmefähigkeit der Luft
X/X_1	%	Normfarbwertverhältnis bezogen auf Normfarbwert X_1 der Vergleichsprobe
X	kg/kg	Feuchtegrad der Körner
X_1	kg/kg	Anfangsfeuchtegrad
X_2	kg/kg	Endfeuchtegrad
X_G	kg/kg	Grenzfeuchtegrad zwischen gebundenem und freiem Wasser

x_{G1}	kg/kg	Gleichgewichtsfeuchtegrad
y, z		Ortskoordinaten
z_1	m	Höhe der Trocknungszone
α	W/m^2K	Wärmeübergangszahl
ϵ	m^3/m^3	spez. Hohlraumvolumen
η_G		Wirkungsgrad des Gebläses samt Antriebsmotor
ϑ_K	$^{\circ}C$	Korntemperatur
ϑ_L	$^{\circ}C$	Lufttemperatur
ϑ_{LO}	$^{\circ}C$	Temperatur der Frischluft
ϑ_{L1}	$^{\circ}C$	Temperatur der Trocknungsluft
ϑ_{L2}	$^{\circ}C$	Temperatur der Abluft
$\vartheta_{L 1,2}$	$^{\circ}C$	mittlerer Temperaturbereich
$\vartheta_{L \text{ Kühl}}$	$^{\circ}C$	Kühlgrenztemperatur der Trocknungsluft
$\lambda_{\text{eff K}}$	W/mK	effektive Wärmeleitfähigkeit des Einzelkorns
$\lambda_{\text{eff S}}$	W/mK	effektive Wärmeleitfähigkeit der Körnerschüttung
ϱ_K	kg/m^3	Reindichte des Korns
ϱ_L	kg/m^3	Dichte der Luft
ϱ_S	kg/m^3	Schüttdichte
ϱ_{SO}	kg/m^3	Schüttdichte der Trockenmasse
ϱ_{S1}	kg/m^3	Schüttdichte der ungetrockneten Körner
ϱ_{S2}	kg/m^3	Schüttdichte der getrockneten Körner
φ_L	%	relative Feuchte der Luft
φ_{L1}	%	relative Feuchte der Trocknungsluft
φ_{L2}	%	relative Feuchte der Abluft

1. Einleitung

Ährengetreide wird in der Bundesrepublik Deutschland mit Feuchtegehalten zwischen 10 und 25% geerntet, der Feuchtegehalt erntefrischer Maiskörner beträgt 30 bis 45%. Während Ährengetreide in klimatisch günstigen Jahren bereits in lagerfähigem Zustand mit Feuchtegehalten unter 14% geerntet werden kann, müssen erntefrische Maiskörner grundsätzlich konserviert werden. Als Konservierungsmaßnahmen bieten sich, abhängig vom späteren Verwendungszweck des Gutes, biologische und chemische Verfahren sowie Trocknung und Kühlung an. Wird die Konservierung unter dem Aspekt der Produktion von Handelsware durchgeführt, so ist nur eine Konservierung durch Trocknung des Gutes möglich; die anderen Konservierungsverfahren liefern keine handelsfähige Ware.

Zur Trocknung von Getreide werden in landwirtschaftlichen Klein- und Mittelbetrieben vorwiegend diskontinuierlich arbeitende Trockner in Form von Ruheschichttrocknern und Umlauf Trocknern eingesetzt. In landwirtschaftlichen Großbetrieben, Getreideannahmestellen, Mühlen und Lagerhäusern finden überwiegend kontinuierlich betriebene Trockner, sogenannte Durchlauftrockner, Anwendung. Insbesondere Querstromdurchlauftrockner sind aufgrund ihrer einfachen Bauweise sowie ihrer hohen Funktions- und Betriebssicherheit weitverbreitet anzutreffen.

Allerdings weisen Querstromtrockner gegenüber Durchlauftrocknern anderer Bauarten einige verfahrensbedingte Nachteile auf, die sich auf die Effektivität der Trocknung ungünstig auswirken. Die geringe Trocknungsleistung reicht oft nicht aus, die von den Erntemaschinen in einem kurzen Zeitraum anfallenden Feuchtmengen sofort zu trocknen. Insbesondere bei Mais, dem bis zur zehnfachen Wassermenge gegenüber Getreide entzogen werden muß, hat dies zur Folge, daß die Ernte entweder nicht zum optimalen Zeitpunkt erfolgen kann oder eine Zwischenlagerung des hochfeuchten Gutes oft über mehrere Tage hinweg notwendig ist. Dabei können erhebliche Trockenmasseverluste durch Atmungsreaktionen sowie Qualitätsminderungen durch die Tätigkeit von Mikroorganismen auftreten.

Da die Querstromtrocknung ein sehr energieintensives Trocknungsverfahren ist, führt jeder Anstieg der Energiepreise zu einer entsprechenden Erhöhung der Trocknungskosten. Geht man beispielsweise davon aus, daß zur Trocknung von 1 dt Mais bis zu 10 l Heizöl benötigt werden, so entstehen Energiekosten in Höhe von mehr als 10% des derzeitig zu erreichenden Verkaufserlöses des Gutes.

Die Forderung nach gleichmäßiger Trocknung auf lagerfähigen Zustand, sowie die Erhaltung biologischer und technologischer Korneigenschaften abhängig vom nachfolgenden Verwendungszweck des Gutes lassen sich bei der Querstromtrocknung verfahrensbedingt nur teilweise realisieren. Darüber hinaus führen unzulängliche Trocknerkonstruktionen sowie unsachgemäße Bedienung der Querstromtrockner zu Qualitätsminderungen des Trocknungsgutes. Die Qualität des getrockneten Gutes entspricht daher oft nicht mehr den gestiegenen Anforderungen der weiterverarbeitenden Industrie an den Rohstoff Getreide.

Aus diesen Mängeln der Querstromtrocknung resultiert die Forderung nach einer Verbesserung des Trocknungsverfahrens. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, Möglichkeiten zu ermitteln, durch die die verfahrensbedingten Nachteile des Querstromverfahrens ganz oder teilweise beseitigt werden können. Die Ergebnisse sollen aufzeigen, inwieweit durch eine Variation der das Trocknungsverhalten beeinflussenden Trocknungsparameter und durch eine Modifikation des Querstromverfahrens Verbesserungen der Trocknung zu erreichen sind.

1.1 Bisherige Arbeiten zur Querstromtrocknung

Die zur Querstromtrocknung vorliegenden theoretischen Untersuchungen gehen überwiegend von der modellhaften Vorstellung aus, daß in einem Querstromtrockner die bewegte Körnerschüttung als quasistationär betrachtet werden kann, falls keine Relativbewegung der Körner innerhalb der Schüttung stattfindet. Unter dieser Voraussetzung werden dann die bei der Ruheschichttrocknung ermittelten Erkenntnisse entsprechend auf die Querstromtrocknung übertragen [1 bis 13].

Zur Berechnung des Trocknungsverhaltens bei der Querstromtrocknung entwickelte Thompson [1, 2] ein mathematisches Modell, das auf empirischen Gleichungsansätzen der Einzelkorntrocknung aufbaut. Bakker-Arkema et al. [3, 4] beschreiben die Trocknungsvorgänge mittels eines Systems gekoppelter Differentialgleichungen, die auf den Grundgesetzen der Wärme- und Stoffübertragung beruhen und geben dafür Näherungslösungen an. Da die beiden Berechnungsmodelle für die Trocknung von Mais mit Feuchtegehalten unter 25% entwickelt wurden, besitzen sie keine allgemeine Gültigkeit. Gleiches gilt für die weiteren Arbeiten [5 bis 13], die unter Verwendung der beiden Trocknungsmodelle den Einfluß verschiedener Faktoren auf die Querstromtrocknung untersuchten.

Experimentelle Arbeiten zur Querstromtrocknung liegen nur von Converse [14], Noyes [15], Lerew et al. [16] sowie Meiering und Höfkes [17] vor, die in Einzelversuchen das Trocknungsverhalten von Maiskörnern mit Anfangsfeuchtegehalten unter 25% in einem konventionellen Schachttrockner sowie in einem Zweistufentrockner mit Luftumkehr untersuchten und beide Bauarten miteinander verglichen. Die dabei gewonnenen Ergebnisse wurden in erster Linie zur Überprüfung der mathematischen Trocknungsmodelle herangezogen; eine Untersuchung der Qualitätsveränderung des Gutes durch die Trocknung wurde nicht vorgenommen.

Berücksichtigt man die Ähnlichkeit des Trocknungsverhaltens zwischen Querstrom- und Ruheschichttrocknung, so können die zur Beschreibung der Ruheschichttrocknung entwickelten mathematischen Ansätze ergänzend auf die Querstromtrocknung übertragen werden [18 - 30]. Dabei sind insbesondere die Arbeiten von Klapp [18] und Hukill [19] von grundlegender Bedeutung. Vergleiche der berechneten Trocknungsverlaufskurven mit experimentell ermittelten Ergebnissen zeigten bei Feuchtegehalten des Gutes unter 25% teilweise gute Übereinstimmung. Für höhere Feuchtegehalte, wie sie insbesondere bei der Ernte von Mais in der Bundesrepublik Deutschland vorkommen, liegen keine vergleichenden Untersuchungen vor.

Da in den von verschiedenen Autoren durchgeführten Arbeiten zur Querstrom- und Ruheschichttrocknung der Einfluß der Trocknungs- und Stoffparameter nur unvollständig und bei jeweils unterschiedlichen Trocknungsbedingungen untersucht wurde, können die Ergebnisse nicht für eine umfassende Betrachtung der Trocknung herangezogen werden. Aus diesem Grund soll in der vorliegenden Arbeit in einer theoretischen und experimentellen Untersuchung das Trocknungsverhalten von Getreide bei der Ruheschicht- und der Querstromtrocknung ermittelt werden.

1.2 Aufgabenstellung und Methodik

In einer theoretischen Betrachtung soll untersucht werden, inwieweit ähnliches Trocknungsverhalten zwischen der Ruheschicht- und der Querstromtrocknung besteht, um die Anzahl der aufwendigen experimentellen Untersuchungen der Querstromtrocknung durch ergänzende Versuche bei der Ruheschichttrocknung reduzieren zu können. Zur Vorausberechnung des Trocknungsverhaltens beider Verfahren soll ein Berechnungsverfahren aufgestellt werden, das das Trocknungsverhalten des Einzelkorns berücksichtigt und auf den Wärme- und Stoffbilanzen für die Trocknung von Körnerschüttungen aufbaut.

Die experimentellen Untersuchungen der Ruheschicht- und der Querstromtrocknung sollen mit Weizen und Mais bei konstanten Trocknungsbedingungen vorgenommen werden. Um den Einfluß unterschiedlicher Trocknungs- und Stoffparameter auf die Trocknung zu erfassen, sollen Versuchsreihen durchgeführt werden, bei denen jeweils nur einer der Parameter verändert wird. Hierfür wird in halbertechnischem Maßstab ein Ruheschicht- und ein Querstromtrockner gebaut, bei dem die Trocknungsparameter Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit und Dicke der Körnerschüttung bzw. Trocknerbreite variiert werden können. Zur Beurteilung der Trocknung werden die Trocknungskenngrößen Trocknungsleistung, thermischer und mechanischer Energiebedarf, Gleichmäßigkeit der Trocknung und Qualität des Trocknungsgutes herangezogen. Die Bewertung der Qualität erfolgt bei Weizen mit den für Backweizen geltenden Qualitätskriterien, bei Mais mit den entsprechenden für Futtermais.

Die Versuchsergebnisse sollen aufzeigen, in welcher Art und Weise die untersuchten Einflußgrößen das Trocknungsverhalten der Körnerschüttung beeinflussen und inwieweit durch eine Variation der Trocknungsparameter eine Verbesserung der Trocknung möglich ist. Darüber hinaus sollen die Versuchsergebnisse zur Überprüfung des Berechnungsverfahrens verwendet werden.

Aufbauend auf den bei der Ruheschicht- und Querstromtrocknung gewonnenen Erkenntnissen wird versucht, durch konstruktive und verfahrenstechnische Maßnahmen die verfahrensbedingten Nachteile der Querstromtrocknung ganz oder teilweise zu beheben. Insbesondere soll untersucht werden, ob dies durch unterschiedliche Fließgeschwindigkeiten der Körnerschüttung im Trockner oder durch eine zweistufige Trocknung mit Luftumkehrung erreicht werden kann. Für die experimentellen Untersuchungen wird der Querstromtrockner entsprechend umgebaut. Weiter sollen verschiedene Möglichkeiten untersucht werden, inwieweit durch Wärmerückgewinnung aus der Abluft der Wärmebedarf bei der Trocknung reduziert werden kann. Die dazu notwendigen experimentellen Untersuchungen werden mit einem zweistufigen Quer-

stromtrockner vorgenommen, der mit einem Wärmerückgewinnungssystem versehen wird.

2. Allgemeine Betrachtung der Trocknung von Körnerfrüchten

2.1 Charakterisierung des Trocknungsgutes

Die umfassende Kenntnis der Eigenschaften des Getreidekorns sowie der Körnerschüttung und ihrer Veränderung während der Trocknung ist Grundlage der Entwicklung und Berechnung von Trocknungsverfahren für Getreide. Im folgenden sollen aus diesem Grunde die für die Trocknung wichtigen biologischen, chemischen und physikalischen Eigenschaften des Trocknungsgutes charakterisiert werden.

Getreide wird in der Bundesrepublik Deutschland überwiegend mit dem Mähdrescher geerntet und fällt daher in Form von Körnerschüttungen zur Weiterverwendung an. Der Feuchtegehalt des Getreides bei der Ernte ist abhängig von der Gutart und den während der Ernteperiode herrschenden Witterungsbedingungen. Das in den Sommermonaten geerntete Ährengetreide besitzt bei der Ernte Feuchtegehalte zwischen 10 und 25%, der Feuchtegehalt des im Herbst geernteten Maises liegt zwischen 30 und 45%¹⁾. Eine sichere Lagerung des Getreides ohne die Gefahr des Verderbs durch Mikroorganismen oder durch zu hohe Trockenmasseverluste durch die Atmungstätigkeit der Körner ist nur

1) Der Feuchtegehalt U gibt das Verhältnis der Feuchtemasse m_W zur Masse des gesamten Gutes an [31]:

$$U = \frac{m_W}{m_W + m_{TS}} \quad (1)$$

Da zwischen dem Feuchtegehalt U und der Feuchtemasse m_W kein linearer Zusammenhang besteht, ist daneben der Feuchtegrad X definiert, für den gilt:

$$X = \frac{m_W}{m_{TS}} \quad (2)$$

gegeben, wenn der Feuchtegehalt der Körner $U_2 < 14\%$ ($X_2 < 0,163$) ist. Dies hat folgende Ursachen:

Getreidekörner gehören aufgrund ihres inneren Aufbaus zu den hygroskopischen Materialien. Bei diesen Stoffen findet bei Feuchtegehalten unterhalb des hygroskopischen Grenzfeuchtegehaltes eine Dampfdruckabsenkung der im Stoff gebundenen Flüssigkeit gegenüber dem Sättigungsdampfdruck einer ungebundenen Flüssigkeit statt. Ein solcher Stoff nimmt aus der ihn umgebenden Luft abhängig von Temperatur und relativer Feuchte der Luft sowie vom Feuchtegehalt des Stoffes entweder Feuchte auf oder gibt sie an diese ab, bis sich der Dampfdruck der in dem Stoff enthaltenen Feuchte mit dem der umgebenden Luft im Gleichgewicht befindet. Der Zusammenhang zwischen dem Feuchtegehalt des Stoffes und der relativen Feuchte der Luft im Gleichgewichtszustand läßt sich bei konstanter Temperatur durch die Sorptionsisothermen beschreiben, wie sie beispielhaft für Mais in Bild 1 dargestellt sind. Ergänzend wurden in dieses Bild die Bereiche eingezeichnet, bei denen die verschiedenen, für den Verderb des Getreides verantwortlichen Mikroorganismen lebensfähig sind.

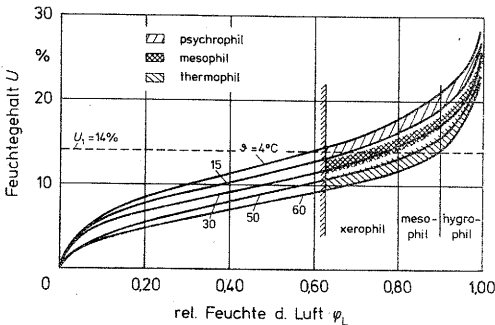


Bild 1: Sorptionsisothermen von Mais [32] mit den eingezeichneten Bereichen für das Wachstum verschiedener Mikroorganismengruppen [33]

Wie aus dem Bild ersichtlich wird, ist bei einer relativen Feuchte $\varphi_L < 65\%$ nicht mehr mit dem Wachstum der verschiedenen Mikroorganismengruppen zu rechnen. Bei Feuchtegehalten der Körner unter 14% und den in der Bundesrepublik Deutschland herrschenden Lagerungstemperaturen unter 15°C ist also eine langfristige sichere Lagerung gewährleistet.

Die Reduzierung des Feuchtegehaltes auf $U \leq 14\%$ bewirkt neben der sicheren Lagerfähigkeit eine Verringerung der Trockenmasseverluste. Da es sich bei Getreidekörnern um lebende Organismen handelt, findet ein Atmungsvorgang statt, dessen Intensität sehr stark mit zunehmendem Feuchtegehalt und Temperatur der Körner ansteigt. Dabei werden die in den Körnern enthaltenen Kohlehydrate Stärke und Zucker unter Sauerstoffaufnahme in Kohlendioxid und Wasser zersetzt, wobei gleichzeitig beträchtliche Wärme produziert wird. Außer der Abnahme der Trockenmasse der Körner führte dieser Vorgang in der Körnerschüttung sowohl zu einer Zunahme der Atmungsaktivität der Körner als auch zu einer Verbesserung der Lebensbedingungen der Mikroorganismen.

Bei der Trocknung mit hohen Lufttemperaturen $\vartheta_{Ll} > 80^\circ\text{C}$ kann durch die Einwirkung der Wärme in Verbindung mit dem Feuchteentzug aus den Körnern die Atmungsaktivität verringert und der Mikroorganismenbesatz herabgesetzt werden [34]. Allerdings besteht dabei die Gefahr, daß durch die hohen Temperaturen die Qualität und Quantität der Korninhaltsstoffe Proteine, Kohlehydrate und Fette verringert wird. Außerdem können die technologischen Eigenschaften der Körner verändert werden.

Die physikalischen Stoffeigenschaften von Getreide sind in erster Linie abhängig vom Feuchtegehalt und der Temperatur der Körner. Weiter können Sorte, Erntejahr, Standort und Düngung usw. zu teilweise erheblichen Veränderungen der Stoffeigenschaften führen. Diese sollen jedoch im Rahmen dieser Betrachtung unberücksichtigt bleiben.

Die Bindung der Feuchte in den Getreidekörnern erfolgt nach Lykow [35] durch physikalisch-mechanische sowie durch physikalisch-chemische Bindung. Eine physikalisch-mechanische Feuchtebindung liegt bei Getreidekörnern infolge fehlender Kapillaren nur als Benetzungsfeuchte vor. Dabei haftet die Feuchte durch unmittelbare Berührung an der Oberfläche des Gutes. Die Bindungskraft ist die Oberflächenspannung der anhaftenden Feuchte. Bei einer Trocknung verhält sich die so gebundene Feuchte wie freies Wasser. Zum Verdunsten dieser Feuchte ist nur die Verdampfungswärme des freien Wassers zuzuführen, für die im Temperaturbereich $0 \leq \vartheta_L \leq 150^\circ\text{C}$ folgende Beziehung gilt [36]:

$$r = 2500,5 - 2,43 T \quad (3)$$

Bei einer physikalisch-chemischen Bindung unterscheidet man zwischen der gebundenen und der freien Feuchte im Korn. Als freie Feuchte wird die im Korn enthaltene Flüssigkeitsmenge bezeichnet, zu deren Verdunstung im wesentlichen nur die Verdampfungswärme des Wassers zuzuführen ist. Freie Feuchte liegt in den Getreidekörnern nur bei Feuchtegehalten über ca. 19% vor. Bei Weizen beträgt der Grenzfeuchtegehalt etwa $U_G = 22,7\%$ ($X_G = 0,294$), bei Mais etwa $U_G = 22,2\%$ ($X_G = 0,285$) [37]. Unterhalb dieser Werte liegt die Feuchte in den Körnern nur in gebundener Form vor. Zum Verdunsten dieser gebundenen Feuchte ist zusätzlich zur Verdampfungswärme r des freien Wassers noch die Bindungswärme r_{WB} zum Abtrennen der adsorptiv gebundenen Wassermoleküle erforderlich:

$$r_{WB} = r + r_B \quad (4)$$

Zur Berechnung der Verdampfungswärme r_{WB} der gebundenen Feuchte in Abhängigkeit vom Feuchtegrad der Körner geben Thompson und Shedd [38] den Ansatz an:

$$r_{WB} = A e^{-BX} r \quad (5)$$

Für die Stoffkonstanten A und B wurden für Weizen und Mais die folgenden Werte experimentell ermittelt [38]:

Weizen: A = 23,0 B = 40,0
 Mais : A = 4,348 B = 28,25

Die spezifische Wärme von Getreide in Abhängigkeit vom Feuchtegrad der Körner ist für Weizen und Mais in Tafel 1 zusammengestellt. Da sich die spezifische Wärme außerdem temperaturabhängig verändert, wird die mittlere spezifische Wärme der Körner angegeben, die für einen größeren Temperaturbereich gültig ist.

Um den während des Trocknungsprozesses auftretenden Wärmestrom und den Temperaturverlauf im Gut berechnen zu können, müssen die Werte für die Wärmeleitfähigkeit des Gutes bekannt sein. In Tafel 2 sind diese für das Einzelkorn und die Körnerschüttung von Weizen und Mais zusammengestellt [40, 41]. Während für das Einzelkorn von Mais von Scherer [41] temperatur- und feuchteabhängige Gleichungen vorliegen, sind für das Einzelkorn von Weizen derzeit noch keine Werte vorhanden, da aufgrund der geringen Korngröße das Weizenkorn einer Messung bislang nicht zugänglich ist.

Gutart	Sorte	mittl. spez. Wärme kJ/kg K	Gültigkeitsbereich	
			Temperatur °C	Feuchtegrad
Weizen	Caribo	$c_{KX} = 1,276 + 4,916 X$	$\vartheta_{L1,2} = 10-50$	$0 \leq X \leq 0,37$
Mais	Velox	$c_{KX} = 1,294 + 4,734 X$	$\vartheta_{L1,2} = 10-60$	$0 \leq X \leq 1,0$
	Brillant	$c_{KX} = 1,247 + 4,527 X$	$\vartheta_{L1,2} = 10-60$	$0 \leq X \leq 1,0$
	Inrakorn	$c_{KX} = 1,293 + 4,553 X$	$\vartheta_{L1,2} = 10-60$	$0 \leq X \leq 1,5$

Tafel 1: Gleichungen zur Berechnung der mittleren spezifischen Wärme von Weizen- und Maiskörnern abhängig vom Feuchtegrad der Körner [39]

Gutart	Wärmeleitfähigkeit λ_{eff} W/m K	Gültigkeitsbereich	
		Temperatur °C	Feuchtegehalt %
<u>Weizen</u> Einzelkorn Schüttung	- $\lambda_{\text{effS}} = 0,117 + 1,132 \cdot 10^{-3} U$	- $\vartheta_{L1,2} = 20-50$	- $1 \leq U \leq 20$
<u>Mais</u> Einzelkorn Schüttung	$\lambda_{\text{effK}} = 0,080 + 5,84 \cdot 10^{-3} U$ $\lambda_{\text{effS}} = 0,108 + 1,8 \cdot 10^{-3} U$	$\vartheta_{L1,2} = 5-60$	$8 \leq U \leq 45$

Tafel 2: Zusammenstellung der Wärmeleitfähigkeit von Weizen und Mais abhängig vom Feuchtegehalt der Körner [40, 41]

Die mechanischen Stoffeigenschaften und die geometrischen Kenngrößen von Weizen- und Maiskörnern wurden in einer neueren Arbeit von Scherer und Kutzbach [42] untersucht. Sie sind in Tafel 3 in Form von Gleichungen dargestellt, die eine formelmäßige Abhängigkeit der Stoffkennwerte vom Feuchtegrad der Körner wiedergeben. Die Gleichungen sind zwar sortenspezifisch nur für eine Weizen- bzw. Maissorte zutreffend, jedoch wurde festgestellt, daß die funktionalen Zusammenhänge zwischen den mechanischen Stoffeigenschaften und dem Feuchtegrad bei den untersuchten Körnerfrüchten im wesentlichen einander ähnlich sind. Eine Vernachlässigung des Einflusses des Feuchtegrades der Körner auf die mechanischen Stoffkennwerte, wie verschiedentlich in der Literatur bei der Berechnung von Trocknungsverfahren angewandt, führt insbesondere bei höherem Feuchtegrad zu teilweise erheblichen Abweichungen.

Stoffeigenschaften		Weizen	Mais
Kornlänge	L_K mm	$L_K = 6,1 + 0,12 X$	$L_K = 9,8 + 1,31 X$
Kornbreite	B_K mm	$B_K = 3,6 + 0,40 X$	$B_K = 8,5 + 1,26 X$
Korndicke	D_K mm	$D_K = 3,1 + 0,24 X$	$D_K = 4,8 + 1,06 X$
Äquiv.Kugeldurchmesser	d_K mm	$d_K = 4,8 + 1,32 X$	$d_K = 7,0 + 2,05 X$
Mittl.Kornmasse	m_K g	$m_K = 0,0419+0,041 X$	$m_K = 0,23+0,22 X+0,02 X^2$
Mittl.Kornvolumen	V_K cm ³	$V_L = 0,0296+0,034 X$	$V_K = 0,175+0,18X+0,03 X^2$
Reindichte	ρ_K kg/m ³	$\rho_K = 1413 - 193,4 X$	$\rho_K = 1353-179,4X+78,4 X^2$
Schüttdichte	ρ_S kg/m ³	$\rho_S = 775+231,9X-1324X^2$	$\rho_S = 661,4+204X-1301 X^2 + 630,1 X^3$
Hohlraumvolumen	ϵ_S m ³ /m ³	$\epsilon_S = 0,446-0,14X+0,605X^2$	$\epsilon_S = 0,513-0,11X+0,48 X^2 -0,56 X^3$

Tafel 3: Mechanische Stoffeigenschaften von Weizen- und Maiskörnern in Abhängigkeit vom Feuchtegrad [42]

	Weizen	Mais
Sorte:	Jubilar 1975	Inrakorn 1974
Gültigkeitsbereich	$0,05 \leq X \leq 0,25$	$0,05 \leq X \leq 0,85$

2.2 Anforderungen an ein Trocknungsverfahren für Getreide

Die Aufgabe der Trocknung von Getreide besteht in einer Verminderung des Feuchtegehaltes der Körner bis zum lagerfähigen Endfeuchtegehalt unter Erhaltung der Kornqualität. Dies mit möglichst geringem Aufwand zu erreichen, ist das Ziel der verschiedenen Trocknungsverfahren. Die dazu notwendigen verfahrenstechnischen Anforderungen an ein Trocknungsverfahren für Getreide sind in erster Linie eine maximale Trocknungsleistung bei gleichzeitigem minimalem thermischem und mechanischem Energiebedarf, eine gleichmäßige Trocknung aller Körner auf lagerfähigen Zustand sowie die Erhaltung der Kornqualität abhängig vom späteren Verwendungszweck des Gutes. Die Abhängigkeit dieser Trocknungskenngrößen von den Trocknungsbedingungen wird in Kap. 2.2.1 bis 2.2.4 aufgezeigt.

Darüber hinaus wird von der Trocknungsanlage gefordert, daß sie funktions- und betriebssicher arbeitet sowie den gesetzlichen Vorschriften für den Bau und Betrieb von Trocknungsanlagen entspricht [43]. Der Arbeitsablauf beim Trocknen muß so geplant sein, daß er dem des Gesamtbetriebes angepaßt ist; der Arbeitsaufwand zum Betreiben, Überwachen und Warten des Trockners sollte gering gehalten werden. Weiter sollten die Gesamtkosten für die Trocknung, die sich aus den Energiekosten, Kapitalkosten, Arbeitskosten sowie den Kosten für Reparatur und Wartung zusammensetzen, möglichst gering sein.

2.2.1 Trocknungsleistung

Die Trocknungsleistung ist definiert als diejenige Feuchtemasse \dot{m}_W , die in einer Zeiteinheit aus dem zu trocknenden Gut entzogen wird [31]. Sie kann nach folgender Beziehung berechnet werden:

$$\dot{m}_W = m_{TS} \frac{dX}{dt} \quad (6)$$

Mit dX/dt wird in Gl. (6) die Trocknungsgeschwindigkeit des zu trocknenden Gutes bezeichnet, die das Trocknungsverhalten eines Stoffes abhängig von den verschiedenen Trocknungs- und Stoffparametern charakterisiert; m_{TS} gibt die Trockenmasse des zu trocknenden Gutes an. Eine Steigerung der Trocknungsleistung ist nach Gl. (6) durch eine Erhöhung der Trocknungsgeschwindigkeit sowie durch eine größere Gutmenge möglich.

Bei der Trocknung dünner Körnerschüttungen ($s = d_K$) kann die Trocknungsgeschwindigkeit in erster Linie durch eine Erhöhung der Temperatur der Trocknungsluft vergrößert werden. Allerdings ist die Erhöhung der Trocknungslufttemperatur dadurch begrenzt, daß eine thermische Schädigung der Körner vermieden werden muß. Eine Vergrößerung der Trocknungsgeschwindigkeit durch einen erhöhten Luftdurchsatz ist nur möglich, wenn damit der Stoffübergang zwischen der Kornoberfläche und der Trocknungsluft vergrößert werden kann. Darüber hinaus limitiert

der temperaturabhängige Feuchtetransport vom Korninnern an die Kornoberfläche den Trocknungsvorgang.

Letzteres trifft jedoch nur bedingt auf die Trocknung dicker Körnerschüttungen ($s \gg d_K$) zu. Bei diesen Körnerschüttungen, die in ruhendem oder bewegtem Zustand sämtliche praxisangewandten Trocknungsverfahren charakterisieren, kann die Trocknungsleistung durch eine Erhöhung des Wärmestromes \dot{Q}_L gesteigert werden. Wird idealisiert angenommen, daß die in der Trocknungsluft enthaltene Wärme vollständig zur Verdunstung der Feuchte aus dem Gut genutzt werden kann, ergibt sich für die Trocknungsleistung:

$$\dot{m}_W = \frac{\dot{Q}_L}{r_{WB}} \quad (7)$$

Wie aus der Gleichung für den Wärmestrom \dot{Q}_L :

$$\dot{Q}_L = \dot{m}_L c_{pLX} (s_{L1} - s_{L0}) \quad (8)$$

zu ersehen ist, bedingen sowohl die Erhöhung des Luftdurchsatzes \dot{m}_L als auch der Trocknungslufttemperatur s_{L1} einen höheren Wärmestrom \dot{Q}_L und dementsprechend höhere Trocknungsleistungen.

Eine andere Möglichkeit zur Charakterisierung der Trocknungsleistung ist die Gesamttrocknungszeit $\Delta t_{1,2}$, die angibt, wie lange eine Körnerschüttung der Masse m_{K2} benötigt, um vom Anfangsfeuchtegrad X_1 auf den Endfeuchtegrad X_2 zu trocknen:

$$\Delta t_{1,2} = \frac{m_{K2} r_{WB} (X_1 - X_2)}{\dot{Q}_L (1 + X_2)} \quad (9)$$

Wie Gl. (9) zeigt, ist bei gleicher Trockengutmasse m_{K2} die Gesamttrocknungszeit durch eine Erhöhung des Wärmestromes \dot{Q}_L zu verkürzen. Sie wird verlängert durch zunehmende Anfangsfeuchtegrade bzw. abnehmende Endfeuchtegrade des Gutes.

2.2.2 Energiebedarf

Der Energiebedarf bei der konvektiven Trocknung setzt sich zusammen aus dem Bedarf an thermischer Energie zum Verdunsten der Feuchte und dem Bedarf an mechanischer Energie zum Antrieb des Gebläses zur Erzeugung des Luftstromes.

Der für die Trocknung notwendige thermische Energie- bzw. Wärmebedarf setzt sich zusammen aus dem Wärmebedarf für den eigentlichen Trocknungsvorgang und den Wärmeverlusten im Wärmetauscher, durch Abstrahlung, in der Abluft und in Form von Abwärme in den getrockneten, erwärmten Körnern. Der spezifische Wärmebedarf gibt an, welche Wärmemenge bei einem Trocknungsverfahren erforderlich ist, um 1 kg Feuchte aus dem zu trocknenden Gut zu entfernen:

$$q_W = \frac{Q_L}{m_W} \quad (10)$$

Betrachtet man den spezifischen Wärmebedarf von konventionellen Trocknungsanlagen, der je nach angewandtem Trocknungsverfahren 4 000 bis 8 000 kJ/kg beträgt [44], so zeigt es sich, daß diese Werte infolge der Wärmeverluste wesentlich über der Verdampfungswärme des entzogenen Wassers liegen ($r_{WB} = 2\,400 - 2\,800$ kJ/kg). Dadurch verringert sich auch entsprechend die Trocknungsleistung in Gl. (7) bzw. erhöht sich die Gesamttrocknungszeit in Gl. (9), die dort für ideale Bedingungen dargestellt sind.

Um den spezifischen Wärmebedarf bei der Trocknung zu senken, bieten sich verschiedene Möglichkeiten an:

- Erhöhung der Temperatur der Trocknungsluft, wodurch nach Gl. (4) die Verdampfungswärme des Wassers gesenkt werden kann. Gleichzeitig ist damit eine Steigerung der Trocknungsleistung verbunden.

- Vollständige Sättigung der Abluft. Damit läßt sich die Wasserdampfaufnahmefähigkeit der Trocknungsluft vollkommen zur Trocknung nutzen. Dies kann entweder durch eine geeignete Luftführung oder durch eine Verringerung des Luftdurchsatzes erreicht werden, wobei letzteres allerdings mit einer Senkung der Trocknungsleistung verbunden ist.
- Gleichmäßige Trocknung der Körner auf lagerfähigen Endfeuchtegehalt. Eine Übertrocknung der Körner erfordert einen höheren Wärmebedarf für die zusätzlich zu entziehende Feuchte sowie für die höhere Bindungswärme des Wassers bei den niedrigeren Feuchtegehalten.
- Reduzierung der Wärmeverluste durch Wärmeisolation von Teilen der Trocknungsanlage. Weiter sollten die Trocknungsanlagen zur Verhinderung von Leckverlusten der Trocknungsluft luftdicht sein.
- Verzicht auf Wärmetauscher, d.h. Direktbeheizung der Trocknungsanlage mittels Rauchgas-Luft-Gemisch. Dies ist jedoch aus Qualitätsgründen nur möglich, wenn keine qualitätsmindernde Schadstoffablagerung aus dem Rauchgas auf dem Trocknungsgut erfolgt [45].
- Wärmerückgewinnung aus der Abluft sowie aus den getrockneten warmen Körnern. Die Wärmerückgewinnung aus den getrockneten Körnern erfolgt vorwiegend dadurch, daß die beim Abkühlen der Körner sich erwärmende Kühlluft als vorgewärmte Frischluft dem Lufterhitzer der Trocknungszone zugeführt wird. Zur Wärmerückgewinnung aus der Abluft der Trocknungszone sind verschiedene Verfahren möglich, die ausführlich in Kap. 6.2.3 dargestellt sind.

