

Die Trockentechnik

Von

M. Hirsch

Zweite Auflage

Die Trockentechnik

Grundlagen, Berechnung, Ausführung und
Betrieb der Trockeneinrichtungen

Von

Dipl.-Ing. M. Hirsch

Beratender Ingenieur v. B. I.

Zweite, verbesserte und vermehrte Auflage

Mit 336 Textabbildungen
einer schwarzen und 2 zweifarbigen
i-v-Tafeln für feuchte Luft



Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH
1932

**Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung
in fremde Sprachen, vorbehalten.**

Copyright 1932 by Springer-Verlag Berlin Heidelberg
Ursprünglich erschienen bei Julius Springer in Berlin 1932
Softcover reprint of the hardcover 2nd edition 1932

ISBN 978-3-642-89850-1

ISBN 978-3-642-91707-3 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-642-91707-3

Aus dem Vorwort zur ersten Auflage (1927).

Über die Trockentechnik liegen zahlreiche Arbeiten vor, so daß die Praxis für die allgemeine Voraussage der Betriebsbedingungen brauchbare Anhaltspunkte besitzt und für den Entwurf von Trockeneinrichtungen über gute Vorbilder verfügt. Es fehlt jedoch ein wissenschaftliches Werk, das die Theorie des Trocknens erschöpfend behandelt, die Methode liefert, um den Trockenvorgang in allen Teilen zahlenmäßig zu beherrschen und die maßgebenden Stoffeigenschaften des Trockengutes restlos klärt. Diese Lücken zu schließen, ist die Aufgabe der vorliegenden Arbeit.

Der erste Teil behandelt die wissenschaftlichen Grundlagen und rechnerischen Verfahren. Daß dabei vielfach von Grund aus aufgebaut werden mußte, ergab sich aus der Tatsache, daß bisher in einschlägigen Untersuchungen die wichtige hygroskopische Eigenschaft des Trockengutes so gut wie gar nicht beachtet und die Ermittlung der Trockenzeit fast ausnahmslos als Aufgabe der Erfahrung angesehen wurde. Die Untersuchung des Trockenvorganges konnte Verfasser auf der wichtigen Veröffentlichung von Mollier: Ein neues Diagramm für Dampf-Luftgemische (Z. V. d. I. 1923) aufbauen, deren Lektüre dem Studium dieses Buches vorausgehen sollte. Hieran anlehnd hat sich Verfasser die erweiterte Aufgabe gestellt, den zeitlichen Verlauf der Veränderung von Trockenmittel und Trockengut festzulegen und ein Zustandsbild des Trockenvorganges zu entwickeln, das möglichst alle Nebeneinflüsse berücksichtigt. Die Untersuchungen umfassen sowohl die reine Lufttrocknung als auch Verfahren, bei denen die beheizten Flächen zur unmittelbaren Erwärmung des Trockengutes dienen. Zahlenbeispiele erläutern die Anwendung der entwickelten Berechnungsmethoden. Ihre Ergebnisse stehen in guter Übereinstimmung mit den Tatsachen. Die Frucht aus diesem ersten Teil stellt für den Leser keine leichte Ernte dar. Es bedarf gründlicher Vertiefung, um die vielfach neuartigen Begriffe und Darstellungsformen voll in sich aufzunehmen. Das Ziel, den ganzen Trockenvorgang mit klarem Blick zu durchdringen, sollte die Mühe lohnen.

Der zweite Teil behandelt praktische Gesichtspunkte. Es bestehen zahlreiche Wege, einen Trockenvorgang durchzuführen. Diese Möglichkeiten mußten daher systematisch geordnet und kritisch beleuchtet werden, um die Wahl zwischen den verschiedenen Verfahren zu erleichtern. Wenn hier zunächst die Bauweise der Trockner untersucht wird, wie sie durch die gewählte Arbeitsweise, ohne Rücksicht auf die Trockengutsart, bedingt ist, so blieb es nötig, die Gestaltungsfrage nochmals bei der Besprechung der Gutseigenschaften zu streifen. Der Schluß beschäftigt sich mit der Untersuchung der zweckmäßigen Betriebsführung.

Vorwort zur zweiten Auflage.

Der in der ersten Auflage unternommene Versuch einer wissenschaftlichen Behandlung der Trockentechnik und einer systematischen Darstellung ihrer Verfahren und Ausführungsformen hat eine fast ausnahmslos freundliche Beurteilung gefunden. Willkommene Kritik gab hierbei mannigfaltige Anregungen. Der Verfasser hat sich bestrebt, ihnen bei der Neuauflage Rechnung zu tragen. In diesem Sinne sind die wissenschaftlichen Grundlagen verbreitert und dadurch leichter verständlich geworden. Soweit die aus vereinfachten theoretischen Erwägungen folgenden Zahlenwerte nur angenähert stimmen, ist der Geltungsbereich eingegrenzt. Dies gilt z. B. für die Temperatur des trocknenden Guts, den Dampfdruck über dem trocknenden Gut und den Wert der Trockenkraft. Das Festhalten an solchen errechneten Zahlenwerten stellt einen durch den augenblicklichen Stand der Forschung begründeten Notbehelf dar, läßt sich jedoch darüber hinaus vertreten, weil damit für Vergleich verschiedener Verhältnisse ein Maßstab von unbestrittenem Wert gewonnen wird. Tatsächlich finden auch die theoretischen Ergebnisse eine befriedigende Bestätigung durch praktische Untersuchungen.

Die Schwierigkeit der theoretischen Erwägungen und die rechnerische Arbeit bei der Verfolgung des Trockenverlaufs ließ die vom Verfasser vorgeschlagene Problembehandlung nur zögernd Eingang in die Praxis finden. Wo dies geschah, ist der Erfolg nicht ausgeblieben. So wurde der Vorgang der Trocknung von Leder, Malz, Tabak, Kaffee und Braunkohle in Anlehnung an die hier gegebenen Anweisungen theoretisch untersucht und hierbei nicht nur befriedigende Übereinstimmung mit dem tatsächlichen Verlauf, sondern auch manche Verbesserungsmöglichkeit gegenüber der früheren Arbeitsweise gefunden. Auch auf Gebieten, wo die Trocknung als Nebenvorgang betrachtet wird, haben die Arbeiten des Verfassers befruchtend gewirkt. Dies gilt beispielsweise für die Kaltlagerung feuchten Guts, bei der die als Gewichtsverlust auftretende Trockenleistung in ganz bestimmten Grenzen geregelt werden soll. Für verschiedene Arten von Trockengut konnte der Verfasser durch theoretische Vorausberechnung neuartige Trockenverfahren entwickeln, deren Richtigkeit durch den nachträglichen Versuch erwiesen wurde. In einzelnen Fällen mußten hierbei die maßgebenden Eigenschaften des Trockenguts — vor allem der Zusammenhang zwischen hygroskopischen Eigenschaften und Feuchtigkeitsgehalt — in fernen Ländern erst ermittelt werden, was nach den in der Neuauflage veröffentlichten Anweisungen stets gelang. Derartige Erfolge sollten den Praktiker ermutigen, sich eingehend mit der Theorie zu beschäftigen und der Vorausberechnung des Trockenverlaufs den ihr

zukommenden Wert beizumessen. Der heute noch immer im Vordergrund stehende Trockenversuch besitzt daneben volle Bedeutung nur dann, wenn er am ähnlichen Modell in der hier beschriebenen Weise durchgeführt wird. Da dies nur selten zu verwirklichen ist, wird der Versuch durch die Vorausberechnung häufig zu ersetzen, regelmäßig zu begründen und zu ergänzen sein.

Wenn in der vorliegenden Arbeit die Begriffe des Wärmeübergangs-, -leit- und -durchgangsvermögens beibehalten und nicht durch die ihrem reziproken Wert entsprechenden Wärmewiderstandszahlen ersetzt wurden, so geschah dies, weil die Gesetze der Wärmeübertragung für das behandelte Gebiet wenn auch wichtig, so doch nicht von allein ausschlaggebender Bedeutung sind und darum zunächst abgewartet werden darf, wie sich die Fachwelt zu der vom Verfasser in seiner Neubearbeitung von Hausbrands Verdampfen, Kondensieren und Kühlen erstmalig gewagten Rechnungsweise mit den Wärmewiderstandszahlen allein stellt.

Neben der selbstverständlichen Durchsicht auf Mängel in Einzelheiten hat die Neuauflage an vielen Stellen Ergänzung gefunden. Der für die Trocknung bis ins hygroskopische Gebiet hinein wichtige Zusammenhang zwischen Feuchtigkeitsgehalt des Guts und Feuchtigkeitsgrad der mit dem Gut im Gleichgewicht stehenden Luft wird in stark vermehrten Beispielen dargestellt. Bei der Wertung der Theorie finden die neueren Untersuchungen weitgehende Berücksichtigung. Den Erörterungen über Wärmeübertragung liegt der heutige wissenschaftliche Stand zugrunde. Neu ist die Untersuchung über den Verlauf des Eindampfvorganges unter Berücksichtigung der hygroskopischen Eigenschaften und der sich daraus ergebenden Veränderung von Gutstemperatur und Trockenkraft. Die Darstellung im $i-x$ -Bild ist auf das für die Abkühlung feuchter Luft wichtige Nebelgebiet ausgedehnt worden.

Der Abschnitt über Ausführung der Trockenvorrichtungen in Anpassung an das Trockenverfahren ist mit dem Ziel einer schärferen Gruppierung vollständig umgearbeitet. Die Ausführungsformen finden eine den Fortschritten der Praxis entsprechende erweiterte Darstellung. Im Abschnitt über Ausführung der Trockenvorrichtungen in Anpassung an die besonderen Eigenschaften verschiedener Gutsarten erstreckt sich der Ausbau sowohl auf die in der ersten Auflage behandelten Stoffe als auch auf neu hinzugekommene Gutsarten.

Wenn die neue Auflage gegenüber der ersten Verbesserungen bringt, so kommt ein Mitverdient hieran den wissenschaftlichen Kreisen, ausführenden Firmen und Verbrauchern zu, die dem Verfasser Erfahrungen und Anregungen freimütig zur Verfügung stellten. Daneben haben, wie in der ersten Auflage, die Verlagsbuchhandlung und meine Frau als Mitarbeiterin zum Gelingen beigetragen. An sie alle richtet sich mein Dank.

Frankfurt a. M., Dezember 1931.

M. Hirsch.

Inhaltsverzeichnis.

Erster Teil: Grundlagen und Berechnung.

	Seite
I. Allgemeine physikalische Grundlagen der künstlichen Trocknung.	1
A. Mittel zur künstlichen Trocknung.	1
1. Die Wirkung mechanischer Kräfte	1
2. Die Wirkung der Wärme	2
a) Verdampfen	2
b) Verdunsten	2
c) Kondensieren	6
3. Physikalisch-chemische Verfahren	7
B. Bindung und Art der Feuchtigkeit	7
1. Reine Flüssigkeiten	8
a ^I) Haftwasser	8
b ^I) Haftflüssigkeit, nicht Wasser	8
a ^{II}) Kapillarwasser	8
b ^{II}) Kapillare Flüssigkeit, nicht Wasser	9
a ^{III}) Quellwasser	9
b ^{III}) Quellflüssigkeit, nicht Wasser	10
2. Lösungen	10
a ^I) Kristallisierende Lösung als Haftflüssigkeit	10
b ^I) Kolloidale Lösung als Haftflüssigkeit.	11
a ^{II}) Kristallisierende Lösung als Kapillarflüssigkeit	11
b ^{II}) Kolloidale Lösung als Kapillarflüssigkeit	11
a ^{III}) Kristallisierende Lösung als Quellflüssigkeit.	11
b ^{III}) Kolloidale Lösung als Quellflüssigkeit	12
3. Feuchte und hygroskopische Körper	12
4. $\frac{p}{p''}$ - γ -Bild	14
II. Wärmebilanz des Trockenvorganges	21
A. Die Wärmebilanzgleichung für Trocknung mit Luft (Verdunstung).	21
B. Die Wärmebilanzgleichung für Trocknung ohne Luft (Verdampfung).	24
III. Nutzleistung und Verluste beim Trockenvorgang. Das vollkommene Trockenverfahren	25
IV. Bildliche Darstellung des Zustandes von feuchten Gasen und Gut	29
A. Das Molliersche i - x -Bild für wasserhaltige Luft	29
B. Das Molliersche i - x -Bild für allgemeine feuchte Gase.	33
C. Kühlgrenze und Zustandspunkt des Gutes im i - x -Bilde.	34
D. Das i - γ -Bild für feuchtes Gut	41
E. Der Randmaßstab im i - x -Bilde.	43
V. Wechselwirkung zwischen feuchten Gasen und Gut.	45
A. Wechselwirkung zwischen feuchten Gasen und tropfbaren Flüssigkeiten. Die Trockenkraftlinie \varkappa für feuchtes Gut	45
B. Wärmeübergangszahl zwischen feuchten Gasen und tropfbaren Flüssigkeiten	49
1. Kritische Geschwindigkeit w_k	49
2. Die Wärmeübergangszahl α und α_v	51
3. Wärmestrahlung	59

	Seite
C. Einfluß der Stoffeigenschaften auf die Wechselwirkung zwischen Gasen und festen Körpern	60
D. Die Beziehung zwischen α und α'	66
E. Wärmeübertragung zwischen Gas und Gut bei veränderlichen Verhältnissen. Das Trockenzeitbild (x - z -Bild)	76
VI. Voraussetzungen für die Berechnung des Trockenvorganges	
A. Wetterverhältnisse.	88
B. Beeinflussung der Gutseigenschaften durch die Führung des Trockenvorganges	89
1. Physikalische Veränderungen	89
a) durch den Einfluß der absoluten Höhe der Gutstemperatur	89
b) durch den Einfluß der Trockengeschwindigkeit	90
c) durch die Eigenart des Trockenmittels	92
2. Chemische Veränderungen	93
a) durch den Einfluß der absoluten Höhe der Gutstemperatur	93
b) durch den Einfluß der Trockengeschwindigkeit	93
c) durch die Eigenart des Trockenmittels.	94
3. Biologische Veränderungen	95
a) durch den Einfluß der absoluten Höhe der Gutstemperatur	95
b) durch den Einfluß der Trockengeschwindigkeit	96
c) durch die Eigenart des Trockenmittels.	97
C. Feuchtigkeitsgehalt des Trockengutes	97
VII. Die Berechnung des Trockenvorganges mit Luft als Trockenmittel	
A. Das i - x -Bild als Grundlage für die Berechnung des Trockenvorganges	102
1. Frischlufttemperatur t_r	103
2. Feuchtigkeitsgehalt der Frischluft x_r	104
3. Temperatur der Trockenluft nach der Vorwärmung t_a	104
4. Endtemperatur der Trockenluft t_e	105
B. Festlegung der Hauptpunkte im i - x -Bild, unter Berücksichtigung von Vorwärmung und hygroskopischen Eigenschaften des Gutes.	112
1. Gleichstrom	113
2. Gegenstrom	116
C. Das verbundene i - x - i - x -Bild	118
1. Gleichstrom	119
2. Gegenstrom	121
D. Schrittweise Verfolgung der zeitlichen Zustandsänderung von Gas und Gut bei beliebigem Ausgangspunkt beider für Luft als Trockenmittel	122
E. Die rechnerische Verfolgung des Trockenvorganges	129
1. Gleichstrom	129
2. Gegenstrom	135
F. Verlauf des i - x -Bildes unter Berücksichtigung der Streuverluste Q_{verl}	138
1. Gleichstrom	139
2. Gegenstrom	140
G. Verlauf der Zustandsänderung bei Trockenvorrichtungen mit ständig wechselndem Trockenbild	144
H. Verlauf der Zustandsänderung bei Trockenvorrichtungen mit gleichbleibendem Trockenbild und Bewegung der Luft im Querstrom zum Gut	153
VIII. Die Berechnung des Trockenvorganges bei Wärmeübertragung an das Gut durch beheizte Flächen	
A. Wärmeübertragung von Heizmittel durch metallische Trennflächen an Gut	158
1. Wärmeübertragungszahl α	159
2. Wärmeleitfähigkeit λ_i	164
3. Wärmedurchgangszahl k	164
B. Wärmeübertragung von Heizmittel durch metallische Trennflächen und Gut an feuchte Gase. Die Temperatur einseitig beheizten Gutes.	172

	Seite
C. Wärmeübertragung durch metallische Trennflächen und Gut an feuchte Gase bei veränderlichem Zustand von Gut und Gas	181
D. Schrittweise Verfolgung der Zustandsänderung bei Wärmeübertragung von Heizmittel durch metallische Trennflächen und Gut an feuchte Gase bei beliebigem Ausgangszustand von Gut und Gas	184
IX. Berechnung des Energieverbrauches	185
A. Wärmeverbrauch	185
B. Arbeitsverbrauch	190

Zweiter Teil: Ausführung und Betrieb.

I. Durchführung des Trockenvorganges	193
A. Vorbereitung des Gutes	193
1. Mechanische Entfeuchtung	193
2. Zweckentsprechende Gestaltung	193
3. Veränderung der Oberfläche des Gutes	193
4. Veränderung der natürlichen Eigenschaften des Gutes. Die Trocknung vorgewärmten Gutes	193
B. Grundsätze für die Durchführung des Trockenvorganges	196
1. Trockenverfahren, bei denen Beharrungszustand vorliegt	197
a) Trockenverfahren mit zeitlichem Beharrungszustande, jedoch örtlichem Wechsel des Zustandes von Gut und Trockenmittel	197
I. Gleichstrom	197
II. Gegenstrom	199
III. Querstrom	202
b) Trockenverfahren mit zeitlichem Beharrungszustande und örtlich unverändertem Zustand des Trockenmittels	204
2. Trockenverfahren, bei denen das Trockenbild ständig wechselt	205
a) Trockenverfahren mit ständig wechselndem Trockenbild und veränderlichem Zustand des Trockenmittels	205
b) Trockenverfahren mit ständig wechselndem Trockenbild und unveränderlichem Zustand des Trockenmittels	205
C. Trockenverfahren mit Nachheizung	206
1. Stufenheizung	206
2. Innenheizung	210
D. Trocknen mit Mischluft	212
E. Entfeuchtung der Frischluft. Bewetterungsanlagen	218
F. Abkühlung feuchter Luft. Das Nebelgebiet im $i-x$ -Bild	221
G. Trocknen mit Luft in geschlossenem Kreislauf. Kalte Trocknung	224
H. Trocknen mit veränderlicher Luftmenge	226
I. Maßnahmen zur Verteilung der Trockenwirkung. Bewegung von Gut und Trockenmittel	234
K. Mischung von feuchten Gasen und gesättigten Dämpfen	253
L. Nachbehandlung des Gutes. Der lufttrockene Zustand	259
1. Abkühlung	259
2. Herstellung des lufttrockenen Zustandes	260
3. Umhüllen	261
4. Besondere Behandlung zum Schutze gegen Verderb	261
II. Ausführung der Trockenvorrichtungen in Anpassung an das Trockenverfahren	262
A. Vorrichtungen zur Durchführung eines Trockenverfahrens, bei dem Beharrungszustand vorliegt	263
1. Vorrichtungen zur Durchführung eines Trockenverfahrens, bei dem Beharrungszustand vorliegt, mit Luft oder einem anderen vollkommenen Gas als Trockenmittel	263
a) Waagerechter Kanaltrockner	263
b) Senkrechter Kanaltrockner (Trockenturm)	280
c) Trommeltrockner	284

	Seite
d) Rieseltrockner	288
e) Stromtrockner	292
f) Zerstäubungstrockner	294
2. Vorrichtungen zur Durchführung eines Trockenverfahrens, bei dem Beharrungszustand vorliegt, unter Anwendung beheizter Flächen zusammen mit Luft oder einem anderen vollkommenen Gas	299
a) Trockenzylinder	300
b) Walzentrockner	302
c) Tauchtrommeln	306
d) Röhrentrockner	307
e) Tellertrockner	309
f) Muldentrockner	309
g) Trommeltrockner	311
3. Vorrichtungen zur Durchführung eines Trockenverfahrens, bei dem Beharrungszustand vorliegt, unter Anwendung beheizter Flächen allein (Verdampfanlagen)	313
a) Trockenzylinder	314
b) Walzentrockner	316
c) Tauchtrommel	316
d) Tellertrockner	318
e) Muldentrockner	318
B. Vorrichtungen zur Durchführung eines Trockenverfahrens, bei dem das Trockenbild ständig wechselt	319
1. Vorrichtungen zur Durchführung eines Trockenverfahrens, bei dem das Trockenbild ständig wechselt, mit Luft oder einem anderen vollkommenen Gas als Trockenmittel	319
a) Trockenschränke und Trockenkammern	319
b) Darren	324
2. Vorrichtungen zur Durchführung eines Trockenverfahrens, bei dem das Trockenbild ständig wechselt, unter Anwendung beheizter Flächen zusammen mit Luft oder einem anderen vollkommenen Gas	330
3. Vorrichtungen zur Durchführung eines Trockenverfahrens, bei dem das Trockenbild ständig wechselt, unter Anwendung beheizter Flächen allein (Verdampfanlagen)	331
a) Trockenschränke	331
b) Tellertrockner	333
c) Schaufeltrockner	333
d) Trommeltrockner	333
C. Trockenvorrichtungen mit Heißdampf als Wärmeträger	334
III. Ausführung der Trockenvorrichtungen in Anpassung an die besonderen Eigenschaften verschiedener Gutsarten	334
A. Organische Stoffe	335
1. Tierstoffe	335
a) Fleisch	335
b) Blut	336
c) Leder	337
d) Leim	341
e) Gelatine	342
f) Trockenplatten und Filme	342
g) Milch	343
h) Eier	345
i) Fische	346
k) Seife	347
l) Haare und Wolle	349
2. Pflanzenstoffe	351
a) Kartoffeln	351
b) Stärke	353
c) Getreide	355
d) Malz	361

	Seite
e) Hopfen	364
f) Hefe	364
g) Treber	365
h) Teigwaren	365
i) Obst	366
k) Gemüse	370
l) Tabak	372
m) Kaffee	372
n) Flachs	374
o) Holz	374
p) Zellstoff und Papier	386
q) Zucker	396
r) Gummi, Kautschuk	398
3. Garne und Stoffe	401
a) Garne	401
b) Stoffe, Wäsche, Kunstleder	403
4. Lacke	413
a) Lackierte Gegenstände	413
b) Elektrische Kabel	416
5. Brennstoffe	417
6. Farbstoffe, Gerbstoffe, Harnstoff	430
7. Sprengstoffe	432
B. Anorganische Stoffe	432
1. Salze	432
2. Mineralien und keramische Erzeugnisse	434
IV. Ausführung der Heizvorrichtung	441
V. Vorrichtungen zur Ausnutzung der Abwärme. Wetterfertiger	444
VI. Reinigung der Brüden	447
VII. Einfügung der Trocknung in den allgemeinen Arbeitsgang	452
VIII. Betriebsregelung bei Trockenanlagen	457
1. Thermometer	457
2. Luftfeuchtigkeitsmesser	457
3. Luftmengenmesser	459
4. Trockenkraftmesser	459
5. Luftrichtungsmesser	460
6. Vorrichtungen zur Messung des Feuchtigkeitsgehalts des Trockengutes	461
7. Trockenversuche am verkleinerten Modell	467
8. Betriebsanweisung	468
9. Selbsttätige Regelung	468
IX. Gesundheitliche Erfordernisse bei Trockenanlagen	472
Firmenverzeichnis	476
Namenverzeichnis	478
Sachverzeichnis	480

Formelzeichen.

- a Temperaturleitfähigkeit [m²/h]; $a = \frac{\lambda}{c \cdot \gamma}$,
 α Wärmeübergangszahl für fühlbare Wärme [kcal/m²·°C·h],
 α' Wärmeübergangszahl für Dampfwärme [kcal/kg·h],
 α_V räumliche Wärmeübergangszahl für fühlbare Wärme [kcal/m³·°C·h];
 $\alpha_V = \alpha \frac{F}{V} = \alpha \frac{\mathfrak{F}}{\mathfrak{B}}$,
 α'_V räumliche Wärmeübergangszahl für Dampfwärme [kcal/m·kg·h];
 $\alpha'_V = \alpha' \frac{F}{V} = \alpha' \frac{\mathfrak{F}}{\mathfrak{B}}$,
 B Breite [m],
 b Beiwert,
 C Strahlungskonstante [kcal/m²·h·(° abs.)⁴], C_1 der strahlenden
 C_2 der bestrahlten Fläche, $C_s = 4,96$ des vollkommen schwarzen
Körpers,
 c spezifische Wärme [kcal/kg·°C],
 C_p spezifische Wärme feuchten Gases (feuchter Luft) bei unveränderlichem
Druck, bezogen auf 1 kg Reingas (Reinluft) [kcal/kg·°C];
 $C_p = c_{pL} + x \cdot c_{pD}$,
 c_{pD} spezifische Wärme des Dampfes bei unveränderlichem Druck
[kcal/kg·°C]; für Wasserdampf $c_{pD} \approx 0,46$,
 c_{pL} spezifische Wärme des Reingases (der Reinluft) bei unveränderlichem
Druck [kcal/kg·°C]; für Reinluft $c_{pL} \approx 0,24$,
 C_{pG} spezifische Wärme feuchten Gases (feuchter Luft) von dem gedachten
Zustand, wie er dem Gute zukommt, bezogen auf 1 kg
Reingas (Reinluft) [kcal/kg·°C]; $C_{pG} = c_{pL} + x_G \cdot c_{pD}$,
 \mathfrak{C} spezifische Wärme feuchten Gutes, bezogen auf 1 kg Trockenstoff
[kcal/kg·°C]; $\mathfrak{C} \approx c_x + x \cdot c_{\mathfrak{B}}$,
 c_x spezifische Wärme des Trockenstoffes im Gut [kcal/kg·°C],
 $c_{\mathfrak{B}}$ spezifische Wärme der Flüssigkeit im Gut [kcal/kg·°C]; für
Wasser $c_{\mathfrak{B}} \approx 1$,
 χ von der Körpergestalt abhängige Funktionsform,
 d Durchmesser [m],
 d' gleichwertiger Durchmesser [m]; $d' = \frac{2B \cdot H}{B + H}$,
 Δ Zeichen für endlichen Unterschied (Δi , Δi , ΔP , $\Delta \mathfrak{F}$, Δt , Δt ,
 Δx , Δx , Δz),
 e Basis des natürlichen Logarithmus; $e = 2,718$,
 e Stärke [m], e_i der trennenden Metallwand,
 e Stärke des Trockengutes [m],

- F gas- (luft-) berührte Austauschfläche [m²]; $F = \mathfrak{F} \cdot Z$; F_1 strahlende Fläche, F_2 bestrahlte Fläche,
 F_i beheizte Austauschfläche [m²],
 \mathfrak{F} Oberfläche des stündlich getrockneten Gutsgewichtes \mathfrak{G} [m²/h],
 f Querschnitt [m²],
 \mathfrak{f} spezifische Oberfläche des Gutes [m²/kg]; $\mathfrak{f} = \frac{\mathfrak{F}}{\mathfrak{G}}$,
 G stündlich umlaufendes Gewicht feuchten Gases (feuchter Luft) [kg/h]; $G = G_L + G_D = G_L(1 + x)$,
 G_D in G enthaltenes Dampfgewicht [kg/h]; $G_D = x \cdot G_L$,
 G_L in G enthaltenes Reingas- (Reinluft-) gewicht [kg/h]; G_{Lh} Reinluftgewicht des Schwadens, G_{Lr} Reinluftgewicht der beizumischenden Außenluft,
 \mathfrak{G} stündlich zugeführtes Gewicht feuchten Gutes [kg/h]; $\mathfrak{G} = \mathfrak{G}_x + \mathfrak{G}_w = \mathfrak{G}_x(1 + \varepsilon)$,
 \mathfrak{G}_x in \mathfrak{G} enthaltenes Trockenstoffgewicht [kg/h],
 \mathfrak{G}_w in \mathfrak{G} enthaltenes Flüssigkeitsgewicht [kg/h]; $\mathfrak{G}_w = \varepsilon \cdot \mathfrak{G}_x$,
 g Beschleunigung der Erdschwere [m/s²]; $g \approx 9,81$,
 γ spezifisches Gewicht feuchten Gases (feuchter Luft) bei der Temperatur t und dem Druck P [kg/m³]; $\gamma = \gamma_L + \gamma_D = \gamma_L(1 + x)$,
 γ_D spezifisches Gewicht des Dampfes bei der Temperatur t und dem Teildruck P_D [kg/m³]; $\gamma_D \approx \frac{P_D}{R_D \cdot T} = x \cdot \gamma_L$,
 γ'' spezifisches Gewicht gesättigten Dampfes bei der Temperatur t [kg/m³]; $\gamma'' \approx \frac{P''}{R_D \cdot T}$,
 γ_L spezifisches Gewicht des Reingases (der Reinluft) bei der Temperatur t und dem Teildruck P_L [kg/m³]; $\gamma_L = \frac{P_L}{R_L \cdot T}$,
 γ_w Raumgewicht feuchten Gutes [kg/m³]; $\gamma_w = \gamma_x + \gamma_w = \gamma_x(1 + \varepsilon)$,
 γ_x Raumgewicht des im Gut enthaltenen Trockenstoffes [kg/m³],
 γ_w Raumgewicht der im Gut enthaltenen Feuchtigkeit [kg/m³];
 $\gamma_w = \varepsilon \cdot \gamma_x$,
 H Höhe [m],
 i spezifischer Wärmehalt feuchten Gases (feuchter Luft) bei der Temperatur t und dem Feuchtigkeitsgehalt x , bezogen auf 1 kg Reingas (Reinluft) [kcal/kg]; $i = i_L + x \cdot i_D$,
 i_D spezifischer Wärmehalt des Dampfes bei der Temperatur t [kcal/kg]; $i_D \approx r_{00} + c_{pD} \cdot t$; für Wasserdampf $i_D \approx 595 + 0,46 t$,
 i_L spezifischer Wärmehalt des Reingases (der Reinluft) bei der Temperatur t [kcal/kg]; $i_L = c_{pL} \cdot t$; für Reinluft $i_L \approx 0,24 t$,
 i_g spezifischer Wärmehalt feuchten Gases (feuchter Luft) von dem gedachten Zustand, wie er dem Gute zukommt [kcal/kg]; $i_g \approx c_{pL} \cdot t + x_g(r_{00} + c_{pD} \cdot t)$,
 i spezifischer Wärmehalt feuchten Gutes bei der Temperatur t und dem Feuchtigkeitsgehalt ε , bezogen auf 1 kg Trockenstoff [kcal/kg];
 $i \approx i_x + \varepsilon \cdot i_w$,
 i_x spezifischer Wärmehalt des Trockenstoffes bei der Temperatur t [kcal/kg]; $i_x = c_x \cdot t$,

- i_{fl} spezifischer Wärmeinhalt der Flüssigkeit bei der Temperatur t [kcal/kg]; $i_{\text{fl}} = c_{\text{fl}} \cdot t$; für Wasser $i_{\text{fl}} \approx t$,
 k Wärmedurchgangszahl [kcal/m² · °C · h], k_i von Heizmittel an Gut,
 k' Verdunstungszahl [kg/m² · h]; $k' = \frac{\alpha}{C_{p_g}}$,
 ξ gleichwertige Wärmedurchgangszahl bei Wärmeübertragung durch beheizte Flächen und Gut an feuchtes Gas [kcal/m² · °C · h];
 $\xi = k \left(1 + \frac{(i_{D_t} - i_{\text{fl}})(x_g - x)}{C_{p_g}(t_i - t)} \right)$,
 \varkappa Trockenpotential [°C],
 L Länge [m],
 λ Wärmeleitzahl [kcal/m · °C · h], λ_i der Wand,
 μ Zähigkeit [kg · s/m²],
 n Zahl der Gasdurchgänge [/h]; $n = \frac{3600w}{L}$,
 P Gesamtdruck feuchten Gases (feuchter Luft), Barometerstand [kg/m²]; $P = P_L + P_D = P_L + \varphi \cdot P''$,
 P_D Teildruck des in dem feuchten Gase (der feuchten Luft) enthaltenen Dampfes [kg/m²]; $P_D = \varphi \cdot P''$,
 P'' Sättigungsdruck des Dampfes bei der Temperatur t [kg/m²],
 P_L Teildruck des in dem feuchten Gase (der feuchten Luft) enthaltenen Reingases (der Reinluft) [kg/m²],
 p Dampfdruck über feuchtem Gut bei der Temperatur t [kg/m²],
 p_i absoluter Druck des Heißdampfes [kg/cm²],
 $\pi \approx 3,14$,
 φ Feuchtigkeitsgrad (relative Feuchtigkeit) feuchten Gases (feuchter Luft); $\varphi = \frac{P_D}{P''} = \frac{x \cdot P}{P'' \left(\frac{R_L}{R_D} + x \right)}$; für wasserhaltige Luft $\varphi = \frac{x \cdot P}{P''(0,622 + x)}$,
 φ_{G} Feuchtigkeitsgrad (relative Feuchtigkeit) feuchten Gutes;
 $\varphi_{\text{G}} = \frac{\xi}{1 + \xi}$,
 Q von außen zugeführter Wärmestrom [kcal/h], Q_i von Heizmittel an Gut,
 Q_F von feuchtem Gas (feuchter Luft) an Gut übergehender innerer Wärmestrom [kcal/h]; $Q_F = Q_i + Q'$,
 Q_t von feuchtem Gas (feuchter Luft) an Gut übergehender Wärmestrom, fühlbar durch Verminderung der Gastemperatur [kcal/h],
 $Q_i = F \cdot \alpha (t - t)$,
 Q' von feuchtem Gas (feuchter Luft) an Gut übergehender Wärmestrom, entstehend durch Niederschlag von Dampf aus dem Gas [kcal/h]; $Q' = F \cdot \alpha' (P_D - \text{p})$,
 Q_{verl} nach außen zerstreuter Verlustwärmestrom [kcal/h],
 R Gaskonstante feuchten Gases (feuchter Luft) [m⁰ abs.],
 R_D Gaskonstante des Dampfes [m⁰ abs.]; für Wasserdampf $R_D \approx 47,06$,
 R_L Gaskonstante des Reingases (der Reinluft) [m⁰ abs.]; für Reinluft $R_L \approx 29,27$,

XIV Kennzeichnung der Zustandspunkte für Gas (Luft) und Gut.

R_k	Reynoldssche Zahl, $R_k \approx 2320$,
r	Verdampfwärme [kcal/kg]; für Wasserdampf $r_{0^{\circ}} \approx 595$,
ρ	Massendichte [$\text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$],
Σ	Summenzeichen für endliche Größen,
T	absolute Temperatur [$^{\circ}\text{C}$ abs.]; $T \approx 273 + t$,
t	Temperatur feuchten Gases (feuchter Luft) [$^{\circ}\text{C}$], t_i des Heizmittels,
t'_x	Taupunkt feuchten Gases (feuchter Luft) beim Feuchtigkeitsgehalt x [$^{\circ}\text{C}$],
t	Temperatur des Gutes an der freien Fläche [$^{\circ}\text{C}$], t_i an der Heizfläche,
Θ	absolute Wandtemperatur [$^{\circ}\text{C}$ abs.]; $\Theta \approx 273 + \vartheta$,
τ	Kühlgrenze [$^{\circ}\text{C}$],
ϑ	Wandtemperatur [$^{\circ}\text{C}$],
V	gas- (luft-) erfüllter Rauminhalt [m^3]; $V = \mathfrak{B} \cdot Z$,
\mathfrak{B}	Rauminhalt des stündlich getrockneten Gutsgewichtes [m^3/h],
v	spezifisches Volumen feuchten Gases (feuchter Luft) bei der Temperatur t und dem Druck P [m^3/kg] $v = \frac{1}{\gamma}$,
v_D	spezifisches Volumen des Dampfes bei der Temperatur t und dem Teildruck P_D [m^3/kg]; $v_D = \frac{1}{\gamma_D}$,
v''	spezifisches Volumen gesättigten Dampfes bei der Temperatur t [m^3/kg]; $v'' = \frac{1}{\gamma''}$,
v_L	spezifisches Volumen des Reingases (der Reinluft) bei der Temperatur t und dem Teildruck P_L [m^3/kg]; $v_L = \frac{1}{\gamma_L}$,
\mathfrak{B}	Wasserwert der Stundenmenge [kcal/ $^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$],
w	Geschwindigkeit des feuchten Gases (der feuchten Luft) [m/s],
w	Geschwindigkeit des Gutes [m/s],
x	Feuchtigkeitsgehalt feuchten Gases (feuchter Luft), bezogen auf 1 kg Reingas (Reinluft); $x = \frac{\gamma_D}{\gamma_L} = \frac{R_L}{R_D} \cdot \frac{\varphi \cdot P''}{P - \varphi \cdot P''}$; für wasserhaltige Luft $x = 0,622 \frac{\varphi \cdot P''}{P - \varphi \cdot P''}$,
x_g	Feuchtigkeitsgehalt feuchten Gases (feuchter Luft) von dem gedachten Zustand, wie er dem Gute zukommt,
ε	Feuchtigkeitsgehalt des Gutes, bezogen auf 1 kg Trockenstoff; $\varepsilon = \frac{\gamma_{\mathfrak{B}}}{\gamma_{\mathfrak{G}}} = \frac{\varphi_{\mathfrak{G}}}{1 - \varphi_{\mathfrak{G}}}$; ε_e im hygroscopischen Punkt,
Z	Trockendauer [h],
z	Zeit [h].

Kennzeichnung der Zustandspunkte für Gas (Luft) und Gut.

R	Zustand des rohen Gases (der rohen Luft, Frischluft),
V	Zustand des vorgewärmten Gases (der vorgewärmten Luft),
A	Zustand des Gases (der Luft) bei Erreichung der Kühlgrenze (das Gut befindet sich am Anfang des Ausgleichzustandes),

- E* Zustand des Gases (der Luft) beim Verlassen der Kühlgrenze (das Gut befindet sich am Ende des Ausgleichzustandes),
H Zustand des Gases (der Luft) beim Austritt aus der Trockenvorrichtung (das Gut befindet sich in hygroskopischem Zustand),
J ideeller Beharrungszustand des Gases (der Luft) nach Ausgleich mit dem Gut,
M Mischzustand des Gases (der Luft),
G allgemeiner Zustand des Gases (der Luft),
 \mathfrak{R} Zustand des rohen Gutes,
 \mathfrak{B} Zustand des vorgewärmten Gutes,
 \mathfrak{A} Zustand des Gutes bei Erreichung der Kühlgrenze, am Anfang des Ausgleichzustandes,
 \mathfrak{E} Zustand des Gutes beim Verlassen der Kühlgrenze, am Ende des Ausgleichzustandes,
 \mathfrak{S} Zustand des hygroskopischen fertiggetrockneten Gutes,
 \mathfrak{F} ideeller Beharrungszustand des Gutes nach Ausgleich mit dem Gase (der Luft),
 \mathfrak{G} allgemeiner Zustand des Gutes.

Index.

" oder $\varphi = 1$ in gesättigtem Zustand,

a im Zustand *A*,

a im Zustand \mathfrak{A} ,

D Dampf,

e im Zustand *E*,

e im Zustand \mathfrak{E} ,

F Fläche,

\mathfrak{G} feuchtes Gut,

g im Zustand *G*,

g im Zustand \mathfrak{G} ,

h im Zustand *H*,

h im Zustand \mathfrak{H} ,

i im Zustand *J*,

i im Zustand \mathfrak{J} ,

k kritisch

L Reingas, Reinluft,

m im Zustand *M*,

p bei unveränderlichem Druck,

r im Zustand *R*,

nur ausnahmsweise beigelegt. Im allgemeinen bezeichnen kleine lateinische Buchstaben ohne Index Eigenschaften des feuchten Gases (der feuchten Luft) im Zustand *G*, kleine deutsche Buchstaben ohne Index Eigenschaften des feuchten Gutes im Zustand \mathfrak{G} ,

r im Zustand \mathfrak{R} ,

\mathfrak{x} Trockenstoff,

t bei der Temperatur *t*,

t bei der Temperatur t ,

v räumlich,

v im Zustand *V*,

v im Zustand \mathfrak{B} ,

\mathfrak{w} Flüssigkeit.

Abkürzung der Quellenangaben.

Am. Soc. Mech. Eng.	Journal of the American Society of Mechanical Engineers.
Ann. d. Physik	Annalen der Physik.
Arch. Wärmewirtsch.	Archiv für Wärmewirtschaft und Dampfkesselwesen.
Chem. Apparatur	Chemische Apparatur.
Ges.-Ing.	Gesundheits-Ingenieur.
Heat. Pip. and Air Conditg.	Heating Piping and Air Conditioning.
J. Agr. Research	Journal of Agricultural Research.
J. Am. Leather C. A.	Journal of the American Leather Chemists Association.
J. Ind. Engg. Chem.	Journal of Industrial and Engineering Chemistry.
J. Inst. Brewing	Journal of the Institute of Brewing.
J. Soc. Aut. Eng.	Journal of the Society of Automotive Engineers.
J. Soc. Chem. Ind.	Journal of the Society of Chemical Industry.
Mech. Engg.	Mechanical Engineering.
Mitt. d. D. L. G.	Mitteilungen der Deutschen Landwirtschaftsgesellschaft.
Phys. Rev.	Physical Review
Refr. Engg.	Refrigerating Engineering.
Svensk Pappers Tidning	Svensk Pappers Tidning
Techn. Mech. Therm.	Zeitschrift für Technische Mechanik und Thermodynamik.
U. S. A. Dept. Agr. Bull.	United States Departement of Agriculture Bulletin.
W. f. Pap.	Wochenblatt für Papierfabrikation.
Wschr. Brauerei.	Wochenschrift für Brauereien.
Z. ang. Chem.	Zeitschrift für angewandte Chemie.
Z. ang. Math. Mech.	Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik.
Z. Bayer. Rev. Ver.	Zeitschrift des Bayerischen Revisionsvereins.
Z. ges. Kälteind.	Zeitschrift für die gesamte Kälteindustrie.
Z. ges. Turbinenwesen	Zeitschrift für das gesamte Turbinenwesen.
Z. öst. Ing. V.	Zeitschrift des österreichischen Ingenieur- u. Architektenvereins.
Z. techn. Phys.	Zeitschrift für technische Physik.
Z. V. d. I.	Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure.

Berichtigungen.

- S. 47, Z. 12 v. o.: „positiv“ statt „negativ“.
- S. 52, Fußnote 1: „Kreuzstromwärmeaustauscher“ statt „Gleichstromwärmeaustauscher“.
- S. 70, Z. 15 v. o.: C_p statt c_p .
- S. 81, Z. 4 v. u.: k' statt k .
- S. 130, Z. 12 v. u.: C_r statt c_r .
- S. 149, Z. 5 v. o.: „Ermittelung“ statt „Trmittlung“.
- S. 160, Z. 13 v. o.: „umgeformt“ statt „ungeformt“.
- S. 161, Z. 15 v. o.: $\frac{d^3 \cdot \gamma_m^2 \cdot \beta_m (t_i - \vartheta)}{g \cdot \mu_m^2}$ statt $\frac{d^3 \cdot \gamma_m^2 \cdot \beta_m (t_i - \vartheta)}{g_m^2}$.
- S. 183, letzte Z. v. u.: k' statt k .
- S. 318, Z. 2 v. u.: „Vakuumentrocknern“ statt „Vakkumentrocknern“.
- S. 385, Z. 16 v. o.: m^3/h statt m^3 .
- S. 394, Z. 8 v. u.: kg/m^2 statt kg/m .

Grundlagen und Berechnung.

I. Allgemeine physikalische Grundlagen der künstlichen Trocknung.

Künstliche Trocknung im allgemeinsten Sinne umfaßt die Vorgänge, bei denen der Feuchtigkeitsgehalt eines Körpers durch besondere Mittel verringert wird. Der behandelte Stoff — im folgenden als Trockengut oder kurz Gut bezeichnet — kann beliebige Form besitzen, fest, flüssig oder gasförmig sein, die in ihm enthaltene Feuchtigkeit aus Wasser oder anderen Flüssigkeiten bestehen.

A. Mittel zur künstlichen Trocknung.

Als Mittel zur künstlichen Trocknung kommen in Betracht:

1. die Wirkung mechanischer Kräfte,
2. die Wirkung der Wärme:
 - a) Verdampfen,
 - b) Verdunsten,
 - c) Kondensieren,
3. physikalisch-chemische Verfahren.

1. Die Wirkung mechanischer Kräfte.

Lose haftende Feuchtigkeit kann durch Pressen, Saugen, Schleudern und Filtern entfernt werden. Die Flüssigkeit erfährt hierbei keine Änderung ihres Aggregatzustandes.

Der Arbeitsaufwand entspricht der Überwindung des Haftvermögens der Flüssigkeit, ist also gering. Diesem Vorteil steht vielfach der Nachteil gegenüber, daß mit der mechanisch entfernten Flüssigkeit wertvolle gelöste Stoffe verloren gehen, z. B. bei Nahrungsmitteln lösliche Vitamine.

Der Grad der möglichen mechanischen Entwässerung nimmt nach Versuchen, die Smith¹ an wasserhaltigem Kies durchgeführt hat, mit der Zähigkeit der Flüssigkeit ab. Da diese mit steigender Temperatur stark fällt, bedeutet höhere Temperatur die Möglichkeit einer weitergehenden mechanischen Entfeuchtung. In Fällen, bei denen

¹ Smith: Über den Einfluß der Temperatur auf die Wasserabflußgeschwindigkeit bei Zellstoffbrei. *Papir Journalen* 1919.

mechanische Mittel vor der eigentlichen Trocknung angewandt werden, empfiehlt es sich daher, die für Anwärmung des Gutes erforderliche Wärme vor der mechanischen Behandlung zuzuführen.

2. Die Wirkung der Wärme.

a) Verdampfen. Werden feuchte Körper von fester Form genügend hoch erwärmt, so siedet der Feuchtigkeitsanteil und entweicht in Dampfform. Die Siedetemperatur hängt ab von der Art der Feuchtigkeit und ihrer Bindung mit dem Trockenstoffanteil. Besteht die Feuchtigkeit aus Wasser, das ohne innige Bindung lose anhaftet, und erfolgt die Verdampfung in die freie Luft bei einem Barometerstand von 760 mm Q.-S., so beträgt die Siedetemperatur 100° . Sie läßt sich beliebig erhöhen oder verringern, wenn das Verdampfen in einem geschlossenen Gefäß unter einem Druck erfolgt, der unabhängig ist von der Umgebung und entweder durch Drosselung der Dampfaustrittsöffnung darüber oder durch Anschluß an eine mit Unterdruck arbeitende Kondensationsanlage darunter gehalten wird.

In gleicher Weise wird bei flüssigen Körpern das Lösungsmittel durch Erwärmung verdampft und die Lösung mehr und mehr eingedickt. Sie erwärmt sich hierbei auf eine höhere Temperatur, als der Siedetemperatur des Lösungsmittels bei dem vorliegenden Druck der Umgebung entspricht.

Bei der Verdampfung entsteht reiner gesättigter Dampf. Der Wärmeaufwand entspricht in der Hauptsache der Steigerung des Wärmeinhaltes von dem Wert der Flüssigkeitswärme auf den Betrag der Dampfwärme.

Die Wärmezufuhr zu dem Gute kann erfolgen durch erhitzte Flächen, mit denen das Gut in Berührung steht, oder durch Wärmestrahlung erhitzter Körper, die sich in Umgebung des Gutes befinden, ohne mit diesem in Berührung zu stehen.

Seltener ist die unmittelbare Erwärmung des Gutes durch heiße Gase. Als solche können z. B., nach dem Vorschlage von Hausbrand¹, überhitzte Dämpfe der zu entziehenden Flüssigkeit in Betracht gezogen werden.

