Systematik der Trockner für rieselfähiges Gut

Von **Fritz Litzenberger**, Braunschweig-Völkenrode

Viele in der landwirtschaftlichen Produktion anfallende Massengüter muß man nach der Ernte trocknen, um sie zu konservieren oder für die Weiterverarbeitung vorzubereiten. Vielfach handelt es sich dabei um rieselfähige Güter. Wir wollen hierunter Haufwerke aus relativ kleinen und leichten Teilen verstehen, die nicht oder nur durch geringe Verhakungs- oder (bei nassem Gut) Kapillarkräfte miteinander verbunden sind. Solche Güter landwirtschaftlicher Art sind beispielsweise alle Getreidearten, Ölsaaten und Samen; aus der industriellen Produktion seien Kunstdünger, gemahlene Kohle und Kunststoffe genannt. Manche Produkte werden durch Zerkleinern rieselfähig gemacht, wie Häckselheu, gehäckseltes Rübenblatt oder in Streifen geschnittenes Gemüse.

Rieselfähige Güter lassen sich meist sehr gut trocknen, da in den relativ kleinen Teilen die Wege für den Wärme- und Stofftransport kurz sind und das Haufwerk auf viele Weisen gemischt und fein verteilt werden kann. Daher kommt gerade hier eine Vielzahl von Apparaten verschiedenster Bauweise in Betracht.

Einteilungsmerkmale und Systematik

Um den Überblick zu erleichtern, wird im folgenden eine Systematik der Trockner für rieselfähiges Gut aufgestellt und anhand einiger allgemeiner Grundlagen und ausgeführter Apparate erläutert. Für eine solche Einteilung bietet sich eine Vielzahl von Merkmalen an, wie sie auch in allgemeinen Übersichten über Trocknung und Trocknerbauarten von *Görling* [1], *Kiesskalt* [2] und *Kröll* [3; 4] verwendet werden. Einige sind in **Tafel 1** zusammengestellt. Die obenstehende Gruppe umfaßt übergeordnete Begriffe; in der unteren Gruppe finden sich Unterteilungen für die häufig vorkommenden Fälle der unmittelbaren und mittelbaren konvektiven Erwärmung, die beide durch das Wirken eines Trocknungsmittels gekennzeichnet sind.

Als zweckmäßige Hauptkriterien, die vor allem eine genügend genaue Unterteilung ergeben sollen, werden ausgewählt:

1. die Art der Wärmezuführung an den Verdampfungsort und
2. die Art der Gutsbewegung und Mischung.

Wärmezufuhr an den Verdampfungsort

Bei thermischer Trocknung muß zum Entfeuchten die notwendige Verdampfungswärme an den Ort der Zustandsänderung gebracht werden. Nach der überwiegenden Art der Wärmezufuhr kann man fünf Gruppen von Trocknern unterscheiden:

1. Trockner mit unmittelbarer Konvektionsbeheizung des Gutes durch das Trocknungsmittel. Dieses ist ein heißes Gas, welches gleichzeitig den entstehenden Wasserdampf aufnimmt;
2. Trockner mit mittelbarer Konvektionsbeheizung des Gutes durch das Trocknungsmittel;
3. Kontakttrockner mit überwiegend konduktiver Wärmezufuhr von beheizten Oberflächen;
4. Strahlungstrockner;
5. Trockner mit unmittelbarer Gutserwärmung auf elektrischem Wege.

Dipl.-Ing. Fritz Litzenberger ist wissenschaftlicher Mitarbeiter des Institutes für landtechnische Grundlagenforschung (Direktor: Prof. Dr.-Ing. Wilhelm Batel) der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode.

Gutsbewegung und Mischung

Diese Einteilung beschreibt die Anordnung der Teilchen beim Trocknen. Wird eine Schüttung aus rieselfähigen Teilchen entgegen der Schwerkraftrichtung von einem Gas durchströmt, so können entsprechend **Bild 1** je nach Größe der Strömungsgeschwindigkeit w im frei gedachten Schüttungsquerschnitt drei charakteristische Zustände dieses Feststoff-Gasgemisches auftreten:

1. Die **Ruheschicht** bei kleinen Gasgeschwindigkeiten w. Hier bleibt die Anordnung der Teilchen zueinander während der Trocknung gleich. Dies gilt, solange der Druckabfall in der Schicht kleiner ist als deren Gewicht je Flächeneinheit:

$$\Delta P \leqq (1 - \varepsilon)\, \varrho_S\, g\, l,$$

worin ΔP den Druckabfall,
ε den Zwischenraumanteil,
ϱ_S die Feststoffdichte,
g die Erdbeschleunigung und
l die Schichthöhe bedeuten.

2. Die **Wirbelschicht** bei höheren Luftgeschwindigkeiten. In der Wirbelschicht schwingen die Teilchen aus ihrer Ruhelage heraus gegeneinander [6] und es steigen Luftblasen auf, wodurch die Schicht die Fließfähigkeit und das Aussehen einer kochenden

Tafel 1. Mögliche Unterscheidungsmerkmale der Trockner für rieselfähige Güter.

Allgemeine Merkmale	
Druck im Trocknungsraum:	Normaldrucktrocknung Vakuumtrocknung
Anteil des Dampfdruckes am Gesamtdruck:	Verdunstungstrocknung*) Verdampfungstrocknung**)
Gutszufuhr und -abfuhr:	diskontinuierliche Beschickung kontinuierliche Beschickung
Gutsbeweguug u. Mischung:	Ruheschicht Umlegeschicht Wirbelschicht Aerosol
Wärmezufuhr an dem Verdampfungsort:	Konvektion, unmittelbar Konvektion, mittelbar Kontakt Strahlung unmittelbare elektrische Erwärmung
Merkmale bei unmittelbarer und mittelbarer Konvektionsbeheizung	
Art des Heiz- und Trocknungsmittels:	Warmluft Feuerungsgase überhitzter Dampf Inertgas
Führung des Trocknungsmittels, wärmewirtschaftlich:	Frischluft Teilumluft Umluft
Führung des Trocknungsmittels bei Ruheschichten:	überströmte Schüttung durchströmte Schüttung
Führung des Trocknungsmittels bei kontinuierlichem Betrieb:	Gleichstrom Gegenstrom Kreuzstrom

*) Partialdruck des Wasserdampfes $<$ Gesamtdruck
**) Partialdruck des Wasserdampfes $\geqq$ Gesamtdruck

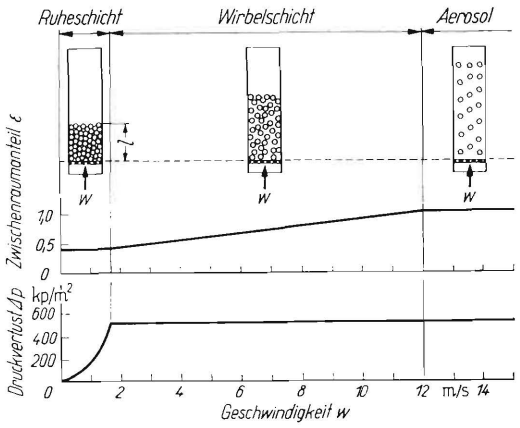


Bild 1. Charakteristische Zustände eines Feststoff-Gasgemisches nach *Barth* [5].

Teilchen: Kugeln	d	= 5 mm ⌀
Zwischenraumanteil	ε	= 0,4
Dichte des gasförmigen Mediums	ϱ_M	= 1,2 kg/m³
Feststoffdichte	ϱ_S	= 2000 kg/m³
Schichthöhe	l	= 400 mm

Flüssigkeit erhält. Bei steigender Strömungsgeschwindigkeit w im freien Strömungsquerschnitt dehnt sich die Wirbelschicht immer mehr aus.

3. **Aerosol.** Im Grenzzustand hat der Zwischenraumanteil ε den Wert 1 und die Anströmgeschwindigkeit v am einzelnen Teilchen den Betrag der Schwebegeschwindigkeit v_f erreicht. Unter Schwebegeschwindigkeit versteht man dabei die Endfallgeschwindigkeit eines Teilchens im ruhenden Medium, die sich durch das Gleichgewicht von Erdanziehungs- und Strömungskräften ergibt. Es gilt also:

$$\varepsilon = 1 \text{ und daraus } v = \frac{w}{\varepsilon} = w \text{ und}$$

$$v = v_f \quad \text{mit} \quad v_f = \frac{4\,\varrho_S\,g\,d}{3\,\varrho_M\,\zeta}$$

ϱ_M Dichte des gasförmigen Mediums
d äquivalenter Teilchendurchmesser
ζ Widerstandsbeiwert des Teilchens

4. Beim letzten, mit **Umlegeschicht** bezeichneten Zustand wird das Gut durch maschinelles Umschaufeln, Abrieseln von Förderbändern oder durch schwingende Gutsauflagen, d. h. mit mechanischen Mitteln und nicht mit Strömungskräften, gewendet und durchgemischt.

Neben diesen beiden Hauptkriterien „Wärmezufuhr" und „Gutsbewegung und Mischung" ist die Unterscheidung in diskontinuierliche und kontinuierliche Betriebsweise besonders zweckmäßig. Kontinuierlichen Betrieb strebt man stets dann an, wenn größere Mengen gleichartigen Gutes zu verarbeiten sind.

Die beiden erstgenannten Wege der Wärmezufuhr erfordern bei kontinuierlichem Betrieb als wichtigste Unterteilung die nach den Richtungen von Guts- und Gasbewegung. Man unterscheidet Gleichstrom — Gegenstrom — Kreuzstrom **(Bild 2)**.

Beim **Gleichstrom** trifft das eintretende kalte Feuchtgut mit heißer, trockener Luft zusammen. Im Trockner nähern sich beide der sogenannten Kühlgrenztemperatur, einem Wert, der durch den Lufteintrittszustand bestimmt wird. Das Gut trocknet anfangs rasch, später wegen der kleiner werdenden Temperaturdifferenz und zunehmender Luftsättigung nur langsam. Hygroskopische Substanzen können dabei oft nicht die geforderte Endfeuchte erreichen. Das feuchte Gut muß die sehr schnell verlaufende Austrocknung zu Anfang vertragen können.

Beim **Gegenstrom** trifft die heiße Frischluft mit dem austretenden, bereits getrockneten Gut zusammen, während sich am Gutseintritt bereits abgekühlte und befeuchtete Luft und Feuchtgut gegenüberstehen. Das Gut wird also anfangs langsam getrocknet, später einem hohen Temperatur- und Feuchtigkeitsgefälle ausgesetzt, das auch im hygroskopischen Bereich eine befriedigende Austrocknung ermöglicht. Das trockene Gut muß allerdings eine schnelle Austrocknung bei hoher Temperatur ohne Schädigung vertragen können.

Beim einfachen **Kreuzstrom** ist das Gut auf dem ganzen Weg durch den Trockner gleichartigen Luftbedingungen ausgesetzt. Durch zonenweises Belüften mit verschieden konditionierter Luft, meist erzeugt durch Mischen von Frisch- und Abluft, kann man jedoch oft eine besonders gute Anpassung an das Trocknungsverhalten des Gutes erreichen.

Es hängt also von den besonderen Trocknungseigenschaften des Gutes ab, seiner Neigung zum Verkleben, zur Rißbildung durch Schrumpfspannungen, zum biologischen Verderb, ob Gleichstrom- oder Gegenstromtrocknung anzuwenden sind; lediglich im Mehr-

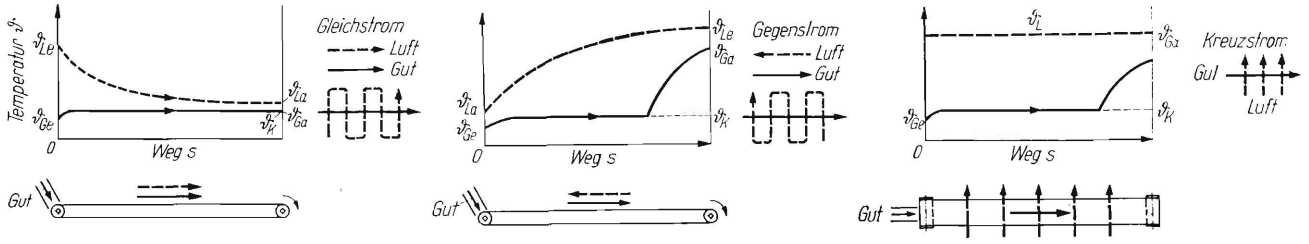


Bild 2. Luft- und Gutsführung bei kontinuierlicher Konvektionstrocknung.