Neben der thermischen Energie wird bei der konvektiven Trocknung mechanische Energie für den Gebläseantrieb benötigt. Allerdings ist ihr Anteil am gesamten Energiebedarf mit etwa 5 - 8% [46,47] als wenig bedeutend anzusehen. Für die Berechnung des spezifischen mechanischen Energiebedarfs bezogen auf 1 kg entzogenes Wasser gilt:

$$e = \frac{\Delta p_S}{\Delta x_L \cdot \rho_L \cdot \eta_G} \quad (11)$$

mit: $\Delta p_S = f(h, v_L^2)$

Um den mechanischen Energiebedarf niedrig zu halten, sollte der Druckabfall Δp_S in der Schüttung möglichst gering und die Wasserdampfaufnahmefähigkeit der Luft sowie der Gebläsewirkungsgrad möglichst hoch sein. Während die zweite Forderung in Einklang mit einer Senkung des thermischen Energiebedarfes steht, ist eine Reduzierung des Druckabfalls in der Körnerschüttung nur durch geringere Dicken der Körnerschüttung oder durch eine Verringerung der Luftgeschwindigkeit möglich. Damit verbunden ist allerdings eine Abnahme der Trocknungsleistung oder ein höherer Wärmebedarf.

2.2.3 Gleichmäßigkeit der Trocknung

Das Ziel der Getreidetrocknung ist eine sichere Konservierung der Körner, um sie während der anschließenden Weiterverarbeitung oder Lagerung vor Verderb zu schützen. Dazu ist es erforderlich, sämtliche Körner auf einen lagerfähigen Feuchtegehalt von $U_2 = 14\%$ ($X_2 = 0,163$) zu trocknen. Körner mit höheren Feuchtegehalten sind während der Lagerung Ausgangspunkt für eine Verminderung der Kornqualität durch Mikroorganismen-tätigkeit. Außerdem führen höhere Feuchtegehalte der Körner infolge verstärkter Enzymaktivitäten zu erhöhten Substanzverlusten während der Lagerungsdauer. Um dies zu verhindern, muß bei der Trocknung für eine gleichmäßige Trocknung aller Körner gesorgt werden. Dies kann dadurch erreicht werden, daß alle Körner gleich lange der Trocknungsluft unterschiedlichen Zustandes ausgesetzt werden, wie dies bei der Gleich- und der Gegenstromtrocknung der Fall ist. Bei den anderen Trocknungsverfahren wie bei der Ruheschicht- und der Querstromtrocknung

sind dazu aufwendigere Maßnahmen wie beispielsweise Mischeinrichtungen im Trockner oder eine Umkehr der Strömungsrichtung der Trocknungsluft erforderlich.

2.2.4 Qualität des getrockneten Gutes

Die Auswahl eines Trocknungsverfahrens muß in erster Linie unter dem Aspekt erfolgen, daß durch die Trocknung ein Produkt erzielt werden kann, welches den jeweils gestellten Qualitätsanforderungen gerecht wird. Die Qualitätskriterien bei der Trocknung von Getreide sind vor allem abhängig von der Gutart und vom anschließenden Verwendungszweck des Gutes wie beispielsweise für die menschliche oder tierische Ernährung. Tafel 4 zeigt die Beurteilungskriterien für Weizen, der als Backweizen Verwendung findet, sowie für Mais, welcher zur tierischen Ernährung verwendet wird.

Die Verminderung der Kornqualität während der Trocknung entsteht durch hohe Korntemperaturen, die zu lange auf das Korn einwirken. In Verbindung mit dem Feuchtegehalt der Körner hat eine unzulässig lange Korntemperatur-Einwirkzeit zur Folge, daß im Korninnern irreversible biochemische Reaktionen ablaufen, die zu einer Schädigung der thermisch weniger resistenten Korninhaltsstoffe führen. So werden die Backeigenschaften von Weizen entscheidend von der Quellfähigkeit des nativen Proteins beeinflusst, das sehr temperaturempfindlich ist [48]. Ähnliches gilt für den zur tierischen Ernährung verwendeten Mais, bei dem die Proteine temperaturbegrenzend wirken. Insbesondere die essentielle Aminosäure Lysin reagiert sehr negativ auf erhöhte Temperatureinwirkungen [49]. Bild 2 zeigt die in ein Korntemperatur-Einwirkzeit-Diagramm eingezeichneten Schädigungsgrenzen von Backweizen und Futtermais, wobei als Qualitätskriterien bei Weizen das spezifische Backvolumen und bei Mais die Aminosäure Lysin zugrunde gelegt wurden [48, 49]. Liegen nun Korntemperatur-Zeit-Kurven von Trocknungsverfahren unterhalb der

Schädigungsgrenze, so kann mit Sicherheit angenommen werden, daß keine trocknungsbedingte Schädigung des Backvolumens bzw. des Lysingehaltes vorliegt.

Gutart	Verwendungszweck	Qualitätskriterien
Weizen	Brotgetreide	Mahlbarkeit Wasseraufnahmefähigkeit des Mehles Teigausbeute maschinelle Verarbeitungseigenschaften des Teiges Volumen und Aussehen des Gebäcks
Mais	Futtermittel	Rohnährstoffgehalt Energiegehalt Gehalt an verdaulichem Rohprotein biologische Wertigkeit des Rohproteins

Tafel 4: Beurteilungskriterien für die Qualität von Backweizen und von Futtermais

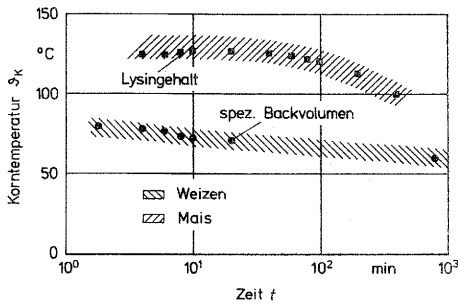


Bild 2: Schädigungsgrenzen bei der Trocknung von Brotgetreide und Futtermais, dargestellt in einem Korntemperatur-Einwirkzeit-Diagramm [48, 49]

Da eine Untersuchung der thermisch bedingten Veränderungen des Backvolumens von Weizen bzw. der essentiellen Aminosäure Lysin im Mais Korn sehr zeit- und kostenaufwendig ist, wurden im Rahmen des dieser Arbeit zugrunde liegenden Forschungsprojektes zwei Schnellmethoden entwickelt, mit denen sich Trocknungsschäden bei Weizen- und Maiskörnern in kurzer Zeit ermitteln lassen [48, 50]. So konnte bei Weizen ein linearer Zusammenhang zwischen dem relativen spezifischen Backvolumen und dem relativen Feuchtklebergehalt festgestellt werden, der als Grundlage für eine Schnellmethode verwendet werden kann, Bild 3. Bei der Trocknung von Maiskörnern mit Lufttemperaturen über 100°C wurde eine Korrelation zwischen der Farbveränderung und der Abnahme des Lysingehaltes der Körner ermittelt. In Bild 4 ist diese Korrelation zwischen dem Normfarbwertverhältnis und dem relativen Lysingehalt dargestellt. Die in Bild 3 und 4 eingezeichneten Meßwerte sind dabei in Prozent bezogen auf die bei einer Lufttemperatur von 20°C getrockneten Vergleichsprobe aufgetragen.

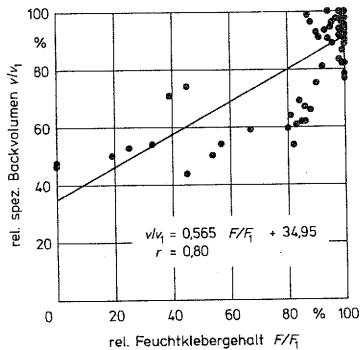


Bild 3: Korrelation zwischen dem relativen spezifischen Backvolumen v/v_1 und dem relativen Feuchtklebergehalt F/F_1 bei der Trocknung von Weizen mit unterschiedlichen Lufttemperaturen und Trocknungszeiten [48].

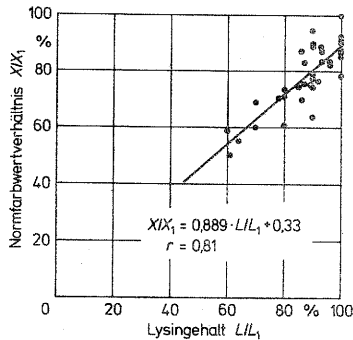


Bild 4: Korrelation zwischen dem relativen Normfarbwertverhältnis X/X_1 und dem relativen Lysingehalt L/L_1 bei der Trocknung von Mais mit unterschiedlichen Lufttemperaturen [50]

2.3 Bauformen von Querstromtrocknern

Bei den zur Trocknung von Getreide eingesetzten kontinuierlich arbeitenden Trocknern unterscheidet man je nach Strömungsrichtung von Gut und Luft zwischen den drei Bauarten Gleich-, Gegen- und Querstromtrocknern. In Gleichstromtrocknern strömen Luft und Gut parallel in gleicher Richtung, während sie in Gegenstromtrocknern parallel in entgegengesetzter Richtung strömen. Bei Querstromtrocknern durchströmt die Luft das Gut unter einem Winkel von 90° zur Bewegungsrichtung des Gutes.

Die Bauformen von Querstromdurchlauf-trocknern lassen sich entsprechend der Anordnung von Trocknungs- und Kühlzone in Flachbehälter-, Schrägbehälter- sowie Hochbehälter- oder Schacht-trockner einteilen, siehe Bild 5. Gemeinsam ist bei sämtlichen Bauformen der Vorratsbehälter für das Feuchtgut, die Trocknungszone sowie die nachgeschaltete Kühlzone zum Abkühlen der Körner.

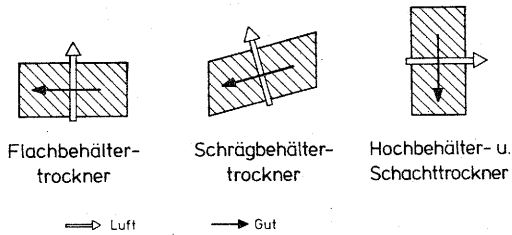


Bild 5: Bauformen von Querstromtrocknern

In Flachbehälter-trocknern wird die Körnerschüttung in waagrechtlicher Richtung mittels mechanischer Fördereinrichtungen wie Bänder, Schnecken oder Schaufelwerke durch den Trockner bewegt und dabei von unten nach oben von der Trocknungsluft durchströmt. Die einfachste und gebräuchlichste Bauart von Flachbehälter-trocknern ist der Schubwendetrockner, Bild 6. Der Transport der 0,5 - 0,6 m hohen Körnerschüttung über den Sieb-lochboden erfolgt durch ein Schaufelwerk mit spiralförmig an-

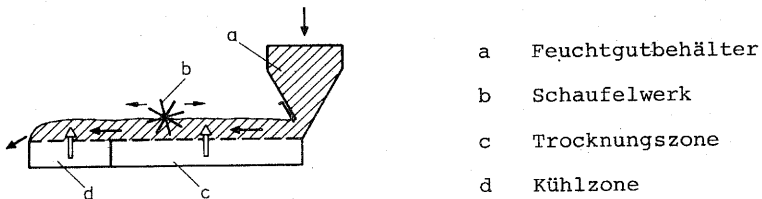
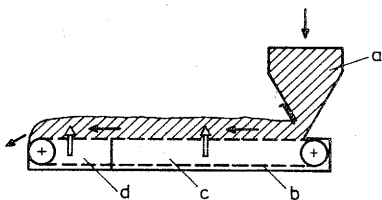


Bild 6: Schubwendetrockner

geordneten Schaufeln, das in der Körnerschüttung hin und her läuft. Dabei wird das Gut schrittweise vorwärts bewegt und zugleich durchmischt, wodurch eine gleichmäßige Trocknung des Gutes erreicht wird. Durch verschiedene Einstellmöglichkeiten

bei der Feuchtgutaufgabe und beim Schaufelwerk können sowohl die Schütthöhe als auch die Verweilzeit des Gutes im Trockner den jeweiligen Erfordernissen angepaßt werden. Für die während des Mischungsvorganges verstärkt auftretende Staubentwicklung ist allerdings ein Staubabscheider unbedingt erforderlich.

Bei Bandtrocknern, Bild 7, wird das Feuchtgut auf ein luftdurchlässiges Band aufgegeben und durchwandert die Trocknungs- und Kühlzone ohne Durchmischung der Körnerschüttung, wodurch die Körner sehr ungleichmäßig getrocknet werden. Am Bandende wird das getrocknete Gut selbsttätig abgeworfen. Um eine gleichmäßigere Trocknung bei Bandtrocknern zu erreichen, werden bei neueren Bauarten spezielle Mischeinrichtungen angewandt.



- a Feuchtgutbehälter
- b Transportband
- c Trocknungszone
- d Kühlzone

Bild 7: Bandtrockner

Zur Reduzierung des Grundflächenbedarfes wurden mehrstufige Bandtrockner entwickelt, die konstruktiv allerdings sehr aufwendig sind, Bild 8. Das Trocknungsgut fällt am Ende des oberen Bandes auf das darunterliegende, das in entgegengesetzter Richtung läuft. Bei dieser Umlagerung wird das Gut durchmischt und gleichzeitig von der durchströmenden Abluft entstaubt. Durch Variation der Bandgeschwindigkeit kann die Schütthöhe in den einzelnen Stufen an das Trocknungsverhalten des Gutes angepaßt werden.

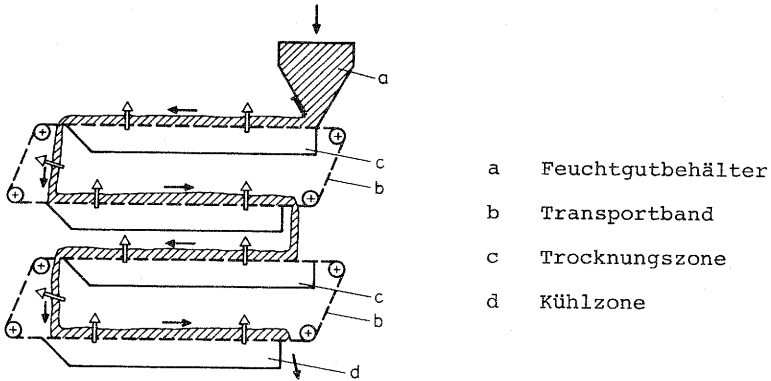
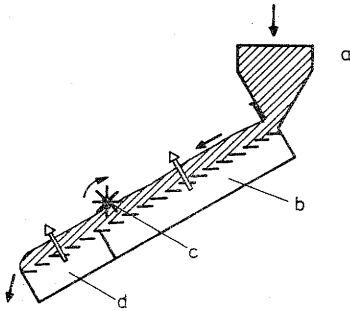


Bild 8: Mehrbandtrockner

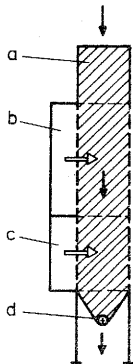
In Schrägbehältertrocknern, Bild 9, erfolgt der Transport des Gutes durch den Trockner aufgrund der Schwerkraftwirkung, die zusätzlich von rotierenden, fest eingebauten Schaufelrädern unterstützt wird. Diese Schaufelräder dienen gleichzeitig zur Durchmischung des Gutes während des Trocknungsprozesses. Der Gutdurchsatz kann bei Trocknern dieser Bauform nur in einem engen Bereich variiert werden, da die Neigung des Trocknerbodens nicht verstellbar ist. Insbesondere bei schlecht fließenden, hochfeuchten Körnerschüttungen bereitet die exakte Einstellung des Gutdurchsatzes erhebliche Schwierigkeiten.



- a Feuchtgutzufuhr
- b Trocknungszone
- c Schaufelwerk
- d Kühlzone

Bild 9: Schrägbehältertrockner

In Hochbehälter- oder Schachttrocknern, Bild 10, wandert die zu trocknende Körnerschüttung nur aufgrund der Schwerkraftwirkung gleichförmig durch den Trockner. In der aus luftdurchlässigen Wänden gebildeten Trocknungszone wird das Gut quer zu seiner Bewegungsrichtung von der Trocknungsluft durchströmt. Während des Trocknungsvorganges erfolgt keine Durchmischung



- a Feuchtgutbehälter
- b Trocknungszone
- c Kühlzone
- d Austragseinrichtung

Bild 10: Hochbehälter- oder Schachttrockner

des Gutes. Die Fließgeschwindigkeit des Gutes im Trockner wird durch die unten im Trockner befindliche Austragseinrichtung gesteuert. Querstromtrockner in Hochbehälterbauweise, auf die im Rahmen dieser Arbeit insbesondere eingegangen wird, besitzen folgende Vorteile:

- Geringer konstruktiver und apparativer Aufwand durch die einfache Bauweise. Im Trockner sind keinerlei Einbauten für Fördereinrichtungen und Luftkanäle erforderlich.
- Keine Verstopfungsgefahr im Trocknerschacht, da keine Einbauten im Trockner vorhanden sind, die zu Brückenbildungen oder Gutablagerungen führen können. Damit wird eine hohe Funktionssicherheit des Trockners gewährleistet.

Nachteilig wirkt sich die Querströmung der Trocknungsluft auf das Trocknungsverhalten der Körnerschüttung aus:

- Die Körnerschüttung wird sehr ungleichmäßig getrocknet, da die Körner an der Lufteintrittsseite schneller trocknen als an der Luftaustrittsseite. Wird der Trocknungsvorgang bei Erreichen des mittleren Endfeuchtegehaltes $\bar{U}_2 = 14\%$ der Körnerschüttung beendet, hat dies zur Folge, daß die Körner am Lufteintritt stark übertrocknet werden, während diejenigen am Luftaustritt noch teilweise ungetrocknet sind.
- Die Trocknungsleistung ist gering im Vergleich zu anderen Durchlauftrocknungsverfahren. Da die Körner an der Lufteintrittsseite während der gesamten Trocknungszeit der heißen Trocknungsluft ausgesetzt sind, kann die Temperatur der Trocknungsluft nur so hoch gewählt werden, daß die thermische Schädigung der Körner vermieden wird. Entsprechend wird dadurch die temperaturabhängige Trocknungsleistung begrenzt.
- Der Wärmebedarf zum Entzug der Feuchte aus den Körnern ist relativ hoch. Dies ist in erster Linie auf die schlechte

Energieausnutzung der Trocknungsluft im unteren Teil der Trocknungszone im Bereich der nahezu getrockneten Körner zurückzuführen, in dem die Abluftsättigung stark abnimmt. Außerdem wird bei einer Übertrocknung der Körner am Lufteintritt zusätzliche Wärme für die bei geringen Feuchtegehalten sehr schwer entfernbare Feuchte benötigt.

3. Analytische Betrachtung des Trocknungsverhaltens von Körnerschüttungen

3.1 Das Trocknungsverhalten dünner Körnerschüttungen

Als dünne Körnerschüttungen werden Schüttungen bezeichnet, bei deren Durchströmen der Zustand der Trocknungsluft im Idealfall nicht verändert wird. Dies kann erreicht werden, wenn die Luftmenge im Verhältnis zur Gutmenge sehr groß gewählt wird. Bei der Trocknung hygroskopischer Stoffe mit hohen Feuchtegraden kann der Trocknungsvorgang in drei charakteristische Trocknungsabschnitte unterteilt werden [35, 51]:

- Im sogenannten 1. Trocknungsabschnitt erfolgt die Trocknung ausschließlich an der feuchten Oberfläche des Stoffes bei konstanter Trocknungsgeschwindigkeit. Das Stoffinnere hat keinen Einfluß auf die Trocknung, da die Feuchte aus dem Stoffinnern so schnell an die Oberfläche gelangt, daß diese stets vollständig mit Feuchte benetzt ist. Der Trocknungsvorgang läßt sich demzufolge mit den Gesetzmäßigkeiten der Wärme- und Stoffübertragung für eine Flüssigkeitsoberfläche beschreiben.
- Im 2. Trocknungsabschnitt wird aus dem Stoffinnern weniger Feuchte nachgeliefert als bei vorliegendem Luftzustand verdunstet werden kann. Der Trocknungsvorgang wird nicht mehr vom Stoffübergangswiderstand zwischen Oberfläche und

Umgebungsluft, sondern von dem wesentlich größeren Widerstand im Stoffinnern beeinflusst. Dieser mit fortschreitender Trocknung zunehmende Stoffübergangswiderstand ist nur durch einen höheren Dampfdruck im Stoffinnern bei höheren Temperaturen zu überwinden; d.h. die Korntemperatur muß ansteigen.

- Im 3. Trocknungsabschnitt wird an jeder Stelle des zu trocknenden Stoffes die maximale hygroscopische Feuchte unterschritten, d.h. im gesamten Stoff findet der Trocknungsvorgang statt. Die Trocknungsgeschwindigkeit nimmt dabei weiter ab und wird gleich null, sobald der sorptive Gleichgewichtszustand zwischen dem zu trocknenden Stoff und der Trocknungsluft erreicht ist; der Trocknungsvorgang ist beendet.

3.2 Differentialgleichungen zur Beschreibung des Trocknungsverhaltens von Körnerschüttungen

3.2.1 Differentialgleichungen zur Beschreibung des Trocknungsverhaltens dicker ruhender Körnerschüttungen

Als dicke Körnerschüttungen werden Schüttungen bezeichnet, bei deren Durchströmen sich der Zustand der Trocknungsluft merklich verändert. Die Trocknungsluft gibt entlang ihres Strömungsweges Wärme ab und nimmt Feuchte auf; das Gut trocknet entsprechend unterschiedlich. Die drei Trocknungsabschnitte treten bei der Trocknung dicker Körnerschüttungen gleichzeitig nebeneinander auf und sind dadurch nicht mehr voneinander zu unterscheiden [51 bis 54].

Im folgenden soll analog der Untersuchungen von Klapp [18] anhand des ruhenden Volumenelementes dV in Bild 11 das Trocknungsverhalten einer dicken Körnerschüttung betrachtet werden. Das Volumenelement wird dabei in Richtung der positiven s -Achse von der Trocknungsluft durchströmt.

Die im Luftstrom dem Volumenelement $dV = dsdydz$ in der Zeiteinheit dt zugeführte Wärmemenge dQ_1 beträgt:

$$dQ_1 = dy dz \varrho_L v_{L,s} c_{pLX} \mathcal{S}_L dt \quad (12),$$

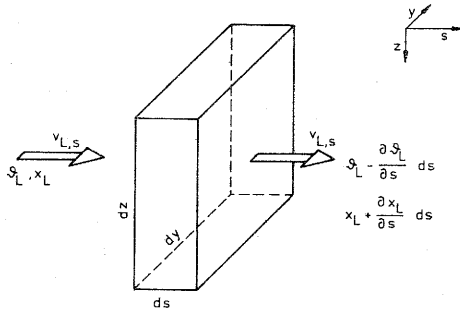


Bild 11: Änderung des Luftzustandes beim Durchströmen durch ein Volumenelement dV der ruhenden dicken Körnerschüttung während des Trocknungsvorganges

während für die in der Zeiteinheit dt aus dem Volumenelement abgeführte Wärmemenge dQ_2 gilt:

$$dQ_2 = dy dz \varrho_L v_{L,s} c_{pLX} \left(\mathcal{S}_L - \frac{\partial \mathcal{S}_L}{\partial s} ds \right) dt \quad (13)$$

Aus Gl. (12) und (13) folgt für eine Enthalpieänderung des Luftstromes innerhalb des Volumenelementes:

$$dQ = dy dz \varrho_L v_{L,s} c_{pLX} \frac{\partial \mathcal{S}_L}{\partial s} ds dt \quad (14)$$

Diese dem Luftstrom entzogene Wärmemenge wird durch konvektiven Wärmeübergang in der Zeit dt an die Körner übertragen:

$$dQ = \alpha A_{KO} (\vartheta_L - \vartheta_K) ds dy dz dt \quad (15)$$

mit: $\vartheta_L, \vartheta_K = f(s, t)$.

Durch Gleichsetzen von Gl. (14) und Gl. (15) folgt:

$$dy dz \varrho_L v_{L,s} c_{pLX} \frac{\partial \vartheta_L}{\partial s} ds dt = \alpha A_{KO} (\vartheta_L - \vartheta_K) ds dy dz dt \quad (16)$$

Für die Änderung der Lufttemperatur im Volumenelement dV erhält man aus Gl. (16):

$$\frac{\partial \vartheta_L}{\partial s} = \frac{\alpha A_{KO} (\vartheta_L - \vartheta_K)}{v_{L,s} \varrho_L c_{pLX}} \quad (17)$$

Die an die Körner übertragene Wärmemenge dQ_K , siehe Gl. (15), wird zur Erwärmung der Körner:

$$dQ_K = ds dy dz \varrho_{SO} c_{KX} \frac{\partial \vartheta_K}{\partial t} dt \quad (18)$$

sowie zur Verdunstung der Feuchte aus den Körnern verwendet:

$$dQ_X = ds dy dz \varrho_{SO} r_{WB} \frac{\partial X}{\partial t} dt \quad (19)$$

mit: $\partial X / \partial t = f(\vartheta_L, \vartheta_K, v_L, X_L, X_1)$.

Damit gilt:

$$\begin{aligned} \alpha A_{KO} (\vartheta_L - \vartheta_K) ds dy dz dt &= ds dy dz \varrho_{SO} c_{KX} \frac{\partial \vartheta_K}{\partial t} dt \\ &+ ds dy dz \varrho_{SO} r_{WB} \frac{\partial X}{\partial t} dt \quad (20) \end{aligned}$$

Aus Gl. (20) kann die zeitliche Änderung der Korntemperatur während der Trocknung ermittelt werden:

$$\frac{\partial \vartheta_K}{\partial t} = \frac{\alpha A_{KO} (\vartheta_L - \vartheta_K) - \varrho_{SO} r_{WB} \partial X / \partial t}{\varrho_{SO} c_{KX}} \quad (21)$$

Findet im Volumenelement dV ein Trocknungsvorgang statt, so muß die den Körnern entzogene Feuchte:

$$dm_W = ds \, dy \, dz \, \varphi_{SO} \frac{\partial X}{\partial t} \, dt \quad (22)$$

von der durchströmenden Trocknungsluft aufgenommen werden:

$$dm_W = dy \, dz \, v_{L,S} \, \varphi_L \, dt \, \frac{\partial x_L}{\partial s} \, ds \quad (23)$$

Durch Gleichsetzen von Gl. (22) und (23) läßt sich die Änderung der Feuchte der Trocknungsluft abhängig vom Weg ds durch das Volumenelement darstellen:

$$\frac{\partial x_L}{\partial s} = \frac{\varphi_{SO} \frac{\partial X}{\partial t}}{\varphi_L \, v_{L,S}} \quad (24)$$

Die drei Differentialgleichungen Gl. (17), (21) und (24) in Verbindung mit einer geeigneten Gleichung für die Trocknungsgeschwindigkeit $g_D = \partial X / \partial t$ der dünnen Körnerschüttung bei den verschiedenen Trocknungsbedingungen dienen als Grundlage zur Beschreibung des Trocknungsverhaltens einer dicken Körnerschüttung bei konvektiver Trocknung. Da eine analytische Lösung dieser gekoppelten Differentialgleichungen nicht möglich ist, wurde die Trocknung dicker Körnerschüttungen von verschiedenen Autoren mittels näherungsweise Lösungsansätze beschrieben, wobei teilweise erhebliche Vereinfachungen getroffen wurden [18, 55, 56].

3.2.2 Differentialgleichungen zur Beschreibung des Trocknungsverhaltens querdurchströmter bewegter Körnerschüttungen

Unter einer querdurchströmten bewegten Körnerschüttung versteht man eine bewegte Körnerschüttung, die senkrecht zu ihrer Bewegungsrichtung von der Trocknungsluft durchströmt wird. Das Trocknungsverhalten einer solchen Körnerschüttung soll analog Kap.3.2.1 an einem Volumenelement $dV = ds \, dy \, dz$ betrachtet werden, das in Richtung der positiven s -Achse von der Trocknungsluft durchströmt wird, während sich die Körnerschüttung mit konstanter Fließgeschwindigkeit $v_{K,z}$ in Richtung der z -Achse bewegt, Bild 12.

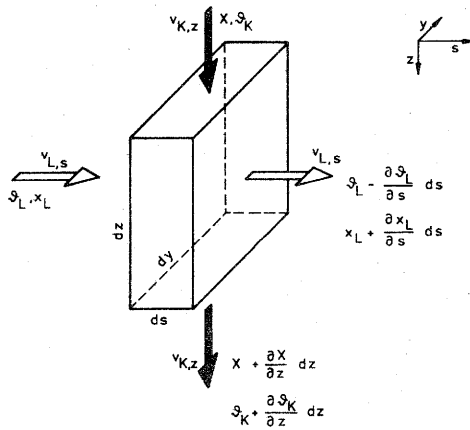


Bild 12: Änderung des Luft- und Gutzustandes in einem Volumenelement dV der querdurchströmten bewegten Körnerschüttung während des Trocknungsvorganges

Für die im Volumenelement dV ablaufenden Wärme- und Stoffübergangsvorgänge gelten die ähnlichen Gesetzmäßigkeiten wie bei der Trocknung ruhender Körnerschüttungen, siehe Gl. (17), (21) und (24), wobei allerdings der Trocknungsvorgang bei der Trocknung ruhender Körnerschüttungen eine Funktion der Zeit ist, während er bei bewegten Körnerschüttungen als eine Funktion des zurückgelegten Weges aufgefaßt werden kann. Bei konstanter Fließgeschwindigkeit

$$v_{K,z} = \partial z / \partial t \quad (25)$$

$$\text{bzw.} \quad \partial t = \frac{1}{v_{K,z}} \partial z \quad (26)$$

$$\text{mit:} \quad v_{K,s} = 0, \quad v_{K,y} = 0 \quad (27)$$

und bei jeweils gleicher Dicke s der Körnerschüttung können die Differentialgleichungen zur Beschreibung des Trocknungsverhaltens querdurchströmter bewegter Körnerschüttungen direkt aus denen der ruhenden Körnerschüttung abgeleitet werden. Damit gilt:

$$\frac{\partial \vartheta_L}{\partial s} = \frac{\alpha A_{KO} (\vartheta_L - \vartheta_K)}{v_{L,s} \varrho_L c_{pLX}} \quad (17)$$

mit $\vartheta_L, \vartheta_K = f(s, z)$

$$\frac{\partial \vartheta_K}{\partial z} = \frac{\alpha A_{KO} (\vartheta_L - \vartheta_K) - v_{Kz} \varrho_{SO} r_{WB} \partial X / \partial z}{v_{K,z} \varrho_{SO} c_{KX}} \quad (28)$$

$$\frac{\partial x_L}{\partial s} = \frac{v_{K,z} \varrho_{SO} \partial X / \partial z}{v_{L,s} \varrho_L} \quad (29)$$

mit: $\partial X / \partial z = f(\vartheta_L, \vartheta_K, v_L, x_L, X)$.

Aufgrund dieses Zusammenhanges zwischen beiden Trocknungsverfahren liegen in der Literatur für die Trocknung querdurchströmter bewegter Körnerschüttungen nur Berechnungsansätze für die Trocknung ruhender Körnerschüttungen vor.

Berücksichtigt man, daß durch den Feuchteentzug aus den Getreidekörnern eine Schrumpfung der Körner stattfindet [42, 45, 48], so führt diese auch zu einer Volumenabnahme der Körnerschüttung, die nach folgender Beziehung berechnet werden kann:

$$\frac{\Delta v_S}{v_{S1}} = 1 - \frac{\rho_{S1} (1 + X)}{\rho_S (X) (1 + X_1)} \quad (30)$$

mit:
$$v_S (X) = \frac{m_{TS} (1 + X)}{\rho_S (X)} \quad (31)$$

und
$$\Delta v_S = v_{S1} - v_S (X) \quad (32)$$

Bild 13 zeigt beispielhaft die mit Gl. (30) errechnete relative Volumenabnahme einer Maiskörnerschüttung bezogen auf das Ausgangsvolumen der Schüttung bei einem Feuchteentzug vom Anfangsfeuchtegrad X_1 auf den lagerfähigen Feuchtegrad $\bar{X}_2 = 0,163$ ($\bar{U}_2 = 14\%$). Die Gleichung für die Schüttdichte ρ_S in Abhängigkeit vom Feuchtegrad wird dabei aus Tafel 3 entnommen. Wie aus Bild 13 ersichtlich wird, steigt die Volumenabnahme mit zunehmendem Anfangsfeuchtegrad der Körner nahezu linear an.

Für die Volumenschrumpfung der Körnerschüttung entlang des Weges z ergibt sich abhängig vom Feuchteentzug:

$$\frac{\partial v_S}{\partial z} = \frac{v_{S1} \rho_{S1}}{1 + X_1} \frac{1}{\rho_S (X)} \frac{\partial X}{\partial z} - \frac{(1 + X)}{\rho_S (X)^2} \frac{\partial \rho_S}{\partial z} \quad (33)$$

Diese Volumenschrumpfung der Körnerschüttung führt zu einer Änderung der Fließgeschwindigkeit der Körner in z -Richtung, für die gilt:

$$\frac{\partial v_K}{\partial z} = \frac{v_{K2}}{v_{S2}} \frac{\partial v_S}{\partial z} \quad (34)$$

bzw. unter Verwendung von Gl. (33):

$$\frac{\partial v_K}{\partial z} = \frac{v_{K2} \rho_{S2}}{1 + X_2} \frac{1}{\rho_S (X)} \frac{\partial X}{\partial z} - \frac{(1 + X)}{\rho_S (X)^2} \frac{\partial \rho_S}{\partial z} \quad (35)$$

Eine eventuell auftretende Querbewegung der Körner in s,y-Richtung aufgrund unterschiedlicher Trocknung am Luftzutritt bzw. Luftaustritt wird nicht mitberücksichtigt, d.h.

$$\frac{\partial v_K}{\partial s} = 0 \quad \text{und} \quad \frac{\partial v_K}{\partial y} = 0 \quad (36)$$

Um die relative Fließgeschwindigkeitsänderung der Körnerschüttung abhängig vom Feuchteentzug aufzuzeigen, wurde die folgende Gleichung:

$$\frac{\Delta v_K}{v_{K2}} = \frac{\Delta v_S / v_{S1}}{1,0 - \Delta v_S / v_{S1}} \quad (37)$$

mit: $\Delta v_K = v_K(X) - v_{K2}$ (38)

unter Einbeziehung von Gl. (30) in Bild 14 beispielhaft für die Trocknung einer Maiskörnerschüttung dargestellt. Dabei wurde angenommen, daß analog der Darstellung in Bild 13 die Maiskörner vom Anfangsfeuchtegrad X_1 jeweils bis auf lagerfähigen Feuchtegrad $X_2 = 0,163$ ($U_2 = 14\%$) getrocknet werden.