Kaum angewendet werden Flüssigkeiten mit höherem Siedepunkt, wenn auch deren Benutzung als unmittelbar wirkende Heizmittel denkbar wäre.

b) Verdunsten. Luft kann Dampf so lange aufnehmen, bis der auf den Dampf entfallende Teildruck des Gemisches dem Sättigungsdruck entspricht, der bei der vorliegenden Temperatur dem Dampf zukommt.

Zahlenbeispiel 1. Bei einem Barometerstand von 735,5 mm Q.-S. = 1 at = 10000 kg/m^2 und einer Temperatur von 80° betrage der Teildruck des in feuchter Luft enthaltenen Wasserdampfes 2415 kg/m^2 .

Der Sättigungsdruck des Wasserdampfes bei 80° ergibt sich aus der Dampf-

¹ Hausbrand: Das Trocknen mit Luft und Dampf. Berlin: Julius Springer 1924.

tafel zu $0,483 \text{ at} = 4830 \text{ kg/m}^2$, d. i. doppelt so hoch wie der vorliegende Dampf-
teildruck.

Es bedeute

- P den Gesamtdruck des feuchten Gases, in kg/m^2 ,
 P_L den Teildruck des von Feuchtigkeit befreit gedachten Gases, in kg/m^2 ,
 P_D den Teildruck des in dem feuchten Gase enthaltenen Dampfes, in kg/m^2 ,
 P'' den Sättigungsdruck des Dampfes bei der Temperatur t , in kg/m^2 ,
 $T = 273 + t$ die absolute Temperatur des feuchten Gases, in $^\circ\text{C}$ abs.
 t die Temperatur des feuchten Gases, in $^\circ\text{C}$,
 v das spezifische Volumen des feuchten Gases bei der Temperatur t und dem
 Druck P , in m^3/kg ,
 v_L das spezifische Volumen des von Feuchtigkeit befreit gedachten Gases bei
 der Temperatur t und dem Teildruck P_L , in m^3/kg ,
 v_D das spezifische Volumen des in dem feuchten Gase enthaltenen Dampfes bei
 der Temperatur t und dem Teildruck P_D , in m^3/kg ,
 v'' das spezifische Volumen gesättigten Dampfes bei der Temperatur t , in m^3/kg ,
 R die Gaskonstante des feuchten Gases,
 R_L die Gaskonstante des von Feuchtigkeit befreit gedachten Gases,
 R_D die Gaskonstante des in dem feuchten Gase enthaltenen Dampfes,
 γ das spezifische Gewicht des feuchten Gases bei der Temperatur t und dem
 Druck P , in kg/m^3 ,
 γ_L das spezifische Gewicht des von Feuchtigkeit befreit gedachten Gases bei der
 Temperatur t und dem Teildruck P_L , in kg/m^3 ,
 γ_D das spezifische Gewicht des in dem feuchten Gase enthaltenen Dampfes bei
 der Temperatur t und dem Teildruck P_D , in kg/m^3 ,
 γ'' das spezifische Gewicht gesättigten Dampfes bei der Temperatur t , in kg/m^3 .

Die feuchte Luft werde, ebenso wie ihre beiden Bestandteile, als vollkommenes
Gas betrachtet, das der Boyle-Mariotteschen Zustandsgleichung

$$P \cdot v = R \cdot T \quad (1)$$

folgt. Es ergibt sich alsdann für den Dampfanteil

$$\gamma_D = \frac{1}{v_D} = \frac{P_D}{R_D \cdot T},$$

oder für das gewählte Beispiel mit

$$R_D = 47,06$$

für Wasserdampf

$$\gamma_D = \frac{2415}{47,06 (273 + 80)} = 0,145,$$

$$\gamma'' = \frac{1}{v''} = \frac{P''}{R_D \cdot T},$$

$$\gamma'' = \frac{4830}{47,06 (273 + 80)} = 0,290.$$

Das in 1 m^3 gesättigter Luft enthaltene Dampfgewicht ist doppelt so hoch wie
das vorhandene, vorausgesetzt, daß in beiden Fällen gleiche Temperatur herrscht.
Allgemein gilt

$$\frac{\gamma_D}{\gamma''} = \frac{P_D}{P''} = \varphi. \quad (2)$$

Das in der Raumeinheit enthaltene Dampfgewicht verhält sich zu
dem bei gleicher Temperatur möglichen Dampfgewicht wie der vor-
handene Teildruck des Dampfes zu dem der Temperatur entspre-
chenden Sättigungsdruck. Das Verhältnis $\frac{P_D}{P''}$ wird als relative Feuchtig-

keit oder

Feuchtigkeitsgrad φ

bezeichnet. Er beträgt im vorliegenden Beispiele

$$\varphi = \frac{2415}{4830} = 0,5.$$

Nach dem Daltonschen Gesetz gilt ferner

$$P = P_L + P_D. \quad (3)$$

Es folgt daher mit

$$P_L \cdot v_L = R_L \cdot T$$

$$\gamma_L = \frac{1}{v_L} = \frac{P - P_D}{R_L \cdot T} = \frac{P - \varphi \cdot P''}{R_L \cdot T}.$$

Dies ergibt für das Beispiel mit

$$R_L = 29,27$$

für trockene Luft

$$\gamma' = \frac{10000 - 2415}{29,27 (273 + 80)} = 0,734.$$

Das Verhältnis

$$\frac{\gamma_D}{\gamma_L} = \frac{R_L}{R_D} \cdot \frac{\varphi \cdot P''}{P - \varphi \cdot P''} = x \quad (4)$$

stellt das Feuchtigkeitsgewicht dar, das auf 1 kg trockenes Gas bei dem Gesamtdruck P , der den Sättigungsdruck P'' bestimmenden Temperatur t und dem Feuchtigkeitsgrad φ des Gases entfällt. Es wird als

Feuchtigkeitsgehalt x

bezeichnet. Für das Beispiel beträgt er

$$x = \frac{0,145}{0,734} = 0,198.$$

Im besonderen wird für wasserhaltige Luft

$$x = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot P''}{P - \varphi \cdot P''}.$$

Für den Sättigungszustand ergibt sich

$$\gamma_{L(\varphi=1)} = \frac{P - P''}{R_L \cdot T},$$

$$x_{(\varphi=1)} = \frac{\gamma''}{\gamma_{L(\varphi=1)}} = \frac{R_L}{R_D} \cdot \frac{P''}{P - P''},$$

oder mit den Zahlen des Beispiels

$$\gamma_{L(\varphi=1)} = \frac{10000 - 4830}{29,27 (273 + 80)} = 0,500,$$

$$x_{(\varphi=1)} = \frac{0,290}{0,500} = 0,580.$$

Aus dem Vergleich von γ_L und $\gamma_{L(\varphi=1)}$ folgt: Bei gleichbleibender Temperatur t und unverändertem Gesamtdruck P nimmt das in der Raumeinheit enthaltene Gewicht trockenen Gases mit zunehmendem Feuchtigkeitsgrad φ ab. Die Dampfaufnahme erfolgt auf Kosten einer Verdrängung des trockenen Gases. Der Feuchtigkeitsgehalt $x_{(\varphi=1)}$ des gesättigten Gases ist nicht etwa gleich dem doppelten des bei gleicher Temperatur für einen Feuchtigkeitsgrad $\varphi = 0,5$ geltenden Wertes, sondern größer.

Das spezifische Gewicht des feuchten Gases folgt zu

$$\begin{aligned}\gamma &= \gamma_L + \gamma_D = \gamma_L (1 + x) = \gamma_D \cdot \frac{1+x}{x}, \\ \gamma &= \frac{P_L}{R_L \cdot T} + \frac{P_D}{R_D \cdot T} = \frac{P}{R_L \cdot T} - \varphi \cdot P'' \left(\frac{1}{R_L} - \frac{1}{R_D} \right), \quad (5) \\ \gamma_{(\varphi=1)} &= \frac{P}{R_L \cdot T} - P'' \left(\frac{1}{R_L} - \frac{1}{R_D} \right).\end{aligned}$$

Das erste Glied der rechten Seite bezeichnet das spezifische Gewicht trockenen Gases bei der Temperatur t und dem Gesamtdruck P . Für wasserhaltige Luft gilt

$$\begin{aligned}\gamma &= \frac{P}{29,27 \cdot T} - 0,0129 \cdot \varphi \cdot P'', \\ \gamma_{(\varphi=1)} &= \frac{P}{29,27 \cdot T} - 0,0129 \cdot P''.\end{aligned}$$

Bei einer bestimmten Temperatur t und gleichem Gesamtdruck P wird das spezifische Gewicht wasserhaltiger Luft um so kleiner, je höher ihr Feuchtigkeitsgrad φ ist. Bei einem bestimmten Gesamtdruck P ist feuchte Luft stets leichter als trockene Luft gleicher Temperatur.

Für das Zahlenbeispiel ergibt sich

$$\gamma = 0,145 + 0,734 = 0,879$$

und für gesättigte Luft

$$\gamma_{(\varphi=1)} = 0,290 + 0,500 = 0,790.$$

Je größer der Druck P der Umgebung ist, um so höher liegt der bei einer bestimmten Temperatur t und einem bestimmten Dampfdruck $P_D = \varphi \cdot P''$ verbleibende Teildruck des trockenen Gases $P - \varphi \cdot P''$. Die durch 1 kg trockenes Gas tragbare Feuchtigkeitsmenge wird daher um so kleiner, je höher der Druck der Umgebung liegt. Wird $P = P''$, also gleich dem der gegebenen Temperatur entsprechenden Sättigungsdruck des Dampfes, so folgt die Beziehung

$$P_{L(\varphi=1)} = P'' - P'' = 0.$$

Für gesättigte Luft wird alsdann der Teildruck des Dampfes gleich dem Gesamtdruck, der Teildruck des trockenen Gases verschwindet, die Aufnahmefähigkeit wird unendlich groß. Der Verdunstungsvorgang geht damit in die Verdampfung über. Die bei der Verdunstung als Träger des Dampfes nötige Luft wird zum störenden Fremdkörper.

An sich besteht die Möglichkeit, statt Luft andere Gase für Abführung der Feuchtigkeit zu verwenden, wenn sie genügend weit von ihrem Sättigungszustande entfernt sind und sich in flüssigem Zustande nicht mit der zu entziehenden Flüssigkeit mischen. In ausgiebigem Maße werden Feuergase zur Trocknung benutzt. Wenn im folgenden daher von „Luft“ als Trockenmittel gesprochen wird, so ist hierunter bei den allgemeinen Erörterungen ein als Trockenmittel geeignetes Gas zu verstehen, ebenso wie „Wasser“ und „Wasserdampf“ als Feuchtigkeitsbestandteil nur ein bezeichnendes Beispiel für die mögliche Flüssigkeits- bzw. Dampfart darstellt. Bei den zahlenmäßigen Untersuchungen

muß selbstverständlich die besondere Gas- und Feuchtigkeitsart berücksichtigt werden.

Die Verdunstung kann bei feuchten Körpern fester oder flüssiger Form zur Anwendung gelangen. Sie bedingt Wärmezufuhr an das Gut, um seinen Flüssigkeitsgehalt in Dampf zu verwandeln, außerdem Luft, um den Dampf aufzunehmen. Die Wärme wird entweder nur der als Dampfträger bestimmten Luft entzogen oder unmittelbar nur auf das Gut übertragen, das seinerseits mittelbar die Luft erwärmt und ihre Aufnahmefähigkeit für Dampf erhöht; oder es kann die Wärmezufuhr gleichzeitig sowohl an Gut als auch an Luft unmittelbar erfolgen. Die Erwärmung des Gutes geschieht auf einem der unter a) gekennzeichneten Wege. Für die Erwärmung der Luft kommen die bekannten Verfahren der Luftheizung in Betracht.

Der äußere Wärmeaufwand für die Verdunstung schwankt zwischen Null — natürliche Lufttrocknung — und positiven Werten, deren Höhe von den Temperatur- und Feuchtigkeitsverhältnissen der Luft abhängt.

Nach Einleitung des Verdunstungsvorganges ist die Luft in der Grenzschicht gegen die freie Fläche des feuchten Gutes gesättigt. Die Verdunstungswirkung wird aufrechterhalten durch Diffusion des Dampfes, der aus dieser Grenzschicht in entferntere, nicht gesättigte Schichten der Luft tritt. In gleichem Sinne wirkt die natürliche oder durch künstliche Mittel verstärkte Bewegung der Luft über das Gut.

Bei reiner Lufttrocknung beruht die Wärmeübertragung hauptsächlich auf Oberflächenwirkung. Die Verdunstung erfolgt vorzugsweise an der freien Fläche des Gutes. Diese wird daher bei reiner Lufttrocknung stärker entfeuchtet als die tieferen Schichten.

Bei Erwärmung durch erhitzte Flächen ist die Temperatur und damit die Dampfspannung des Gutes an der beheizten Seite höher als an der freien. Es strömt daher Dampf von der unmittelbar erwärmten nach der freien Oberfläche des Gutes, um dort in die umgebende Luft auszutreten. Das Gut trocknet an der beheizten Seite in höherem Maße aus.

Für einen bestimmten Körper wird einseitige Übertrocknung um so merkbarer, je größer die Schichtstärke des Gutes ist. Durch weitgehende Ausbreitung und umwälzende Bewegung des Gutes kann der Gefahr begegnet werden.

c) Kondensieren. Bei feuchten Gasen bietet Abkühlung durch einen Körper, dessen Temperatur tiefer als der Taupunkt des feuchten Gases liegt, ein Mittel zur Trocknung. Der Taupunkt ist hierbei durch die Temperatur gekennzeichnet, bei der die Teilspannung des Dampfes dem Sättigungsdruck entspricht. Die Feuchtigkeit schlägt sich in flüssiger, bei Anwendung entsprechend tiefer Temperaturen in fester Form nieder. Der Betrag der zu entziehenden Wärme entspricht in der Hauptsache der Verminderung des Wärmeinhaltes von dem Betrag der Dampfwärme auf den Wert der Flüssigkeitswärme, gegebenenfalls zuzüglich Erstarrungswärme der niederschlagenden Feuchtigkeit.

3. Physikalisch-chemische Verfahren.

Bestimmte feuchte Stoffe von fester Form und Flüssigkeiten, die wahre oder allgemeine Lösungen darstellen, wirken hygroskopisch, d. h. die Dampfspannung über solchen Körpern ist niedriger als die bei gleicher Temperatur dem Lösungsmittel zukommende Sättigungsspannung P'' . Es ist daher möglich, feuchte Gase durch Überleiten über hygroskopische Körper, z. B. Salze, Zellulose, Silica-Gel, Schwefelsäure, zu trocknen, und zwar so lange, bis die Anreicherung mit Feuchtigkeit schließlich den Spannungsunterschied aufhebt.

Die bei der Absorption entstehende Wärme ist gleich der Summe der — positiven oder negativen — Lösungswärme und der Verflüssigungswärme des entzogenen Dampfes. Das Absorptionsmittel bedarf daher einer Kühlung. Auf der anderen Seite ist Zufuhr von Wärme an das Gut in einem Maße erforderlich, das in der Hauptsache der Verdampfwärme der zu entziehenden Flüssigkeit entspricht.

Von den beschriebenen Trockenverfahren soll hier in erster Linie das Verdunsten behandelt werden. Bezüglich der Verdampfanlagen beschränken sich die nachstehenden Ausführungen auf die Fälle, bei denen das Gut von vornherein in fester Form vorliegt oder aus Lösungen in fester Form zurückbleibt. Verfahren, bei denen reine Flüssigkeiten restlos verdampfen oder Lösungen unter Beibehaltung ihrer flüssigen Form teilweise eingedampft werden, hat der Verfasser in der von ihm neu bearbeiteten 7. Auflage von Hausbrand's Verdampfen, Kondensieren und Köhlen behandelt, auf die verwiesen sei. Maßgebend für die Trennung des Stoffes war das Bestreben, die Sondergebiete so zu umgrenzen, daß für jedes einzelne gleichartige technologische Gesichtspunkte gelten und für deren Durchführung ähnliche Ausführungsformen in Betracht kommen.

B. Bindung und Art der Feuchtigkeit.

Die in Körpern fester oder flüssiger Form enthaltene Feuchtigkeit besteht aus

1. reinen Flüssigkeiten, in erster Linie
 - a) Wasser, in Ausnahmefällen
 - b) anderen mehr oder minder flüchtigen Flüssigkeiten,
2. Lösungen, wobei das Lösungsmittel in der Regel durch Wasser gebildet wird und es sich entweder um
 - a) kristallisierende Lösungen oder
 - b) kolloidale Lösungen handelt.

Nach Art der Bindung zwischen Feuchtigkeit und Trockenstoff des Gutes ist zu unterscheiden:

- I. Haftflüssigkeit,
- II. Kapillarflüssigkeit,
- III. Quellflüssigkeit.

Außerdem kann die Feuchtigkeit als chemisch gebundenes (Kristall-) Wasser auftreten. Seine Entfernung bedeutet Zerstörung der Kristalle

und ist nicht als physikalische Trocknung in dem hier behandelten Sinne aufzufassen.

Die für die folgenden Betrachtungen hiernach verbleibenden drei Flüssigkeitsformen gehen in Wirklichkeit meist ineinander über. Die durchgeführte scharfe Trennung entspricht Grenzzuständen und bezweckt Klärung der maßgebenden grundsätzlichen Beziehungen.

1. Reine Flüssigkeiten.

a^I) Haftwasser. Das Haftwasser tritt z. B. auf der Oberfläche von Metallplatten auf. Seine Verdampfung oder Verdunstung erfolgt über einer geschlossenen Fläche reinen Wassers. Um Haftwasser handelt es sich auch bei nassem grobstückigem, wasserundurchlässigem Gut. Bedingung ist, daß die Schichtung die feuchten Oberflächen in freier Berührung mit der Luft läßt, also die Bildung von zusammenhängenden, durch zwei benachbarte Oberflächen begrenzten Wasseradern vermieden wird. Schließlich tritt das Haftwasser auch bei Schichtung feinstückigen Gutes und in dem Zwischengewebe von zellenartig aufgebauten Körpern auf, sobald die Wasseradern im Verlaufe der Trocknung sich in einseitig haftende Wasserflecken oder Wassertropfen auflösen.

Die Hemmungen, die sich dem Verdampfen oder Verdunsten des in tieferen Schichten befindlichen Haftwassers entgegensetzen, sind Strömungswiderstände. Sie spielen praktisch keine Rolle, solange nicht durch übermäßige Beschleunigung der Trocknung die Strömungsgeschwindigkeit hoch wird. Auf alle Fälle genügt die geringste Steigerung der Temperatur über die dem Druck der Umgebung entsprechende Siedetemperatur, um das Haftwasser restlos zu verdampfen, bzw. Anwendung von ungesättigter Luft beliebigen Feuchtigkeitsgehaltes, um seine vollständige Verdunstung herbeizuführen. Die für die Trockenwirkung bezeichnende Eigenschaft des Haftwassers liegt darin, daß bei jeder Temperatur seine Dampfspannung dem Sättigungsdruck P'' entspricht.

b^I) Haftflüssigkeit, nicht Wasser. Liegt statt Wasser eine andere Haftflüssigkeit, z. B. Benzin vor, so ändern sich die Verhältnisse nur insofern, als die über der Flüssigkeit herrschende Sättigungsspannung höher oder niedriger liegt als der Sättigungsdruck von Wasser gleicher Temperatur. Höhere Sättigungsspannung ist gleichbedeutend mit niedrigerem Siedepunkt und bewirkt, daß für das Verdampfen Anwärmung auf tiefere Temperaturen genügt und umgekehrt. Das Verdunsten wird nach wie vor dadurch bedingt, daß die trocknende Luft nicht gesättigt sein darf. Als Sättigungsmittel der Luft kommt hierbei nicht der in ihr im allgemeinen enthaltene Wasserdampf, sondern Dampf aus der dem Gut zu entziehenden Flüssigkeit in Frage, vorausgesetzt, daß sich im flüssigen Zustande der zu entziehende Stoff mit Wasser nicht mischt, wie dies z. B. bei Benzin zutrifft, während bei dem mit Wasser in Lösung gehenden Alkohol die Wasserdampfspannung der Luft eine Rolle spielt.

a^{II}) Kapillarwasser. Bei feinstückiger Schichtung wasserundurchlässiger Körper, z. B. Quarzsand, und stark wasserhaltigen, engzelligen,

festen Körpern ist ein Teil des Wassers in geschlossenen Adern festgehalten, die im ganzen Umfang durch feste Wände begrenzt sind und sich bis zur Oberfläche des Körpers ausdehnen, um dort in das einseitig festgehaltene Haftwasser einzumünden. Auf diese Wasseradern wirken die kapillaren Kräfte im Sinne einer Förderung des Wassers von den inneren Schichten nach der Oberfläche, sobald das Haftwasser an der Einmündungsstelle des Kapillarkanals auf der Oberfläche verschwunden ist. Voraussetzung ist, daß in den tieferen Schichten oder auch an Stellen der Oberfläche, mit denen das entgegengesetzte Ende des Kapillarkanals in Verbindung steht, noch genügend Wasser vorhanden ist, um die Kapillarader aufrechtzuerhalten. Zerreißen mit fortschreitender Trocknung die Kapillaradern, so wird das zuvor in Zugspannung gehaltene Kapillarwasser zu innerem spannungslosem Haftwasser.

Die Kapillarwirkung wird einerseits durch die Kapillarkonstante des Wassers bei Benetzung eines Körpers der gerade vorliegenden Beschaffenheit bedingt; andererseits nimmt sie zu, wenn die Flüssigkeitsmenge mit Verkleinerung der Korngröße bzw. Zusammendrängen der Bindegewebeschichten sich verkleinert.

Hieraus folgt, daß in bezug auf die Trockenwirkung das Kapillarwasser sich nicht ungünstiger verhält als das Haftwasser, d. h. daß sein Verdampfen bei der geringsten Erhöhung der Temperatur über den Siedepunkt des Wassers, sein Verdunsten mit ungesättigter Luft beliebigen Feuchtigkeitsgrades möglich ist.

b^{II}) Kapillare Flüssigkeit, nicht Wasser. Unter Berücksichtigung des verschiedenen Siedepunktes gelten hierfür die gleichen Gesichtspunkte wie für Kapillarwasser.

a^{III}) Quellwasser. Während Haft- und Kapillarwasser mit der Oberfläche in Verbindung stehen, ist das in zellenartig aufgebauten festen Körpern enthaltene Quellwasser durch die Zellenwände eingeschlossen. Diese sind sowohl für das Wasser als auch die darüber eingehenden gesättigten Wasserdämpfe durchlässig. Ein Ausgleich des hydrostatischen Druckes durch sie hindurch findet jedoch nicht statt. Die Ursache für den Durchtritt des Quellwassers und der Wasserdämpfe durch die Zellenwand bildet die Diffusionskraft. Sie ermöglicht das Auftrocknen des Quellwassers, sobald das Haft- und Kapillarwasser an der äußeren Zellenwand ganz oder teilweise verschwunden ist. Wegen der geringen Durchtrittsgeschwindigkeit des Quellwassers kommt im praktischen Falle fast nur die Diffusionskraft der Quellwasserdämpfe in Betracht.

Die Diffusionsgeschwindigkeit des Dampfes hängt vor allem von dem Unterschiede der beiderseitigen Dichte ab. Auftrocknen des Quellwassers ist bei unbegrenzter Trockendauer, unter Annahme eines beliebig geringen Dichteunterschiedes zwischen dem Satttdampf im Zelleninneren und dem Dampfgehalt der Umgebung, möglich. Die kleinste Erhöhung der Temperatur über den Siedepunkt des Wassers bewirkt daher ein Verdampfen des Quellwassers. Für das Verdunsten des Quellwassers ist ungesättigte Luft beliebigen Feuchtigkeitsgrades anwendbar. Zu den Strömungswiderständen, die auch das in tieferen Schichten sitzende Kapillarwasser beim Verdampfen oder Verdunsten findet,

treten bei dem Quellwasser die Diffusionswiderstände hinzu. Ihre Höhe hängt vor allem von den Körpereigenschaften der Zellenwand ab. Die Widerstände haben um so geringeren Einfluß, je kleiner die Trockengeschwindigkeit ist.

b^{III}) Quellflüssigkeit, nicht Wasser. Besteht die Quellflüssigkeit nicht aus Wasser, so ändern sich die Verhältnisse grundsätzlich nicht, wenn die umgebende Luft nur Dampf der dem Zelleninnern zu entziehenden Quellflüssigkeit besitzt und damit nicht vollständig gesättigt ist. Der in der Luft enthaltene Wasserdampf bleibt darüber hinaus ohne Einfluß, wenn die Quellflüssigkeit sich mit Wasser nicht mischt. Geht sie dagegen mit Wasser eine Lösung ein, so gewinnt das Diffusionsvermögen der aus der Quellflüssigkeit gebildeten Dämpfe in Wasserdampf Bedeutung.

2. Lösungen.

a^I) Kristallisierende Lösung als Haftflüssigkeit. Tritt das Haftwasser als Lösungsmittel einer kristallisierenden Lösung auf, so liegt bei einer bestimmten Temperatur die Dampfspannung über der Lösung niedriger, als dem Sättigungsdruck P'' reinen Wassers entspricht. Das Verdampfen des Wassers aus der Lösung erfordert daher Erwärmung auf eine Temperatur, die höher liegt als die durch den Druck der Umgebung bestimmte Siedetemperatur reinen Wassers. Die Verdunstung verlangt Anwendung ungesättigter Luft mit einem so niedrigen Feuchtigkeitsgehalt, daß die Dampfteilspannung $\varphi \cdot P''$ kleiner bleibt als der über der Lösung bei der gleichen Temperatur herrschende Dampfdruck.

Mit fortschreitender Trocknung nimmt der Sättigungsgrad der Lösung zu. Gleichzeitig wächst der Unterschied zwischen der über der Lösung herrschenden Dampfspannung und dem Sättigungsdruck P'' des reinen Wassers. Die Verdampfung fordert eine stärkere Überhöhung der Temperatur über die Siedetemperatur des Wassers, die Verdunstung bedingt eine weitergehende Verringerung des Feuchtigkeitsgrades φ der Luft, bis schließlich die Lösung den Sättigungszustand und ihre Dampfspannung den Mindestwert erreicht.

Während bei festen Körpern diese Eigenschaften kristallisierender Lösungen nur einen Teileinfluß auf den ganzen Trockenvorgang ausüben, der daneben noch von den später behandelten Eigenschaften der als Kapillar- und Quellflüssigkeit auftretenden Lösung abhängt, beherrschen sie den ganzen Trockenvorgang, wenn kristallisierende Lösungen einzudampfen oder durch Verdunstung des Wasseranteiles zu trocknen sind.

Die Löslichkeit hängt von der Temperatur ab und nimmt mit ihr in der Regel zu. Der Sättigungszustand der Lösung wird im allgemeinen bei einem größeren Gehalt des Lösungsmittels an gelösten Stoffen, d. h. später, erreicht, wenn die Trocknung bei höheren Temperaturen vor sich geht. Für verschiedene Stoffe schwankt die Löslichkeit in weiten Grenzen. Bei 50° entfallen im Sättigungszustand auf 100 Gtl. Wasser z. B. etwa 260 Gtl. Rohrzucker, dagegen nur etwa 37 Gtl. NaCl.

Die nach Erreichung des Sättigungszustandes aus der Lösung ausfallenden Bodenkörper sind wasserfreie oder wasserhaltige Kristalle. Im ersten Falle vollzieht sich die weitere Trocknung bis zur vollkommenen Wasserfreiheit unter den durch den Sättigungszustand der Lösung gegebenen Grenzbedingungen. Im zweiten Falle ist der Trockenvorgang als beendet anzusehen, sobald nur noch das in den Kristallen chemisch gebundene Wasser vorhanden ist.

Wenn die als Haftflüssigkeit auftretende Lösung erhebliche Dicke besitzt, bzw. die Lösung das zu trocknende Gut selbst darstellt, erstreckt sich die Wirkung des Trockenvorganges zunächst nur auf die Schicht, die beim Verdampfen dem unmittelbaren Einfluß des erwärmenden Körpers ausgesetzt ist, beim Verdunsten die Grenzfläche gegen die trocknende Luft bildet. Die weitere Ausbreitung der Wirkung wird durch Diffusion gefördert, die auf einen Ausgleich der verschiedenen Lösungsstärken hinarbeitet. Wegen der geringen Diffusionsgeschwindigkeit spielt sie im allgemeinen keine Rolle. In ähnlichem Sinne arbeitet die Mischkraft des mit zunehmender Lösungsstärke wachsenden spezifischen Gewichtes, wenn die Trocknung von der Oberfläche her erfolgt. Ausschlaggebend wirkt jedoch die Förderkraft der beim Eindampfen an der Heizfläche sich bildenden Dampfblasen und die Mischkraft mechanischer Rührvorrichtungen.

b^I) Kolloidale Lösung als Haftflüssigkeit. Auch über kolloidalen Lösungen herrscht eine niedrigere Dampfspannung, als bei der gegebenen Temperatur dem Sättigungsdruck P'' reinen Wassers entspricht. Die für die Trockenwirkung in Betracht kommenden Eigenschaften sind daher grundsätzlich die gleichen, wie zuvor erörtert. Während jedoch mit Erreichung der Sättigung bei kristallisierenden Lösungen ein Grenzzustand eintritt, findet bei kolloidalen Lösungen ein allmählicher Übergang von flüssiger über halbfeste in feste Form statt.

a^{II}) Kristallisierende Lösung als Kapillarflüssigkeit. Wie bei reinem Wasser, fördert auch bei kristallisierenden Lösungen die Kapillarkraft der in geschlossenen Adern festgehaltenen Flüssigkeit den Nachschub nach der Oberfläche. Die Auftrocknung des in der Kapillarflüssigkeit enthaltenen Wassers erfolgt daher zunächst grundsätzlich unter gleichen Bedingungen wie die der Haftflüssigkeit. Die an die Oberfläche geförderte Kapillarflüssigkeit bewirkt hier eine Anreicherung mit dem gelösten Stoff, die schließlich zur Verkrustung und Verhornung der Oberfläche führen kann.

b^{II}) Kolloidale Lösung als Kapillarflüssigkeit. Solange die kolloidale Lösung die Eigenschaft einer benetzenden Flüssigkeit behält, besteht gegenüber kristallisierender Lösung als Kapillarflüssigkeit kein grundsätzlicher Unterschied.

a^{III}) Kristallisierende Lösung als Quellflüssigkeit. Die Zellenwände der zellenartig aufgebauten festen Körper sind bei kristallisierenden Lösungen durchlässig für Lösungsmittel und gelösten Stoff. Nimmt daher mit fortschreitender Trocknung die Sättigungsstärke der durch Haft- und Kapillarflüssigkeit gebildeten Lösung zu, so wirken Diffusion und Osmose durch die Zellenwände hindurch in beiden Richtungen

ausgleichend. Die Diffusion erstreckt sich hierbei sowohl auf das eingeschlossene flüssige Lösungsmittel als auch die darüber lagernden Dämpfe, die Osmose auf den gelösten Stoff außerhalb der Zellenwände. Wegen der geringen Ausgleichgeschwindigkeit tritt die Wirkung der Osmose und, soweit sie den flüssigen Teil betrifft, auch der Diffusion bei der zeitlich begrenzten technischen Trocknung gegenüber der Diffusion des Dampfanteils der Quellflüssigkeit zurück. Unter dem Einfluß der letzten erfolgt bei genügend langer Trockenzeit Auftrocknung der Quellflüssigkeit bei grundsätzlich gleichen Bedingungen, wie sie für die Haft- und Kapillarflüssigkeit gelten.

b^{III}) Kolloidale Lösung als Quellflüssigkeit. Bei kolloidalen Lösungen fehlt die osmotische Kraft. Der bei kristallisierenden Lösungen eintretende Ausgleich des gelösten Stoffes durch die Zellenwände entfällt. Es verbleibt jedoch die einseitig wirkende Diffusionskraft des in den Zellen eingeschlossenen Lösungsmittels und seines Dampfes. Die durch Wegfall der osmotischen Kraft sich ergebende Veränderung der Trockengeschwindigkeit ist praktisch ohne Bedeutung. Die Trocknungsbedingungen erfahren daher gegenüber kristallisierender Lösung als Quellflüssigkeit keine grundsätzliche Verschiebung.

Besteht das Lösungsmittel nicht, wie bisher angenommen, aus Wasser, sondern aus einer anderen mehr oder minder flüchtigen Flüssigkeit, so ändert sich die für das Verdampfen erforderliche Anwärmetemperatur bzw. der für das Verdunsten zulässige höchste Feuchtigkeitsgehalt der Luft. Beide sind nach wie vor durch die Dampfspannung über der Lösung bedingt, die auch hier niedriger liegt als die Sättigungsspannung des reinen Lösungsmittels bei gegebener Temperatur.

In vielen Fällen besteht das Lösungsmittel aus einer Mischung von Wasser und anderen Flüssigkeiten, z. B. Ölen. Neben der Auftrocknung des Wassers läuft alsdann eine Austreibung anderer Stoffe einher. Sie ist unerwünscht, wenn es sich z. B. um leicht flüchtige Geschmacksstoffe von Lebensmitteln handelt, läßt sich jedoch um so weniger vermeiden, je niedriger der Siedepunkt dieses Lösungsmittelanteils liegt.

Das Lösungsmittel beeinflußt die Löslichkeit. Besteht es z. B. aus Wasser, so entsprechen bei 25° etwa 36 Gtl. NaCl in 100 Gtl. Lösungsmittel dem Sättigungszustande. Dagegen verringert sich dieser Gehalt auf etwa 19, 11, 4 Gtl. NaCl, wenn als Lösungsmittel wässriger Äthylalkohol mit 25, 50, 75 Gew.-% verwendet wird.

3. Feuchte und hygroskopische Körper.

Unter Zusammenfassung der im vorstehenden beschriebenen Möglichkeiten lassen sich zwei Zustände des Gutes unterscheiden: Es gilt

1. als „feucht“, wenn die an seiner Oberfläche herrschende Dampfspannung bei unendlich kleiner Trockengeschwindigkeit gleich dem Sättigungsdruck der reinen Flüssigkeit bei der vorliegenden Temperatur ist,
2. als „hygroskopisch“, wenn die an seiner Oberfläche herrschende Dampfspannung bei unendlich kleiner Trockengeschwindigkeit niedriger

ist als der Sättigungsdruck der reinen Flüssigkeit bei der vorliegenden Temperatur.

Hieraus ergibt sich, daß Körper, bei denen die Feuchtigkeit in Form einer reinen Flüssigkeit auftritt, stets „feucht“ bleiben. Denn die z. B. bei Auftrocknung reiner Quellflüssigkeit sich ergebenden Widerstände sind abhängig von der Zeit und verschwinden, wenn die Trockendauer ins Unendliche ausgedehnt wird. Bildet dagegen die Flüssigkeit mit Trockenstoffteilen eine allgemeine oder wirkliche Lösung, so wirkt das Gut hygroskopisch. Der maßgebende Druckunterschied wächst mit zunehmender Lösungsstärke, d. h. fortschreitender Trocknung. Bei geringer Lösungsstärke ist er so niedrig, daß er praktisch vernachlässigt werden kann. Das Gut zeigt sich erst dann ausgesprochen hygroskopisch, wenn sein Feuchtigkeitsgehalt eine gewisse Grenze unterschreitet. Ein und dieselbe Gutsart kann daher bei hohem Feuchtigkeitsgehalt als feucht, bei niedrigem Feuchtigkeitsgehalt als hygroskopisch gelten. Der Feuchtigkeitsgehalt, der kennzeichnend ist für den deutlichen Übergang vom feuchten in den hygroskopischen Zustand, bestimmt den hygroskopischen Punkt.

Es bezeichne

- t die Temperatur des Gutes, in $^{\circ}\text{C}$,
- \mathfrak{P} den Dampfdruck über dem Gut bei der Temperatur t , in kg/m^2 ,
- γ_{G} das Raumgewicht des Gutes, in kg/m^3 ,
- γ_{x} das Raumgewicht des im Gut enthaltenen Trockenstoffes, in kg/m^3 ,
- γ_{w} das Raumgewicht der im Gut enthaltenen Feuchtigkeit, in kg/m^3 ,
- φ_{G} die relative Feuchtigkeit oder den Feuchtigkeitsgrad des Gutes, verstanden als das auf 1 kg feuchtes Gut entfallende Feuchtigkeitsgewicht,
- ε den Feuchtigkeitsgehalt des Gutes, verstanden als das auf 1 kg im Gut enthaltenen Trockenstoff entfallende Feuchtigkeitsgewicht,
- ε_e den Feuchtigkeitsgehalt des Gutes im hygroskopischen Punkt.

Es ergibt sich alsdann

$$\gamma_{\text{G}} = \gamma_{\text{x}} + \gamma_{\text{w}},$$

$$\varphi_{\text{G}} = \frac{\gamma_{\text{w}}}{\gamma_{\text{G}}} = \frac{\gamma_{\text{w}}}{\gamma_{\text{x}} + \gamma_{\text{w}}} = \frac{\frac{\gamma_{\text{w}}}{\gamma_{\text{x}}}}{1 + \frac{\gamma_{\text{w}}}{\gamma_{\text{x}}}},$$

$$\varepsilon = \frac{\gamma_{\text{w}}}{\gamma_{\text{x}}} = \frac{\gamma_{\text{w}}}{\gamma_{\text{G}} - \gamma_{\text{w}}} = \frac{\frac{\gamma_{\text{w}}}{\gamma_{\text{G}}}}{1 - \frac{\gamma_{\text{w}}}{\gamma_{\text{G}}}} = \frac{\varphi_{\text{G}}}{1 - \varphi_{\text{G}}}, \quad (6)$$

$$\varphi_{\text{G}} = \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon}. \quad (7)$$

Es gilt ferner

$$\frac{\mathfrak{P}}{P''} = 1 \text{ bei feuchtem Gut,} \quad (8)$$

$$\frac{\mathfrak{P}}{P''} < 1 \text{ bei hygroskopischem Gut für } \chi < \chi_e. \quad (9)$$

4. $\frac{\mathfrak{P}}{P''}$ - χ -Bild.

Werden hygroskopische Körper in den Bereich der Untersuchung gezogen, so ist es nötig, die Veränderung des Verhältnisses $\frac{\mathfrak{P}}{P''}$ mit dem Feuchtigkeitsgehalt χ für Werte $0 < \chi < \chi_e^{\mathfrak{P}}$ festzulegen. Dies läuft darauf hinaus, dem Gut ein $\frac{\mathfrak{P}}{P''}$ - χ -Bild zuzuordnen. Die physikalischen Unterlagen hierfür liegen für verschiedene Körper vor. Soweit sie fehlen, sollte ihre Ermittlung der Festlegung des Trockenvorganges stets vorausgehen. Aus ihm ergibt sich für ein bestimmtes Gut und einen beliebigen Feuchtigkeitsgehalt χ das Verhältnis $\frac{\mathfrak{P}}{P''}$. Wird P'' der für

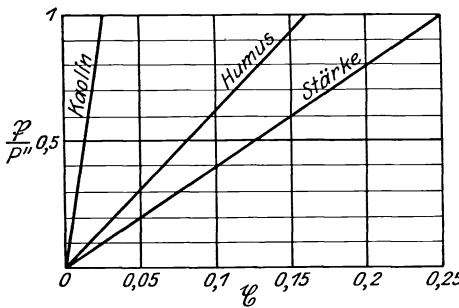


Abb. 1. $\frac{\mathfrak{P}}{P''}$ - χ -Bild für Kaolin, Humus, Stärke.

die aufzutrocknende Flüssigkeit geltenden Dampfdruck als Sättigungsdruck bei der Temperatur t entnommen, so folgt damit der Wert $\frac{\mathfrak{P}}{P''} \cdot P'' = \mathfrak{P}$. Erkennzeich-

net zusammen mit t und χ den Zustand des Gutes. Aus Abb. 1 läßt sich z. B. ablesen: Stärke ist feucht, wenn ihr Wassergehalt $\chi = 0,25$ oder mehr beträgt. Der Dampfdruck \mathfrak{P} über wasserhaltiger Stärke ist bei einem Wassergehalt von 25% oder mehr

gleich dem Sättigungsdruck P'' des Wassers. Bei niedrigerem Wassergehalt verändert sich das Verhältnis $\frac{\mathfrak{P}}{P''}$ linear mit χ . Die wichtige lineare

Beziehung zwischen $\frac{\mathfrak{P}}{P''}$ und χ , die sich für wasserhaltige Stärke aus den Beobachtungen von Hoffmann¹ ergibt, findet auch bei anderen Körpern eine Bestätigung. Die von Wollny² durchgeführten Untersuchungen mit Humus als organischem, Kaolin als anorganischem Stoff ergaben z. B. den in Abb. 1 dargestellten gleichfalls linearen Verlauf. Der für den hygroskopischen Punkt bezeichnende Abszissenwert liegt bei Humus mit einem Wassergehalt $\chi_e = 0,16$, bezogen auf wasserfreien Boden, in ähnlicher Höhe wie bei Stärke, bei Kaolin mit etwa $\chi_e = 0,025$ dagegen wesentlich niedriger. Bei Kaolin zeigt sich die hygroskopische

¹ Hoffmann: Die Getreidespeicher.

² Wollny: Forschungen auf dem Gebiete der Agrikultur-Physik.

Wirkung erst nach einer viel weitergehenden Entwässerung als bei Humus oder Stärke.

Der lineare Verlauf kann nicht als allgemeine Regel angenommen werden, stellt vielmehr eine mehr oder weniger zulässige Annäherung an die tatsächlichen Verhältnisse dar. Das gleiche gilt für die bisher stillschweigend angenommene Unabhängigkeit des hygroskopischen Verhaltens von der Temperatur.

Schlenk¹ teilt als das Ergebnis der Untersuchung zweier verschiedener Malzarten den in Abb. 2 dargestellten Zusammenhang mit. Gegenüber dem gestrichelten linearen Verlauf scheint hiernach bei niedrigem Luftfeuchtigkeitsgrad die hygroskopische Eigenschaft stärker zu sein.

Bei niedrigem Feuchtigkeitsgehalt des Malzes liegt der Dampfdruck tiefer, als er sich aus dem linearen Verlauf ergäbe. Schlenk gibt die Beobachtungstemperatur nicht an und weist darauf hin, daß den Ergebnissen keine große Genauigkeit zukommt. Daß verschiedene Sorten von Malz sich in hygroskopischer Hinsicht unterscheiden, erscheint möglich. Wegen des hohen Gehalts an Stärke ist von vornherein zu erwarten, daß sich Malz hygroskopisch ähnlich verhält wie Stärke.

Genaue Untersuchungen, die nach Anweisung des Verfassers durch die Staatliche Prüfstelle in Malang (Niederländisch Indien) an frisch geernteten Kaffeekirschen und entfleischten, vergorenen und gewaschenen Kaffeebohnen durchgeführt wurden, lieferten die in Abb. 3 wiedergegebenen Beziehungen. Der lineare Verlauf gilt hiernach genügend genau bis zu einem Feuchtigkeitsgehalt von etwa 0,1 und deckt sich einigermaßen mit der für Humus ermittelten Geraden. Hier wurde im Gegensatz zu den Angaben von Schlenk das hygroskopische Verhalten beiderlei Gutes trotz der durch die besondere Vorbehandlung verschiedenen Eigenart übereinstimmend gefunden.

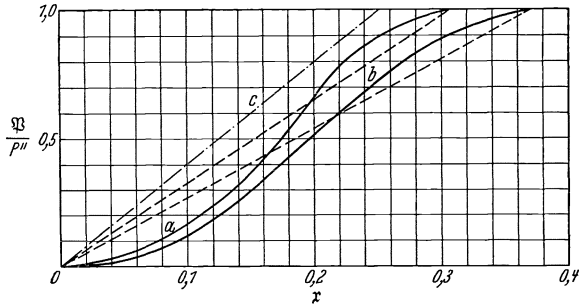


Abb. 2. $\frac{p}{P''}$ - ξ -Bild für Malz (Schlenk).
a, b Malz verschiedener Herkunft, c Stärke.

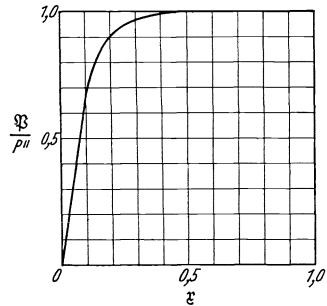


Abb. 3. $\frac{p}{P''}$ - ξ -Bild für Kaffee und Kaffeekirschen.

¹ Schlenk: Das Darren von Malz. Wschr. Brauerei 1928.

Nach Miller¹ ergeben sich für zelluloseartige Stoffe die Zusammenhänge der Abb. 4. Der hygrokopische Punkt liegt hiernach für

Holzfaser	bei einem Feuchtigkeitsgehalt	$\chi_e \sim 0,20$
Flachsfaser	„ „ „	$\chi_e \sim 0,145$
Rohrfaser	„ „ „	$\chi_e \sim 0,15$
Lumpenfilz	„ „ „	$\chi_e \sim 0,13$

Die Kurven verlaufen durchaus verschiedenartig. Der lineare Zusammenhang findet sich nur für Rohrfaser bestätigt und ist hier deshalb nicht voll beweiskräftig, weil gerade dieses Muster durch Vorbehandlung eine Einbuße an Feuchtigkeitsaufnahme-fähigkeit erlitten hatte. An späterer Stelle wird darauf hingewiesen, daß die Feuchtigkeitsaufnahme getrockneten Gutes von dem Grad der vorausgehenden Trocknung und der Führung des Trockenvorganges abhängt. Aus diesem Grunde sind Beobachtungen, die, wie die Millerschen, das hygrokopische Ver-

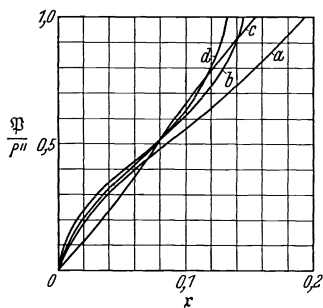


Abb. 4. $\frac{p}{p_0}$ - χ -Bild für zelluloseartige Stoffe (Miller). a Holzfaser, b Flachsfaser, c Rohrfaser, d Lumpenfilz.

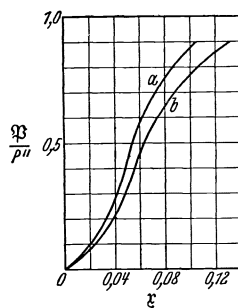


Abb. 5. $\frac{p}{p_0}$ - χ -Bild für Papier (Morrison). a Zeitungspapier, b Lumpenpapier.

halten zahlenmäßig aus der Zunahme des Feuchtigkeitsgehaltes nach vorausgehender Trocknung feststellen, mit Vorsicht zu verwenden. Sie liefern in der Regel zu niedrige Werte des Feuchtigkeitsgehalts, lassen daher den untersuchten Stoff in schwächerem Grade hygrokopisch erscheinen, als seinem Verhalten bei der Trocknung entspricht. Die Millerschen Untersuchungen lassen außerdem auf Beobachtungsfehler schließen, weil die Krümmung der Kurven umgekehrt verläuft wie bei allen übrigen Feststellungen. Werden hiermit die Kurven verglichen, die Morrison² nach Abb. 5 für das hygrokopische Verhalten von Zeitungs- und Lumpenpapier angegeben hat, so kommt diesen größere Wahrscheinlichkeit zu als den entsprechenden Linienzügen für Holzfaser und Lumpenfilz der Abb. 4.

Das Ergebnis umfassender Untersuchungen von Wilson-Daub-Kern³ an verschiedenen Ledersorten ist in Abb. 6 bis 8 niedergelegt.

¹ Miller: Effect of moisture on the heat transmission in insulating materials. Refr. Engg. 1927.

² Morrison: Air conditions for libraries. Heat, Pip. and Air Conditg. 1930.