ϑ_L Lufttemperatur ϑ_G Gutstemperatur ϑ_K Kühlgrenztemperatur Index e beim Eintritt Index a beim Austritt

Hier liegt ein Zustand disperser Feststoffteilchen in einem gasförmigen Medium vor, den wir in weiterem Sinne als Aerosol (auch Zustand pneumatischer Förderung, Flugstaubwolke) bezeichnen wollen, obwohl die Teilchen meist oberhalb kolloidaler Größenordnungen liegen. Die Gutskörner schweben zunächst und werden bei geringer Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit oder Verringerung der Dichte, z. B. infolge der Austrocknung, mit dem Gasstrom fortgeführt. Bild 1 zeigt den Zusammenhang zwischen Schichtzustand, Druckabfall, Zwischenraumanteil und Strömungsgeschwindigkeit. Der Aerosolzustand kann aber auch durch Herabrieseln von Teilchen in einem Gasstrom oder ähnliche Maßnahmen erzeugt werden; wesentliches Merkmal dabei ist stets die Vereinzelung der Teilchen.

In der Wirbelschicht und im Aerosolzustand wird das Haufwerk durch den Gasstrom ständig gewendet und durchgemischt und so die Teilchen gleichmäßig und allseitig getrocknet.

zonen-Kreuzstromtrockner kann man theoretisch eine für jedes Gut passende Abstufung von Temperatur und Feuchte erzielen. In Bild 2 sind zwei technisch häufiger angewandte Möglichkeiten der Konvektionstrocknung angedeutet, bei denen die Luft zwar örtlich im Kreuzstrom geführt wird, insgesamt aber doch eine Gleich- bzw. Gegenstromcharakteristik des Trockners vorliegt.

Anhand der beiden Hauptkriterien „Wärmezufuhr" und „Gutsbewegung und Mischung" sowie der wichtigen, oben genannten Merkmale wurden die Trockner für rieselfähiges Gut in **Tafel 2** in einer Systematik zusammengestellt.

1. Trockner mit unmittelbar wirkender Konvektionsheizung

Ruheschicht. Überströmte Schüttgutschichten trocknen wie der überströmte Einzelkörper in einem Abschnitt konstanter und zwei Abschnitten fallender Trocknungsgeschwindigkeit, wobei

sich die Verdunstungszone von der überströmten Oberfläche nach innen verlagert **(Bild 3)**. Die Trocknungsabschnitte sind dabei nach *Krischer* [7] gekennzeichnet durch: I. Oberflächenverdunstung mit kapillarer Flüssigkeitsnachführung aus dem Gutsinneren; II. Verlagerung des Trocknungsspiegels nach innen bei Erschöpfung der kapillaren Saugkräfte; III. hygroskopische Trocknung an allen Stellen des Gutes.

Unter Trocknungsgeschwindigkeit g_D verstehen wir die Feuchtigkeitsmenge, die je Zeiteinheit durch eine Oberflächeneinheit des Gutes hindurchtritt. Sie wird im folgenden als Funktion der Gutsfeuchte X abgebildet, die das Massenverhältnis

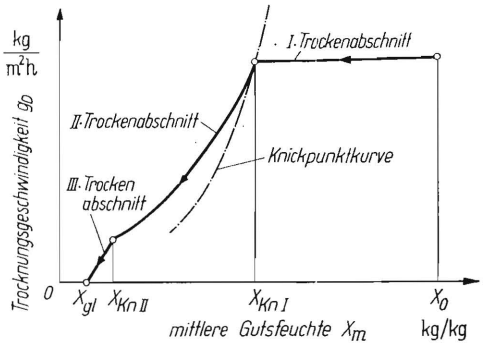


Bild 3. Trocknungsverlauf des Einzelkörpers bzw. der überströmten Schüttung.

X_0 Anfangsfeuchte
X_{gl} Gleichgewichtsfeuchte
X_{KnI}, X_{KnII} Feuchte im I. und II. Knickpunkt
g_D Trocknungsgeschwindigkeit
s Dicke der Gutsschicht

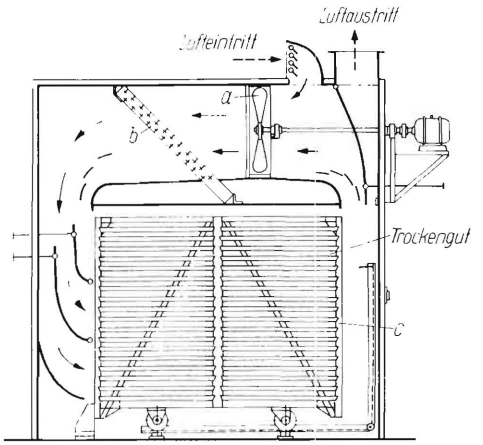


Bild 4. Kammertrockner mit überströmter Ruheschicht (Bauart Schilde).

a Ventilator, b Heizkörper, c Hordenwagen

„Feuchte zu Trockensubstanz" darstellt. Aus $g_D = f(X)$ berechnet sich die Trocknungszeit t nach [7] zu:

$$t = s\,\varrho_{tr} \int_{X_0}^{X} \frac{1}{g_D}\,dX$$

worin s die Dicke der Gutsschicht und
ϱ_{tr} die Dichte des trockenen Feststoffes im betrachteten Gesamtvolumen sind.

Für rieselfähige Güter werden überströmte Ruheschichten in diskontinuierlichen Kammertrocknern angewandt **(Bild 4)**, für kontinuierlichen Betrieb wären Bandtrockner mit einem Förderband denkbar, wie sie in Bild 2 zur Veranschaulichung von Gleich-, Gegen- und Kreuzstrom skizziert sind.

Bei Durchströmung ruhender Schüttgutschichten liegen gleichbleibende Trocknungsbedingungen nur für die erste dem Luftstrom zugewandte Teilchenschicht vor **(Bild 5)**. Zunächst treten in hintereinander liegenden Gutschichten Abschnitte konstanter Trocknungsgeschwindigkeiten auf, deren jeweilige Größe mit der Eindringtiefe abnimmt. Wenn die Eintrittsschicht den ersten Knickpunkt erreicht hat, erhöht sich das Trocknungspotential der daraus abströmenden Luft und somit nach der Stoffübergangsbeziehung die Trocknungsgeschwindigkeit g_D in den folgenden Gutsschichten:

$$g_{DI} = \frac{\beta}{R_D\,T}(P_{DO} - P_{DL}) = \frac{\alpha}{r}(\vartheta_L - \vartheta_O).$$

β Stoffübergangszahl m/h
α Wärmeübergangszahl kcal/m² h grad
R_D Gaskonstante des Wasserdampfs mkp/kg °K
r Verdampfungswärme kcal/kg
T absolute Temperatur °K
P_{DO} Dampfteildruck an der Gutsoberfläche kp/m²
ϑ_O Temperatur an der Gutsoberfläche °C
P_{DL} Dampfteildruck im Luftstrom kp/m²
ϑ_L Temperatur im Luftstrom °C

Das Bild stellt nach *Krischer* und *Jaeschke* [8] links den theoretischen und rechts einen experimentell festgestellten Verlauf der Trocknungsgeschwindigkeiten in einer sehr dünnen Schüttung aus 7 Schichten Gasbetonprismen dar. Bei tiefen Schüttungen strömt die Luft ab einer gewissen Tiefe zunächst gesättigt weiter. Es wandert dann eine begrenzte Zone mit verschieden großen, endlichen Trocknungsgeschwindigkeiten von der Zuströmseite durch das Gut, welches erst voll ausgetrocknet ist, wenn auch in der letzten Teilchenschicht die Trocknungsgeschwindigkeit angewachsen und wieder auf Null abgefallen ist.

Diese Erscheinungen (auch von *Kröll* [3], *Wenner* [9], *Maltry* [10] behandelt) treten in allen konvektiven Ruheschichttrocknern auf, z. B. in den diskontinuierlich arbeitenden einfachen

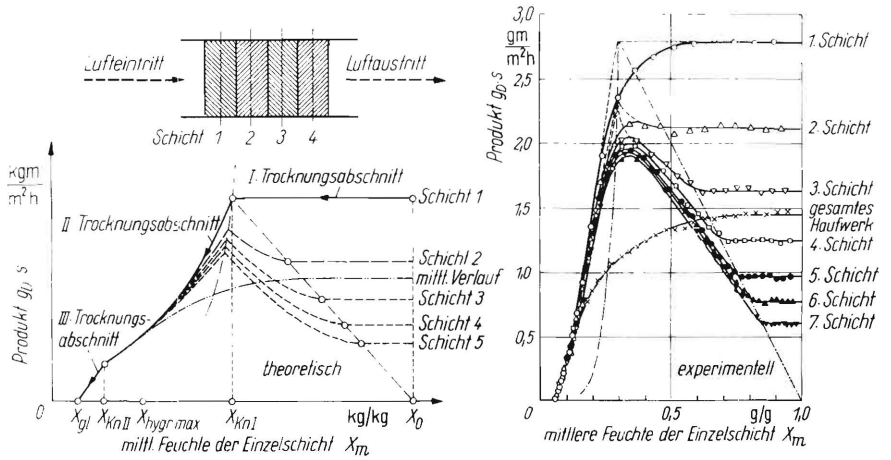


Bild 5. Trocknungsverlauf in hintereinander liegenden, durchströmten Gutschichten (nach *Krischer* und *Jaeschke* [8]).

$X_{hygr\,max}$ maximale hygroskopische Feuchte Weitere Zeichenerklärung s. Bild 3

Tafel 2. Systematik der Trockner für rieselfähiges Gut.

Gutsbewegung und Mischung	Wärmezufuhr an das Trocknungsgut															
	Konvektion, unmittelbar				**Konvektion,** mittelbar				**Kontakt**		**Strahlung**		**elektr. Erwärmung**	
	dis-kontinuierlich	kontinuierlich: Gleichstrom	kontinuierlich: Gegenstrom	kontinuierlich: Kreuzstrom	dis-kontinuierlich	kontinuierlich: Gleichstrom	kontinuierlich: Gegenstrom	kontinuierlich: Kreuzstrom	dis-kontinuierlich	kontinuierlich	dis-kontinuierlich	kontinuierlich	dis-kontinuierlich	kontinuierlich
Ruheschicht	**überströmte Schüttung**								**Normaldruck**					
	Kammertrockner mit Siebhorden	Einbandtrockner			Kammertrockner mit Massivhorden	Kanaltrockner mit Hordenwagen			Heizplatten-Kammertrockner		Kammertrockner	Bandtrockner		Bandtrockner
	durchströmte Schüttung						Spiralbandtrockner		**Vakuum**					
	Darre Silotrockner		Gegenstromschachttrockner	Schachttrockner Lochtrommeltrockner					Heizplatten-Kammertrockner	Gefriertrocknungskanal mit Hordenwagen	Kammertrockner	Gefriertrocknungskanal mit Hordenwagen		
Umlegeschicht		Mehrbandtrockner		Schubwendetrockner Roto-Louvre-Trockner Dächertrockner		Trommeltrockner	Mehrfachtrommeltrockner	Tellertrockner	**Normaldruck**	Vibrationstrockner Schneckentrockner				
									Vakuum					
									Vakuum-Taumeltrockner	Bauarten ähnlich Normaldruck Vakuum-Rieseltrockner				
Wirbelschicht	Wirbelstoßtrockner	Schwebetrockner		Wirbelschicht-Getreidetrockner										
Aerosol		Umlaufstromtrockner Mehrstufenstromtrockner Düsenrohrtrockner												
		(Schleudertrockner) (Zerstäubungstrockner)												

Darren **(Bild 6),** landwirtschaftlichen Bodenbelüftungsanlagen und Silotrocknern **(Bild 7).** Sie haben zur Folge, daß eine gleichmäßige Austrocknung der in Strömungsrichtung hintereinanderliegenden Gutsschichten nur durch eine genügend lange Verweilzeit des Gutes im Trockner erreicht werden kann. Die dem Lufteintritt zunächst gelegenen Teilchen sind dabei während der ganzen Trocknungszeit einer relativ hohen Temperatur ausgesetzt und können bei empfindlichem Gut geschädigt werden. Meist nimmt man aus wirtschaftlichen Erwägungen eine ungleichmäßige Trocknung bei mittellanger Trocknungszeit in Kauf und versucht, durch Mischen des Gutes beim Umlagern einen möglichst raschen natürlichen Ausgleich der Restfeuchte herbeizuführen.