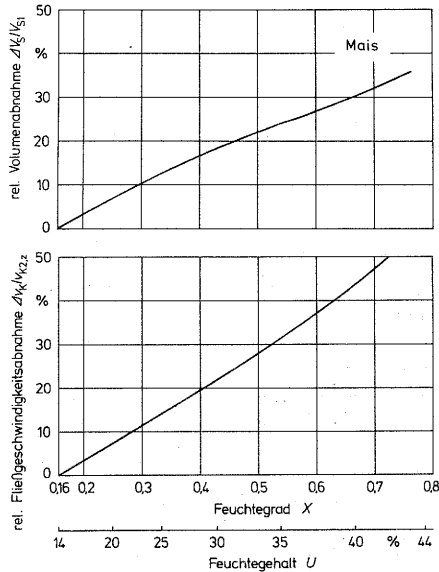


Bild 13 und 14: Relative Volumenabnahme $\Delta V_S/V_{S1}$ (Bild 13) und relative Fließgeschwindigkeitsabnahme $\Delta v_K/v_{K2,z}$ (Bild 14) der Körnerschüttung bei der Trocknung von Mais vom Anfangsfeuchtegrad X_1 bzw. Anfangsfeuchtegehalt U_1 auf den Endfeuchtegrad $\bar{X}_2 = 0,163$ bzw. Endfeuchtegehalt $\bar{U}_2 = 14\%$

3.3 Modell zur Vorausberechnung des Trocknungsverhaltens ruhender Körnerschüttungen

Da die in Kap. 3.2 aufgezeigten Differentialgleichungen analytisch nicht lösbar sind, soll im folgenden ein Berechnungsmodell aufgestellt werden, mit dem das Trocknungsverhalten dicker, ruhender Körnerschüttungen vorausberechenbar ist. Dazu wird modellhaft die Körnerschüttung der Ausgangshöhe s_1 in mehrere dünne Schichten Δs_1 unterteilt, die kaskadenförmig von der Trocknungsluft durchströmt werden. Die Trocknungsluft

einer solchen dünnen Schicht entspricht dabei der Abluft der zuvor durchströmten Schicht; die Abluft der Schicht wird als Trocknungsluft der nachfolgenden Schicht verwendet.

Für das Berechnungsmodell gelten daher weiterhin die in Kap. 3.2 aufgezeigten Gleichungen, wobei die Annahme getroffen wird, daß während des betrachteten Zeitintervalls Δt in einer Schicht die Stoffkennaten von Gut und Luft konstant bleiben. Weiter wird angenommen, daß die Korntemperatur in einer Schicht nach dem Zeitintervall Δt gleich der Temperatur der Abluft gesetzt wird.

Damit kann das Trocknungsverhalten einer dünnen Schicht anhand von Wärme- und Stoffbilanzen in Verbindung mit einem Gleichungsansatz für das Trocknungsverhalten der dünnen Körnerschüttung bei verschiedenen Trocknungsbedingungen beschrieben werden. Durch Kombination aller dünnen Schichten zu einer dicken Körnerschüttung ist deren Trocknungsverhalten mathematisch erfaßbar.

Aus der Stoffbilanz für die Feuchte in einer dünnen Schicht ergibt sich, daß die Differenz zwischen der mit der Trocknungsluft in die Schicht einströmenden und der mit der Abluft ausströmenden Feuchtemasse gleich derjenigen sein muß, die den Körnern entzogen wird. Daraus folgt:

$$m_L (x_{L2} - x_{L1}) = m_{TS} g_D \Delta t \quad (39)$$

bzw.
$$x_{L2} = x_{L1} + \frac{m_{TS}}{m_L} g_D \Delta t \quad (40)$$

mit:
$$m_L = A_{Y,z} \varrho_L v_L \Delta t \quad (41)$$

$$m_{TS} = A_{Y,z} \varrho_{SO} \Delta s_1 \quad (42)$$

Aus der Wärmebilanz ergibt sich, daß die in der Zeiteinheit Δt mit der Trocknungsluft zugeführte Wärmemenge $Q_{L,1}$ sowie die bereits in den Körnern gespeicherte Wärmemenge $Q_{K,1}$

abzüglich der Wärmemenge in der Abluft $Q_{L,2}$, der in den Körnern verbleibenden Wärme $Q_{K,2}$ sowie der Wärmemenge Q_B zum Lösen der gebundenen Feuchte aus den Körnern gleich Null sein muß:

$$Q_{L,1} + Q_{K,1} - Q_{L,2} - Q_{K,2} - Q_B = 0 \quad (43)$$

Für die Faktoren in Gl. (43) gelten folgende Beziehungen:

$$Q_L = m_L [\bar{c}_{pL} \vartheta_L + x_L (\bar{c}_{pD} \vartheta_L + r_O)] \quad (44)$$

$$Q_K = m_S \bar{c}_{KX} \vartheta_K \quad (45)$$

$$Q_B = m_S g_D \Delta t r_B \quad (46)$$

mit: $g_D = f(\vartheta_L, v_L, x_L, X, \vartheta_K)$ (47)

$$r_B = f(\vartheta_K, X) \quad (48)$$

$$\bar{c}_{KX} = f(\vartheta_K, X) \quad (49)$$

Damit ergibt sich für Gl. (42):

$$\begin{aligned} & m_{L,1} [\bar{c}_{pL} \vartheta_{L1} + x_{L1} (\bar{c}_{pD} \vartheta_{L1} + r_O)] + m_S \bar{c}_{KX1} \vartheta_{K1} \\ & - m_{L,2} [\bar{c}_{pL} \vartheta_{L2} + x_{L2} (\bar{c}_{pD} \vartheta_{L2} + r_O)] \\ & + m_S \bar{c}_{KX2} \vartheta_{K2} - m_S g_D \Delta t r_B = 0 \end{aligned} \quad (50)$$

Unter Verwendung der Gl. (40) für die Stoffbilanz sowie der getroffenen vereinfachten Annahme, daß die Korntemperatur ϑ_{K2} in einer Schicht nach dem Zeitintervall Δt gleich der Ablufttemperatur angenommen wird [57, 58], reduziert sich Gl. (50) zu:

$$\begin{aligned} & m_L (\vartheta_{L1} - \vartheta_{L2}) (\bar{c}_{pL} + x_{L1} \bar{c}_{pD}) \\ & - m_S [g_D \Delta t (\bar{c}_{pD} \vartheta_{L2} + r_O + r_B) - \bar{c}_{KX1} \vartheta_{K1} + \bar{c}_{KX2} \vartheta_{L2}] \\ & = 0 \end{aligned} \quad (51)$$

Bei Kenntnis der Stoffkenn Daten in Gl. (47) bis (49) in Abhängigkeit von den verschiedenen Trocknungsparametern lassen sich mit einem numerischen Näherungsverfahren die Faktoren in Gl. (43) und Gl. (51) so ermitteln, daß die Gleichungsbedingungen erfüllt sind.

Gleichzeitig ist zu überprüfen, ob der errechnete Zustand der Abluft - Temperatur, Feuchtegrad und relative Feuchte - nach dem Durchströmen einer Schicht vom thermodynamischen Standpunkt aus möglich ist. Es muß sichergestellt sein, daß bei dem Berechnungsverfahren der Feuchtegrad der Abluft x_{L2} , Gl. (40), den maximal möglichen Feuchtegrad der Luft $x_L \max$ bei der Temperatur ϑ_{L2} :

$$x_L \max = 0,622 \frac{p_D (\vartheta_{L2})}{p - p_D (\vartheta_{L2})} \quad (52)$$

nicht überschreitet. Bei $x_L(t) > x_L \max$ ist unter Berücksichtigung der Forderung $x_L(t) = x_L \max$ bzw. des zu erwartenden Kondensationseffektes in der Schicht die Berechnung des Trocknungsverhaltens erneut vorzunehmen.

Der Trocknungsvorgang gilt als beendet, sobald der mittlere Endfeuchtegrad aller dünnen Schichten bzw. der gesamten dicken Körnerschüttung den Wert $\bar{x}_2 \leq 0,163$ ($\bar{u}_2 \leq 14\%$) erreicht hat, bei dem das Gut lagerfähig ist.

Die Volumenschumpfung der Körnerschüttung hat bei der Beschreibung des Trocknungsverhaltens der ruhenden dicken Körnerschüttung keinen Einfluß, da nur die Ausgangshöhe s_1 der Körnerschüttung vor dem Feuchteentzug Verwendung findet, vgl. Gl. (42).

Ein Vergleich des mit dem Berechnungsmodell ermittelten Trocknungsverlaufes mit dem experimentell bestimmten Trocknungsverlauf ist in Kap. 4.5 aufgezeigt.

4. Experimentelle Untersuchungen des Trocknungsverhaltens dicker ruhender Körnerschüttungen

4.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Um das Trocknungsverhalten dicker ruhender Körnerschüttungen entsprechend der modellhaften Betrachtung in Kap. 3.3 experimentell ermitteln zu können, wird von einer Versuchsanlage gefordert, daß eine Unterteilung der dicken Körnerschüttung in mehrere dünne Schichten möglich ist, die jede für sich untersucht werden kann. Dabei müssen die dünnen Schichten so miteinander verbunden sein, daß die thermodynamischen Zustandsänderungen in den einzelnen Schichten genau denen bei der Trocknung der dicken Körnerschüttungen entsprechen. Die Abluft einer dünnen Schicht muß also gleich der Trocknungsluft der nachfolgenden Schicht sein, d.h. der Zustand der Luft sowie der Luftdurchsatz zwischen dem Austritt aus der einen Schicht und dem Eintritt in die nachfolgende Schicht dürfen sich nicht verändern. Darüber hinaus wird von der Versuchsanlage gefordert, daß die Trocknungslufttemperatur und -geschwindigkeit sowie die Höhe der gesamten Körnerschüttung unabhängig voneinander über einen größeren Bereich hinweg variiert werden können, damit der Einfluß dieser Trocknungsparameter auf das Trocknungsverhalten von Getreide untersucht werden kann.

Unter Berücksichtigung dieser Forderungen wurde in halbtechnischem Maßstab ein Ruheschichttrockner entwickelt, der in Bild 15 dargestellt ist.

Der Ruheschichttrockner besteht aus 6 übereinander angeordneten Trocknungsbehältern, die kaskadenförmig von unten nach oben von der Trocknungsluft durchströmt werden. Die Trocknungsbehälter sind mit einem Sieblochboden versehen und können je nach Gutart etwa 10 - 12 kg Körner aufnehmen. Die maximale Schichthöhe in einem Behälter beträgt 0,17 m, so daß insgesamt Körnerschüttungen bis zu 1 m Schütthöhe untersucht werden können. Zur kontinuierlichen Messung der Gewichtsabnahme der

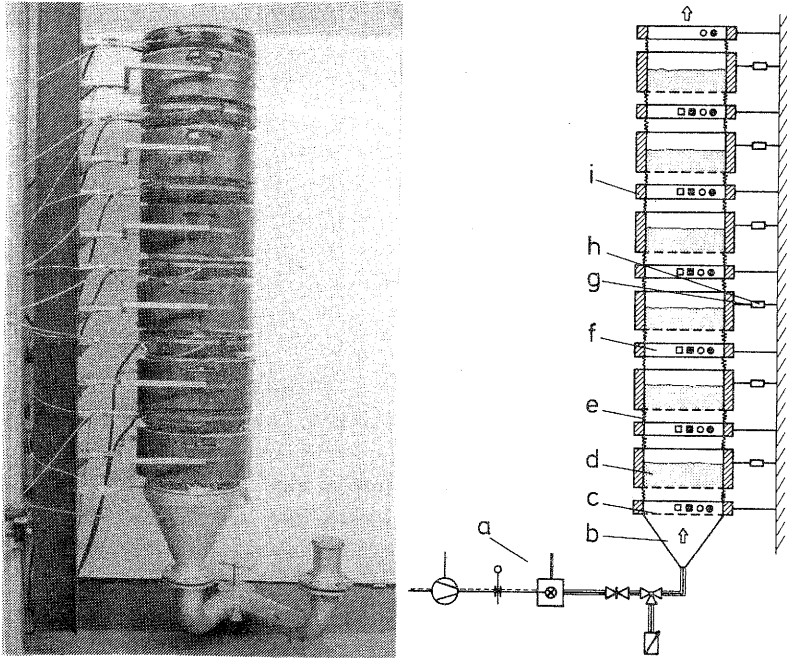


Bild 15: Versuchsanlage zur Untersuchung des Trocknungs-
verhaltens ruhender Körnerschüttungen

- a Lufterhitzungseinrichtung
- b Luftmischkammer
- c Drahtgeflecht
- d Probenbehälter
- e Folienschlauchverbindung
- f Zwischenrahmen
- g Meßrahmen
- h Biegestab mit Dehnungsmeßstreifen
- i Wärmeisolation

Meßstellen:

- Luftdruck
- Korntemperatur
- Lufttemperatur
- Taupunkttemperatur

einzelnen Kornschichten während der Trocknung dient eine elektronische Wiegeeinrichtung. Über einen Meßrahmen wird das Gewicht jeder Kornschicht auf einen Biegestab übertragen, mit vier als Vollbrücke geschalteten Dehnungsmeßstreifen erfaßt und mittels Datenerfassungsanlage im Gegensatz zu bereits vorhandenen Versuchsanlagen [59] kontinuierlich aufgezeichnet.

Um die Gewichtsbestimmung nicht durch Meßeinbauten oder durch Abstützung der Trocknungsbehälter untereinander zu beeinflussen, befindet sich zwischen den Behältern ein starrer Zwischenrahmen zur Aufnahme der Meßeinrichtungen, der durch biege- weiche luftdichte Plastikfolien mit den Trocknungsbehältern verbunden ist. Zur Reduzierung von Wärmeverlusten sind die Außenwände der Trocknungsbehälter und der Zwischenrahmen wärme- isoliert.

Zur Erzeugung der Trocknungsluft wird Umgebungsluft mit einem Radialgebläse in die Meßleitung ($d_i = 0,1 \text{ m}$) gefördert, in der die Luftgeschwindigkeit mittels Normblende nach DIN 1952 [60] gemessen und mit einem Schieber auf den vorgegebenen Wert eingestellt wird. In einer mit Propangas betriebenen Brennkammer wird die Luft auf die gewünschte Temperatur der Trocknungsluft erwärmt. Anschließend strömt die Trocknungsluft durch einen unter dem Trockner angebrachten Diffusor, wo sie mit Hilfe eines engmaschigen Drahtgeflechtes gedrosselt und gleich- mäßig über den gesamten Trocknerquerschnitt ($d_i = 0,357 \text{ m}$) verteilt wird.

Um die Luftzustände vor und nach dem Durchströmen durch die einzelnen Kornschichten zu erfassen, wird die Lufttemperatur mit Widerstandsthermometern, die Taupunkttemperatur mit Lithiumchloridfühler gemessen, die jeweils an den starren Zwischenrahmen im Trockner angebracht sind. Aus diesen beiden Werten kann anschließend die relative Feuchte der Luft errechnet werden. Der Zustand der Umgebungsluft wird am Gebläseein- tritt bestimmt.

Zur Messung der Korntemperatur während des Trocknungsvorganges werden Körner, in deren Innern sich ein Thermoelement ($d = 0,5 \text{ mm}$) befindet, an den Zwischenrahmen in den Luftstrom eingebracht. Um den Meßvorgang nicht durch Wärmeleitung über den Metallmantel des Thermoelements zur Spitze zu verfälschen, werden zuvor mehrere Körner gleichen Feuchtegehaltes auf das Thermoelement ohne Zwischenraum hintereinander aufgespießt. Die Registrierung der zeitlichen Änderung der Korntemperatur sowie der Luftzustände erfolgt mittels Datenerfassungsanlage.

Die Veränderung des Druckabfalls in den einzelnen Kornschichten zur Ermittlung der Druckkraft auf die Trocknungsbehälter wird mittels U-Rohr-Manometer gemessen und die Werte in zeitlichen Abständen registriert. Zur Kontrolle der elektronischen Wiegeeinrichtung wird das Gewicht jeder Kornschicht vor und nach der Trocknung zusätzlich auf einer Waage gewogen. Der Feuchtegehalt der Körner der Schichten vor und nach der Trocknung wird im Trockenschrank (24 h bei 105°C) bestimmt.

Für die Durchführung der Versuche wird das Versuchsgut mit dem Mährescher geerntet. Anschließend werden in einem Labor-Saatgutreiniger die Beimengungen und Kornfeinteile entfernt, um bei den Versuchen nur ganze Körner zu verwenden. Zum Befüllen der Trocknungsbehälter werden diese den Meßrahmen entnommen und bis zur erforderlichen Schichthöhe gleichmäßig gefüllt. Um die Versuche miteinander vergleichen zu können, wird jeweils die gleiche Kornmasse eingefüllt, deren Zusammenhang mit der Schütthöhe über die Schüttdichte gegeben ist. Danach werden die 6 Behälter in die Meßrahmen zurückgehängt und mit den Plastikfolien zu einer Trocknereinheit verbunden.

Während der Einstellung von Luftgeschwindigkeit und Lufttemperatur auf den gewünschten Betriebszustand durchströmt die Trocknungsluft nicht den Trockner, sondern wird zuvor mit einer Zweizegklappe ins Freie umgelenkt. Erst bei Erreichen des stationären Luftzustandes wird die Luft durch den Trockner geleitet und mit den verschiedenen Meßeinrichtungen im Trockner die trockenungsbedingten Veränderungen ermittelt. Nach

Beendigung der Trocknung werden die Probenbehälter dem Trockner entnommen und gewogen. Weiter wird der Feuchtegehalt der Mischproben der einzelnen Kornschichten im Trockenschrank bestimmt.

Als problematisch gestaltet sich bei den Versuchen die Beschaffung von Versuchsmaterial mit jeweils gleichem Anfangsfeuchtegehalt für die verschiedenen Versuchsreihen. Bedingt durch Witterungseinflüsse während der Ernteperiode sowie durch den fortschreitenden Reifeprozess der Körner können Schwankungen des Anfangsfeuchtegehaltes nicht vermieden werden. Eine Zwischenlagerung der erntefeuchten Körner über mehrere Tage hinweg ist nicht möglich, da frühzeitig einsetzende Gär- und Atmungsprozesse das Material für die Versuche ungeeignet machen.

4.2 Versuchsauswertung

Da es in der Praxis der Getreidetrocknung üblich ist, den Feuchtegehalt U der Körner zur Kennzeichnung der Feuchte in den Körnern zu benutzen, wird dieser im folgenden verwendet; der Feuchtegrad X ist ergänzend in Klammern angegeben.

Zur Berechnung des Feuchtegehaltverlaufs in den einzelnen Kornschichten in Abhängigkeit von der Trocknungszeit sind neben den Meßdaten für die zeitliche Gewichtsabnahme auch die Werte für den Druckabfall in den Schichten notwendig, um bei veränderlichem Druckabfall die unterschiedlichen Druckkräfte auf die einzelnen Schichten kompensieren zu können. Da die Veränderung der Druckkräfte erst nach Versuchsende berechnet werden kann, ist es nicht möglich, die Trocknungsversuche zu dem Zeitpunkt zu beenden, an dem der mittlere Feuchtegehalt der gesamten Körnerschüttung den lagerfähigen Zustand $\bar{U}_2 = 14\%$ ($\bar{X}_2 = 0,163$) erreicht hat. Eine exakte Vorausberechnung der Gesamttrocknungszeit $\Delta t_{1,2}$ mit einem Berechnungsmodell ist aufgrund fehlender Stoffkennwerte noch nicht realisierbar. Daher wurde bei den Versuchen die Körnerschüttung so lange getrocknet, bis aufgrund von Erfahrungswerten erwartet werden konnte, daß der Endfeuchtegehalt \bar{U}_2 unterschritten wurde. Bei der Versuchsauswertung

werden dann die Versuchsergebnisse auf den Endfeuchtegehalt \bar{U}_2 zurückgerechnet.

Zur Beurteilung des Trocknungsverhaltens abhängig von den verschiedenen Trocknungsparametern werden die in Kap. 2.2 beschriebenen Trocknungskenngößen herangezogen. Die Bewertung der Trocknungsleistung erfolgt dabei anhand der Gesamttrocknungszeit $\Delta t_{1,2}$, Gl. (9). Bei der Ermittlung des spezifischen Wärmebedarfs q_w nach Gl. (10) wird der dem Trockner zugeführte Wärmestrom bei der Trocknung von Weizen auf eine Umgebungstemperatur von $\vartheta_{LO} = 20^\circ\text{C}$, bei Mais von $\vartheta_{LO} = 10^\circ\text{C}$ bezogen, um dadurch nur den zur Luftanwärmung erforderlichen Wärmestrom zu erfassen, Gl. (8). Dabei ist zu berücksichtigen, daß der spezifische Wärmebedarf aufgrund von Meßfehlern nur mit einer Meßunsicherheit von ± 200 kJ/kg ermittelt werden kann. Eine Untersuchung der Kornqualität des getrockneten Gutes konnte nicht vorgenommen werden, da bei den Versuchen die Körner über den lagerfähigen Zustand hinaus übertrocknet wurden. Diese längeren Trocknungszeiten führen zu Qualitätsveränderungen, die nicht mit denen identisch sind, die bei der Trocknung auf den Endfeuchtegehalt $\bar{U}_2 = 14\%$ entstehen. Die Zurückrechnung der Qualitätsveränderung auf den Endfeuchtegehalt \bar{U}_2 ist nicht möglich, da die zeitliche Veränderung der Kornqualität bei den verschiedenen Trocknungsbedingungen nicht bekannt ist.

4.3 Versuchsergebnisse

Bei der experimentellen Untersuchung des Trocknungsverhaltens dicker Körnerschüttungen aus Weizen- und Maiskörnern wurden die in Tafel 5 zusammengestellten Trocknungs- und Stoffparameter variiert und bei konstanten äußeren Bedingungen ihr Einfluß auf das Trocknungsverhalten der Körnerschüttung ermittelt. Der zeitliche Verlauf der wichtigsten, das Trocknungsverhalten der dicken Körnerschüttung charakterisierenden Größen, ist für Weizen und Mais in Bild 16 bis 19 beispielhaft für jeweils einen Versuch dargestellt. Wie Bild 16 für den Feuchtege-

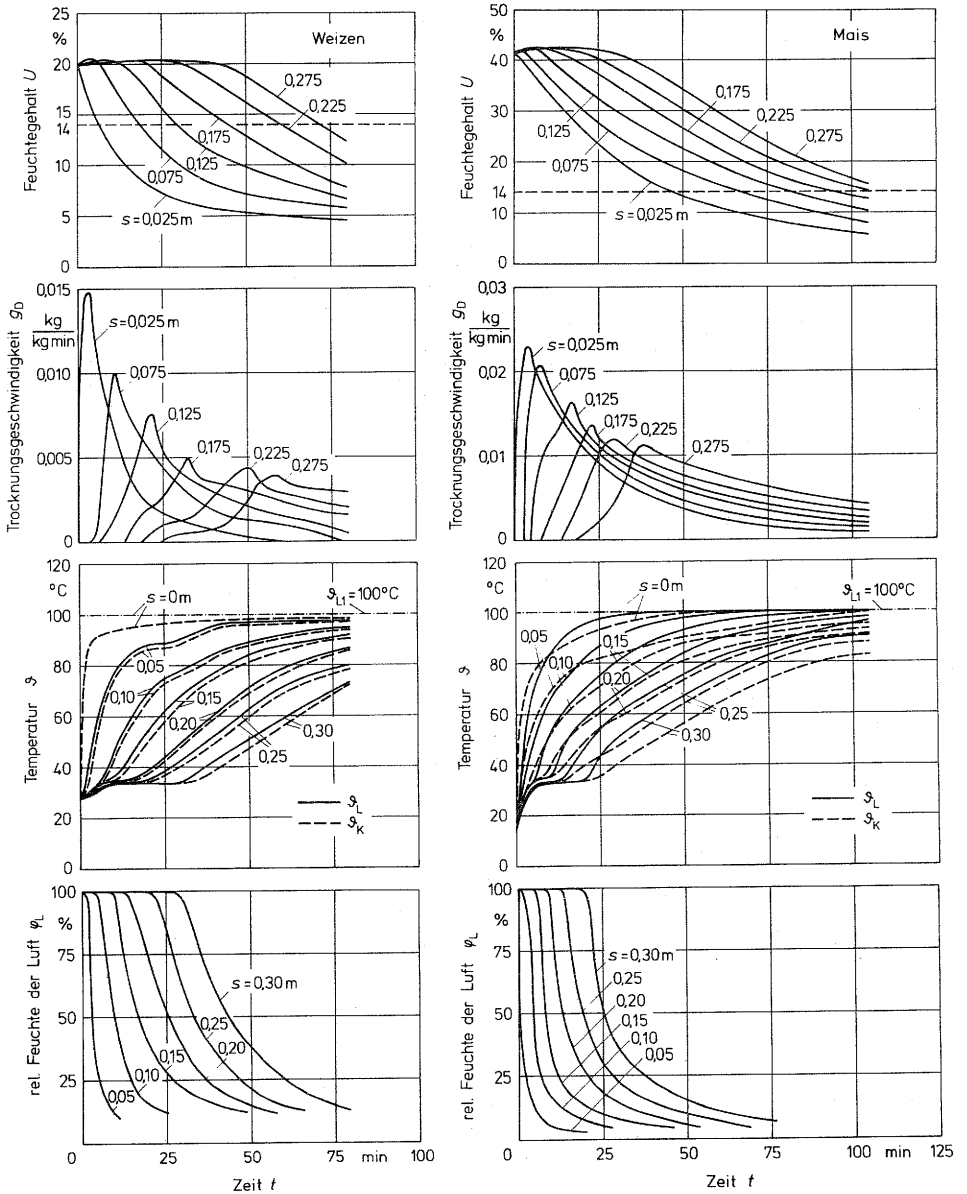


Bild 16 bis 19: Zeitlicher Verlauf von Feuchtegehalt U (Bild 16), Trocknungsgeschwindigkeit g_b (Bild 17), Lufttemperatur θ_L und Korntemperatur θ_K (Bild 18) und relativer Feuchte ϕ_L der Luft (Bild 19). Gleiche Versuchsbedingungen wie in Bild 20-22.

Parameter		Gutart	
		Weizen	Mais
Luttemperatur ϑ_{L1}	°C	40 - 120	80 - 140
Luftgeschwindigkeit v_{L1}	m/s	0,5 - 1,0	0,5 - 1,25
Höhe der Körnerschüttung s_1	m	0,1 - 0,6	0,1 - 0,45
Anfangsfeuchtegehalt der Körner U_1	%	19,1 - 24,3	38,7 - 41,1
Sorte:		Jubilar	Eta, Limac

Tafel 5: Zusammenstellung der variierten Trocknungs- und Stoffparameter und der untersuchten Bereiche bei der Trocknung ruhender dicker Körnerschüttungen

haltverlauf zeigt, beginnt zuerst die dem Lufteintritt zunächst gelegene Kornschicht mit der mittleren Höhe ($\bar{s} = 0,025$ m) zu trocknen; die Trocknungsgeschwindigkeit wird aus Bild 17 ersichtlich. Gleichzeitig steigt die Korntemperatur in der Schicht an, Bild 18. Die relative Feuchte der Abluft der ersten Schicht ($s = 0,05$ m) beträgt zu Beginn des Trocknungsprozesses nahezu 100%, Bild 19. In der nachfolgenden Schicht kann damit nur noch ein geringer Feuchteentzug aus den Körnern stattfinden. Alle weiteren Schichten ($\bar{s} > 0,075$ m) bleiben zunächst ungetrocknet, wobei die Korn- und Ablufttemperaturen den Wert der Kühlgrenztemperatur der Trocknungsluft anstreben. Liegt die Korntemperatur einer Schicht unter diesem Wert, wird so lange aus der Luft Feuchte auskondensiert, bis die anfallende Kondensationswärme ausreicht, die Körner auf Kühlgrenztemperatur zu erwärmen. Insbesondere bei der Trocknung von Maiskörnern mit einer Anfangskorntemperatur $\vartheta_{KO} = 10^{\circ}\text{C}$, Bild 18, wird diese Erscheinung deutlich. Die Körner werden zunächst auf die Kühlgrenztemperatur $\vartheta_{L\text{ Kühl}} = 33^{\circ}\text{C}$ vorgewärmt, wobei infolge des Kondensations-effektes der Feuchtegrad der Körner zunimmt, Bild 16. Ein wei-

terer Anstieg der Korntemperatur ist danach erst wieder bei beginnender Trocknung festzustellen.

Der Verlauf von Trocknungsgeschwindigkeit, Temperatur und relativer Feuchte der Abluft abhängig vom Feuchtegrad bzw. der Feuchtegehalt der Körner in den einzelnen Schichten zeigen die Bilder 20 bis 22. Aus Bild 20 wird ersichtlich, daß bei der Trocknung dünner Schichten der Höhe $\Delta s = 0,05$ m kein Abschnitt konstanter Trocknungsgeschwindigkeit auftritt, wie er bei der Trocknung von Maiskörnern in einer Einkornschicht festgestellt wurde [45]. Die Temperatur der Luft, Bild 21, ist bei konstanter Temperatur der Zuluft mit Ausnahme der Abluft der an der Lufteintrittsstelle befindlichen Schicht ($s = 0,05$ m) unabhängig von der Anzahl der durchströmten Schichten nahezu nur eine Funktion des Feuchtegehaltes der Körner. Bei Kenntnis des Zusammenhangs zwischen Ablufttemperatur und Feuchtegehalt der Körner besteht damit vor allem bei Weizen die Möglichkeit, durch Verwendung der einfach und schnell ermittelbaren Ablufttemperatur als indirekte Meßgröße für den Feuchtegehalt der Körner den Trocknungsprozeß automatisch zu beenden, sobald die Körner einen vorgegebenen Endfeuchtegehalt erreicht haben. Die Verwendung der relativen Feuchte der Luft als indirekte Meßgröße für den Feuchtegehalt der Körner, Bild 22, ist ungeeignet, da bei der Trocknung von Weizen ein relativ breiter Streubereich festgestellt wurde. Weiter war es bei der Trocknung von Mais mit den verwendeten Lufttemperatur-Taupunkttemperaturfühlern gerätebedingt nicht möglich, die relative Feuchte der Luft bei $\varphi_L < 10\%$ zu erfassen.

4.3.1 Einfluß der Lufttemperatur

Zur Ermittlung des Einflusses unterschiedlicher Temperaturen der Trocknungsluft auf das Trocknungsverhalten der dicken Körnerschüttung wurde bei konstanter Luftgeschwindigkeit und konstantem Anfangsfeuchtegehalt der Weizen- und Maiskörner die Trocknungslufttemperatur zwischen den in Tafel 5 zusammenge-

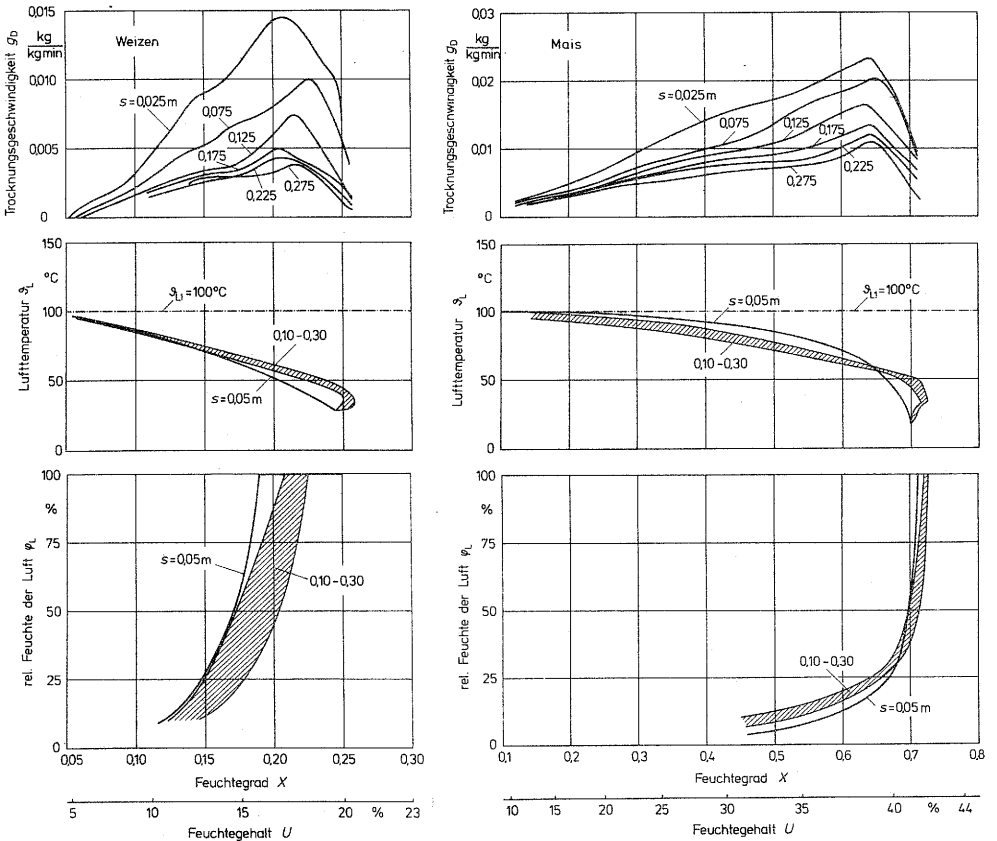


Bild 20 bis 22: Verlauf von Trocknungsgeschwindigkeit g_D (Bild 20), Temperatur ϑ_L (Bild 21) und relativer Feuchte der Luft φ_L (Bild 22) in Abhängigkeit vom Feuchtegrad X bzw. vom Feuchtegehalt U

Gutart:	Weizen	Mais
Anfangsfeuchtegehalt	$\bar{U}_1 = 19,7\%$	$\bar{U}_1 = 41,2\%$
Endfeuchtegehalt	$\bar{U}_2 = 7,7\%$	$\bar{U}_2 = 11,6\%$
Lufttemperatur	$\vartheta_{L1} = 100^\circ\text{C}$	$\vartheta_{L1} = 100^\circ\text{C}$
Luftgeschwindigkeit	$v_{L1} = 0,5 \text{ m/s}$	$v_{L1} = 1,0 \text{ m/s}$
Höhe der Körnerschüttung	$s_1 = 0,3 \text{ m}$	$s_1 = 0,3 \text{ m}$

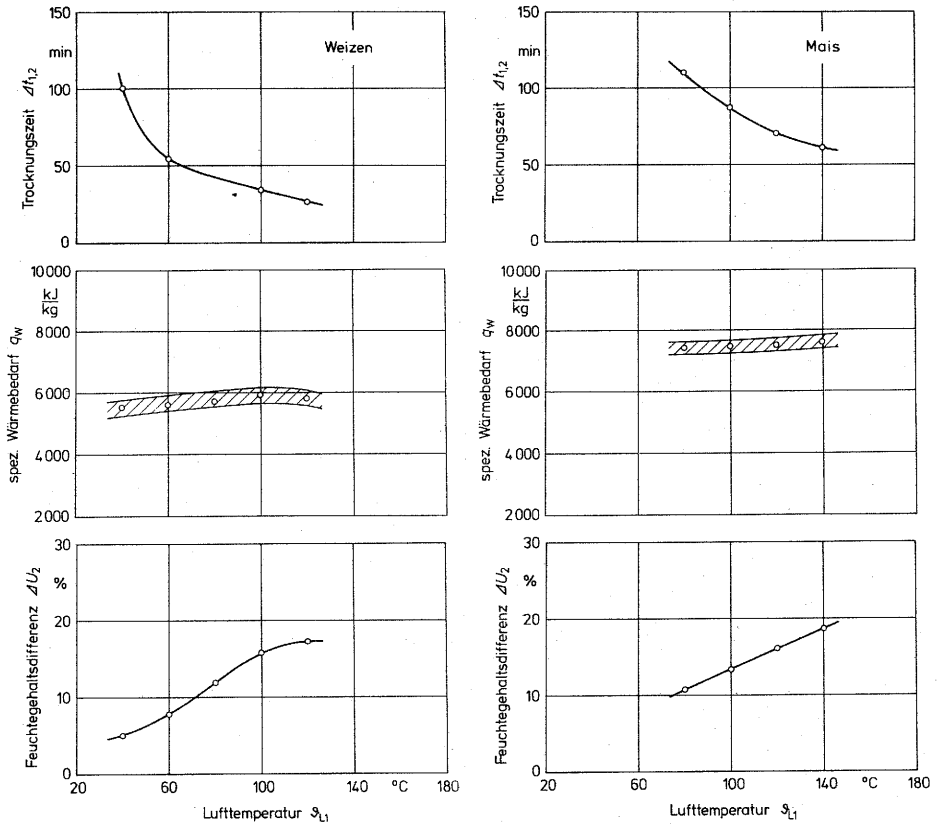


Bild 23 bis 25: Gesamttrocknungszeit $\Delta t_{1,2}$ (Bild 23), spezifischer Wärmebedarf q_w (Bild 24) und Feuchtegehaltsdifferenz ΔU_2 (Bild 25) in Abhängigkeit von der Lufttemperatur θ_{L1}

Gutart:	Weizen	Mais
Anfangsfeuchtegehalt	$U_1 = 20\%$	$U_1 = 40\%$
Endfeuchtegehalt	$\bar{U}_2 = 14\%$	$\bar{U}_2 = 14\%$
Luftgeschwindigkeit	$v_{L1} = 0,5 \text{ m/s}$	$v_{L1} = 1,0 \text{ m/s}$
Höhe der Körnerschüttung	$s_1 = 0,3 \text{ m}$	$s_1 = 0,3 \text{ m}$

stellten Grenzen variiert. Die Bilder 23 bis 25 zeigen den bei diesen Versuchsreihen ermittelten Einfluß der Trocknungslufttemperatur auf Gesamttrocknungszeit, spezifischen Wärmebedarf und Gleichmäßigkeit der Trocknung.