³ Wilson-Daub-Kern: The properties of shoe leather. J. Am. Leather C. A. 1926.

Der Vergleich der drei Abbildungen unter sich zeigt zunächst, daß bei gleichem Wassergehalt ξ das Verhältnis $\frac{\mathfrak{P}}{P''}$ bei chromgegerbtem Leder niedriger liegt, die hygroskopischen Eigenschaften sich also

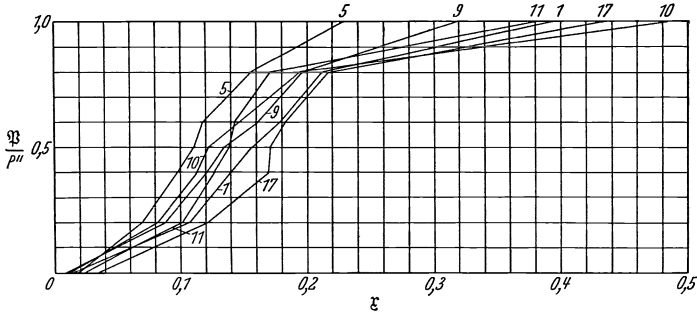


Abb. 6. $\frac{\mathfrak{P}}{P''}$ - ξ -Bild für Leder vegetabilischer Gerbung (Wilson-Daub-Kern).

1 gefärbtes Kalbleder, 5 schwarzes Roßleder, 9 ungefärbtes Kalbfutterleder, 10 ungefärbtes Schaffutterleder, 11 schwarzes Haifischleder, 12 Sohlleder.

stärker äußern als bei vegetabilischer Gerbung. Die Lackierung chromgegerbten Leders bringt dessen $\frac{\mathfrak{P}}{P''}$ -Wert auf den höheren Betrag, wie er vegetabilisch gegerbtem Leder entspricht. Die untersuchten Leder waren zuvor 6 Wochen lang in Luft von $\varphi = 0,50$ Feuchtigkeitsgrad

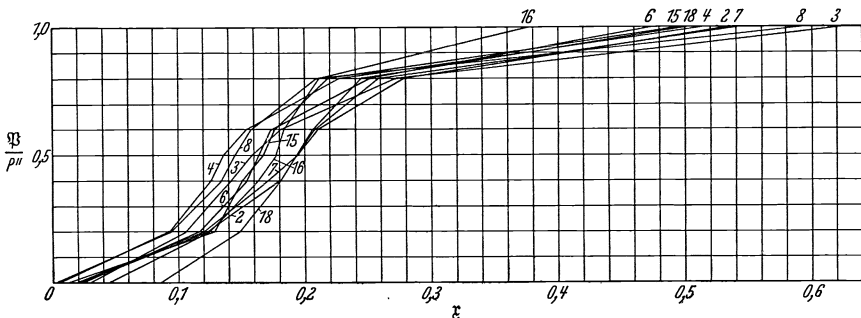


Abb. 7. $\frac{\mathfrak{P}}{P''}$ - ξ -Bild für Leder, chromgegerbt (Wilson-Daub-Kern).

2 gefärbtes Kalbleder, 3 schwarzes satiniertes Chromkid, 4 schwarzes Känguruhleder, 6 gefärbtes Rindleder (Nubuk), 7 gefärbtes Rindleder (Spalt), 8 schwarzes schwedisches Leder (Kalb), 15 schwarzes Rindleder, 16 amerikanisches Militär-Oberleder (vegetabilisch nachgegerbtes Rindleder), 18 Sohlleder.

gelagert und wurden danach während jedesmal 30 Tagen Luft von verschiedenem Feuchtigkeitsgrad ausgesetzt. Gleichwohl lassen die Überschneidungen der verschiedenen Kurven auf Beobachtungsfehler schließen. Ein Anlaß hierfür lag z. B. darin, daß die zu etwa 25° angegebene Versuchstemperatur nicht genau festgehalten wurde. Dies ist bei Untersuchungen in der Nähe des hygroskopischen Punktes deshalb verhängnisvoll, weil bei vorübergehender Temperatursteigerung

der sehr feuchten Luft Feuchtigkeit auf das kältere Leder niederschlägt, die nachträglich, auch bei Wiederherstellung des Temperaturnausgleiches, nicht wieder verschwindet. Die Folge ist ein zu hoch gefundener Wert des dem hygroskopischen Punkt zukommenden Grenzfeuchtigkeitsgehaltes, wie er z. B. bei der untersuchten Probe von Fohlenlackleder vorzuliegen scheint.

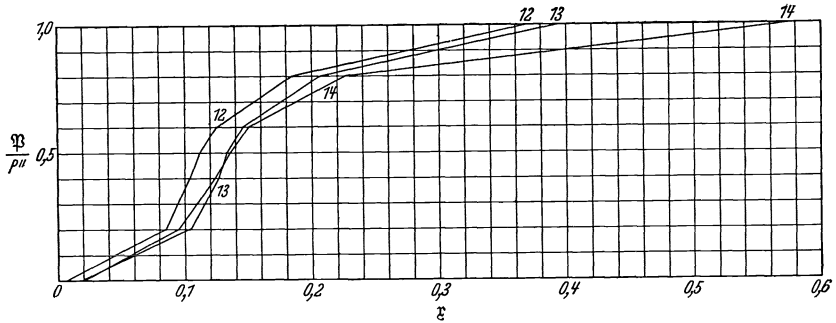


Abb. 8. $\frac{p}{p''}$ - x -Bild für Lackleder, chromgegerbt (Wilson-Daub-Kern).
12 Rindlack (Spalt), 13 Kidlack, 14 Fohlenlack.

Aus den Versuchen, die Culpepper-Caldwell¹ mit getrockneten Äpfeln durchgeführt haben, läßt sich der in Abb. 9 wiedergegebene mittlere Zusammenhang ableiten. Für die Bewertung des Ergebnisses, vor allem des für hohe $\frac{p}{p''}$ -Werte gefundenen Feuchtigkeitsgehalts gilt das bezüglich der Versuche von Wilson-Daub-Kern Bemerkte.

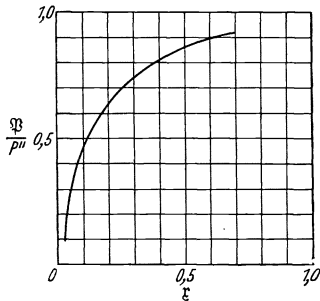


Abb. 9. $\frac{p}{p''}$ - x -Bild für Äpfel (Culpepper-Caldwell).

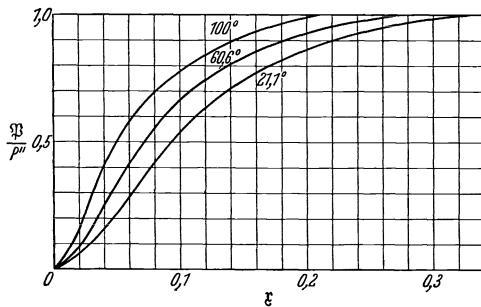


Abb. 10. $\frac{p}{p''}$ - x -Bild für Holz (Thelen).

Den Einfluß der Temperatur auf das hygroskopische Verhalten von Holz hat das landwirtschaftliche Ministerium der Vereinigten Staaten nach Thelen² gemäß Abb. 10 festgestellt. Hiernach ist anzunehmen, daß mit höherer Temperatur der einem bestimmten Feuchtigkeitsgehalt

¹ Culpepper-Caldwell: The relation of atmospheric humidity to the deterioration of evaporated apples in storage. J. of Agr. Research. 1927.

² Thelen: Kiln Drying Handbook. U. S. Dept. Agr. Bull. 1929, 1136.

ξ zukommende $\frac{p}{p''}$ -Wert zunimmt, die Stärke der hygroskopischen Wirkung also sinkt. Die mittlere Kurve ist interpoliert. Die obere gilt für die Siedetemperatur des Wassers, die als Grenztemperatur für die Beobachtung wenig geeignet erscheint. Wenn daher auch die Verschiebung der Kurven mit zunehmender Temperatur nach oben grundsätz-

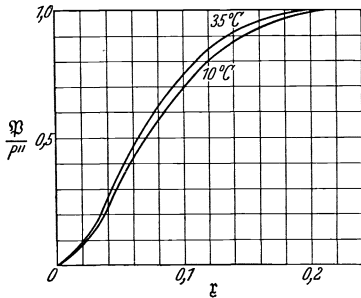


Abb. 11. $\frac{p}{p''}$ - ξ -Bild für Baumwolle (Hartshorne).

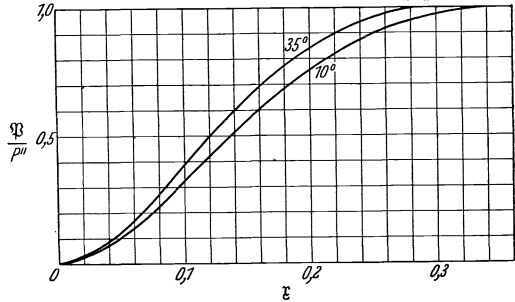


Abb. 12. $\frac{p}{p''}$ - ξ -Bild für Wolle (Hartshorne).

lich richtig ist, so bleibt doch der Nachweis, daß der Temperatureinfluß die hier angegebene zahlenmäßige Höhe erreicht, noch zu erbringen.

In ähnlicher Weise wie Miller haben verschiedene Forscher das hygroskopische Verhalten von Textilrohstoffen aus der Feuchtigkeitszunahme nach vorausgehender vollständiger Trocknung ermittelt, hierbei jedoch den Einfluß der Temperatur genau berücksichtigt. Die Abb. 11 und 12 gelten nach Hartshorne¹ für Baumwolle bzw. Wolle, Abb. 13 entspricht dem Verhalten chinesischer Rohseide, wie es Schloesing angibt. Alle diese Beobachtungen bestätigen das Zurückgehen der hygroskopischen Wirkung bei zunehmender Temperatur.

Das Verhalten eines Stoffes mit ungewöhnlich stark hygroskopischer Wirkung geht aus Abb. 14 hervor, mit der die Untersuchungen wiedergegeben sind, die van Bemmelen² mit dem aus einer 7% -Lösung gewonnenen Hydrogel der Kieselsäure vorgenommen hat. Der lineare Verlauf geht hier bei einem Punkt, dessen Abszissenwert einem Wassergehalt von etwa $\xi = 0,15$ und dessen Ordinatenwert einem Verhältnis

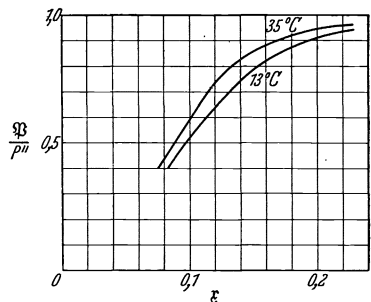


Abb. 13. $\frac{p}{p''}$ - ξ -Bild für chinesische Rohseide (Schloesing).

¹ Hartshorne: The moisture content of textiles and some of its effects. Am. Soc. Mech. Eng. 1917.

² Mezger: Die Zustandsformeln des hygroskopisch gebundenen Wassers und die Verdichtung ungesättigter Dämpfe zu verdünnten Flüssigkeiten. Ges.-Ing. 1924.

von etwa $\frac{\mathfrak{P}}{P''} = 0,65$ entspricht, ziemlich plötzlich in eine flache Kurve über, die erst bei dem in der Zeichnung nicht mehr enthaltenen Abszissenwert von etwa $\chi = 8$ die Ordinate $\frac{\mathfrak{P}}{P''} = 1$ erreicht. Das bedeutet, daß für derartige Gele ein schwach hygroskopisches Verhalten sich über die

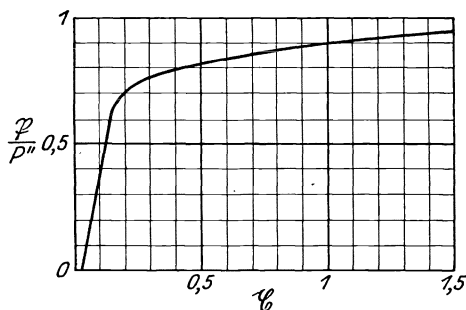


Abb. 14. $\frac{\mathfrak{P}}{P''}$ - χ -Bild für Hydrogel der Kieselsäure (van Bemmelen).

Das Verhalten von wässriger NaCl-Lösung ist in Abb. 15 wieder gegeben. Die Kurve verläuft ähnlich wie in Abb. 14. Sie endet links bei dem Sättigungszustand. Der nicht bekannte steile Abfall zum Nullpunkt entspricht der hygroskopischen Wirkung feuchten Salzes,

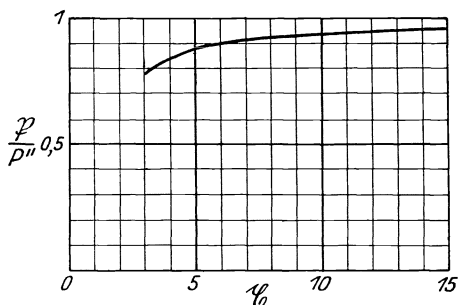


Abb. 15. $\frac{\mathfrak{P}}{P''}$ - χ -Bild für wässrige NaCl-Lösung.

weiten Grenzen erstreckt, innerhalb deren die technische Trocknung überhaupt in Frage kommt, daß dagegen das stark hygroskopische Verhalten erst bei einem verhältnismäßig niedrigen Wassergehalt einsetzt. (Daß bei einer Dampfspannung 0 nach Abb. 14 der Wassergehalt noch nicht vollständig verschwindet, ist voraussichtlich darauf zurückzuführen, daß es sich hier um die chemisch gebundenen Wasserreste handelt, deren Austreibung nicht mehr als eigentliche Trocknung anzusehen ist.)

Die in erheblichem Maße schon bei dem hohen Feuchtigkeitsgehalt $\chi = 3$ einsetzt.

Die folgenden Untersuchungen gehen von der Voraussetzung aus, daß der Zusammenhang zwischen $\frac{\mathfrak{P}}{P''}$ und χ für Werte $\chi < \chi_e$ bei allen hygroskopischen Körpern, die der Trocknung zu unterwerfen sind, mit genügender Genauigkeit als linear verlaufend angenommen werden kann. Für diese Annäherung spricht nicht nur das Streben nach Vereinfachung der analytischen Untersuchung, sondern auch die Tatsache,

daß die grundlegenden Eigenschaften und damit auch das hygroskopische Verhalten fast bei allen der Trocknung unterworfenen Stoffen wechselt. Die Nachprüfung der mit der vereinfachten Annahme durchgeführten Berechnungen durch den praktischen Versuch hat diese schließlich in allen Fällen als zulässig bestätigt. Der Trockenvorgang zerfällt damit in zwei durch den hygroskopischen Punkt scharf abgegrenzte Abschnitte, dessen erster im Feuchtgebiet bei einem Dampfdruck über dem Gut $\mathfrak{P} = P''$ vor sich geht, während der zweite im hygroskopischen Gebiet

bei abnehmendem Wert $\frac{\mathfrak{P}}{P''} < 1$ verläuft. Die Tatsache, daß die Veränderung des Wertes $\frac{\mathfrak{P}}{P''}$ bei fast allen Arten von Trockengut mit einem Feuchtigkeitsgrad ε_e einsetzt, der während der Trocknung in der Regel unterschritten wird, zeigt, daß das hygroskopische Verhalten von allgemeinerer Bedeutung ist, als früher angenommen wurde. Der Versuch, den Trockenvorgang rechnerisch zu erfassen, darf daher an dieser Körpereigenschaft nicht in dem Maße achtlos vorübergehen, wie dies zuvor der Fall zu sein pflegte.

Die Lage des hygroskopischen Punktes ist ebenso wie der Zusammenhang zwischen $\frac{\mathfrak{P}}{P''}$ und $\varepsilon < \varepsilon_e$ im Beharrungszustande nur wenig abhängig von der Temperatur. Ihr Einfluß auf das $\frac{\mathfrak{P}}{P''} \cdot \varepsilon$ -Bild darf daher bei der praktischen Rechnung vernachlässigt werden, ohne daß ihr Ergebnis in unzulässigem Maße von den Tatsachen abweicht.

II. Wärmebilanz des Trockenvorganges.

A. Die Wärmebilanzgleichung für Trocknung mit Luft (Verdunstung).

Es bezeichne

Q	den von außen zugeführten Wärmestrom, in kcal/h,
Q_{verl}	den nach außen zerstreuten Verlustwärmestrom, in kcal/h,
G	das stündlich umlaufende Gewicht feuchter Luft, in kg/h,
G_L	das in G kg/h feuchter Luft enthaltene Gewicht trockener Luft — Reinluft —, in kg/h,
G_D	das in G kg/h feuchter Luft enthaltene Dampfgewicht, in kg/h,
\mathcal{G}	das stündlich zugeführte Gewicht feuchten Gutes, in kg/h,
\mathcal{G}_ε	das in \mathcal{G} kg/h feuchtem Gut enthaltene Trockenstoffgewicht, in kg/h,
$\mathcal{G}_{\mathfrak{P}}$	das in \mathcal{G} kg/h feuchtem Gut enthaltene Flüssigkeitsgewicht, in kg/h,
C_p	die spezifische Wärme der feuchten Luft bei unveränderlichem Druck, bezogen auf $(1 + x)$ kg feuchte Luft, d. i. 1 kg Reinluft, in kcal/kg \cdot °C,
c_{pL}	die spezifische Wärme der Reinluft bei unveränderlichem Druck, in kcal/kg \cdot °C,
c_{pD}	die spezifische Wärme des Dampfes bei unveränderlichem Druck, in kcal/kg \cdot °C,
\mathcal{C}	die spezifische Wärme des feuchten Gutes, bezogen auf $(1 + \varepsilon)$ kg feuchtes Gut, d. i. 1 kg Trockenstoff, in kcal/kg \cdot °C,
c_ε	die spezifische Wärme des Trockenstoffes, in kcal/kg \cdot °C,
$c_{\mathfrak{P}}$	die spezifische Wärme der Flüssigkeit, in kcal/kg \cdot °C,
r	die Verdampfwärme in kcal/kg,

- i den Wärmehalt der feuchten Luft bei der Temperatur t und dem Feuchtigkeitsgehalt x , bezogen auf $(1 + x)$ kg feuchte Luft, d. i. 1 kg Reinsluft, in kcal/kg,
 i_L den Wärmehalt von 1 kg Reinsluft bei der Temperatur t , in kcal/kg,
 i_D den Wärmehalt von 1 kg Dampf bei der Temperatur t , in kcal/kg,
 i den Wärmehalt des feuchten Gutes bei der Temperatur t und dem Feuchtigkeitsgehalt χ , bezogen auf $(1 + \chi)$ kg feuchtes Gut, d. i. 1 kg Trockenstoff, in kcal/kg,
 $i_{\mathfrak{z}}$ den Wärmehalt von 1 kg Trockenstoff bei der Temperatur t , in kcal/kg,
 $i_{\mathfrak{fl}}$ den Wärmehalt von 1 kg Flüssigkeit bei der Temperatur t , in kcal/kg,
 Index r den Zustand der Luft vor der Trocknung,
 Index h den Zustand der Luft nach der Trocknung,
 Index \mathfrak{z} den Zustand des Gutes vor der Trocknung,
 Index \mathfrak{h} den Zustand des Gutes nach der Trocknung.

Es gelten dann folgende Beziehungen

$$G_D = G_L \cdot x, \quad (10)$$

$$G = G_L + G_D = G_L(1 + x), \quad (11)$$

$$\mathfrak{G}_{\mathfrak{fl}} = \mathfrak{G}_{\mathfrak{z}} \cdot \chi, \quad (12)$$

$$\mathfrak{G} = \mathfrak{G}_{\mathfrak{z}} + \mathfrak{G}_{\mathfrak{fl}} = \mathfrak{G}_{\mathfrak{z}}(1 + \chi), \quad (13)$$

$$C_p = c_{pL} + c_{pD} \cdot x, \quad (14)$$

$$\mathfrak{C} = c_{\mathfrak{z}} + c_{\mathfrak{fl}} \cdot \chi, \quad (15)$$

$$i_L = c_{pL} \cdot t, \quad (16)$$

$$i_D = r_0 + c_{pD} \cdot t, \quad (17)$$

$$i = i_L + x \cdot i_D = c_{pL} \cdot t + x(r_0 + c_{pD} \cdot t) = r_0 \cdot x + C_p \cdot t, \quad (18)$$

$$i_{\mathfrak{z}} = c_{\mathfrak{z}} \cdot t, \quad (19)$$

$$i_{\mathfrak{fl}} = c_{\mathfrak{fl}} \cdot t, \quad (20)$$

$$i = i_{\mathfrak{z}} + \chi \cdot i_{\mathfrak{fl}} = c_{\mathfrak{z}} \cdot t + \chi \cdot c_{\mathfrak{fl}} \cdot t = \mathfrak{C} \cdot t. \quad (21)$$

Die letzte Beziehung stellt nur eine Annäherung dar, wenn die Feuchtigkeit mit dem Trockenstoff eine allgemeine oder wirkliche Lösung bildet. Denn die spezifische Wärme von Lösungen errechnet sich nicht in dieser einfachen Weise als Summe der spezifischen Wärme der Bestandteile, sondern muß durch Versuch ermittelt werden. Außerdem wird hierbei die bei Lösungen mit dem Ausfall des gelösten Stoffes verbundene Wärmetönung vernachlässigt.

In Abb. 16 sei das für Durchführung des Trockenvorganges dienende beliebig begrenzte System dargestellt. Herrscht Beharrungszustand, so treten stündlich von außen ein:

der äußere Wärmestrom Q kcal/h,
 feuchte Luft mit einem Reinluftgehalt von G_L kg/h, einem Feuchtigkeitsgehalt x_r und einem Wärmeinhalt von $G_L \cdot i_r$ kcal/h,
 feuchtes Gut mit einem Trockenstoffgehalt von G_x kg/h, einer Temperatur t_r , einem Feuchtigkeitsgehalt ξ_r und einem Wärmeinhalt von $G_x \cdot i_r$ kcal/h.

Gleichzeitig verschwinden nach außen:

der Wärmeverluststrom Q_{verl} kcal/h,

feuchte Luft mit einem Reinluftgehalt von G_L kg/h, einem Feuchtigkeitsgehalt x_h und einem Wärmeinhalt von $G_L \cdot i_h$ kcal/h,

getrocknetes Gut mit einem Trockenstoffgehalt von G_x kg/h, einer Temperatur t_h , einem Feuchtigkeitsgehalt ξ_h und einem Wärmeinhalt von $G_x \cdot i_h$ kcal/h.

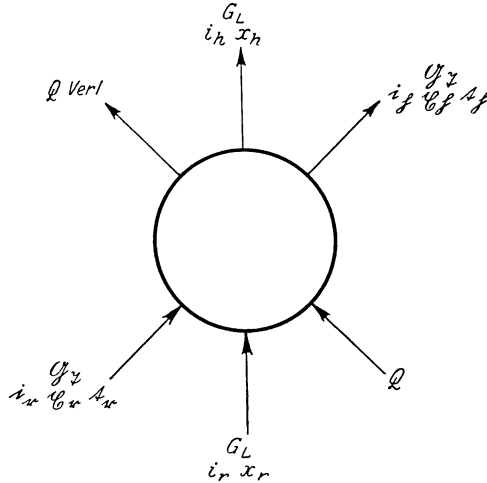


Abb. 16. Wärmestrombild des Trockners.

Die ein- und austretenden Wärmemengen sind im Beharrungszustande gleich. Die Wärmebilanzgleichung lautet daher

$$Q + G_L \cdot i_r + G_x \cdot i_r = Q_{\text{verl}} + G_L \cdot i_h + G_x \cdot i_h, \quad (22)$$

$$Q = G_L (i_h - i_r) + G_x (i_h - i_r) + Q_{\text{verl}} \\ = G_L (i_h - i_r) + G_x \cdot [\mathcal{C}_h (t_h - t_r) - i_{\text{str}} (\xi_r - \xi_h)] + Q_{\text{verl}}. \quad (22a)$$

Da die Feuchtigkeitszunahme der Luft der Feuchtigkeitsabgabe des Gutes entspricht, gilt die Beziehung

$$G_L (x_h - x_r) = G_x (\xi_r - \xi_h), \quad (23)$$

und die Wärmebilanzgleichung läßt sich auch schreiben

$$Q = G_L [(i_h - i_r) - i_{\text{str}} (x_h - x_r)] + G_x \cdot \mathcal{C}_h (t_h - t_r) + Q_{\text{verl}}. \quad (22b)$$

Der Betrag $G_L \cdot i_{\text{str}} (x_h - x_r) = G_x \cdot i_{\text{str}} (\xi_r - \xi_h)$ stellt den Wärmeinhalt der stündlich verdunsteten Feuchtigkeitsmenge in flüssigem Zustande bei der ursprünglichen Temperatur t_r dar. Er geht bei der Trocknung vom Gut auf die Luft über. Diese Wandlung erfolgt ohne äußeren Wärmeverbrauch allein durch Ortswechsel.

$G_L (i_h - i_r)$ bedeutet die stündliche Erhöhung des Wärmeinhaltes der Luft. Hiervon ist nur der Betrag $G_L [(i_h - i_r) - i_{\text{str}} (x_h - x_r)]$ durch die äußere Wärmequelle zu bestreiten. Diese hat außerdem den Streuverlust Q_{verl} und die Vermehrung des Wärmeinhaltes des mit

erhöhter Temperatur austretenden Gutes im Betrage $\mathcal{G}_x \cdot \mathcal{C}_h (t_h - t_r)$ zu decken.

Die Wärmebilanzgleichung bleibt richtig, gleichgültig, in welcher Weise die Zuführung des äußeren Wärmestromes Q erfolgt. Dies kann dadurch geschehen, daß Luft oder Gut oder beide vorgewärmt werden, ehe sie miteinander in Berührung treten, oder daß während ihres Zusammenwirkens eine Nachwärmung von Luft oder Gut oder beiden stattfindet, oder schließlich dadurch, daß Vor- und Nachwärmung verbunden werden.

B. Die Wärmebilanzgleichung für Trocknung ohne Luft (Verdampfung).

Findet reine Verdampfung statt, so fehlt die Luft als Trockenmittel. Im Beharrungszustande treten stündlich von außen ein:

der äußere Wärmestrom Q kcal/h,

feuchtes Gut mit einem Trockenstoffgehalt \mathcal{G}_x kg/h, einer Temperatur t_r , einem Feuchtigkeitsgehalt x_r und einem Wärmeinhalt von $\mathcal{G}_x \cdot i_r$ kcal/h.

Nach außen verschwinden:

der Wärmeverluststrom Q_{verl} kcal/h,

Dampf mit einem Gewicht $\mathcal{G}_x(x_r - x_h)$ kg/h, das der Menge der verdampften Flüssigkeit entspricht. Sein Wärmeinhalt beträgt $\mathcal{G}_x \cdot i_{Dh}(x_r - x_h)$ kcal/kg,

getrocknetes Gut mit einem Trockenstoffgehalt von \mathcal{G}_x kg/h, einer Temperatur t_h , einem Feuchtigkeitsgehalt x_h und einem Wärmeinhalt von $\mathcal{G}_x \cdot i_h$ kcal/h.

Die Wärmebilanzgleichung lautet:

$$Q + \mathcal{G}_x \cdot i_r = Q_{\text{verl}} + \mathcal{G}_x \cdot i_{Dh}(x_r - x_h) + \mathcal{G}_x \cdot i_h. \quad (24)$$

Der äußere Wärmestrom folgt hieraus nach Umformung zu

$$Q = \mathcal{G}_x(i_{Dh} - i_{\text{str}})(x_r - x_h) + \mathcal{G}_x \cdot \mathcal{C}_h(t_h - t_r) + Q_{\text{verl}}. \quad (24a)$$

Die äußere Wärmezufuhr hat die Vermehrung des Wärmeinhaltes der verdampften Flüssigkeit von dem Betrage der anfänglichen Flüssigkeitswärme $\mathcal{G}_x \cdot i_{\text{str}}(x_r - x_h)$ auf den Betrag der Dampfwärme $\mathcal{G}_x \cdot i_{Dh}(x_r - x_h)$ zu bestreiten, außerdem die durch Temperaturerhöhung im getrockneten Gute entstehende Vermehrung des Wärmeinhaltes $\mathcal{G}_x \cdot \mathcal{C}_h(t_h - t_r)$ und schließlich den Streuverlust.

Durch Vergleich der Formeln (22) und (24) ergibt sich, daß die Trocknung mit Luft der reinen Verdampfung in bezug auf Wärmeverbrauch gleichkommt, wenn die Beziehung gilt

$$\begin{aligned} G_L(i_h - i_r) &= \mathcal{G}_x \cdot i_{Dh}(x_r - x_h) = G_L \cdot i_{Dh}(x_h - x_r), \\ i_h - i_r &= i_{Dh}(x_h - x_r). \end{aligned}$$

Werden die Werte i_{Dh} , i_h und i_r nach Formel (17) und (18) eingesetzt, so folgt schließlich

$$(r_{0^0} + c_{pD} \cdot t_h)(x_h - x_r) + C_{pr}(t_h - t_r) = i_{Dh}(x_h - x_r).$$

Der Wärmehalt $i_{Dh} = r_{0^0} + c_{pD} \cdot t_h$ kann größer oder kleiner sein als $r_{0^0} + c_p \cdot t_h$, je nachdem die Dampftemperatur t_h bei reiner Verdampfung höher oder niedriger liegt als die Luftaustrittstemperatur t_h beim Verdunsten. Werden beide gleichgesetzt, so ist das Trockenverfahren mit Luft der reinen Verdampfung in bezug auf Wärmeverbrauch gleichwertig, wenn $t_h = t_r$ wird, d. h. die Luft beim Austritt die gleiche Temperatur besitzt wie vor dem Eintritt in das System. Je mehr $t_h > t_r$ wird, um so überlegener erscheint die reine Verdampfung. Wird $t_h < t_r$, so bedeutet dies, daß die Möglichkeit der natürlichen Lufttrocknung mit ausgenutzt wird. In diesem Falle übertrifft die Lufttrocknung die reine Verdampfung.

Dieser Vergleich bietet nur einen allgemeinen Anhalt, da er von der Voraussetzung ausgeht, daß beide Verfahren unter gleichen Temperaturverhältnissen arbeiten, und daß die Streuverluste in beiden Fällen gleich sind.

III. Nutzleistung und Verluste beim Trockenvorgang. Das vollkommene Trockenverfahren.

Die Bilanzgleichung läßt sich auch schreiben:

für Verdunstung

$$Q = \mathcal{G}_x \cdot \mathcal{C}_h(t_h - t_r) + G_L \cdot C_{pr}(t_h - t_r) + G_L(i_{Dh} - c_{ws} \cdot t_r)(x_h - x_r) + Q_{verl},$$

(1) (2) (3) (4)

für Verdampfung

$$Q = \mathcal{G}_x \cdot \mathcal{C}_h(t_h - t_r) + \mathcal{G}_x(i_{Dh} - c_{ws} \cdot t_r)(t_r - t_h) + Q_{verl}.$$

(1) (3) (4)

Die Frage, welche Beträge beim Trockenvorgang als Nutzleistung und welche als Verlust zu betrachten sind, wird verschieden beantwortet.

1. Die Überschuwärme $\mathcal{G}_x \cdot \mathcal{C}_h(t_h - t_r)$, die mit dem austretenden Gut aus der Trockenvorrichtung in die Umgebung hinauswandert, wird häufig unter Nutzleistung verbucht, weil sie durch das Trockenverfahren bedingt ist.

2. Das gleiche gilt für die fühlbare Überschuwärme $G_L \cdot C_{pr}(t_h - t_r)$, die bei Verdunstungsanlagen in der austretenden Luft entweicht.

3. Die dem Gut entzogene Feuchtigkeit verwandelt sich bei den hier betrachteten Trockenverfahren in Dampf. Der Unterschied der hierauf entfallenden Dampfwärme gegenüber der anfänglichen Flüssigkeitswärme $G_L(i_{Dh} - c_{ws} \cdot t_r)(x_h - x_r)$ bzw. $\mathcal{G}_x(i_{Dh} - c_{ws} \cdot t_r)(t_r - t_h)$ wird fast ausnahmslos als Hauptbetrag der Nutzleistung angesehen,

weil es sich hier um einen Wärmeverbrauch handelt, der durch das Verfahren bedingt ist.

4. Die Trockenvorrichtung kann gegen die Umgebung nicht vollkommen wärmedicht gehalten werden; infolgedessen findet ein Wärmeaustausch mit der Umgebung statt. Er stellt den Wärmeverlust Q_{verl} dar.

5. Ein bei energiewirtschaftlichen Erörterungen der Trockentechnik nur selten erwähnter Betrag betrifft den Aufwand für Lösung des physikalischen Zusammenhanges zwischen der zu entziehenden Feuchtigkeit und dem verbleibenden Restgut. Hierher gehört auch die positive oder negative Verstärkungswärme, die mit der Veränderung der Sättigungsstärke bei genügend weit fortgesetzter Trocknung verbunden ist, gegebenenfalls auch die Wärmetönung bei Umwandlung von Hydraten in Anhydride, wenn die Flüssigkeit eine wahre Lösung darstellt. Ein Bild über die Höhe der hier in Betracht kommenden Werte ergibt sich z. B. daraus, daß bei Verringerung des Wassergehaltes einer Chlorkalziumlösung von $x_t = 18$ auf $x_g = 1,5$, bezogen auf 1 kg wasserfreies CaCl_2 , die Verstärkungswärme nur etwa $\frac{1}{500}$ der Verdampfwärme des Wassers beträgt. Andererseits entspricht der Wärmetönung bei Verwandlung von Chlorkalziumhydrat ($\text{CaCl}_2 + 6 \text{H}_2\text{O}$) in wasserfreies Chlorkalzium ein Wärmeaufwand, der etwa $\frac{1}{3}$ der Verdampfwärme beträgt, also keinesfalls mehr vernachlässigt werden sollte.

Es ist unbestreitbar, daß der im allgemeinen zahlenmäßig gegenüber den anderen Beträgen zurückstehende, unter 5. behandelte Energieaufwand die eigentlichste Nutzleistung des Trockenvorganges darstellt. Sie tritt bei allen Trockenverfahren, also auch bei mechanischer Entfeuchtung, als solche auf, kommt jedoch in der Bilanzgleichung nicht klar zum Ausdruck. Ihr Einfluß äußert sich bei Verdampfanlagen u. a. darin, daß die Dampftemperatur niedriger liegt als die Temperatur des als allgemeine oder wirkliche Lösung aufzufassenden Gutes — Siedeverzug —. Bei der Verdunstung wird die Trennarbeit durch Berücksichtigung der hygroskopischen Eigenschaft erfaßt.

Andererseits sind die unter 4. erwähnten Wärmebeträge unbedingt als Verluste zu betrachten, weil es sich hierbei um eine nicht erfaßbare Zerstreuung der Wärme handelt.

Die unter 1. und 2. genannten Posten lassen sich innerhalb des Trockenvorganges wiedergewinnen, die Überschußwärme des Gutes kann, ebenso wie die fühlbare Überschußwärme der Luft, in Wärmeaustauschvorrichtungen zur Vorwärmung von Gut und Luft dienen. Bei der unter 3. angeführten Dampfwärme ist dies gleichfalls teilweise möglich. Eine Grenze wird hier dadurch gezogen, daß die Vorwärmung von Gut und Trockenmittel meist nur einen kleinen Teil der verfügbaren Dampfwärme erfordert, besonders wenn die Überschußwärme von Gut und Luft schon zuvor hierfür herangezogen wird. In der Hauptsache fehlt daher die Gelegenheit für Rückgewinnung der Dampfwärme innerhalb des Trockenvorganges selbst. Hierzu ist vielmehr die Heranziehung eines weiteren Systems nötig, das Bedürfnisse decken

kann, die, wie z. B. Raumheizung, Wassererwärmung, außerhalb des Trockenvorganges liegen. Eine Verbesserung ist denkbar, wenn die Trocknung in mehrere Stufen zerfällt, von denen jede folgende mit einem niedrigeren Druck arbeitet. Der aus der vorausgehenden Stufe entweichende Brühdampf kann dann als Heizmittel für die folgende Stufe dienen. Nur für den Abdampf der letzten Stufe ist anderweitige Verwendung zu suchen. Bei unendlicher Stufenzahl ließe sich auch die Dampfwärme innerhalb des Trockenvorganges restlos wiedergewinnen.

Verglichen mit dem vollkommenen Vorgang ist daher nur die unter 5. angeführte Trennarbeit als Nutzleistung zu betrachten, während der Betrag 4. als Streuverlust, die Beträge 1., 2. und 3. als innere Verluste des Trockenverfahrens zu betrachten sind.

Die vorstehenden Erörterungen folgen dem bei Aufgaben reiner Wärmeübertragung üblichem Gedankengange. Es ist jedoch bekannt,

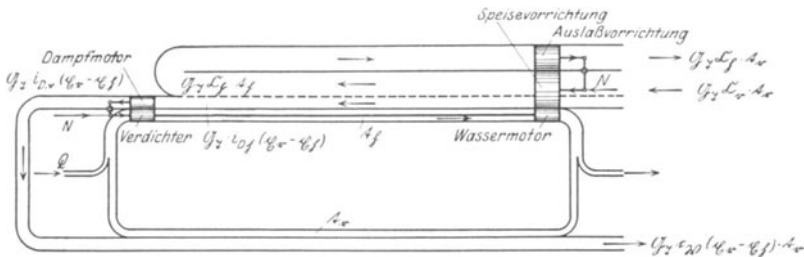


Abb. 17. Wärmestrombild eines vollkommenen Trockners.

wenn auch von dem Wärmetechniker zu selten beachtet, daß es sich bei der Wärmeübertragung nicht nur darum handelt, die aufgewandte Anzahl von kcal möglichst restlos, in gleichem Betrage, als Nutzleistung wiederzufinden, sondern auch darum, die durch Temperaturabnahme eintretende Entwertung der Wärmeenergie zu vermeiden. Bezeichnet Q_0 die Nutzleistung und T_0 die dabei nötige absolute Temperatur, so ist der Vorgang unvollkommen, wenn nur $Q = Q_0$ ist, weil ein Temperaturgefälle bestehen, also $T > T_0$ sein muß. Die Energieentwertung wird dadurch ausgedrückt, daß bei unmittelbarem Wärmeaustausch die Entropie zunimmt und die Wärmeübertragung einen nicht umkehrbaren, daher unvollkommenen Vorgang darstellt.

Die Mittel, die Trocknung als möglichst vollkommenen Vorgang durchzuführen, sind in Abb. 17 angedeutet. Das feuchte Gut wird durch eine Speisevorrichtung gegen den in dem Trockenraum herrschenden höheren Druck eingeführt. Die Wärmezufuhr erfolgt in einer Austauschvorrichtung, die im Gegenstrom arbeitet und die aufzutrocknende Feuchtigkeit bei gleichbleibender Temperatur verdampft. Das verbleibende Restgut nimmt hierbei eine erhöhte Temperatur an. Vor dem Austritt wandert es im Gegenstrom zu dem eintretenden Gut und gibt die Überschuwärme an dieses ab. In einer Ausbläsvorrichtung erfolgt die Entspannung des Restgutes auf den Druck der Umgebung unter Arbeitsgewinn.

Die in Dampfform ausgetretene Flüssigkeit durchläuft eine Kraftmaschine, z. B. einen Dampfmotor, und dehnt sich hierbei auf den Druck der Umgebung aus. Die Temperatur sinkt dementsprechend. Der Niederdruckdampf gibt bei gleichbleibender Temperatur seine Wärme in einer Gegenstromvorrichtung an Wasser ab, verflüssigt sich hierbei, während das beheizte Wasser verdampft. Hiermit ist der offene Lauf des Gutes beendet. Es tritt mit dem getrockneten Gute der Wärmeinhalt $\mathcal{G}_x \cdot \mathcal{C}_h \cdot t_r$, mit der entzogenen Feuchtigkeit der Wärmeinhalt $\mathcal{G}_x \cdot c_{\text{W}} (t_r - t_h) t_r$ nach außen. Beide zusammen entsprechen der in dem eintretenden Naßgut enthaltenen Wärmemenge $\mathcal{G}_x \cdot \mathcal{C}_r \cdot t_r$, sowohl nach zahlenmäßiger Höhe als auch nach Energiewertigkeit. Die für die Speisevorrichtung aufgewandte Arbeit wird durch die Auslaßvorrichtung nur zum Teile wiedergewonnen. Es verbleibt ein Energieverbrauch für die Förderung des zu entziehenden Feuchtigkeitsgehaltes gegen den erhöhten Druck. Ihm steht die verfügbare Arbeitsmenge des Dampfmotors gegenüber.

Das durch die niederschlagende Feuchtigkeit verdampfte Wasser arbeitet in einem besonderen Kreislauf. Der Dampf wird durch einen Verdichter auf höheren Druck gebracht, strömt mit entsprechend erhöhter Temperatur in der eigentlichen Trockenvorrichtung dem Gute entgegen und bewirkt, sich verflüssigend, die Verdampfung der zu entziehenden Feuchtigkeit. Das niedergeschlagene Wasser durchläuft eine Kraftmaschine, z. B. einen Wassermotor, wird hierbei entspannt und nimmt gleichzeitig die niedrigere Temperatur wieder an. Die in der Kraftmaschine gewonnene Arbeit wird zur teilweisen Deckung des Arbeitsbedarfs des Verdichters verwendet, ein weiterer Teil der für den Verdichter benötigten Arbeit wird durch die von dem Dampfmotor abgegebene Leistung bestritten, der Rest als äußere Arbeit zugeführt. Außerdem wird Dampf von außen in den geschlossenen Kreislauf geleitet. Ihm entspricht eine gleiche Gewichtsmenge abgehenden Niederschlagwassers.

Der verbleibende Energiebedarf ist durch die unter 5. behandelte Nutzarbeit bedingt. (Speise- und Auslaßvorrichtung entfallen, wenn die Trockenvorrichtung unter dem gleichen Drucke arbeitet, der in der Umgebung herrscht. Die Niederdruckseite des Kreislaufes steht dann unter Vakuum. Die entzogene Feuchtigkeit und das der Zusatzwärme entsprechende Niederschlagwasser müssen durch Pumpen gegen den äußeren Druck gefördert werden.)

Von Erörterungen, in welcher Weise sich derartige vollkommene Arbeitsverfahren durchführen lassen, möge abgesehen werden. Jedenfalls bestehen für die energiewirtschaftliche Verbesserung künstlicher Trockenanlagen, ebenso wie für die Heizung ganz allgemein, Möglichkeiten, die auch teilweise schon in der Praxis erörtert bzw. der Ausführung nähergebracht worden sind. Es sei hier nur an den Vorschlag erinnert, den Brüdenampf zum Betriebe von Niederdruckdampfturbinen zu benutzen, und an die Verwendung von Brüdenkompressoren zur Verdichtung und Wiederverwendung des abgehenden Dampfes (Josse, Gensecke).

Demgegenüber ist das energiewirtschaftliche Ziel, das sich die Trockentechnik zur Zeit fast ausnahmslos stellt, ein recht bescheidenes. Es gipfelt im allgemeinen darin, die inneren und äußeren Verluste nach Möglichkeit zu verringern und die inneren Verluste in erster Linie innerhalb, demnächst außerhalb des eigentlichen Trockenvorganges wiederzugewinnen. Selbstverständlich bleibt dieses Bestreben nach wie vor richtig und die Überleitung zu dem umkehrbaren Trockenverfahren ein Problem der weiteren Zukunft.

Bei dem vollkommenen Trockenverfahren kann von einem Wirkungsgrad gesprochen werden, der um so höher liegt, je niedriger die angewandte Höchsttemperatur ist und je geringer das Temperaturgefälle zwischen der hohen und niedrigen Temperatur gehalten wird. Diese Gesichtspunkte gelten ganz allgemein auch für das praktisch angewandte Trockenverfahren. Für dieses lautet die energiewirtschaftliche Forderung, den Trockenvorgang möglichst bei gleichbleibender Temperatur zu leiten und diese Temperatur so niedrig wie möglich zu halten.

IV. Bildliche Darstellung des Zustandes von feuchten Gasen und Gut.

A. Das Molliersche i - x -Bild für wasserhaltige Luft.

Die Darstellung des Vorganges der Lufttrocknung in bildlicher Form hat über Weiß¹, Müller², Schüle³, Höhn⁴ u. a. eine Entwicklung genommen, die in dem von Mollier⁵ vorgeschlagenen i - x -Bilde zu einem gewissen Abschluß gelangt ist. Mollier wählt als Ausgangspunkt die einfachen Gasgesetze und vermeidet damit die Widersprüche früherer Darstellungen, die von dem für vollkommene Gase geltenden Dalton'schen Gesetz ausgingen, gleichzeitig jedoch die Dampfeigenschaften aus Dampftafeln entnahmen.

Das Molliersche in Abb. 18 wiederholte i - x -Bild ist entworfen für eine

spezifische Wärme der Reinluft: $c_{pL} = 0,24$ kcal/kg \cdot °C, unabhängig von Temperatur und Druck,

spezifische Wärme des Wasserdampfes: $c_{pD} = 0,46$ kcal/kg \cdot °C, unabhängig von Temperatur und Druck,

Verdampfwärme des Wasserdampfes bei 0°: $r_{0^{\circ}} = 595$ kcal/kg.

Mollier wählt schiefwinklige Koordinaten. Die waagerechte Hilfsabzissenachse stellt die Temperaturlinie für $t = 0$ dar. Auf ihr wird der Dampfgehalt x abgelesen. Für einen bestimmten Wert x wird die Höhe der bei 0° darauf entfallenden Verdampfwärme $r_{0^{\circ}} \cdot x = 595 x$ durch den Abstand der Waagerechten von der darunter verlaufenden schrägen Abzissenachse gemessen.

¹ Weiß: Kondensation. Berlin 1901.

² Müller: Z. V. d. I. 1905.

³ Schüle: Z. V. d. I. 1919.

⁴ Höhn: Z. V. d. I. 1919.

⁵ Mollier: Z. V. d. I. 1923.