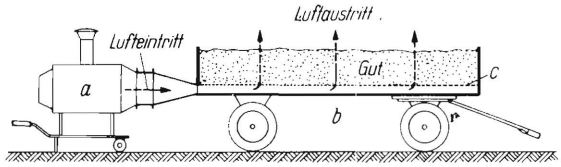


Bild 6. Darre.
a Lufterhitzer, b Wagen-Darrfläche, c Siebboden

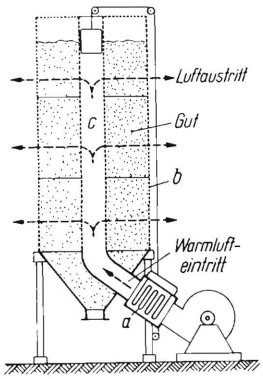


Bild 7. Silotrockner.
a Lufterhitzer, b durchlässiger Silomantel, c Belüftungsschacht

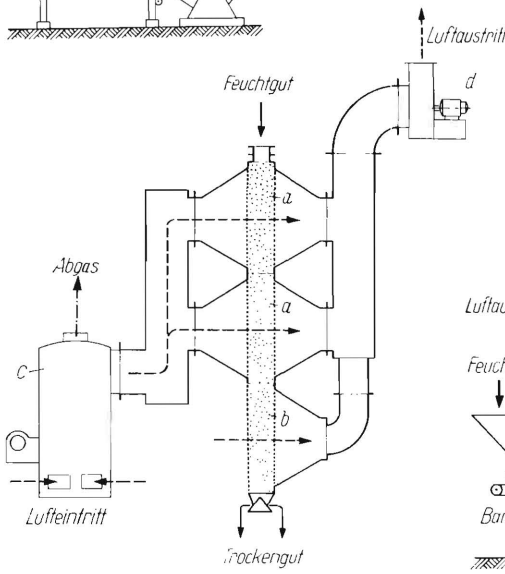


Bild 8. Schachttrockner für Getreide. einseitig belüftet (Bauart Rietberg).
a Trocknungszonen, b Kühlzone, c Lufterhitzer, d Ventilator

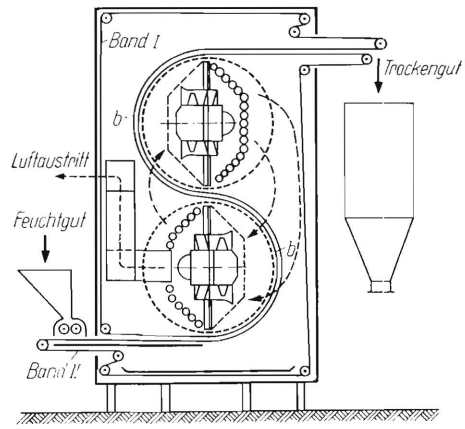


Bild 9. Lochtrommeltrockner für Chemikalien (Bauart Kiefer).
a Ventilatoren mit nachgeschalteten Erhitzerrohren, b Trocknungszonen

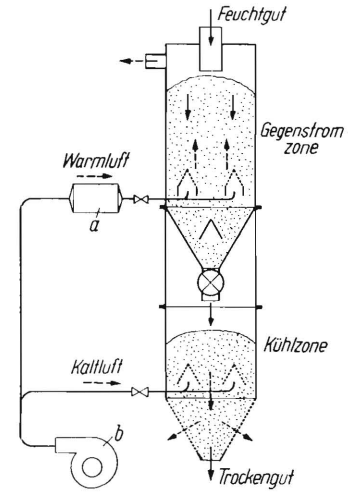


Bild 10. Gegenstrom-Schachttrockner für Getreide.
a Lufterhitzer, b Ventilator

In kontinuierlichen Trocknern treten die gleichen Vorgänge beim Kreuzstrom auf. Die Schachttrockner mit ungestörtem, senkrechtem Gutsdurchfluß **(Bild 8)** dürfen dabei als Ruheschichttrockner angesehen werden. Durch Führen des Gutes in einer relativ dünnen Schicht verringert man das Feuchtigkeitsgefälle im austretenden Gut. Außerdem wird die Verweilzeit des Gutes im heißen Luftstrom an der Zuströmseite kürzer. Dieses wird bei manchen Konstruktionen noch durch Wechseln der Anströmrichtung in zwei hintereinanderliegenden Trocknerzonen unterstützt. Nach diesem Prinzip arbeitet der in **Bild 9** dargestellte Lochtrommeltrockner, bei dem eine Ruheschicht des Trocknungsgutes (Kristalle, Perlen, Granulate) zwischen zwei Siebbändern geführt wird, die über große, gelochte Trommeln umlaufen. Ventilatoren und Heizregister liegen innerhalb dieser Trommeln.

Die Verweilzeit des Gutes wird bei Schachttrocknern durch Antriebsverstellung des Rüttelschuhauslaufes, beim Lochtrommeltrockner durch Drehzahländerung der gewünschten Endfeuchte angepaßt.

Beim Gleich- und Gegenstrom können ungleiche Austrocknung und lange Verweilzeiten einzelner Schichten am Lufteintritt nicht auftreten, da alle Teilchen nacheinander die gleichen Bereiche von Luftfeuchte und Temperatur durchlaufen. Welche der beiden Anströmarten gewählt wird, hängt von den speziellen Gutseigenschaften ab. Für Getreide ist nach Untersuchungen von *Hege* [11] der Gegenstrom als besonders günstig anzusehen: Er bewirkt am Gutseintritt durch hohe Luftfeuchte und niedrige Temperatur eine langsame Aufwärmung ohne Austrocknen und Verhärten der Kornschale. Erst das vorgetrocknete und weniger empfindliche Korn wird der heißen, trockenen Frischluft ausgesetzt. **Bild 10** zeigt als Beispiel eines Gegenstrom-Ruheschichttrockners eine Versuchsanlage des Landmaschineninstitutes der TH München.

Umlegeschicht. Gleichmäßiger und oft schneller als in der Ruheschicht kann man durch ständiges Wenden und Mischen des Gutes trocknen, wie dies in den mechanisch durchmischten Umlegeschichten geschieht. Setzt man voraus, daß sich infolge intensiver Durchmischung im Gut keine Temperatur- und Feuchtigkeitsunterschiede bilden können, so ergeben sich in den verschiedenen Entfernungen vom Lufteintritt Trocknungsverläufe entsprechend **Bild 11.** Die Verläufe der Trocknungsgeschwindigkeiten g_{De} und g_{Da} aller hintereinanderliegenden Schichten sowie der Gesamtschüttung g_{Dm} gleichen denen des Einzelkörpers.

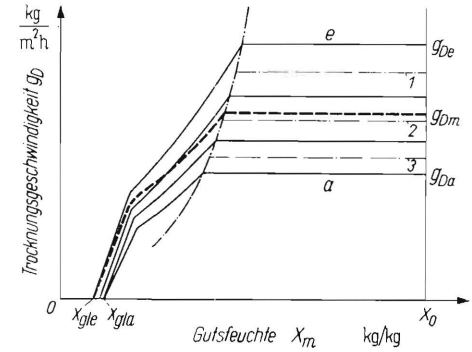


Bild 11. Trocknungsverlauf dauernd durchgemischter, durchströmter Güter (nach *Krischer* [7]).
Zeichenerklärung s. Bild 3
Index e Lufteintrittsseite
Index a Luftaustrittsseite

Die Konvektionstrockner mit Umlegeschichten arbeiten, da sie eine Gutsbewegung vorsehen, meist kontinuierlich. Kreuzstrom durch eine dünne, durchmischte Gutsschicht ist vorherrschend. Der Schubwendetrockner nach *von Sybel* **(Bild 12)** wendet das Gut durch eine über einer Darrfläche hin- und herlaufende Wendetrommel und fördert es dabei schrittweise in Richtung auf das Trocknerende (Hinlauf — Wenden; Rücklauf — Fördern). Durch Verstellen der Laufgeschwindigkeit des Wenders kann man Trocknungszeiten von einigen Minuten bis zu mehreren Stunden

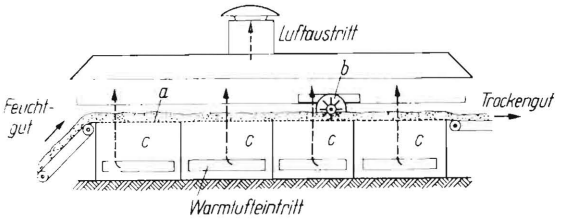


Bild 12. Schubwendetrockner nach *von Sybel*.
a Darrfläche, b Wendetrommel, c Querbelüftungszonen

wählen. Mischen von Frischluft und Abluft, getrennt für die einzelnen Querbelüftungszonen, ermöglicht das Einstellen verschiedener Luftzustände und somit eine besonders gute Anpassung an das Trocknungsgut. Dadurch ist der Apparat für sehr viele landwirtschaftliche Produkte verwendbar. Man trocknet Grünfutterarten, Knollenfrüchte und Getreide; der Wärmeverbrauch beträgt bei Grünfutter etwa 850 kcal/kg Wasser.

Bei anderen Kreuzstromtrocknern wird das Gut durch Bewegungen der Darrfläche gefördert und gemischt. Sie arbeiten als Schwingförderrinnen mit Siebboden oder als einfache Bandförderer mit Siebbändern.

Eine ganz andere Bauart stellt der Roto-Louvre-Trockner dar, ein Trommeltrockner, bei dem der Kreuzstrom durch einen besonderen Trommeleinbau bewirkt wird **(Bild 13).** Beim Drehen der Trommel wird das Gut durch ständiges Abrieseln gemischt und auf der kegelförmigen Oberfläche des Einbaus in axialer Richtung gefördert. Der Apparat wird zur Trocknung von Gießereisand und Ammoniumsulfat eingesetzt und für Leistungen zwischen 1 und 17 t/h gebaut.

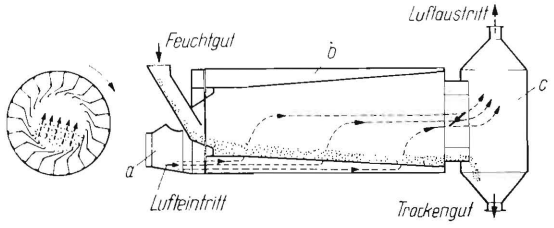


Bild 13. Roto-Louvre-Trockner.
a Einlaßgehäuse, b Trommel, c Auslaßgehäuse

Gleichstrom und Gegenstrom bei Umlegeschichten lassen sich z. B. durch Bandtrockner mit mehreren übereinanderliegenden Siebbändern verwirklichen. Beim Mehrbandtrockner nach **Bild 14** sind Lufterhitzer zwischen jedem der 4 Bänder angebracht. Gegenstrom liegt hier strenggenommen nur vor, wenn ausschließlich das unterste Heizregister beaufschlagt wird. Bei erneutem Aufheizen in jeder Stufe nähert man sich der Kreuzstromcharakteristik.

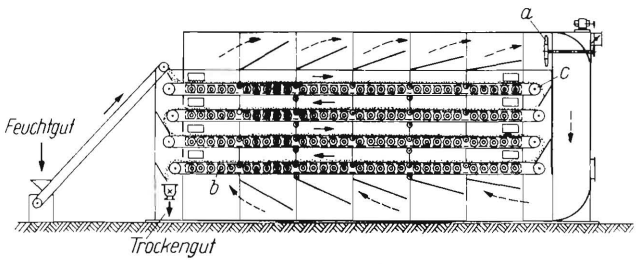


Bild 14. Mehrbandtrockner (Bauart Krauss-Maffei-Imperial).
a Ventilator, b Heizregister, c Tragbänder

Der in der Getreideverarbeitung recht verbreitete Dächertrockner weist in Richtung des Gutsflusses abwechselnd Gleich- und Gegenstrom auf, ist aber insgesamt gesehen als Kreuzstromtrockner aufzufassen, da das Gut auf seinem gesamten Weg annähernd gleichen Luftbedingungen ausgesetzt ist. Bei dem in **Bild 15** gezeigten Trockner wirken die übereinanderliegenden Dächerreihen abwechselnd als Luftzufuhr- und -abfuhrkanäle. Gleichzeitig teilen und mischen sie das durchfließende Gut.