Die Gesamttrocknungszeit $\Delta t_{1,2}$ in Bild 23, die nach Kap. 2.2 ein Maß für die Trocknungsleistung darstellt, nimmt mit zunehmender Trocknungslufttemperatur und dem dadurch bedingten höheren Wärmestrom sehr stark ab. Der spezifische Wärmebedarf q_w , Bild 24, steigt mit zunehmender Lufttemperatur geringfügig an, fällt allerdings bei der Trocknung von Weizen mit Lufttemperaturen über 100°C wieder leicht ab. Die im Vergleich zu Durchlauf Trocknern relativ hohen Werte für den spezifischen Wärmebedarf sind darauf zurückzuführen, daß zu Beginn des instationär ablaufenden Trocknungsvorganges erhebliche Wärmemengen vorwiegend nur zum Erwärmen der Körner erforderlich sind. Während dieser Zeit liegt die Temperatur der Abluft der obersten Schicht unter der Kühlgrenztemperatur, vgl. Bild 18; d.h. die Luft kann infolge der geringen Wasserdampfaufnahmefähigkeit nur wenig Feuchte aus der Körnerschüttung entfernen. Im weiteren Verlauf der Trocknung fällt die relative Feuchte sehr rasch auf Werte $\varphi_{L2} < 100\%$, vgl. Bild 19, d.h. ein erheblicher Anteil der Wasserdampfaufnahmefähigkeit der Trocknungsluft bleibt ungenutzt. Diese verfahrensbedingten Nachteile der Trocknung dicker Körnerschüttungen führen auch bei Einsatz des Verfahrens in der Praxis zu hohen Wärmebedarfswerten von $q_w = 6000 - 8000 \text{ kJ/kg}$ [61].

Der spezifische mechanische Energiebedarf e zum Antrieb des Gebläses zur Erzeugung des Luftstromes liegt bei den Versuchen mit $0,03 - 0,06 \text{ kWh/kg}$ bei der Trocknung von Weizen und mit $0,01 - 0,03 \text{ kWh/kg}$ bei Mais wesentlich unter dem praxisüblichen Wert von etwa $5 - 8\%$ des Gesamtenergiebedarfes, vgl. Kap. 2.2.2. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, daß der Druckabfall in dem Modell-Ruheschichttrockner aufgrund der Verwendung von gereinigtem Getreide sowie aufgrund des geringen Druckverlustes in den Trocknungsluftzuleitungen sowie in der geringen Höhe der Körnerschüttung niedriger als bei praxisüblichen Ruheschichttrocknern ist.

Um die Gleichmäßigkeit der Trocknung bei verschiedenen Lufttemperaturen zu ermitteln, wurde bei Erreichen des mittleren Endfeuchtegehaltes $\bar{U}_2 = 14\%$ ($\bar{X}_2 = 0,163$) der gesamten dicken Schüttung die Feuchtegehaltsdifferenz ΔU_2 zwischen der obersten und der untersten dünnen Schicht bestimmt und in Bild 25 aufgezeichnet. Dabei zeigt sich, daß mit zunehmenden Temperaturen der Trocknungsluft die Feuchtegehaltsdifferenz stark ansteigt. Der Verlauf des Endfeuchtegehaltes der Körnerschüttung weist das in Bild 26 dargestellte charakteristische Verhalten auf. Wird eine solche ungleichmäßig getrocknete Körnerschüttung anschließend gelagert, sind die Körner mit Feuchtegehalten $U_2 > 14\%$ ($X_2 > 0,163$) Ausgangspunkte für einen Verderb der Körnerschüttung durch Mikroorganismen. Um dies zu verhindern, wird in der Praxis der Getreidetrocknung versucht, durch intensives Mischen des Gutes einen Feuchteausgleich zwischen den unterschiedlich getrockneten Körnern zu erreichen. Während mit dieser Maßnahme bei einer Weizenkörnerschüttung die Feuchtegehaltsdifferenz von $\Delta U_2 < 1,5\%$ erreicht werden kann [62], läßt sich in einer Maiskörnerschüttung die Feuchtegehaltsdifferenz nur bis auf $\Delta U_2 \approx 3\%$ verringern [63]. In diesem Fall ist eine sichere Lagerung der Maiskörnerschüttung nur durch eine zusätzliche konservierende Nachbehandlung, wie beispielsweise eine Belüftung im Lagerbehälter gewährleistet.

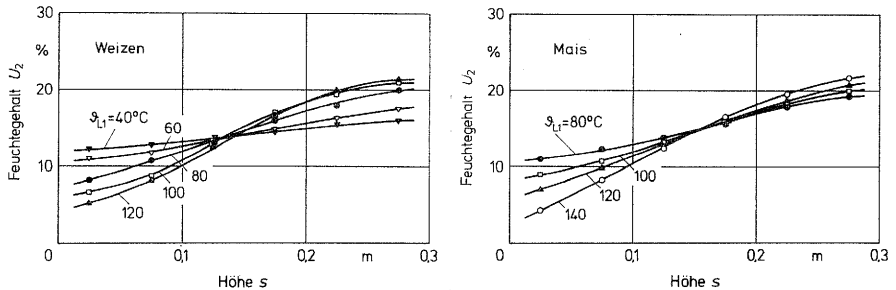


Bild 26: Verlauf des Endfeuchtegehaltes U_2 in der Körnerschüttung abhängig von der Höhe s in der Schüttung. Gleiche Versuchsbedingungen wie in Bild 23 bis 25

4.3.2 Einfluß der Luftgeschwindigkeit

Zur Untersuchung des Einflusses der Luftgeschwindigkeit auf das Trocknungsverhalten der Körner wurde in einer Versuchsreihe die Luftgeschwindigkeit zwischen den in Tafel 5 angegebenen Grenzen variiert und die Versuchsergebnisse in Bild 27 bis 29 dargestellt.

Nach Gl. (9) muß die Gesamttrocknungszeit $\Delta t_{1,2}$ mit steigender Luftgeschwindigkeit abnehmen. Wie Bild 27 zeigt, verkürzt sich allerdings die Gesamttrocknungszeit nicht in dem erwarteten Maße, sondern erheblich langsamer. Die Ursache dafür ist die mit ansteigender Luftgeschwindigkeit wesentlich schlechter werdende Ausnutzung der Wasserdampfaufnahmefähigkeit der Luft, die auch ein Ansteigen des spezifischen Wärmebedarfs q_w zur Folge hat, Bild 28. Der spezifische mechanische Energiebedarf steigt nach Gl. (11) mit zunehmender Luftgeschwindigkeit stark an. Beispielsweise beträgt er bei einer Luftgeschwindigkeit $v_L = 0,5$ m/s bei Weizen 0,01 kWh/kg bzw. bei Mais 0,012 kWh/kg entzogenem Wasser und steigt bei $v_L = 1,0$ m/s auf 0,047 kWh/kg bei Weizen bzw. 0,049 kWh/kg bei Mais an.

Die Gleichmäßigkeit der Trocknung bzw. die Feuchtegehaltsdifferenz ΔU_2 wird mit steigender Luftgeschwindigkeit wesentlich verbessert, Bild 29. Bei höheren Luftgeschwindigkeiten wird die Wasserdampfaufnahmefähigkeit der Trocknungsluft erst nach längerem Strömungsweg durch die Körnerschüttung vollständig ausgenutzt, wodurch auch die von der Lufteintrittsstelle entfernten Körner bereits frühzeitig zu trocknen beginnen. Außerdem führen die kürzeren Gesamttrocknungszeiten dazu, daß die an der Lufteintrittsstelle befindlichen Körner weniger übertrocknet werden.

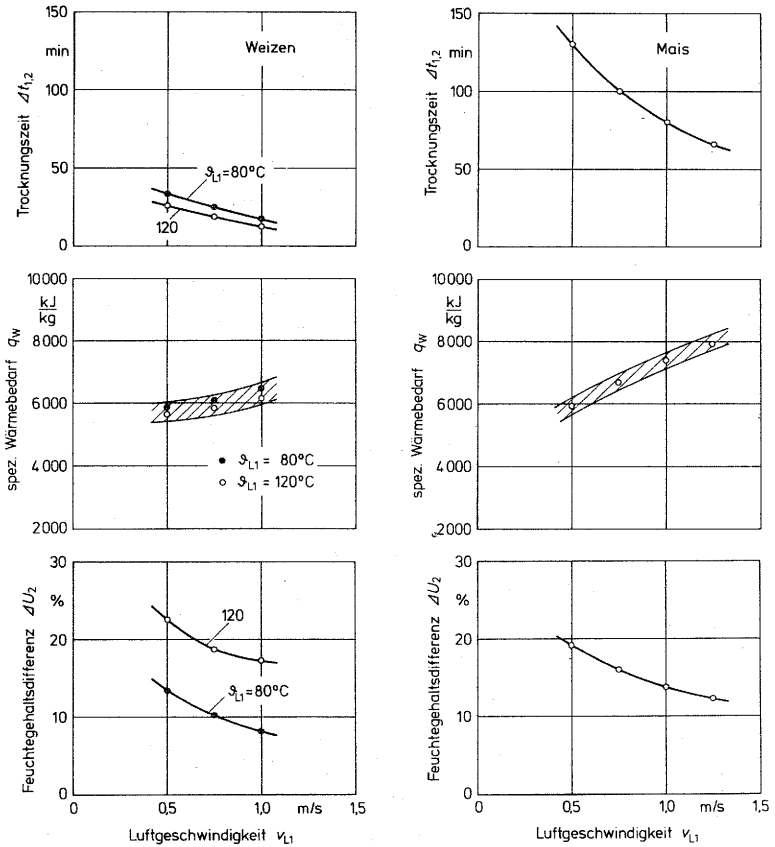


Bild 27 bis 29: Gesamttrocknungszeit $\Delta t_{1,2}$ (Bild 27), spezifischer Wärmebedarf q_w (Bild 28) und Feuchtegehaltsdifferenz ΔU_2 (Bild 29) in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit v_{L1}

Gutart:	Weizen	Mais
Anfangsfeuchtegehalt	$U_1 = 19\%$	$U_1 = 40\%$
Endfeuchtegehalt	$\bar{U}_2 = 14\%$	$\bar{U}_2 = 14\%$
Lufttemperatur	$\vartheta_{L1} = 80; 120^\circ\text{C}$	$\vartheta_{L1} = 100^\circ\text{C}$
Höhe der Körnerschüttung	$s_1 = 0,3 \text{ m}$	$s_1 = 0,3 \text{ m}$

4.3.3 Einfluß der Höhe der Körnerschüttung

Der Einfluß der Höhe der Körnerschüttung auf das Trocknungsverhalten ist aus den Bildern 30 bis 32 zu ersehen. Die Gesamttrocknungszeit $\Delta t_{1,2}$ ist nahezu linear abhängig von der Höhe der Schüttung, Bild 30. Die bei geringeren Höhen relativ größeren Trocknungszeiten sind darauf zurückzuführen, daß die Wasserdampfaufnahmefähigkeit infolge des kurzen Strömungsweges durch die Körnerschüttung nicht vollständig ausgenutzt werden kann. Entsprechend steigt dadurch auch der spezifische Wärmebedarf q_w mit abnehmender Höhe stark an, Bild 31. Die Versuchsergebnisse für den mechanischen Energiebedarf e zeigen, daß dieser aufgrund der höheren Trocknungsleistung mit zunehmender Höhe der Körnerschüttung nicht linear, sondern degressiv zunimmt.

Die Gleichmäßigkeit des Trocknungsvorganges wird mit zunehmender Schüttungsdicke schlechter, wie Bild 32 für die Feuchtegehaltsdifferenz ΔU_2 zeigt. Die mit ansteigender Höhe der Körnerschüttung längere Gesamttrocknungszeit $\Delta t_{1,2}$ führt zu starker Übertrocknung der Körner an der Lufteintrittsstelle, während die Körner am Luftaustritt immer weniger getrocknet werden. Die Grenzhöhe der Körnerschüttung, bei der nahezu keine Veränderung der Feuchtegehaltsdifferenz ΔU_2 der Körner zwischen Lufteintritt und Luftaustritt mehr stattfindet, ist abhängig von den Trocknungs- und Stoffparametern, d.h. für jeden speziellen Trocknungsprozess experimentell zu bestimmen.

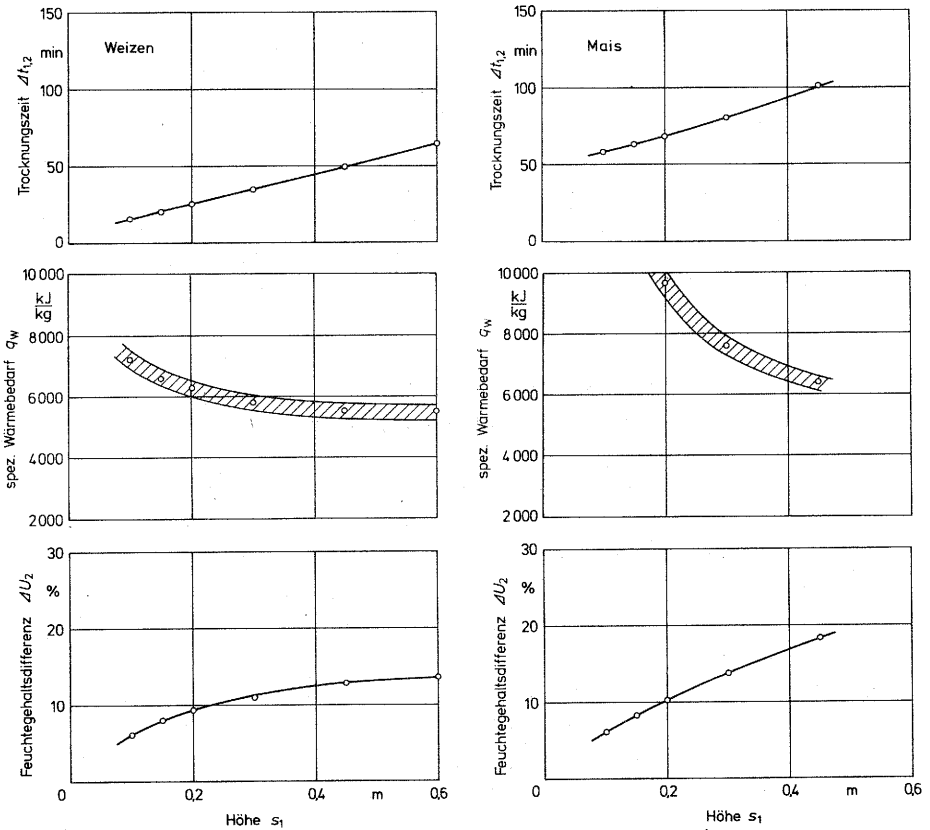


Bild 30 bis 32: Gesamttrocknungszeit $\Delta t_{1,2}$ (Bild 30), spezifischer Wärmebedarf q_w (Bild 31) und Feuchtegehaltsdifferenz ΔU_2 (Bild 32) in Abhängigkeit von der Höhe s_1 der Körnerschüttung

Gutart:	Weizen	Mais
Anfangsfeuchtegehalt	$U_1 = 19\%$	$U_1 = 39\%$
Endfeuchtegehalt	$\bar{U}_2 = 14\%$	$\bar{U}_2 = 14\%$
Lufttemperatur	$\vartheta_{L1} = 80^\circ\text{C}$	$\vartheta_{L1} = 100^\circ\text{C}$
Luftgeschwindigkeit	$v_{L1} = 0,5 \text{ m/s}$	$v_{L1} = 1,0 \text{ m/s}$

4.3.4 Einfluß des Anfangsfeuchtegehaltes der Körner

Bedingt durch den Mangel an geeignetem Versuchsgut konnte der Einfluß des Anfangsfeuchtegehaltes der Körner auf die Trocknungskenngrößen nur an Einzelversuchen bei Weizen untersucht werden, dessen Anfangsfeuchtegehalt $U_1 = 19,1\%$ ($X_1 = 0,239$) bzw. $U_1 = 24,3\%$ ($X_1 = 0,321$) betrug. Die dabei ermittelten Versuchsergebnisse sind in Tafel 6 zusammengestellt.

Anfangsfeuchtegehalt U_1 %	Gesamt-Trocknungszeit $\Delta t_{1,2}$ min	entzogene Feuchtemasse \dot{m}_w kg/h	spez. Wärmebedarf q_w kJ/kg	spez. mech. Energiebedarf e kWh/kg	Feuchtegehaltsdifferenz ΔU_2 %
19,1	25,5	3,07	5790	0,015	17,8
24,3	45	3,30	5530	0,012	21,3

Tafel 6: Trocknungskenngrößen von Weizen bei unterschiedlichem Anfangsfeuchtegehalt U_1 der Körner

Lufttemperatur	$\vartheta_{L1} = 100^\circ\text{C}$
Luftgeschwindigkeit	$v_{L1} = 0,5 \text{ m/s}$
Höhe der Körnerschüttung	$s_1 = 0,3 \text{ m}$

Da die Gesamttrocknungszeit $\Delta t_{1,2}$ bei unterschiedlichem Anfangsfeuchtegehalt der Körner wenig aussagekräftig für die Trocknungsleistung ist, wurde in Tafel 6 die stündlich entzogene Feuchtemasse \dot{m}_w ergänzend eingetragen. Dabei wird deutlich, daß mit steigendem Anfangsfeuchtegehalt der Körner die Trocknungsleistung zunimmt. Gleichzeitig werden der spezifische Wärmebedarf q_w und der spezifische mechanische Energiebedarf e reduziert. Die Gleichmäßigkeit der Trocknung bzw. die Feuchtegehaltsdifferenz ΔU_2 nimmt mit steigendem Anfangsfeuchtegehalt der Körner ab, da infolge der längeren Trocknungszeit für die feuchtere Körnerschüttung die Körner an der Luft Eintrittsseite stärker übertrocknet werden, während sie am Luftaustritt zunehmend ungetrocknet bleiben.

4.4 Vergleich des mit den Modellansätzen berechneten Trocknungsverlaufs mit den experimentell ermittelten Ergebnissen

Grundlage des in Kap. 3.3 aufgestellten Berechnungsmodells ist die Kenntnis des Trocknungsverhaltens der dünnen Körnerschüttung abhängig von den verschiedenen Trocknungs- und Stoffparametern wie Temperatur und relative Feuchte der Trocknungsluft, Luftgeschwindigkeit, Feuchtegrad und Temperatur der Körner. Eine exakte Beschreibung des Trocknungsverhaltens dünner Getreidekörnerschüttungen mit den Gesetzmäßigkeiten des Wärme- und Stoffübergangs ist infolge des inhomogenen Aufbaus des Kornes sowie der Komplexität der Feuchtebewegung im Korninnern nicht möglich [45, 52].

Aus diesem Grund schlägt Schlünder [64] vor, nicht die grundlegenden Wärme- und Stoffaustauschvorgänge, sondern die experimentell zu bestimmenden Trocknungsverlaufskurven als diejenige physikalische Grundinformation zu betrachten, auf die alle Theorien der Trocknungsprozesse aufzubauen sind. Allerdings besteht dazu die Notwendigkeit, die Trocknungsverlaufskurven für die verschiedenen Trocknungsbedingungen zu kennen.

Für die Trocknung dünner Getreidekörnerschüttungen liegen zwar eine Reihe experimenteller Untersuchungen vor, in denen der Einfluß einiger, den Trocknungsverlauf beeinflussenden Größen untersucht wurde [45, 65 bis 81]. Die ermittelten Ergebnisse weisen allerdings erhebliche Schwankungen auf, die in erster Linie darauf zurückzuführen sind, daß die Versuche bei unterschiedlichen Versuchsbedingungen durchgeführt wurden. Eine vollständige Erfassung der Trocknungsverlaufskurven von Getreide in Abhängigkeit von den verschiedenen Trocknungsbedingungen unter exakt definierten Bedingungen liegt nicht vor, wird jedoch derzeit im Rahmen eines Forschungsvorhabens am Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim vorgenommen.

Um trotzdem eine Überprüfung des Berechnungsmodells aus Kap. 3.3 vornehmen zu können, wurde aus den Ergebnissen der Untersuchungen des Trocknungsverhaltens dicker ruhender Körnerschüttungen in Kap. 4.3 die Trocknungsgeschwindigkeit errechnet und in das Berechnungsmodell übernommen. Daraufhin wurde untersucht, inwieweit die berechenbaren Größen wie beispielsweise die Lufttemperatur nach den einzelnen Schichten mit den experimentellen Werten unter Berücksichtigung der verwendeten Gleichungen und der getroffenen Annahmen übereinstimmen. Zur Berechnung wurde Gl. (51) umgeformt in:

$$\vartheta_{L2} = \frac{m_L \vartheta_{L1} (\bar{c}_{pL} + x_{L1} \bar{c}_{pD}) - m_{TS} [g_D \Delta t (r_B + r_O) + \bar{c}_{KX1} \vartheta_{K1}]}{m_L (\bar{c}_{pL} + x_{L1} \bar{c}_{pD}) + m_{TS} (g_D \Delta t \bar{c}_{pD} + \bar{c}_{KX2})} \quad (53)$$

Vergleicht man die mittels Gleichung (53) berechneten Verlauf der Ablufttemperaturen nach den einzelnen dünnen Schichten mit den gemessenen Kurven, so ergeben sich nur geringfügige Abweichungen, Bild 33. Diese Abweichungen sind in erster Linie darauf zurückzuführen, daß die Trocknungsgeschwindigkeit durch Differentiation aus den Trocknungsverlaufskurven ermittelt wurde, deren Genauigkeit $\pm 5\%$ beträgt. Außerdem konnten bei der Berechnung der Ablufttemperatur Wärmeverluste, die infolge der Erwärmung der Trocknungsbehälter und durch Wärmeübertragung an die Umgebung entstehen, nicht mitberücksichtigt werden.

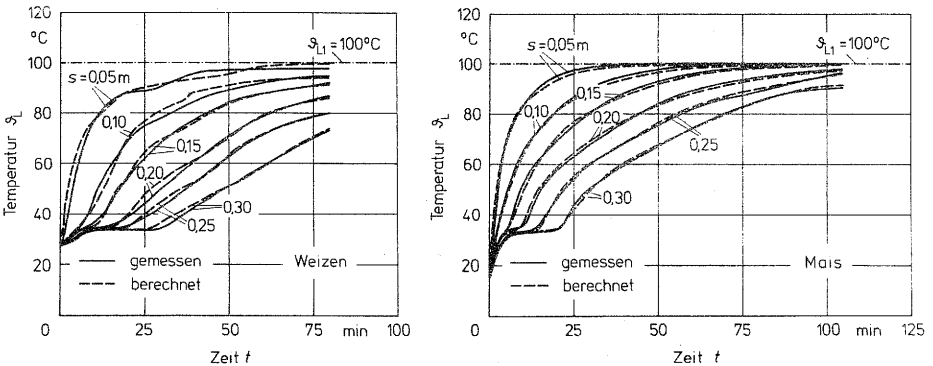


Bild 33: Vergleich des mit Gl. (53) berechneten Verlaufs der Lufttemperatur ϑ_L mit dem experimentell ermittelten. Gleiche Versuchsbedingungen wie in Bild 16 bis 19

4.5 Folgerungen aus den Versuchsergebnissen

Die experimentelle Untersuchung der Ruheschichttrocknung hat gezeigt, daß dieses Trocknungsverfahren einige verfahrensbedingte Nachteile aufweist, die auch durch eine Variation der untersuchten Trocknungsparameter nicht behoben werden konnten. Die im Vergleich zu anderen Trocknungsverfahren geringe Trocknungsleistung konnte durch eine Erhöhung der Lufttemperatur und der Luftgeschwindigkeit nur geringfügig gesteigert werden, da zu hohe Trocknungslufttemperaturen zu einer Qualitätsschädigung der Körner am Lufteintritt führen [47, 48], bzw. zu hohe Luftgeschwindigkeiten mit einer starken Zunahme des Wärmebedarfes bzw. des mechanischen Energiebedarfes verbunden waren.

Der spezifische Wärmebedarf lag bei den untersuchten Trocknungsbedingungen immer über 5 500 kJ/kg. Er entsprach damit den Werten von in der Praxis eingesetzten Ruheschichttrocknern, deren spezifischer Wärmebedarf 6000 - 8000 kJ/kg beträgt [61]. Die Ursache für den hohen Wärmebedarf bei der Ruheschichttrocknung ist in erster Linie darin zu suchen, daß zu Beginn der Trocknung die Abluft die Körnerschüttung nahezu mit der niedrigen Temperatur der noch kalten Körner verläßt und damit nur geringe Feuchtemengen aufnehmen und aus der Körnerschüttung entfernen kann. Weiter fällt mit fortschreitender Trocknung die relative Feuchte der Abluft stark ab; d.h. die Wärmeausnutzung der Trocknungsluft wird sehr schlecht.

Die Ungleichmäßigkeit der Trocknung zwischen Lufteintritt und Luftaustritt führte sowohl bei der Trocknung von Weizen als auch bei Mais zu unerwartet hohen Feuchtegehaltsdifferenzen, die teilweise bei Werten $\Delta U_2 > 20\%$ lagen. Es ist zu erwarten, daß bei der Lagerung einer solchen ungleichmäßig getrockneten Körnerschüttung die Körner durch die Mikroorganismen-tätigkeit verdorben werden, bevor ein Feuchteausgleich zwischen den unterschiedlich getrockneten Körnern stattgefunden hat.

Eine Beseitigung dieser Mängel der Ruheschichttrocknung durch eine Optimierung der Trocknungsparameter ist nur teilweise möglich, da sich eine Variation der Trocknungsparameter unterschiedlich auf die einzelnen Trocknungskenngrößen auswirkt. In Tafel 7 sind die Auswirkungen einer Erhöhung der untersuchten Trocknungsparameter Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit und Dicke der Körnerschüttung auf die Trocknungskenngrößen tabellarisch zusammengestellt.

Erhöhung von	Auswirkungen auf				
	Trocknungsleistung \dot{m}_w	Gesamt-trocknungszeit $\Delta t_{1,2}$	spez. Wärmebedarf q_w	spez. mech. Energiebedarf e	Gleichmäßigkeit der Trocknung ΔU_2
Lufttemperatur s_{L1}	+	+	0	+	-
Luftgeschwindigkeit v_{L1}	+	+	-	-	+
Schütt-höhe s_1	+	-	+	-	-

(+) günstig (0) nahezu einflußlos (-) ungünstig

Tafel 7: Auswirkung einer Erhöhung der untersuchten Trocknungsparameter auf die Trocknungskenngrößen bei der Trocknung dicker ruhender Körnerschüttungen

Beispielsweise können durch eine Erhöhung der Trocknungslufttemperatur Trocknungsleistung und spezifischer mechanischer Energiebedarf verbessert werden, während jedoch gleichzeitig die Gleichmäßigkeit der Trocknung stark abnimmt. Einer Erhöhung der Lufttemperatur sind weiter dadurch Grenzen gesetzt, daß die Qualität der Körner zu erhalten ist. Die Lufttemperatur darf bei der Trocknung dicker Körnerschüttungen nur so hoch sein, daß während der Trocknungszeit die an der Lufteintrittsstelle befindlichen besonders gefährdeten Körner nicht geschädigt werden.

Für eine Verbesserung der Trocknung dicker Körnerschüttungen im Hinblick auf Trocknungsleistung, Wärmebedarf, Gleichmäßigkeit der Trocknung und Erhaltung der Kornqualität bieten sich aufgrund der gewonnenen Versuchsergebnisse folgende Lösungsmöglichkeiten an:

- Einbau von Mischeinrichtungen in die Trocknungszone zur Durchmischung der Körner, um eine Übertrocknung der Körner am Lufteintritt bzw. eine Untertrocknung der Körner am Luftaustritt zu vermeiden. Gleichzeitig können höhere Lufttemperaturen zur Anwendung kommen, da die Körner nur kurze Zeiten in der heißen Trocknungsluft am Lufteintritt verbleiben. Durch die Durchmischung lassen sich sämtliche Trocknungskenngrößen verbessern.
- Umkehrung der Strömungsrichtung der Trocknungsluft nach der Hälfte der Trocknungszeit. Mit dieser Verfahrensänderung lassen sich ähnliche Effekte erzielen wie bei der Durchmischung der Körnerschüttung; allerdings sind die positiven Auswirkungen auf die Trocknungskenngrößen erheblich geringer.
- Vorwärmung der Körnerschüttung auf die Kühlgrenztemperatur des entsprechenden Trocknungsluftzustandes. Dadurch kann die Wasseraufnahmefähigkeit der Trocknungsluft bereits zu Beginn der Trocknung vollständig ausgenutzt werden, ohne daß gleichzeitig Feuchte aus der Luft auskondensiert und sich auf den Körnern niederschlägt. Es erfolgt damit eine Steigerung der Trocknungsleistung und eine Verringerung des Wärmebedarfes. Allerdings ist zur Realisierung dieser Möglichkeit ein erheblicher technischer Aufwand erforderlich.

5. Experimentelle Untersuchung des Trocknungsverhaltens von Körnerschüttungen bei der Querstromtrocknung

5.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Zur experimentellen Untersuchung des Trocknungsverhaltens von Getreide bei der Querstromtrocknung wird ein Versuchsquerstromtrockner benötigt, bei dem die Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit und Breite der Trocknungszone unabhängig voneinander variiert werden können. Weiter wird von dem Trockner gefordert, daß eine gleichförmige Fließgeschwindigkeit der Körnerschüttung im Trocknerschacht und eine gleichmäßige Luftströmung im rechten Winkel zur Bewegungsrichtung der Körnerschüttung gewährleistet ist. Im Hinblick auf eine spätere Modifizierung des Querstromverfahrens, siehe Kap. 6, sollte der Querstromtrockner so gestaltet sein, daß konstruktive Veränderungen des Trockners mit geringem technischen Aufwand realisiert werden können.

Unter Beachtung dieser Anforderungen wurde im Modellmaßstab der in Bild 34 dargestellte Querstromtrockner gebaut. Der Versuchstrockner besteht im wesentlichen aus dem Vorratsbehälter für Feuchtgut, der Trocknungszone, der nachgeschalteten Trockengutzone sowie der Austrageeinrichtung für die getrockneten Körner. Zur Vermeidung von Wärmeverlusten wurde der gesamte Trockner wärmeisoliert. Auf den Einbau einer Kühlzone wurde verzichtet, um den Anlaufvorgang bei Versuchsbeginn abzukürzen.

Die zu trocknenden Körner werden mit einem Becherelevator in den Feuchtgutvorratsbehälter gefördert und fließen infolge Schwerkrafteinwirkung gleichförmig durch den Trocknerschacht. Die Füllstandsregelung der Körnerschüttung im Trockner erfolgt mittels kapazitivem Zweipunktregler. Zum Austragen der Körner aus dem Trockner werden Dosierzellen verwendet, die nach dem Zellenradprinzip arbeiten. Der Gutdurchsatz kann über eine stufenlose Verstellung der Drehzahl der Dosierzellen

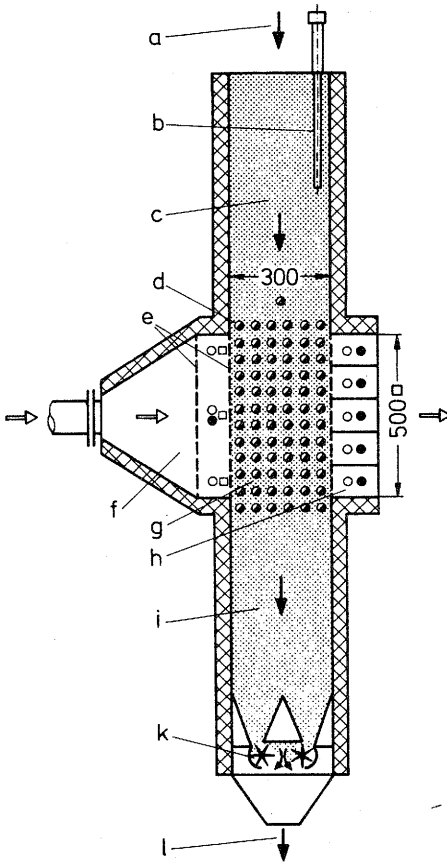


Bild 34: Schematische Darstellung des Querstrommodelltrockners (Maße in mm)

- a Feuchtgut
- b Füllstandsregler
- c Feuchtgutzone
- d Meßöffnung
- e Drahtgeflecht
- f Trocknungsluftzufuhr
- g Trocknungszone
- h Abluftkanal
- i Trockengutzone
- k Austragseinrichtung
- l Trockengut

Meßstellen:

- Luftdruck
- Lufttemperatur
- Taupunkt
- ◐ Lufttemperatur/
Feuchtegehalt der
Körner

gesteuert und mit einer Durchlaufwaage kontinuierlich bestimmt werden.