Von der für $x = 0$ geltenden Ordinatenachse gehen Temperaturlinien aus. Ihr Ordinatenabstand vom Nullpunkt entspricht dem Betrage $c_{pL} \cdot t = 0,24 t$, d. i. dem Wärmeinhalt von 1 kg Reinform bei der Temperatur t . Die Temperaturlinien sind Geraden und steigen mit zunehmender Temperatur immer mehr an. Ihr Ordinatenabstand von der waagerechten Hilfsabszissenachse für einen bestimmten Wert x

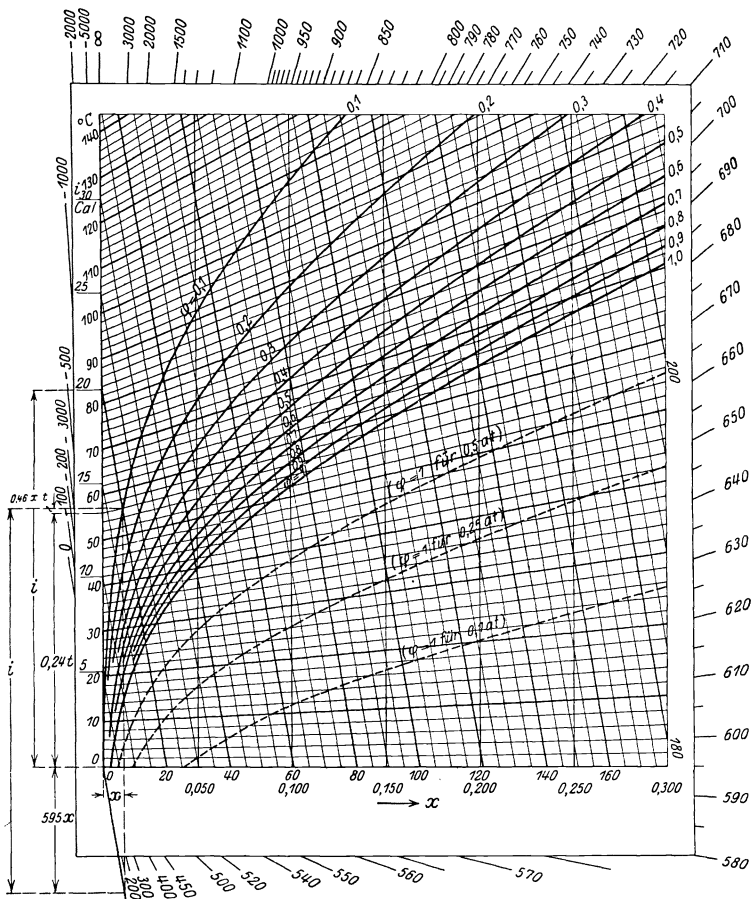


Abb. 18. Molliersches i - x -Bild für wasserhaltige Luft.

entspricht dem Betrage $C_p \cdot t = (c_{pL} + c_{pD} \cdot x) t = (0,24 + 0,46 x) t$. Für gleiche Temperaturunterschiede ist der in der Ordinatenrichtung gemessene Abstand der Temperaturlinien gleich. Durch den Schnittpunkt der schrägen t -Geraden mit der im Abszissenabstand x gezogenen Senkrechten wird der Luftzustand festgelegt. Dieser Schnittpunkt wird in der Folge als

Zustandspunkt feuchter Luft

angeführt und mit dem Buchstaben G versehen. Er bestimmt den

Wärmeinhalt feuchter Luft mit 1 kg Reinluft und x kg Dampf in seinem in Richtung der Ordinaten gemessenen Abstände von der schrägen Abszissenachse zu

$$\begin{aligned} i &= r_{00} \cdot x + c_{pL} \cdot t + c_{pD} \cdot x \cdot t = c_{pL} \cdot t + x(r_{00} + c_{pD} \cdot t) \\ &= 0,24 t + x(595 + 0,46 t). \end{aligned}$$

Eine durch Punkt G gelegte Parallele zur schrägen Abszissenachse schneidet die Ordinatenachse in einem Abstand vom Nullpunkt, der gleichfalls dem Werte i entspricht. Das Zurückgreifen auf die schräge Abszissenachse, die bei hohen x -Werten dem Bildfelde entschwindet, erübrigt sich daher.

Für eine bestimmte Temperatur t folgt aus den Dampftafeln die zugehörige Sättigungsspannung P'' . Unter Annahme eines bestimmten Gesamtdruckes P errechnet sich hierfür nach Formel (4) der Höchstdampfgehalt zu

$$x_{(\varphi=1)} = \frac{0,622 P''}{P - P''}.$$

Die Schnittpunkte der im Abszissenabstände $x_{(\varphi=1)}$ gezogenen Senkrechten mit den t -Linien ergeben die Sättigungslinie. Für einen Sättigungsgrad $\varphi < 1$ finden sich die zugehörigen Werte

$$x = 0,622 \frac{\varphi \cdot P''}{P - \varphi \cdot P''}$$

und führen zu den im i - x -Bilde aufgenommenen φ -Linien.

Unter Zugrundelegung eines Gesamtdruckes $P = 10000 \text{ kg/m}^2$ ist in Tafel I das Molliersche i - x -Bild in ergänzter Form wiedergegeben. Die darin eingezeichnete P_D -Kurve liefert nach Formel (4) zu dem Abszissenwerte x den zugehörigen Dampfdruck.

$$P_D = \frac{x \cdot P}{\frac{R_L}{R_D} + x} = \frac{x \cdot P}{0,622 + x}.$$

Bei der Vorausberechnung des Trockenvorganges bedarf es im allgemeinen ziemlich willkürlicher Annahmen für die Höhe des Gesamtdruckes. Die Tafel kann daher ohne weiteres benutzt werden, solange der Aufstellungsort infolge seiner Höhenlage nicht einen von 735,5 mm Q.-S. wesentlich abweichenden Barometerstand von vornherein erwarten läßt.

Ist der Gesamtdruck innerhalb der Trockenvorrichtung höher oder niedriger als 10000 kg/m^2 , so enthält bei einer bestimmten Temperatur t die Raumeinheit feuchter Luft im Sättigungszustande ein gleich hohes Dampfgewicht, dagegen ein höheres bzw. niedrigeres Reinluftgewicht als bei einem Druck von 10000 kg/m^2 . Auf 1 kg Reinluft entfällt bei einer bestimmten Temperatur und einem bestimmten Feuchtigkeitsgrad bei höherem Gesamtdruck ein kleinerer, bei niedrigerem Gesamtdruck ein größerer Feuchtigkeitsgehalt x . Dies wirkt sich im i - x -Bilde so aus, daß die Temperaturlinien sich nicht verschieben, dagegen die für einen Gesamtdruck von

10000 kg/m² geltende Sättigungslinie $\varphi = 1$ bei einem Drucke von 5000 kg/m² für $\varphi = 0,5$ gilt und umgekehrt die für einen Gesamtdruck

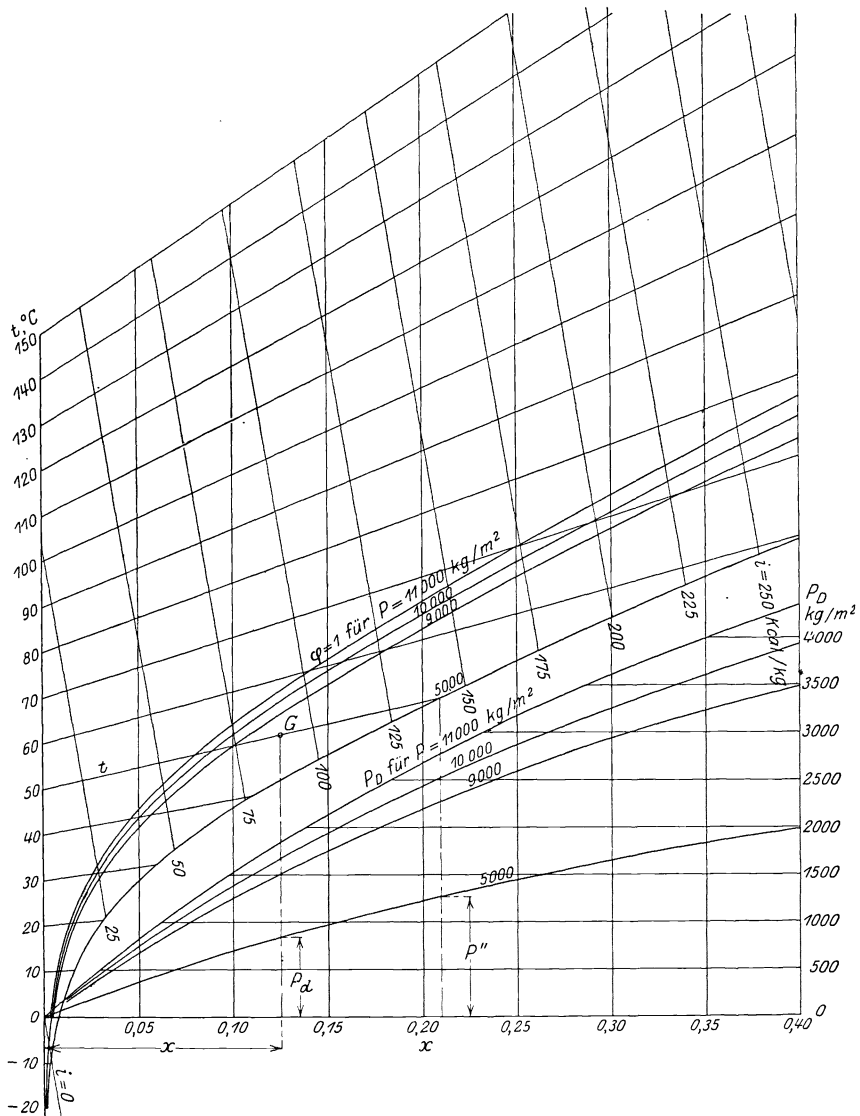


Abb. 19. i - x -Bild für verschiedenen Gesamtdruck P .

von 10000 kg/m² gefundene Linie $\varphi = 0,5$ die Sättigungslinie bei einem Gesamtdruck von 20000 kg/m² darstellt.

Für die Festlegung des dem Luftzustande entsprechenden Punktes G bei einem von 10000 kg/m² verschiedenen Gesamtdruck kann Abb. 19

dienen, die Linien für $\varphi = 1$ und P_D , unter Annahme eines Gesamtdruckes von $P = 11000, 10000, 9000$ und 5000 kg/m^2 , enthält. Für einen Feuchtigkeitsgehalt x und eine Temperatur t ergibt sich der Zustandspunkt der Luft unabhängig von P als Schnittpunkt G der t -Geraden mit der x -Ordinaten. Sind dagegen Temperatur t , Feuchtigkeitsgrad φ und Gesamtdruck P bekannt, so läßt sich, da t den Sättigungsdruck P'' auf der für P gültigen P_D -Kurve liefert, der Teildruck des Dampfes $P_D = \varphi \cdot P''$ ermitteln. Der Wert P_D führt zu dem Abszissenwert x und die x -Linie im Schnitt mit der t -Geraden zu dem Zustandspunkt G .

B. Das Molliersche i - x -Bild für allgemeine feuchte Gase.

Besteht das angewandte Trockenmittel nicht aus atmosphärischer Luft, sondern allgemeinen Gasen, so ändert sich von den für den Entwurf des i - x -Bildes maßgebenden Größen nur der Wert der spezifischen Wärme c_{pL} . Er liegt z. B. bei Verbrennungsgasen wegen des Kohlen säuregehaltes höher als bei Luft und fordert außerdem Berücksichtigung seiner Veränderung bei höheren Temperaturen, die hier häufig auftreten. Je mehr die reinen Feuergase mit Frischluft gemischt werden, um so mehr nähert sich das maßgebende i - x -Bild dem für feuchte Luft entworfenen.

Besteht die zu verdampfende Feuchtigkeit nicht aus Wasser, sondern aus einer anderen tropfbaren Flüssigkeit, so ändern sich von den Grundlagen des i - x -Bildes die spezifische Wärme c_{pD} und die Verdampfwärme r des Dampfes.

Im i - x -Bilde kommen diese Unterschiede dadurch zum Ausdruck, daß beim Verdunsten von Wasser in ein anderes Gas als Luft die Neigung der schrägen Abszissenachse, von der aus die i -Werte zählen, sich nicht ändert. Dagegen verschieben sich die t -Linien. Sie rücken im Verhältnis der Vergrößerung der spezifischen Wärme c_{pL} bzw. des Wärmeinhaltes i_L auseinander. Ihre Schräge zur Abszissenachse bleibt unverändert. Die Sättigungslinie folgt mit ihren Ordinatenwerten der Verschiebung der t -Linien.

Verdunsten einer anderen Flüssigkeit als Wasser in Luft äußert sich im i - x -Bilde dadurch, daß die Sättigungslinie einen abweichenden Verlauf nimmt, außerdem die Neigung der schrägen Abszissenachse sich wegen des verschiedenen Wertes der Verdampfwärme r verändert. Die t -Linien bleiben in ihrem Ausgangspunkte auf der Ordinatenachse liegen. Ihre Neigung verändert sich jedoch entsprechend der verschiedenen spezifischen Wärme c_{pD} des Dampfes.

Im letzten Falle ist vorausgesetzt, daß die Luft wasserfrei ist. Ist dies nicht der Fall, so verschiebt sich der Ausgangspunkt der t -Linien im Verhältnis $\frac{0,24 + 0,46 \cdot x}{0,24} = 1 + 1,92 \cdot x$, wenn x den Gehalt der Luft an Wasserdampf darstellt. Außerdem bleibt für die Gültigkeit des so entworfenen i - x -Bildes die Voraussetzung bestehen, daß die zu verdampfende Flüssigkeit sich nicht mit Wasser mischt. Anderen-

falls werden die Beziehungen verwickelter und sind nicht mehr in einfacher Weise wiederzugeben.

Nach diesen Gesichtspunkten läßt sich z. B. für Verbrennungsgase beliebiger Zusammensetzung und das Verdunsten von Lösungsmitteln, die sich nicht mit Wasser mischen, das i - x -Bild zeichnen. Wenn hier davon abgesehen wird, so geschieht dies mit Rücksicht darauf, daß nur eine Vielzahl von i - x -Bildern die wechselnden Verhältnisse zu erfassen vermag und ihre Aufzeichnung daher eine Aufgabe des entwerfenden Ingenieurs darstellt. Für die spezifische Wärme der Verbrennungsgase bzw. deren Wärmeinhalt geben zahlreiche Sonderwerke Anhalt zur Berechnung. Ein i - x -Bild für Feuergase findet sich in der Grubenmannschen Arbeit¹. Die Werte der spezifischen Wärme von Lösungsmitteln im Gaszustande, ihrer Verdampfwärme und ihrer Sättigungskurve sind den physikalischen Tabellenwerken zu entnehmen, die hierfür allerdings keine lückenlosen Angaben liefern.

C. Kühlgrenze und Zustandspunkt des Gutes im i - x -Bilde.

Wird ein gegen störende Einflüsse geschütztes feuchtes Thermometer in feuchte Luft gebracht, so zeigt es eine bestimmte von dem Luftzustande (t , x) und der Luftgeschwindigkeit abhängige Temperatur an. Wird statt des Thermometers ein anderer „feuchter“ Körper der feuchten Luft ausgesetzt, so stellt sich seine Temperatur auf die gleiche Höhe ein. Die Anzeige des feuchten Thermometers ist demnach maßgebend für die Temperatur, der das feuchte Gut zustrebt und die es beibehält, solange es feucht bleibt.

Die von dem feuchten Thermometer bei einem bestimmten Luftzustand angezeigte Temperatur liegt um so tiefer, je höher die Geschwindigkeit der darüber streichenden Luft ist. Sie erreicht jedoch praktisch eine untere Grenze τ , die

Kühlgrenze,

sobald die Geschwindigkeit 2 bis 3 m/s überschreitet. Diese Kühlgrenze ist gleichbedeutend mit der als „Temperatur des feuchten Thermometers“ gekennzeichneten Angabe. Carrier und Lindsay² haben den Unterschied zwischen der genauen Kühlgrenztemperatur und der wirklichen Anzeige des mit Wasser befeuchteten Thermometers für verschiedene Luftgeschwindigkeiten untersucht. Der von ihnen ermittelte, auf $^{\circ}\text{C}$ und m/s umgerechnete Zusammenhang der Abb. 20 gibt in den logarithmisch eingeteilten Ordinaten für die wirklichen Temperaturen t des feuchten Thermometers von -35 bis etwa 93° die Abweichung der tatsächlichen Anzeige von der genauen Kühlgrenze in % des beobachteten Temperaturunterschiedes $t-t$ zwischen trockenem und

¹ Grubenmann: Jx -Tabeln feuchter Luft. Berlin: Julius Springer 1926.

² Carrier u. Lindsay: The temperatures of evaporation of water into air. Refr. Engg. 1925.

feuchtem Thermometer. Bei hohen Luftgeschwindigkeiten ist der Fehler stets so gering, daß er unberücksichtigt bleiben kann. Bei niedrigen Luftgeschwindigkeiten trifft dies nur zu, wenn gleichzeitig die Kühlgrenze hoch liegt. Dagegen ist der Fehler nicht zu vernachlässigen, wenn es sich um niedrige Kühlgrenzwerte und geringe Luftgeschwindigkeiten handelt. Die den Kurven beigeschriebenen Zahlen entsprechen nicht der bei der Temperatur t wirklich beobachteten Luftgeschwindigkeit w , sondern dem auf 21^0 umgerechneten Werte

$$w_{21} = w \cdot \frac{294}{273 + t}.$$

Die Versuchsergebnisse gelten außerdem, genau genommen, für einen Barometerstand von 760 mm Q.-S., können jedoch unbedenklich allgemein für

Feuchtigkeitsmessungen unter atmosphärischem Druck benutzt werden. Für den Trockenvorgang ermöglichen die Beobachtungen von Carrier und Lindsay einen Rückschluß auf das Maß, in dem die Temperatur des feuchten Gutes nach Ausgleich mit der umgebenden Luft die Kühlgrenze übersteigt.

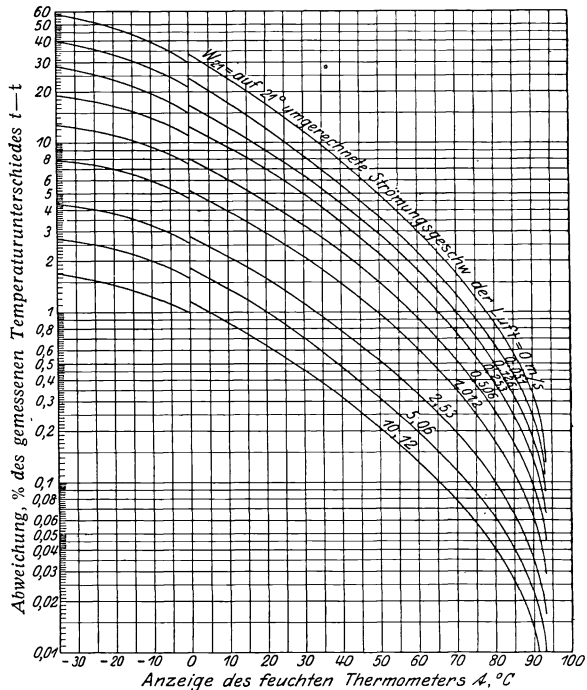


Abb. 20. Abweichung des zwischen trockenem und feuchtem Thermometer beobachteten Temperaturunterschiedes $t-t$ bei verschiedenen Luftgeschwindigkeiten (Carrier-Lindsay).

Es seien folgende Voraussetzungen getroffen:

1. Das Gut habe seinen

Ausgleichszustand

erreicht, seine Temperatur liege auf der Kühlgrenze τ .

Der Ausgleichszustand ist dadurch bestimmt, daß mit seiner Erreichung die Temperatur des feuchten Gutes der tatsächlichen Anzeige eines feuchten Thermometers entspricht. Die Annahme, daß diese Temperatur mit der Kühlgrenze zusammenfällt, ist an die Bedingung geknüpft, daß die Luftgeschwindigkeit genügend hoch liegt. Bei Trockenanlagen mit künstlich verstärkter Luftbewegung kann die Voraussetzung

regelmäßig als erfüllt angesehen werden. Bei schwacher Luftbewegung erscheinen mit obiger Annahme die Verhältnisse zu günstig dargestellt. Da diese sich jedoch aus anderen Gründen in der Regel verbietet, darf die Kühlgrenze als Temperatur des feuchten Gutes im Ausgleichszustand angenommen werden.

2. Ein Wärmeaustausch mit der äußeren Umgebung finde nicht mehr statt. Es sei also $Q = 0$ und $Q_{\text{verl}} = 0$.

Der innere Wärmeaustausch vollzieht sich alsdann zwischen Gut und Luft allein. Da die Temperatur der Luft höher ist als die des Gutes, überträgt die Luft fühlbare Wärme an das Gut. Die Temperatur des Gutes ändert sich im Ausgleichszustand nicht; daher setzt sich die ganze Wärme in Verdampfung von Feuchtigkeit aus dem Gut um. Der Dampf und damit die an ihn gebundene Dampfwärme tritt in die Luft über.

Mit diesen Voraussetzungen schreibt sich die Bilanzgleichung

$$0 = G_L[(i_e - i_a) - i_{\text{ss}\tau}(x_e - x_a)],$$

wenn

Index a den Zustand des Gases bei Annahme der Kühlgrenze τ ,

Index e den Zustand des Gases beim Verlassen der Kühlgrenze τ kennzeichnen.

Hieraus folgt für den

Hauptabschnitt des Trockenvorganges,

in dem das Gut den Ausgleichszustand, d. h. die Temperatur τ der Kühlgrenze besitzt,

$$i_e - i_a = i_{\text{ss}\tau}(x_e - x_a). \quad (25)$$

Dies ist die Gleichung der im i - x -Bilde der Abb. 21 dargestellten Geraden $C\mathcal{G}$, der

Linie gleicher Kühlgrenze τ

auf der sich der Zustandspunkt G der Luft im Hauptabschnitt der Trocknung bewegt. Sind äußere Einflüsse ausgeschlossen und besitzt das Gut die Temperatur $t = \tau$, wie sie der Kühlgrenze der feuchten Luft im Anfangszustande zukommt, so verändert sich der Luftzustand längs der τ -Linie.

Während bei der Wärmeübertragung zwischen trockenen Körpern mit Erreichung des Temperaturlausgleiches der Erwärmungsvorgang beendet ist, stellt für den Austausch zwischen Flüssigkeiten und feuchten Gasen die τ -Linie die Grenzbedingung dar, bei der die Wärmeübertragung sich wohl fortsetzt, den Wärmeinhalt der Flüssigkeit ebenso wie den der feuchten Luft jedoch nicht mehr beeinflusst. Denn die nach Formel (25) verbleibende Änderung des Wärmeinhaltes um den Betrag $i_{\text{ss}\tau}(x_e - x_a)$ stellt die Flüssigkeitswärme der in das Gas übertretenden Feuchtigkeit dar. Ihr Übergang beruht nicht auf Wärmewirkung, sondern ist die Folge einer Ortsveränderung der Flüssigkeit, die ohne Energieaufwand erfolgt.

Für die Einzeichnung der τ -Linien gilt nach Abb. 21 folgendes:
 Durch den Schnittpunkt \mathcal{G} , in dem die Temperaturgerade $t = \tau$ die Sättigungslinie schneidet, ist die i -Linie zu ziehen. Schneidet sie die Ordinatenachse im Punkte B und wird von B aus gegen den Ordinatenursprung zu die Strecke

$$BC = i_{\text{ss}} \tau \cdot x_g = c_{\text{ss}} \cdot \tau \cdot x_g,$$

also für wasserhaltige Luft der Betrag $\tau \cdot x_g$ abgetragen, so ergibt sich Punkt C , in dem die durch \mathcal{G} gehende τ -Linie die Ordinatenachse schneidet. Die so entworfenen τ -Linien die i -Linien in dem i - x -Bilde der Tafeln II und III aufgenommen. Beide weichen mit zunehmender Temperatur mehr und mehr voneinander ab. Die τ -Linien ermöglichen u. a., die „Temperatur des feuchten Thermometers“ abzulesen. Wasserhaltiger Luft von $t = 30^\circ$, be-

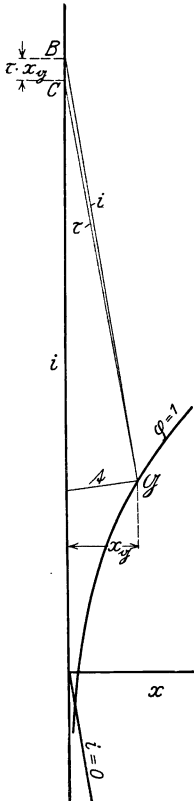


Abb. 21. Linie gleicher Kühlgrenze τ im i - x -Bild.

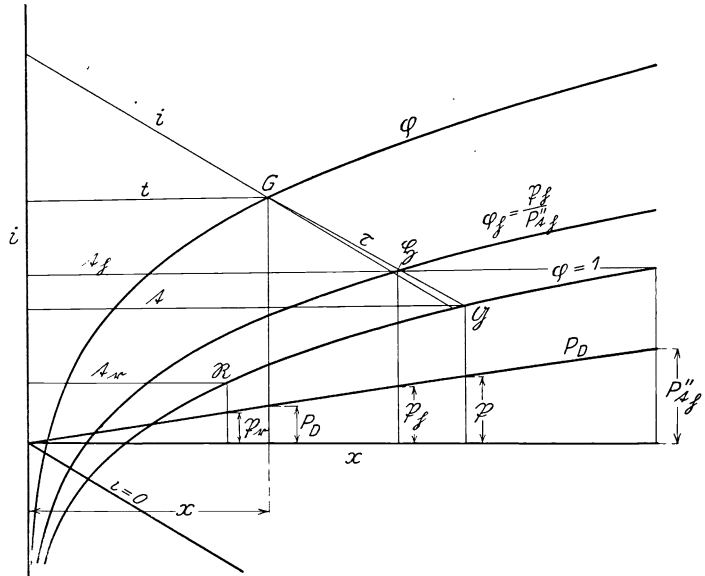


Abb. 22. Zustandspunkt des Gutes im i - x -Bild.

obachtet am trockenen Thermometer, und einem Feuchtigkeitsgrad von $\varphi = 0,4$, entsprechend einem Feuchtigkeitsgehalt von $x \approx 0,011$, kommt z. B. eine Kühlgrenze $\tau = 20^\circ$ zu, wie sie das feuchte Thermometer bei genügend hoher Luftgeschwindigkeit tatsächlich anzeigt.

Jeder Punkt G des i - x -Bildes der Abb. 22 kennzeichnet den Zustand der Luft nach Temperatur t , Feuchtigkeitsgehalt x , Wärmeinhalt i , Feuchtigkeitsgrad φ und Dampfteildruck P_D . Nach dem Gesagten bestimmt die durch Punkt G gezogene τ -Linie in ihrem Schnittpunkte \mathcal{G} mit der Sättigungslinie die Temperatur t feuchten Gutes

im Ausgleichszustande. Die Dampfspannung \mathfrak{P} über dem Gute ist hierbei durch den Wert P'_t gegeben, der dem Schnittpunkt der durch \mathcal{G} gezogenen x -Linie mit der P_D -Kurve zukommt. \mathcal{G} stellt den

Zustandspunkt feuchten Gutes

dar, das er nicht nur hinsichtlich seiner Temperatur $t = \tau$, sondern auch in bezug auf seine Dampfspannung $\mathfrak{P} = P'_t$ kennzeichnet.

Die Annahme, daß die Dampfspannung \mathfrak{P} der Sättigungsspannung P'_t entspricht, gilt nur unter der Voraussetzung einer unendlich langsamen Feuchtigkeitsabnahme. Bei endlicher Trockengeschwindigkeit ist nach Winkelmann¹ und Mache² \mathfrak{P} kleiner als P'_t , und zwar ist der Unterschied abhängig von Temperatur t und Trockengeschwindigkeit. Die maßgebenden Beziehungen liegen zahlenmäßig noch nicht fest. Da zudem die Erfahrung in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen steht, die aus der Annahme $\mathfrak{P} = P'_t$ rechnerisch folgen, kann diese Annäherung für praktische Fälle als zulässig betrachtet werden.

Über Feuchtigkeitsgehalt τ und Wärmeinhalt i sagt die Lage des Zustandspunktes \mathcal{G} nichts aus. Diese Werte wechseln während des Hauptabschnittes des Trockenvorganges, ohne daß Punkt \mathcal{G} im i - x -Bilde sich verschiebt.

Ähnlich ergeben sich die Beziehungen für einen beliebigen Zustand feuchten Gutes vor Erreichung des Ausgleichzustandes. Der entsprechende Zustandspunkt \mathfrak{R} liegt gleichfalls auf der Sättigungslinie und ist gekennzeichnet durch die Gutstemperatur t_r , entsprechend der durch den Punkt \mathfrak{R} gehenden t -Linie, und die Dampfspannung des Gutes $\mathfrak{P}_r = P''_{t_r}$, während Feuchtigkeitsgehalt τ_r und Wärmeinhalt i_r auch hier nicht aus dem i - x -Bilde hervorgehen.

Dieses bedarf daher einer Ergänzung durch ein i - τ -Bild, um die Eigenschaften feuchten Gutes restlos festzulegen.

Verliert das Gut die Eigenschaft des feuchten Körpers, so entspricht die ihm bei einer bestimmten Temperatur t_h zukommende Dampfspannung \mathfrak{P}_h nicht mehr der Sättigungsspannung P'_{t_h} . Sein Zustandspunkt rückt im i - x -Bilde von der Sättigungslinie ab. Wird der P_D -Wert aufgesucht, der dem Betrage \mathfrak{P}_h gleichkommt, und die zu $P_D = \mathfrak{P}_h$ gehörige x_h -Linie gezogen, so schneidet diese die dem Werte $t = t_h$ entsprechende Temperaturgerade in einem Punkte \mathcal{H} , der als

Zustandspunkt des hygroskopischen Gutes

betrachtet werden darf, das er nach Temperatur t_h und Dampfdruck \mathfrak{P}_h festlegt. (Die Annahme, daß $\mathfrak{P}_h = P_D$, ist mit der oben für $\mathfrak{P} = P'_t$ gemachten Einschränkung zulässig.) Punkt \mathcal{H} liegt auf der φ_h -Linie, für die die Beziehung

$$\varphi_h = \frac{\mathfrak{P}_h}{P'_{t_h}}$$

¹ Winkelmann: Über die Diffusion von Gasen und Dämpfen. Ann. d. Phys. 1884.

² Mache: Über die Verdunstungsgeschwindigkeit des Wassers in Wasserstoff und Luft. Wiener Sitzungsber. 1910.

gilt. Nach Abschnitt I. B. 4 besteht zwischen dem Feuchtigkeitsgehalt χ und dem Verhältnis $\frac{\mathfrak{P}}{P''}$ im hygroskopischen Gebiete die aus dem $\frac{\mathfrak{P}}{P''}$ - χ -Bilde hervorgehende Beziehung, die als unabhängig von der Temperatur betrachtet werden darf. Jedem Werte $\frac{\mathfrak{P}}{P''}$ kommt für eine gegebene Art hygroskopischen Gutes ein ganz bestimmter Wert χ zu. Das aber heißt, daß für einen bestimmten Stoff der Zustandspunkt hygroskopischen Gutes durch den seiner Lage im i - x -Bilde entsprechenden Wert $\varphi = \frac{\mathfrak{P}}{P''}$ auch den Betrag χ festlegt. Die φ -Linien stellen daher gleichzeitig Linien gleichen Feuchtigkeitsgehaltes χ hygroskopischen Gutes dar. Der einer bestimmten φ -Linie beizuschreibende χ -Wert besitzt jedoch nicht eine gleichbleibende Höhe, sondern hängt ab von den Gutseigenschaften. Das i - x -Bild bedarf daher einer Ergänzung durch das $\frac{\mathfrak{P}}{P''}$ - χ -Bild. Nach Abb. 1 kommt z. B. dem Verhältnis $\frac{\mathfrak{P}}{P''} = 0,5$ ein Wert χ zu, der für Stärke 0,125, für Humus 0,08, für Kaolin 0,0125 beträgt. Diese verschiedenen χ -Zahlen sind daher im i - x -Bilde der φ -Linie beizuschreiben, die dem Werte $\frac{\mathfrak{P}}{P''} = 0,5 = \varphi$ entspricht. Da nach Abb. 14 für das Hydrogel der Kieselsäure zu dem Werte $\frac{\mathfrak{P}}{P''} = 0,9$ der Wert $\chi = 1$ gehört, wäre hierfür der $\varphi = 0,9$ -Linie des i - x -Bildes die Zahl $\chi = 1$ anzufügen. Der hygroskopische Zustand eines bestimmten Gutes wird daher im i - x -Bilde durch einen Punkt dargestellt, dessen Lage die maßgebenden Eigenschaften des Gutes, nämlich Temperatur t , Dampfdruck \mathfrak{P} und Feuchtigkeitsgehalt χ festlegt. Da sich hieraus auch sein spezifischer Wärmehalt i rechnerisch ermitteln läßt, ist für hygroskopisches Gut die Ergänzung des i - x -Bildes durch ein i - χ -Bild weniger erforderlich als für feuchtes Gut.

Bei Körpern, wie dem Hydrogel der Kieselsäure, dehnt sich das hygroskopische Gebiet, wenn auch mit allmählich verschwimmender Kennzeichnung, über weit auseinander liegende Grenzen aus. Die Trocknung bewegt sich hier in weitem Verlauf, gegebenenfalls ganz im hygroskopischen Gebiete. In solchen Fällen und ganz allgemein dann, wenn der Anfangsfeuchtigkeitsgehalt des Gutes niedriger ist als dem hygroskopischen Punkte entspricht, d. h. $\chi_r < \chi_e$ wird, liegt der Zustandspunkt des Gutes während des ganzen Trockenvorganges oberhalb der Sättigungslinie. Das i - x -Bild gibt alsdann erschöpfende Auskunft über die wechselnden Eigenschaften des Gutes, wenn in ihm auch die der Veränderung des Gutes entsprechende Zustandskurve eingetragen wird.

Eine weitergehende Vereinfachung folgt, wenn die Kurve des $\frac{\mathfrak{P}}{P''}$ - χ -Bildes für alle hygroskopischen Körper als Gerade angesehen wird, die dem Gesetze $\frac{\chi}{\chi_e} = \frac{\mathfrak{P}}{P''}$ folgt. Während zuvor der χ -Wert in einer für jede Gutsart verschiedenen Zahl den φ -Linien beizuschreiben war,

gelten mit der getroffenen Voraussetzung die φ -Linien für jedes hygroskopische Gut mit einem Verhältnis $\frac{\chi}{\chi_e} = \frac{\mathfrak{P}}{P''} = \varphi$. Statt daher der $\varphi = 0,5$ -Linie als χ -Wert für Stärke 0,125, für Humus 0,08, für Kaolin 0,0125 beizuschreiben, kann sie für alle drei mit der Bezeichnung $\frac{\chi}{\chi_e} = 0,5$ versehen werden.

Bei hygroskopischem Gute ist der Stillstand der Trocknung in einem ideellen Punkte \mathfrak{S} dadurch gekennzeichnet, daß der wirksame Spannungsunterschied $\mathfrak{P}_{\mathfrak{S}} - P_D$ verschwindet, also $\mathfrak{P}_{\mathfrak{S}} = P_D$ wird. Für diesen nach unendlicher bzw. im praktischen Falle genügend langer Zeit sich einstellenden Gleichgewichts- oder

Beharrungszustand

ergibt sich daher

$$\varphi_{\mathfrak{S}} = \frac{P_D}{P''} = \frac{\mathfrak{P}_{\mathfrak{S}}}{P''}.$$

Das aber bedeutet, daß alsdann der Zustandspunkt \mathfrak{S} des Gutes auf die φ -Linie fällt, die gleichzeitig dem Zustande der Luft entspricht. Die φ -Linien der Tafel I kennzeichnen daher für hygroskopisches Gut den Grenzzustand der Trockenluft für Erreichung eines bestimmten Endfeuchtigkeitsgehaltes χ_i , der für verschiedene Gutsarten verschieden ist, bzw. eines für alle Gutsarten gleichen Verhältnisses $\frac{\chi_i}{\chi_e} = \varphi_i$, wenn die Beziehung zwischen $\frac{\mathfrak{P}}{P''}$ und χ durchweg linear angenommen wird. Entspricht z. B. dem Werte $\frac{\mathfrak{P}}{P''} = 0,5$ ein Wert $\chi = 0,125$, so heißt dies, daß die Luft dort, wo sie mit dem fertig getrockneten Gute zusammentrifft, keinesfalls einen höheren Feuchtigkeitsgrad als $\varphi = 0,5$ besitzen darf, wenn die Trocknung bis auf einen Feuchtigkeitsgehalt des Gutes $\chi_g = 0,125$ durchgeführt werden soll. Es wäre also ein voreiliges Urteil, in solchen Fällen, die sich z. B. bei der Getreidetrocknung ergeben, aus dem niedrigen Feuchtigkeitsgrad der Abluft auf ein mangelhaftes Verfahren zu schließen.

Das $\frac{\mathfrak{P}}{P''}$ - χ -Bild kann daher auch als

φ - χ -Bild

bezeichnet werden, wenn φ den Feuchtigkeitsgrad der Luft darstellt, mit der das hygroskopische Gut bei dem Feuchtigkeitsgehalt χ sich im Gleichgewicht befindet, also weder Feuchtigkeit verliert noch aufnimmt. Der Grenzwert χ_e im hygroskopischen Punkt entspricht daher einem Betrag $\varphi = 1$, d. h. gesättigter Luft.

Während bei feuchtem Gut die natürliche Trocknung ohne Vorwärmung stets möglich bleibt, solange die Luft nicht gesättigt ist, muß bei hygroskopischem Gut der Feuchtigkeitsgrad das durch χ_g bedingte Maß φ_g unterschreiten. Liegt der Feuchtigkeitsgrad der Frischluft höher, so ist Vorwärmung erforderlich.

Restlose Entfeuchtung auf einen Wert $x_0 = 0$ entspricht bei hygroskopischem Gute einem Verhältnis $\frac{p}{P''} = 0$ und damit einem Werte $\varphi_0 = 0$. Das aber bedeutet, daß sich vollständige Entfeuchtung hygroskopischen Gutes unter Verwendung von Luft als Trockenmittel deshalb nicht erreichen läßt, weil diese stets, wenn auch noch so wenig, Feuchtigkeit enthält.

Bisher war angenommen, daß als Trockenmittel ausschließlich feuchte Luft dient. Erfolgt die Wärmezufuhr an das Gut unmittelbar durch eine beheizte Fläche und fällt der Luft daneben die Aufgabe zu, die entstehenden Dämpfe aufzunehmen, d. h. Verdampfen bei der Siedetemperatur zu vermeiden und Verdunsten bei niedriger liegender Temperatur zu sichern, so bleibt der beschriebene Zusammenhang zwischen dem Feuchtigkeitsgehalt und den φ -Linien bestehen. Auch hier bestimmt die einem gegebenen x -Werte zugeordnete φ -Linie den höchsten Feuchtigkeitsgrad der umgebenden Luft, wenn ein bestimmtes hygroskopisches Gut bis zu dem Werte x entfeuchtet werden soll. Die umgebende Luft darf daher dort, wo sie mit dem stark getrockneten hygroskopischen Gut in Berührung kommt, keinesfalls gesättigt sein. Das bedeutet, daß über ihm kein sichtbarer Schwaden bestehen kann, sobald sein Feuchtigkeitsgehalt den Grenzwert x_e unterschreitet.

Auf dem von der Temperatur unabhängigen Zusammenhang zwischen φ -Werten der Luft und x -Werten des Gutes beruht die Anwendung des Haarhygrometers. Die Längenänderung, die ein entfettetes Frauenhaar mit Wechsel seines Feuchtigkeitsgehaltes erfährt, wird dabei als Maß des Feuchtigkeitsgrades der Luft benutzt. In gesättigter Luft nimmt das Haar den Feuchtigkeitsgehalt x_e an. Er sinkt bei einem Feuchtigkeitsgrad $\varphi < 1$ auf einen Wert $x < x_e$, der nur abhängig ist von φ und bei linearer Beziehung zwischen $\frac{p}{P''}$ und x den Wert $x = \varphi \cdot x_e$ annimmt.

D. Das i - x -Bild für feuchtes Gut.

Während bei dem i - x -Bilde die Entscheidung leicht dahin zu treffen ist, daß als trocknendes Gas Luft und als aufzutrocknende Flüssigkeit Wasser die Regel bildet, liegt bei dem i - x -Bilde des Gutes die Schwierigkeit vor, daß die spezifische Wärme c_x des Trockenstoffanteiles für verschiedene Gattungen von Gut sich ändert.

Ein Ausweg bestünde darin, statt der auf 1 kg Trockenstoff bezogenen Größen i und x , die Werte $\frac{i}{c_x}$ und $\frac{x}{c_x}$ zur Darstellung zu bringen. Auf diese Weise entstünde das in Abb. 23 wiedergegebene $\frac{i}{c_x} - \frac{x}{c_x}$ -Bild, das für Gut jeder Art gilt. Es erscheint jedoch nicht unbedingt nötig, diese Vereinheitlichung durchzuführen, weil das i - x -Bild, wie es für ein bestimmtes Gut gilt, sich nur aus Geraden zusammensetzt. In Abb. 24 ist z. B. für einen Wert $c_x = 0,32$, wie er der trockenen Papierfaser entspricht, das i - x -Bild dargestellt. Während die Temperatur-

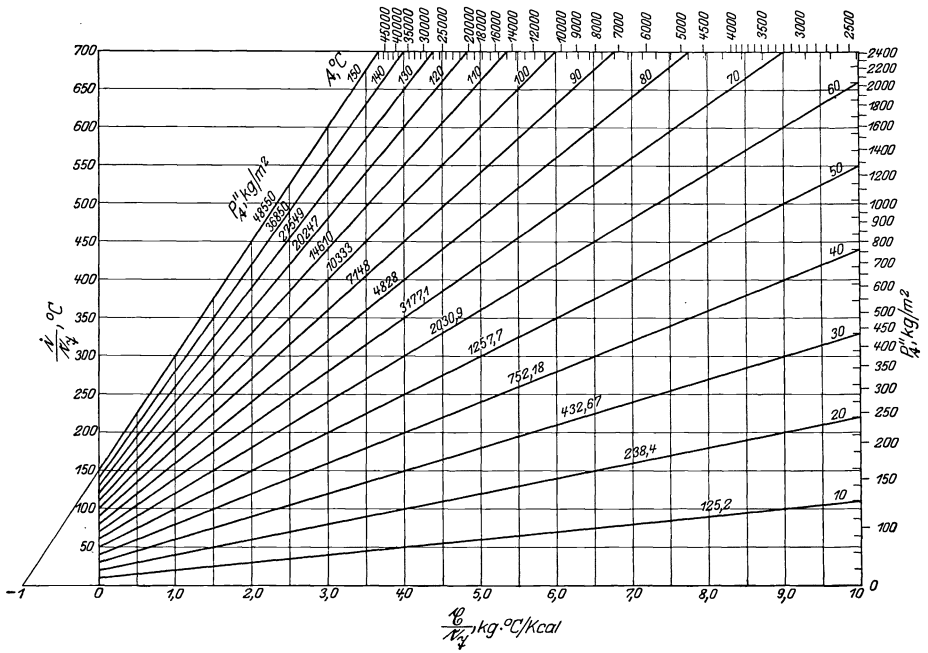


Abb. 23. $\frac{i}{c_x} - \frac{x}{c_x}$ -Bild für feuchtes Gut.

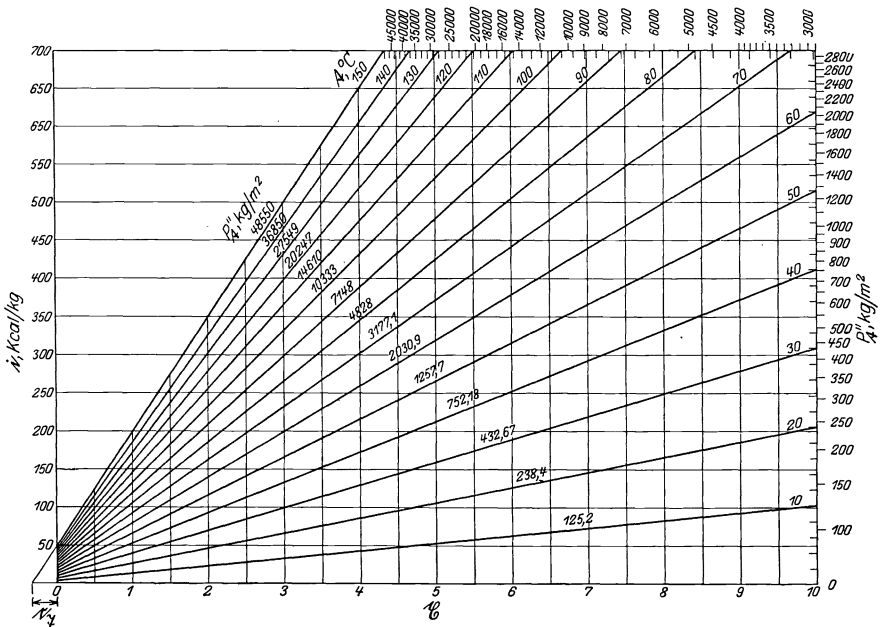


Abb. 24. $i-r$ -Bild für feuchtes Gut ($c_x = 0,32$).

linien sich bei Abb. 23 in einem Abszissenabstand 1 links von dem Nullpunkt schneiden, liegt in dem i - x -Bilde dieser Schnittpunkt in der Entfernung x_x , also in Abb. 24 um das Abszissenmaß 0,32 links vom Nullpunkt. Beide Darstellungen unterscheiden sich nur durch die Verschiebung des Ordinatenursprunges. Abbildung 23 und 24 enthalten als Randteilung neben der Temperatur t auch den Druck P_t'' . Für feuchte Körper gelten beide Bezeichnungen. Linien gleicher Temperatur und gleichen Dampfdruckes fallen zusammen. Dagegen weichen sie bei hygroskopischem Gut voneinander ab. In

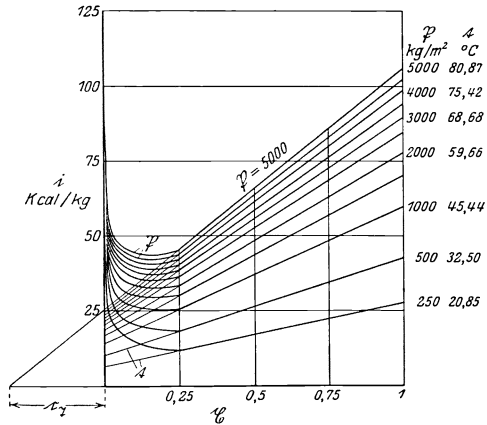


Abb. 25. i - x - β -Bild für hygroskopisches Gut ($x_x = 0,32$; $x_e = 0,25$).

Abb. 25 sind zum Anfang der Abb. 24 die β -Linien vergrößert für den Fall wiedergegeben, daß z. B. das hygroskopische Verhalten bei einem Werte $x_e = 0,25$ einsetzt und zwischen x und dem Verhältnis $\frac{\beta}{P''}$ linearer Zusammenhang besteht.

E. Der Randmaßstab im i - x -Bilde.

Die Wärmebilanzgleichung (22b) läßt sich auch schreiben

$$Q + G_L \cdot i_{\beta r} (x_h - x_r) - G_x \cdot C_{\beta} (t_h - t_r) - Q_{\text{verl}} = G_L (i_h - i_r)$$

oder, wenn sämtliche Größen auf 1 kg verdunstete Flüssigkeit bezogen, d. h. beide Seiten durch die stündliche Trockenleistung $G_L (x_h - x_r)$ geteilt werden,

$$\frac{Q}{G_L(x_h - x_r)} + i_{\beta r} - \frac{G_x \cdot C_{\beta} (t_h - t_r)}{G_L(x_h - x_r)} - \frac{Q_{\text{verl}}}{G_L(x_h - x_r)} = \frac{i_h - i_r}{x_h - x_r}$$

oder mit $G_L (x_h - x_r) = G_x (x_r - x_h)$

$$\frac{Q}{G_L(x_h - x_r)} + i_{\beta r} - C_{\beta} \cdot \frac{t_h - t_r}{x_r - x_h} - \frac{Q_{\text{verl}}}{G_L(x_h - x_r)} = \frac{i_h - i_r}{x_h - x_r}. \quad (26)$$

Das auf der rechten Seite stehende Verhältnis bedeutet die Zunahme des Wärmehaltes der Luft, bezogen auf 1 kg verdunstete Flüssigkeit. Nach der linken Seite ist diese Zunahme keinesfalls gleichbedeutend mit dem durch $\frac{Q}{G_L(x_h - x_r)}$ dargestellten spezifischen Wärmeverbrauch. Beide sind nur dann einander gleich, wenn folgende Beträge vernachlässigt werden:

1. die Flüssigkeitswärme der in die Luft wandernden Feuchtigkeit $G_L \cdot i_{\text{str}}(x_h - x_r)$,
2. die im Gut verbleibende Überschußwärme $G_x \cdot C_p(t_h - t_r)$ und
3. die Streuverluste Q_{verl} .

In Abb. 26 bezeichne
 Index r den Zustand der äußeren Luft (Punkt R),
 Index a den Zustand der vorgewärmten Luft am Anfang des Hauptabschnittes der Trocknung (Punkt A),
 Index e den Zustand der Luft am Ende des Hauptabschnittes der Trocknung (Punkt E).