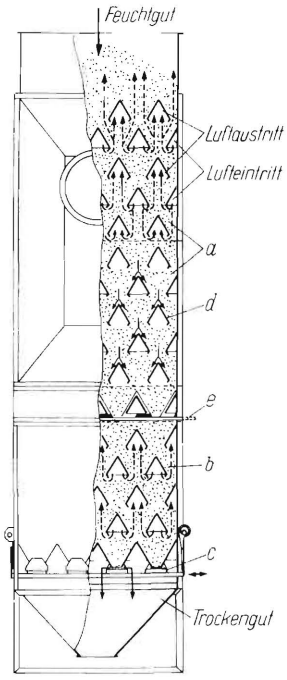


Bild 15. Dächertrockner (Bauart Goldsaat).
a Trocknungszone,
b Kühlzone,
c Rüttelschuhauslauf,
d Dacheinbauten,
e Trennschieber vor Kühlzone

Durch Hintereinanderschalten der übereinanderliegenden Trocknerabschnitte ließe sich auch für den gesamten Trockner eine Gegen- oder Gleichstromcharakteristik erzeugen, jedoch wird dieses Verfahren in der Praxis nicht angewandt. Getrocknet werden mit diesen Geräten körnige Produkte, die nicht zur Brückenbildung neigen.

Wirbelschicht. Als nächstes Mittel der Konvektionstrocknung wenden wir uns der Wirbelschicht zu. Hier befinden sich die Teilchen in einem instabilen Schwebezustand und werden, besonders durch aufsteigende Luftblasen, gewendet und intensiv durchgemischt. Günstig verhalten sich abriebfeste, kleine Teile möglichst einheitlicher Korngröße, die nicht zum Verhaken neigen, da sonst leicht Luft in bevorzugten Kanälen durch die Schicht bricht. Zweckmäßige Schichthöhen liegen bei 300 bis 500 mm, die optimale Korngröße bei $d \leq 50\,\mu$. Vergleichende Untersuchungen ergaben, daß die Wärme- und Stoffübergangszahlen zwischen Warmluft und Gut bei gleichem Luftdurchsatz in der Wirbelschicht kleiner sind als in der Ruheschicht [12]. Man führt dies auf eine geringere Anströmgeschwindigkeit $v = w/\varepsilon$ infolge des vergrößerten Zwischenraumanteiles ε im Wirbelzustand zurück. Im Gegensatz dazu steigt der Wärmeübergang zwischen Teilchen und Heizkörpern beim Übergang von der Ruheschicht zur Wirbelschicht stark an und erreicht ein Maximum bei 2 bis 3facher Lockerungsgeschwindigkeit **(Bild 16).** Die Wärmeübertragung beruht hier auf einem kurzzeitigen Kontakt zwischen Korn und Heizfläche, wobei nach *Ernst* [13] das Optimum der Kontaktzeit gerade durch die in der Wirbelschicht vorliegenden Mischbewegungen erreicht wird. Die praktisch angewandten Wirbelschichttrockner machen jedoch von diesen Möglichkeiten einer Kontaktheizung keinen Gebrauch.

Diskontinuierliche Wirbelschichtapparate für kleinere Produktmengen bestehen im Prinzip aus einem Behälter mit Siebboden, durch den man Warmluft strömen läßt. Bei einer Sonderbauart, dem Wirbelstoßtrockner nach *Belik* [14], wird das Gut jeweils

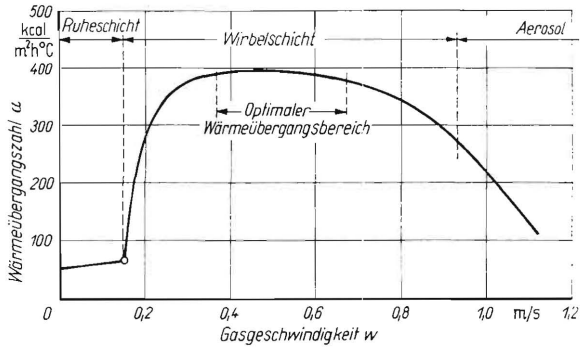


Bild 16. Wärmeübergang zwischen Wärmeaustauschern und Feststoffteilchen in Gas-Feststoffverteilungen (nach *Ernst* [13]).

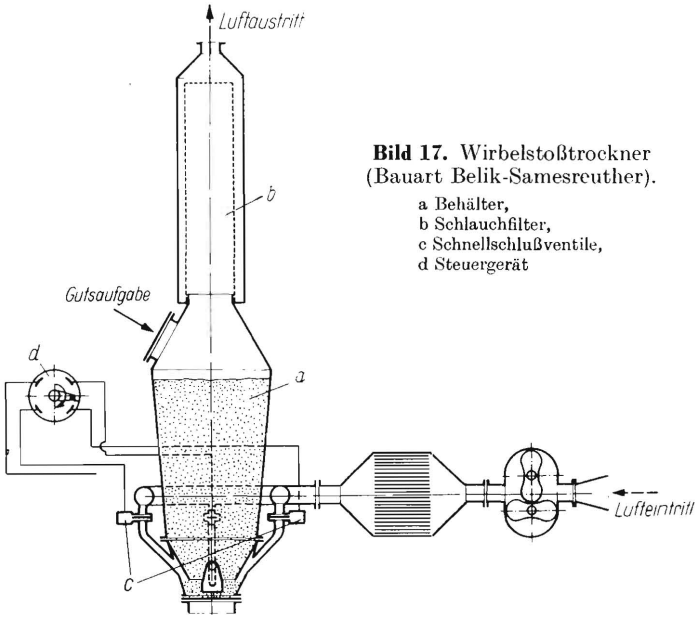


Bild 17. Wirbelstoßtrockner (Bauart Belik-Samesreuther).
a Behälter,
b Schlauchfilter,
c Schnellschlußventile,
d Steuergerät

nur kurzzeitig in den Wirbelzustand versetzt, indem man nacheinander von verschiedenen bodennahen Öffnungen her Warmluft einbläst **(Bild 17)**. So will man die Ausbildung bevorzugter Strömungskanäle verhindern und den Abrieb empfindlicher Substanzen herabsetzen. Der Wirbelstoß kann einer stetigen Luftdurchströmung überlagert werden.

Als Beispiel für kontinuierliche Betriebsweise mag der Wirbelschicht-Getreidetrockner gelten **(Bild 18)**. Er führt Luft und Gut im Kreuzstrom und nutzt das flüssigkeitsähnliche Verhalten der Schicht zum Transport aus. Den drei oberen Ventilatoren ist je ein Warmwasserlufterhitzer zugeordnet, der untere Ventilator fördert Frischluft zur Kühlung des Gutes. Interessant ist der baukastenartige Aufbau des Fließweges aus gleichartigen

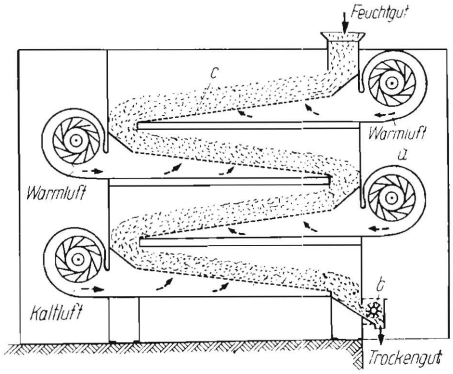


Bild 18. Wirbelschicht-Getreidetrockner (Bauart Svenska Fläktfabriken).
a Radialgebläse, b Zellenradschleuse, c Siebbodenauflage

Stufen, die — zwischen 4 und 16 Stück übereinandergesetzt — Trockner für verschiedene stündliche Durchsatzmengen ergeben. Die Trocknungstemperaturen betragen 65° C. der Feuchtgutdurchsatz 2 bis 13 t/h bei einem Wärmeverbrauch von 900 bis 1000 kcal/kg Wasser.

Gleichstromtrocknung liegt in gewisser Weise beim Schwebetrockner vor, der im Übergangsbereich zwischen Wirbelschicht und Aerosol arbeitet **(Bild 19)**. Das oben einfallende Gut bildet auf dem Siebboden eine Wirbelschicht. Ein Rührwerk sorgt für gleichmäßige Aufströmung. Die leichten und trockenen Gutsteile schweben nach oben und werden über einen Abscheidezyklon

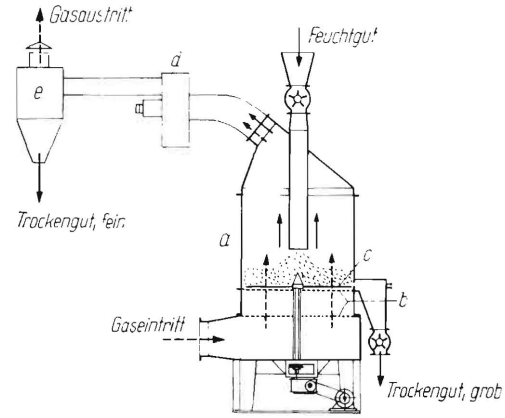


Bild 19. Schwebetrockner (Bauart Keller).
a Schwebekammer, b Siebböden, c Rührwerk, d Ventilator, e Zyklon

pneumatisch ausgetragen, während grobe Gutsteile seitlich unten abgezogen werden. Der Apparat wird in der Holzindustrie eingesetzt und ist auch für verschiedene chemische und landwirtschaftliche Güter erprobt.

Aerosol. Erhöhung der Luftgeschwindigkeit führt aus der Wirbelschicht zum nächsten Gutszustand, dem Aerosol. Dieses liegt bei der Stromtrocknung vor. Gut und Luft bewegen sich dabei im Gleichstrom. Prinzipiell gelten die Gesetzmäßigkeiten des Wärme- und Stoffaustausches an angeströmten Einzelkörpern, wie sie in einer zusammenfassenden Darstellung von *Krischer* [15] wiedergegeben werden. Vor allem in der Nähe der Gutsaufgabe sind die Übergangsbedingungen so günstig, daß die Oberflächentrocknung meist wenige Sekunden beansprucht. **Bild 20** zeigt die experimentell ermittelte Stoffübergangszahl, abhängig von der Trocknerlänge nach *Rühle* [16]. Der starke Abfall der Stoffübergangszahl zu Anfang ist durch die Verringerung der Relativgeschwindigkeit zwischen Gut und Gas von der Luftgeschwindigkeit w auf die Schwebegeschwindigkeit v_f während der Beschleunigung der Teilchen bedingt.

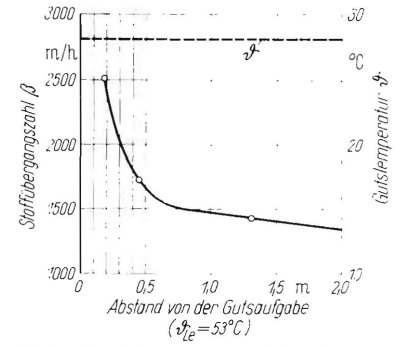


Bild 20. Örtliche Stoffübergangszahl im Stromtrockner (nach *Rühle* [16]).