Die Trocknungsluft wird mit der bereits in Kap. 4.1.1 beschriebenen Lufterhitzungseinrichtung erwärmt und über einen Luftkanal der Trocknungszone zugeführt. Um in der Trocknungszone eine gleichförmige Luftverteilung zu erreichen, wurde der Luftzufuhrkanal als Diffusor ausgebildet und zusätzlich mit einem als Luftwiderstand wirkenden engmaschigen Drahtgeflecht versehen. Ein zweites Drahtgeflecht dient zur Begrenzung des Trocknerschachtes in der Trocknungszone. Wie sich in Vorver-

suchen zeigte, konnte mit diesen Maßnahmen eine gleichmäßige Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilung der Trocknungsluft in der Trocknungszone erreicht werden. Um während der Versuche ein unkontrolliertes Ausströmen der Trocknungsluft aus der Trocknungszone nach oben und unten durch den Trocknerschacht weitgehend zu unterbinden, wurden die Feuchtgutzone bzw. die Trockengutzone so groß ausgebildet, daß die Höhe der darin befindlichen Körnerschüttung jeweils ein Mehrfaches der Breite der Körnerschüttung in der Trocknungszone betrug.

Für die Durchführung der Versuche wird das Versuchsmaterial mit dem Mähdrescher geerntet; danach werden mit einem Saatgutreiniger die Beimengungen und Kornfeinteile entfernt. Nach dem Befüllen des Trocknerschachtes wird entsprechend den vorgegebenen Versuchsparametern der stündliche Trockengutdurchsatz

$$\dot{m}_{K2} = \dot{m}_w \frac{1 - U_1}{U_1 - U_2} \quad (54)$$

durch Drehzahl-Regulierung der Dosierwalzen so eingestellt, daß ein mittlerer Endfeuchtegehalt der getrockneten Körnerschüttung von 14% zu erwarten ist. Weiter werden Temperatur und Geschwindigkeit der Trocknungsluft vor Eintritt in die Trocknungszone dem Sollwert angepaßt.

Während der Trocknung werden zur Bestimmung des Feuchtegehaltes der zu trocknenden Körner stündlich 3 Proben aus der Feuchtgutzone entnommen und im Trockenschrank (24 h bei 105°C) der Feuchtegehalt ermittelt. Der Feuchtegehalt der getrockneten Körner wird nach Erreichen des stationären Trocknungsvorganges in Abständen von 10 Minuten in gleicher Weise bestimmt. Um bei den Versuchen zu gesicherten Ergebnissen zu gelangen, beträgt die Versuchszeit während des stationären Trocknungsbetriebes abhängig vom Trockengutdurchsatz zwei bis sechs Stunden.

Die Messung der Temperatur und des Taupunktes von Außenluft, Trocknungsluft und Abluft erfolgt mit Thermoelementen bzw.

Lufttemperatur-Feuchtefühlern. Zur Ermittlung des Abluftzustandes abhängig vom Weg des Gutes in der Trocknungszone sind an der Abluftseite der 0,5 m hohen Trocknungszone im Abstand von jeweils 0,1 m fünf durch Luftleitbleche voneinander getrennte Lufttemperatur-Feuchtefühler angebracht. Die ermittelten Meßwerte werden in analoger Form mit einem Punktdrucker registriert und anschließend mittels Rechenprogramm ausgewertet.

Zur Beurteilung des Trocknungsvorganges in der Trocknungszone ist es erforderlich, den Feuchtegehalt der Körner sowie die Lufttemperatur in der Trocknungszone zu ermitteln. Dazu wurden in der Trocknungszone senkrecht zur Bewegungsrichtung von Luft und Körnerschüttung 72 Meßöffnungen (Durchmesser $d_1 = 25\text{mm}$) im Abstand von jeweils 0,05 m in der Trocknerwand angebracht, vgl. Bild 34. Für die Bestimmung des Feuchtegehaltes der Körner werden an diesen Meßöffnungen mittels Probenzieher Kornproben entnommen. Weiter können an diesen Meßstellen Kornproben zur Untersuchung von qualitativen Veränderungen der Körner während des Trocknungsvorganges entnommen werden. Zur Messung der Lufttemperatur in der Trocknungszone wird eine Temperaturmeßsonde, in deren luftdurchlässiger Spitze sich ein Mantelthermoelement befindet, durch die Meßöffnungen in den Trockner eingebracht. Da das Einbringen der Temperaturmeßsonde direkt durch die Meßöffnung Schwierigkeiten bereitet, wurden die Verschlußstopfen der Meßstellen zusätzlich mit einer 4,5 mm dicken verschließbaren Bohrung versehen, durch welche die 4 mm dicke Sonde geführt werden kann.

Um die Qualitätsveränderung der Körner durch die Trocknung ermitteln zu können, werden sowohl vom Feuchtgut als auch vom Trockengut jeweils homogenisierte Mischproben entnommen und entsprechend der Gutart und dem nachfolgenden Verwendungszweck nach den in Kap. 2.2.4 dargestellten Methoden untersucht.

Schwierigkeiten bereitet bei den Versuchen die Einstellung des Gutdurchsatzes, der so zu regulieren ist, daß die Körner den Trockner mit einem mittleren Endfeuchtegehalt von 14% verlassen. Wie aus Gl. (54) ersichtlich wird, muß dazu der Anfangs-

feuchtegehalt der Körner bekannt sein. Da dieser aus Zeitgründen bei Versuchsbeginn nur mit Hilfe eines Schnellfeuchtemeßgerätes ermittelt werden kann, dessen Meßunsicherheit insbesondere bei hohen Feuchtegehalten im Bereich von $\Delta U = \pm 2\%$ liegt, ist auch der Endfeuchtegehalt der Körner nach der Trocknung dieser Toleranz unterworfen.

5.2 Versuchsauswertung

Analog der Untersuchung des Trocknungsverhaltens dicker Körnerschüttungen werden zur Beurteilung des Trocknungsverhaltens von Weizen und Mais bei der Querstromtrocknung unter verschiedenen Trocknungsbedingungen die Trocknungskenngrößen von Kap. 2.2 verwendet. Zur Ermittlung von auftretenden Veränderungen der Kornqualität bei der Trocknung werden die getrockneten Weizen- und Maismischproben mit den in Kap. 2.2 beschriebenen Schnellmethoden untersucht^{*)}.

Die Gesamttrocknungszeit $\Delta t_{1,2}$ entspricht bei Durchlauftrocknern derjenigen Verweilzeit der Körner in der Trocknungszone, die erforderlich ist, den Anfangsfeuchtegehalt U_1 auf den mittleren Endfeuchtegehalt \bar{U}_2 der die Trocknungszone verlassenden Körner zu erniedrigen:

$$\Delta t_{1,2} = \frac{z_1 A_{s,y} \frac{\varphi_{S1} + \varphi_{S2}}{2} q_w (U_1 - \bar{U}_2)}{\dot{Q}_L (100 - U_1)} \quad (55)$$

Mit z_1 wird in Gl. (55) die Höhe der Trocknungszone, mit $A_{s,y}$ die Querschnittsfläche des Trocknerschachtes in der s,y -Ebene bezeichnet. Aus Gl. (55) kann dann die mittlere Korngeschwindigkeit $v_{K,z}$ in der Trocknungszone errechnet werden.

^{*)} Die backtechnischen Untersuchungen von Weizen wurden freundlicherweise von Herrn Prof. Dr. L. Wassermann, Fa. Eiselen Vater und Sohn, Neu-Ulm, durchgeführt. Für die farbmetrischen Untersuchungen stellte Herr Prof. Dr. S. Scholtyssek, Leiter des Fachgebietes Kleintierzucht der Universität Hohenheim, ein Dreibereichsfarbmeßgerät zur Verfügung.

Zur Ermittlung der Zustandsänderungen der Luft beim Durchströmen durch die Körnerschüttung muß der Feuchtegrad x_{L2} der Luft in Abhängigkeit von der Trocknerbreite s in verschiedenen Höhen z der Trocknungszone berechnet werden. Unter Verwendung von Gl. (39) in Kap. 3.3 für die Stoffbilanz ergibt sich:

$$x_L(s, z) = x_{L1} + \frac{1}{\dot{m}_L} \sum_{s=0}^{s_1} m_{TS}(s, z) g_D(s, z) \quad (56)$$

Für die Faktoren in Gl. (56) sind die experimentell ermittelten Werte der Versuche einzusetzen. Die relative Feuchte der Luft $\varphi_L(s, z)$ kann bei bekanntem Verlauf des Feuchtegrades $x_L(s, z)$ und der gemessenen Lufttemperatur $\vartheta_L(s, z)$ aus dem Mollier - h, x - Diagramm entnommen werden.

5.3 Versuchsergebnisse

Zur Ermittlung des Trocknungsverhaltens von Weizen und Mais bei der Querstromtrocknung wurden die Trocknungsparameter unter Berücksichtigung der Erkenntnisse der Ruheschichttrocknung zwischen den in Tafel 8 zusammengestellten Grenzen verändert. Der Gutparameter Anfangsfeuchtegehalt der Körner war durch die jeweiligen Erntebedingungen vorgegeben.

Parameter		Gutart	
		Weizen	Mais
Lufttemperatur ϑ_{L1}	°C	60 - 120	80 - 160
Luftgeschwindigkeit v_{L1}	m/s	0,5 - 1,5	0,5 - 1,5
Breite der Trocknungszone s_1	m	0,15 ; 0,3	0,15 ; 0,3
Anfangsfeuchtegehalt der Körner U_1	%	17,9 - 26,4	35,2 - 38,7
Sorte:		Jubilar	Brillant Inrakorn Limac

Tafel 8: Zusammenstellung der variierten Trocknungs- und Stoffparameter sowie der untersuchten Bereiche bei der Querstromtrocknung

Um den charakteristischen Trocknungsvorgang bei der Querstromtrocknung von Weizen und Mais aufzuzeigen, ist in Bild 35 bis 38 exemplarisch für jeweils einen Versuch der Verlauf des Feuchtegehaltes U der Körner sowie der Temperatur der Trocknungsluft ϑ_L in der Trocknungszone aufgezeichnet. Die Kurven zeigen dabei die Abhängigkeit des Feuchtegehaltes bzw. der Lufttemperatur vom Weg z des Gutes in der Trocknungszone bei verschiedenen Abständen s der Körner von der Lufteintrittsseite. Wie aus Bild 35 und 36 ersichtlich wird, findet an der Lufteintrittsseite eine intensive Trocknung der Körner statt, während die Körner an der Luftaustrittsseite nur sehr langsam trocknen bzw. teilweise ungetrocknet bleiben. Die Erhöhung des Feuchtegehaltes der Körner an der Luftaustrittsseite zu Beginn der Trocknung ist auf Kondensation von Feuchte aus der Trocknungsluft zurückzuführen, die sich auf der Oberfläche der Körner niederschlägt.

Die bereits vor Eintritt der Körner in die Trocknungszone beginnende Vortrocknung der der Lufteintrittsseite zugekehrten Körner ist damit zu erklären, daß im Trockner eine geringe Luftströmung durch die Körnerschüttung im Gegenstrom nach oben erfolgt. Das gleiche Verhalten der Trocknungsluft findet auch nach unten im Trocknerschacht statt, so daß die Körner noch geringfügig im Gleichstrom nachgetrocknet werden. Als Folge davon liegt der mittlere Endfeuchtegehalt der Körnerschüttung beim Austritt aus dem Trockner um $\Delta U_2 = 1-2\%$ niedriger als beim Verlassen der Trocknungszone.

Wird angenommen, daß nach der kurzzeitigen Anlaufphase der Trocknung die Korntemperatur näherungsweise der Lufttemperatur im Trockner entspricht [57, 58], so geben die Bilder 37 und 38 neben dem Verlauf der Lufttemperatur in der Trocknungszone auch Auskunft über das Verhalten der Korntemperatur beim Durchfließen der Körner durch den Trockner. Vergleicht man den Verlauf von Lufttemperatur und Feuchtegehalt in der Trocknungszone, so zeigt es sich, daß der Entzug der Feuchte abhängig ist von der Temperatur der Trocknungsluft. Beispielsweise beginnen in Bild 36 die Maiskörner an der Stelle $s = 0,275$ m ausgehend vom

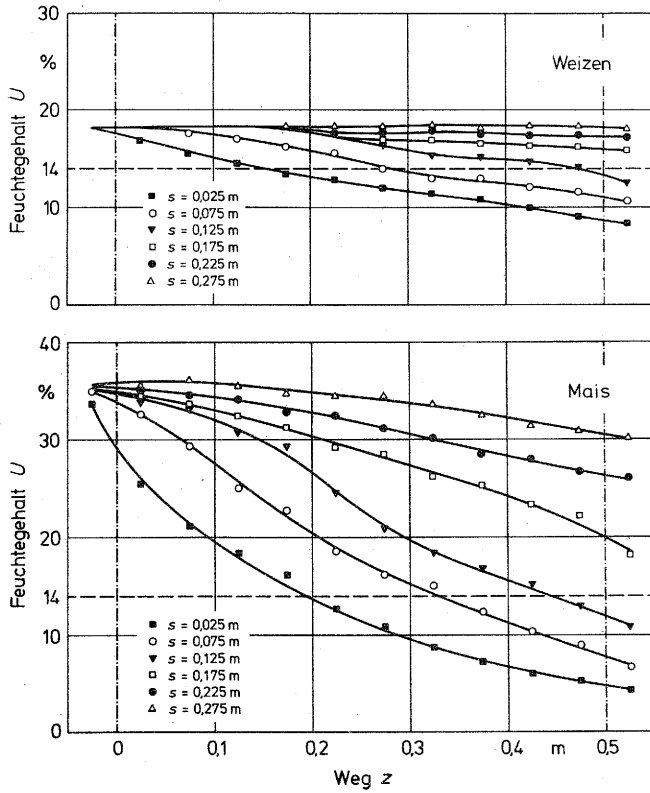


Bild 35 und 36: Verlauf des Feuchtegehaltes U der Körner abhängig vom Weg z des Gutes in der Trocknungszone an verschiedenen Stellen der Trocknerbreite s

Gutart:	Weizen	Mais
Anfangsfeuchtegehalt	$U_1 = 18,3\%$	$U_1 = 35,0\%$
Endfeuchtegehalt	$\bar{U}_2 = 14,1\%$	$\bar{U}_2 = 14,8\%$
Lufttemperatur	$\vartheta_{L1} = 100^\circ\text{C}$	$\vartheta_{L1} = 140^\circ\text{C}$
Luftgeschwindigkeit	$v_{L1} = 1,0 \text{ m/s}$	$v_{L1} = 1,0 \text{ m/s}$
Breite des Trockners	$s_1 = 0,3 \text{ m}$	$s_1 = 0,3 \text{ m}$
Korngeschwindigkeit	$\bar{v}_K = 2,33\text{m/h}$	$\bar{v}_K = 0,88\text{m/h}$

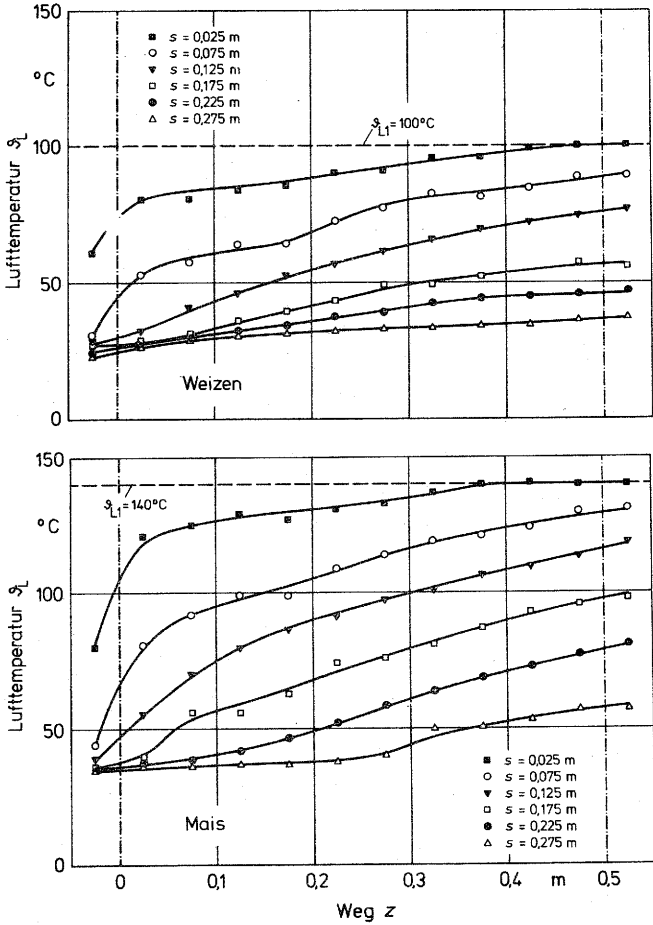


Bild 37 und 38: Verlauf der Lufttemperatur ϑ_L abhängig vom Weg z des Gutes in der Trocknungszone an verschiedenen Stellen der Trocknerbreite s . Gleiche Versuchsbedingungen wie in Bild 35 und 36

Anfangsfeuchtegehalt U_1 der Körner erst dann zu trocknen, nachdem ein Anstieg der Trocknungslufttemperatur zu beobachten ist, Bild 38; zuvor wird nur die auskondensierte Feuchte an der Kornoberfläche entfernt.

Betrachtet man den Trocknungsvorgang in Abhängigkeit von der Trocknerbreite s , so ergibt sich bei der Trocknung von Mais für den Feuchtegehalt U , die Lufttemperatur ϑ_L und die relative Luftfeuchte φ_L das in Bild 39 bis 41 dargestellte Verhalten. Die Kurven wurden dabei für den Zustand bei Eintritt der Körner in die Trocknungszone ($z = 0$) sowie in der Mitte ($z = 0,25$ m) und am Ende der Trocknungszone ($z = 0,5$ m) aufgezeichnet. Diese Art der Darstellung zeigt sowohl die ungleichmäßige Trocknung der Körner über die Trocknerbreite, Bild 39, als auch das Absinken der Lufttemperatur beim Durchströmen durch die Körnerschüttung, Bild 40. Die relative Feuchte der Luft in Bild 41 nimmt für $z = 0$ sehr schnell zu und erreicht nach etwa $s = 0,20$ m Weg durch die Körnerschüttung den Sättigungszustand $\varphi_L = 100\%$. Da die Lufttemperatur weiter absinkt, Bild 40, sind Kondensationserscheinungen und demgemäß ein Anstieg des Feuchtegehaltes der Körner die Folge.

Die Intensität des Wärme- und Stoffaustausches veranschaulichen die Bilder 42 bis 44, die den zeitlichen Verlauf von Temperatur ϑ_L , Feuchtegrad x_L und relativer Feuchte φ_L der Trocknungsluft wiedergeben. Der Zeitpunkt $t = 0$ bezeichnet dabei den Eintritt der Luft in die Trocknungszone; die Ergebnisse wurden aus den Werten in Bild 36 und 38 berechnet. Wie die Bilder zeigen, findet insbesondere bei Eintritt des Gutes in die Trocknungszone ($z = 0$) ein intensiver Wärme- und Stoffaustausch zwischen Luft und Gut statt, so daß die Lufttemperatur bereits nach $0,033$ sec von $\vartheta_{L1} = 140^\circ\text{C}$ auf die Hälfte abgesunken ist, Bild 42. Gleichzeitig steigen der Feuchtegrad und die relative Feuchte der Luft stark an, Bild 43 und 44; der Sättigungszustand der Luft $\varphi_L = 100\%$ wird bereits nach $0,11$ sec erreicht.

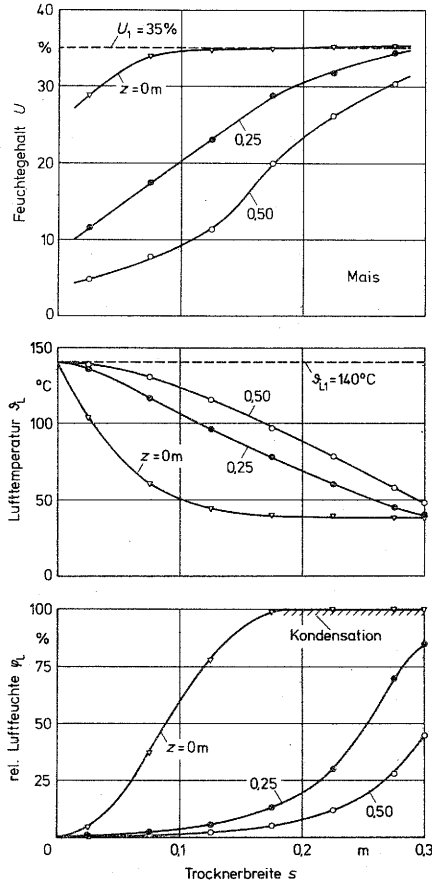


Bild 39 bis 41: Verlauf von Feuchtegehalt U der Körner (Bild 39), Lufttemperatur S_L (Bild 40) und relativer Luftfeuchte ϕ_L (Bild 41) abhängig von der Trocknerbreite s für unterschiedliche Wege z des Gutes in der Trocknungszone, $z = 0$ Guteintritt, $z = 0,25\text{ m}$ Mitte der Trocknungszone, $z = 0,50\text{ m}$ Gutaustritt)

Gutart:	Mais
Anfangsfeuchtegehalt	$U_1 = 35\%$
Endfeuchtegehalt	$\bar{U}_2 = 14,8\%$
Lufttemperatur	$S_{L1} = 140^\circ\text{C}$
Luftgeschwindigkeit	$v_{L1} = 1,0\text{ m/s}$
Breite des Trockners	$s_1 = 0,3\text{ m}$

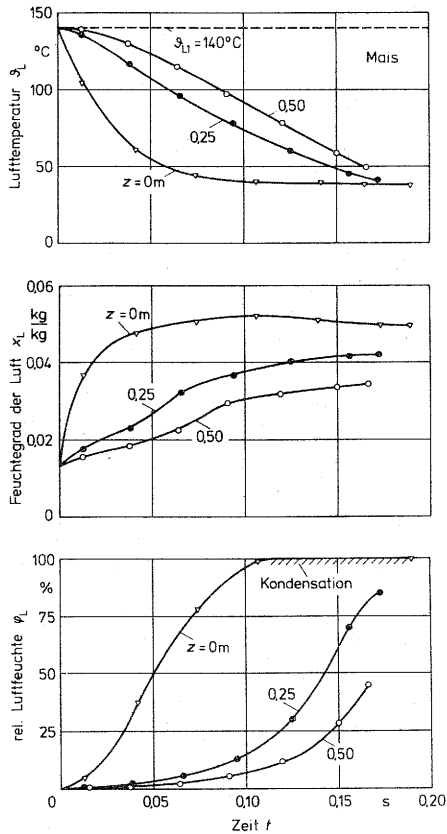


Bild 42 bis 44: Zeitlicher Verlauf von Feuchtegrad x_L der Luft (Bild 42), Lufttemperatur θ_L (Bild 43) und relativer Luftfeuchte ϕ_L (Bild 44) für unterschiedliche Wege z des Gutes in der Trocknungszone. Gleiche Versuchsbedingungen wie in Bild 39 bis 41

5.3.1 Einfluß der Lufttemperatur

Zur Ermittlung des Einflusses der Temperatur der Trocknungs-
luft auf das Trocknungsverhalten wurde eine Versuchsreihe bei
unterschiedlichen Lufttemperaturen und sonst konstanten Trock-
nungsbedingungen durchgeführt und die Ergebnisse in den Bildern
45 bis 48 dargestellt.

Die Trocknungsleistung, d.h. die je Zeiteinheit entzogene
Feuchtemasse \dot{m}_w muß nach Gl. (6) bis (8) mit zunehmender Luft-
temperatur ansteigen. Bild 45 zeigt die bei der Trocknung von
Weizen und Mais stündlich entziehbare Feuchtemasse \dot{m}_w in Abhän-
gigkeit von der Temperatur der Trocknungsluft ϑ_{L1} . Der Grund
für die degressive Zunahme des Feuchteentzugs mit steigenden
Lufttemperaturen ist in erster Linie darin zu suchen, daß
einerseits der dem Trockner zugeführte Wärmestrom degressiv
zunimmt und andererseits bei höheren Lufttemperaturen eine
schlechtere Wärmeausnutzung aus der Trocknungsluft erfolgt.

Da der spezifische Wärmebedarf aus den Versuchsdaten nicht
exakt ermittelt werden kann, zeigt Bild 46 die Abhängigkeit
des spezifischen Wärmebedarfs q_w von der Trocknungsluft unter
Berücksichtigung des Streubereichs. Die Zunahme des spezifi-
schen Wärmebedarfes mit steigender Lufttemperatur ist in er-
ster Linie auf die starke Übertrocknung und Erwärmung der Kör-
ner am Lufteintritt zurückzuführen, wozu erhebliche Wärme be-
nötigt wird. Dieses Verhalten steht im Gegensatz zur Gleich-
und Gegenstromtrocknung, bei denen mit zunehmender Lufttempe-
ratur der spezifische Wärmebedarf absinkt [45, 82, 83]. Der
gegenüber der Ruheschichttrocknung wesentlich niedrigere spe-
zifische Wärmebedarf ist damit zu erklären, daß in dem Ver-
suchstrockner eine geringe Luftströmung der Trocknungsluft
nach oben erfolgt, die die noch kalten ungetrockneten Körner
vorwärmt. In der Trocknungszone wird dadurch einerseits ein
Auskondensieren von Feuchte aus der Luft weitgehend vermie-
den, andererseits kann die Wasserdampfaufnahmefähigkeit der
Luft vollständig ausgenutzt werden.

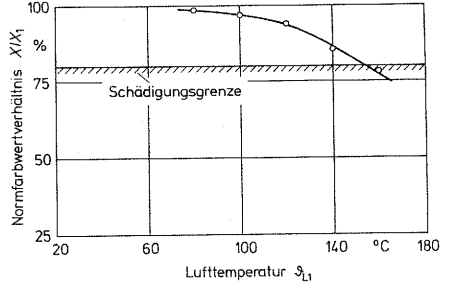
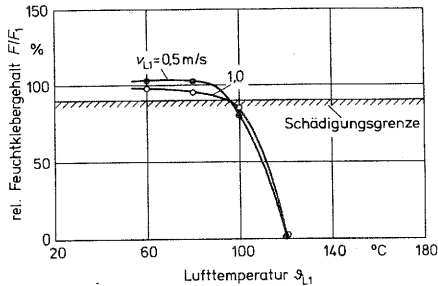
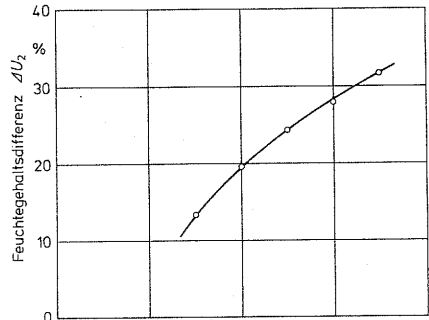
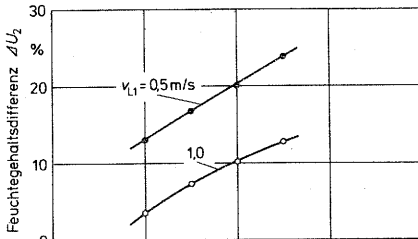
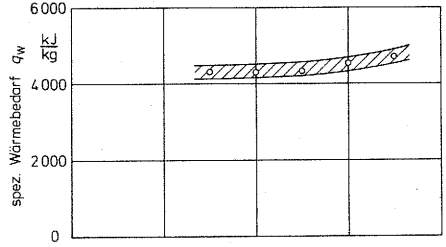
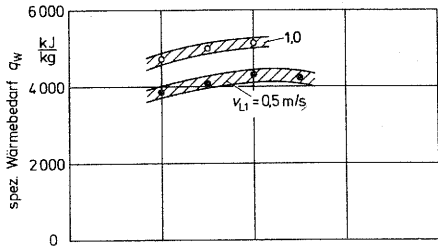
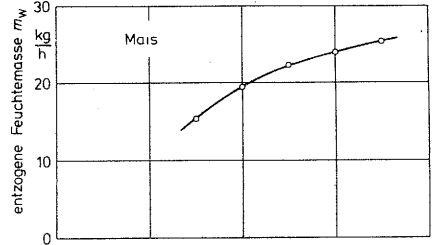
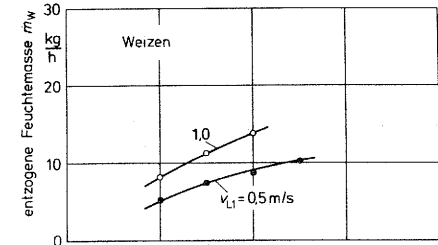


Bild 45 bis 48: Entzogene Feuchtemasse \dot{m}_w (Bild 45), spezifischer Wärmebedarf q_w (Bild 46), Feuchtegehaltsdifferenz ΔU_2 (Bild 47) und relativer Feuchtklebergehalt F/F_1 bzw. Normfarbverhältnis X/X_1 (Bild 48) in Abhängigkeit von der Lufttemperatur s_{L1} . Gleiche Versuchsbedingungen wie in Bild 49 und 50

Der ebenfalls gemessene spezifische Energiebedarf e für den Gebläseantrieb liegt mit 0,01 - 0,1 kWh/kg bei der Weizen- und 0,01 - 0,03 kWh/kg bei der Maistrocknung wie bei der Trocknung dicker ruhender Körnerschüttungen unter dem praxisüblichen Wert von etwa 5 - 8% des Gesamtenergiebedarfes [46, 47]. Ursache dafür ist der geringe Druckabfall der Luft beim Durchströmen durch die gereinigte Körnerschüttung sowie die geringen Druckverluste in den Trocknungsluft- und Abluftleitungen.

Um die Gleichmäßigkeit der Trocknung bei den verschiedenen Lufttemperaturen aufzuzeigen, wurde in Bild 47 die Feuchtegehaltsdifferenz ΔU_2 zwischen den Körnern am Lufteintritt ($s = 0,025$ m) und am Luftaustritt ($s = 0,275$ m) dargestellt. Aus dem Bild wird deutlich, daß mit zunehmender Lufttemperatur die Feuchtegehaltsdifferenz stark ansteigt. Vergleicht man diese Werte mit Feuchtegehaltsdifferenzen bei der Gleich- oder Gegenstromtrocknung mit $\Delta U_2 = 1 - 3\%$ [82, 83], so zeigt sich die ungleichmäßige Trocknung beim Querstromverfahren sehr deutlich.

Bei der Ermittlung von Veränderungen der Kornqualität durch die Trocknung mit den in Kap. 2.2.4 beschriebenen Schnellmethoden wurde der in Bild 48 aufgezeigte Einfluß der Trocknungslufttemperatur auf die qualitätsbestimmenden Größen festgestellt. Da eine Schädigung der Kornqualität nur dann vorliegt, sobald der Kurvenverlauf des relativen Feuchtklebergehaltes F/F_1 bzw. des Normfarbwertverhältnisses X/X_1 die Schädigungsgrenze unterschritten hat [48, 49], bedeutet dies, daß bei der Trocknung von Weizen dieser erst bei Lufttemperaturen von über 90°C und Mais bei über 150°C geschädigt wird.

Betrachtet man die Veränderung des Endfeuchtegehaltes U_2 und der Qualität der Körner in Abhängigkeit von der Trocknerbreite am Beispiel der Trocknung von Mais, so erkennt man in Bild 49 die starke Übertrocknung der Körner am Lufteintritt sowie die mit zunehmender Lufttemperatur abnehmende Trocknung der Körner am Luftaustritt. Die Qualitätsveränderung der Maiskörner bei der Trocknung ist sehr stark abhängig vom Abstand der Körner zum Lufteintritt, Bild 50. Die in diesem Bild bereits bei

Lufttemperaturen $\vartheta_{L1} = 140^{\circ}\text{C}$ aufgezeigte Schädigung der Körner im Bereich des Lufteintritts ($s < 0,1$ m) wird bei einer Qualitätsuntersuchung der gesamten getrockneten Körnerschüttung, Bild 48, infolge des geringen Anteils der geschädigten Körner in der Körnerschüttung nicht erfaßt.

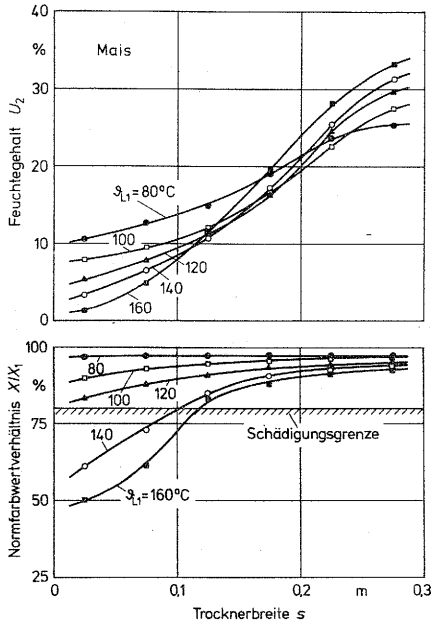


Bild 49 und 50: Verlauf von Endfeuchtegehalt U_2 (Bild 49) und Normfarbwertverhältnis X/X_1 (Bild 50) der Maiskörner nach der Trocknungszone ($z = 0,525$ m) in Abhängigkeit von der Trocknerbreite s bei verschiedenen Lufttemperaturen ϑ_{L1} :

Gutart:	Weizen	Mais
Anfangsfeuchtegehalt	$U_1 = 20\%$	$U_1 = 36\%$
Endfeuchtegehalt	$\bar{U}_2 = 14\%$	$\bar{U}_2 = 14\%$
Luftgeschwindigkeit	$v_{L1} = 0,5; 1,0$ m/s	$v_{L1} = 1,0$ m/s
Breite des Trockners	$s_1 = 0,3$ m	$s_1 = 0,3$ m

5.3.2 Einfluß der Luftgeschwindigkeit

Zur Untersuchung des Einflusses der Luftgeschwindigkeit auf das Trocknungsverhalten wurde die Luftgeschwindigkeit bei sonst konstanten Trocknungsbedingungen zwischen den in Tafel 8 angegebenen Grenzen variiert. Die dabei ermittelten Versuchsergebnisse sind in den Bildern 51 bis 53 dargestellt.