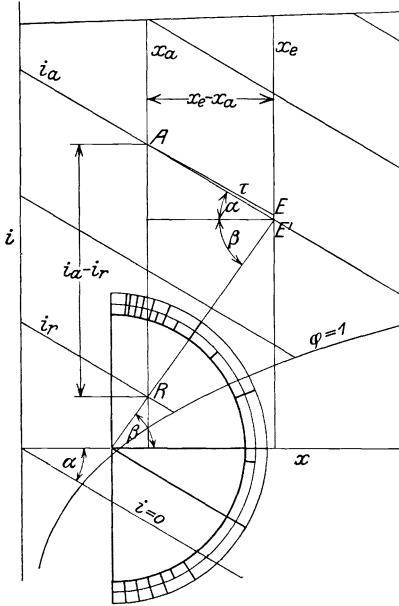


Abb. 26. Anwendung des Winkelmessers zur Ermittlung des spezifischen Wärmeverbrauchs.

Die Luft werde vor dem Zusammentreffen mit dem Trockengut erwärmt. Dieser Vorgang vollzieht sich bei gleichbleibendem Feuchtigkeitsgehalt x_r der Luft, die Zustandsänderung folgt daher im i - x -Bild der Ordinaten als Linie gleichen Feuchtigkeitsgehaltes. Punkt A liegt senkrecht über Punkt R . Die Gerade AE entspricht dem Hauptabschnitt der Trocknung, fällt daher nach dem oben Gefundenen mit der Kühlgrenzlinie zusammen, wenn hier die vereinfachende Annahme getroffen wird, daß das Trockengut von vornherein die Kühlgrenztemperatur besitzt.

Die erste Vernachlässigung läuft darauf hinaus, die Abweichung der τ -Linie von der i -Linie unberücksichtigt, also den Luftzustandspunkt E mit dem Punkt E' zusammenfallen zu lassen. Die beiden letzten Vernachlässigungen bedeuten, daß von dem

Einfluß der Temperaturänderung des Gutes und der Streuverluste auf den Verlauf der Luftzustandskurve abgesehen wird. Dies kommt in Abb. 26 dadurch zum Ausdruck, daß Punkt E' als Endzustandspunkt der Luft betrachtet, die ganze Trocknung daher als Hauptabschnitt aufgefaßt wird, in dem die Temperatur des Gutes ständig auf der Kühlgrenze stehen bleibt.

Der spezifische Wärmeverbrauch $\frac{Q}{G_L(x_e - x_r)} \approx \frac{i_a - i_r}{x_e - x_r}$ wird nach Abb. 26 im i - x -Bilde durch den Winkel β festgelegt, den die waagerechte Abszissenachse mit der Verbindungslinie der beiden Punkte R und E' bildet, die den Grenzzuständen der Trockenluft entsprechen. Bezeichnet α den gleichbleibenden Winkel, den die i -Linie mit der waagerechten Abszissenachse bildet, so gilt

$$\frac{i_a - i_r}{x_e - x_r} = n(\text{tg } \alpha + \text{tg } \beta).$$

$n \cdot \operatorname{tg} \alpha$ stellt hierbei im Maßstab n des Koordinatenverhältnisses $\frac{i}{x}$ den festen Wert 595 kcal dar. Der Winkel ist von dem Maßstab des i - x -Bildes abhängig (bei Tafel I und III: $\operatorname{tg} \alpha = \frac{0,1}{0,001} \cdot 595 = 5,95$; bei Tafel II: $\operatorname{tg} \alpha = \frac{0,1}{0,0001} \cdot 595 = 0,595$).

Der für die Tafeln I und III, bzw. für Tafel II entworfene Winkel- β -Messer¹, der am Umfange den Wert $n (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta)$ unmittelbar enthält, kann daher zur Ermittlung dieses Verhältnisses in der in Abb. 26 gekennzeichneten Weise angelegt werden.

Stellt Punkt E den Endzustand des Gutes, unter Berücksichtigung des wirklichen Verlaufs der Trocknung längs der τ -Linie oder längs irgendeiner von A ausgehenden Kurve dar, so ist, wenn die Abweichung von der i -Linie berücksichtigt werden soll, Punkt R nicht mit Punkt E , sondern mit Punkt E' zu verbinden, in dem die durch A gehende i -Linie die x_e -Linie schneidet, und für die Richtung RE' der Winkelmesser anzulegen.

Der nach Mollier im i - x -Bilde, Abb. 18 und Tafel I, für wasserdampfhaltige Luft angegebene Randmaßstab, dem der Winkelmesser nachgebildet ist, ermöglicht die Ablesung des Verhältnisses $\frac{i_a - i_r}{x_e - x_r}$, wenn durch den Ordinatenursprung eine Parallele zu der Verbindungslinie des Punktes R mit dem in angegebener Weise zu findenden Punkte E' gezogen wird.

Erfolgt die Wärmezufuhr nicht, wie früher vorausgesetzt, ausschließlich an die Luft vor Berührung mit dem Gute, sondern während der Trocknung an Luft oder Gut oder beide, so versagt das angegebene Verfahren für Ermittlung des spezifischen Wärmeverbrauches. Als dann kommt die Annäherung in Frage, die drei oben erwähnten Vernachlässigungen zuzulassen und den Winkelmesser oder Randmaßstab für die Verbindungslinie RE anzuwenden. Denn in dem Werte $G_L(i_e - i_r)$ ist der Betrag des äußeren Wärmestromes enthalten, gleichgültig in welcher Weise die Wärmezufuhr erfolgt, allerdings unter Vernachlässigung der Punkte 1. bis 3.

V. Wechselwirkung zwischen feuchten Gasen und Gut.

A. Wechselwirkung zwischen feuchten Gasen und tropfbaren Flüssigkeiten.

Die Trockenkraftlinie \varkappa für feuchtes Gut.

Es bedeute

Q_t den von dem Gas an die Flüssigkeit übergehenden Wärmestrom, fühlbar durch Verminderung der Gastemperatur (bzw., wenn negativ, Erhöhung der Gastemperatur), in kcal/h,

¹ Den Tafeln im Anhang beigelegt.

- Q' den von dem Gas an die Flüssigkeit übergehenden Wärmestrom, entstehend durch Niederschlag von Dampf aus dem Gas (bzw., wenn negativ, Verdampfen von Flüssigkeit in das Gas), in kcal/h,
 $Q_F = Q_t + Q'$ den von dem Gas an die Flüssigkeit übergehenden inneren Wärmestrom, in kcal/h,
 F die gasberührte Oberfläche der Flüssigkeit, in m^2 ,
 α die Übergangszahl für fühlbare Wärme, in $kcal/m^2 \cdot ^\circ C \cdot h$,
 α' die Übergangszahl für Dampfwärme, bezogen auf $1 kg/m^2$ Unterschied des Dampfdruckes, in $kcal/kg \cdot h$,
 V den von dem Gas-Flüssigkeitsgemisch erfüllten Rauminhalt, in m^3 ,
 α_V die räumliche Übergangszahl für die fühlbare Wärme, in $kcal/m^3 \cdot ^\circ C \cdot h$,
 α'_V die räumliche Übergangszahl für die Verdampfwärme, bezogen auf $1 kg/m^2$ Unterschied des Dampfdruckes, in $kcal/m \cdot kg \cdot h$,
 t die Temperatur des feuchten Gases, in $^\circ C$,
 t'_x den Taupunkt des feuchten Gases beim Feuchtigkeitsgehalt x , in $^\circ C$,
 t die Temperatur der Flüssigkeit, in $^\circ C$,
 P_D den Teildruck des in dem feuchten Gase enthaltenen Dampfes, in kg/m^2 ,
 \mathfrak{P} den Dampfdruck über der Flüssigkeit, in kg/m^2 .

Bei dem Wärmeaustausch zwischen feuchten Gasen und tropfbaren Flüssigkeiten tritt von dem Gas in die Flüssigkeit stündlich eine Wärmemenge über, deren fühlbarer Betrag

$$Q_t = F \cdot \alpha (t - t) \quad (27)$$

und deren Dampfanteil

$$Q' = F \cdot \alpha' (P_D - \mathfrak{P}) \quad (28)$$

entspricht. Die gesamte an die Flüssigkeit stündlich übertragene Wärme beträgt

$$Q_F = Q_t + Q' = F [\alpha (t - t) + \alpha' (P_D - \mathfrak{P})]. \quad (29)$$

Tritt die Oberfläche der Flüssigkeit in rechnerisch schwer zu erfassender unregelmäßiger Form auf, so ist es zweckmäßiger, das Gesetz der Wärmeübertragung in die Form zu bringen:

$$Q_F = Q_t + Q' = V [(\alpha_V (t - t) + \alpha'_V (P_D - \mathfrak{P}))]. \quad (29a)$$

Die beiden Teilbeträge Q_t und Q' können im einzelnen positiv oder negativ sein, was folgende Auslegung ergibt:

$$t > t. \quad Q_t \text{ positiv,}$$

das wärmere Gas führt der kälteren Flüssigkeit fühlbare Wärme zu. Dieser Fall bildet die Regel bei der reinen Lufttrocknung;

$$t < t. \quad Q_t \text{ negativ,}$$

die wärmere Flüssigkeit führt dem kälteren Gase fühlbare Wärme zu. Dies tritt z. B. ein, wenn das getrocknete Gut nachträglich durch Frischluft abgekühlt wird;

$$P_D > \mathfrak{P}. \quad Q' \text{ positiv,}$$

Feuchtigkeit schlägt aus dem Gase in die Flüssigkeit nieder. Dieser Fall kann im allgemeinen nur eintreten, wenn die Flüssigkeit kälter als das Gas, Q_t also positiv ist. Die Flüssigkeitstemperatur liegt unter dem Taupunkt. (Ein Ausnahmefall ergibt sich, wenn die Flüssigkeit an einen hygroskopischen Körper gebunden ist. Alsdann ist es möglich, daß Feuchtigkeit aus dem Gase in Flüssigkeit von gleicher oder sogar höherer Temperatur niederschlägt.)

$$P_D < \mathfrak{P}. \quad Q' \text{ negativ,}$$

Flüssigkeit verdampft in das Gas. Die Flüssigkeit ist hierbei entweder wärmer als das Gas, Q_t also negativ, z. B. bei Nachtrocknung durch kühlende Frischluft, oder sie besitzt die gleiche Temperatur wie das Gas, wobei $Q_t = 0$ ist, oder sie ist kälter als das Gas, Q_t also negativ. Dieser letzte Fall entspricht der reinen Lufttrocknung durch Gase im Ausgleichszustande des feuchten Gutes. Für die Bedingung $P_D < \mathfrak{P}$ bedeutet der Taupunkt des Gases die tiefstmögliche Temperatur der Flüssigkeit.

Im i - x -Bild der Abb. 27 ergibt sich für den einem beliebigen Zustande des Gases zugeordneten Punkt G Niederschlag in die Flüssigkeit oder Verdampfung in das Gas, je nachdem die Flüssigkeitstemperatur tiefer oder höher als der Taupunkt t'_x liegt, der dem Schnittpunkt der Sättigungslinie mit der durch G gehenden Ordinaten entspricht. (Ist, im Ausnahmefalle, die Flüssigkeit an einen hygroskopischen Körper gebunden, so liegt der Grenzzustand senkrecht über diesem Schnittpunkt, also bei einer Temperatur oberhalb des Taupunktes).

Sind Q_t und Q' gleichzeitig positiv, so bedeutet dies Erwärmung der Flüssigkeit und Niederschlag in die Flüssigkeit auf der einen, Abkühlung und Entfeuchtung des Gases auf der anderen Seite; sind umgekehrt Q_t und Q' gleichzeitig negativ, so folgt hieraus Abkühlung und Verdampfung der Flüssigkeit auf der einen, Erwärmung und Befeuchtung des Gases auf der anderen Seite. Ist Q_t positiv und Q' negativ, so nimmt die Flüssigkeit aus dem Gase fühlbare Wärme, das Gas aus der Flüssigkeit Dampfwärme auf. Im Grenzzustande wird $Q_t = -Q'$ und $Q_F = 0$. Die von dem Gas an die Flüssigkeit abgegebene fühlbare Wärme entspricht gerade der aus der Flüssigkeit an das Gas übertragenen Dampfwärme. Es folgt alsdann

$$-Q' = Q_t = F \cdot \alpha (t - t).$$

Dieser Fall ist gegeben, wenn reine Lufttrocknung feuchten Gutes vorliegt. Im Ausgleichszustande, während dessen die Veränderung des Luftzustandes längs der τ -Linie vor sich geht, fällt t mit der Kühlgrenztemperatur τ zusammen, die die Flüssigkeit bzw. das feuchte Gut dauernd behält.

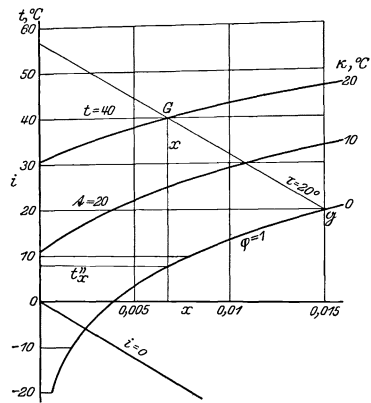


Abb. 27. Trockenkraftlinien κ im i - x -Bild.

Q' ist gleichbedeutend mit der im Wärmemaßstabe ausgedrückten stündlichen Trockenleistung. Der Wert $\frac{-Q'}{F \cdot \alpha} = (t - \tau)$ bezeichnet für den Ausgleichzustand des feuchten Gutes, der dem Hauptabschnitte der Trocknung entspricht, das Temperaturgefälle, das gleich der stündlichen Trockenwärmeleistung wird, wenn der Betrag $F \cdot \alpha$, d. h. der auf 1° Temperaturgefälle entfallende stündliche Wärmeübergang, 1 kcal/° C·h beträgt. Diese auf $F \cdot \alpha = 1$ bezogene Trockenwärmeleistung stellt die Wirksamkeit der Luft als Trockenmittel dar und sei als

Trockenpotential oder spezifische Trockenkraft \varkappa bezeichnet. Für verschiedenen Zustand der Luft ist das Trockenpotential gegenüber feuchtem Gut im Ausgleichzustande gleich hoch, wenn der Unterschied zwischen der Lufttemperatur t und der dem Luftzustande entsprechenden Kühlgrenze τ denselben Wert besitzt. Das aber bedeutet, daß sich

Linien gleicher Trockenkraft \varkappa

nach Abb. 27 im i - x -Bilde darstellen lassen durch Kurven, deren Abstand von der Sättigungslinie gleich ist, wobei dieser Abstand längs der τ -Linien im Temperaturmaßstabe gemessen bzw., da dieser längs der τ -Linien ständig wechselt, in Grad abgezählt wird.

Die Trockenkraftlinien als reines Temperaturgefälle darzustellen, ist nur unter der genügend genau zulässigen Voraussetzung folgerichtig, daß die Wärmeübergangszahl α bei Zustandsänderungen längs der τ -Linien unabhängig von der Temperatur ist.

Die Linien gleicher spezifischer Trockenkraft sind in den Tafeln II und III eingetragen. Sie stellen eine wichtige Ergänzung des Mollierschen i - x -Bildes dar.

Zahlenbeispiel 2. Aus Tafel II läßt sich z. B. ablesen, daß Luft mit $t = 20^\circ$ und $x = 0,0037$ Feuchtigkeitsgehalt eine spezifische Trockenkraft $\varkappa = 10$ besitzt und in der Trockenwirkung Luft von $t = 30^\circ$ und $x = 0,011$ bzw. Luft von $t = 40^\circ$ und $x = 0,024$ gleichkommt, während Luft von $t = 20^\circ$ und $x = 0,009$ ein Trockenpotential $\varkappa = 5$, d. h. nur die halbe Wirkung, besitzt; ihre Vorwärmung auf $t = 28^\circ$ verdoppelt die spezifische Trockenkraft und bringt sie damit auf die Höhe der zuvor genannten Zustände.

Wegen der Beziehung

$$\begin{aligned} -Q' &= F \cdot \alpha' (\mathfrak{P} - P_D), \\ \frac{-Q'}{F \cdot \alpha'} &= \mathfrak{P} - P_D \end{aligned}$$

kann das Trockenpotential auch durch das Gefälle zwischen der der Kühlgrenztemperatur τ entsprechenden Sättigungsspannung P'_τ und der Dampfteilspannung P_D der Luft gemessen werden. Diese Auslegung scheint näher zu liegen als die Auffassung von \varkappa als Temperaturgefälle. Trotzdem ist die letzte vorzuziehen, weil sie die Eintragung von Potentiallinien in das i - x -Bild gestattet und außerdem Widersprüche vermeidet, die sich im anderen Falle nach späterer Erörterung ergeben würden.

Die Trockenpotentiallinien der Tafeln II und III gelten nur für feuchtes Gut im Ausgleichzustande, verlieren daher ihre Bedeutung für Untersuchung der Zustandsänderung, wenn die Temperatur des Gutes von beliebiger anfänglicher Höhe bei Beginn der Trocknung der Kühlgrenze zustrebt, ebenso wie für die Verfolgung der Zustandsänderungen im hygroskopischen Gebiete.

Spätere Untersuchungen werden zeigen, daß, wenn anfangs feuchtes Gut hygroskopische Eigenschaften annimmt, der Zustandspunkt der Luft bei reiner Lufttrocknung die τ -Linie verläßt und sich in einer Richtung weiterbewegt, die genügend genau mit der Richtung der i -Linie zusammenfällt. Nach dem früher Gesagten stellen die φ -Linien des i - x -Bildes gleichzeitig $\frac{x}{x_e}$ -Linien hygroskopischen Gutes dar. Bei hygroskopischem Gut mit einem Feuchtigkeitsgehalt τ und einem Verhältnis $\frac{x}{x_e} = \varphi$ sind daher

in bezug auf das Trockenpotential angenähert alle Zustandspunkte der Luft gleichwertig, wenn zu ihnen ein Wert P_D gehört, der den Betrag \mathfrak{P} des zugeordneten Zustandspunktes des Gutes auf der φ -Kurve um ein gleichbleibendes Maß $\mathfrak{P} - P_D$ unterschreitet. Die zueinander gehörigen Zustandspunkte für Luft und Gut liegen hierbei auf i -Linien.

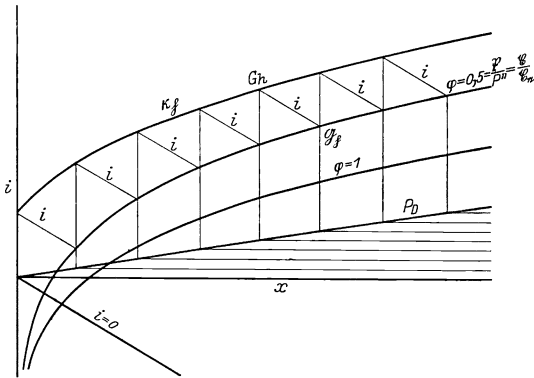


Abb. 28. Angenäherte Trockenkraftlinie für hygroskopisches Gut im i - x -Bild.

In Abb. 28 ist z. B. zu der Feuchtigkeitsgrad-Linie für $\varphi = 0,5$ die angenäherte Trockenkraftlinie für hygroskopisches Gut mit einem Werte $\mathfrak{P} - P_D = 50 \text{ kg/m}^2$ entworfen. Sie verläuft zu der φ -Linie ähnlich wie die für feuchtes Gut geltende Trockenkraftlinie zur Sättigungslinie.

Da die Trockenkraftlinien aus den Schnittpunkten der t - und τ -Linien gefunden sind, können sie auch umgekehrt dazu benutzt werden, um für eine bestimmte Kühlgrenze τ die Linie gleichbleibender Kühlgrenze ohne weitere Rechnung einzuzichnen. Es sind zu diesem Zwecke der Schnittpunkt der t -Linie, die dem Zahlenwert τ entspricht, mit der Sättigungslinie und die schräg darüberliegenden Schnittpunkte der t - und κ -Linien durch eine Gerade zu verbinden, die alsdann die τ -Linie darstellt.

B. Wärmeübergangszahl zwischen feuchten Gasen und tropfbaren Flüssigkeiten.

1. Kritische Geschwindigkeit w_k .

Ebenso wie bei der mittelbaren Wärmeübertragung durch Metallwände ist bei dem unmittelbaren Wärmeübergang zwischen Gasen und tropfbaren Flüssigkeiten eine plötzliche Verschlechterung anzunehmen, wenn die Strömungsgeschwindigkeit den kritischen Wert

$$w_k = \frac{R_k \cdot \mu}{d \cdot \varrho} \tag{30}$$

unterschreitet. Es kann alsdann nicht mehr mit einer Durchwirbelung der Gase gerechnet werden, der Übergang der Feuchtigkeit erfolgt in der Hauptsache durch die weniger wirksame Diffusion.

Hierbei bedeuten

- $R_k \approx 2320$ eine Kenngröße, die Reynoldssche Zahl,
- μ die Zähigkeit des Gases, in $\text{kg} \cdot \text{s/m}^2$,
- d den Durchmesser des Gasweges bei kreisförmigem Querschnitt, in m,
- ϱ die Massendichte, in $\text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$.

Bei geschichtetem Gute kann der Weg der Trockengase in erster Annäherung kanalförmig und die Grenzgeschwindigkeit als kritische Geschwindigkeit abhängig von dem gleichwertigen Durchmesser d' des Strömungsweges angenommen werden.

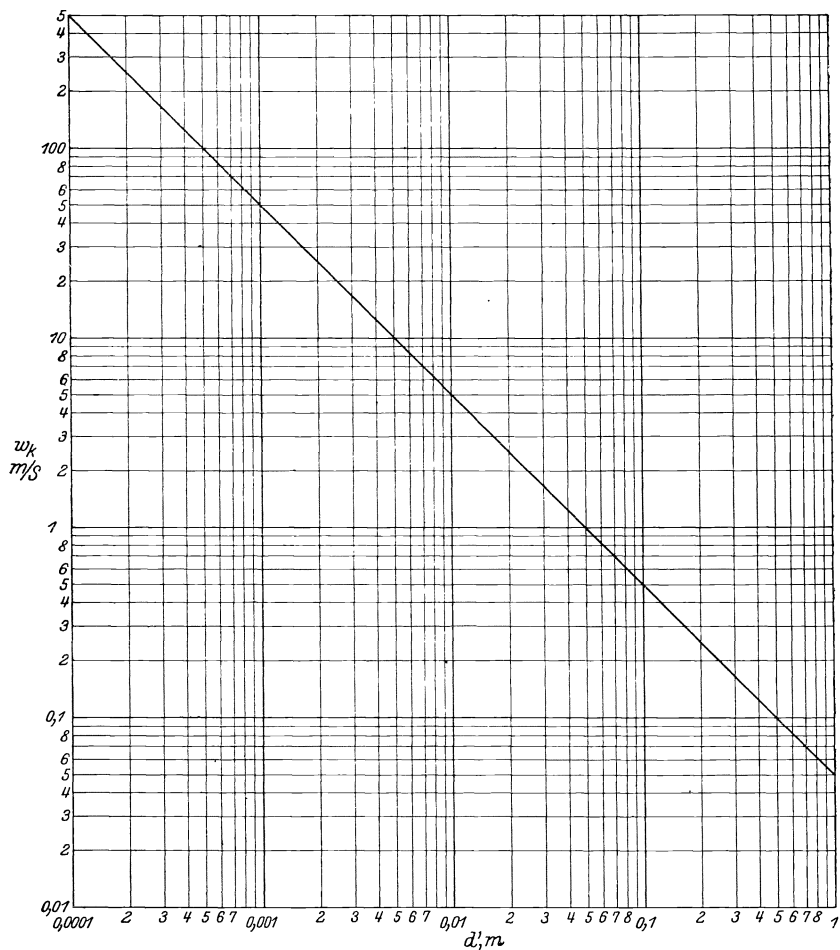


Abb. 29. Abhängigkeit der kritischen Geschwindigkeit w_k vom gleichwertigen Durchmesser d' ($\frac{R_k \cdot \mu}{\rho} = 0,05$).

Abb. 29 stellt in logarithmischem Maßstabe die Abhängigkeit des Wertes w_k von d' dar, wenn Luft als Trockenmittel dient. Hierbei ist $\frac{R_k \cdot \mu}{\rho} \approx 0,05$ angenommen und der Einfluß von Temperatur und Feuchtigkeitsgrad der Luft vernachlässigt, weil er gegenüber der Ungewißheit in der Festsetzung der Querschnittsform des Strömungsweges verschwindet. Es ergibt sich, daß bei feinkörnigem und daher dicht geschichtetem Gute die auf den freien Querschnitt bezogene Luftgeschwindigkeit

hoch gehalten werden muß. Um die Strömungswiderstände zu beschränken, ist das Gut in um so dünnerer Schicht anzuordnen, je feiner es ist.

Selbstverständlich kommt diesen Erwägungen keine genaue rechnerische Bedeutung zu, weil auch bei geringeren Geschwindigkeiten wegen der Ungleichförmigkeit des Weges mit einer Fortsetzung der am Eintritt sich bildenden Wirbel durch die ganze Trockengutschicht hindurch gerechnet werden kann.

Bei streifenförmigem Luftstrom, wie er bei der Trocknung frei aufgehängter, tafelförmiger Waren sich ergibt, ist der gleichwertige Durchmesser $d' = \frac{2B \cdot H}{B + H}$, wobei $B \cdot H$ den Querschnitt des Luftstreifens und $2(B + H)$ seinen Umfang bedeuten. Im Gegensatz zu geschichtetem Trockengut kommt der errechneten kritischen Geschwindigkeit in solchen Fällen auch praktischer Wert zu.

Die kritische Geschwindigkeit liegt wohl ausnahmslos über dem Wert, der nach Abb. 29 nötig ist, um voraussetzungsgemäß die Temperatur feuchten Gutes im Ausgleichszustande gleich der Kühlgrenze setzen zu dürfen. Die gewählte Annäherung ist deshalb unbedenklich. Sie führt nur dann zu falschen Schlüssen, wenn die Luftgeschwindigkeit den kritischen Wert erheblich unterschreitet. Solche Fälle sind aber mit Rücksicht auf die Wärmeaustauschvorgänge besonders ungünstig, ihre Verwirklichung zählt zu den nach Möglichkeit zu vermeidenden Ausnahmen. Die hier entwickelte nach Vereinfachung strebende Theorie darf daher darüber hinweg gehen.

2. Die Wärmeübergangszahl α und α_V .

Bei der rechnerischen Feststellung der Wärmeübergangszahl ist zu unterscheiden, ob das Gut zahlenmäßig in der Größe der dem Gasstrom ausgesetzten Oberfläche F erfaßt werden kann, oder ob seine Gestaltung so unregelmäßig ist, daß zahlenmäßig nur der Rauminhalt V feststeht, den das Gut im Gasstrom einnimmt. Z. B. ist das erste der Fall, wenn Waren in Tafelform vorliegen, das letzte, wenn es sich um schaufelfähige Stoffe handelt.

Die Fläche F kann eine Ebene bilden oder von unregelmäßiger Form sein. Für die Wärmeübergangszahl zwischen Luft und ebenen Flächen haben die Untersuchungen von Nusselt-Jürges¹ im Maschinenlaboratorium der Technischen Hochschule Karlsruhe zu folgenden Formeln geführt

$$\alpha = 5,3 + 3,6 \cdot w \quad \text{für } w \leq 5 \text{ m/s}, \quad (31)$$

$$\alpha = 6,7 \cdot w^{0,78} \quad \text{für } w > 5 \text{ m/s}, \quad (31a)$$

wobei w die Geschwindigkeit des Luftstromes in m/s darstellt. Die Beobachtungen wurden mit Kupferplatten verschiedener Rauigkeit gemacht und ergaben die obigen Beiwerte für stark gerauhte Oberfläche,

¹ Nusselt-Jürges: Die Kühlung einer ebenen Wand durch einen Luftstrom. Ges.-Ing. 1922. Jürges: Beihefte z. Ges.-Ing. 1924, Reihe 1, Nr. 19.

während bei glatten Flächen die Formeln

$$\alpha = 5 + 3,4 \cdot w$$

bzw.

$$\alpha = 6,14 \cdot w^{0,78}$$

lauten. Bei den hier in Betracht kommenden Flächen handelt es sich wohl ausnahmslos um raue Flächen, so daß die Formeln mit den höheren Beiwerten anzuwenden sind. Hierbei ist vorausgesetzt, daß die Geschwindigkeit, mit der das Gas über das Gut streicht, in allen Fällen oberhalb der kritischen Geschwindigkeit gehalten wird.

Für den Wärmeübergang von turbulenten Rauchgasen an eine ebene Wand fand Zimmermann¹ die Beziehung

$$\alpha = 8,5 \cdot w^{0,76}.$$

Der Einfluß der Geschwindigkeit auf α und damit die Trockenwirkung, ist erheblich. Hieraus ergibt sich, daß Maßnahmen, die den Luftlauf beschleunigen, eine Abkürzung der Trockenzeit ergeben. Umgekehrt kann große Luftgeschwindigkeit schädlich wirken, wenn das Gut zu hohe Trockengeschwindigkeit nicht verträgt.

Für freie Strömung in Luft über eine beheizte Platte fand Nusselt² die Beziehung $\alpha = 2,2 \sqrt[4]{\vartheta - t}$, die durch die Untersuchungen von Nusselt-Jürges³ im Maschinenlaboratorium der Technischen Hochschule Karlsruhe bestätigt wurde. Hierbei bedeuten ϑ die Temperatur der Wand, in °C, t die Temperatur der Luft, in °C.

Für den hier interessierenden umgekehrten Fall der Wärmeübertragung von Luft an Wand kann

$$\alpha = 2,2 \sqrt[4]{t - \vartheta} \quad (32)$$

gesetzt werden.

Fälle, bei denen das Gut die Form eines Rohres besitzt, das innen von dem Gasstrom durchflossen wird, kommen nur ausnahmsweise in Betracht. Für sie gilt alsdann die Nusselt⁴-Gröbersche⁵ Formel

$$\alpha_m = 22,5 \cdot l^{-0,05} \cdot d^{-0,16} \cdot w^{0,79} \cdot \frac{\lambda_m}{a_m^{0,79}}. \quad (33)$$

Hierbei bedeuten

α_m die mittlere Wärmeübergangszahl, in kcal/m²·°C·h,
 l die Rohrlänge, in m,

¹ Zimmermann: Der Wärmeübergang am Gleichstromwärmeaustauscher. Diss. 1928.

² Nusselt: Forschungsheft 64.

³ Nusselt-Jürges: Das Temperaturfeld über einer lotrecht stehenden geheizten Platte. Z. V. d. I. 1928.

⁴ Nusselt: Der Wärmeübergang im Rohr. Z. V. d. I. 1917.

⁵ Gröber: Die Grundgesetze der Wärmeleitung und des Wärmeüberganges. Berlin: Julius Springer 1921.

d den Rohrdurchmesser, in m,
 w die Fließgeschwindigkeit, in m/s,

$\lambda_m = \frac{1}{T - \Theta} \int_{\Theta}^T \lambda \cdot dT$ die mittlere Wärmeleitfähigkeit des Gases, in
 kcal/m · °C · h,

$\alpha_m = \frac{\lambda_m}{c_{pm} \cdot \gamma_m}$ die mittlere Temperaturleitfähigkeit des Gases, in m²/h,

$c_{pm} = \frac{1}{T - \Theta} \int_{\Theta}^T c_p \cdot dT$ die mittlere spezifische Wärme des Gases, in
 kcal/kg · °C,

$\gamma_m = \frac{1}{T - \Theta} \int_{\Theta}^T \gamma \cdot dT = \frac{\gamma_{\Theta} \cdot \Theta}{T - \Theta} \cdot \ln \frac{T}{\Theta}$ das mittlere spezifische Gewicht
 des Gases, in kg/m³,

T die absolute Temperatur des Gases, in °C abs.,

Θ die absolute Temperatur der Rohrwand, in °C abs.,

γ_{Θ} das spezifische Gewicht des Gases bei der Temperatur Θ , in kg/m³,

$T_m = \frac{T - \Theta}{\ln \frac{T}{\Theta}}$ die mittlere absolute Temperatur des Gases, in °C abs.

Bei ringförmigem Querschnitt des Gasweges mit einem Durchmesser d_1 des äußeren, d_2 des inneren Ringes ist für den Fall, daß der Wärmeaustausch durch beide Seiten erfolgt, der gleichwertige Durchmesser

$$d' = d_1 - d_2$$

einzusetzen, während für rechteckigen Querschnitt der gleichwertige Durchmesser

$$d' = \frac{2B \cdot H}{B + H}$$

wird, wobei B und H die Seitenlängen des Rechtecks bilden.

Die Nusselt-Gröbersche Formel gilt unter der Voraussetzung, daß die mittlere Gastemperatur sich von der Temperatur der Rohrwand wenig unterscheidet und Dichte, Zähigkeit und Wärmeleitfähigkeit an den verschiedenen Stellen des Rohrquerschnitts als gleich betrachtet werden können. Für den Fall, daß dies nicht zutrifft, hat Nusselt¹ eine neue Formel angegeben, ferner hat, auf Grund seiner Versuche an Rinnen mit künstlich geschaffener, nach Form und Größe zahlenmäßig erfaßter Oberflächenrauheit Fromm² eine Formel entwickelt. Auf beide sei der Vollständigkeit halber hingewiesen. Den hier vorliegenden Zwecken entspricht die oben angegebene vereinfachte Nusselt-Gröbersche Formel vollkommen.

¹ Nusselt: Der Einfluß der Gastemperatur auf den Wärmeübergang im Rohr. Techn. Mech. Therm. 1930.

² Fromm: Strömungswiderstände in rauen Rohren. Z. ang. Math. Mech. 1923.

Häufiger sind Fälle, bei denen das Gut auf die Form eines Stabes zurückgeführt werden kann, der von dem Gas umspült wird. Der Wärmeübergang ist verschieden, je nachdem das Gut in der Stabachse strömt oder quer dazu.

Für den ersten Fall liegen keine allgemeinen Versuche vor. In der Regel kann damit gerechnet werden, daß die Stäbe in gleichmäßigem Mittelabstand y versetzt angeordnet sind. Aus Abb. 30 folgt alsdann unter Annahme kreisförmigen Stabquerschnitts für jeden umströmten Stab mit dem Durchmesser d ein Querschnitt des Gasstromes

$$f = 0,866 y^2 - \frac{d^2 \cdot \pi}{4}$$

und der gleichwertige Durchmesser zu

$$d' = \frac{3,464 y^2 - d^2 \cdot \pi}{d \cdot \pi} = \frac{1,1 y^2}{d} - d.$$

Für den rechteckigen Querschnitt ergibt sich

$$d' = \frac{1,732 y^2 - 2 B \cdot H}{B + H}.$$

Mit dieser Berichtigung gilt auch hier die Nusselt-Gröbersche Formel.

Für die Strömung des Gases senkrecht zur Stabachse kommt die Nusseltsche¹ Formel

$$\alpha_m = 0,067 \cdot \frac{\lambda_m}{d} \left(1273 + \frac{d \cdot w \cdot \rho_m}{\mu_m} \right)^{0,716} \quad (34)$$

kaum in Frage, weil sie nur für Einzelrohre gilt, während es sich hier in der Regel um Stabbündel handelt. Die zur Klärung der alsdann maßgebenden Strömungsvorgänge von Thoma² vorgenommenen Versuche sind später durch Reiher³ im Laboratorium für technische Physik der Technischen Hochschule München ergänzt worden. Sie führten für versetzte Reihen, mit denen hier ausnahmslos zu rechnen ist, zu der Formel

$$\alpha = b \cdot \frac{\lambda_m}{d} \left(\frac{w_{\max} \cdot d \cdot \rho_m}{\mu_m} \right)^{0,69}, \quad (35)$$

wobei b einen Beiwert darstellt, der sich je nach Zahl der Rohrreihen ändert und z. B. für 2, 3, 4, 5 Rohrreihen 0,1, 0,113, 0,123, 0,131 beträgt, und w_{\max} die Luftgeschwindigkeit im Rohrspalt, in m/s, bedeutet.

Lohrisch⁴ untersuchte den Verlauf des Wärmeüberganges an den

¹ Nusselt: Die Kühlung eines Zylinders durch einen senkrecht zur Achse strömenden Luftstrom. Ges.-Ing. 1922.

² Thoma: Hochleistungskessel. Berlin: Julius Springer 1921.

³ Reiher: Wärmeübergang von strömender Luft an Rohre. Z. V. d. I. 1926.

⁴ Lohrisch: Bestimmung von Wärmeübergangszahlen durch Diffusionsversuche. Forschungsheft 322.

einzelnen Stellen des Rohrumfanges und fand, daß der Wärmeübergang für Geschwindigkeiten, die nahe oberhalb des kritischen Wertes liegen, auf der dem Luftstrom entgegengerichteten Rohrseite wesentlich größer ist als auf der Rückseite, daß dagegen bei besonders hohen Geschwindigkeiten die Verhältnisse sich umkehren und der Wärmeübergang auf der Rückseite überwiegt. Für die hier betrachteten Trockenvorgänge hat dieses Ergebnis insofern Bedeutung, als das quer angeblasene stabförmige Gut bei Geschwindigkeiten in der Nähe des kritischen Wertes einseitig stärker trocknet, daß dagegen die Ungleichheit in dem Maße vermindert wird, in dem die Geschwindigkeit steigt. Nach den Feststellungen von Lohrlich ist der Wärmeübergang an den von dem Luftstrom seitlich gestreiften Flächen stets geringer als an der Vorder- und Rückseite. An diesen Stellen ergibt sich daher bei der Trocknung eine verringerte Wirkung, gleichgültig ob mit mäßiger oder hoher Geschwindigkeit gearbeitet wird.

Die erwähnten Thomaschen Versuche sind wegen des Aufbaus der daraus gefundenen Gleichung

$$\alpha = 3600 \cdot \frac{f}{F} \cdot c_p \cdot g \cdot \frac{h}{w}$$

beachtenswert, in der

f den Spaltquerschnitt, in m^2 ,

h den Druckhöhenverlust, in kg/m^2 ,

bedeuten. Die Formel besagt, daß die Anordnung am günstigsten ist, bei der möglichst kleine Gasgeschwindigkeit möglichst großen Druckhöhenverlust ergibt. Hieraus folgt ganz allgemein, daß Querströmung bessere Wärmeübergangsverhältnisse schafft als Strömung längs der Achse.

Erfolgt die Wärmeabgabe in freier Strömung, also nur durch Leitung und Konvektion, so gilt die von Nusselt¹ aufgestellte Beziehung

$$\frac{\alpha_m \cdot d}{\lambda_m} = \Phi \left(\frac{3600 d^3 \cdot \gamma_m^2 \cdot \beta_m \cdot c_{p m} (t - \vartheta)}{\lambda_m \cdot \mu_m} \right), \quad (36)$$

wobei

$\beta_m = \frac{1}{t - \vartheta} \int_{\vartheta}^t \beta dt$ die mittlere räumliche Ausdehnungszahl des Gases,

in $\frac{1}{^\circ C} (\beta_m \approx \frac{1}{273})$,

$\mu_m = \frac{1}{t - \vartheta} \int_{\vartheta}^t \mu \cdot dt$ die mittlere Zähigkeit des Gases, in $kg \cdot s/m^2$ be-

deuten und

Φ eine Funktion des Klammerwertes

darstellt. Die Form dieser Funktion entspricht der Kurve Abb. 31.

¹ Nusselt: Die Wärmeabgabe eines waagrecht liegenden Drahtes oder Rohres in Flüssigkeiten und Gasen. *Z. V. d. I.* 1929.

In allen Fällen, bei denen die Form der von dem Gut dargebotenen Oberfläche so verwickelt ist, daß sie sich geometrisch nicht in einheitlicher einfacher Weise darstellen läßt, muß an Stelle von α der Wert α_V ermittelt werden, der für die Raumwirkung maßgebend ist. α und α_V stehen hierbei in der bereits erwähnten Beziehung

$$F \cdot \alpha = V \cdot \alpha_V.$$

Bezüglich des Wertes α_V haben die Untersuchungen von Whitman

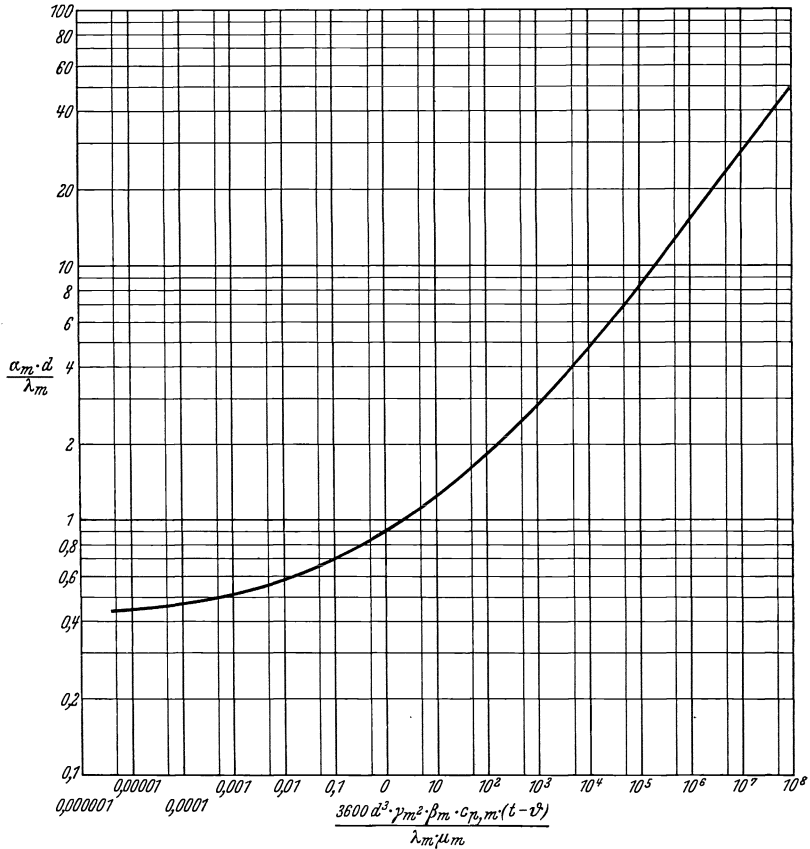


Abb. 31 (Nusselt).

und Keats¹ Aufschluß gebracht. Die von ihnen aufgestellten Formeln lauten, auf internationales Maß umgerechnet,

$$\alpha_V = 1150 + 1,5 \cdot \frac{G}{f} = 1150 + 5400 \cdot w \cdot \gamma \quad (37)$$

für den Fall der Luftbefeuchtung — Trocknung des Gutes — in einem

¹ Whitman u. Keats: Rates of absorption and heat transfer between gases and liquids. J. Ind. Engg. Chem. 1922.

Trockenturm mit Füllkörpern;

$$\alpha_V = \frac{1}{\frac{1}{1150 + 5400 \cdot w \cdot \gamma} + \frac{1}{2,16 \cdot 10^{-9} (3600 \cdot w \cdot \gamma)^{1,8} (3600 \cdot w \cdot \gamma)^{1,54}}} \quad (38)$$

für den Fall der Lufttrocknung — Befeuchtung des Gutes — in einem Trockenturm mit Füllkörpern;

$$\alpha_V = 600 + 0,12 \cdot \frac{G}{f} = 600 + 432 \cdot w \cdot \gamma \quad (39)$$

für den Fall der Luftbefeuchtung — Trocknung des Gutes — in einer Düsenkammer;

$$\alpha_V = \frac{1}{\frac{1}{600 + 432 \cdot w \cdot \gamma} + \frac{1}{330 + 46,8 \cdot w \cdot \gamma}} \quad (40)$$

für den Fall der Lufttrocknung — Befeuchtung des Gutes — in einer Düsenkammer.

Hierbei bedeuten

- $\frac{G}{f} = 3600 \cdot w \cdot \gamma$ die Belüftungsstärke, d. h. das auf 1 m² Durchgangs-
querschnitt entfallende stündliche Gasgewicht, in kg/m²·h,
 f den Durchgangsquerschnitt, in m²,
 w die Gasgeschwindigkeit, in m/s,
 w die Flüssigkeits- (Guts-) Geschwindigkeit, in m/s,
 γ_{G} das Raumgewicht der Flüssigkeit — des Gutes —, in kg/m³,
 $\frac{\text{G}}{f} = 3600 \cdot w \cdot \gamma_{\text{G}}$ die Berieselungsstärke, d. h. das auf 1 m² Durchgangs-
querschnitt entfallende stündliche Gewicht an Flüssigkeit — feuch-
tem Gut —, in kg/m²·h.

Für die hier in erster Linie behandelten Fälle der Gutstrocknung kommen Formel (37) z. B. bei Trocknern für schaufelfähiges Gut, und Formel (39) z. B. bei Zerstäubungstrocknern zur Anwendung. Die Formeln (38) und (40) gelten für die Berechnung von Bewetterungsanlagen, bei denen in der Regel eine Entfeuchtung der Luft gefordert wird. Es ist darauf hinzuweisen, daß die Berieselungsstärke $\frac{\text{G}}{f}$, also die Durchgangsgeschwindigkeit w des Gutes, bei Trockenanlagen keinen Einfluß auf α_V hat. Andererseits ist jedoch bestimmt anzunehmen, daß die aus den Thomaschen Versuchen sich ergebenden Schlußfolgerungen auch hier gelten, die Verteilung des Gutes im Gasstrom also erheblichen Einfluß behält. Dies führt zu der Forderung, durch enge Schichtung mit mäßigen Gasgeschwindigkeiten hohe Strömungswiderstände zu schaffen, also flächenförmiges Gut so anzuordnen, daß für den Gasweg schmale Kanäle entstehen, schaufelfähiges Gut dicht zu lagern. Selbstverständlich setzt der für die Förderung des Gases nötige Arbeitsbedarf hier bestimmte Grenzen für die Länge der Kanäle und die Höhe der Schicht.

Die Formeln von Whitman und Keats können nur als rohe Annäherung betrachtet werden. Nach den Gleichungen (37) und (39) wäre die Wirkung bei verschiedenen Stoffen unabhängig von der spezifischen Oberfläche des Gutes, die auf 1 kg bzw. 1 m³ entfällt, wenn nur das Raumgewicht übereinstimmt. Dies ist aber zweifellos nicht der Fall. Tatsächlich ist der auf 1 m³ bezogene Wärmeübergang bei größerer spezifischer Oberfläche höher als bei geringerer, wie dies die später erwähnten Versuche von Lurié bestätigen.

Daß andererseits der Aufbau der Formeln von Whitman und Keats mit der Beobachtung in guter Übereinstimmung steht, beweisen Untersuchungen, die Lurié¹ über das Trocknen von Farben durchgeführt hat und deren Ergebnis umgezeichnet in Abbildung 32 wiedergegeben ist. Es werde vorweggenommen, daß die Trockenleistung proportional der übertragenen Wärmemenge ist. Die anfangs, bis zum Eintritt in das hygroskopische Gebiet, linear mit der Zeit erfolgende Feuchtigkeitsabnahme beträgt bei den ausgezogenen, für Violettack geltenden Linien bei einer Luftgeschwindigkeit, die Lurié

zu	0	2	4	m/s
angibt, stündlich				
etwa	0,15	0,65	1	kg/h
für 1 kg Feststoff,				
d. i. ein Verhältnis	0,23	1	1,53	

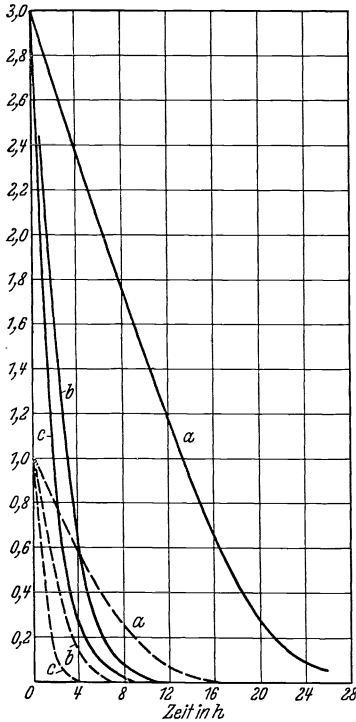


Abb. 32. Abnahme des Feuchtigkeitsgehaltes von Violettack — und Miloriblau - - - bei verschiedenen Luftgeschwindigkeiten (Lurié).
a 0 m/s, b 2 m/s, c 4 m/s Luftgeschwindigkeit.