Hinzu kommt die Abnahme der Schwebegeschwindigkeit entsprechend der Dichte und Korngröße der Teilchen während des Trocknens. Ein von *Kröll* durchgerechnetes Beispiel **(Bild 21)** zeigt, daß die Trocknungszeit und somit auch die Trocknerlänge stark von der Teilchengröße abhängen. Ausreichende Verweilzeiten bei vernünftiger Bauhöhe des Trockners erreicht man durch

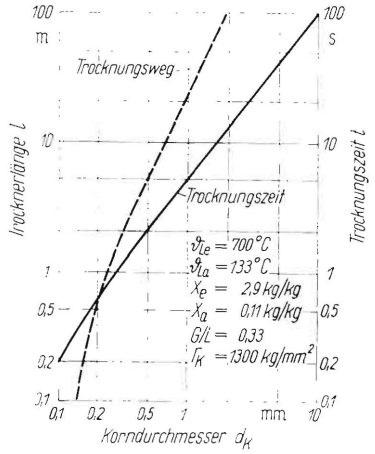
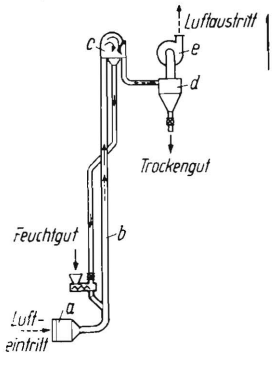


Bild 21. Trocknungsweg und -zeit in Abhängigkeit vom Korndurchmesser (nach *Kröll* [3]).

mehrmaligen Gutsumlauf, Mehrstufentrocknung, trichterförmige Erweiterung des Stromrohres nach oben [17] oder spiralenförmige Führung der Teilchen. Beim Umlaufstromtrockner **(Bild 22)** wird das leichte, trockene und das schwere, noch nicht genügend getrocknete Gut im Sichter durch eine Umlenkklappe getrennt und das letztere zur Gutsaufgabe zurückgeführt, wo es den Kreislauf von neuem beginnt. Der Zweistufentrockner **(Bild 23)** besteht aus hintereinandergeschalteten Durchlaufstromtrocknern. Er wird vom gesamten Gut nur einmal durchlaufen. Die Verweilzeit kann also hier nicht variiert werden, weshalb der Trockner meist für ein spezielles Gut ausgelegt wird, z. B. für Feinkohle oder feinkristalline Chemikalien.



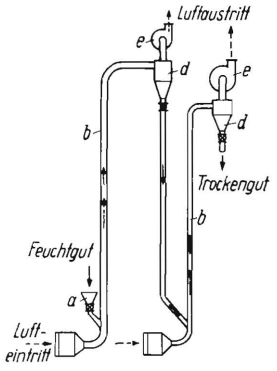


Bild 22. Umlauf-Stromtrockner. **Bild 23.** Mehrstufentrockner.
a Lufterhitzer, b Stromrohr, c Umlenkhaube, d Zyklon, e Ventilator

Beim Düsenrohrtrockner **(Bild 24)** dagegen ist die Länge des spiralenförmigen Trocknungsweges einstellbar, und zwar durch Verändern der Axialkomponente des Luftstromes mittels Umlenkklappen in der langgestreckten, tangentialen Zuströmdüse. Die Verweilzeit kann dabei zwischen 15 und 120 s variiert werden.

Stromtrockner verarbeiten Produkte wie Stärke, Kohlenstaub, Holzmehl, körnige oder gehäckselte Landwirtschaftsgüter. Für

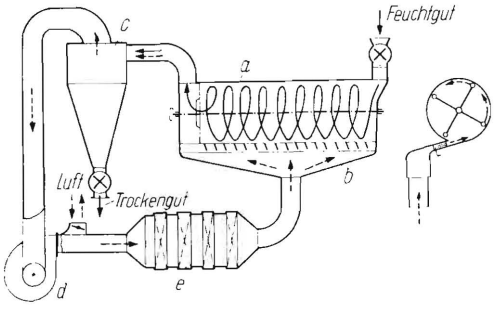


Bild 24. Düsenrohrtrockner (Bauart Büttner).
a Düsenrohr, b Zuströmdüse, c Zyklon, d Ventilator, e Lufterhitzer

letztere kommen auch Kombinationen von Durchlaufstromtrocknern mit Trommeltrocknern zur Anwendung (siehe *Bussen* [17]).

Hinsichtlich der Stoffübergangsbedingungen, d. h. einzeln angeströmter Teilchen, gehören zu den Aerosoltrocknern auch die Schleudertrockner, die meist gleichzeitig als Prallzerkleinerer und Trocknungsapparate dienen.

2. Trockner mit mittelbar wirkender Konvektionsheizung

Genaugenommen treten bei jeder Erwärmung mehrere Übertragungsarten gemeinsam auf. Wegen ihrer besonderen praktischen Bedeutung wollen wir jedoch an dieser Stelle in Anlehnung an *Kröll* (hier: „Gutserwärmung auf mehreren Wegen") vor allem die Verfahren einordnen, in denen die Wärme durch das gasförmige Trocknungsmittel in den Trockner hineinkommt und hier nicht nur das Gut, sondern in gleichem Maße die Gutsauflageflächen, die Wände und spezielle Einbauten beheizt, die ihrerseits durch Leitung und Strahlung das Gut erwärmen.

Ruheschicht. Wird eine Ruheschicht rieselfähigen Gutes auf übereinanderliegenden plattenförmigen Horden überströmt, so geht durch Konvektion aus dem Luftstrom, Wärmeleitung von unten durch die Auflageplatte und Strahlung von der darüberliegenden Plattform Wärme an die Gutsoberfläche über **(Bild 25)**:

$$q_{DI} = \frac{1}{r}\,(q_K + q_B + q_R)$$

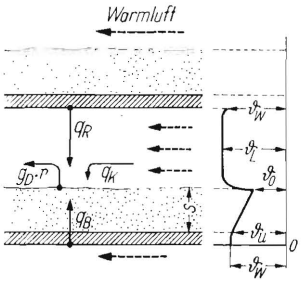


Bild 25. Wärmezuführung und Temperaturverlauf bei mittelbarer konvektiver Gutserwärmung.

q_K	Konvektionswärme	kcal/m² h
q_B	Kontaktwärme	kcal/m² h
q_R	Strahlungswärme	kcal/m² h

Eine Vergleichsrechnung mit angenommenen Werten **(Bild 26)** ergibt, daß die Trocknungsgeschwindigkeit g_{DI} gegenüber einer rein konvektiven Trocknung bei gleicher Temperatur bedeutend erhöht wird. Mit dünner werdender Gutsschicht nimmt der Anteil der Kontakterwärmung q_B und gleichzeitig die Trocknungsgeschwindigkeit zu, da der Wärmewiderstand s/λ (siehe unter Kontakttrockner) des meist schlecht leitenden Gutes geringer wird. Der Anteil der Strahlungswärme beträgt hier nur bis zu

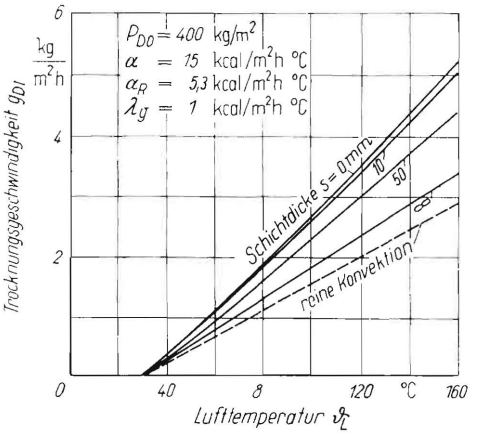


Bild 26. Trocknungsgeschwindigkeit als Funktion von Lufttemperatur und Schichtdicke bei mittelbarer konvektiver Gutserwärmung.

10%. Die Aufteilung der Gesamtwärmemenge auf die einzelnen Übertragungsarten ist natürlich stark von der Gestaltung des Trockners abhängig, besonders vom Verhältnis der durch Strahlung oder Kontakt wirksamen Trocknerfläche zur Gutsoberfläche. Wesentliche Merkmale des Verfahrens sind, daß 1. die maximale Gutstemperatur durch das Trocknungsmittel begrenzt ist und 2. bei Beachten der für das Gut verträglichen Temperaturen sich bei gleicher Gastemperatur höhere Trocknungsgeschwindigkeiten erzielen lassen als bei Konvektionstrocknung.

Diskontinuierliche Ruheschichttrockner dieser Art sind alle luftbeheizten Kammern, in denen das Gut, in Schalen ruhend, überströmt wird. Einen kontinuierlichen Ruheschichttrockner stellt der Spiralbandtrockner **(Bild 27)** dar. Die Horden sind zu einem endlosen Band aufgereiht und werden im Trockner in einer Schraubenlinie von oben nach unten geführt, wodurch man eine große Trocknungsfläche bei kleinem Grundflächenbedarf erzielt. In der waagerechten Strecke außerhalb wird ent- und beladen. Innerhalb der Spiralführung laufende Gebläseräder drücken die Luft durch die außenliegenden Heizbatterien. Bei Lufteintritt in Bodennähe liegt Gegenstromprinzip (Kreuz-Gegenstrom) vor. Man trocknet abriebempfindliche Güter, wie Kräuter, Pilze, Gemüse auf Gutsauflageflächen bis zu 1000 m².

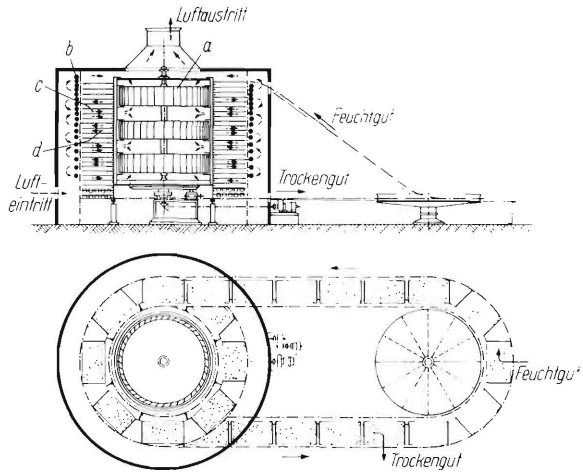


Bild 27. Spiralband-Trockner (Bauart Büttner).
a Radialventilatoren, b Heizrohre, c Vorströmzone, d Rückströmzone

Umlegeschichten. Ist das Gut gegen Abrieb unempfindlich, werden Trockner mit Umlegeschichten angewendet, mit denen man vor allem im zweiten Trocknungsabschnitt höhere Geschwindigkeiten erzielen kann. Dies zeigt z. B. ein Versuch von *Kröll* mit einer Sandschicht **(Bild 28).** Durch ständiges Wenden wird das Temperaturgefälle, das sich zwischen Auflageplatte und Gutsoberfläche bildet, immer wieder beseitigt, und entsprechend der Ausgleichstemperatur liegt am Trocknungsspiegel ein höherer Wert vor als bei nicht durchmischter Schicht.

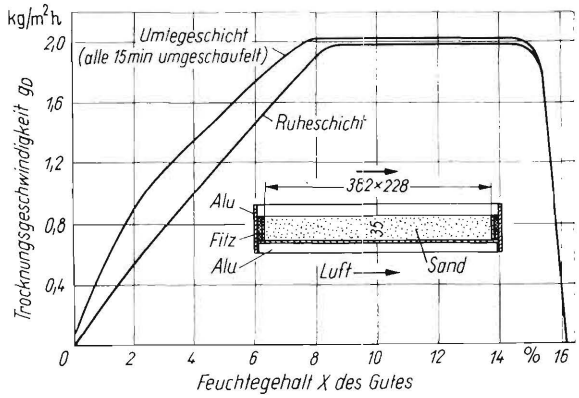


Bild 28. Verhalten einer Ruheschicht und einer Umlegeschicht bei Gutserwärmung auf mehreren Wegen (nach *Kröll* [4]).

Als Beispiel sei der Tellertrockner in **Bild 29** gezeigt, der im Kreuzstrom arbeitet. Das Gut wird oben aufgegeben und von rotierenden Tragarmen mit schräg angestellten Hubschaufeln auf den Tellern radial verschoben, wobei es durch abwechselnd am Tellerrand und in der Mitte liegende Öffnungen nach unten fällt. Die Verweilzeit ist durch die Drehzahl der Schaufelwelle veränderbar. Trocknungsprodukte sind Glutamate, Chemikalien und Metallpulver.

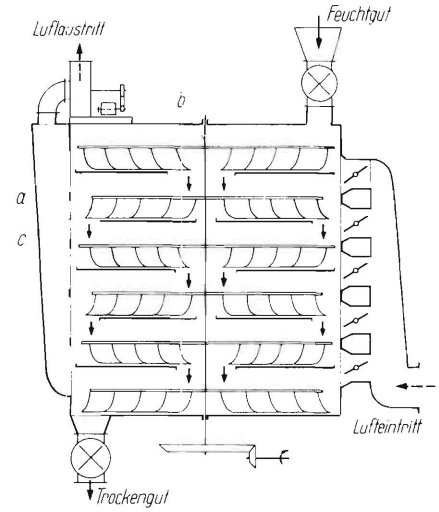


Bild 29. Tellertrockner (Bauart Krauss-Maffei-Imperial).
a Auflageteller, b Schaufelwelle, c Transportschaufeln

Besonders verbreitet bei der Verarbeitung von Massengütern sind die Trommeltrockner **(Bild 30).** Im Prinzip bestehen sie aus einem rotierenden Rohr mit meist geneigter Längsachse. Gleich-, Gegen- und Kreuzstrom (Roto-Louvre-Trockner) sind möglich. Besondere Einbauten sorgen für gleichmäßige Verteilung des Materials über dem Trommelquerschnitt und lassen das Gut örtlich quer zum Luftstrom abrieseln (s. Bild 30, unten).