Der dem Trockner zugeführte Wärmestrom \dot{Q}_L ist nach Gl. (8) bei konstanter Lufttemperatur linear abhängig vom Luftdurchsatz und damit auch linear abhängig von der Luftgeschwindigkeit v_L . Die Trocknungsleistung, Bild 51, steigt dagegen nicht proportional dem zugeführten Wärmestrom an, sondern verläuft degressiv. Dieses hat seine Ursache darin, daß mit steigender Luftgeschwindigkeit die Wärmeausnutzung aus der Trocknungsluft abnimmt. Dadurch erhöht sich auch der spezifische Wärmebedarf q_w , siehe Bild 52. Der spezifische mechanische Energiebedarf e steigt mit zunehmender Luftgeschwindigkeit stark an. Beispielsweise beträgt er bei der Luftgeschwindigkeit $v_{L1} = 0,5$ m/s bei Weizen 0,012 kWh/kg bzw. bei Mais 0,007 kWh/kg und steigt bei der Luftgeschwindigkeit $v_{L1} = 1,5$ m/s auf 0,062 kWh/kg bei Weizen bzw. 0,039 kWh/kg bei Mais an.

Die Gleichmäßigkeit der Trocknung wird mit höheren Luftgeschwindigkeiten erheblich verbessert, wie Bild 53 veranschaulicht. Die mit einer Zunahme der Luftgeschwindigkeit verbundene Erhöhung des Wärmestromes \dot{Q}_L führt zu einer Verkürzung der Verweilzeit des Gutes in der Trocknungszone, wodurch Körner an der Lufteintrittsseite weniger übertröcknet werden. Weiter wird bei erhöhter Luftzufuhr das Trocknungsvermögen der Luft erst nach längerem Strömungsweg durch die Körnerschüttung vollständig ausgenutzt. Damit beginnen auch die von der Lufteintrittsstelle entfernt befindlichen Körner bereits frühzeitig zu trocknen und verlassen mit geringeren Endfeuchtegehalten die Trocknungszone.

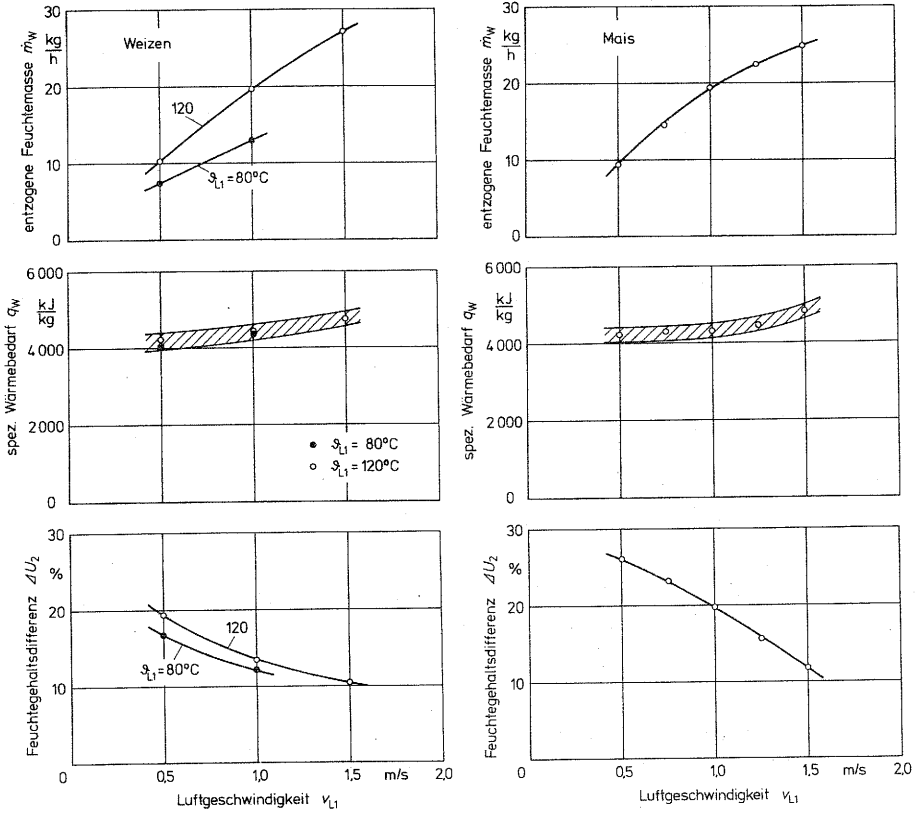


Bild 51 bis 53: Verlauf von entzogener Feuchtemasse \dot{m}_w (Bild 51), spezifischem Wärmebedarf q_w (Bild 52) und Feuchtegehaltsdifferenz ΔU_2 (Bild 53) in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit v_{L1}

Gutart:

Anfangsfeuchtegehalt

Endfeuchtegehalt

Lufttemperatur

Breite des Trockners

Weizen

$U_1 = 21,5\%$

$\bar{U}_2 = 14\%$

$s_{L1} = 80; 120^\circ\text{C}$

$s_1 = 0,3 \text{ m}$

Mais

$U_1 = 36\%$

$\bar{U}_2 = 14\%$

$s_{L1} = 100^\circ\text{C}$

$s_1 = 0,3 \text{ m}$

Die trocknungsbedingte Veränderung der Kornqualität wird in erster Linie von der Höhe der Korntemperatur und ihrer Einwirkungszeit beeinflusst. Eine Erhöhung der Luftgeschwindigkeit und die damit kürzer werdende Verweilzeit des Gutes in der Trocknungszone muß somit zu einer Verringerung der Qualitätsveränderungen führen. Bei der Trocknung von Weizen mit einer Lufttemperatur von $\vartheta_{L1} = 80^{\circ}\text{C}$ konnte eine geringfügige Verbesserung der Qualität mit steigender Luftgeschwindigkeit festgestellt werden; eine über die Schädigungsgrenze hinausgehende Qualitätsveränderung wurde in dem untersuchten Luftgeschwindigkeitsbereich nicht festgestellt. Die Trocknung von Weizen mit einer Lufttemperatur von $\vartheta_{L1} = 120^{\circ}\text{C}$ führte dagegen unabhängig von den eingestellten Luftgeschwindigkeiten zu einer vollständigen Qualitätsschädigung der Körner.

Bei der Trocknung von Mais mit einer Lufttemperatur $\vartheta_{L1} = 100^{\circ}\text{C}$ konnte unabhängig von den untersuchten Luftgeschwindigkeiten $0,5 \leq v_{L1} \leq 1,5$ m/s keine Qualitätsveränderung der getrockneten Mischproben ermittelt werden. Im höheren Temperaturbereich findet dagegen mit steigender Luftgeschwindigkeit eine geringer werdende Qualitätsveränderung der Körner im Trockner statt, wie man aus Bild 54 für die Luftgeschwindigkeiten $v_{L1} = 0,5$ m/s und $1,0$ m/s erkennen kann.

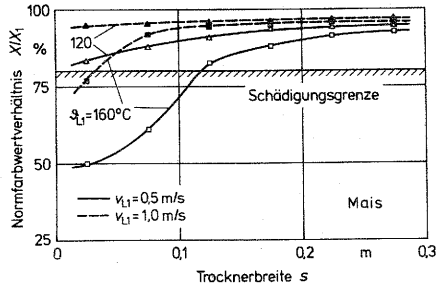


Bild 54: Normfarbwertverhältnis X/X_1 der Maiskörner nach der Trocknungszone ($z = 0,525 \text{ m}$) bei unterschiedlichen Luftgeschwindigkeiten abhängig von der Trocknerbreite s

Gutart:	Mais
Anfangsfeuchtegehalt	$U_1 = 36\%$
Endfeuchtegehalt	$\bar{U}_2 = 14\%$
Lufttemperatur	$\vartheta_{L1} = 120; 160^\circ\text{C}$
Breite des Trockners	$s_1 = 0,3 \text{ m}$

5.3.3 Einfluß der Trocknerbreite

Um den Einfluß der Trocknerbreite auf die Trocknung zu untersuchen, wurde die Breite des Trocknerschachtes von $s_1 = 0,30 \text{ m}$ auf $s_1 = 0,15 \text{ m}$ reduziert und bei sonst gleichen Versuchseinstellungen die Trocknungskenngrößen ermittelt und verglichen. Die Versuchsergebnisse sind beispielhaft für die Trocknung von Mais in Bild 55 bis 58 zusammengestellt. Wie Bild 55 zeigt, wird bei der Trocknerbreite $s_1 = 0,15 \text{ m}$ die Trocknungsleistung um 5 - 25% gegenüber der Trocknerbreite $s_1 = 0,3 \text{ m}$ verringert. Gleichzeitig steigt der spezifische Wärmebedarf q_w an, Bild 56. Ursache dieses Verhaltens ist die geringe Sättigung der Abluft insbesondere im niedrigen Temperaturbereich und die damit verbundene geringere Wärmeausnutzung der Trocknungsluft. Der spezifische mechanische Energiebedarf reduziert sich bei der verringerten Trocknerbreite $s_1 = 0,15 \text{ m}$ um 30 - 45%. Die in Bild 57 dargestellte Feuchtegehaltsdifferenz ΔU_2 verdeutlicht,

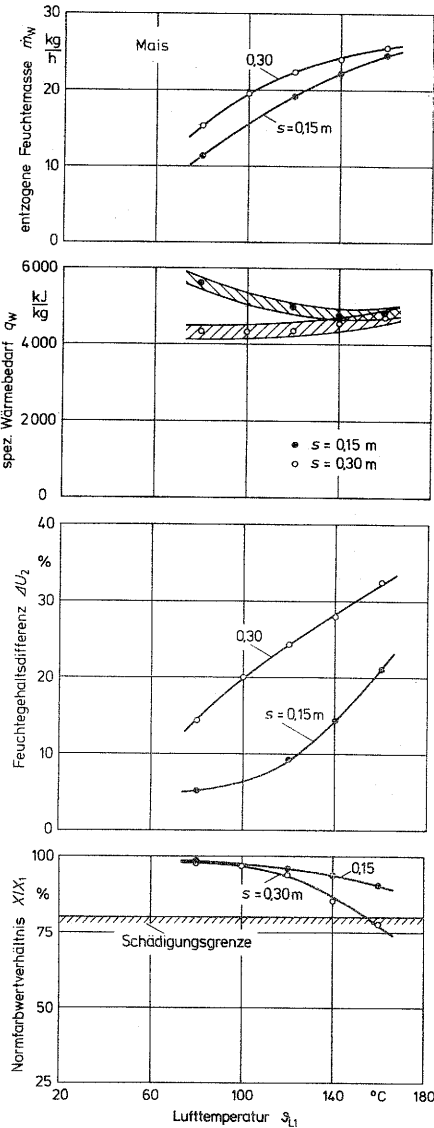


Bild 55 bis 58: Verlauf von entzogener Feuchtemasse \dot{m}_w (Bild 55), spez. Wärmebedarf q_w (Bild 56), Feuchtegehaltsdifferenz ΔU_2 (Bild 57) und Normfarbverhältnis X/X_1 (Bild 58) abhängig von der Lufttemperatur ϑ_{L1} bei Trocknerbreiten $s_1 = 0,15\text{ m}$ und $s_1 = 0,3\text{ m}$

Gutart: Mais
 Anfangsfeuchtegehalt $U_1 = 36\%$
 Endfeuchtegehalt $\bar{U}_2 = 14\%$
 Luftgeschwindigkeit $v_{L1} = 1,0\text{ m/s}$

daß mit abnehmender Trocknerbreite s_1 die Körner gleichmäßiger getrocknet werden. Gleichfalls wird die Qualität der Körner bei der geringeren Trocknerbreite weniger beeinflusst, Bild 58, was in erster Linie auf die bei gleichem Gutsdurchsatz nahezu halbierte Verweilzeit der Körner in der Trocknungszone zurückzuführen ist.

5.3.4 Einfluß des Anfangsfeuchtegehaltes der Körner

Die Untersuchung des Einflusses des Anfangsfeuchtegehaltes auf das Trocknungsverhalten mußte in Ermangelung an geeignetem Versuchsgut auf Einzelversuche mit Weizen eingeschränkt werden, dessen Anfangsfeuchtegehalt $U_1 = 18,5\%$ und $25,5\%$ betrug. Die bei einer Lufttemperatur $\vartheta_{L1} = 80^\circ\text{C}$ und einer Luftgeschwindigkeit $v_{L1} = 1,0 \text{ m/s}$ ermittelten Versuchsergebnisse sind in Tafel 9 zusammengestellt.

Anfangsfeuchtegehalt U_1	entz. Feuchtemasse \dot{m}_w	Trocknungszeit $\Delta t_{1,2}$	spez. Wärmebedarf q_w	spez.mech. Energiebedarf e	Feuchtegehaltsdifferenz ΔU_2	rel.spez. Backvolumen v/v_1
%	kg/h	min	kJ/kg	kWh/kg	%	%
18,5	11,54	18	4990	0,064	7,0	98
25,5	12,85	32	4480	0,055	14,2	97

Tafel 9: Darstellung der Trocknungskenngrößen von Weizen in Abhängigkeit vom Anfangsfeuchtegehalt U_1 der Körner

Lufttemperatur $\vartheta_{L1} = 80^\circ\text{C}$
 Luftgeschwindigkeit $v_{L1} = 1,0 \text{ m/s}$
 Breite des Trockners $s_1 = 0,3 \text{ m}$

Wie aus Tafel 9 zu entnehmen ist, wird bei höherem Anfangsfeuchtegehalt U_1 die zeitlich entzogene Feuchtemasse \dot{m}_w um etwa 11% erhöht, wobei gleichzeitig der spezifische Wärmebedarf q_w um etwa 10% abnimmt. Dies ist darauf zurückzuführen, daß mit

zunehmenden Feuchtegehalten die Feuchte aus den Körnern schneller und leichter entzogen werden kann. Ähnliches Verhalten wurde auch in eigenen Versuchen bei der Einzelkorntrocknung von Weizen ermittelt [84].

Die Gleichmäßigkeit der Trocknung nimmt mit zunehmendem Anfangsfeuchtegehalt ab. Da zur Trocknung des Gutes auf den mittleren Endfeuchtegehalt $\bar{U}_2 = 14\%$ bei höheren Anfangsfeuchtegehalten den Körnern mehr Feuchte entzogen werden muß, wird die Gesamttrocknungszeit $\Delta t_{1,2}$ vergrößert. Dadurch werden die Körner an der Lufteintrittsstelle stärker übergetrocknet, während sie gleichzeitig an der Luftaustrittsstelle aufgrund des höheren Anfangsfeuchtegehaltes weniger getrocknet werden, Bild 59. Eine Veränderung der Kornqualität aufgrund der längeren Trocknungszeit bei dem höheren Feuchtegehalt konnte nicht festgestellt werden.

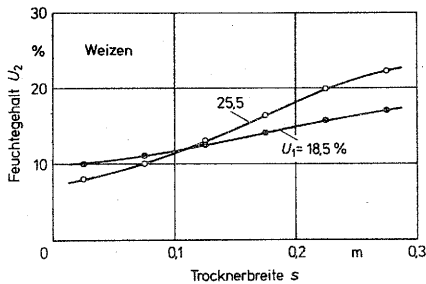


Bild 59: Feuchtegehaltsverlauf U_2 der Weizenkörner nach der Trocknungszone ($z = 0,525$ m) abhängig von der Trocknerbreite s bei unterschiedlichem Anfangsfeuchtegehalt U_1 der Körner

Gutart:	Weizen
Endfeuchtegehalt	$\bar{U}_2 = 14\%$
Lufttemperatur	$\vartheta_{L1} = 80^\circ\text{C}$
Luftgeschwindigkeit	$v_{L1} = 1,0$ m/s
Breite des Trockners	$s_1 = 0,3$ m

5.4 Folgerungen aus den Versuchsergebnissen

Die bei der Untersuchung der Querstromtrocknung ermittelten Versuchsergebnisse wiesen nahezu die gleichen Tendenzen auf wie diejenigen bei der Ruheschichttrocknung in Kap. 4, d.h. bei der Querstromtrocknung traten ähnliche Mängel auf. Die geringe Trocknungsleistung konnte durch eine Temperaturerhöhung der Trocknungsluft nur so lange gesteigert werden, bis die Qualitätsschädigungsgrenze der am Lufteintritt trocknenden Körner erreicht war. Eine Steigerung der Trocknungsleistung durch erhöhte Luftgeschwindigkeiten führte zu einem starken Anstieg des Wärmebedarfes und des mechanischen Energiebedarfes.

Der spezifische Wärmebedarf bei der Querstromtrocknung lag mit 4000 - 5500 kJ/kg unter den Werten der Ruheschichttrocknung; entsprach jedoch den Werten wie sie bei Querstromtrocknern auftreten, die in der Praxis eingesetzt werden [61]. Dies ist vor allem dadurch bedingt, daß bei der kontinuierlich arbeitenden Querstromtrocknung die wärmeintensive Anlaufphase zu Beginn der Trocknung unberücksichtigt bleibt. Darüber hinaus wurden bei den Versuchen durch die Falschlufftströmung der Trocknungsluft nach oben die kalten Körner in der Feuchtgutzone bereits vorgewärmt, so daß in der Trocknungszone das Auskondensieren von Feuchte aus der Luft verhindert wurde. Damit konnte die Wasserdampfaufnahmefähigkeit der Luft bereits bei Eintritt der Körner in die Trocknungszone vollständig ausgenutzt werden. Allerdings führte die Falschlufftströmung zu einem geringeren Luftdurchsatz durch die am Luftaustritt der Trocknungszone trocknenden Körnerschüttung, wodurch diese weniger getrocknet und entsprechend die ungleichmäßige Trocknung verstärkt wurde. Bei der Lagerung einer solchen ungleichmäßig getrockneten Körnerschüttung scheint eine sichere Lagerung der Körner in Frage gestellt.

Eine Beseitigung der Mängel der Querstromtrocknung alleine durch eine Variation der Trocknungsparameter ist wie bei der Ruheschichttrocknung nicht möglich. Wie aus Tafel 10 ersichtlich wird, wirkt sich eine Variation der untersuchten Trock-

nungsparameter nicht ausschließlich günstig auf die Trocknungs-kenngrößen aus. Beispielsweise kann bei der Trocknung von Weizen mit einem Anfangsfeuchtegehalt $U_1 = 20\%$ zur Steigerung der Trocknungsleistung bei einer Luftgeschwindigkeit $v_{L1} = 0,5 \text{ m/s}$ die Lufttemperatur bis auf $\vartheta_{L1} = 90^\circ\text{C}$ erhöht werden, ohne daß die Qualität der Körner Schaden erleidet. Während durch eine Temperaturerhöhung der spezifische Wärmebedarf nur geringfügig zunimmt, steigt die Ungleichmäßigkeit der Trocknung sehr stark an, d.h. die Feuchtegehaltsdifferenz ΔU_2 zwischen den unterschiedlich getrockneten Körnern beträgt 18%. Erfolgt gleichzeitig zur Temperaturerhöhung eine Vergrößerung der Luftgeschwindigkeit von $v_{L1} = 0,5 \text{ m/s}$ auf $1,0 \text{ m/s}$, so wird die Trocknungsleistung um zusätzlich 55% gesteigert sowie die Feuchtegehaltsdifferenz auf $\Delta U_2 = 9\%$ reduziert. Allerdings nehmen dadurch der spez. Wärmebedarf um 25% und der spez. mechanische Energiebedarf um mehr als 100% zu.

Erhöhung von	Auswirkungen auf				
	Trocknungsleistung	spez. Wärmebedarf	spez. mech. Energiebedarf	Gleichmäßigkeit	Kornqualität
Lufttemperatur ϑ_{L1}	+	0	+	-	-
Luftgeschwindigkeit v_{L1}	+	-	-	+	+
Trocknerbreite s_1	+	+	-	-	-

(+) günstig (0) nahezu einflußlos (-) ungünstig

Tafel 10: Auswirkungen einer Erhöhung der Trocknungsparameter Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit und Trocknerbreite auf die Trocknungskenngrößen bei der Querstromtrocknung

Es erscheint also günstiger, eine Verbesserung der Querstromtrocknung durch apparative oder verfahrenstechnische Veränderungen zu versuchen, wie sie auch Lasseran vorschlägt [85, 86]. Dazu bieten sich aufgrund der in Kap. 5.3 gewonnenen Erkenntnisse folgende Möglichkeiten an, die auch in der Praxis realisierbar sind:

- Unterteilung des Trocknerschachtes in senkrechter Richtung mit dem Ziel, die Fließgeschwindigkeit in den entstehenden Schachtsegmenten so zu regulieren, daß sie dem jeweiligen Trocknungsverlauf angepaßt sind.
- Umkehrung der Strömungsrichtung der Trocknungsluft durch die Körnerschüttung in einer zweiten Trocknungszone oder durch eine Inversion der Körnerschüttung im Trocknerschacht mittels Gutleitblechen.
- Anpassung der Trocknungslufttemperatur und der Luftgeschwindigkeit an das Trocknungsverhalten des Gutes bei einer mehrfachen Unterteilung der Trocknungszone in Fließrichtung der Körnerschüttung.
- Durchmischung der Körnerschüttung im Trocknerschacht durch konstruktive Maßnahmen wie beispielsweise den Einbau von spiralförmig ausgebildeten Gutleitblechen.
- Wärmerückgewinnung aus der Abluft insbesondere im unteren Teil der Trocknungszone, in dem die Abluft relativ warm und wenig gesättigt ist, sowie aus den getrockneten warmen Körnern nach der Trocknungszone.

Im folgenden Kapitel soll untersucht werden, inwieweit sich einige der hier aufgezeigten Veränderungsvorschläge positiv auf die Querstromtrocknung auswirken.

6. Experimentelle Untersuchung zur Modifizierung der Querstromtrocknung

6.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Nach Abschluß der Grundlagenuntersuchung der Ruheschichttrocknung und der konventionellen Querstromtrocknung wurde der in Bild 34 dargestellte Modelltrockner entsprechend den in Kap. 4 und 5 gewonnenen Erkenntnissen so umgebaut, daß eine Verbesserung der Querstromtrocknungsverfahren hinsichtlich Trocknungsleistung, Wärmebedarf, Gleichmäßigkeit der Trocknung und Erhaltung der Kornqualität erwartet werden konnte. In Bild 60 sind die modifizierten Bauarten dem konventionellen Querstromtrockner, Bild 60 a, gegenübergestellt.

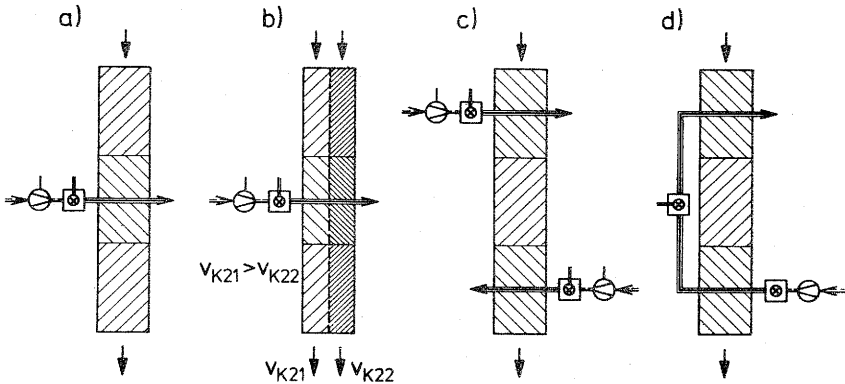


Bild 60: Schematische Darstellung der modifizierten Querstromtrockner im Vergleich mit dem konventionellen Querstromtrockner:

- konventioneller einstufiger Querstromtrockner
- einstufiger Querstromtrockner mit unterschiedlicher Fließgeschwindigkeit der Körner
- zweistufiger Querstromtrockner mit Luftumkehrung
- zweistufiger Querstromtrockner mit Luftumkehrung und Wärmerückgewinnung aus der Abluft

Bei der in Bild 60 b aufgezeigten Trocknerversion wurde der Trocknerschacht in der Mitte ($s = 0,15$ m) mittels eines luftdurchlässigen Trennbleches in zwei senkrechte Hälften unterteilt, wodurch es möglich wurde, die Fließgeschwindigkeit der Körner innerhalb des Trocknungsschachtes zu variieren. Die Einstellung der unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten in den beiden Schachthälften erfolgt über Austragsdosierwalzen, vgl. Bild 34, die mit Kettenrädern unterschiedlichen Durchmessers versehen wurden. Durch geeignete Auswahl des Durchmesserverhältnisses der beiden Kettenräder läßt sich das Verhältnis der Fließgeschwindigkeiten der Körnerschüttung in den beiden Schachthälften variieren.

Bei dem in Bild 60 c dargestellten zweistufigen Querstromtrockner wurde der einstufige Modelltrockner mit einer zweiten baugleichen Trocknungszone versehen, in der die Trocknungsluft in entgegengesetzter Richtung zur ersten durch die Körnerschüttung strömt. Um die Trocknungsbedingungen in den beiden Zonen unabhängig voneinander variieren zu können, verfügen beide über eine eigene Lufterhitzungseinrichtung. Die zwischen die Trocknungszone zusätzlich eingebaute Temperzone dient zur Vermeidung von Falschluffströmungen zwischen beiden Zonen in senkrechter Richtung durch den Trocknerschacht.

Zur experimentellen Untersuchung der Wärmerückgewinnung aus der Abluft wurde der zweistufige Querstromtrockner mit einem Wärmerückgewinnungssystem versehen, Bild 60 d. Dabei strömt die Abluft der unteren Trocknungszone nicht ungenutzt ins Freie, sondern wird mit einem zweiten, in den Luftkanal eingebauten Lufterhitzer auf die Temperatur der Trocknungsluft in der oberen Trocknungszone erwärmt und in dieser erneut zum Trocknen genutzt. Wie man aus Bild 60 d erkennen kann, ist bei dieser Trocknerbauart nur ein Gebläse erforderlich, welches allerdings so dimensioniert sein muß, daß der gesamte Druckabfall der Luft in den beiden Trocknungszone sowie in den Luftkanälen überwunden werden kann. Um in dem eingebauten Lufterhitzer eine gleichmäßige Luft- und Temperaturverteilung zu erreichen, wurden in dem

Luftkanal mehrere Luftleitbleche angebracht und als Lufterhitzer ein stufenlos regelbarer Gasflächenbrenner verwendet. Zur Vermeidung von Brandgefahr durch glühende Ascheteile in der Trocknungsluft wurde vor die obere Trocknungszone ein Funken-sieb eingebaut.

Die Durchführung der Versuche erfolgt entsprechend dem in Kap. 5.1 beschriebenen Verfahren. Allerdings wird die Anlaufzeit der Versuche bei dem zweistufigen Trockner durch die vergrößerte Bauhöhe des Trockners erheblich verlängert. Bei den Versuchen zur Wärmerückgewinnung aus der Abluft muß zudem in der Anlaufphase der Trocknung die Trocknungslufttemperatur der oberen Trocknungszone mit dem eingebauten Lufterhitzer stetig nachgeregelt werden, da bei beginnender Trocknung die Temperatur der Abluft der unteren Trocknungszone keinen konstanten Wert annimmt.

Die bei den Versuchen mit den modifizierten Trocknerbauarten untersuchten Trocknungs- und Gutparameter sind in Tafel 11 zusammengestellt. Die Parameter wurden dabei entsprechend den in Kap. 5.3 beschriebenen Versuchen variiert, um die Versuchsergebnisse miteinander vergleichen zu können. Allerdings konnten Schwankungen im Anfangsfeuchtegehalt des erntefrischen Versuchsmaterials aufgrund von Witterungseinflüssen nicht vermieden werden.

Parameter		Gutart	
		Weizen	Mais
Lufttemperatur ϑ_{L1}	°C	60 - 120	80 - 160
Luftgeschwindigkeit v_{L1}	m/s	0,5 - 1,0	0,5 - 1,25
Fließgeschwindigkeitsverhältnis v_{K21}/v_{K22}	-	1,0 - 2,5	1,0 - 3,0
Anfangsfeuchtegehalt der Körner U_1	%	17,9 - 23,2	35,5 - 41,3
Sorte:		Jubilar	Eta Inrakorn Limac

Tafel 11: Zusammenstellung der Trocknungs- und Stoffparameter sowie der untersuchten Bereiche bei den modifizierten Querstromtrocknungsverfahren

6.2 Versuchsergebnisse

6.2.1 Einstufige Querstromtrocknung mit unterschiedlicher Fließgeschwindigkeit der Körner

Um den Trocknungsvorgang bei dem einstufigen Querstromtrocknungsverfahren mit unterschiedlicher Fließgeschwindigkeit der Körner in den beiden Schachthälften aufzuzeigen, wurden in den Bildern 61 und 62 der Verlauf des Feuchtegehaltes der Körner und der Temperatur der Trocknungsluft beispielhaft für einen Versuch bei der Trocknung von Mais dargestellt. Die Kurven sind dabei abhängig vom Weg z des Gutes in der Trocknungszone für unterschiedliche Breiten s im Trockner aufgetragen. Wie Bild 61 zeigt, kann durch eine Erhöhung der Fließgeschwindigkeit der auf der Lufteintrittsseite des Trennbleches befindlichen Körnerschüttung ($0 \leq s \leq 0,15$ m) und der damit verbunde-

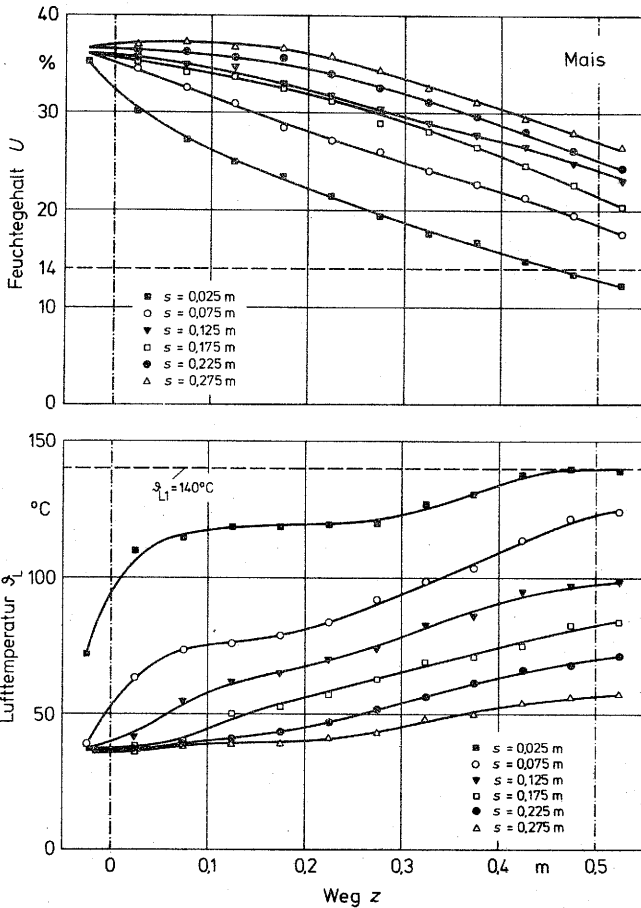


Bild 61 und 62: Verlauf von Feuchtegehalt U (Bild 61) und Lufttemperatur θ_L (Bild 62) abhängig vom Weg z des Gutes in der Trocknungszone an verschiedenen Stellen der Trocknerbreite s bei einem Fließgeschwindigkeitsverhältnis $v_{K21}/v_{K22} = 3,0$. Lage des Trennblechs $s = 0,15$ m

Gutart:	Mais
Anfangsfeuchtegehalt	$U_1 = 36\%$
Endfeuchtegehalt	$\bar{U}_2 = 14\%$
Lufttemperatur	$\theta_{L1} = 140^\circ\text{C}$
Luftgeschwindigkeit	$v_{L1} = 1,0$ m/s
Breite des Trockners	$s_1 = 0,3$ m
Korngeschwindigkeit	$\bar{v}_K = 0,91$ m/h

nen Verringerung der Fließgeschwindigkeit der Körnerschüttung auf der Abluftseite ($0,15 \text{ m} \leq s \leq 0,30 \text{ m}$) eine wesentlich gleichmäßigere Trocknung erreicht werden. Die Ursache dafür ist darin zu suchen, daß infolge der 3fach höheren Fließgeschwindigkeit auf der Lufteintrittsseite die Verweilzeit der Körner in der Trocknungszone verkürzt und demzufolge die Über Trocknung reduziert wird. Umgekehrt wird auf der Abluftseite die Verweilzeit der Körner verlängert, wodurch die Körner intensiver getrocknet werden. Beispielsweise trocknen dadurch die im Bereich der Trocknerbreite $s = 0,175 \text{ m}$ befindlichen Körner auf einen geringeren Feuchtegehalt als die dem Lufteintritt näher gelegenen Körner an der Stelle $s = 0,125 \text{ m}$.

Die Temperatur der Trocknungsluft in Bild 62 liegt im Vergleich zur konventionellen Querstromtrocknung insbesondere in der abluftseitigen Trocknerseite trotz höherer Verweilzeit der Körner im Trockner wesentlich unter den dort ermittelten Werten. Der Grund dafür ist in dem intensiveren Wärme- und Stoffaustausch in der lufteintrittsseitigen Körnerschüttung zu suchen, der zu niedrigeren Lufttemperaturen in der Körnerschüttung auf der Abluftseite führt.

Die Trocknungsleistung kann mit zunehmendem Fließgeschwindigkeitsverhältnis der Körner nur geringfügig gesteigert werden, was auf eine geringe Abnahme des spezifischen Wärmebedarfes zurückzuführen ist. Obwohl bei der Trocknung mit steigendem Fließgeschwindigkeitsverhältnis eine bessere Wärmeausnutzung der Trocknungsluft sowie eine Reduzierung der wärmeintensiven Über Trocknung der Körner festzustellen ist, bewirkt diese keine wesentliche Senkung des spezifischen Wärmebedarfes, da verbunden mit dem erhöhten Gutdurchsatz an der Lufteintrittsseite ein erheblicher Anteil der Wärme zur Erwärmung dieser Körner benötigt wird. Diese Wärme ist nicht zur Trocknung nutzbar, sondern verläßt ungenutzt den Trockner.

Das eigentliche Ziel, das mit der Variation der Fließgeschwindigkeit der Körner im Trocknerschacht erreicht werden soll, ist die Verbesserung der Gleichmäßigkeit der Trocknung.

Bild 63 zeigt, daß mit zunehmendem Fließgeschwindigkeitsverhältnis die Feuchtegehaltsdifferenz ΔU_2 wesentlich verringert wird. Eine weitere Verringerung der Feuchtegehaltsdifferenz durch noch höhere Fließgeschwindigkeitsverhältnisse ist nur so lange möglich, bis die Endfeuchtegehalte U_2 der jeweils auf der Abluftseite befindlichen Körner in den beiden Schachthälften den gleichen Wert angenommen haben, vgl. Bild 64. Darüber hinaus führt nur eine mehrfache Unterteilung der Körnerschüttung zu einer gleichmäßigeren Trocknung.

Da die Veränderung der Kornqualität von der Höhe der Korntemperatur sowie der Zeitdauer der thermischen Einwirkung beeinflußt wird, muß eine Verkürzung der Verweilzeit der qualitätsgefährdeten Körner an der Lufteintrittsstelle zu einer geringen Qualitätsveränderung führen. Bild 65 veranschaulicht die mit zunehmendem Fließgeschwindigkeitsverhältnis und der damit bedingten geringeren Verweilzeit abnehmende Veränderung der Kornqualität. Untersuchungen von Mischproben der getrockneten Weizen- und Maiskörner konnten dies bestätigen. Damit besteht also die Möglichkeit, mit diesem modifizierten Querstromverfahren die Trocknungsleistung durch eine Temperaturerhöhung der Trocknungsluft gegenüber der konventionellen Querstromtrocknung zu steigern, ohne daß dadurch die Kornqualität verringert wird.