Die Trockenluft besaß eine Temperatur von 70° und einen Feuchtigkeitsgrad von 0,55, entsprechend einem spezifischen Gewicht von rund $\gamma \approx 1 \text{ kg/m}^3$. Hiernach ergibt sich nach Formel (37)

$$\alpha_V = 1150 \quad 11550 \quad 22750,$$

also ein Verhältnis 0,1 : 1 : 1,9 .

Da die Temperatur des feuchten Gutes bei gleichbleibender Beschaffenheit der Trockenluft für alle drei Fälle genügend genau gleich der Kühlgrenze angenommen werden kann, sollte die stündliche Feuchtigkeitsabnahme sich in gleichem Verhältnis wie α_V verändern. Daß sie bei der von Lurié mit 0 angegebenen Geschwindigkeit größer ist, erklärt sich z. T. dadurch, daß die Formeln von Whitman und Keats nur für endliche Geschwindigkeiten gelten. Abgesehen davon ergeben sich auch

¹ Lurié: Trockenanlage für Buch- und Steindruckfarben. Arch. Wärmewirtsch. 1929, H. 10.

bei fehlender künstlicher Luftbewegung durch die Konvektion Luftgeschwindigkeiten von endlicher Größe. Nach den gestrichelten, für Miloriblauf geltenden Linienzügen beträgt bei der gleichen Veränderung der Geschwindigkeiten das Verhältnis der stündlichen Feuchtigkeitsabnahme

$$0,4 : 1 : 2.$$

Hier stimmen also für Geschwindigkeiten von 2 bzw. 4 m/s das tatsächliche und das nach der Formel von Whitman und Keats theoretisch zu erwartende Verhältnis besonders gut überein.

Nach den Formeln (33), (34), (35), (36) besteht zwischen α und gewissen von der Temperatur beeinflussten Stoffeigenschaften eine bestimmte Abhängigkeit. Es ist zweifellos nur als Annäherung anzusehen, wenn eine solche in den übrigen Formeln nicht klar oder überhaupt nicht zum Ausdruck kommt. Die Darstellung der Trockenkraftlinien als reines Temperaturgefälle, unter Annahme eines längs der τ -Linie gleichbleibenden α -Wertes, ist daher nur dann richtig, wenn die Temperaturabhängigkeit von α unter den besonderen Bedingungen der Kühlgrenzlinie sich aufhebt. Dies ist der Fall, wenn die Abhängigkeit sich auf die im Ausgleichszustande feuchten Gutes gleichbleibende Temperatur der Grenzschicht, nicht die Mitteltemperatur zwischen Gas- und Grenzschicht, bezieht. Die Annahme gleichen Wertes α längs der τ -Linie erscheint danach zweifellos genügend genau zutreffend, und die Darstellung der α -Linien als Temperaturgefälle richtig.

3. Wärmestrahlung.

Bei Luft als Trockenmittel hat die Wärmestrahlung im allgemeinen untergeordneten Einfluß auf die gesamte Wärmeübertragung. In erheblicherem Maße wirkt sie zwischen Gas und Gut, wenn das Trockenmittel aus Verbrennungsgasen besteht, die wegen des Kohlensäure- und hohen Wasserdampfgehaltes die Wärme auch teilweise durch Strahlung an das Gut abgeben, ohne daß sich jedoch bei den hier meist vorliegenden niedrigen Temperaturen die zahlenmäßige Berücksichtigung lohnt.

Strahlwirkung ergibt sich auch dadurch, daß die trockenen Innenteile der Trockenvorrichtung, also die Wandungen und andere bauliche Teile, schließlich auch die Trockengestelle sich auf die Lufttemperatur erwärmen, wodurch zwischen diesen und dem kälteren feuchten Gut ein Temperaturgefälle entsteht. Infolgedessen treten Unregelmäßigkeiten insofern auf, als das nach den Wandungen und anderen trockenen Teilen zu liegende Gut eine um die Strahlung erhöhte Wärmewirkung erfährt und lebhafter trocknet als die übrigen Teile. Bei empfindlichem Gut kann es sich daher lohnen, dieser Unregelmäßigkeit entgegenzuwirken. Dies wird z. B. dadurch angestrebt, daß durch Oberflächenbehandlung die Wärmestrahlung dort möglichst niedrig gehalten wird, wo sie das Gut ungleichmäßig beeinflusst, und dort erhöht wird, wo sie auf das Gut in gleichmäßiger Weise wirkt. Die Ausführung besteht z. B. darin, daß bei Trockenvorrichtungen, in denen das Gut im

wesentlichen nebeneinander hängt, die Seitenwände eine Oberfläche mit niedriger Strahlzahl, Decken und Böden dagegen eine Oberfläche mit hoher Strahlzahl erhalten, und umgekehrt, wenn das Gut im wesentlichen übereinander angeordnet wird. Zur Beurteilung des Einflusses verschiedenartigen Anstriches auf die Strahlung sind die Untersuchungen von Schmidt¹ beachtenswert. Danach liegt bei der Beobachtungstemperatur von etwa 20° die Strahlzahl

für einen schneeweißen Emaillackanstrich. . . mit 4,5 kcal/m² · h (° abs.)⁴
 für einen schwarzen glänzenden Lackanstrich mit 4,35 „ „
 für weißes Schmelzemail mit 4,5 „ „

etwa gleich hoch wie für Holz, Ziegelsteine, Dachpappe und höher als bei rauhem Gußeisen und verrosteten Eisenblechen. Nur bei schwarzem glänzendem Spirituslack ergibt sich eine, wenn auch unbedeutende, Abnahme auf 4,1. Es ist daher ein Irrtum, einen hell glänzenden, glatten Anstrich als guten Strahlungsschutz anzusehen und in dieser Beziehung einen Unterschied zwischen hellen und dunklen Anstrichen zu machen. Entsprechend der niedrigen Strahlzahl von 0,35 für rohes Aluminium ergibt ein Anstrich von Aluminiumlack mit Zapon als Bindemittel eine Strahlzahl zwischen 1,85 und 2, die von den untersuchten Anstrichmitteln am niedrigsten liegt, aber immer noch ein Mehrfaches der Strahlzahl polierter Flächen aus Messing, Nickel, Kupfer, Aluminium darstellt.

C. Einfluß der Stoffeigenschaften auf die Wechselwirkung zwischen Gasen und festen Körpern.

Wenn bei der rechnerischen Verfolgung des Luft-Trockenvorganges allein die Werte α und α' bzw. $\alpha\gamma$ und $\alpha'\gamma$ berücksichtigt werden, so läuft dies darauf hinaus, daß der Trockenvorgang als reine Oberflächenwirkung angesehen wird, was er in der Hauptsache auch ist. Voraussetzung bleibt hierbei jedoch, daß bestimmte Körpereigenschaften des Gutes eine Ausbreitung der mit der Trocknung einhergehenden Zustandsänderung in die Tiefe so schnell ermöglichen, daß praktisch von einem sofortigen inneren Ausgleich gesprochen werden kann. Als solche Körpereigenschaften kommen in Betracht:

e die Stärkeabmessung, in m,
 $\alpha = \frac{\lambda}{c \cdot \gamma}$ die Temperaturleitfähigkeit, in m²/h und
 $\frac{\alpha}{\lambda}$ die relative Wärmeübergangszahl.

Die Voraussetzungen treffen in genügendem Maße für den Hauptabschnitt der Trocknung zu, währenddessen die Temperatur des feuchten Gutes auf der Kühlgrenze stehenbleibt, also kein Wärmeaustausch mit der äußeren Umgebung stattfindet. Dagegen ist es nötig, für die

¹ Schmidt: Wärmestrahlung technischer Oberflächen bei gewöhnlicher Temperatur. Beihefte z. Ges.-Ing. 1927, Reihe 1, H. 20.

Veränderungen während der Vorwärmung und in dem an den Hauptabschnitt der Trocknung anschließenden hygroskopischen Gebiet nachzuprüfen, ob die besonderen Körpereigenschaften Vor- und Nachwärmung in der Weise zustande kommen lassen, wie dies ohne ihre Berücksichtigung sich ergibt.

Ist die Stärkenabmessung e nicht, wie dies z. B. bei flächenartigem Gut die Regel bildet, durch die Art des Gutes von vornherein festgelegt, so kommt Zerkleinerung in Frage, um die Gleichmäßigkeit der Trockenwirkung bis auf die tieferen Schichten auszudehnen. Sie bedeutet eine schonendere Behandlung hygroskopischen Gutes, weil die für einen bestimmten Endfeuchtigkeitsgehalt $x < x_e$ nötige Gesamttemperatur bei einer um so geringeren Übertemperatur der Oberfläche erreicht wird, je weiter die Zerkleinerung geht. Wird z. B. bei einem Würfel die Kantenlänge auf $\frac{1}{10}$ verkleinert, so ergibt sich eine 1000-fache Zerteilung und eine Verhundertfachung der Oberfläche, also eine Verzehnfachung der wirksamen Oberfläche \bar{f} , wobei

$$\bar{f} = \frac{\bar{F}}{\mathcal{G}} = \frac{F}{\mathcal{G} \cdot Z}$$

die spezifische Oberfläche des Gutes, in m^2/kg ,

\bar{F} die Oberfläche des stündlich getrockneten Gutgewichtes \mathcal{G} , in m^2/h , darstellen.

Hieraus erklärt es sich, daß bei Trocknung von Gut verschiedener Korngröße, wie Rohbraunkohle, der Endfeuchtigkeitsgehalt bei den kleinen Stücken niedriger liegt als bei den großen. Besonders merklich ist dieser Unterschied, wenn der durchschnittliche Feuchtigkeitsgehalt verhältnismäßig hoch bleibt, also außerhalb des hygroskopischen Gebietes liegt, denn dann spielen die besonderen Stoffeigenschaften keine entscheidende Rolle mehr und die mit der Zerkleinerung zunehmende spezifische Oberfläche gibt den Ausschlag. Mit Eintritt in das hygroskopische Gebiet wird ein Ausgleich mehr und mehr dadurch geschaffen, daß der Einfluß der Stoffeigenschaften allmählich überwiegt. Da die Wärmeleitzahl mit abnehmender Feuchtigkeit kleiner wird und für die wasserfreie Braunkohle schätzungsweise nur $\frac{1}{10}$ des für feuchte Kohle geltenden Wertes beträgt, verzögert sich die Trockenwirkung bei dem kleineren Korn, sobald es die Kühlgrenze verläßt, und das noch feuchte größere Korn holt den Vorsprung des kleineren mehr und mehr ein. Im gleichen Sinne wirkt die innige Mischung der Körner, die einen Ausgleich der Feuchtigkeit zwischen den sich berührenden Teilchen durch Diffusion um so mehr begünstigt, je stärker mit fortschreitender Trocknung die hygroskopischen Eigenschaften des trockensten, kleinsten Korns zur Geltung kommen.

Versuche von Seidenschnur¹ an lignitischer Rohbraunkohle mit Mischung verschiedener Korngröße ergaben, daß die Trockenleistung sich wie 2,5 : 2 : 1 verhielt, wenn die spezifische Oberfläche im Verhältnis 5 : 2,5 : 1 abgestuft wurde, also sich nicht, wie zunächst zu erwarten wäre, im Verhältnis der spezifischen Oberfläche veränderte. Der Unter-

¹ Seidenschnur: Braunkohle 1924.

schied erklärt sich daraus, daß bei dem größeren Korn die für den Angriff der Luft freibleibende Oberfläche wegen der höheren Sperrigkeit größer ist als bei dem sich mehr zusammenschließenden kleinen Korn, daß ferner bei Zusammenlagerung grober Korngruppen größere Luftkanäle entstehen, deren kritische Geschwindigkeit niedriger liegt als bei Gruppen feinerer Körner und daß infolgedessen sich im Gebiet der kleineren Körner höher gesättigte Luftgebiete ausbilden, durch die die Trockenleistung herabgesetzt wird. Hinzu kommt auch hier die Diffusionswirkung zwischen den durchmischten Teilen verschiedener Korngröße.

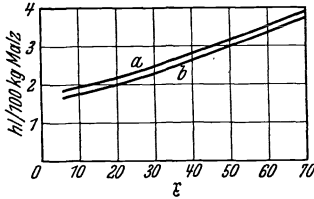


Abb. 33. Abhängigkeit des Raum-inhaltes von dem Feuchtigkeitsgehalt bei Malz (Schlenk).
a Tennenmalz, b Kastenmalz.

Die Korngröße bleibt während des Trockenvorganges nicht im ursprünglichen Maße erhalten, da in der Regel durch Schrumpfung eine allmähliche Abnahme des Rauminhaltes eintritt. Auch hierdurch

ergibt sich eine Verzögerung der Trockenwirkung. Die Abnahme des Rauminhaltes im Verlaufe der Trocknung ist häufig sehr wesentlich. Beispielsweise ergeben sich für Malz nach Schlenk¹ die in Abb. 33 dargestellten Verhältnisse. Die Schrumpfung tritt auch bei flächenartigem Gute auf. Ihr ungünstiger Einfluß äußert sich vor allem in dem Zu-

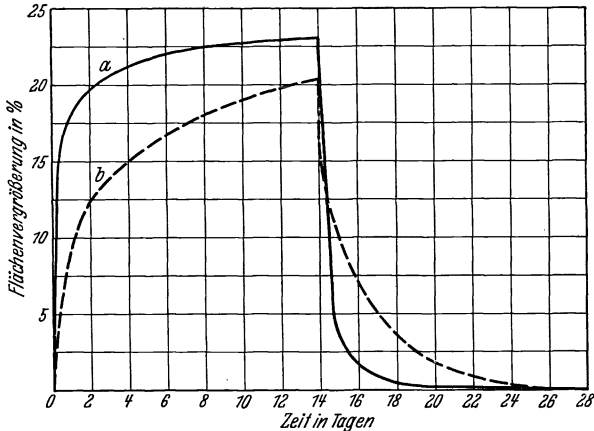


Abb. 34. Veränderung des Flächeninhaltes bei Leder (Wilson-Daub-Kern).
a chromgegerbtes Kalbleder 0,9 mm stark, b chromgegerbtes Rindleder 2,7 mm stark.

sammenziehen der Fläche selbst, weniger in der Verringerung der Stärke. Die Flächenveränderung von chromgegerbtem dünnem Kalb- und dickem Rindleder verläuft beispielsweise nach den Untersuchungen von Wilson-Daub-Kern² nach Abb. 34, wenn das Leder aus vollkommen trockener, in gesättigte Luft gebracht wird und umgekehrt.

¹ Schlenk: Das Darren von Malz. Wschr. Brauerei 1928.

² Wilson-Daub-Kern: The properties of shoe leather. J. Am. Leather C. A. 1926.

Bei dem dicken Leder wurde offensichtlich der Gleichgewichtszustand in gesättigter Luft nicht erreicht, so daß für beide der Flächenschwund zu etwa 23% geschätzt werden kann, wenn die Trocknung bis zur vollständigen Wasserfreiheit fortgesetzt würde.

Zuweilen wird die Flächenschrumpfung durch Spannen des Gutes künstlich verhütet.

Für den Einfluß der Körpereigenschaften bieten die Untersuchungen von Gröber¹ über die Erwärmung einfacher geometrischer Körper einen Anhalt. Danach ist bei gleicher Stärkenabmessung für den raschen und vollkommenen Temperatenausgleich die Form von Kugel, Würfel und kurzem Zylinder mit Länge = Höhe am günstigsten. Ihr folgen lange Zylinder, Balken mit quadratischem Querschnitt, während die Platte an letzter Stelle steht. Die für reine Wärmeübertragung durchgeführten Untersuchungen bieten auch einen Anhaltspunkt für die Trockenwirkung, so daß der daraus sich ergebende zeitliche Verlauf angenähert auch hier zugrunde gelegt werden kann, weil für Wärmeleitung und Diffusion ähnliche Gesetze gelten. Es lassen sich danach folgende Schlüsse ziehen:

1. Die Zerteilung empfindlichen Gutes soll bei festliegender Stärkenabmessung möglichst in Kugelform erfolgen. Dem entspricht z. B. Zerstäuben von Flüssigkeit.

2. Dehnt sich die Trocknung auf lange Zeit aus, wird also bei Lufttrockenanlagen mit niedrigem Trockenpotential gearbeitet, so ist die Form des Gutes ohne wesentlichen Einfluß.

3. Die von Williamson und Adams² nach Gröber³ aufgestellte und in Abb. 35 wiedergegebene Linie der Abkühlgeschwindigkeit verläuft bei Kugelform zunächst steil, dann flach, bei Plattenform mit mehr gleichbleibender Neigung. Der Unterschied durch verschiedene Formen ist daher um so größer, je kürzer die Einwirkung der Umgebung dauert.

4. Mit zunehmender Trocknung nehmen die Werte λ , c und γ fast ausnahmslos ab. Der Wert der Temperaturleitfähigkeit $a = \frac{\lambda}{c \cdot \gamma}$ verändert sich meist in gleichem Sinne. Seine Abnahme bedeutet Verzögerung des Ausgleiches und damit der Trockenwirkung.

Um sich über die Veränderung von a ein rohes Bild zu machen, kann schätzungsweise angenommen werden, daß Gut, das sich ähnlich wie Holz verhält, im nassen Zustande einen Wert $a = \frac{\lambda}{c \cdot \gamma} \approx \frac{0,5}{0,7 \cdot 1000} \approx 0,0007$, im getrockneten Zustande dagegen $a \approx \frac{0,2}{0,5 \cdot 800} \approx 0,0005$ besitzt. Ähnliche Verhältnisse ergeben sich für Gut, dessen Eigenschaften denen von Ziegelsteinen gleichkommen. Hier ist für den nassen Zustand

¹ Gröber: Die Grundgesetze der Wärmeleitung und des Wärmeübergangs. Berlin: Julius Springer 1921; und Einführung in die Lehre von der Wärmeübertragung. Berlin: Julius Springer 1926.

² Williamson u. Adams: Temperature distribution in solids during heating or cooling. Phys. Rev. 14, Ser. II 1919.

³ Gröber: Die Erwärmung und Abkühlung einfacher geometrischer Körper. Z. V. d. I. 1915.

$a \approx \frac{1,2}{0,4 \cdot 2000} \approx 0,0015$, für den trocknen Zustand $a \approx \frac{0,4}{0,2 \cdot 1700} \approx 0,0012$.

Bei der Ungewißheit der zahlenmäßigen Veränderung der Einzelfaktoren, die a beeinflussen, muß die Untersuchung sich bis zum Vorliegen genauerer Ergebnisse damit bescheiden, für den Trockenvorgang einen durchschnittlichen a -Wert anzunehmen.

Wegen zahlenmäßiger Anhalte ist auf die Gröberschen Untersuchungen zurückzugreifen. Es bedeutet:

$Q \cdot z$ die Wärmeabgabe des Körpers nach Ablauf von z Stunden, in kcal,

\mathfrak{B} den Wasserwert des Körpers, in kcal/°C·h,

t die Umgebungstemperatur, in °C,

t_0 die ursprüngliche Körpertemperatur, in °C,

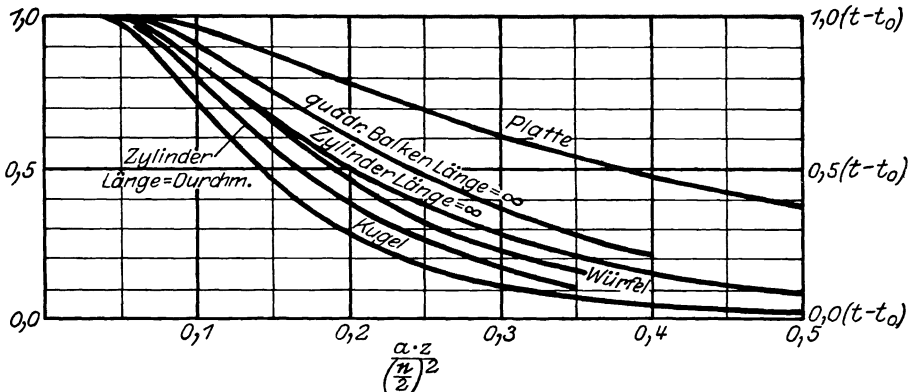


Abb. 35. Abkühlgeschwindigkeit für den Mittelpunkt oder die Achse verschiedener Körper (Größen).

$a = \frac{\lambda}{c \cdot \gamma}$ Temperaturleitfähigkeit, z Zeit, e Stärke oder Durchmesser,
 t Umgebungstemperatur, t_0 ursprüngliche Körpertemperatur.

λ die Wärmeleitzahl des Körpers, in kcal/m·°C·h,

e die Stärke des plattenförmigen bzw. den Durchmesser des rundstab- oder kugelförmigen Körpers, in m,

z die Zeit, in h,

χ eine von der Körpergestalt abhängige Funktionsform,

so gilt nach Gröber

$$Q \cdot z = \mathfrak{B} \cdot z (t_0 - t) \chi \left(\frac{\alpha}{\lambda} \cdot \frac{e}{2}, \frac{\alpha \cdot z}{\left(\frac{e}{2}\right)^2} \right). \quad (41)$$

Die Funktion χ hat Gröber abhängig von den Größen $\frac{\alpha}{\lambda} \cdot \frac{e}{2}$ und $\frac{\alpha \cdot z}{\left(\frac{e}{2}\right)^2}$ in

Tafeln zusammengestellt. Sie ergibt sich für $\alpha = 5$, $\lambda = 0,2$, $a = 0,0005$ für

e		0,02			0,1	
nach Stunden $z =$		1	5	20	1	5
χ für Platte	0,9	1	1	0,2	0,6	0,9
Rundstab	1	1	1	0,3	0,8	1
Kugel	1	1	1	0,4	1	1

d. h. daß z. B. ein flacher, plattenförmiger Körper von 0,02 m Stärke nach 1 Stunde 90% seines überschüssigen Wärmehaltes an die Umgebung abgegeben hat, wenn die Wärmeübergangsverhältnisse und die Körpereigenschaften den für α , λ und a gemachten Annahmen entsprechen. Für die noch geringeren Stärken, um die es sich bei der Trocknung häufig handelt, reichen die Gröberschen Tafeln nicht aus, und ihre Erweiterung erscheint wünschenswert, da die zahlenmäßige Berechnung zeitraubend ist.

In ähnlicher Weise geben die Gröberschen Tafeln einen Anhaltspunkt, um zu prüfen, ob die aus der Oberflächenwirkung für die Vorwärmung errechnete Zeit für vollständige Durchdringung des Gutes ausreicht. Diese Untersuchung ist in der Regel von geringerer Bedeutung, weil eine Verzögerung des Temperatenausgleiches bis in die inneren Schichten nur bedeutet, daß die äußeren Schichten ihre Vorwärmung vollendet haben und ihre Feuchtigkeit in dem der Kühlgrenze zukommenden Maße abzugeben beginnen, während die inneren Schichten noch fortfahren, einen Teil der an die Oberfläche abgegebenen Wärme zu verschlucken. Bei empfindlichem Gut kann dagegen Verzögerung der Durchwärmung dazu führen, daß die äußeren Schichten vollständig austrocknen und reißen, weil die Entfeuchtung des Kerns zu weit zurückbleibt. Es sind alsdann Maßnahmen nötig, um den Trockenvorgang künstlich zu verlangsamen, und zwar auf das Maß, das durch den Wärmeausgleich bedingt ist. Solche Mittel bestehen in Anwendung von Luft mit mäßigem Trockenpotential, Einhaltung niedriger Temperaturen und damit geringer Temperaturunterschiede in den einzelnen Schichten. Verlängerung der Trockendauer muß hierbei in Kauf genommen werden. Sie läßt sich verkürzen, wenn das Gut vor Beginn der Trocknung eine Temperaturerhöhung auf das gerade noch zuträgliche Maß erfährt, z. B. durch Behandlung mit Dampf. Der so vorgewärmte Körper stellt nach Beginn der Trocknung selber den Wärmeträger dar. Das Temperaturgefälle im Gut verläuft von innen nach außen. Damit auch hier Ribildungen durch Temperaturunterschiede vermieden bleiben, soll die zur Wegführung der verdampften Flüssigkeit angewandte Luft nicht zu kalt sein, bedarf also im allgemeinen vorheriger Anwärmung.

Die rechnerische Berücksichtigung der Stoffeigenschaften ist einigermaßen verwickelt, daneben auch an vielfache Annahmen gebunden. Es ist daher der einfache Versuch über die zweckmäßige Leitung des Trockenvorganges in dieser Richtung vorzuziehen. Wenn der Berechnungsgang hier angedeutet wurde, so geschah dies weniger mit Rücksicht auf zahlenmäßig festzustellende Werte, als darauf, den Einfluß der einzelnen Faktoren zu betonen, damit dem Untersuchenden klar ist, welche Grundlagen als gegeben anzusehen sind und welche Einflüsse er verändern kann, um den Versuch zum Erfolg zu führen. Das Endziel wird in der Regel darauf hinauslaufen, die Trockenzeit möglichst abzukürzen, das Gut jedoch weitestgehend zu schonen.

Eine Wirkung der Stoffeigenschaften ist auch das Auftreten eines scheinbaren hyroskopischen Punktes. Bei der Trocknung von zellenartigen Körpern, wie Holz, äußert er sich in der Weise, daß ziem-

lich plötzlich eine Verzögerung der Trockenwirkung eintritt, sobald der Zelleninhalt aufgetrocknet ist und die aneinanderschließenden Zellwände die Feuchtigkeit nicht mehr als ununterbrochene Kapillarkanäle fördern. Das Dämpfen von Holz hat wohl auch die Wirkung, daß es die Kapillarkanäle wiederherstellt und dadurch das Heben der Feuchtigkeit vom Kern an die Oberfläche erleichtert. Die Lage des scheinbaren hygroskopischen Punktes ergibt sich bei einem durchschnittlichen Feuchtigkeitsgehalt $\varkappa > \varkappa_e$. Sie ist abhängig von der Trockengeschwindigkeit, ebenso wie das Maß, um das der für die Oberfläche geltende Wert $\frac{\mathfrak{P}}{P''}$ unter dem Betrage liegt, der nach dem $\frac{\mathfrak{P}}{P''}$ - \varkappa -Bild dem durchschnittlichen Feuchtigkeitsgehalt zukommt. Der Unterschied verschwindet, wenn die Stoffeigenschaften ihren Einfluß verlieren oder die Trockendauer unbegrenzt ist.

D. Die Beziehung zwischen α und α' .

In der Formel

$$Q_F = Q_t + Q' = F[\alpha(t - t) + \alpha'(P_D - \mathfrak{P})]$$

bleibt die Größe der Wärmeaustauschfläche F während des Trockenvorganges gleich, wenn davon abgesehen wird, daß mit fortschreitender Wasserentziehung eine Schrumpfung des Gutes eintritt. Soll diese berücksichtigt werden, so genügt es, für F einen zwischen dem Anfangs- und Endzustand liegenden geschätzten Mittelwert einzusetzen.

Bedeutet

Z die gesamte Trockendauer, in h,

so folgt das Fassungsvermögen der Trockenvorrichtung, in Trockenstoffgewicht gemessen, zu $\mathfrak{G}_x \cdot Z$, gleichgültig, ob es sich darum handelt, eine bestimmte, von vornherein eingebrachte Menge zu verarbeiten oder ob das Gut durch die Trockenvorrichtung hindurchwandert. Voraussetzung bleibt im letzten Falle nur, daß Beharrungszustand vorliegt, also in jeder Zeiteinheit das gleiche Trockenstoffgewicht ein- und austritt.

Da \mathfrak{F} die dem stündlich verarbeiteten Trockenstoffgewicht \mathfrak{G}_x zukommende Austauschfläche darstellt, ergibt sich

$$F = \mathfrak{F} \cdot Z. \quad (42)$$

Von den übrigen Größen der Gleichung (29) seien α und α' als gleichbleibend während des untersuchten Vorganges angesehen. Die gleiche Annahme ist zulässig für die Gutstemperatur t und die Dampfspannung über dem Gut \mathfrak{P} , wenn es sich um den Hauptabschnitt der Trocknung feuchten Gutes handelt, während dessen beide Werte der gleichbleibenden Kühlgrenze entsprechen. Dagegen ändern sich t und \mathfrak{P} während der Zeit, in der das Gut eine Vorwärmung oder auch Abkühlung erfährt, also in dem der Haupttrocknung vorausgehenden und folgenden Abschnitt. Die Werte für die Lufttemperatur t und Dampfteilspannung P_D erfahren einen ständigen Wechsel.

Ändern sich Temperaturgefälle und Spannungsunterschied im Verlauf des untersuchten Vorganges nur wenig, so können Mittelwerte dafür eingesetzt werden. Für den allgemeinen Fall dagegen muß der Wärmeaustausch für eine unendlich kleine Zeit dz ermittelt werden, während der alle Werte als gleichbleibend angesehen werden dürfen. Wird hierbei zunächst an solche Trockenvorrichtungen gedacht, bei denen Luft und Gut sich beide, gleich- oder entgegengesetzt gerichtet, bewegen, so kommt dem gesamten Trocknerinhalt die Austauschfläche F , einer unendlich kleinen in der Bewegungsrichtung gemessenen Teillänge dL die Austauschfläche $\frac{F \cdot dL}{L}$ zu, wenn

L die Länge der Trockenvorrichtung, in der Bewegungsrichtung von Gas oder Luft gemessen, in m, bedeutet.

Die stündliche Wärmeabgabe von Luft an Gut innerhalb dieser unendlich kleinen Teilstrecke beträgt

$$dQ_F = \frac{F \cdot dL}{L} [\alpha(t - t) + \alpha'(P_D - \mathfrak{P})].$$

Da

$$L = 3600 \cdot w \cdot Z$$

und bei unveränderlicher Gutsgeschwindigkeit w auch

$$dL = 3600 \cdot w \cdot dz$$

ist, kann

$$\frac{F \cdot dL}{L} = \frac{F \cdot dz}{Z} = \mathfrak{F} \cdot dz$$

gesetzt werden. Gleichung (29) nimmt damit die Form an

$$dQ_F = dQ_t + dQ' = \mathfrak{F} \cdot dz [\alpha(t - t) + \alpha'(P_D - \mathfrak{P})]. \quad (43)$$

dQ_F stellt ganz allgemein die in der Zeit dz von dem feuchten Gas an die Flüssigkeit durch Wärmeaustausch übergehende Wärmemenge dar.

In der Formel

$$i = c_{pL} \cdot t + (r_{00} + c_{pD} \cdot t)x$$

bedeutet $c_{pL} \cdot t$ die Vergrößerung des spezifischen Wärmehaltes durch Temperatursteigerung, also Wärmeaustausch, $(r_{00} + c_{pD} \cdot t)x$ die Vergrößerung des spezifischen Wärmehaltes durch Aufnahme der verdampften Flüssigkeit. Da diese mit dem der Flüssigkeitswärme entsprechenden spezifischen Wärmehalt $i_{\mathfrak{B}t} \cdot x$ in den Arbeitsvorgang durch einfachen Ortswechsel eintritt, beruht, neben dem Betrage $c_{pL} \cdot t$, nur der Betrag $(r_{00} + c_{pD} \cdot t)x - i_{\mathfrak{B}t} \cdot x$ auf reinem Wärmeaustausch. Bezeichnet di die Zunahme des spezifischen Wärmehaltes des feuchten Gases in der Zeit dz , bezogen auf 1 kg trockenes Gas, so ist der dem Betrage dQ_F gleichzusetzende, dem Wärmeaustausch entsprechende Wert des Wärmehaltes nicht $-G_L \cdot di$, sondern $-G_L(di - i_{\mathfrak{B}t} \cdot dx)$. Das negative Zeichen rührt daher, daß dQ_F positiv Wärmeabgabe des

Gases bedeutet und di positiv als Vermehrung des spezifischen Wärmeinhaltes des Gases gilt. Es folgt hieraus

$$-G_L(di - i_{\text{fl}} \cdot dx) = \mathfrak{F} \cdot dz [\alpha(t - t) + \alpha'(P_D - \mathfrak{P})]. \quad (44)$$

Das Verhältnis $\frac{\alpha}{\alpha'}$ ergibt sich alsdann zu

$$\frac{\alpha}{\alpha'} = - \frac{G_L(di - i_{\text{fl}} \cdot dx)}{\mathfrak{F} \cdot dz \cdot \alpha' (t - t)} - \frac{P_D - \mathfrak{P}}{t - t}. \quad (45)$$

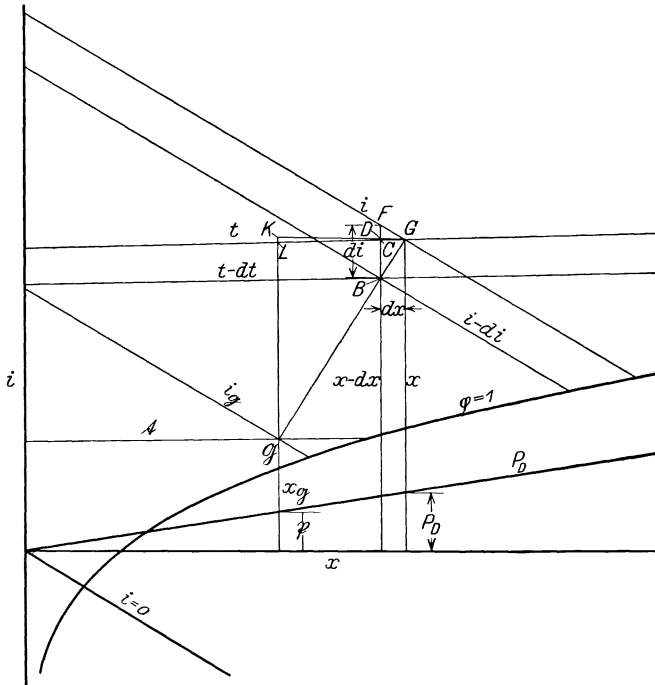


Abb. 36. Allgemeine Zustandsänderung der Luft im i - x -Bild nach unendlich kleiner Zeitdauer.

Es bezeichne

i_{Dt} den Wärmeinhalt von 1 kg Dampf bei der Temperatur t des Gases, in kcal/kg (für Wasserdampf $i_{Dt} = 595 + 0,46 \cdot t$),

dann bedeutet $i_{Dt} - i_{\text{fl}} t$ die erforderliche Wärme, um 1 kg Flüssigkeit von der Temperatur t in Dampf von der Temperatur t zu verwandeln.

$G_L \cdot dx (i_{Dt} - i_{\text{fl}} t)$ stellt daher die auf die Zeit dz entfallende Trockenleistung im Wärmemaßstabe dar. Sie ist gleich $-dQ'$. Es folgt hieraus

$$-dQ' = -\mathfrak{F} \cdot dz \cdot \alpha' (P_D - \mathfrak{P}) = G_L \cdot dx (i_{Dt} - i_{\text{fl}} t), \quad (46)$$

$$\mathfrak{F} \cdot dz \cdot \alpha' = -G_L \cdot dx \cdot \frac{i_{Dt} - i_{\text{fl}} t}{P_D - \mathfrak{P}},$$

$$\frac{\alpha}{\alpha'} = \frac{G_L(di - i_{\text{fl}} \cdot dx)}{G_L \cdot dx \cdot \frac{(i_{Dt} - i_{\text{fl}} t)(t - t)}{P_D - \mathfrak{P}}} - \frac{P_D - \mathfrak{P}}{t - t} = \frac{\mathfrak{P} - P_D}{t - t} \cdot \frac{i_{Dt} - \frac{di}{dx}}{i_{Dt} - i_{\text{fl}} t}.$$

In dem i - x -Bild der Abb. 36 bezeichnet ganz allgemein G den Zustand des feuchten Gases nach seinen maßgebenden Werten t , x , i und \mathcal{G} den Zustand der Flüssigkeit nach den zugeordneten Werten t , x_g , i_g , und \mathfrak{P} . x_g und i_g beziehen sich auf einen gedachten Zustand des Gases bei der Temperatur t und dem Dampfdruck \mathfrak{P} , wie sie dem Zustand der Flüssigkeit zukommen. Die Veränderung des Luftzustandes unter der Einwirkung der Flüssigkeit kann während der unendlich kleinen Zeit dz als Mischung zweier Luftmengen von dem durch die Punkte G und \mathcal{G} gekennzeichneten Zustände aufgefaßt werden. Die Mischluft besitzt alsdann einen Zustand, der durch den Punkt B auf der Geraden $G\mathcal{G}$ in unmittelbarer Nähe von G dargestellt wird¹. Der Abszissenabstand zwischen G und B entspricht der Veränderung dx des Feuchtigkeitsgehaltes. Punkt B liegt auf der Temperaturlinie $t - dt$. Es läßt sich alsdann aus dem i - x -Bild folgende Beziehung ablesen

$$BC = BF - CD - DF,$$

$$(c_{pL} + c_{pD} \cdot x) dt = di - c_{pD} \cdot dx \cdot t - r_{00} \cdot dx = di - (r_{00} + c_{pD} \cdot t) dx,$$

$$\frac{BC}{GD} = \frac{\mathcal{G}L}{GK},$$

$$\frac{di - (r_{00} + c_{pD} \cdot t) dx}{dx} = \frac{(c_{pL} + c_{pD} \cdot x_g)(t - t)}{x - x_g},$$

$$\frac{di}{dx} = (c_{pL} + c_{pD} \cdot x_g) \frac{t - t}{x - x_g} + (r_{00} + c_{pD} \cdot t).$$

Wird die Bezeichnung

$$c_{pL} + c_{pD} \cdot x_g = C_{p_g}$$

eingeführt, so bedeutet

C_{p_g} die spezifische Wärme feuchter Luft von dem gedachten Zustande, wie er der Flüssigkeit zukommt, bezogen auf $(1 + x_g)$ kg feuchte Luft, d. i. 1 kg Reiluft, in kcal/kg \cdot °C,

also die spezifische Wärme der Grenzschicht über der Flüssigkeit, die nach Temperatur t und Dampfspannung \mathfrak{P} mit der Flüssigkeit übereinstimmt und daher einen Feuchtigkeitsgehalt x_g besitzt, wie er im i - x -Bild dem Punkte \mathcal{G} entspricht. Da ferner

$$r_{00} + c_{pD} \cdot t = i_{Dt}$$

ist, ergibt sich durch Einsetzen von $\frac{di}{dx}$

$$\begin{aligned} \frac{\alpha}{\alpha'} &= \frac{\mathfrak{P} - P_D}{t - t} \cdot \frac{i_{Dt} - C_{p_g} \cdot \frac{t - t}{x - x_g} - tDt}{i_{Dt} - i_{\mathfrak{P}t}}, \\ \frac{\alpha}{\alpha'} &= \frac{C_{p_g} (\mathfrak{P} - P_D)}{(i_{Dt} - i_{\mathfrak{P}t}) (x_g - x)}. \end{aligned} \quad (47)$$

¹ Der Nachweis, daß der Mischungspunkt auf der Verbindungsgeraden liegt, ist in Abschnitt BI erbracht.

Lewis¹ hat die Beziehung aufgestellt

$$\frac{\alpha}{k'} = C_p. \quad (48)$$

Hierbei bedeutet

$k' = \frac{G_L(x_e - x_a)}{F(x_g - x)}$ die Verdunstungszahl, d. h. das über 1 m² Flüssigkeitsoberfläche stündlich verdunstende Flüssigkeitsgewicht, wenn der Unterschied des Feuchtigkeitsgehaltes x_g , wie er gesättigtem Gase von der Flüssigkeitstemperatur t zukommt, und des tatsächlichen Feuchtigkeitsgehaltes x des Gases der Einheit entspricht, in kg/m²·h. Da

$$G_L(x_e - x_a) = \frac{Q'}{i_{Dt} - i_{\mathfrak{R}t}} = \frac{F \cdot \alpha' (P_D - \mathfrak{P})}{i_{Dt} - i_{\mathfrak{R}t}},$$

besteht zwischen k' und α' die Beziehung

$$k' = \alpha' \cdot \frac{\mathfrak{P} - P_D}{(i_{Dt} - i_{\mathfrak{R}t})(x_g - x)}, \quad (49)$$

und es folgt aus Formel (47) und (49) $\frac{\alpha}{k'} = C_{p_g}$ bzw. das Verhältnis $\frac{\alpha}{\alpha'}$ nach Lewis

$$\frac{\alpha}{\alpha'} = \frac{c_p(\mathfrak{P} - P_D)}{(i_{Dt} - i_{\mathfrak{R}t})(x_g - x)}.$$

Die Lewissche Beziehung wurde für den Sonderfall aufgestellt, daß turbulente Luft und Wasser im Wärmeaustausch stehen. Demgegenüber gilt die hier entwickelte Beziehung für $\frac{\alpha}{\alpha'}$ ganz allgemein. Sie stellt den Augenblickswert des Verhältnisses $\frac{\alpha}{\alpha'}$ für beliebige Gase und Flüssigkeiten dar, wobei die Flüssigkeiten durch feuchte Körper oder auch hygroskopisch wirkende Stoffe dargestellt werden können, wenn nur die Werte C_{p_g} , \mathfrak{P} , $i_{\mathfrak{R}t}$ und x_g dem Zustande des Körpers entsprechen. Der gefundene Wert stimmt mit dem aus der Lewisschen Beziehung sich ergebenden überein, wenn in der letzten statt C_p der Wert C_{p_g} eingesetzt wird, d. h. die spezifische Wärme nicht auf den wirklichen Gaszustand, sondern auf den Zustand der über dem feuchten Körper schwebenden Grenzschicht bezogen wird.

Aus der Definition der Verdunstungszahl k' ergibt sich die Verdunstungsleistung zu

$$G_L(x_e - x_a) = k' \cdot F(x_g - x) \text{ kg/h.}$$

Die hierbei entwickelte Dampfwärme beträgt

$$(i_{Dt} - i_{\mathfrak{R}t}) k' \cdot F(x_g - x).$$

Wird mit α_D eine gleichwertige Wärmeübergangszahl für die Dampf-

¹ Lewis: The evaporation of a liquid into a gas. Mech. Engg. 1922, s. a. Bericht darüber im Forschungsheft 275.

wärme gekennzeichnet, so folgt sie aus der Beziehung

$$F \cdot \alpha_D (t - t) = (i_{Dt} - i_{\text{fl}t}) k' \cdot F (x_g - x)$$

zu

$$\alpha_D = (i_{Dt} - i_{\text{fl}t}) k' \cdot \frac{x_g - x}{t - t} = (i_{Dt} - i_{\text{fl}t}) \frac{\alpha}{C_{p_g}} \cdot \frac{x_g - x}{t - t}$$

und die resultierende Wärmeübergangszahl für fühlbare und Dampf-
wärme zu

$$\alpha_{\text{res}} = \alpha + \alpha_D = \alpha \left[1 + \frac{i_{Dt} - i_{\text{fl}t}}{C_{p_g}} \cdot \frac{x_g - x}{t - t} \right].$$

Für freie Strömung gilt diese Beziehung nicht genau. Für sie wird

$$\alpha = 2,2 \sqrt[4]{t - t}.$$

Die Berücksichtigung der Dampfwärme in einer resultierenden Wärme-
übergangszahl erfolgt für freie Strömung nach Schmidt¹ in der Formel

$$\alpha_{\text{res}} = \alpha \left[1 + \frac{i_{Dt} - i_{\text{fl}t}}{C_{p_g}} \cdot \frac{x_g - x}{t - t} \cdot \frac{k_d}{a} \right] \sqrt[4]{\frac{T - \mathfrak{T} \frac{m}{m_g}}{T - \mathfrak{T}}},$$

wenn

k_d die Diffusionskonstante, in m^2/h ,

$\alpha = \frac{\lambda}{c_p \cdot \gamma}$ die Temperaturleitfähigkeit, in m^2/h ,

$T = t + 273$ die absolute Temperatur des Gases, in $^\circ\text{C}$ abs.,

$\mathfrak{T} = t + 273$ die absolute Temperatur der Flüssigkeit, in $^\circ\text{C}$ abs.,

m das Molekulargewicht des feuchten Gases bei dem Flüssigkeits-
gehalt x ,

m_g das Molekulargewicht des feuchten Gases bei dem Flüssigkeits-
gehalt x_g

bedeuten.

Die beiden Formeln für α_{res} stimmen überein, wenn der Unterschied
der Molekulargewichte m und m_g vernachlässigt wird und die Diffu-
sionskonstante k_d gleich der Temperaturleitfähigkeit a ist, was bei
Verdunstung von Wasser in Luft ($a = 0,0654 \text{ m}^2/\text{h}$, $k_d = 0,0712 \text{ m}^2/\text{h}$,
 $\frac{a}{k_d} = 0,916$) genügend genau zutrifft.

Im Haupttrockenabschnitt bewegt sich der Luftzustand längs der
 τ -Linie. Für sie folgt aus Abb. 37

$$B \mathcal{G} = BC + CD - \mathcal{G} D,$$

$$C_{p_g}(t-t) = c_{p_0} \cdot t(x_g - x) + (r_{00} - i_{\text{fl}t})(x_g - x) = (i_{Dt} - i_{\text{fl}t})(x_g - x).$$

Es wird daher

$$\left(\frac{\alpha}{\alpha'} \right)_\tau = \frac{\beta - P_D}{t - t}, \quad (50)$$

was sich auch unmittelbar aus Formel (29) ergibt, da für die Veränderung

¹ Schmidt: Verdunstung und Wärmeübergang. Ges.-Ing. 1929, H. 29.

des Gases längs der τ -Linie $Q_F = 0$ wird. Für einen mit gleichbleibender Kühlgrenze des Gases verlaufenden Trockenvorgang läßt sich daher jedem Punkte des i - x -Bildes ein bestimmtes Verhältnis $\frac{\alpha}{\alpha'}$ zuordnen. Es können also hierfür Linien gleicher Werte $\frac{\alpha}{\alpha'}$ nach Abb. 38 in das i - x -Bild eingefügt werden. Sie fallen nahezu mit Linien gleicher Kühlgrenze zusammen, so daß für den Hauptabschnitt der Trocknung feuchten Gutes mit einem gleichbleibenden Verhältnis $\frac{\alpha}{\alpha'}$ gerechnet werden

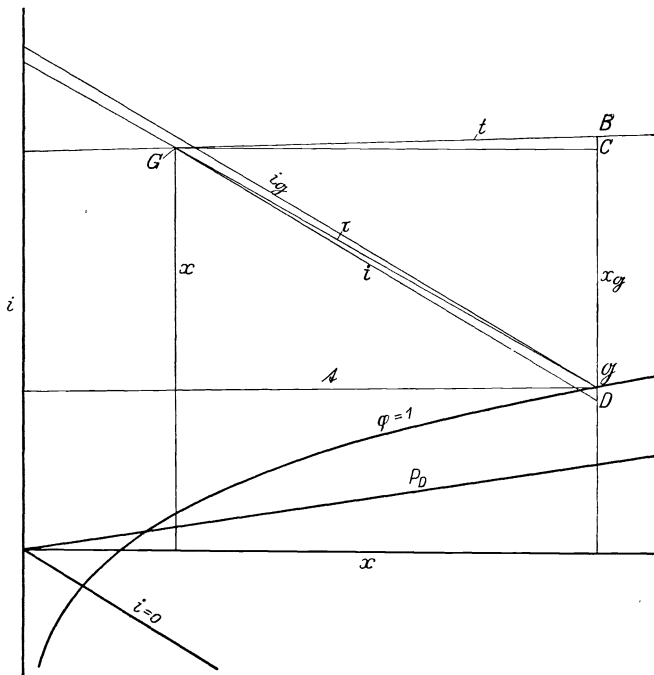


Abb. 37. Zustandsänderung der Luft im i - x -Bild während des Haupttrockenabschnittes.

darf. Innerhalb des Bildfeldes der Abb. 38 verändert sich das Verhältnis $\frac{\alpha}{\alpha'}$ zwischen etwa 6,4 für niedrige i_g -Werte, also niedrige Temperaturen t des Gutes, um etwa 30° herum, und etwa 4,6 für höhere i_g -Werte, also höhere Gutstemperatur, um 75° herum.