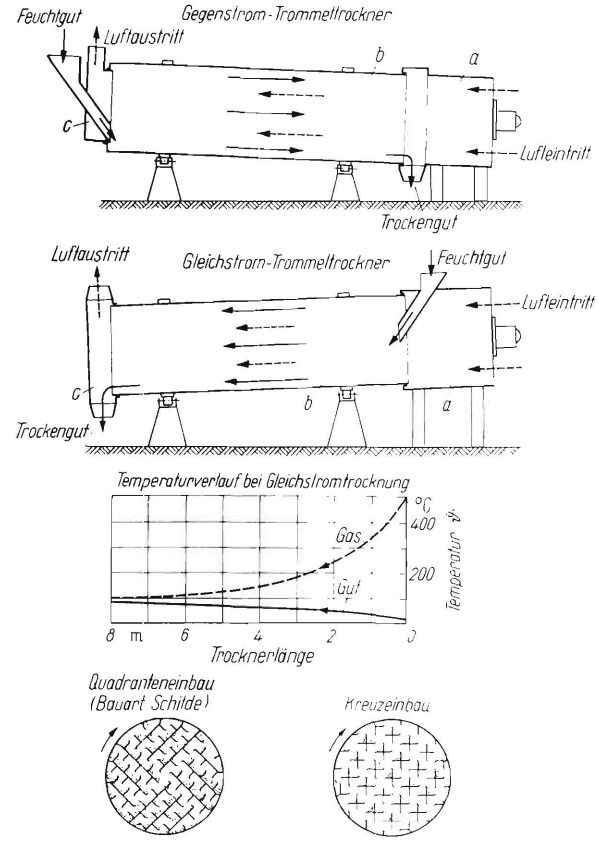


Bild 30. Trommeltrockner.
a Lufterhitzer, b Trommel, c Luftauslaßgehäuse

In waagerecht liegenden Trommeln sorgen Einbauten auch für den Transport in Längsrichtung. Vielfach werden die Trommeltrockner mit hohen Eingangstemperaturen betrieben. Die gemessene Temperaturverteilung in einem Gleichstromtrockner (Bild 30) zeigt, daß ein Gut dabei nicht notwendigerweise überhitzt wird. Trommeltrockner laufen mit Drehzahlen zwischen 1 und 15 U/min, haben Durchmesser von 0,3 bis 4 m und sind 2,5 bis 60 m lang.

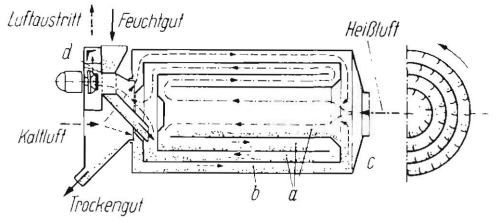


Bild 31. Gegenstrom-Trommeltrockner für Getreide (Kalker Trieurfabrik).
a Trockentrommeln, b Kühltrommel, c Mischraum, d Ventilator

Eine Sonderbauart der Trommeltrockner stellt der in **Bild 31** gezeigte Getreidetrockner dar. Vier Trommeln sind ineinandergeschachtelt: Die drei inneren werden im Gegenstrom mit Rauchgas-Luftgemisch durchspült, die äußere wirkt durch Frischluftansaugung als Kühlzone. Schaufeleinbauten bewirken den Gutstransport. Der Apparat trocknet bis zu 3 t/h Getreide, das dabei auch von Staub und Spelzen gereinigt wird.

3. Kontakttrockner

Die Kontakttrocknung sei durch vorwiegende Wärmezuführung über das Gut berührende heiße Oberflächen gekennzeichnet. Kontakttrockner können mit einem durchströmenden Trocknungsmittel als Verdunstungstrockner oder ohne ein solches als Verdampfungstrockner arbeiten. Bei Normaldruck muß bei letzteren die Gutstemperatur über 100°C liegen. Ruht eine Rieselgutschicht auf einer Heizplatte, so gelangt die Wärme durch Leitung im Gut zur Wasserdampf abgebenden Oberfläche, wo sich die Trocknungsgeschwindigkeit

$$g_{\mathrm{DI}} = \frac{1}{r}\,(q_{\mathrm{B}} - q_{\mathrm{verl}}) = \frac{1}{r}\,\frac{\lambda}{s}\,(\vartheta_{\mathrm{W}} - \vartheta_{\mathrm{O}}) - q_{\mathrm{verl}}$$

ergibt, worin q_{verl} die Verlustwärme in kcal/m² h, λ die Wärmeleitzahl in kcal/m h grad, s die Schichtdicke in m und ϑ_{W} die Wandtemperatur in °C sind. Wärme- und Stoffbewegung sind gleichgerichtet. Da die Wärmeleitfähigkeit des Gutes mit der Feuchte abnimmt, können die zuerst austrocknenden Gutsschichten nahe der Heizfläche leicht überhitzt werden.

Ruheschichten. Kontakttrocknung in Ruheschichten wendet man in manchen Kammertrocknern und häufig bei Vakuumapparaten an. Dabei wird die Schicht möglichst dünn gehalten, um kleine Wärmeleitungswiderstände (s/λ) zu erzielen.

Umlegeschichten. In den ständig durchmischten Umlegeschichten kann man höhere Trocknungsgeschwindigkeiten erreichen und örtliche Überhitzungen vermeiden. Die Wärme wird hier während eines kurzfristigen Kontaktes von der Heizfläche direkt auf das einzelne Teilchen übertragen. Dabei verbessern sich die Übertragungsbedingungen mit kürzer werdender Kontaktzeit, was in der äquivalenten Wärmeübergangszahl

$$\alpha' = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\,\frac{\sqrt{\lambda\, c\, \varrho_{\mathrm{S}}}}{\sqrt{t}}$$

zum Ausduck kommt, wobei c die spezifische Wärme in kcal/kg °C ϱ_{S} die Dichte des Feststoffes in kg/m³ und t die Zeit in h sind. Experimentell wird dies auch durch die Wirbelschichtuntersuchungen von *Ernst* (Bild 16) verdeutlicht, bei denen ebenfalls kurze Kontaktzeiten zwischen Korn und Heizfläche vorliegen.

In der Bauweise ähneln viele Kontakttrockner den Apparaten der genannten Gruppe, nur daß die das Gut berührenden Flächen jetzt durch Dampf oder Warmwasser von innen beheizt werden. So gibt es Tellertrockner mit beheizten Auflagetellern und als Trommeltrockner den Dampfröhrentrockner, bei dem der Trommelquerschnitt mit dampfbeheizten, Hubschaufeln tragenden Röhren bestückt ist, über welche das Gut abrieselt. Im Schneckentrockner nach **Bild 32** wird das Gut mittels einer Förderschnecke oder Schaufelwelle durch eine Mulde bewegt, die von außen durch Heizschlangen erwärmt wird.

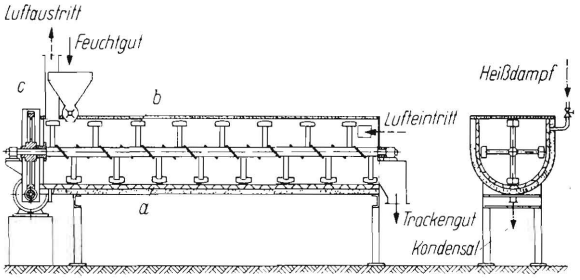


Bild 32. Schneckentrockner (nach [3]).
a mantelbeheizter Trog, b unterbrochene Schnecke, c Schneckenantrieb

Den Mechanismus der Schwingförderung nutzt der Vibrations-Kontakttrockner aus **(Bild 33).** Das Gut fließt durch zwei übereinanderliegende, beheizte Schwingrinnen. Die Erregerfrequenz und somit Fördergeschwindigkeit und Verweilzeit können verändert werden. Der über der oberen Rinne liegende Heizkörper d ermöglicht eine zusätzliche Strahlungsbeheizung.

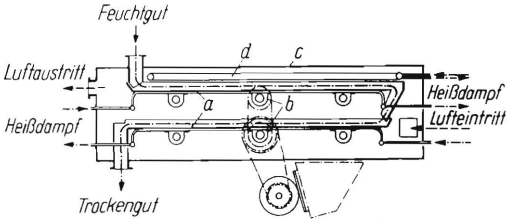


Bild 33. Vibrations-Kontakttrockner (Bauart Lurgi, nach [3]).
a beheizte Schwingrinnen, b Schwingungserreger, c Gehäuse, d Strahlungsheizkörper

Beide hier abgebildeten Geräte werden zwecks Dampfabführung von Luft durchströmt, jedoch sind dabei Gleichstrom- oder Gegenstromprinzip von untergeordneter Bedeutung, da die Wärme auf einem anderen Wege zugeführt wird. Als Heizmittel dienen meist Warmwasser oder Niederdruckdampf bis 3 ata bei Heizflächentemperaturen von 70—130°C. Kontakttrockner eignen sich nur für solche rieselfähigen Güter, die nicht zum Anbacken an den Heizflächen neigen, z. B. für Ruß, Sägemehl, chemische Düngemittel. Der Kornabrieb ist beim Vibrationstrockner besonders gering.

4. Strahlungstrockner

Zusätzlich zur Kontakttrocknung oder auch als alleiniges Mittel der Wärmezuführung wird die Wärmestrahlung angewandt. Dabei senden Strahlungsheizkörper, z. B. elektrische Lampen oder heiße Metall- oder Keramikplatten, eine elektromagnetische Wellenstrahlung vorzugsweise im Infrarotbereich aus. Die Wellenlängen liegen zwischen 1,3 μ (Infrarotlampe 1930°C) und 6,8 μ (dampfbeheizte Rohrwand 150°C).

Im Prinzip wird die durch Strahlung zugeführte Wärme durch Absorption im Inneren des Trocknungsgutes frei, wobei die Strahlungsintensität I_λ exponentiell mit der Eindringtiefe s abnimmt:

$$I_\lambda = I_{\lambda 0}\, \mathrm{e}^{-a_\lambda s}$$

$I_{\lambda 0}$ ist hier die Strahlungsintensität an der Oberfläche und a_λ der Absorptionskoeffizient.

Manche Trocknungsgüter absorbieren auf diese Weise die eingestrahlte Energie schon in Eindringtiefen von $s = 0{,}01$—1 mm fast vollständig, so daß bei dickeren Schichten die Wärmezufuhr dann, wie bei der Konvektionstrocknung, von der Oberfläche her erfolgt. Das Absorptionsvermögen der Trocknungsgüter hängt stark von der Wellenlänge λ der Strahlung ab. Bei vielen Stoffen

treten ausgeprägte Absorptionsmaxima auf, die z. B. für Wasser **(Bild 34)** bei $\lambda = 3$ und $\lambda = 6\mu$ liegen. Auch die meisten technischen Strahler haben ein derart ausgeprägtes Emissionsspektrum **(Bild 35)**. Es ist daher nach [3] notwendig und in einem gewissen Umfange möglich, den Strahler durch die Auswahl des Materials oder der Betriebstemperatur an das Gut anzupassen, d. h., die größte Strahlungsintensität im Absorptionsminimum zu wählen, wenn die Strahlung möglichst tief in das Gut eindringen soll, sie in das Absorptionsmaximum zu legen, wenn man eine Oberfläche intensiv austrocknen will.