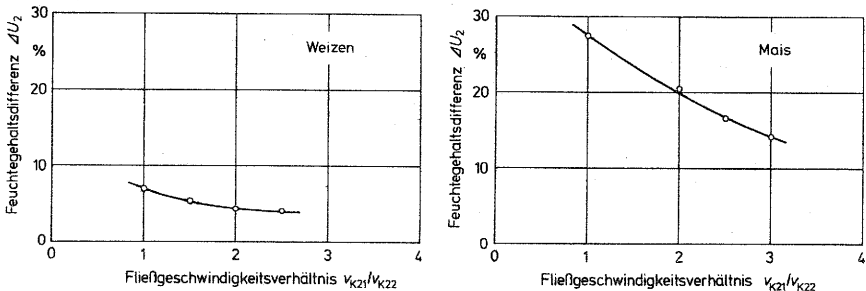


Bild 63: Abhängigkeit der Feuchtegehaltsdifferenz ΔU_2 vom Fließgeschwindigkeitsverhältnis v_{K21}/v_{K22} der Körner. Lage des Trennblechs $s = 0,15$ m. Gleiche Versuchsbedingungen wie in Bild 64 und 65

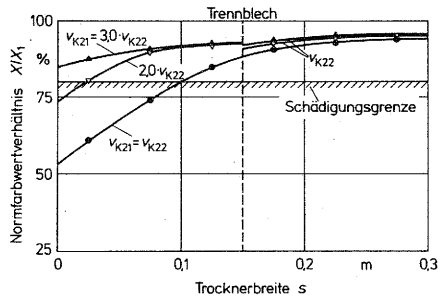
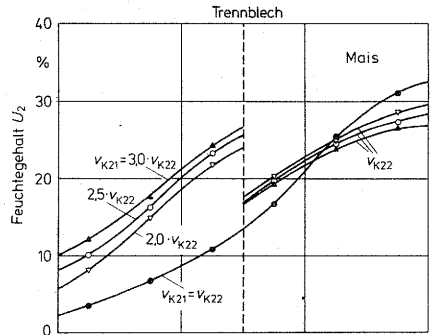
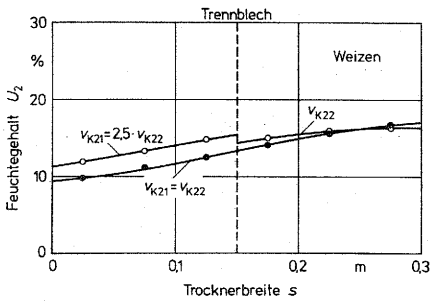


Bild 64 und 65:

Verlauf von Endfeuchtegehalt U_2 (Bild 64) und Normfarbwertverhältnis X/X_1 (Bild 65) abhängig von der Trocknerbreite s bei unterschiedlicher Fließgeschwindigkeit der Körner

Gutart:	Weizen	Mais
Anfangsfeuchtegehalt	$U_1 = 18\%$	$U_1 = 36\%$
Endfeuchtegehalt	$\bar{U}_2 = 14\%$	$\bar{U}_2 = 14\%$
Lufttemperatur	$\vartheta_{L1} = 80^\circ\text{C}$	$\vartheta_{L1} = 140^\circ\text{C}$
Luftgeschwindigkeit	$v_{L1} = 1,0 \text{ m/s}$	$v_{L1} = 1,0 \text{ m/s}$
Breite des Trockners	$s_1 = 0,3 \text{ m}$	$s_1 = 0,3 \text{ m}$

6.2.2 Zweistufige Querstromtrocknung mit Luftumkehrung

Der Trocknungsvorgang bei der zweistufigen Querstromtrocknung mit gegenläufiger Luftströmung in den beiden Trocknungszonen wird vor allem dadurch beeinflusst, daß die in der oberen Trocknungszone 1 im Bereich des Lufteintritts befindlichen Körner ($s = 0,025 \text{ m}$) sich in der unteren Trocknungszone 2 infolge der Umkehrung der Strömungsrichtung der Trocknungsluft im Bereich des Luftaustritts ($s = 0,275 \text{ m}$) befinden, vgl.

Bild 60 c. Damit werden die in Trocknungszone I dem Lufteintritt zunächst gelegenen Körner sehr intensiv getrocknet und sind der hohen Temperatur der Trocknungsluft ausgesetzt, während die Körner an der Abluftseite ungetrocknet durchströmt werden, siehe Bild 66 und 67. In der zweiten Trocknungszone erfolgt der umgekehrte Vorgang; die bislang noch ungetrockneten Körner werden getrocknet. Die bereits getrockneten Körner befinden sich im Bereich der feuchten, abgekühlten Abluft und erfahren keine weitere Trocknung mehr. Eine Zunahme des Feuchtegehaltes dieser Körner war nicht zu beobachten. Die in der Mitte des Trocknerschachtes befindlichen Körner ($0,1 \leq s \leq 0,2\text{m}$) werden am wenigsten getrocknet. Die Trocknungsluft besitzt in diesem Bereich in beiden Trocknungs-zonen bedingt durch den Wärme- und Stoffaustausch mit den der Lufteintrittsstelle näher gelegenen Körnern nur noch ein geringes Trocknungspotential, das zur Trocknung dieser Körner genutzt werden kann.

Einfluß der Lufttemperatur

In Bild 68 bis 71 ist der Einfluß der Temperatur der Trocknungsluft auf die wichtigsten Trocknungskenngrößen von Weizen und Mais graphisch dargestellt. Zum Vergleich mit der konventionellen einstufigen Querstromtrocknung wurden in die Bilder ergänzend die Versuchsergebnisse aus Kap. 4.2.2 gestrichelt eingezeichnet.

Vergleicht man die Trocknungsleistung des zweistufigen Trockners mit dem konventionellen einstufigen Querstromtrockner, so kann die Trocknungsleistung infolge der verdoppelten Wärmezufuhr um mehr als das zweifache gesteigert werden, Bild 68. Auch bei gleichem Wärmestrom, d.h. bei der Luftgeschwindigkeit $v_{L1} = 0,5\text{m/s}$ im zweistufigen Trockner ist aufgrund des geringeren spezifischen Wärmebedarfes eine Steigerung der Trocknungsleistung zu verzeichnen.

Der spezifische Wärmebedarf, Bild 69, nimmt sowohl bei der Trocknung von Weizen bei Lufttemperaturen über $\vartheta_{L1} = 100^{\circ}\text{C}$ als

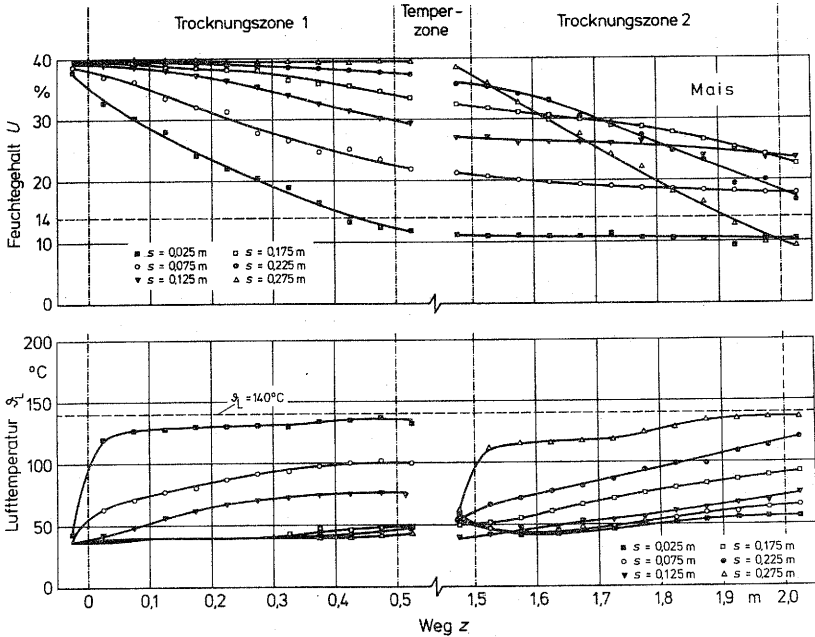


Bild 66 und 67: Verlauf von Feuchtegehalt U (Bild 66) und Lufttemperatur θ_L (Bild 67) abhängig vom Weg z des Gutes in der Trocknungszone an verschiedenen Stellen der Trocknerbreite s

Gutart:	Mais
Anfangsfeuchtegehalt	$U_1 = 40\%$
Endfeuchtegehalt	$\bar{U}_2 = 14\%$
Lufttemperatur	$\theta_{L1} = 140^\circ\text{C}$
Luftgeschwindigkeit	$v_{L1} = 1,0 \text{ m/s}$
Breite der 2 Trocknungszonen	$s_1 = 0,3 \text{ m}$
Korngeschwindigkeit	$\bar{v}_K = 1,34 \text{ m/h}$

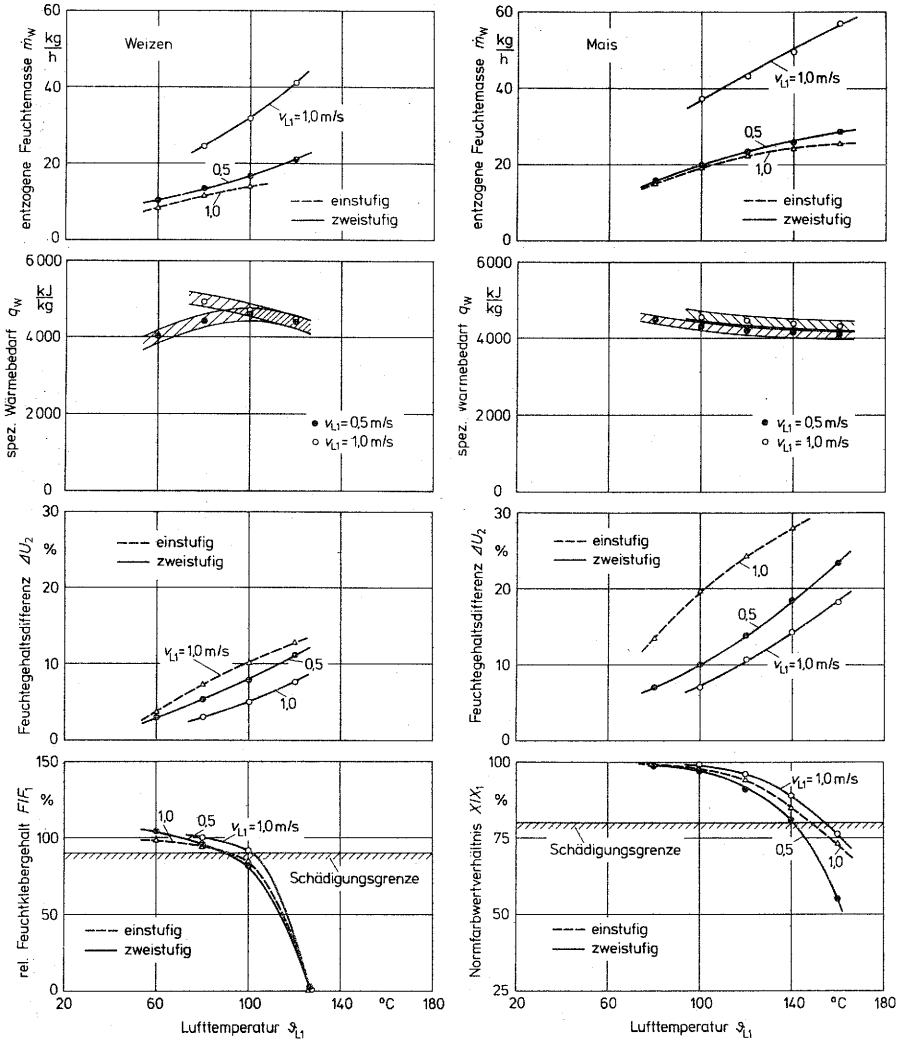


Bild 68 bis 71:

Abhängigkeit von entzogener Feuchtemasse m_w (Bild 68), spez. Wärmebedarf q_w (Bild 69), Feuchtegehaltsdifferenz ΔU_2 (Bild 70) und rel. Feuchtklebergehalt F/F_1 bzw. Normfarbwertverhältnis X/X_1 (Bild 71) von der Lufttemperatur θ_{L1} bei unterschiedlichen Luftgeschwindigkeiten. Zum Vergleich wurden die Ergebnisse der einstufigen Trocknung gestrichelt eingezeichnet. Gleiche Versuchsbedingungen wie in Bild 72

auch bei der Maistrocknung mit zunehmenden Lufttemperaturen ab, was auf eine bessere Wärmeausnutzung der Trocknungsluft sowie auf die mit steigenden Temperaturen abnehmende Verdampfungswärme des Wassers zurückzuführen ist. Gegenüber der konventionellen Querstromtrocknung kann der spezifische Wärmebedarf geringfügig reduziert werden. Weiter zeigen die Versuchsergebnisse, daß der spezifische mechanische Energiebedarf für den Gebläseantrieb bei der Trocknung von Weizen mit einer Luftgeschwindigkeit von $v_{L1} = 0,5$ m/s zwischen $e = 0,01$ und $0,04$ kWh/kg und bei Mais zwischen $0,005$ kWh/kg und $0,03$ kWh/kg liegt und damit geringer ist als die bei der einstufigen Querstromtrocknung ermittelten Werte.

Zur Darstellung der Gleichmäßigkeit der zweistufigen Trocknung ist in Bild 72 der Feuchtegehalt U_2 der Körner beim Verlassen der unteren Trocknungszone abhängig von der Trocknerbreite s für verschiedene Lufttemperaturen dargestellt. Dieses für die zweistufige Trocknung charakteristische Trocknungsverhalten zeigt die Über Trocknung der Körner im Bereich des Lufteintritts und die Untertrocknung der Körner in der Mitte des Trocknerschachtes. Die dabei auftretende Feuchtegehaltsdifferenz ΔU_2 zwischen den Körnern aus diesen beiden Bereichen abhängig von der Lufttemperatur zeigt Bild 70. Aus dem Bild wird ersichtlich, daß mit der zweistufigen Trocknung eine Verbesserung der Gleichmäßigkeit der Trocknung sowohl bei jeweils gleicher Luftgeschwindigkeit $v_{L1} = 1,0$ m/s als auch bei gleicher Wärmezufuhr d.h. bei $v_{L1} = 1,0$ m/s bei der einstufigen bzw. $v_{L1} = 0,5$ m/s bei der zweistufigen Trocknung erzielt werden konnte.

Die Veränderung der Kornqualität durch die Trocknung mit unterschiedlichen Lufttemperaturen gibt Bild 71 wieder. Wie das Bild zeigt, kann Weizen mit dem zweistufigen Verfahren mit Lufttemperaturen bis zu $\vartheta_{L1} = 100^\circ\text{C}$ bei einer Luftgeschwindigkeit von $v_{L1} = 1,0$ m/s getrocknet werden, ohne daß eine Schädigung der Körnerschüttung zu erwarten ist. Bei einer Luftgeschwindigkeit $v_{L1} = 0,5$ m/s sowie bei der einstufigen Querstromtrocknung mit $v_L = 1,0$ m/s sind nur Lufttemperaturen bis

etwa 90°C zulässig. Entsprechendes Verhalten der Kornqualität wurde auch bei der Trocknung von Mais festgestellt, wobei allerdings die zulässigen Temperaturen der Trocknungsluft bei $v_L = 1,0 \text{ m/s}$ im Bereich bis zu $\vartheta_{L1} < 160^\circ\text{C}$ liegen.

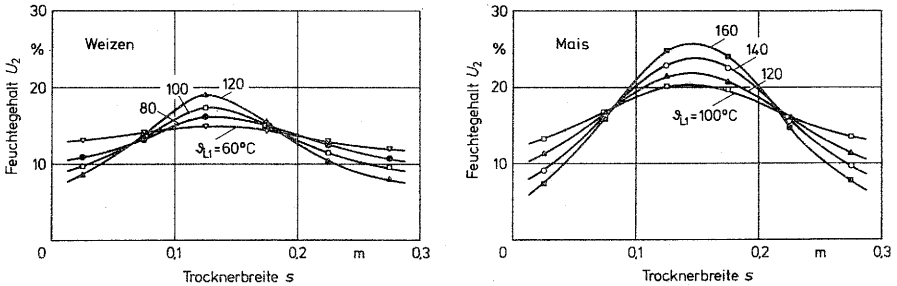


Bild 72: Verlauf des Feuchtegehaltes U_2 abhängig von der Trocknerbreite s bei verschiedenen Lufttemperaturen ϑ_{L1} .

Gutart:	Weizen	Mais
Anfangsfeuchtegehalt	$U_1 = 20\%$	$U_1 = 40\%$
Endfeuchtegehalt	$\bar{U}_2 = 14\%$	$\bar{U}_2 = 14\%$
Luftgeschwindigkeit	$v_{L1} = 1,0 \text{ m/s}$	$v_{L1} = 1,0 \text{ m/s}$
Breite der 2 Trocknungs-zonen	$s_1 = 0,3 \text{ m}$	$s_1 = 0,3 \text{ m}$

Einfluß der Luftgeschwindigkeit

Die Untersuchung des Luftgeschwindigkeitseinflusses im Bereich $0,5 \leq v_{L1} \leq 1,5 \text{ m/s}$ führt bei der zweistufigen Trocknung mit Luftumkehr zu folgenden Ergebnissen:

- Die Trocknungsleistung nimmt mit steigender Luftgeschwindigkeit nahezu linear zu, wobei sie gegenüber der einstufigen Trocknung um mehr als 100% gesteigert werden kann.
- Der mit zunehmender Luftgeschwindigkeit ansteigende spezifische Wärmebedarf entspricht in etwa den Werten bei der einstufigen Trocknung. Gleiches gilt für den spezifischen mechanischen Energiebedarf.

- Die Gleichmäßigkeit der Trocknung wird mit zunehmender Luftgeschwindigkeit verbessert. Gegenüber der einstufigen Trocknung kann die Feuchtegehaltsdifferenz um mehr als die Hälfte reduziert werden.
- Die Qualität der getrockneten Körner wird bei höheren Luftgeschwindigkeiten weniger beeinflusst; gegenüber der einstufigen Trocknung wurden geringere Qualitätsveränderungen festgestellt.

Einfluß unterschiedlicher Wärmezufuhr in den Trocknungszonen

Um den Einfluß unterschiedlicher Wärmezufuhr in den beiden Trocknungszonen auf das Trocknungsverhalten von Mais zu bestimmen wurde der Wärmestrom \dot{Q}_L in der oberen Trocknungszone gegenüber der unteren erhöht. Die Trocknungsbedingungen in der unteren Trocknungszone blieben bei den Versuchen konstant, während in der oberen Trocknungszone im ersten Versuch die Lufttemperatur um 20 K und danach im zweiten Versuch zusätzlich noch die Luftgeschwindigkeit um 25% erhöht wurde. In Tafel 12 sind sowohl die Trocknungsbedingungen als auch ihr Einfluß auf die Trocknungskenngrößen dargestellt. Zum Vergleich sind die Ergebnisse bei gleicher Wärmezufuhr in den beiden Trocknungszonen - gleiche Lufttemperatur und Luftgeschwindigkeit - in der Tafel ergänzend aufgeführt.

Ein Vergleich der Versuchsergebnisse bei unterschiedlicher und bei gleicher Wärmezufuhr in den beiden Trocknungszonen zeigt, daß sich die Trocknungsleistung \dot{m}_w mit zunehmendem Wärmestrom in der oberen Trocknungszone steigern läßt, wobei der spez. Wärmebedarf q_w Werte annimmt, die zwischen den Werten der Versuche mit gleicher Wärmezufuhr liegen. Gleiches gilt für die Feuchtegehaltsdifferenz ΔU_2 und das Normfarbwertverhältnis X/X_1 . Bild 73 verdeutlicht den Verlauf der Feuchtegehaltsdifferenz ΔU_2 abhängig von der Trocknerbreite s bei ungleicher und bei gleicher Wärmezufuhr. Während

	Wärmezufuhr			
	unterschiedlich		gleich	
Trocknungszone oben				
Lufttemperatur ϑ_{L1} °C	140	140	120	140
Luftgeschwindigkeit v_{L1} m/s	1,0	1,25	1,0	1,0
Trocknungszone unten				
Lufttemperatur ϑ_{L1} °C	120	120	120	140
Luftgeschwindigkeit v_{L1} m/s	1,0	1,0	1,0	1,0
Wärmestrom \dot{Q}_L 10^3 kJ/kg	207,5	235,5	195,2	218,4
Trocknungskenngrößen				
entz. Feuchtemasse \dot{m}_w kg/h	46,4	52,4	43,2	50,6
spez. Wärmebedarf q_w kJ/kg	4470	4495	4525	4325
spez. mech. Energiebedarf e kWh/kg	0,023	0,027	0,025	0,020
Feuchtegehaltsdifferenz ΔU_2 %	12,8	12,3	10,5	14,2
Normfarbverhältnis X/X_1 %	90,4	94,1	96,1	89,2

Tafel 12: Zusammenstellung der Trocknungsbedingungen und ihr Einfluß auf die Trocknungskenngrößen bei unterschiedlicher und bei gleicher Wärmezufuhr. Sonst gleiche Versuchsbedingungen wie in Bild 72

bei gleicher Wärmezufuhr in den beiden Trocknungszonen die Kurven nahezu achsensymmetrisches Verhalten zur Trocknermitte ($s = 0,15$ m) aufweisen, sind die Feuchtegehaltskurven bei ungleicher Wärmezufuhr durch jeweils unterschiedliche Feuchtegehalte der Körner im Bereich der Lufteintritte gekennzeichnet. Eine Verbesserung der Gleichmäßigkeit der Trocknung läßt sich also nur dann erzielen, wenn die Trocknungsbedingungen in beiden Trocknungszonen so aufeinander abgestimmt sind, daß die Körner in beiden Trocknungszonen gleiches Trocknungsverhalten aufweisen.

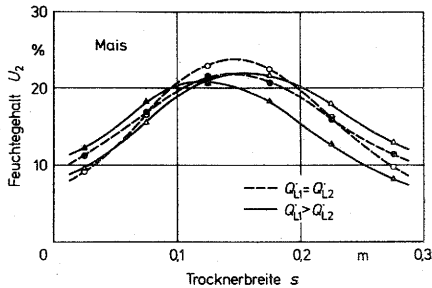


Bild 73: Vergleich des Feuchtegehaltsverlaufs U_2 der Maiskörner im Trockner bei unterschiedlicher und bei gleicher Warmluftzufuhr in den beiden Trocknungs-zonen

Obere Trocknungszone

Untere Trocknungszone

▲ $\vartheta_{L11} = 140^{\circ}\text{C}$, $v_{L11} = 1,0 \text{ m/s}$

◊ $\vartheta_{L12} = 120^{\circ}\text{C}$, $v_{L12} = 1,0 \text{ m/s}$

△ $\vartheta_{L11} = 140^{\circ}\text{C}$, $v_{L11} = 1,25 \text{ m/s}$

◊ $\vartheta_{L12} = 120^{\circ}\text{C}$, $v_{L12} = 1,0 \text{ m/s}$

● $\vartheta_{L11} = 120^{\circ}\text{C}$, $v_{L11} = 1,0 \text{ m/s}$

◊ $\vartheta_{L12} = 120^{\circ}\text{C}$, $v_{L12} = 1,0 \text{ m/s}$

○ $\vartheta_{L11} = 140^{\circ}\text{C}$, $v_{L11} = 1,0 \text{ m/s}$

◊ $\vartheta_{L12} = 140^{\circ}\text{C}$, $v_{L12} = 1,0 \text{ m/s}$

Sonst gleiche Versuchsbedingungen wie in Bild 72

6.2.3 Wärmerückgewinnung aus der Abluft

Wie bereits in Kap. 2.2.2 erwähnt, kann der spezifische Wärmebedarf bei der Trocknung unter anderem dadurch gesenkt werden, daß die in der Abluft enthaltene Wärme nicht ungenutzt ins Freie geleitet, sondern mit Hilfe eines Wärmerückgewinnungssystems zurückgewonnen und wieder zur Trocknung verwendet wird. Insbesondere bei Querstromtrocknern mit zwei und mehreren Trocknungs-zonen kann die Wärmerückgewinnung auf einfache Art und Weise vorgenommen werden [85 bis 87]. Einige der dazu geeigneten Wärmerückgewinnungsverfahren aus der Abluft der Trocknungs-zonen sind in Bild 74 a-e schematisch dargestellt.

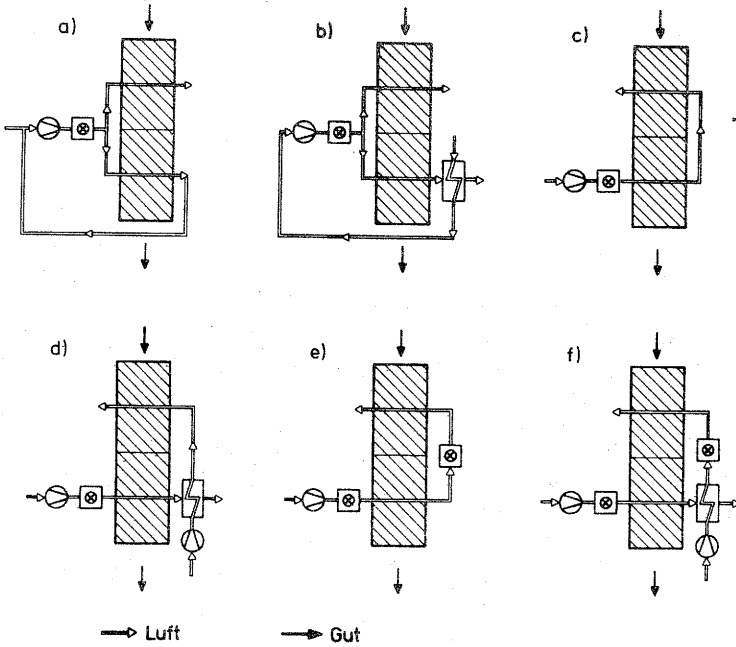


Bild 74: Schematische Darstellung von Wärmerückgewinnungsmöglichkeiten aus der Abluft der unteren Trocknungszone bei zweistufigen Querstromtrocknern

- a) Vorwärmung der Frischluft durch Zumischen von Abluft
- b) Vorwärmung der Frischluft im Wärmetauscher
- c) Direkte Nutzung der Abluft als Trocknungsluft
- d) Vorwärmung der Frischluft im Wärmetauscher und anschließende Nutzung als Trocknungsluft
- e) Nutzung der Abluft als Trocknungsluft durch Zwischenerwärmung
- f) Vorwärmung der Frischluft im Wärmetauscher mit anschließender Zwischenerwärmung

Die einfachste Möglichkeit der Wärmerückgewinnung bei der zweistufigen Querstromtrocknung besteht darin, Bild 74 a, die trockene und warme Abluft der unteren Trocknungszone der Frischluft zuzumischen und dieses Luftgemisch im anschließenden Luftherhitzer auf die Temperatur der Trocknungsluft zu erwärmen. Ist eine Trennung der Stoffströme von Frischluft und Abluft erforderlich, kann in einem Wärmetauscher die Abluft zur Vorwärmung der Frischluft genutzt werden, Bild 74 b. Bei der zweistufigen Trocknung mit Luftumkehrung ist die einfachste Möglichkeit der Wärmerückgewinnung das in Bild 74 c aufgezeigte Verfahren der direkten Verwendung der Abluft als Trocknungsluft in der oberen Trocknungszone. Allerdings besteht dabei die Gefahr, daß beim Durchströmen der feuchtwarmen Luft durch das noch kühle Gut in der oberen Trocknungszone Feuchte aus der Luft auskondensiert, die sich auf den Körnern niederschlägt. Diese Feuchte muß anschließend wieder entfernt werden. Um ein Auskondensieren zu verhindern, kann ein Wärmetauscher eingesetzt werden, Bild 74 d. Dabei lassen sich zwar die Luftströme trennen, jedoch wird ein zweites Gebläse erforderlich. Außerdem verringert sich die rückgewinnbare Wärme infolge der Verlustwärme im Wärmetauscher. Eine günstigere Möglichkeit ist in Bild 74 e dargestellt, bei der mit einem zweiten Luftherhitzer die Abluft der unteren Trocknungszone auf die Temperatur der Trocknungsluft der oberen Zone erwärmt wird. Damit läßt sich nicht nur das Kondensationsproblem gegenüber dem in Bild 74 c dargestellten Verfahren wesentlich reduzieren, sondern gleichzeitig durch die zusätzliche Wärmezufuhr die Trocknungsleistung steigern. Dabei muß allerdings gesichert sein, daß bei der direkten Erwärmung der Trocknungsluft sowohl die Sicherheitsvorschriften eingehalten als auch Schadstoffablagerungen durch die Direktbeheizung vermieden werden [43, 45]. Sollen bei diesem Verfahren die Luftströme von Frischluft und Abluft getrennt werden, ist entsprechend der in Bild 74 d aufgezeigten Möglichkeit ein Wärmetauscher sowie zusätzlich ein zweites Gebläse erforderlich, Bild 74 f; die aus der Abluft rückgewinnbare Wärme verringert sich dabei um die Übertragungsverluste im Wärmetauscher.

Die Zustandsänderungen der Trocknungsluft bei den beiden in Bild 74 e und f dargestellten Verfahren ist in Bild 75 anhand des Mollier-h,x-Diagramms bei idealisierter Trocknung dargestellt. Bei der Verwendung eines Wärmetauschers, Bild 74 f, muß in der unteren Trocknungszone der Trocknungsluft die Enthalpie $h_{L1} - h_{LO}$, in der oberen Trocknungszone bei gleichem Luftzustand nur noch die Enthalpie $h_{L1} - h_{L2'}$ zugeführt werden. Die Verringerung des spezifischen Wärmebedarfes Δq_w bezogen auf den spezifischen Wärmebedarf q_w bei der Trocknung ohne Wärmerückgewinnung berechnet sich aus:

$$\frac{\Delta q_w}{q_w} = \frac{h_{L2'} - h_{LO}}{2 (h_{L1} - h_{LO})} \quad (57)$$

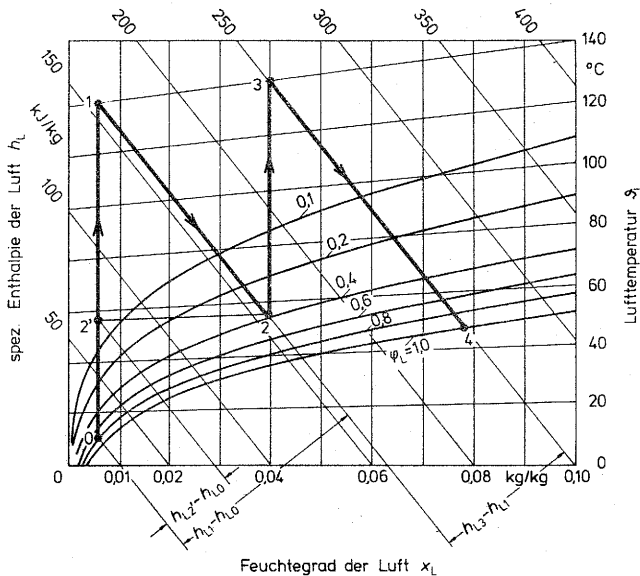


Bild 75: Darstellung der Luftzustände im Mollier-h,x-Diagramm bei den Wärmerückgewinnungsverfahren von Bild 74 e und 74 f

- 0 Zustand der Außenluft
- 1 Zustand der Trocknungsluft
- 2 Zustand der Abluft
- 2' Zustand der Frischluft nach dem Wärmetauscher
- 3 Zustand der Trocknungsluft nach der Zwischenerwärmung
- 4 Zustand der Abluft bei Zwischenerwärmung

In Bild 76 ist die mit Gl. (57) berechnete prozentuale Verringerung des spezifischen Wärmebedarfes unter Verwendung der Versuchsergebnisse aus Kap. 6.2.2 dargestellt. Dabei wurde vereinfacht für den Wirkungsgrad des Wärmetauschers der ideale Wert 1,0 angenommen.

Bei der Trocknung mit Zwischenerwärmung, Bild 74 e, muß bei der Erwärmung der Trocknungsluft in der unteren Trocknungszone die Enthalpie $h_{L1} - h_{LO}$, in der oberen Trocknungszone die Enthalpie $h_{L3} - h_{L1}$ zugeführt werden. Während des Trocknungsprozesses steigt dabei der Feuchtegrad der Luft von x_{LO} auf x_{L4} an. Die Reduzierung des spezifischen Wärmebedarfes Δq_w bezogen auf den Wert bei der Trocknung ohne Wärmerückgewinnung berechnet sich zu:

$$\frac{\Delta q_w}{q_w} = 1 - \frac{(h_{L3} - h_{LO}) / (x_{L4} - x_{LO})}{(h_{L1} - h_{LO}) / (x_{L2} - x_{LO})} \quad (58)$$

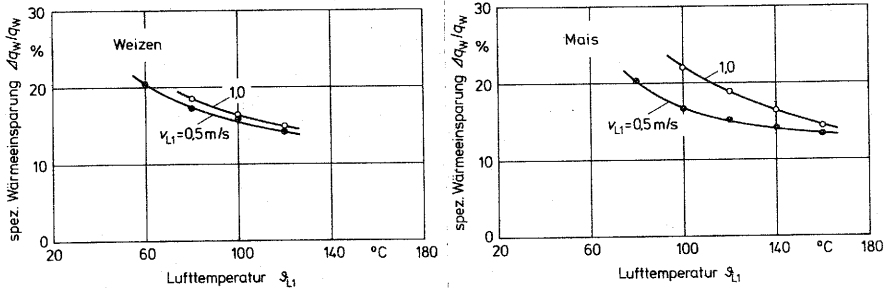


Bild 76: Prozentuale Verringerung des spez. Wärmebedarfes $\Delta q_w/q_w$ bei Vorwärmung der Frischluft im Wärmetauscher. Gleiche Versuchsbedingungen wie in Bild 72

Die Berechnung der bei der Trocknung mit Zwischenerwärmung erzielbaren Senkung des spezifischen Wärmebedarfes ist nur möglich, wenn entsprechendes Datenmaterial von Versuchen mit diesem Wärmerückgewinnungssystem vorliegt. Daher waren experimentelle Untersuchungen mit der in Bild 60 d schematisch dargestellten Versuchsanlage erforderlich. In Tafel 13 sind für die

Trocknung von Mais die variierten Trocknungsbedingungen sowie ihr Einfluß auf die Trocknungskenngrößen zusammengestellt. Zum Vergleich mit den Versuchen ohne Wärmerückgewinnung wurden die dort ermittelten Versuchsergebnisse zusätzlich in Klammern dargestellt.