Wird das zuvor feuchte Gut hygroskopisch, so verläuft die Zustandsänderung der Luft, wie sich aus späteren Untersuchungen ergeben wird, nicht mehr in Richtung der τ -Linie, sondern es findet eine allmähliche Annäherung an die Richtung der i -Linie statt. Gleichzeitig verläßt der den Gutzustand darstellende Punkt \mathcal{G} die Sättigungslinie und bewegt sich gegen einen hygroskopischen Beharrungspunkt, dem auch der Luftzustandspunkt G zustrebt. Mit genügender Genauigkeit können daher die für den Haupttrockenabschnitt sich ergebenden Werte $\frac{\alpha}{\alpha'}$

auch für das anschließende hygroskopische Gebiet beibehalten werden. Während der Vorwärmung und Abkühlung des Gutes dagegen ist mit einem veränderlichen Wert $\frac{\alpha}{\alpha'}$ nach Formel (47) zu rechnen.

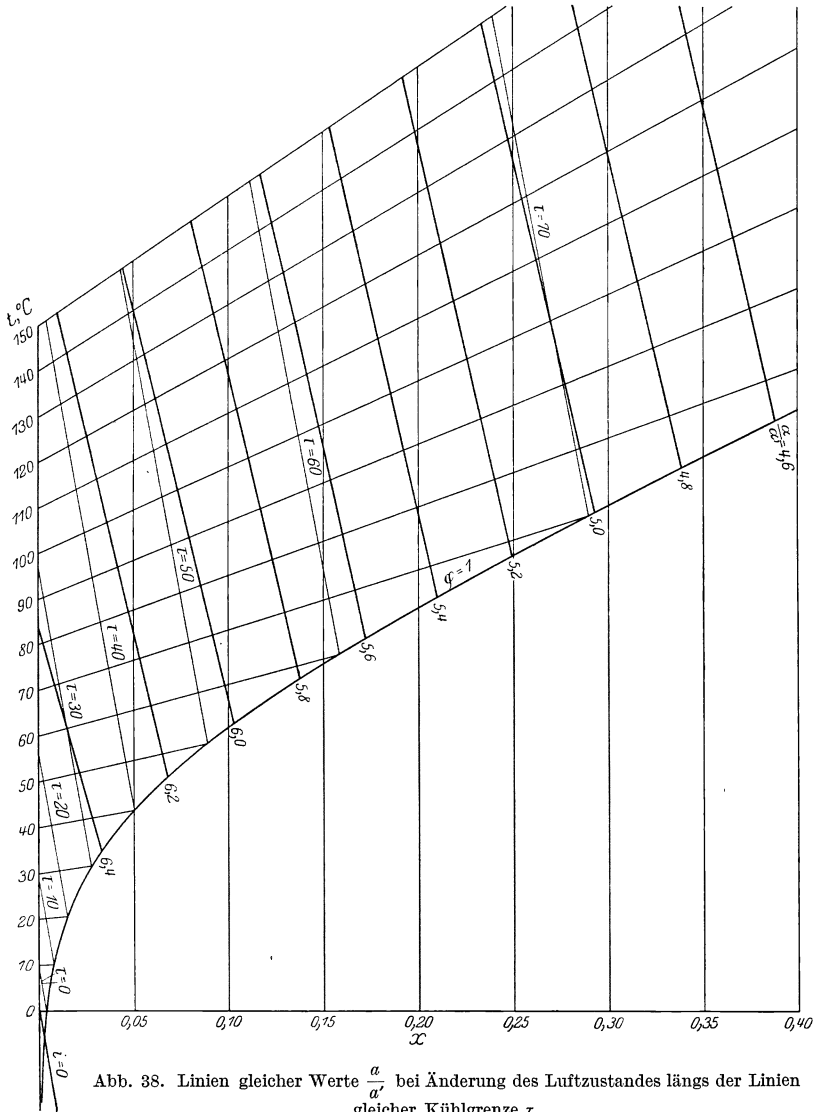


Abb. 38. Linien gleicher Werte $\frac{\alpha}{\alpha'}$ bei Änderung des Luftzustandes längs der Linien gleicher Kühlgrenze τ .

Nunmehr ergibt sich auch der Grund, weshalb es zu Widersprüchen geführt hätte, wenn den Trockenkraftlinien statt gleichen Temperaturgefälles ($t - t$) gleiches Spannungsgefälle ($\mathfrak{B} - P$) zugrunde gelegt worden wäre. Im letzten Falle hätte die Voraussetzung eines gleich-

bleibenden Wertes α' gegolten. Während jedoch α längs der τ -Linien als unveränderlich betrachtet werden kann, trifft dies für α' nicht zu, weil die Linien gleichen Verhältnissen $\frac{\alpha}{\alpha'}$ nach Abb. 38 von den τ -Linien abweichen. Aus diesem Grunde durften auch die nach Abb. 28 für hygroskopisches Gut für gleiches Spannungsgefälle entworfenen Trockenkraftlinien $\kappa_{\frac{1}{2}}$ nur als angenähert bezeichnet werden.

Die für $\frac{\alpha}{\alpha'}$ geführten Untersuchungen gelten auch für das zahlenmäßig gleiche Verhältnis $\frac{\alpha_V}{\alpha'_V}$.

Zahlenbeispiel 3. Es soll Luft mit einem Reinluftgehalt von $G_L = 100000 \text{ kg/h}$ von $t_1 = 40^\circ$ Anfangstemperatur und $\varphi_1 = 0,6$ anfänglichem Feuchtigkeitsgrad, entsprechend einem Feuchtigkeitsgehalt $x_1 = 0,0294$, getrocknet werden. Als Kühlmittel diene Wasser, das mit einer Temperatur $t_1 = 10^\circ$ zu- und $t_2 = 20^\circ$ abläuft. Wie ist der Entfeuchtungsraum zu bemessen, wenn er als Trockenturm mit Füllkörpern ausgebildet wird?

Im i - x -Bild erfolgt die Zustandsänderung der Luft in jedem Augenblick in Richtung der Verbindungsgeraden $G\mathcal{G}$, wenn die Punkte G und \mathcal{G} den Augenblickszustand von Luft und Gut darstellen, also zu Beginn der Entfeuchtung in Richtung einer Geraden $G_1\mathcal{G}_1$, die durch die bekannten Anfangszustände festliegt, zum Schluß längs einer Geraden $G_2\mathcal{G}_2$, von der nur der Punkt \mathcal{G}_2 bekannt ist. Im vorliegenden Beispiele liegen die Punkte G_1 , \mathcal{G}_1 und \mathcal{G}_2 im i - x -Bild nahezu auf einer Geraden. Punkt G_2 muß daher gleichfalls auf diese Gerade zu liegen kommen, kann daher auf ihr als Schnittpunkt mit der Geraden für $x_2 = 0,0200$ gefunden werden. Der Endzustand der Luft ergibt sich auf diese Weise bei einer Temperatur von $t_2 \approx 27^\circ$ und einem Feuchtigkeitsgrade $\varphi_2 \approx 0,85$. Die austretende Luft ist daher nicht gesättigt. Daß es möglich ist, aus ungesättigter Luft Feuchtigkeit niederzuschlagen, hat Verfasser an anderer Stelle¹ nachgewiesen.

Hiernach ergeben sich folgende Werte:

$$\begin{aligned} (t - t)_{\text{mittel}} &= \frac{40 - 10 + 27 - 20}{2} = 18,5, \\ x_{g_1} &= 0,0079 \quad (\text{für } t = 10^\circ, \quad \varphi = 1), \\ x_{g_2} &= 0,0152 \quad (\text{für } t = 20^\circ, \quad \varphi = 1), \\ (x_g - x)_{\text{mittel}} &= \frac{0,0079 - 0,0294 + 0,0152 - 0,0200}{2} = 0,0132. \end{aligned}$$

Die zu übertragende fühlbare Wärme beträgt einerseits nach Formel (27)

$$Q_t = V \cdot \alpha_V (t - t)_{\text{mittel}},$$

andererseits

$$Q_t = G_L (c_{pL} + c_{pD} \cdot x_2) (t_1 - t_2).$$

Hierbei ist die Vorstellung maßgebend, daß die der Trockenleistung $G_L(x_1 - x_2)$ entsprechende Wärme vorweg als Dampfwärme entzogen sei, als Leistung der fühlbaren Wärme daher neben der Abkühlung der Reinluft noch die Abkühlung der verbleibenden Dampfmenge $G_L \cdot x_2$ übrigbleibt. Die Dampfwärme beträgt einerseits nach Formel (28)

$$Q' = V \cdot \alpha'_V (P_D - \mathfrak{B})_{\text{mittel}},$$

andererseits ergibt sie sich zu

$$Q' = G_L (r_{0^\circ} + c_{pD} \cdot t_1 - i_{\mathfrak{B}} t_{\text{mittel}}) (x_1 - x_2).$$

¹ Hirsch: Die Abkühlung feuchter Luft. Ges.-Ing. 1926.

Der letzte Betrag folgt aus der Überlegung, daß für 1 kg niederschlagende Feuchtigkeit, die ihr ursprünglich inwohnende Dampfwärme $i_{D_1} = r_0 + c_{pD} \cdot t_1$ an die Flüssigkeit übergeht, hiervon jedoch der Betrag der schließlichen mittleren Flüssigkeitswärme $i_{\mathfrak{B}} t_{\text{mittel}}$ in Abzug zu bringen ist, weil dessen Übertritt keine Folge des Wärmeaustausches darstellt. Durch Gleichsetzen von je zwei Gleichungen ergibt sich aus den Beziehungen für die fühlbare Wärme

$$V = \frac{G_L(c_{pL} + c_{pD} \cdot x_2)(t_1 - t_2)}{\alpha_V(t - t)_{\text{mittel}}},$$

aus den Beziehungen für die Dampfwärme

$$V = \frac{G_L(r_0 + c_{pD} \cdot t_1 - i_{\mathfrak{B}} t_{\text{mittel}})(x_1 - x_2)}{\alpha'_V(P_D - \mathfrak{B})_{\text{mittel}}}.$$

Die Wärmeübergangszahl α_V für fühlbare Wärme ist hier, da es sich um eine Luft-trockenanlage handelt, nach Formel (38)

$$\alpha_V = \frac{1}{\frac{1}{1150 + 1,5 \cdot \frac{G}{f}} + \frac{1}{2,16 \cdot 10^{-9} \left(\frac{G}{f}\right)^{1,8} \left(\frac{\mathfrak{G}}{f}\right)^{1,54}}}$$

zu errechnen. Der Durchgangsquerschnitt f ergibt sich aus der als zulässig ermittelten Luftgeschwindigkeit w und dem Rauminhalt der Luft im mittleren Zustand $\frac{G}{\gamma_{\text{mittel}}}$. Er sei zu $f = 15 \text{ m}^2$ angenommen. Die Berieselungsstärke $\frac{\mathfrak{G}}{f}$ folgt hieraus, wenn die stündlich zugeführte Wassermenge \mathfrak{G}_1 bekannt ist. Sie muß durch Erwärmung von t_1 auf t_2 die gesamte auf Wärmeaustausch entfallende Leistung $Q_F = Q_t + Q'$ aufnehmen. Es ergibt sich daher

$$\begin{aligned} \mathfrak{G}_1 &= \frac{G_L[(c_{pL} + c_{pD} \cdot x_2)(t_1 - t_2) + (r_0 + c_{pD} \cdot t_1 - i_{\mathfrak{B}} t_{\text{mittel}})(x_1 - x_2)]}{t_1 - t_2} \\ &= \frac{100000 \left[(0,24 + 0,46 \cdot 0,0200)(40 - 27) + \left(595 + 0,46 \cdot 40 - \frac{20 + 10}{2} \right) (0,0294 - 0,0200) \right]}{20 - 10} \\ &= \frac{324960 + 562500}{10} = 88650. \end{aligned}$$

Die stündlich austretende Wassermenge ist um den Betrag der Trockenleistung größer und beträgt

$$\mathfrak{G}_2 = \mathfrak{G}_1 + G_L(x_1 - x_2) = 88650 + 100000(0,0294 - 0,0200) = 89590.$$

Die für die Berechnung von α_V anzusetzende mittlere Berieselungsstärke folgt daher zu

$$\frac{\mathfrak{G}}{f} = \frac{\mathfrak{G}_1 + \mathfrak{G}_2}{2f} = \frac{88650 + 89590}{2 \cdot 15} \approx 5900.$$

Mit

$$G = G_L(1 + x_{\text{mittel}}) = 100000 \left(1 + \frac{0,0294 + 0,0200}{2} \right) = 102470,$$

$$\frac{G}{f} = \frac{102470}{15} \approx 6800$$

ergibt sich

$$\alpha_V = \frac{1}{\frac{1}{1150 + 1,5 \cdot 6800} + \frac{1}{2,16 \cdot 10^{-9} \cdot 6800^{1,8} \cdot 5900^{1,54}}} \approx 5600.$$

Die Größe des benötigten Berieselungsraumes beträgt daher

$$V = \frac{324000}{5600 \cdot 18,5} \approx 3,1 \text{ m}^3.$$

Die Höhe der Füllkörperschicht ist mit

$$\frac{V}{f} = \frac{3,1}{15} \approx 0,21 \text{ m}$$

zu bemessen. Es ist selbstverständlich, daß der Wert

$$V = \frac{562500}{\alpha'_V (P_D - \mathfrak{P})_{\text{mittel}}},$$

wie er sich nach der Dampfwärme errechnet, zu demselben Ergebnis führen muß. Nach Formel (47) gilt

$$\begin{aligned} \alpha'_V (P_D - \mathfrak{P})_{\text{mittel}} &= \frac{\alpha_V}{C_{p_g \text{mittel}}} (i_{Dt_1} - i_{\mathfrak{S}t_{\text{mittel}}}) (x - x_g)_{\text{mittel}} \\ &= \frac{5600}{0,24 + 0,46 \cdot \frac{0,0079 + 0,0152}{2}} \left(595 + 0,46 \cdot 10 - \frac{20 + 10}{2} \right) 0,0132 \approx 180000, \\ V &= \frac{562500}{180000} \approx 3,1 \text{ m}^3. \end{aligned}$$

Der Zusammenhang der Formeln für Q_t , Q' und $\frac{\alpha}{\alpha'}$ bzw. $\frac{\alpha_V}{\alpha'_V}$ ist derartig, daß die Übereinstimmung der Berechnungen von V nach der fühlbaren und der Dampfwärme sich zwangsläufig ergibt.

E. Wärmeübertragung zwischen Gas und Gut bei veränderlichen Verhältnissen. Das Trockenzeitbild (x - z -Bild).

Die Beziehung

$$-G_L(di - i_{\mathfrak{S}t} \cdot dx) = \mathfrak{F} \cdot dz [\alpha(t - t) + \alpha'(P_D - \mathfrak{P})]$$

läßt sich wie folgt umformen

$$\begin{aligned} -G_L(di - i_{\mathfrak{S}t} \cdot dx) &= \frac{\mathfrak{F} \cdot dz \cdot \alpha}{C_{p_g}} \left[C_{p_g}(t - t) + C_{p_g} \cdot \frac{\alpha'}{\alpha} (P_D - \mathfrak{P}) \right], \\ &= \mathfrak{F} \cdot dz \cdot k' \left[C_{p_g}(t - t) + \frac{C_{p_g}(i_{Dt} - i_{\mathfrak{S}t})(x - x_g)(P_D - \mathfrak{P})}{C_{p_g}(P_D - \mathfrak{P})} \right], \\ &= \mathfrak{F} \cdot dz \cdot k' [(c_{pL} + c_{pD} \cdot x_g)t + (r_{0^0} + c_{pD} \cdot t - i_{\mathfrak{S}t})x \\ &\quad - (c_{pL} + c_{pD} \cdot x_g)t - (r_{0^0} + c_{pD} \cdot t - i_{\mathfrak{S}t})x_g], \\ &= \mathfrak{F} \cdot dz \cdot k' [(c_{pL} \cdot t + (r_{0^0} + c_{pD} \cdot t)x] - [c_{pL} \cdot t \\ &\quad + (r_{0^0} + c_{pD} \cdot t)x_g] - i_{\mathfrak{S}t}(x - x_g)), \\ -G_L(di - i_{\mathfrak{S}t} \cdot dx) &= \mathfrak{F} \cdot dz \cdot k' [i - i_g - i_{\mathfrak{S}t}(x - x_g)]. \end{aligned} \quad (51)$$

Die Bedeutung des Klammerwertes auf der rechten Seite ergibt sich aus Abb. 39. Durch den Zustandspunkt \mathfrak{G} des Gutes werde eine

Parallele zu der τ_t -Linie gezogen, die vom Schnittpunkt der durch \mathcal{G} gehenden t -Geraden mit der Sättigungslinie ausgeht. Alsdann stellt der Wert $i - i_g - i_{\text{st}}(x - x_g)$ den senkrechten Abstand des dem

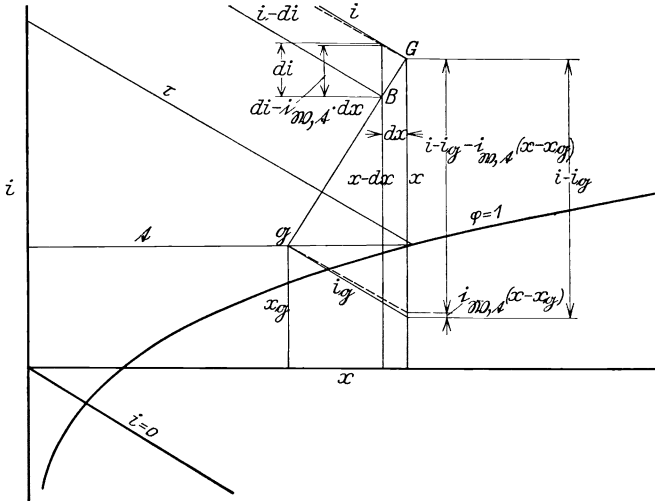


Abb. 39. Allgemeine Zustandsänderung der Luft im i - x -Bild nach unendlich kleiner Zeitdauer.

Gaszustande entsprechenden Punktes G von dieser Parallelen dar. Wird zu der τ_t -Linie auch durch G eine Parallele gezogen und der Punkt B unendlich nahe bei G auf der Verbindungsgeraden $G \mathcal{G}$ angenommen, so stellt B den neuen Zustandspunkt des Gases nach der Zeit dz dar. Es gilt die Beziehung

$$\frac{(di - i_{\text{st}} \cdot dx)}{i - i_g - i_{\text{st}}(x - x_g)} = \frac{di}{i - i_g}.$$

Formel (51) vereinfacht sich daher zu

$$-G_L \cdot di = \mathfrak{F} \cdot k' (i - i_g) dz$$

oder

$$di = \frac{\mathfrak{F}}{G_L} \cdot k' (i_g - i) dz, \quad (51a)$$

$$di = \frac{F}{G_L \cdot Z} \cdot k' (i_g - i) dz. \quad (52)$$

Diese wichtige Gleichung bedeutet, daß bei Wärmeübertragung zwischen feuchten Gasen und Flüssigkeiten die Zunahme des spezifischen Wärmeinhaltes des Gases in jedem Augenblick verhältnismäßig ist dem Teil der Austauschfläche F , der auf 1 kg während der Gesamtaustauschzeit umlaufenden trockenen Gases entfällt, der Verdunstungszahl k' und dem Unterschied des spezifischen Wärmeinhaltes i_g von Gas, dessen Zustand nach Temperatur und Dampfspannung \mathfrak{F} dem der Flüssigkeit entspricht,

von dem tatsächlichen spezifischen Wärmehalt i des Gases. Der Wärmehalt i_g kommt der Grenzschicht zu, die an der Oberfläche des Gutes ruht und den Wärmeaustausch vermittelt.

Wird Formel (52) geschrieben

$$G_L \cdot Z \cdot C_{p_g} \cdot di = F \cdot \alpha (i_g - i) dz, \quad (52a)$$

so stimmt sie in ihrem Bau ganz mit der für Wärmeübertragung zwischen trockenen Körpern vom Wasserwert \mathfrak{B} kcal/°C·h und trockenen Gasen geltenden Gleichung

$$\mathfrak{B} \cdot Z \cdot dt = F \cdot \alpha (t - t) dz = G_L \cdot Z \cdot c_{p_L} \cdot dt \quad (52b)$$

überein. Auch $G_L \cdot Z \cdot C_{p_g}$ bedeutet einen Wasserwert, den die in der Gesamtaustauschzeit umlaufende trockene Gasmenge unter den Zustandsbedingungen der Grenzschicht besitzt. Formel (52a) stellt die allgemeine Form dar, die in Gleichung (52b) übergeht, wenn der Feuchtigkeitsaustausch wegfällt. Denn dann wird

$$\begin{aligned} C_{p_g} &= c_{p_L}, \\ G_L \cdot Z \cdot C_{p_g} &= G_L \cdot Z \cdot c_{p_L}, \\ i_g &= c_{p_L} \cdot t, \\ i &= c_{p_L} \cdot t, \\ di &= c_{p_L} \cdot dt. \end{aligned}$$

Die Beziehung (51) ist bereits von Merkel¹ aufgestellt worden. Er hat sie als Annäherung, unter Vernachlässigung nebensächlicher Unterschiede, abgeleitet. Formel (51) gilt jedoch nicht nur angenähert, sondern genau und nicht nur dann, wenn es sich um Wärmeaustausch zwischen feuchter Luft und Wasser handelt, sondern auch dann, wenn die Veränderung sich auf ein beliebiges Gas und eine beliebige Flüssigkeit bezieht oder die Flüssigkeit durch einen „feuchten“ oder auch nicht mehr als feucht zu betrachtenden, d. h. hygroskopisch wirkenden, Körper ersetzt wird. Bedingung ist nur, daß der Wärmehalt i_g auf die Temperatur t und die Dampfspannung \mathfrak{B} bezogen wird, die der Oberfläche dieses Körpers zukommen.

Da in der lebenden Natur der Wärmeaustausch fast nur zwischen feuchten Körpern stattfindet, liegt der Gedanke nahe, der Formel (52a) eine größere Bedeutung beizumessen als der Formel (52b) und, um noch einen Schritt weiterzugehen, den Begriff des spezifischen Wärmehaltes als Körpereigenschaft vor den der Temperatur zu setzen. Das Thermometer würde damit als Meßvorrichtung für Lebensvorgänge an Bedeutung einbüßen und als Ersatz ein Wärmehaltsmesser zu finden sein.

Können für k' und den Unterschied $i_g - i$ Mittelwerte als gleichbleibend angesetzt werden, so gilt Formel (52) auch für Veränderungen von endlicher Dauer Z und lautet hierfür

$$i_2 - i_1 = \frac{F}{G_L} \cdot k'_{\text{mittel}} (i_g - i)_{\text{mittel}}. \quad (53)$$

¹ Merkel: Verdunstungskühlung. Forschungsheft 275.

Die Gleichung ist wegen ihrer einfachen Form besonders geeignet, um bei gegebenen Zustandsverhältnissen von Gas und Flüssigkeit entweder die für eine bestimmte Leistung benötigte Austauschfläche F , bzw. den Austauschraum $V = \frac{F \cdot \alpha}{\alpha_V}$, oder für festliegende Ausmaße F bzw. V die übertragbare Leistung zu ermitteln.

Zahlenbeispiel 4. Unter Zugrundelegung von Formel (53) errechnet sich der für die Annahmen des Zahlenbeispiels 3 benötigte Berieselungsraum

$$V = G_L \cdot \frac{(i_1 - i_2)}{k'_{\text{mittel}}} (i - i_g)_{\text{mittel}} .$$

Nach dem i - x -Bild ergeben sich

$$\begin{aligned} i_1 &= 27,6 , \\ i_2 &= 18,6 , \\ i_{g1} &= 7,1 , \\ i_{g2} &= 14,0 , \end{aligned}$$

und es folgt

$$V = \frac{100\,000 (27,6 - 18,6)}{\frac{5600}{0,24 + 0,46} \cdot \frac{0,0079 + 0,0152}{2} \cdot \frac{27,6 - 7,1 + 18,6 - 14}{2}} \approx 3,1$$

in Übereinstimmung mit dem früher gefundenen Ergebnis.

Aus Formel (51a) ergibt sich

$$\int \frac{di}{i_g - i} = \int \frac{\mathfrak{F}}{G_L} \cdot k' \cdot dz . \tag{54}$$

Das Integral ist für veränderlichen Wert $i_g - i$ lösbar, wenn $\frac{\mathfrak{F}}{G_L}$ und k' sich zeitlich nicht ändern und außerdem i_g gleichbleibt. Es wäre auch denkbar, daß i_g sich verändert, jedoch in einer Abhängigkeit von i dargestellt werden kann, bei deren Einsetzung das Integral lösbar bleibt. Dies ist nicht zu erwarten. Denn der Zusammenhang von i mit der Sättigungskurve und den φ -Linien, von denen bis zur Erreichung der Kühlgrenze die erste, im hygroskopischen Gebiet die letzten die Veränderung von i_g bestimmen, ist ein verwickelter. Unveränderlichkeit von i_g führt zu einem gleichbleibenden Wert C_{p_g} . Die Bedingung, daß $k' = \frac{\alpha}{C_{p_g}}$ unabhängig von der Zeit ist, läuft also weiter auf einen gleichbleibenden Wert α hinaus. Ebenso wie bei der Wärmeübertragung ohne Feuchtigkeitsübergang muß daher auch hier der Berechnung ein mittlerer Wert α als Annäherung zugrunde gelegt werden.

Die Voraussetzung eines gleichbleibenden Wertes i_g und C_{p_g} trifft für den Hauptabschnitt des Trockenvorganges zu, während dessen die Guttemperatur unveränderlich gleich der Kühlgrenze τ angenommen werden kann. Hierfür lautet die Lösung der Integralgleichung

$$\frac{i_g - i_a}{i_g - i} = e^{\frac{\mathfrak{F}}{G_L} \cdot k' (z - z_a)} , \tag{55}$$

$$i = i_g - (i_g - i_a) e^{-\frac{\mathfrak{F}}{G_L} \cdot k' (z - z_a)} = i_g - (i_g - i_a) e^{-\frac{F}{G_L} \cdot k' \cdot \frac{z - z_a}{Z}} \tag{55a}$$

bzw., wenn als Ausgangspunkt die Zeit $z_a = 0$ angesetzt und unter Berücksichtigung des Haupttrockenabschnittes allein die Gesamtzeit mit Z bezeichnet wird,

$$\frac{i_g - i_a}{i_g - i_e} = e^{\frac{\mathfrak{F}}{G_L} \cdot k' \cdot Z} = e^{\frac{F}{G_L} \cdot k'}, \quad (55b)$$

$$i_e = i_g - (i_g - i_a) e^{-\frac{\mathfrak{F}}{G_L} \cdot k' \cdot Z} = i_g - (i_g - i_a) e^{-\frac{F}{G_L} \cdot k'}.$$

i_a bedeutet den Wärmehalt des Gases zu Anfang, i_e zu Ende des Hauptabschnitts. Die Gesamtdauer der Haupttrocknung folgt hieraus zu

$$Z = \frac{G_L}{\mathfrak{F} \cdot k'} \cdot \ln \frac{i_g - i_a}{i_g - i_e}. \quad (56)$$

Wird in Formel (51a) der zeitliche Mittelwert $(i_g - i)_{\text{mittel}}$ als unveränderlich eingesetzt, so liefert sie durch Integrierung

$$i_e - i_a = \frac{\mathfrak{F}}{G_L} \cdot k' (i_g - i)_{\text{mittel}} \cdot Z. \quad (57)$$

Aus den Formeln (56) und (57) folgt

$$(i_g - i)_{\text{mittel}} = \frac{i_e - i_a}{\ln \frac{i_g - i_a}{i_g - i_e}}. \quad (58)$$

Das bedeutet, daß bei Errechnung der Veränderung des Wärmehaltes nach Formel (57) auf der rechten Seite ein gleichbleibender Mittelwert des Wärmehaltsgefälles eingesetzt werden kann, der sich in ganz gleicher Weise darstellt, wie der mittlere Temperaturunterschied

$$\frac{t_e - t_a}{\ln \frac{t - t_a}{t - t_e}},$$

der bei einseitig veränderlicher Temperatur für die Wärmeübertragung ohne Feuchtigkeitsaustausch zugrunde zu legen ist. Formel (56) läßt sich daher auch schreiben

$$Z = \frac{G_L}{\mathfrak{F} \cdot k'} \cdot \frac{i_e - i_a}{(i_g - i)_{\text{mittel}}}. \quad (59)$$

Für Werte des Verhältnisses $\frac{i_g - i_a}{i_g - i_e}$, die der Einheit naheliegen, ist der wirkliche Mittelwert des Wärmehaltsgefälles genügend genau gleich dem algebraischen Mittelwert $\frac{i_g - i_a + i_g - i_e}{2} = i_g - \frac{i_a + i_e}{2}$.

Aus Abb. 39 läßt sich die Beziehung ablesen

$$\frac{di}{i_g - i} = \frac{i_{\text{mitt}} \cdot dx}{i_{\text{mitt}}(x_g - x)} = \frac{dx}{x_g - x}. \quad (60)$$

Aus den Formeln (51a) und (60) ergibt sich

$$\frac{dx}{x_g - x} = \frac{\mathfrak{F}}{G_L} \cdot k' \cdot dz. \quad (61)$$

Durch Integrierung folgt

$$\frac{x_g - x_a}{x_g - x} = e^{\frac{\mathfrak{F}}{G_L} \cdot k' \cdot (z - z_a)}, \quad (62)$$

$$x = x_g - (x_g - x_a) e^{-\frac{\mathfrak{F}}{G_L} \cdot k' \cdot (z - z_a)} = x_g - (x_g - x_a) e^{-\frac{F}{G_L} \cdot k' \cdot \frac{z - z_a}{Z}}, \quad (62a)$$

$$\frac{x_g - x_a}{x_g - x} = e^{\frac{\mathfrak{F}}{G_L} \cdot k' \cdot Z} = e^{\frac{F}{G_L} \cdot k'} = \frac{i_g - i_a}{i_g - i_e}, \quad (62b)$$

$$x_e = x_g - (x_g - x_a) e^{-\frac{\mathfrak{F}}{G_L} \cdot k' \cdot Z} = x_g - (x_g - x_a) e^{-\frac{F}{G_L} \cdot k'}, \quad (62c)$$

$$Z = \frac{G_L}{\mathfrak{F} \cdot k'} \cdot \ln \frac{x_g - x_a}{x_g - x_e}. \quad (63)$$

Zur Erleichterung der Rechnung sind in Abb. 40 die Potenzwerte e^m und e^{-m} in logarithmischen Ordinaten, abhängig von m als Abszissen, dargestellt.

Der Mittelwert des Feuchtigkeitsgefälles ergibt sich zu

$$(x_g - x)_{\text{mittel}} = \frac{x_e - x_a}{\ln \frac{x_g - x_a}{x_g - x_e}}. \quad (64)$$

Wird in Formel (61) der zeitliche Mittelwert $(x_g - x)_{\text{mittel}}$ als unveränderlich eingesetzt, so liefert die Integrierung

$$x_e - x_a = \frac{\mathfrak{F}}{G_L} \cdot k' \cdot (x_g - x)_{\text{mittel}} \cdot Z, \quad (65)$$

$$Z = \frac{G_L}{\mathfrak{F} \cdot k'} \cdot \frac{x_e - x_a}{(x_g - x)_{\text{mittel}}}. \quad (63a)$$

Die stündliche Trockenleistung folgt hieraus zu

$$\begin{aligned} G_L(x_e - x_a) &= \mathfrak{F} \cdot Z \cdot k' \cdot (x_g - x)_{\text{mittel}} \\ &= F \cdot k' \cdot (x_g - x)_{\text{mittel}} \end{aligned} \quad (66)$$

und stimmt mit dem Wert überein, der sich nach dem Sinn der Verdunstungszahl k' unmittelbar niederschreiben ließ. Auf den Trockensstoffgehalt des Gutes bezogen, lautet sie

$$\mathcal{G}_x(x_a - x_e) = F \cdot k' \cdot (x_g - x)_{\text{mittel}}. \quad (67)$$

Die Gleichungen (55a), (59), (62a), (63a), (66) und (67) gelten nicht nur für den Hauptabschnitt der Trocknung, sondern für jeden Vorgang, bei dem Wärmeübertragung zwischen feuchtem Gas und Gut statt-

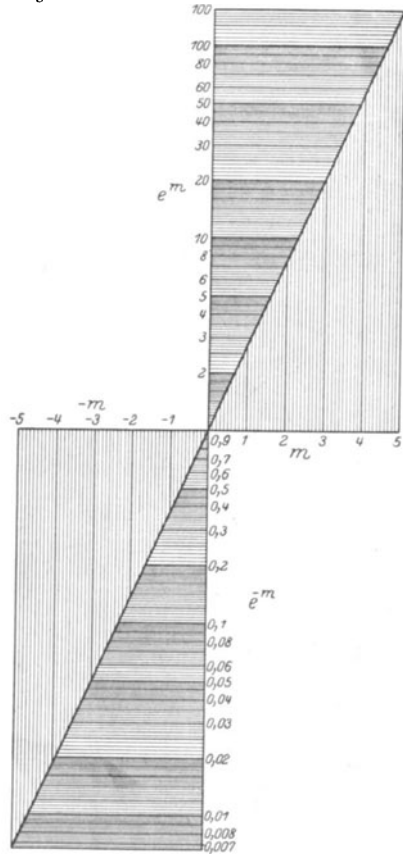


Abb. 40. Exponentialfunktion e^m und e^{-m} .

findet und für die veränderlichen Faktoren genügend genau Mittelwerte als gleichbleibend eingesetzt werden dürfen.

Zahlenbeispiel 5. Für die Annahmen des Zahlenbeispiels 3 errechnet sich der benötigte Berieselungsraum nach Formel (66) zu

$$V = \frac{G_L (x_1 - x_2)}{k' (x - x_g)_{\text{mittel}}} = \frac{100000 (0,0294 - 0,0200)}{5600 \cdot 0,01832} \approx 3,1,$$

$$0,024 + 0,46 \cdot \frac{0,0079 + 0,0152}{2}$$

wie zuvor gefunden.

Die Gleichungen (55) bis (67) bilden die Grundlage für die Berechnung des Haupttrockenabschnittes. Sie bleiben nicht dabei stehen, die Veränderung des Luftzustandes längs der τ -Linie zu ermitteln und

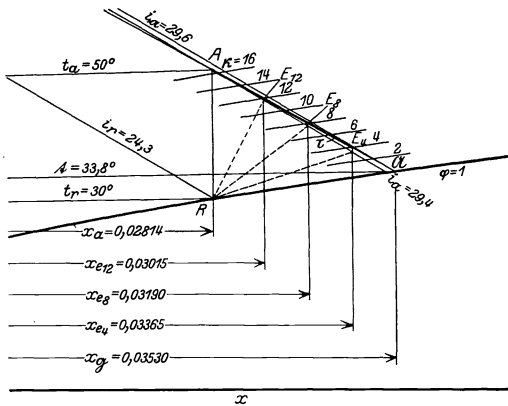


Abb. 41. Zustandsänderung der Luft im i - x -Bild bei verschiedenem Endtrockenpotential.

und durch Festlegung der beiden Endpunkte die für eine bestimmte Trockenleistung erforderliche Luftmenge zu errechnen, sondern bieten vor allem die Handhabe, um den zeitlichen Verlauf des Trockenvorganges zu verfolgen.

Der Hauptabschnitt beherrscht den ganzen Trockenvorgang um so mehr, je höher der Feuchtigkeitsgehalt des Gutes zu Anfang ist und je weniger seine Anfangstemperatur sich von der Kühlgrenze unterscheidet.

Für solche Fälle genügt es meist dem praktischen Bedürfnis, die einfache Rechnung durchzuführen, die im nachstehenden an einem Beispiele erörtert werden möge.

Zahlenbeispiel 6. Es sollen Felle in einem ununterbrochen arbeitenden Trockner, der ein für nasses Gut errechnetes Fassungsvermögen von $Z \cdot G \cdot x(1 + x_a) = 6000$ kg besitzt, von einem Anfangsfeuchtigkeitsgehalt $x_a = 1$ auf einen Endfeuchtigkeitsgehalt $x_e = 0,2$ getrocknet werden. Die beiderseitige Oberfläche der dem Fassungsvermögen entsprechenden Fellzahl betrage $F = 2400$ m². Zur Verfügung stehe gesättigte Frischluft mit einer Temperatur $t_r = 30^\circ$. Sie soll auf $t_a = 50^\circ$ vorgewärmt in den Trockner eintreten und nach einmaligem Durchgang in die Umgebung abgehen. Von dem für Vorwärmung des Gutes auf die Kühlgrenze benötigten Wärmeverbrauch und den Streuverlusten der Trockenvorrichtung werde abgesehen. Es sei ferner angenommen, daß der Endfeuchtigkeitsgehalt den hygroscopischen Punkt nicht unterschreitet, der gesamte Trockenvorgang sich daher auf der Kühlgrenze vollzieht.

In dem i - x -Bild der Abb. 41 entspricht Punkt R dem Zustande der Frischluft, A der vorgewärmten Trockenluft. Die Gerade AQ stellt die Kühlgrenzlinie dar. Sie ergibt einen Wert $\tau = 33,8^\circ$, der die gleichbleibende Temperatur t des Gutes mißt.

Zu Punkt A gehören die Werte

$$x_a = 0,02814, \\ i_a = 29,4.$$

Für Punkt \mathcal{A} ergibt sich

$$x_g = 0,03530, \\ i_g = i_a + i_{\text{Bt}}(x_g - x_a) = 29,4 + 33,8(0,03530 - 0,02814) = 29,6, \\ C_{p\text{g}} = 0,24 + 0,46 \cdot 0,03530 = 0,26.$$

Die Untersuchung sei für verschiedene Endzustände der Trockenluft durchgeführt. Das Trockenpotential der Luft im Zustande A liegt bei $x_a = 16,2$. Das Trockenpotential der abgehenden Luft soll etwa $\frac{3}{4}, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}$ des Anfangswertes betragen, also auf dem Schnittpunkt der τ -Linie mit den Trockenpotentiallinien $x_e =$

	12	8	4	°C
	E_{12}	E_8	E_4	
liegen. Dem entsprechen die Punkte				
mit einem Werte $x_e =$	0,03015	0,03190	0,03365	
$x_e - x_a =$	0,00201	0,00376	0,00551	

Die gesamte in der zunächst unbekanntem Trockenzeit Z zu verdunstende Wassermenge beträgt

$$Z \cdot \mathcal{G}_x(x_a - x_e) = \frac{6000}{1 + x_a}(x_a - x_e) = \frac{6000}{2}(1 - 0,2) \\ = 2400 \text{ kg.}$$

Die während der Trockenzeit Z umlaufende Luftmenge muß daher 2400 kg Dampf bei Erhöhung ihres Feuchtigkeitsgehaltes um das Maß $x_e - x_a$ abführen und daher betragen

$$Z \cdot G_L = \frac{2400}{x_e - x_a} = \begin{matrix} 1190\,000 & 638\,000 & 435\,000 & \text{kg} \end{matrix}$$

Für die Errechnung der Trockenzeit Z ist Kenntnis

der Verdunstungsziffer $k' = \frac{\alpha}{C_{p\text{g}}}$ nötig und hierfür

eine Festsetzung der Geschwindigkeit w erforderlich, mit der die Luft die Flächen der Häute bestreicht.

Sie sei zu $w =$

$$\begin{matrix} 2 & 1 & 0,5 & \text{m/s} \end{matrix}$$

geschätzt. Hierfür folgt

$$\alpha = 5,3 + 3,6 \cdot w = \begin{matrix} 12,5 & 8,9 & 7,1 & \text{kcal/m}^2 \cdot \text{°C} \\ k' = & 48,7 & 34,7 & 27,7 & \text{kg/m}^2 \cdot \text{h} \end{matrix}$$

Nach Formel (63) ergibt sich die gesamte Trockendauer

$$Z = \frac{G_L}{F \cdot k'} \cdot \ln \frac{x_g - x_a}{x_g - x_e} \quad \begin{matrix} 3,35 & 5,72 & 9,6 & \text{h} \end{matrix}$$

Die stündlich verarbeitete Gutsmenge entspricht daher, in nassen Häuten gewogen,

$$\mathcal{G}_x(1 + x_a) = \frac{6000}{Z} = \begin{matrix} 1800 & 1050 & 625 & \text{kg/h} \end{matrix}$$

Die umlaufende Luftmenge besitzt ein Reinluftgewicht

$$G_L = \frac{Z \cdot G_L}{Z} = \begin{matrix} 355\,000 & 110\,000 & 46\,000 & \text{kg/h} \end{matrix}$$

Es bleibt zu prüfen, ob die angenommene Luftgeschwindigkeit zutrifft. Sie ergibt sich aus dem von der Bauweise des Trockners abhängigen freien

Durchgangsquerschnitt f , dem spezifischen Volumen v_L der Luft, wie es der durchschnittlichen Luftbeschaffenheit zwischen den Punkten A und E entspricht, zu

$$w = \frac{G \cdot v_L}{3600 \cdot f}.$$

Wird von dem Unterschiede des spezifischen Volumens abgesehen, so verhalten sich die Raummengen der Luft etwa wie die Reingewichte, also wie

$$3,2: 1: 0,42$$

Wird der Querschnitt in allen drei Fällen gleich gehalten und so bemessen, daß er im zweiten Falle eine Geschwindigkeit von 1 m/s, wie angenommen, ergibt, so führt er im dritten Falle mit 0,42 m/s genügend genau zu der angenommenen Zahl von 0,5 m/s, im ersten Falle dagegen wesentlich höher. Ob zur Vermeidung übermäßiger Widerstände alsdann der Querschnitt zu erweitern ist, bleibt der Erwägung im einzelnen Falle überlassen. Einer höheren Geschwindigkeit entspricht ein größerer Wert k' und eine entsprechende Abkürzung der Trockendauer, die ihrerseits wieder eine Erhöhung der stündlich umlaufenden Luftmenge G_L bewirkt. Der dem Punkte R entsprechende spezifische Wärmehalt beträgt

$$i_r = 24,3.$$

Der spezifische Wärmeverbrauch ermittelt sich hiernach zu

$$\frac{i_a - i_r}{x_e - x_a} = \quad 2550 \quad 1350 \quad 925 \quad \text{kcal/kg}$$

Dieser Wert kann, unter Benutzung des Randmaßstabes oder des Winkelmessers, aus der Neigung der Verbindungslinien von Punkt R mit den senkrecht unter E auf der i_a -Linie liegenden Punkten abgelesen werden. Es zeigt sich, daß die Abkürzung der Trockenzeit mit einem erheblichen Aufwand sowohl an bewegter Luft als auch vor allem an Wärme in Kauf genommen werden muß. Die wirtschaftliche Ausführung liegt daher unbedingt in der Nähe des dritten Falles, der anzuwenden bleibt, wenn, mit Rücksicht auf die Beschaffenheit der Ware, gegen die Trockendauer keine Bedenken bestehen.

Die Größe des Trockenpotentials und damit die Bewegung des Luftzustandspunktes zu den Trockenpotentiallinien bietet den Maßstab für die Veränderung der Trockengeschwindigkeit. Sie ist in Punkt A am größten, in Punkt E am kleinsten. Ein anschauliches Bild wird gewonnen, wenn nach Abb. 42, abhängig von der Zeit als Abszisse, der Feuchtigkeitsgehalt der Luft als Ordinate in einem

x - z -Bild

dargestellt wird, das als Trockenzeitbild bezeichnet werden darf. Die Länge der Abszissenachse stellt die gesamte Trockendauer Z dar. Die x -Kurve beginnt für $z = 0$ mit dem Werte x_a und endet für $z = Z$ mit dem Werte x_e . Wird die Abszissenachse in eine beliebige Anzahl von gleichen Abschnitten, z. B. 10, wie in Abb. 42 geschehen, eingeteilt, so entspricht der Endpunkt des dem Koordinatenursprung zu nächst liegenden Teiles dem Verhältnis $\frac{z}{Z} = 0,1$, der folgende $\frac{z}{Z} = 0,2$

usw. Die Ordinatenwerte x ergeben sich alsdann nach Formel (62a) zu

$$x = x_g - (x_g - x_a) e^{-\frac{F}{G_L} \cdot k' \cdot \frac{z}{Z}}$$

Unter Benutzung der Zahlen des dritten Falles obigen Beispiels sind hiernach die in Abb. 42 eingetragenen x -Werte errechnet. Wie zu erwarten, verläuft die x -Kurve mit abnehmender Neigung zur z -Achse. Ihr Abstand von einer in Entfernung x_a vom Ordinatenursprung gezogenen Parallelen zur Abszissenachse stellt den Wert $x - x_a$ dar, der als Maßstab für die fortschreitende Trockenleistung gilt. Die Tangente

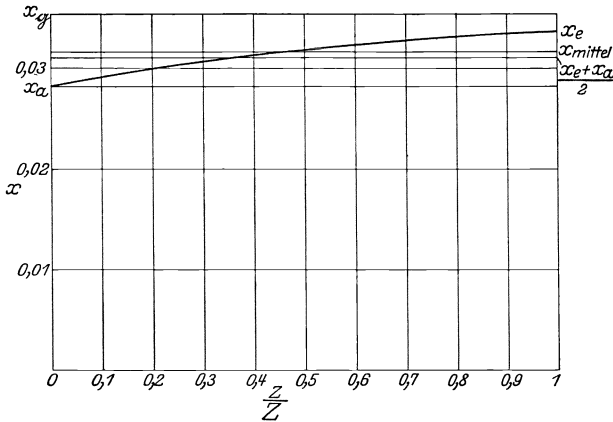


Abb. 42. x - z -Bild des Haupttrockenabschnittes.

an die x -Kurve kennzeichnet mit ihrer Neigung zur z -Achse den Wert

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{dx}{dz},$$

die augenblickliche Trockengeschwindigkeit. In Abb. 42 ist im Abstand des gleichbleibenden Wertes x_g von der Abszissenachse eine Waagerechte gezogen und von ihr ausgehend abwärts die Strecke

$$(x_g - x)_{\text{mittel}} = \frac{x_g - x_a}{\ln \frac{x_g - x_a}{x_g - x_e}}$$

eingetragen. Sie bestimmt nach Formel (66) die stündliche Trockenleistung

$$G_L(x_e - x_a) = F \cdot k' (x_g - x)_{\text{mittel}}.$$

x_{mittel} liegt oberhalb des algebraischen Mittelwertes $\frac{x_e + x_a}{2}$. Der für die Trockenleistung ausschlaggebende Wert x_{mittel} kommt einem Punkte zu, der dem Anfangswerte x_a näher liegt als dem Endwerte x_e .

In Abb. 43 ist die τ -Linie der Abb. 41 nochmals wiederholt und für den dritten Fall die Strecke AE_4 in zehn Teile geteilt, die den x -Werten der Abb. 42 für die zehn gleichen Zeiteile entsprechen. So

läßt sich der zeitliche Verlauf auch in einfacher Weise in das i - x -Bild zurückübertragen.