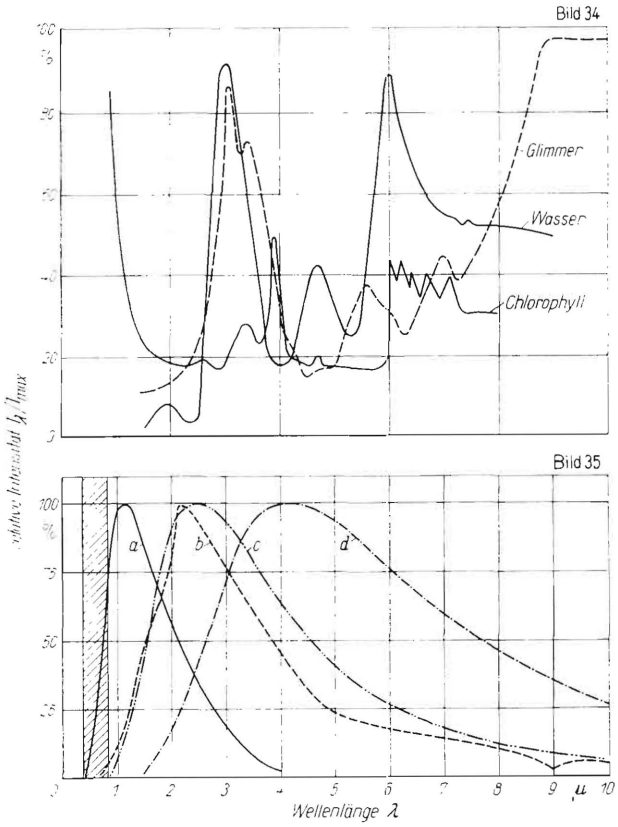


Bild 34. Absorptionsspektren verschiedener Stoffe.
a Wasser (s = 0,01 mm), b Chlorophyll, c Glimmer (nach [18])

Bild 35. Spektrale Energieverteilung einiger Strahler.
a Madza-Lampenstrahler 2180°C, b Heraeus-Quarzrohr-Strahler 1100°C, c Grauer Strahler 870°C, d Grauer Strahler 400°C (nach [3])

Weiterhin wird man bemüht sein, den stets auftretenden reflektierten Anteil der Strahlung durch Reflektoren wieder dem Gut zuzuführen, um zu einem möglichst vollständigen Strahlungsaustausch zu kommen. Für diesen errechnet sich die Trocknungsgeschwindigkeit

$$g_{DI} = \frac{1}{r} C_{12} \left[\left(\frac{T_S}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_O}{100} \right)^4 \right],$$

worin T_S die absolute Temperatur des Strahlers in °K, T_O die absolute Temperatur der Gutsoberfläche in °K und C_{12} die Strahlungsaustauschzahl in kcal/m² h grad⁴ sind.

In die Strahlungsaustauschzahl gehen die Emissionsverhältnisse und die Größen der im Strahlungsaustausch stehenden Flächen ein.

Der Vorteil der Strahlungstrocknung liegt in erster Linie darin, daß man bei hoher Strahlertemperatur größere Wärmemengen je Flächeneinheit zuführen kann als bei den bisher behandelten Übertragungsarten, da die Strahlertemperatur T_S in der 4. Potenz eingeht. Andererseits muß das Gut die möglicherweise hohen, meist in einer dünnen, oberflächennahen Schicht auftretenden Temperaturen vertragen. Meist werden dünne, zusammenhängende Schichten getrocknet, wie Lacke, laufende Papierbahnen, außerdem temperaturunempfindliche keramische Gegenstände.

Für rieselfähiges Gut liegen wenige Anwendungsfälle vor, die sich überwiegend auf das Abtrocknen oberflächlich anhaftender Flüssigkeit, z. B. bei Textilflocken und Feinkohle, beschränken (*Koch* [19]). Grund dafür ist wohl die Schwierigkeit, beim Austrocknen der Innenfeuchte bestimmte Temperaturen einzuhalten und auch bei unterschiedlichen Korngrößen gleichmäßig zu trocknen.

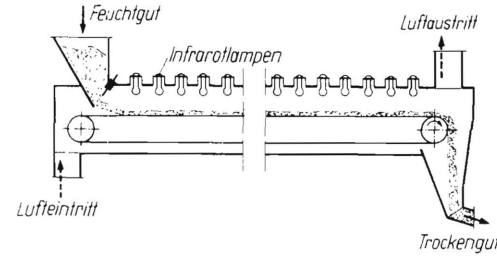


Bild 36. Strahlungsbeheizter Bandtrockner für Textilflocken (nach [20]).

Als Beispiel eines Schüttguttrockners sei in **Bild 36** ein strahlungsbeheizter Bandtrockner für Textilflocken gezeigt. Als Heizkörper dienen elektrische Lampenstrahler; der entstehende Wasserdampf wird durch einen Luftstrom abgeführt.

5. Trockner mit unmittelbarer elektrischer Erwärmung

Unter diesem Begriff verstehen wir eine elektrische Erwärmung, die nicht durch Kontakt oder Strahlung eines Elektroheizkörpers erzeugt wird. Das Trocknungsgut wird hier als Teil eines elektrischen Leiterkreises erwärmt. Es kann dabei wirken

a) als *Ohm*scher Widerstand, meist bei Gleich- oder Niederfrequenzstrom;

b) als Teil einer Induktionsspule, vorwiegend im Kilohertzbereich und

c) als Dielektrikum zwischen den Platten eines Kondensators, technisch interessant im Megahertzbereich 2 bis 100 MHz.

Die dielektrische oder Hochfrequenztrocknung ist vorherrschend. Die Wärme entsteht dabei im Gut durch die Dämpfung von Schwingungen, die das Wechselfeld an den Dipolen, beispielsweise des Wassers, hervorruft. Man stellt den verlustbehafteten Kondensator vereinfacht als Parallelschaltung von Kapazität und *Ohm*schem Widerstand dar **(Bild 37)** und erhält als vom Gut aufgenommene Wärmeleistung

$$q = U I_R = 2\pi f U^2 C \varepsilon \tan\delta$$

$$\text{mit } \tan\delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{1}{R\omega C}$$

worin U die Spannung in V, I_R den Wirkstrom in A, f die Wechselstromfrequenz in Hz, C die Kapazität der Plattenanordnung in A s/V, ε die relative Dielektrizitätskonstante und $\tan\delta$ den Verlustfaktor bedeuten.

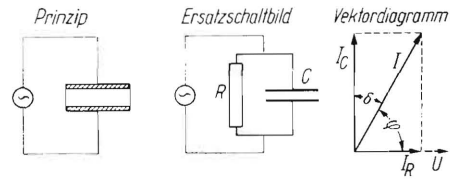


Bild 37. Dielektrische Trocknung.

Sie ist von seiten des Gutes durch die Dielektrizitätskonstante ε, den Verlustfaktor $\tan\delta$ und die Durchbruchsfeldstärke E (Spannung:Plattenabstand) begrenzt, bei der Funkendurchbrüche im Gut auftreten können. Die Zahlenwerte dieser Größen sind: $\varepsilon = 80$ bis 1, je nach Feuchte; $\tan\delta = 1$ bis 0,01; $E = 750$ bis 800 V/cm bei porösen, bis 2000 V/cm bei dichten Gütern.

Da die Wärme wegen der großen Dielektrizitätskonstante des Wassers bevorzugt an den feuchteren Stellen innerhalb des Gutes entsteht, kann man sehr hohe Trocknungsgeschwindig-

keiten erzielen. Nachteilig wirkt sich bei dichten Stoffen aus, daß innen entstehende Dampfblasen nach außen durchdringen müssen und dabei die Gutsstruktur zerstören können. In neueren Forschungsarbeiten [21] verhindert man diese Erscheinungen durch kurzzeitiges, periodisches Anlegen des Wechselfeldes mit zwischenliegenden Pausen für die Dampfabfuhr, durch die sogenannte pulsierende dielektrische Trocknung.

Anwendung findet die dielektrische Trocknung vorwiegend in der Holzindustrie zum Trocknen von Brettern und Spanholzplatten, bei denen hierdurch ein Verwerfen während des Trocknens vermieden wird.

Die Trocknung von Schüttschichten ist prinzipiell möglich. Versuchsweise wurde sie bereits bei Sandschichten (*Mann, Ceagelske, Olson* [22]), Hochofenkoks, Holzspänen und Kochsalz angewandt, wobei sich nach oben genannten Autoren höhere Trocknungsgeschwindigkeiten als bei Konvektionstrocknung erzielen ließen. Amerikanische Versuche mit Getreide führten dagegen nach *Bungartz* [23] nicht zu befriedigenden Ergebnissen, da wider Erwarten die Kornschale schneller austrocknete als das Innere, was nur durch zusätzliche Feuchtluft-Konditionierung zu verhindern war.

In den meisten Fällen dürfte neben hohen Anlagekosten die Tatsache, daß die Wärmeerzeugung durch Elektrizität nur in ganz besonderen Fällen wirtschaftlich tragbar erscheint, bisher einer weiteren Verbreitung der dielektrischen Trocknung im Wege stehen.

Bild 38 zeigt eine zur Trocknung von Schüttgut verwendbare Bauart eines dielektrischen Bandtrockners, der hier zur Entfeuchtung von Birkenholzrollen dient [24]. Das Förderband mit dem Gut läuft zwischen den Elektroden aus gelochten Aluminiumblechplatten. Die untere, durchgehende Elektrode ist geerdet.

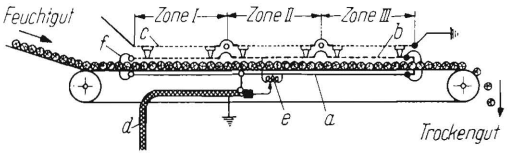


Bild 38. Dielektrischer Bandtrockner (nach [24]).
a Erdpotentialelektrode, b Hochpotentialelektrode, c geerdete Abschirmelektrode, d Zuleitungskabel, e Anlaßspule, f Abstimmspulen

die oben liegende Hochpotentialelektrode besteht aus drei Abschnitten, deren Abstand zum Gut verschieden eingestellt werden und somit dem Trocknungsverlauf angepaßt werden kann. Meist führt man den entstehenden Wasserdampf mittels eines den Trocknungsraum durchziehenden Luftstromes ab. Die dielektrische Trocknung läßt sich durch Regelung von Vorschubgeschwindigkeit und Elektrodenabstand verhältnismäßig leicht automatisieren [20].

6. Vakuumtrockner

Schneller als durch Diffusion des Wasserdampfes in ein anderes Gas hinein, wie sie in den durchlüfteten Trocknerbauarten vor sich geht, kann man durch Verdampfung der Feuchtigkeit trocknen. Diese findet unter atmosphärischem Druck bei 100° C statt, einer Temperatur, die für viele Trocknungsgüter zu hoch liegt. Durch Evakuieren des Trocknungsraumes auf den jeweiligen Sättigungsdruck kann man eine Verdampfungstrocknung auch bei niedrigeren Temperaturen durchführen. Dieses ist aus dem P-ϑ-Zustandsdiagramm des Wassers **(Bild 39)** am Kurvenast links vom Punkt At (100°C, 760 Torr) ersichtlich.

Normalvakuum. Vakuumtrockner erwärmen das Gut durch Kontakt, Strahlung oder auf unmittelbarem elektrischem Wege, wobei die beiden ersten Beheizungsarten oft gleichzeitig wirken. Um das Vakuum aufrechtzuerhalten, muß der anfallende Wasserdampf ständig abgepumpt werden. Wegen seines großen spezifischen Volumens würde dieses Pumpen mit großem Durchsatz erfordern; wirtschaftlicher ist es, den Dampf zwischen Trocknungskammer und Pumpe in einem Kühler zu kondensieren. Vakuumtrocknungsanlagen bestehen daher meist aus Trocknungsraum, Kondensator und Vakuumpumpenaggregat.