<u>Trocknungszone oben</u>				
Lufttemperatur ϑ_{LL}	$^{\circ}\text{C}$	120 (120)	120 (120)	140 (140)
Luftgeschwindigkeit v_{LL}	m/s	0,5 (0,5)	1,0 (1,0)	1,0 (1,0)
<u>Trocknungszone unten</u>				
Lufttemperatur ϑ_{LL}	$^{\circ}\text{C}$	120 (120)	120 (120)	140 (140)
Luftgeschwindigkeit v_{LL}	m/s	0,5 (0,5)	1,0 (1,0)	1,0 (1,0)
Wärmestrom \dot{Q}_L	10^3kJ/h	72,4 (97,8)	149,1 (195,2)	168,7 (218,4)
<u>Trocknungskenngrößen</u>				
entz. Feuchtemasse \dot{m}_W	kg/h	19,6 (23,4)	38,8 (43,2)	43,3 (50,6)
spez. Wärmebedarf q_W	kJ/kg	3690 (4180)	3840 (4525)	3895 (4330)
spez. Wärmeeinsparung $\Delta q_W/q_W$	%	11,7	15,1	10,1
spez. mech. Energiebedarf e	kWh/kg	0,006 (0,007)	0,022 (0,025)	0,018 (0,020)
Feuchtegehaltsdifferenz ΔU_2	%	18,9 (14,6)	12,5 (10,5)	16,3 (14,2)
Normfarbverhältnis X/X_1	%	91,6 (91,0)	94,8 (96,1)	90,4 (89,2)

Tafel 13: Auswirkungen der Trocknung mit Zwischenerwärmung auf die Trocknungskenngrößen. Zum Vergleich sind die Versuchsergebnisse bei der Trocknung ohne Wärmerückgewinnung, Kap. 6.2.2 in Klammern dargestellt

Gutart:	Mais
Anfangsfeuchtegehalt	$U_1 = 39 \quad (40) \%$
Endfeuchtegehalt	$\bar{U}_2 = 17 \quad (14) \%$
Breite der 2 Trocknungszone	$s_1 = 0,3 \quad (0,3) \text{ m}$

Die prozentuale Verringerung des spezifischen Wärmebedarfes liegt mit 10,1 - 15,1% unter den nach Bild 76 erwarteten Werten. Dies ist in erster Linie darauf zurückzuführen, daß in der Versuchsanlage infolge von Falschlufftströmungen in der unteren Trocknungszone nur etwa 85% der dem Trockner zugeführten Frischluft als Trocknungsluft in der oberen Trocknungszone zur Verfügung steht. Damit reduziert sich zum einen die rückgewinnbare Wärme aus der Abluft, zum anderen wird durch den verringerten Luftstrom weniger Wärme der oberen Trocknungszone zugeführt, wodurch die Körner weniger intensiv trocknen. In der unteren Trocknungszone führt diese zusätzlich zu entfernende Feuchte wiederum zu geringeren Ablufttemperaturen, bzw. damit zu einer Reduzierung der rückgewinnbaren Wärme. Außerdem erhöhte sich dadurch sowohl der mittlere Endfeuchtegehalt \bar{U}_2 der Körner von 14% auf 17%, als auch die Feuchtegehaltsdifferenz ΔU_2 , vgl. Tafel 13. Ein Vergleich des Feuchtegehaltes U_2 der Körner beim Verlassen der unteren Trocknungszone ($z = 0,525m$) zeigt, daß bei der Trocknung mit wiedererwärmter Abluft die Feuchte an der Lufteintrittsseite der oberen Trocknungszone wesentlich schlechter entzogen wird, als bei der Trocknung mit erwärmter Frischluft, Bild 77. Die Frage, ob diese Erscheinungen nur auf eine Falschlufftströmung zurückzuführen sind, oder ob dies eine Folge des erhöhten Feuchtegrades der erwärmten Abluft ist, kann mit dem verwendeten Querstromtrockner nicht geklärt werden. Hierzu sind weiterführende Untersuchungen an einer Einzelkornschichtentrocknungsanlage unter entsprechenden Versuchsbedingungen notwendig.

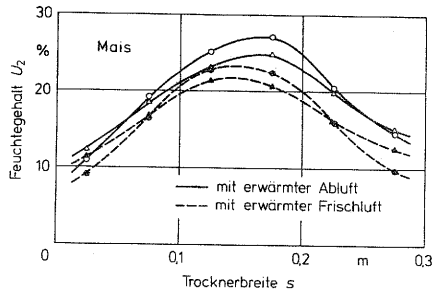


Bild 77: Vergleich des Endfeuchtegehaltsverlaufs U_2 der Maiskörner im Trockner bei der Trocknung mit Zwischenerwärmung der Abluft gegenüber der Trocknung mit erwärmter Frischluft

Zustände der Trocknungsluft:

$$\begin{array}{ll} \circ \bullet & \vartheta_{L1} = 120^{\circ}\text{C}, \quad v_{L1} = 1,0 \text{ m/s} \\ \triangle \blacktriangle & \vartheta_{L1} = 140^{\circ}\text{C}, \quad v_{L1} = 1,0 \text{ m/s} \end{array}$$

Gutart: Mais
 Anfangsfeuchtegehalt $U_1 = 40\%$
 Endfeuchtegehalt $\bar{U}_2 = 14;17\%$

6.3 Beurteilung der modifizierten Querstromtrocknungsverfahren

Zur Beurteilung der untersuchten modifizierten Querstromtrocknungsverfahren im Vergleich zur konventionellen Querstromtrocknung wurden die Trocknungskenngrößen sowie der für die Trockner erforderliche Bauaufwand herangezogen und in Tafel 14 tabellarisch zusammengestellt. Aus der Tafel wird deutlich, daß die modifizierten Verfahren teilweise erhebliche Verbesserungen gegenüber der konventionellen Querstromtrocknung aufweisen:

- Bei dem einstufigen Verfahren mit unterschiedlicher Fließgeschwindigkeit der Körner in den beiden Schachtsegmenten, Bild 60 b, kann mit geringen konstruktiven Veränderungen - Trennblech, regulierbarer Gutaustrag in den Schachthälften - vor allem die Gleichmäßigkeit der Trocknung wesent-

lich verbessert werden. Eine weitere Verbesserung der Gleichmäßigkeit ist nur durch eine mehrfache Unterteilung des Trocknerschachtes möglich, wobei die jeweilige Fließgeschwindigkeit auf das Trocknungsverhalten der Körner abzustimmen ist.

- Die zweistufige Trocknung mit Luftumkehrung, Bild 60 c, führt zu einer Verbesserung sämtlicher Trocknungskenngrößen. Der zur Realisierung des Verfahrens erforderliche Bauaufwand ist allerdings relativ hoch: es sind zwei Trocknungs-zonen sowie eine dazwischen eingebaute Temperzone zur Vermeidung von Falschluchtströmungen zwischen den beiden Trocknungs-zonen notwendig. Der Einbau der unbelüfteten Temperzone hat allerdings den Vorteil, daß darin ein Feuchteausgleich innerhalb der vorgetrockneten Körner vom Korninnern an die getrocknete Kornoberfläche erfolgt, wodurch die Restfeuchte in der zweiten Trocknungszone besser entzogen werden kann. Die bei der Versuchsanlage installierten zwei Gebläse mit Luftherhitzer lassen sich unter Praxisbedingungen bei jeweils gleichen Luftzuständen in den Trocknungs-zonen durch eines ersetzen.
- Durch die Verwendung eines Wärmerückgewinnungssystems kann bei der zweistufigen Trocknung der spezifische Wärmebedarf um weitere 15 - 20% reduziert werden. Hierzu ist allerdings neben dem Bauaufwand für das zweistufige Verfahren noch der zusätzliche Aufwand für das Wärmerückgewinnungssystem notwendig. Bei dem in Bild 74 f dargestellten Verfahren wird ein Luft-Luft-Wärmetauscher benötigt; die direkte Nutzung der Abluft als Trocknungsluft durch Zwischenerwärmung erfordert nur noch ein Gebläse, das allerdings leistungsstärker dimensioniert sein muß.

Bei der Beurteilung der modifizierten Querstromverfahren darf nicht vergessen werden, daß der Verbesserung der Trocknung ein nicht unerheblicher Investitionsaufwand für die erforderlichen Zusatzeinrichtungen wie eine zweite Trocknungszone oder ein

Wärmetauscher gegenüberstehen. Dabei sollte vom wirtschaftlichen Standpunkt aus sichergestellt sein, daß bei den modifizierten Querstromverfahren trotz des höheren Investitionsaufwandes die erreichten Verbesserungen zu geringeren Trocknungskosten führen.

Verfahren	Auswirkungen auf					
	Trocknungsleistung	spez. Wärmebedarf	spez. mech. Energiebedarf	Gleichmäßigkeit	Kornqualität	Bauaufwand
einstufig mit unterschiedl. Fließgeschwindigkeit der Körner	+	+	0	++	++	-
zweistufig mit Luftumkehrung	++	+	+	++	++	--
zweistufig mit Luftumkehrung und Wärmerückgewinnung	++	++	+	++	++	--

(++) sehr günstig (+) günstig (0) nahezu einflußlos
 (-) ungünstig (--) sehr ungünstig

Tafel 14: Auswirkungen der modifizierten Querstromverfahren auf die Trocknungskenngrößen im Vergleich zur konventionellen Querstromtrocknung

7. Folgerungen für die Praxis

Von einem guten Trocknungsverfahren für Getreide wird gefordert, daß die Trocknungsleistung hoch und der Energiebedarf gering ist, die Körner gleichmäßig bis auf Lagerfähigkeit getrocknet werden und die Kornqualität erhalten bleibt. Die Untersuchung des in der Praxis weitverbreiteten konventionellen Querstromtrocknungsverfahrens hat ergeben, daß diese Anforderungen alleine durch eine Variation der Trocknungsparameter Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit und Trocknerbreite nicht gleichzeitig erfüllt werden können, vgl. Tafel 10. Bei einem Einsatz des Verfahrens müssen daher Prioritäten gesetzt werden, welche Trocknungskenngrößen unter den jeweiligen Bedingungen optimal sein müssen und darauf sind die Trocknungsbedingungen abzustimmen.

Es erscheint daher sinnvoller, durch konstruktive oder verfahrenstechnische Veränderungen die Nachteile des konventionellen Querstromtrockners zu beheben. Dabei sollten allerdings die einfache Bauweise sowie die hohe Funktions- und Betriebssicherheit des Trockners erhalten bleiben. Als Möglichkeiten zur Verbesserung wurden drei modifizierte Querstromtrocknungsverfahren vorgestellt und ihr Einfluß auf die Trocknungskenngrößen bzw. die Vorteile gegenüber dem konventionellen Verfahren aufgezeigt, vgl. Tafel 14:

- einstufige Trocknung mit unterschiedlicher Fließgeschwindigkeit der Körner im Trockner, mit der insbesondere die Gleichmäßigkeit der Trocknung verbessert werden kann.
- zweistufige Trocknung mit Luftumkehrung, die zu einer Verbesserung sämtlicher Trocknungskenngrößen führt.
- zweistufige Trocknung mit Luftumkehrung und Wärmerückgewinnung aus der Abluft, mit der zusätzlich der spezifische Wärmebedarf um weitere 15 - 20% gesenkt werden kann.

Die technische Realisierbarkeit dieser modifizierten Verfahren für eine praxismgerechte Anwendung bei der Querstromtrocknung ist insbesondere bei dem ersten Verfahren ohne größeren Aufwand möglich. Unterschiedliche Fließgeschwindigkeiten der Körnerschüttung im Trocknerschacht können neben einer Drehzahlregulierung der Dosierwalzen auch erreicht werden, indem der Gutauslauf aus dem Trockner strömungstechnisch umgestaltet oder die Austrageeinrichtung exzentrisch unter dem Trocknerschacht angeordnet wird. Weiter kann bei gleichem Gutdurchsatz in den Schachtssegmenten durch eine Reduzierung des Schachtquerschnitts in der Trocknungszone die Fließgeschwindigkeit der Körnerschüttung gesteigert werden. Untersuchungen hierzu wurden jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht gemacht.

Um die Körnerschüttung von zwei einander gegenüberliegenden Seiten trocknen zu können, ist entweder eine zweite Trocknungszone erforderlich oder muß bei einstufiger Trocknung die gesamte Körnerschüttung durch Gutleitbleche im Trocknerschacht um 180° gedreht werden. Dabei muß allerdings gewährleistet sein, daß keine Störung des Gutflusses im Trockner eintritt.

Zur Realisierung der untersuchten Möglichkeiten zur Wärmerückgewinnung ist ein zweistufiger Querstromtrockner erforderlich. Für die direkte Nutzung der Abluft der unteren Trocknungszone als Trocknungsluft in der oberen ist gegenüber der zweistufigen Trocknung nur ein leistungsstärkeres Gebläse sowie ein geeigneter Flächenbrenner zur Zwischenerwärmung der Abluft notwendig, der unter Berücksichtigung der Sicherheitsvorschriften in den Luftkanal eingebaut werden muß, Bild 74 e. Bei einer Trennung der Luftströme von Abluft und Trocknungsluft, Bild 74 f, wird neben zwei Luftherhitzungseinrichtungen mit Gebläse ein zusätzlicher Wärmetauscher benötigt.

Eine ökonomische Beurteilung, inwieweit der erhöhte Investitionsaufwand für den Umbau und die zusätzlichen Einrichtungen bei den modifizierten Trocknungsverfahren durch die verbesserte Trocknung kompensiert werden kann, ist in erster Linie abhängig

von der Energiepreissituation, der jährlichen Betriebsstundenzahl sowie der Gesamtnutzungsdauer der Trocknungsanlage. Dies zu untersuchen war jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit. Ein Hinweis auf die Wirtschaftlichkeit der verbesserten Querstromtrocknungsverfahren ist jedoch beispielsweise darin zu sehen, daß zweistufige Querstromtrockner mit Luftumkehrung bereits erfolgreich in der Praxis der Getreidetrocknung eingesetzt werden.

8. Zusammenfassung

Das Querstromtrocknungsverfahren findet weitverbreitete Anwendung zur Getreidetrocknung. Allerdings hat dieses Trocknungsverfahren den Nachteil der geringen Trocknungsleistung, des hohen Wärmebedarfs und der ungleichmäßigen Trocknung der Körnerschüttung. Ziel der vorliegenden Arbeit war es daher, zu untersuchen, inwieweit durch eine Variation der das Trocknungsverhalten beeinflussenden Trocknungsparameter und durch eine Modifikation des Querstromverfahrens Verbesserungen der Querstromtrocknung zu erreichen sind.

In einer theoretischen Betrachtung wurde die Ähnlichkeit des Trocknungsverhaltens von Getreide bei der Ruheschichttrocknung und bei der Querstromtrocknung aufgezeigt. Zur Vorausberechnung des Trocknungsverhaltens bei beiden Verfahren wurde ein Berechnungsverfahren aufgestellt, welches das Trocknungsverhalten des Einzelkorns berücksichtigt und auf den Wärme- und Stoffbilanzen für die Trocknung von Körnerschüttungen aufbaut. Aufgrund des bei der theoretischen Betrachtung festgestellten ähnlichen Trocknungsverhaltens zwischen Ruheschicht- und Querstromtrocknung konnten die aufwendigen Versuche zur Untersuchung der Querstromtrocknung durch ergänzende Versuche bei der Ruheschichttrocknung eingeschränkt werden.

Für die experimentellen Untersuchungen der Ruheschicht- und der Querstromtrocknung wurden in halbtechnischem Maßstab ein Ruhe-

schichttrockner sowie ein Querstromtrockner entwickelt, bei denen die Trocknungsparameter Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit und Dicke der Körnerschüttung variiert werden können. Zur Beurteilung der Trocknung wurden die Trocknungskenngrößen Trocknungsleistung, thermischer und mechanischer Energiebedarf, Gleichmäßigkeit der Trocknung und Qualität des Trocknungsgutes herangezogen. Bei der experimentellen Untersuchung der Ruheschicht- und der Querstromtrocknung wurde der Einfluß unterschiedlicher Trocknungsbedingungen auf das Trocknungsverhalten von Weizen und Mais ermittelt. Mit der Kenntnis dieser Zusammenhänge wurde die Grundlage für eine Verbesserung der beiden Trocknungsverfahren geschaffen. Außerdem konnte mit dem bei der Ruheschichttrocknung ermittelten Trocknungsverhalten die Anwendbarkeit des aufgestellten Berechnungsverfahrens zur Vorausberechnung der Trocknung dicker Körnerschüttungen nachgewiesen werden.

Darüber hinaus konnten aus den Versuchsergebnissen wichtige Hinweise für die Praxis gewonnen werden. Es wurde festgestellt, daß die verfahrensbedingten Mängel der beiden Trocknungsverfahren alleine durch eine Optimierung der untersuchten Trocknungsparameter nicht ausgeglichen werden können. Insbesondere die schlechte Wärmeausnutzung der Trocknungsluft sowie die ungleichmäßige Trocknung der Körner zwischen Lufteintritt und Luftaustritt lassen sich nicht gleichzeitig verbessern.

Aufbauend auf den bei der Ruheschicht- und der Querstromtrocknung gewonnenen Erkenntnisse wurde daraufhin der Querstromtrockner so umgestaltet, daß folgende modifizierte Querstromverfahren experimentell untersucht werden konnten:

- einstufige Trocknung mit unterschiedlicher Fließgeschwindigkeit der Körnerschüttung im Trockner
- zweistufige Trocknung mit Luftumkehrung
- zweistufige Trocknung mit Luftumkehrung und Wärmerückgewinnung aus der Abluft.

Die experimentell ermittelten Ergebnisse zeigten, daß mit diesen Trocknungsverfahren wesentliche Verbesserungen gegenüber der konventionellen Querstromtrocknung zu erzielen sind. Es konnte gleichzeitig die Trocknungsleistung gesteigert, der Wärmebedarf reduziert und die Gleichmäßigkeit der Trocknung erhöht werden, ohne daß eine Verminderung der Kornqualität eintrat.

Die vorliegende Arbeit trägt dazu bei, daß auf dem Gebiet der Querstromtrocknung von Getreide durch eine geeignete Auswahl der Trocknungsbedingungen und durch verfahrenstechnische Verbesserungen in Verbindung mit Wärmerückgewinnungssystemen eine Optimierung des Querstromverfahrens vorgenommen werden kann. Inwieweit der dazu erforderliche höhere Investitionsaufwand durch die verbesserte Trocknung kompensiert werden kann, bedarf einer weiteren Untersuchung.

9. Schrifttum

- [1] Thompson, T.L.: Predicted performances and optimal designs of convection grain dryers. Diss. Purdue University, Lafayette (USA), 1967.
- [2] Thompson, T.L. et.al.: Mathematical simulation of corn drying - a new model, Trans. ASAE 11 (1968) No. 4, S.582/586.
- [3] Bakker-Arkema, F.W. et.al.: Michigan state grain drying models. ASAE-Paper No. 70-832, ASAE St. Joseph, Michigan, 1970.
- [4] Bakker-Arkema, F.W. et.al.: Grain dryer simulation. Research Report 224 Farm Science, Michigan State University, East Lansing, 1974.
- [5] Thompson, T.L., G.H. Foster u. R.M. Peart: Comparison of concurrent-flow, crossflow, and counterflow grain drying methods. U.S.D.A. Mark. Res. Rep. Nr. 841, 1969.
- [6] Bakker-Arkema, F.W., T.W. Evans u. D.M. Farmer: Simulation of multiple-zone grain drying. Trans. ASAE 14 (1971) Nr. 6, S. 935/938.
- [7] Bakker-Arkema, F.W. et.al.: Comparative evaluation of cross-flow and concurrent flow dryers. ASAE-Paper No. 72-846, ASAE St. Joseph, Michigan, 1972.
- [8] Lerew, L.E., F.W. Bakker-Arkema u. R.C. Brook: Simulation of a commercial cross-flow dryer: The Hart-Carter-Model. ASAE-Paper No. 72-829, ASAE St. Joseph, Michigan, 1972.
- [9] Bakker-Arkema, F.W. et.al.: Energy conservation in grain dryers: Performance evaluation. ASAE-Paper No. 73-324, ASAE St. Joseph, Michigan, 1973.
- [10] Paulsen, Mr.R. u. T.L. Thompsen: Effects of reversing airflow in a crossflow grain dryer. Trans. ASAE 16 (1973) Nr.3, S. 541/545.
- [11] Morey, R.V. u. H.A. Cloud: Simulation and evaluation of a multiple column crossflow grain dryer. Trans. ASAE 16 (1973) Nr. 6, S.984/987.

- [12] Pierce, O. u.
T.L. Thompson: Energy utilization and efficiency of crossflow grain dryers. ASAE-Paper No. 75-3020, ASAE St. Joseph, Michigan, 1975.
- [13] Stevens, G.R. u.
T.L. Thompson: Improving crossflow grain dryer design using simulation. Trans. ASAE 19 (1976) No.5, S. 778/781.
- [14] Converse, J.O.: A commercial crossflow-counter-flow grain dryer: the H.C. Trans. ASAE Paper No. 72-828, 1972.
- [15] Noyes, R.T.: SUPERB - "Optimum" continuous crossflow commercial grain dryer. Trans. ASAE Paper No. 77-3015, 1977.
- [16] Lerew, L.E. et.al.: Simulation of a commercial cross-flow dryer: the Hart-Carter-Model. Trans. ASAE Paper No. 72-829, 1972.
- [17] Meiering, A.G. u.
H.J. Höfkes: Die Bedeutung der Computer-Simulation für die Getreidetrocknung. Grundl. Landtechnik 27 (1977), Nr. 1, S.1/8.
- [18] Klapp, E.: Ein Beitrag zur analytischen Behandlung von gekoppelten Wärme- und Stoffaustauschvorgängen in durchströmten Schüttungen. Dissertation, Universität Bonn, 1961.
- [19] Hukill, W.V.: Drying of grain. In: I.A. Anderson u. A.V. Alcock: Storage of cereal grains and their products. Am. Ass. of Cer. Chem. St. Paul/Minnesota 1954, S. 402/435.
- [20] Schroeder, M.E. u.
R.M. Peart: Dynamic programming method of air allocation in a grain dryer. Trans. ASAE 10 (1967) Nr. 1, S. 96/99.
- [21] Zachariah, G.L. u.
G.W. Isaacs: Simulating a moisture-control system for a continuous-flow dryer. Trans. ASAE 9 (1966) Nr. 3, S.297/302.
- [22] Holtman, J.B. u.
G.L. Zachariah: Computer controls for grain dryers. Trans. ASAE 12 (1969) Nr. 3, S. 433/437.

- [23] Boyce, D.S.: Grain moisture and temperature changes with position and time during drying. J. Agr. Eng. Res. 10 (1965) Nr. 4, S. 333/341.
- [24] Spencer, H.B.: A revised model of the wheat drying process. J. Agr. Eng. Res. 17 (1972) Nr. 2, S. 189/194.
- [25] Hamdy, M.Y. u. H.J. Barre: Analysis of hybrid simulation of deep-bed drying of grain. Trans. ASAE 13 (1970) Nr. 5, S. 752/757.
- [26] Baugham, G.R. et.al.: Analog computer simulation of deep-bed drying in grain. Trans. ASAE 14 (1971) Nr. 6, S. 1058/1061.
- [27] Barre, H.J. et.al.: Application of the logarithmic model to crossflow deep-bed grain drying. Trans. ASAE 14 (1971) Nr. 6, S.1061/1064.
- [28] Huang, T.-G. u. W.W.Gunkel: Theoretical and experimental studies of the heating front in a deep bed hygroscopic product. Trans. ASAE 17 (1974) Nr. 2, S. 346/354.
- [29] Bakker-Arkema, F.W. et.al.: Gekoppelter Wärme- und Stoffaustausch während des Trocknungsvorganges in einem Behälter mit Getreide. Landt. Forsch. 17 (1967) Nr. 6, S. 222/263.
- [30] Day, D.L. et.al.: Predicting performance of cross-flow systems for drying grain storage in deep cylindrical bins. Trans. ASAE 8 (1965) Nr.2, S. 288/292 u. 297.
- [31] VDMA: Trocknungstechnische Grundbegriffe. VDMA-Einheitsblätter, Nr. 24 351. Beuth-Vertrieb GmbH, Berlin 15/Köln 1963.
- [32] Rodriguez-Arias, J.H. et.al.: Heat of vaporization for shelled corn. Cereal Chem. 40 (1963), S. 676/683.
- [33] Moreau, C.: Moississures toxiques dans l'alimentation. Paris: Edition P. Lechevalier 1968.

- [34] Kuppinger, H. et.al.: Die Belüftungstrocknung von ern-
tefrischem und vorgetrocknetem
Körnermais unter thermodynam-
ischem und mikrobiologischem
Aspekt. Grundl. Landtechnik 27
(1977) Nr. 4, S. 119/128.
- [35] Lykow, A.W.: Experimentelle und theoretische
Grundlagen der Trocknung. VEB-
Verlag Technik, Berlin, 1955.
- [36] Schmidt, E.: Einführung in die technische
Thermodynamik. Springer-Verlag,
Berlin/Göttingen/Heidelberg,
1963.
- [37] Riedel, L.: Das Wasser. In: Handbuch der
Lebensmittelchemie Band 1,
S. 100/122. Springer-Verlag,
Berlin/Heidelberg/New York, 1965.
- [38] Thompson, H.J.
u. C.K. Shedd: Equilibrium moisture and heat
of vaporization of shelled corn
and wheat. ASAE Journ. Vol. 35
(1954) Nr. 6.
- [39] Mühlbauer, W. u.
R. Scherer: Die spezifische Wärme von Körner-
früchten. Grundl. Landtechnik 27
(1977) Nr. 2, S. 33/40.
- [40] Kazarian, E.A. u.
C.W. Hall: Thermal properties of grain.
Trans. ASAE 8 (1965) Nr. 1,
S. 33/38.
- [41] Scherer, R.: Die Ermittlung thermophysikali-
scher Eigenschaften von Körner-
früchten, dargestellt am Beispiel
von Mais, und die Bedeutung die-
ser Größen für die thermische
Konservierung und Lagerung. For-
schungsbericht Agrartechnik des
Arbeitskreises Forschung und
Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft
Frankfurt, Heft 38, 1979. Im
Selbstverlag des Verfassers,
Institut für Agrartechnik, Uni-
versität Hohenheim.
- [42] Scherer, R. u.
H.D. Kutzbach: Mechanische Eigenschaften von
Körnerfrüchten. Grundl. Landtech-
nik 28 (1978) Nr. 1, S. 6/12.

- [43] DLG-Merkblatt 131/132: Vorschriften für Bau, Aufstellung und Betrieb von landwirtschaftlichen Trocknungsanlagen für Getreide. Deutsche Landwirtschaftsgesellschaft Frankfurt/M., 1976.
- [44] Mühlbauer, W.: Untersuchungen über die Trocknung von Körnermais unter besonderer Berücksichtigung des Gleichstromverfahrens. Forschungsbericht des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft zur Förderung der Agrartechnik, Frankfurt, 1974, Heft 1, im Selbstverlag des Verfassers, Lehrstuhl für Landtechnik, Universität Hohenheim.
- [45] Hutt, W. u. E. Winkler: Einfluß der direkten Beheizung von Trocknungsanlagen auf die Gehalte an polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen. Grndl. Landtechnik 28 (1978) Nr. 6, S.240/245.
- [46] Strehler, A.: Moderne Körnertrocknungsverfahren. Lohnunternehmen (1970) Nr.5, S. 146/152.
- [47] Strehler, A.: Was kostet das Trocknen von Körnermais? Lohnunternehmen (1970) Nr.8, S.250/254.
- [48] Wassermann, L.: Einfluß der Trocknung auf die Backeigenschaften von Weizen. Die Mühle und Mischfuttertechnik 115 (1978) Nr. 30, S.433/435.
- [49] Huß, W.: Einfluß der Trocknung auf die Qualität von Futtermais. Die Mühle und Mischfuttertechnik 115 (1978) Nr. 31, S. 448/450.
- [50] Mühlbauer, W., W. Huß und H. Kuppinger: Farbmétrische Schnellmethode zum Erkennen einer Proteinschädigung bei der Trocknung von Maiskörnern mit hohen Lufttemperaturen. Grndl. Landtechnik 26 (1976) Nr. 4, S. 128/133.
- [51] Krischer, O.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1969.

- [52] Kneule, F.: Das Trocknen. Verlag Sauerländer Aarau und Frankfurt/M., 3. Auflage 1975.
- [53] Kröll, K.: Trocknung luftdurchströmter Streichholzschüttungen. Chemie-Ing.-Techn. 27 (1955) Nr.8/9, S. 527/534.
- [54] Hoiß, J.: Untersuchungen zum Trocknungsverhalten von Zweikornschüttungen kugelförmiger poröser Teilchen. Chemie-Ing.-Techn. 46 (1974) Nr. 23, S.995.
- [55] van Meel, D.A.: Adiabatic convection batch drying with recirculation of air. Chem. Eng. Sci. 9 (1958)Nr. 2, S. 36/40.
- [56] van Arsdell, W.B.: Simultaneous heat and mass transfer in a non-isothermal system. Am. Inst. Chem. Eng. Symposium Series Nr. 16, 1955.
- [57] Thompson, R.A. u. G.H. Foster: Stress cracks and breakage in artificially dried corn. U.S.D.A. Marketing Research Report, No. 631, 1963.
- [58] Henderson, S.M. u. S. Pabis: The air/grain temperature relationship. Journ. of Agr. Eng. Res. 7 (1962) Nr. 4, S. 341/343.
- [59] Sonnenberg, H.: Untersuchung zur Trocknung von Preßlingen aus tierischen Exkrementen mit Luft niedriger Trocknungstemperaturen. Grundl. Landtechnik 27 (1977) Nr. 2, S.57/62.
- [60] DIN 1952: VDI-Durchflußregeln. Regeln für die Durchflußmessung mit genormten Düsen, Blenden und Venturidüsen. VDI-Verlag Düsseldorf, 1963.
- [61] Mühlbauer, W.: Energiebedarf bei der Körner-trocknung. Agrartechn. Internat. 55 (1976) Nr. 8, S. 20/22.
- [62] Maltry, W.: Einige Untersuchungen zur Aufklärung des Verhaltens von Getreide im Dächerschachttrockner. Archiv Landt. 5 (1966) Nr. 3, S. 223/264.

- [63] White, G.M. u.
I.J. Ross: Moisture equilibrium in mixing of
shelled corn. Trans. ASAE 15
(1972) Nr. 3, S. 508/509.
- [64] Schlünder, E.U.: Über den Mechanismus des Stoff-
überganges in heterogenen Systeme-
men, speziell in Festbetten,
fluidisierten Betten und Blasen-
böden. Chem. Eng. Sci. 31 (1977)
Nr. 8, S. 845/851.
- [65] Babitt, J.D.: Observations on the adsorption of
water vapor by wheat. Can. Journ.
Res. 27 F (1949), S. 55/71.
- [66] Simmonds, W.H.,
G.T. Ward u.
E. McEven: The drying of wheat grain. Trans.
Inst. Chem. Eng. London (1953),
S. 265.
- [67] Becker, H.A. u.
H.R. Sallans: A study of internal moisture
movement in the drying of the wheat
kernels. Cereal Chemistry 32
(1955) Nr. 3, S. 212/226.
- [68] Becker, H.A.: A study of diffusion in solids of
arbitrary shape, with applica-
tions to the drying of the wheat
kernels. Journ. of Applied Poly-
mer Science 1 (1959), S. 212.
- [69] Hustrulid, A.: Comparative drying rates of na-
turally moist, remoistened, and
frozen wheat. Trans. ASAE 6 (1963)
Nr. 4, S. 304/308.
- [70] McEven, E.: The effect of air humidity on
through drying of wheatgrains.
Trans. Inst. Chem. Eng. 3 (1955),
S. 133/137.
- [71] Rest, D. van u.
G.W. Isaacs: Exposed-layer drying rates of
small grains. Trans. ASAE 9 (1966)
Nr. 5, S. 688/689.
- [72] Hukill, W.V.: Basic principles in drying corn
and grain sorghum. Agr. Eng. 28
(1947) Nr. 8, S. 335/340.
- [73] Hukill, W.V. u.
J.L. Schmidt: Drying rate of fully exposed
grain kernels. Trans. ASAE 3
(1960) Nr.1, S. 71/80.

- [74] Hustrulid, A. u. A.M. Flikke: Theor. drying curve for shelled corn. Trans. ASAE 2 (1959) Nr.1, S. 112/114.
- [75] Hustrulid, A.: Comparative drying rates of naturally moist, remoistened, and frozen shelled corn. Trans. ASAE 5 (1962) Nr. 1, S.64/67.
- [76] Page, G.E.: Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers. M.S. thesis, Purdue Univ. 1949.
- [77] Hall, C.W. u. G.E. Hall: Drying shelled corn by conduction heating. Agr. Eng. 42 (1961) Nr. 4, S. 186/187 u. 196.
- [78] Finney, E.E., N.N. Moshenin u. J.D. Hovanesian: The thermal efficiency of conduction drying of shelled maize and the effect of temperature and kernel injury on the drying rate. J. Agr. Eng. Res. 8 (1963) Nr. 1, S. 62/69.
- [79] Chittenden, D.H. u. A. Hustrulid: Determining drying constants for shelled corn. Trans. ASAE 9 (1966) Nr. 1, S. 52/55.
- [80] Scheuermann, A. u. W. Mühlbauer: Das Trocknungsverhalten von Einzelkornschichten von Körnermais bei hohen Lufttemperaturen. Grundl. Landt. 20 (1970) Nr. 1, S. 11/15.
- [81] Mühlbauer, W. u. H. Kuppinger: Das Trocknungsverhalten des Einzelkorns. In: Trocknung von Körnerfrüchten in Durchlauf Trocknern. Unveröffentlichter l. Tätigkeitsbericht des Sonderforschungsbereichs 140 - Landtechnik, Bd. II, S. 19/42. Universität Hohenheim 1974.
- [82] Hege, H.: Untersuchungen an einem Gegenstrom-Schacht-Trockner. Landt. Forsch. 6 (1956) Nr. 3, S. 79/87.
- [83] Mühlbauer, W., H. Kuppinger u. G.W. Isaacs: Entwicklung eines Gleich-/Gegenstrom-Durchlauf Trockners für Getreide und Mais. Grundl. Landtechnik 29 (1979) Nr. 4, S.131/140.

- [84] Kuppinger, H.: Untersuchung des Trocknungsverhaltens von befeuchteten und naturfeuchten Weizenkörnern. Diplomarbeit, Univ. Stuttgart, 1973.
- [85] Lasseran, J.C.: Energieeinsparung durch Wärmerückgewinnung. Agrartechnische Berichte 4 (1978), S. 41/53, Univ. Hohenheim.
- [86] Lasseran, J.C. u. A. Hurand: Economies au séchage - Procédés réalisables et recherches en cours. Perspectives agricoles (1979) Nr. 24, S.38/45.
- [87] Mühlbauer, W. u. G.W. Isaacs: Wärmerückgewinnung bei Körnerfruchttrocknungsanlagen. Landtechnik 30 (1975) Nr. 11, S. 479/483.

vervielfältigungen
f. u. t. müllerbader
Forststraße 18 · 7024 Filderstadt 4
Telefon (0711) 771567