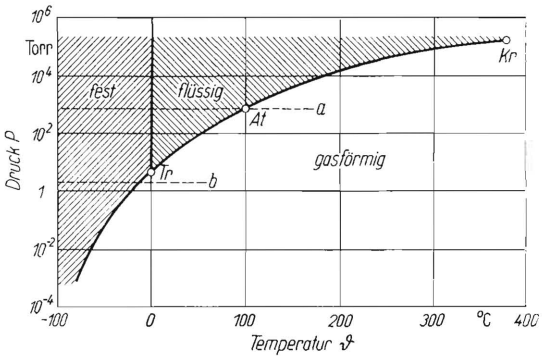


Bild 39. P-ϑ-Zustandsdiagramm für Wasser.
a Phasenänderung unter Atmosphärendruck, b Phasenänderung im Feinvakuumbereich

Das zeigt der durch einen Doppelmantel beheizte Vakuum-Trommeltrockner in **Bild 40.** Rieselfähiges Trocknungsgut in kleineren Chargen wird hier als Umlegeschicht durch kurzfristigen Kontakt der Teilchen an der Wand erwärmt. Die Beschickung erfolgt diskontinuierlich. Das Heizmittel wird durch den rechten Achszapfen zugeführt, der Wasserdampf durch den linken Zapfen abgesaugt, wobei Drücke bis unterhalb 1 Torr möglich sind.

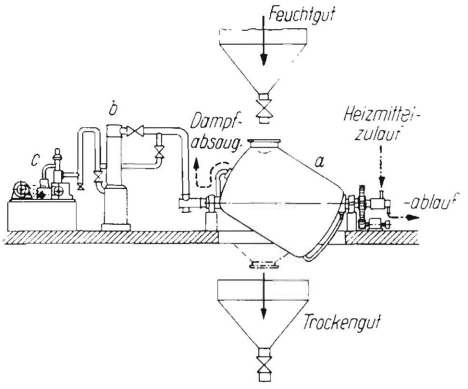


Bild 40. Vakuum-Taumeltrockner (Bauart Haas-Vakuum-Technik).
a Taumeltrockner, b Kondensator, c Vakuumpumpe

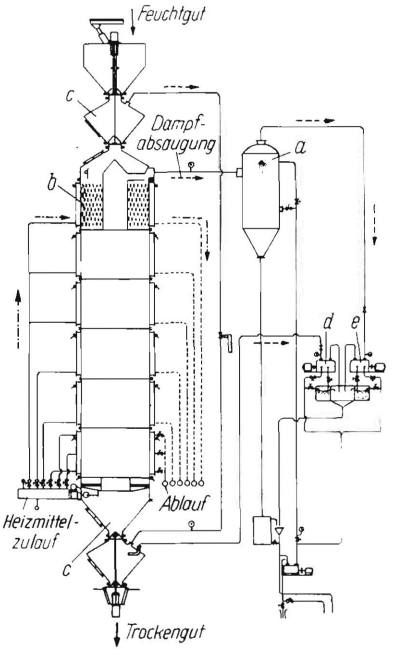


Bild 41. Vakuum-Rieseltrockner (Bauart MIAG).
a Einspritzkondensator, b Vakuumraum mit Heizschlangen, c Schleusen, d Vakuumpumpe für Schleusen, e Vakuumpumpe für Trocknungsraum (Kühlzone weggelassen)

Bei kontinuierlicher Betriebsweise erübrigt sich das zeitraubende Leerpumpen des Trocknungsraumes nach jeder Beschikkung. Statt dessen muß man das Gut über getrennt evakuierbare Schleusenkammern oder Zellenräder zu- und abführen; hier sind dann kleinere Volumina zu evakuieren. Ein Beispiel dafür ist der Vakuum-Rieseltrockner für Getreide in **Bild 41**. Das Gut fließt durch eine Schleuse mit zwei preßluftgesteuerten Kegelventilen in den Trocknungsraum ein und rieselt dort zwischen ringförmigen Heizelementen nach unten, wobei es sich vorwiegend durch Kontakt erwärmt. Ein Programmschaltwerk steuert den Arbeitsablauf. Der Apparat trocknet bis zu 20 t/h Getreide bei 25 Torr und Getreidetemperaturen bis zu 45°C.

Feinvakuum. Die oben genannten Trockner arbeiten im Normal-Vakuumbereich oberhalb des Tripelpunktes von Wasser (P = 4,58 Torr, ϑ = 0,01°C) mit Verdampfungstemperaturen über 0°C. Für manche Pharmazeutika und Lebensmittel sind Trocknungstemperaturen unter 0°C wünschenswert, die man im Fein-Vakuumbereich unterhalb des Tripelpunktes verwirklichen kann. Aus dem Verlauf der Phasengrenzen in Bild 39 ist ersichtlich, daß dabei eine Sublimation der Feuchte vom festen direkt in den gasförmigen Zustand vorliegt. Das Verfahren wird auch als Gefriertrocknung bezeichnet, da man zunächst das Gut bei Normaldruck außerhalb des Trockners oder durch Evakuieren im Trockner ohne Wärmezufuhr (Entzug der Verdampfungswärme) unter 0°C abkühlen muß.

In **Bild 42** ist eine Gefriertrocknungsanlage für Lebensmittel, z. B. geschnittenes Gemüse und Fleisch, dargestellt. Das in flachen Schalen liegende Gut wird in der Einfahrschleuse a durch Evakuieren eingefroren, dann in der Trocknungskammer b durch Absenken der Hängewagen g auf beheizten Platten f abgesetzt. Die Wärmezufuhr an den Verdampfungsort erfolgt durch Leitung im Gut von der unteren Auflageplatte sowie durch Wärmeleitung des Wasserdampfes und Strahlung von der in geringem Abstand darüber befindlichen Auflage [25].

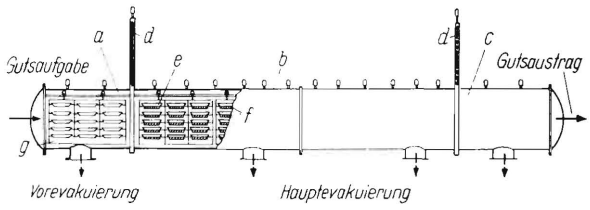


Bild 42. Gefriertrocknungsanlage (Bauart Leybold).
a Einfahrschleuse, b Trocknungskanal, c Austragsschleuse, d Schleusentore, e Tragschalen für das Gut, f Heizplatten, g Hängewagen

Das Vakuum erzeugen Dampfstrahlsauger oder Eiskondensatoren mit Vakuumpumpen. Bei Gemüsetrocknung wird mit einem Druck von 1,9 Torr bei einer Verdampfungstemperatur von −10°C und einer Heizplattentemperatur von 70°C gearbeitet. Der Durchsatz einer solchen Anlage beträgt 40 kg/h m² Auflagefläche.

Schlußbetrachtung

Die vorstehende Darstellung kann natürlich nur wenige Beispiele aus einer Vielzahl von Trocknern erfassen; sie bleibt, dem Thema entsprechend, auf solche Güter beschränkt, die schon im feuchten Zustand eine gewisse Rieselfähigkeit zeigen. Die Systematik ist erweiterungsfähig, beispielsweise auf Suspensionen (Zerstäubungstrocknung) und grobkörnige Güter (Zerkleinerung und Trocknung in Schleudertrocknern, oder in Stromtrocknern mit entsprechender Gutsaufgabe).

Viele der aufgeführten Apparate und Verfahren werden gegenwärtig nicht für die Trocknung landwirtschaftlicher Produkte verwendet. Es ist jedoch denkbar, daß bei einem Verlagern der Produktverarbeitung vom Hofe weg zu zentralen Verarbeitungsbetrieben auch andere, ein größeres Anlagekapital erfordernde Methoden der Trocknung wirtschaftlich werden. Die Eignung eines Trockners für ein bestimmtes Gut ist wegen der verschiedenartigen Eigenschaften der Trocknungsgüter meist nur durch den Versuch nachzuprüfen. Die wichtigsten Gesichtspunkte sind dabei

1. die zulässige Gutstemperatur, die durch temperaturabhängige Umwandlungen des Gutes begrenzt wird. Vielfach ist sie auch von der jeweiligen Gutsfeuchte abhängig.
2. die zulässige Trocknungszeit, ebenfalls durch möglichen Verderb des Gutes, oft auch durch das Eingliedern der Trocknung in einen übergeordneten Verfahrensablauf beschränkt; und
3. die Formänderung (z. B. durch Abrieb), die das Gut während des Trocknens erleiden darf.

Die vorliegende Systematik bietet die Möglichkeit, die in der Landwirtschaft üblichen Trockner in einem größeren Zusammenhang – nämlich der landwirtschaftlichen und der industriellen Trocknung – zu sehen und einzuordnen.

Schrifttum

[1] *Görling, P.:* Trocknung. Ullmanns Encyklopädie der technischen Chemie, Bd. 1, Berlin 1951, S. 563/609.

[2] *Kiesskalt, S.:* Verfahrenstechnik. München 1958, S. 129.

[3] *Kröll, K.:* Trockner und Trocknungsverfahren (Trocknungstechnik II). Berlin 1959.

[4] *Kröll, K.:* Das Trocknen formloser Güter und seine Grundlagen. Aufbereitungs-Technik (1962) H. 1, S. 1/10.

[5] *Barth, W.:* Strömungstechnische Probleme der Verfahrenstechnik. Chem.-Ing.-Techn. **26** (1954) S. 29/34.

[6] *Brötz, W.:* Grundlagen der Wirbelschichtverfahren. Chem.-Ing.-Techn. **24** (1952) S. 60/81.

[7] *Krischer, O.:* Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik (Trocknungstechnik I). Berlin 1956.

[8] *Krischer, O.*, und *L. Jaeschke:* Trocknungsverlauf in durchströmten Haufwerken. Chem.-Ing.-Techn. **33** (1961) S. 592/598.

[9] *Wenner, H. L.:* Die Voraussetzungen für die Lagerung und Belüftung von feucht geerntetem Getreide. Ber. üb. Landtechn. Heft 45. Wolfratshausen 1955.

[10] *Maltry, W.:* Die thermodynamische Erklärung der Vorgänge bei der Silotrocknung. Archiv für Landtechnik **1** (1959) S. 73/85.

[11] *Hege, H.:* Untersuchungen an einem Gegenstrom-Schachttrockner. Landtechn. Forsch. **6** (1956) S. 79/87. Siehe auch: Das Gegenstromverfahren. Ernährungsdienst März 1958.

[12] *Kettenring, K. N., E. L. Manderfield* und *J. M. Smith:* Chem. Engng. Progr. **46** (1950) S. 139 ff.

[13] *Ernst, R.:* Der Mechanismus des Wärmeüberganges an Wärmeaustauschern in Fließbetten. Chem.-Ing.-Techn. **31** (1959) S. 166/173.

[14] *Belik, L.:* Das Wirbelstoßverfahren zur Trocknung von Schüttgut. Chem.-Ing.-Techn. **32** (1960) S. 253/257.

[15] *Krischer, O.:* Wärme und Stoffaustausch bei überströmten und durchströmten Körpern verschiedener geometrischer Form. Chem.-Ing.-Techn. **33** (1961) S. 155/162.

[16] *Rühle, W.:* Der Stoff- und Wärmeübergang im Stromtrockner. Diss. TH München 1958.

[17] *Bussen, R.:* Die Grundzüge der landwirtschaftlichen Trocknung. In: 19. Konstrukteurheft (2. Teil). Düsseldorf: VDI-Verlag 1962 (Grundl. d. Landtechn. H. 15). S. 46/52.

[18] *Landfermann, C. A.:* Strahlungsheizung. Ullmanns Encyklopädie der techn. Chemie, Bd. 1, München 1951. S. 184/191.

[19] *Koch, W.:* Experimentelle Untersuchungen über die Trocknung mit infraroten Strahlen im nicht-hygroskopischen Bereich. VDI-Forschungsheft 465. Düsseldorf 1958.

[20] *Kneule, F.:* Das Trocknen. Frankfurt 1959.

[21] *Halling, H. H.:* Hochfrequenztrocknung einer keramischen Masse. Elektrowärme **18** (1960) S. 62/66.

[22] *Mann, C. A., N. H. Ceagelske* und *A. C. Olson:* Mechanism of Dielectric Drying. Industr. Engng. Chem. Bd. **41** (1949) S. 1686/1694.

[23] *Bungartz, H.:* Die künstliche Getreidetrocknung. VDI-Z. **97** (1955) S. 363/367.

[24] *Holland, F.:* Radio Frequency Drying of Birch Wood for Broomheads. Wood Bd. **20** (1955) S. 86/89.

[25] *Ehlers, H.:* Die Bestimmung optimaler Trocknungsbedingungen von Lebensmitteln durch Messung der Wärme- und Strömungsleitwerte. Vortrag auf der Leybold-Gefriertrocknungstagung 27. 2. 1962 in Köln.