Im x - z -Bild können auch die i -Werte aufgenommen werden, deren Betrag sich nach Formel (55a) zu

$$i = i_g - (i_g - i_a) e^{-\frac{F}{G_L} \cdot k' \cdot \frac{z}{Z}}$$

errechnet. Sind die x -Werte zuvor ermittelt, so ergeben sich in einfacherer Weise die i -Werte aus der Beziehung (62b) zu

$$i = i_g - (x_g - x) \frac{i_g - i_a}{x_g - x_a} = i_g - i_{\text{ges}} (x_g - x),$$

was auch aus der Bedeutung der Kühlgrenzlínie unmittelbar hätte niedergeschrieben werden können.

Statt die Trockenzeit zu suchen, kann auch die Aufgabe gestellt werden, eine bestimmte Trockendauer Z als Voraussetzung zu wählen und für gegebene Anfangsbedingungen den Wert x_e zu finden. Hierbei darf nicht etwa gleichzeitig die stündliche Reinluftmenge G_L von vornherein festgelegt werden, da sie sich aus x_e in der geschilderten

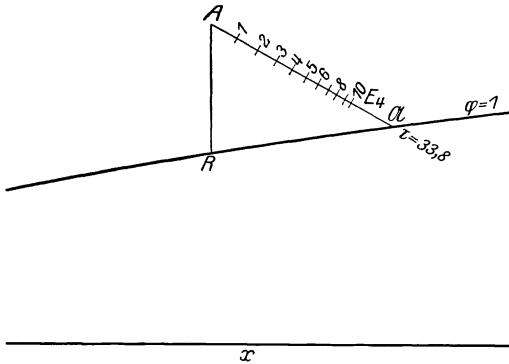


Abb. 43. Zeitlicher Verlauf der Zustandsänderung der Luft im i - x -Bild während des Haupttrockenabschnittes.

Weise zwangsläufig ergibt. Es sei z. B. für die Ausgangsverhältnisse des Beispiels die Trockendauer mit $Z = 8$ festgelegt. Da insgesamt 2400 kg Wasser zu verdunsten sind, beträgt die stündliche Trockenleistung

$$G_L(x_e - x_a) = 300 \text{ kg/h.}$$

Dieser Wert ist nach Formel (66) dem Betrage $F \cdot k' (x_g - x_e)_{\text{mittel}}$ gleichzusetzen, woraus sich

$$(x_g - x_e)_{\text{mittel}} = \frac{300}{2400 \cdot 27,7} = 0,0045$$

ergibt. Um hieraus den Wert x_e zu finden, wird zweckmäßig Abb. 44 benutzt. Diese gilt ganz allgemein für die Ermittlung des wirklichen Mittelwertes, wenn

$$\Delta_{\text{mittel}} = \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{\ln \frac{\Delta_1}{\Delta_2}}$$

ist und Δ_1 den anfänglichen, Δ_2 den schließlichen Unterschied bedeuten. Die Abszissen stellen das Verhältnis $\frac{\Delta_2}{\Delta_1}$, die Ordinaten das

Verhältnis $\frac{\Delta_{\text{mittel}}}{\Delta_1}$ dar. In die gleiche Abbildung ist auch das Verhältnis des arithmetischen Mittelwertes $\frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2}$ zu Δ_1 , also $\frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2 \cdot \Delta_1}$, gestrichelt eingetragen und zeigt, daß bei einem Wert $\frac{\Delta_2}{\Delta_1}$ zwischen etwa 0,5 und 1 der Fehler gering ist, wenn der arithmetische statt des wirklichen

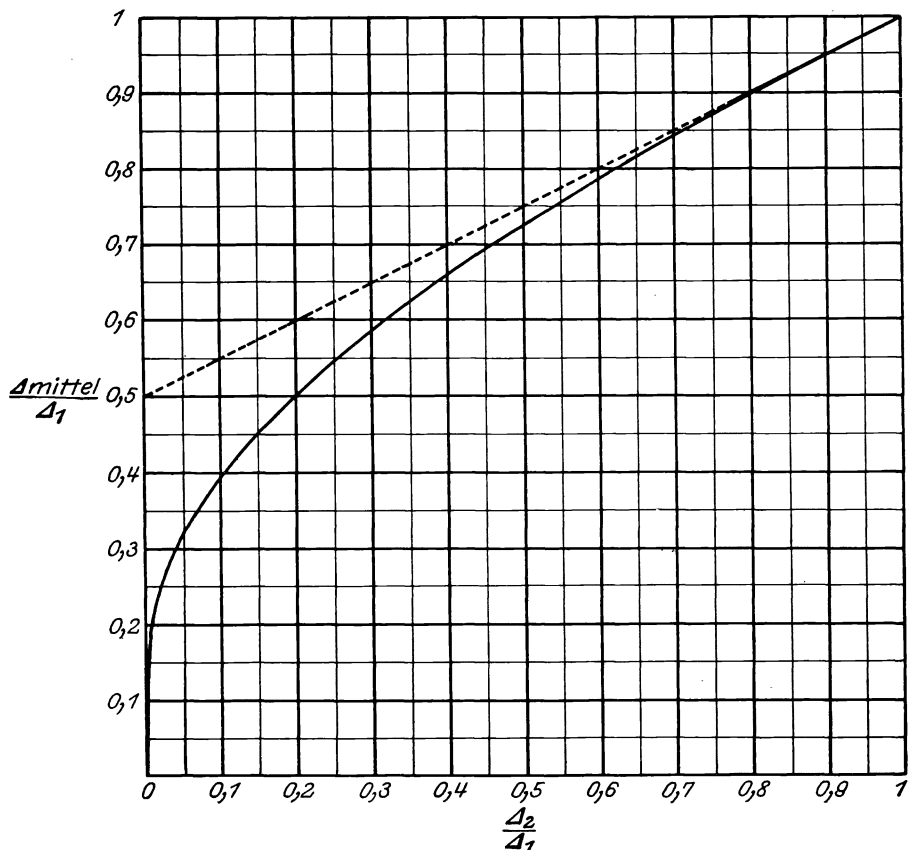


Abb. 44. Tafel für Ermittlung des mittleren Unterschiedes $\Delta_{\text{mittel}} = \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{\ln \frac{\Delta_1}{\Delta_2}}$

Mittelwertes angewandt wird, daß er jedoch immer größer wird, je mehr sich das Verhältnis $\frac{\Delta_2}{\Delta_1}$ dem Werte 0 nähert. Für 0 selbst besitzt das Verhältnis $\frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2 \cdot \Delta_1}$ noch den Wert 0,5, während das Verhältnis $\frac{\Delta_{\text{mittel}}}{\Delta_1} = 0$ wird, entsprechend der Tatsache, daß vollständiger Ausgleich bis zum Verschwinden des Potentialunterschiedes erst nach unendlicher Zeit, d. h. praktisch überhaupt nicht, möglich ist.

Dem Verhältnis $\frac{\Delta_{\text{mittel}}}{\Delta_1}$ entspricht in unserem Beispiele der Betrag

$$\frac{\Delta_{\text{mittel}}}{\Delta_1} = \frac{(x_g - x_e)_{\text{mittel}}}{(x_g - x_a)} = \frac{0,0045}{0,03530 - 0,02814} = 0,625.$$

Für diesen Ordinatenwert ergibt Abb. 44 als Abszissenwert das Verhältnis $\frac{\Delta_2}{\Delta_1} = 0,35$. Da dieser Betrag gleichbedeutend ist mit $\frac{x_g - x_e}{x_g - x_a}$ folgt schließlich

$$x_e = x_g - 0,35(0,03530 - 0,02814) = 0,0328.$$

Mit x_e ist nunmehr auch der Wert

$$G_L = \frac{300}{0,0328 - 0,02814} = 65000 \text{ kg/h}$$

gegeben. Der Luftbedarf liegt höher als der für die längere Trockenzeit von 9,6 h geltende Wert des Falles 3. Ebenso ergibt sich der spezifische Wärmeverbrauch mit

$$\frac{29,4 - 24,3}{0,0328 - 0,02184} = 1100 \text{ kcal/kg}$$

weniger günstig.

VI. Voraussetzungen für die Berechnung des Trockenvorganges.

A. Wetterverhältnisse.

Bei dem Trockenverfahren mit Luft als Trockenmittel muß der Berechnung der Einzelheiten eine Festlegung der zu erwartenden Wetterverhältnisse vorausgehen.

Die mittlere Lufttemperatur t_r des Aufstellungsortes beeinflußt zusammen mit dem mittleren Luftfeuchtigkeitsgehalt x_r die Wirtschaftlichkeit der Anlage. Die Höchstwerte von Temperatur und Feuchtigkeitsgehalt bestimmen den spezifischen Luftbedarf, die Mindesttemperatur zusammen mit dem gleichzeitig möglichen höchsten Feuchtigkeitsgehalt den spezifischen Wärmeverbrauch.

Der Luftdruck P ist bei der Berechnung mit dem ungünstigsten, d. h. höchsten Wert anzusetzen.

Für den Betrieb von Luftentfeuchtungsanlagen und das Arbeiten in geschlossenem Kreislauf kommt der Temperatur des verfügbaren Grundwassers besondere Bedeutung zu.

In Fällen, bei denen die örtlichen Verhältnisse nicht feststehen, und dann, wenn es sich darum handelt, eine möglichst überall verwendbare Trockenvorrichtung zu berechnen, können nachstehende Angaben einen Anhaltspunkt bieten:

Trocknung, statt offen bei einer Temperatur in Nähe von 100° , im luftleeren Raum bei einer Temperatur um 40° herum vorgenommen wird.

In zahlreichen Fällen muß der Verlust wertvoller flüchtiger Bestandteile durch Wahl genügend niedriger Temperaturen vermieden werden. Dies führt dazu, daß z. B. die Temperatur von 115° , bei der Entgasung der Rohbraunkohle beginnt, während deren Trocknung nicht überschritten werden soll. Bei der Bearbeitung von Holz darf in gleichem Sinne die Temperatur nicht so hoch gesteigert werden, daß Harze und wertvolle Holzöle ausgetrieben werden. Der umgekehrte Fall, daß die Gutseigenschaften eine bestimmte Mindesttemperatur für die Trocknung vorschreiben, ist seltener. Er liegt z. B. bei geleimten

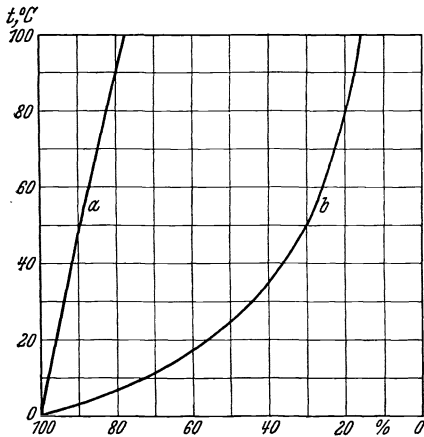


Abb. 45. Veränderung von Kapillarität (a) und Zähigkeit (b) des Wassers mit der Temperatur. Abszissen in % der für 0° gültigen Werte.

Papieren vor. Da nach Klemm¹ die Festigkeit erst bei einer Temperatur über 70° und das Reißen mit einem Feuchtigkeitsgehalt unter 0,5 einzutreten pflegt, muß das Papier vor Verminderung seines Feuchtigkeitsgehaltes unter 0,5 die Temperatur von 70° überschritten haben.

b) durch den Einfluß der Trockengeschwindigkeit. Rasches Einsetzen der Trockenwirkung hat zur Folge, daß die Oberfläche des Gutes in der Feuchtigkeitsabgabe dem Kern um so mehr voraussieht, je dicker der zu trocknende Körper ist und je weniger seine besonderen Eigenschaften die Ausbreitung der Trockenwirkung begünstigen.

Hierbei können Verkrustungen der Oberfläche eintreten. Die anfängliche Steigerung der Trockenkraft führt alsdann zu einer Verlangsamung statt Beschleunigung des gesamten Trockenvorganges. Es ist ein Irrtum, wenn häufig aus diesem Grunde die zu Anfang zulässige Temperatur des Gutes zahlenmäßig festgelegt und z. B. für die Trocknung von Gemüse Einsetzen mit etwa 50° und allmähliche Steigerung bis auf etwa 80° empfohlen wird. Maßgebend ist nicht die Temperatur allein, sondern diese mit dem Feuchtigkeitsgehalt der umgebenden Luft, also das Trockenpotential und die dadurch festgelegte Trockengeschwindigkeit.

Nach Abb. 45 nimmt die Kapillarität des Wassers mit zunehmender Temperatur ab; gleichzeitig sinkt auch die Zähigkeit, und zwar in stärkerem Maße als die Kapillarität. Bei höheren Temperaturen zieht daher die Feuchtigkeit schneller vom Kern zur Oberfläche. Die Trockengeschwindigkeit darf also bei höheren Temperaturen größer sein als

¹ Klemm: Physikalische Vorgänge bei der Stoffleimung. W. f. Pap. 1922.

bei niedrigeren, bei denen eher der Fall eintritt, daß das Trocknen der inneren Teile in unzulässigem Maße dem Trocknen der Oberfläche nachhinkt. Hohe Temperatur bei gleichzeitig niedrigem Trockenpotential ergibt größte Schonung bei der Verarbeitung von Stoffen, die wohl gegen höhere Temperaturen unempfindlich sind, dagegen Temperatur- und Feuchtigkeitsunterschiede zwischen Oberfläche und Kern wegen der damit verbundenen Verformung und Spannung nicht ertragen. In diesem Sinne äußert sich der ungünstige Einfluß hoher Trockengeschwindigkeit um so mehr, je weniger elastisch das Trockengut ist, je größer seine Stärkenabmessungen sind und je langsamer infolge geringer Temperaturleitfähigkeit die Trockenwirkung in seine tieferen Schichten vordringt. Leimtafeln, Zuckerbrote, Stärkeblöcke, Tonwaren, Gießereiformen, Ziegelsteine können unter dem Einfluß solcher Spannungen reißen. Die Trocknung soll daher mit niedrigem Trockenpotential einsetzen und nur allmählich eine Steigerung erfahren. Zu hohe Trockengeschwindigkeit bewirkt bei Holz Werfen, Reißen der Oberfläche und Verschalen des Innern. Auch hier wird Abhilfe durch hohe Temperatur und hohen Feuchtigkeitsgrad der Luft geschaffen. Einleitung von Dampf in den Trockenraum wirkt in gleichem Sinne und in gesteigerten Maße günstig. Sie kommt für die Trocknung wasserreicher, frisch geschnittener Hölzer besonders zu Anfang in Betracht. Wird das Dämpfen in den Trockenvorgang eingeschaltet, so ergibt sich eine Erwärmung des Trockengutes von außen nach innen. Gleichzeitig nehmen die äußeren Teile, die der Trocknung vorausgeeilt sind, Feuchtigkeit auf. Infolgedessen lassen die durch Temperatur- und Feuchtigkeitsunterschiede entstandenen Spannungen nach. Setzt nach dem Dämpfen die eigentliche Trocknung mit niedriger Temperatur wieder ein, so bildet sich ein Temperaturgefälle vom Kern nach der Oberfläche aus, unter dessen Wirkung die Trocknung der inneren Teile beschleunigt erfolgt, solange bis sich Temperaturengleich einstellt, die Trocknung sich wieder in erhöhtem Maße auf die äußeren Teile erstreckt und gegebenenfalls ein Dämpfen neuerlich nötig macht.

Leder wird durch zu hohe Trockengeschwindigkeit außen brüchig, ohne innen genügend durchzutrocknen. Hohe Temperatur ergibt hier wegen der verringerten Zähigkeit des Wassergehaltes ein Heraustreten des Gerbstoffes an die Oberfläche und unerwünschte Verfärbung. Bei vegetabilisch gegerbtem Leder soll deshalb die Trocknung ganz langsam, d. h. bei niedriger Temperatur und hohem Luftfeuchtigkeitsgrad einsetzen.

Wird bei den Zylindern von Papiertrocknern der Dampfdruck über die übliche Höhe von 1,5 bis 2,5 at gesteigert, so kann durch Bildung von Dampfblasen eine Durchlöcherung des Papieres eintreten, und zwar um so eher, je weniger durchlässig der Filz ist, der die Papierbahn gegen den Trockenzyylinder preßt. Dagegen besteht bei den Filztrockenzylindern der Papiermaschinen wegen der hier wegfallenden Papierschlicht diese Gefahr nicht, so daß hier Dampfdrücke bis 3,5 ata zulässig sind.

Bei Getreide tritt eine Schädigung ein, wenn die Trockengeschwindigkeit ein bestimmtes Höchstmaß überschreitet, das nach Hoffmann¹ für den Entzug von je 5% Wasser im allgemeinen bei 1 Stunde, für Braugerste sogar bei 2 Stunden liegt. Frisches Getreide ist besonders empfindlich. Ausnahmeverhältnisse liegen bei der Trocknung von Maiskörnern vor, deren harte Haut geringe Durchlässigkeit für Feuchtigkeit besitzt. Wird der Wassergehalt nicht verdunstet, sondern unter Luftleere verdampft, so entweicht die Feuchtigkeit mit zulässiger Geschwindigkeit durch die kleine Öffnung des Korns, die zuvor den Zusammenhang mit dem Kolben bildete.

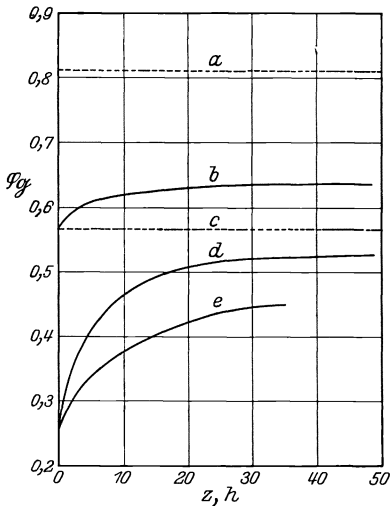


Abb. 46. Einfluß von Trockengeschwindigkeit und Endfeuchtigkeitsgehalt auf die Quellfähigkeit von Fischen (Cloake). Wassertemperatur 14°; *a* natürlicher Wassergehalt von Kabeljau, *b* gesalzener Kabeljau, gewässert; *c* handelsüblicher gesalzener Kabeljau; *d* gesalzener Kabeljau, in 3 Tagen auf $x=0,333$ getrocknet, gewässert; *e* gesalzener Kabeljau, in 24 Tagen auf $x=0,333$ getrocknet, gewässert.

Erfährt die getrocknete Ware vor dem Gebrauch eine Wiederbefeuchtung, unter Anstreben des natürlichen Feuchtigkeitsgehaltes, so ist die Quellfähigkeit, d. h. das Vermögen, die Feuchtigkeit nach der Trocknung zu binden, maßgebend. Die in Abb. 46 wiedergegebenen Versuche von Cloake² mit gesalzener Kabeljau haben ergeben, daß, neben der Höhe des Endfeuchtigkeitsgehaltes, die Trockengeschwindigkeit Einfluß auf die Quellfähigkeit besitzt. Rasche Trocknung begünstigt die Wiederaufnahmefähigkeit. Es handelt sich hierbei offensichtlich um ähnliche Vorgänge, wie sie bei dem Gefrieren von tierischen und pflanzlichen Erzeugnissen vorliegen, daß nämlich die Umkehrbarkeit des Verfahrens um so leichter gelingt, je schneller der Vorgang geführt wird. Spielt daher die Quellfähigkeit des getrockneten Gutes eine Rolle, so bietet Steigerung der Trockengeschwindigkeit, wie sie nur bei künstlicher Trocknung möglich ist,

ein Mittel, um die wertvollen Eigenschaften des Gutes in höherem Maße zu erhalten, als bei der natürlichen Trocknung erreichbar ist. Der Verlust an Quellfähigkeit wird auch als „Altern“ bezeichnet. Die letzten Ursachen für diese Erscheinung sind noch nicht geklärt.

c) durch die Eigenart des Trockenmittels. Der in der Luft enthaltene Staub wirkt zuweilen schädigend, z. B. bei der Trocknung von Filmen und lackierten Flächen. Es ist alsdann nötig, die Luft auf nassem oder trockenem Wege zu filtern und, soweit dies ohne Belästigung der Umgebung möglich ist, den Trockenraum unter leichtem Überdruck zu halten, damit nicht ungereinigte Luft von außen eindringt.

¹ Hoffmann: Versuchsbericht über die Hauptprüfung der Getreidetrockner im Jahre 1913.

² Cloake: Report of Food Investigation Board 1923.

2. Chemische Veränderungen.

a) durch den Einfluß der absoluten Höhe der Guttemperatur. Zu hohe Temperatur kann zu Zersetzungserscheinungen führen. Diese setzen bei tiefen Temperaturen langsam ein und nehmen mit höheren Temperaturen beschleunigt zu, derart, daß der Zersetzungsgrad sich bei gleicher Einwirkungsdauer für etwa je 10° Temperaturerhöhung verdoppelt. Zersetzung bewirkt z. B. bei der Trocknung von Früchten die Bildung von Karamellen und dadurch eine häufig unerwünschte Veränderung von Geschmack und Aussehen. Auch die zunehmende Sprödigkeit von Wolle und der Faser künstlich getrockneten Flachses bei zu hohen Temperaturen ist auf chemische Zersetzung des Säuregehaltes zurückzuführen. Hand in Hand hiermit geht eine Abstumpfung des Flachsglanzes, durch die das Erzeugnis sich mehr und mehr von dem natürlich getrockneten unterscheidet.

Zu hohe Temperaturen führen bei der Trocknung von Leder zu einer Dunkelfärbung des Gerbstoffes. Bei Geweben neigen zarte Farben zur Veränderung, gebleichte Stoffe zum Vergilben, wenn die Gewebetemperatur zu hoch liegt. Einwandfreie Weiße von Stärke wird nur durch Anwendung niedriger Temperatur gesichert, die gleichzeitig die Gefahr der Verkleisterung umgeht. Bei Lebensmitteln, z. B. Obst und Gemüse, führt Steigerung der Temperatur schließlich dazu, daß infolge teilweiser Verbrennung schlechte Geschmacksstoffe an Stelle aromatischer entstehen. In Ausnahmefällen, z. B. bei der Trocknung von Malz, sind hohe Temperaturen, hier über 75° , erwünscht, um aromatische Stoffe zu erzeugen.

Stoffe tierischer und pflanzlicher Herkunft werden bei zu hohen Temperaturen durch Gerinnen und Ausflocken wertvoller Eiweißkörper gefährdet. Wird z. B. Milch auf Walzentrocknern über die Gerinnungstemperatur erhitzt, so ist sie in Wasser nicht mehr restlos aufschwemmbar, das Kasein gerinnt, und der natürliche Geschmack wird verändert. Das Gerinnen des Eiweißes vollzieht sich je nach der Zusammensetzung bei 45 bis 65° . Überschreitung der gefährlichen Temperatur zu irgendwelchem Zeitpunkt des Trockenvorganges bedeutet daher Verzicht auf nachträgliche Wasserlöslichkeit der Eiweißstoffe. Geronnenes Kasein ist für die Kunststoffherstellung weniger geeignet, weil seine Aufnahmefähigkeit für Füllstoffe verringert ist.

Die Qualitätsverschlechterung von Leim und Gelatine ist in der Hauptsache durch ungünstige Veränderung des Glutins veranlaßt. Bei längerem Erhitzen der wässrigen Lösung auf höhere Temperatur tritt Zersetzung ein, wodurch die wertvollsten Eigenschaften, Kleben, Gelatinieren in wässriger Lösung, Erstarren zu elastischen Filmen, stark gemindert werden.

b) durch den Einfluß der Trockengeschwindigkeit. Ungünstiger Einfluß zu hohen Temperaturen wird bei gleichzeitiger Erhöhung der Trockengeschwindigkeit im allgemeinen teilweise aufgehoben. So liegt bei einer bestimmten Eiweißzusammensetzung die gefährliche Temperatur höher, wenn der Feuchtigkeitsgehalt der umgebenden Luft sinkt, d. h. die Trockengeschwindigkeit zunimmt. Bei empfindlichem Gut,

wie Milch, Eiern, Blut u. dgl., wird daher höchste Trockengeschwindigkeit durch feine Zerstäubung angestrebt, um die natürlichen Eigenschaften, wie Löslichkeit, Geschmack, Farbe, zu erhalten.

Bei bestimmten Stoffen ist Kürze der Trockendauer von Bedeutung, weil damit die Anhäufung des Gutes und eine hiermit verbundene Gefahr sich vermindert. Dies gilt z. B. für die Trocknung von Knallquecksilber und anderen Sprengstoffen, für deren Behandlung sich das schnell arbeitende Abdampfverfahren unter Luftleere besonders eignet.

Wird die Trockengeschwindigkeit bei Früchten zu niedrig gewählt, so ergibt sich schließlich der Fehler, daß die Früchte in ihrem eignen Saft kochen.

Die Bildung von aromatischen Stoffen bei dem Abdarren von Malz ist dadurch bedingt, daß vor Beginn des Darrens der Feuchtigkeitsgehalt des Gutes noch etwa 0,16 bis 0,18 beträgt. Liegt er niedriger, z. B. bei 0,06 bis 0,08, so entstehen die hellen Malze. Zu große Trockengeschwindigkeit führt bei der Verarbeitung von Malz zur Lösung von Eiweiß- und Gummistoffen und zur unerwünschten Bildung von Glasmalz.

c) durch die Eigenart des Trockenmittels. Die Anwendung von Luft als Trockenmittel kann schädlich sein, wenn das Gut durch Oxydation, Säuern oder Zersetzung gefährdet wird. In solchen Fällen kommt Eindampfen, unter Ausschluß von Luft, in Betracht, wenn es nicht, wie z. B. bei der Zerstäubungstrocknung, gelingt, durch Abkürzung der Trockendauer die Gefahr zu mildern. Die oxydierende Wirkung ist z. B. unerwünscht bei der Trocknung von Gummifellen. Hier ist geschlossener Kreislauf des Trockenmittels am Platze.

Es liegt nahe, in solchen Fällen als Trockenmittel die sauerstofffreien oder sauerstoffarmen Verbrennungsgase zu verwenden. Da die Verbrennungstemperatur höher liegt als im allgemeinen dem Gute zuträglich ist, müssen kalte Gase beigemischt werden. Unter dem hier betrachteten Gesichtspunkte kommen als solche die sauerstoffarmen Abgase am Ende der Trockenvorrichtung in Frage. Das bedeutet Anwendung des Mischluftverfahrens.

Bei der Trocknung von Ziegelsteinen und ähnlichen Erzeugnissen durch Feuergase bildet sich bei hohem Feuchtigkeitsgehalt des Gutes durch Einwirkung der schwefligen Säure der Gase auf den Kalkgehalt an der Oberfläche ein weißer Gipsanflug. Um ihn zu vermeiden, darf die Feuergastrocknung keinesfalls zu Anfang einsetzen.

Umgekehrt ist die besondere Einwirkung von Feuergasen beabsichtigt, um bei dem Darren von Malz Sonderbiere, wie Lichtenhainer und Grätzer Bier, mit ausgesprochenem Rauchgeschmack zu erhalten.

Der Sauerstoff der Luft ist als Trockenmittel unentbehrlich, wenn wie bei der Lacktrocknung, die Oxydation erst zur Erhärtung des Anstriches führt.

Erfolgt die Wärmeübertragung an das Gut unmittelbar durch beheizte Metallflächen, so ist die Gefahr chemischer Einwirkung durch geeignete Wahl des Baustoffes, z. B. Verwendung von Bronze, Kupfer, nichtrostendem Stahl, zu begegnen.

3. Biologische Veränderungen.

a) durch den Einfluß der absoluten Höhe der Gutstemperatur. Fermente und Vitamine werden durch Steigerung der Temperatur über eine gewisse Grenze geschädigt und schließlich vernichtet. Dies gilt insbesondere für Vitamin A, das in Butter, Rahm, Eigelb, grünen Gemüsen, gelben Rüben, Tomaten, dem Fleisch von Fischen, den Fetten von Pferden, Rindern und Hammeln und dem Lebertran enthalten und für Verhütung der Hornhauttrübung maßgebend ist. Weniger temperaturempfindlich ist Vitamin B, das in Hefen, Rüben, Kartoffeln, grünen Gemüsen, Tomaten, Eiern, Hülsenfrüchten, Eingeweideteilen, ferner im Keim und der Außenschicht des Getreidekorns vorkommt, zum Wachstum nötig ist und dessen Mangel bei Reismahrung zu der Beri-Beri-Krankheit führt. Trockenmilch fast jeder Art enthält z. B. Vitamin B in kaum veränderter Menge. Vitamin C, das in reichem Maße in grünen Gemüsen, Rüben, Obst, Milch, Kartoffeln, Bohnen, Tomaten, Zitronen- und Apfelsaft enthalten ist und dessen Mangel zur Erkrankung an Skorbut führt, ist, ähnlich wie Vitamin A, empfindlich gegen hohe Temperaturen. Trockenmilch ist, wenn die Vitamine zerstört sind, zur Herstellung eines der Frischmilch gleichwertigen Getränkes nicht mehr verwendbar. Ihre Benutzung beschränkt sich auf Bäckereien und andere Nahrungsmittelgewerbe. Das neuerdings getrennte Vitamin D ist für die Bildung des Kalkansatzes in den Knochen verantwortlich, seine Erhaltung in Lebertran, Eigelb und grünen Pflanzen daher zu Vermeidung von Rachitis nötig.

Der Magen- und Darminhalt der Schlachttiere kann wegen des Reichtums an Verdauungsfermenten in getrocknetem Zustande den Futtermitteln für Kleinvieh beigegeben werden. Für Erhaltung der Fermente ist Bedingung, daß bei der Trocknung eine Höchsttemperatur von etwa 65° nicht überschritten wird.

Hohe Temperatur durch Anwendung des Gleichstromverfahrens zu Anfang der Getreidetrocknung empfiehlt Hoffmann¹, um die auf der Getreideoberfläche befindlichen Kleinlebewesen schnell abzutöten.

In gleichem Sinne wird bei Trockenmilch der Bakteriengehalt geringer, wenn die Trocknung bei höheren Temperaturen erfolgt. Hier ergibt sich, wie in vielen Fällen, ein Widerstreit zwischen Vorzug und Nachteil, der im allgemeinen das Verfahren als besser erscheinen läßt, bei dem hohe Temperaturen vermieden werden. Der Entwicklung zurückbleibender Bakterien ist dann durch besondere Maßnahmen — Lagerung in trockener kalter Luft u. dgl. — entgegenzutreten. Nach den Beobachtungen von Knoch² nimmt z. B. die Bakterienzahl von Trockenmilch, deren Wassergehalt $x_5 \approx 0,05$ beträgt,

nach	6 bzw. 12 Monaten
auf	655 „ 261 Bakterien auf 1 g Trockenmilch ab,
gegenüber	22500 Bakterien in dem entsprechenden Frischmilchgewicht.

¹ Hoffmann: Versuchsbericht über die Hauptprüfung der Getreidetrockner im Jahre 1913.

² Knoch: Das Trocknen kolloidaler Flüssigkeiten insbesondere der Milch. Berlin 1927.

Der Bakteriengehalt am Ende der Trocknung ist daher ohne ausschlaggebende Bedeutung, wenn, infolge geringen Endfeuchtigkeitsgehaltes des Gutes, die Voraussetzung für Entwicklung der Bakterien fehlt.

Hubert¹ hat im Landwirtschaftlichen Institut der Vereinigten Staaten den Einfluß der Trocknung auf Holzpilze untersucht. Besitzt das Holz einen Querschnitt von $0,1 \times 0,1$ m oder weniger, so werden durch Anwendung einer Temperatur von etwa 50° bei der Trocknung die Pilze sicher getötet. Bei größerer Stärke bis zu $0,2 \times 0,2$ m ergibt sich der gleiche Erfolg, wenn eine Temperatur von etwa 55° neun Stunden lang wirkt. Die Entwicklung von Pilzen auf dem Holz ist an die Bedingung geknüpft, daß seine Feuchtigkeit höher ist, als dem hygroscopischen Punkte entspricht, der bei $\chi_e \approx 0,25$ angenommen werden darf.

Bei der Malztrocknung bewirkt Steigerung der Temperatur über 45° nach Entweichen der Hauptmenge des Feuchtigkeitsgehaltes eine Unterbrechung der Lebensvorgänge im Korn.

b) durch den Einfluß der Trockengeschwindigkeit. Überschnelles Trocknen führt bei Kiefernholz zum inneren Verblauen. Die Ursache bildet nach Gillroth² ein blauer Pilz, der sich alsdann unter der trockenen Oberfläche in der am Entweichen verhinderten Feuchtigkeit günstig entwickelt.

Die Temperaturbeständigkeit der Vitamine hängt in hohem Maße mit der Trockengeschwindigkeit zusammen. Während Vitamin A bei Anwesenheit von Luftsauerstoff durch längere Erwärmung auf etwa 40° bereits zerstört wird, bleibt es in Milch bei der Zerstäubungstrocknung und auch bei sachgemäßer Anwendung dampfbeheizter Walzen fast unverändert erhalten, obwohl im letzten Falle eine Augenblickstemperatur von über 100° auftreten kann. Kurz dauernde Überhitzung auf hohe Temperatur wirkt hierbei, ebenso wie bei Vitamin C, weniger schädlich als lang andauernde niedrigere Temperatur. Ähnlich verhalten sich Fermente, Enzyme und Glykoside.

Manche Arten von Gut, z. B. Früchte, stellen einen günstigen Nährboden für Kleinlebewesen dar. Mit dem Vorhandensein von Schimmelpilzen ist hier stets zu rechnen. Die Bedingungen für ihre Entwicklung sind bei hoher Trockengeschwindigkeit, d. h. rascher Entfeuchtung der Oberfläche, schlechter als bei langsamer Trocknung. Aus diesem Grunde soll die Trocknung sich unmittelbar an die Vorbereitung der Früchte anschließen.

Eine günstige Nebenwirkung hoher Trockengeschwindigkeit ergibt sich bei der Trocknung von Getreide unter Luftleere dadurch, daß Insekteneier und andere Lebewesen infolge des schnellen Entweichens ihrer Feuchtigkeit platzen.

Hohe Trockengeschwindigkeit vermindert auch die Schädigung durch Fäulnisbakterien. Bei Gallerten, die deren Entwicklung be-

¹ Hubert: Effect of kiln drying, steaming and air seasoning on certain fungi in wood. U. S. Dept. Agr. Bull. 1924, 1262.

² Gillroth: Z. V. d. I. 1925.

sonders begünstigen, muß die Trocknung sich so schnell vollziehen, daß Einsetzen der Fäulnis verhütet wird.

Um die in tierischen Drüsen vorhandenen wertvollen therapeutischen Eigenschaften zu erhalten, werden die Organe fein zerteilt mit hoher Geschwindigkeit unter Luftleere, z. B. unter Anwendung einer Tauchtrommel, getrocknet.

c) durch die Eigenart des Trockenmittels. Steht Infektion des Gutes durch in der Luft enthaltene Kleinlebewesen oder Schädigung durch mechanische Verunreinigungen zu befürchten, so ist eine chemische oder mechanische Filterung der Luft erforderlich. In Ausnahmefällen kann die Abtötung der Kleinlebewesen durch die Höhe der Vorwärmtemperatur der Luft ohnedies gesichert sein.

Die erhöhte Gefahr der Zerstörung von Vitamin A und C bei gleichzeitiger Anwesenheit von Sauerstoff bedeutet einen Vorzug der Trockenverfahren, bei denen, wie bei dem Abdampfverfahren, die äußere Luft ausgeschlossen ist.

C. Feuchtigkeitsgehalt des Trockengutes.

Der natürliche Feuchtigkeitsgehalt des Gutes kommt für den Trockenvorgang nur selten in Betracht, weil fast alle Waren einer Vorbehandlung unterliegen, durch die der Feuchtigkeitsgehalt sich ändert. Die wirtschaftliche Verbesserung, die sich mit einer, wenn auch nur geringen, Verminderung des anfänglichen Feuchtigkeitsgehaltes erzielen läßt, wird häufig unterschätzt, wenn dem Vergleich nicht \varkappa , der auf 1 kg Trockenstoff bezogene Feuchtigkeitsgehalt, sondern, wie zu Unrecht noch vielfach üblich, $\varphi_{\text{G}} = \frac{\varkappa}{1 + \varkappa}$, der auf 1 kg Trockengut bezogene Feuchtigkeitsgrad, zugrunde gelegt wird. Abb. 47 enthält für verschiedene Endfeuchtigkeitsgrade φ_{G_b} Kurven, deren Abszissenwerte die Feuchtigkeitsmenge darstellen, die für 1 kg getrocknetes Gut zu entziehen ist, wenn der anfängliche Feuchtigkeitsgrad des Gutes φ_{G_r} den durch die Ordinaten gemessenen Wert besitzt. Da die Beziehung zwischen \varkappa und φ_{G} auch geschrieben werden kann

$$\varkappa = \frac{\varphi_{\text{G}}}{1 - \varphi_{\text{G}}},$$

ergibt sich für die Abszissen der Wert

$$\frac{\varkappa_r - \varkappa_b}{1 + \varkappa_b} = \frac{\varphi_{\text{G}_r} - \varphi_{\text{G}_b}}{1 - \varphi_{\text{G}_r}}.$$

Aus Abb. 47 läßt sich z. B. ablesen, daß bei einem anfänglichen Feuchtigkeitsgrad $\varphi_{\text{G}_r} = 0,8$, entsprechend einem Wert $\varkappa_r = \frac{0,8}{1 - 0,8} = 4$ und vollkommener Entfeuchtung bis $\varphi_{\text{G}_b} = 0$ für 1 kg des gewonnenen Trockengutes 4 kg Feuchtigkeit zu entziehen sind. Wird der anfängliche Feuchtigkeitsgrad durch mechanische Mittel auf $\varphi_{\text{G}_r} = 0,75$, entsprechend $\varkappa_r = \frac{0,75}{1 - 0,75} = 3$, herabgesetzt, so beträgt die zu entziehende Feuchtigkeitsmenge nur noch 3 kg, bezogen auf 1 kg Enderzeugnis.

Die 5% Ermäßigung des anfänglichen Feuchtigkeitsgrades führen hier zu einer Ersparnis von 25% der Trockenleistung. Ist der anfängliche Feuchtigkeitsgrad in einem anderen Falle $\varphi_{\text{Gr}} = 0,9$, entsprechend

$$\xi_r = \frac{0,9}{1 - 0,9} = 9,$$

und soll die Entfeuchtung bis auf einen Feuchtigkeitsgrad $\varphi_{\text{Gh}} = 0,1$, entsprechend

$$\xi_h = \frac{0,1}{1 - 0,1} = 0,11,$$

erfolgen, so sind für 1 kg getrocknetes Gut 8 kg Feuchtigkeit zu entziehen. Wird auch hier der anfängliche Feuchtigkeitsgrad durch mechanische Mittel auf $\varphi_{\text{Gr}} = 0,85$, entsprechend

$$\xi_r = \frac{0,85}{1 - 0,85} = 5,67,$$

verringert, so sind für 1 kg Enderzeugnis nurmehr 5 kg Feuchtigkeit zu entziehen, um einen Endfeuchtigkeitsgrad $\varphi_{\text{Gh}} = 0,1$ zu erhalten. Der Verringerung des anfänglichen Feuchtigkeitsgrades um 5% entspricht hier eine Ersparnis an Trockenleistung um 38%. Hieraus erhellt schon, daß die Werte φ_{G} kein richtiges Bild über die Veränderung der Feuchtigkeitsmenge geben, auf die es schließlich ankommt, und daß daher der hier durchgeführten Kennzeichnung durch die Werte des Feuchtigkeitsgehaltes ξ

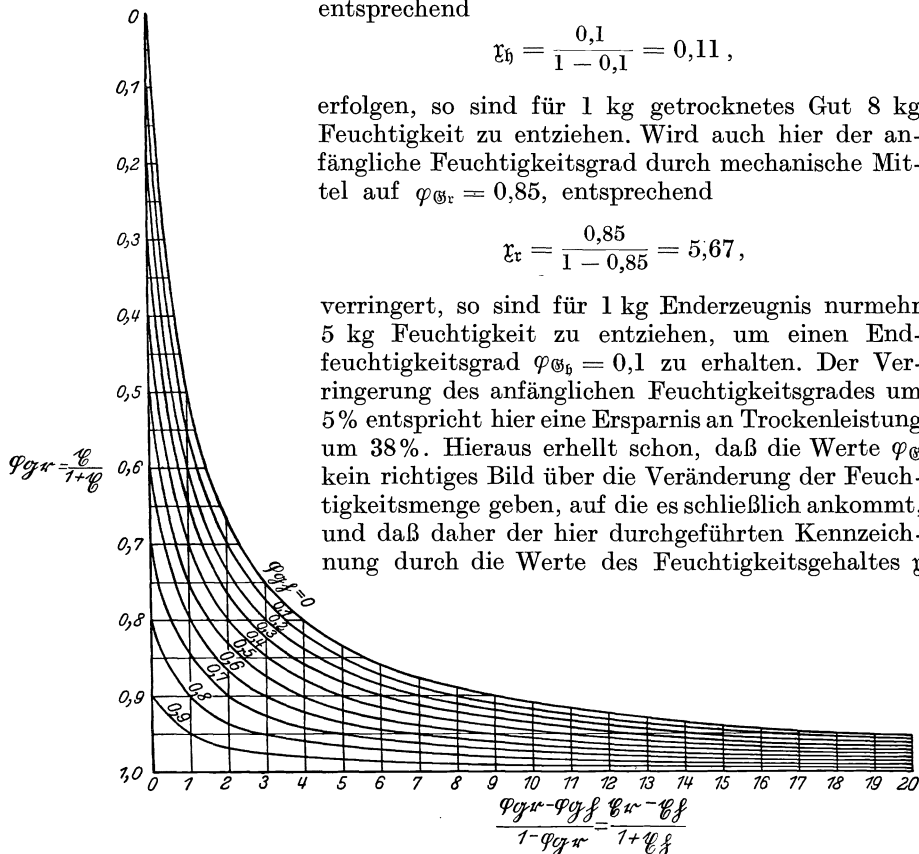


Abb. 47. Beziehung zwischen dem Anfangsfeuchtigkeitsgrad φ_{Gr} des Gutes und der auf 1 kg getrocknetes Gut entfallenden Trockenleistung bei verschiedenem Endfeuchtigkeitsgrad φ_{Gh} des Gutes.

der Vorzug zu geben ist. Die nebenstehende Zusammenstellung bestätigt dies.

Abb. 48 gestattet, zu gegebenen φ_{G} -Werten die entsprechenden ξ -Werte abzulesen.

Für die Wahl des schließlichen Feuchtigkeitsgehaltes ξ_h sind in der Hauptsache folgende Gesichtspunkte maßgebend:

1. Es soll die durch die natürliche Feuchtigkeit vorliegende Gefahr einer Schädigung durch Kleinlebewesen, Hefen, Schimmelpilze u. dgl., sowie die Möglichkeit der Zersetzung unterbunden werden. Dieser Zweck wird bei pflanzlichen und tierischen Erzeugnissen im allgemeinen erfüllt, wenn der endgültige Feuchtigkeitsgehalt den dem hygroskopischen Punkt entsprechenden Wert ξ_e unterschreitet.

2. Wird das getrocknete Gut in Pulverform gewonnen, so muß die Entfeuchtung so weit getrieben werden, daß ein nachträgliches Zusammenbacken der Teilchen unmöglich ist. Die Grenze hierfür bildet ein Feuchtigkeitsgehalt, der bei etwa $\frac{\xi_e}{4}$ liegt.

Bezugsgröße:	Trockenstoffgehalt \mathcal{G}_x	Gewicht des Naßgutes $\mathcal{G}_r = \mathcal{G}_x(1 + \xi_r)$	Gewicht des getrockneten Gutes $\mathcal{G}_h = \mathcal{G}_x(1 + \xi_h)$
Trockenstoff	\mathcal{G}_x	$\mathcal{G}_r(1 - \varphi_{\mathcal{G}_r})$	$\mathcal{G}_h(1 - \varphi_{\mathcal{G}_h})$
Naßgut	$\mathcal{G}_x(1 + \xi_r)$	\mathcal{G}_r	$\mathcal{G}_h \cdot \frac{1 - \varphi_{\mathcal{G}_h}}{1 - \varphi_{\mathcal{G}_r}}$
Getrocknetes Gut	$\mathcal{G}_x(1 + \xi_h)$	$\mathcal{G}_r \cdot \frac{1 - \varphi_{\mathcal{G}_r}}{1 - \varphi_{\mathcal{G}_h}}$	\mathcal{G}_h
Entzogene Feuchtigkeit	$\mathcal{G}_x(\xi_r - \xi_h)$	$\mathcal{G}_r \cdot \frac{\varphi_{\mathcal{G}_r} - \varphi_{\mathcal{G}_h}}{1 - \varphi_{\mathcal{G}_h}}$	$\mathcal{G}_h \cdot \frac{\varphi_{\mathcal{G}_r} - \varphi_{\mathcal{G}_h}}{1 - \varphi_{\mathcal{G}_r}}$
Feuchtigkeit in Naßgut	$\mathcal{G}_x \cdot \xi_r$	$\mathcal{G}_r \cdot \varphi_{\mathcal{G}_r}$	$\mathcal{G}_h \cdot \varphi_{\mathcal{G}_r} \cdot \frac{1 - \varphi_{\mathcal{G}_h}}{1 - \varphi_{\mathcal{G}_r}}$
Feuchtigkeit in getrocknetem Gut	$\mathcal{G}_x \cdot \xi_h$	$\mathcal{G}_r \cdot \varphi_{\mathcal{G}_h} \cdot \frac{1 - \varphi_{\mathcal{G}_r}}{1 - \varphi_{\mathcal{G}_h}}$	$\mathcal{G}_h \cdot \varphi_{\mathcal{G}_h}$

3. Jeder Ware entspricht ein bestimmter Feuchtigkeitsgehalt, den sie im Zustande der Lufttrockenheit bei freier und unbegrenzter Lagerung annimmt. Abgesehen davon, daß jede Weiterführung der künstlichen Entfeuchtung zusätzliche Wärme fordert, ist es im allgemeinen unzweckmäßig, den Endfeuchtigkeitsgehalt niedriger zu treiben, als dem Zustande der Lufttrockenheit für das betreffende Gut entspricht.

4. Bei vielen Arten von Gut, vor allem Nahrungsmitteln, stellt die Trocknung nur einen Zwischenvorgang dar, insofern, als vor dem Verbrauch das entzogene Wasser wieder zugeführt wird. Den Maßstab für die Wiederaufnahme der Feuchtigkeit bildet die Quellfähigkeit. Sie wird dadurch beeinflußt, daß mit dem Kapillarwasser die im Saft gelösten Salze an die Oberfläche treten und diese schließlich verkrusten. Die Quellfähigkeit nimmt im allgemeinen ab, je weiter die Entfeuchtung erfolgt. Sehr weit gehende Trocknung bildet daher, neben geringer Trockengeschwindigkeit, eine Ursache für das „Altern“. Sie ist dafür verantwortlich, daß die Anzeige des Haarhygrometers allmählich zu niedrig wird. Cloake¹ hat nach Abb. 46 beobachtet, daß bei gesalzener Kabeljau der Wassergehalt, der im natürlichen Zustande $\xi_r = 4$ betrug

¹ Cloake: Report of Food Investigation Board 1923.

und durch Trocknung auf $\chi_h = 1,3$ erniedrigt wurde, bei der Wiederbefeuchtung auf nicht mehr als $\chi = 1,72$ stieg. In noch weiterem Maße zeigte sich die Quellfähigkeit vermindert, wenn die Trocknung bis zu einem Feuchtigkeitsgehalt von $\chi_h = 0,18$, also bis etwa auf den Grenz-

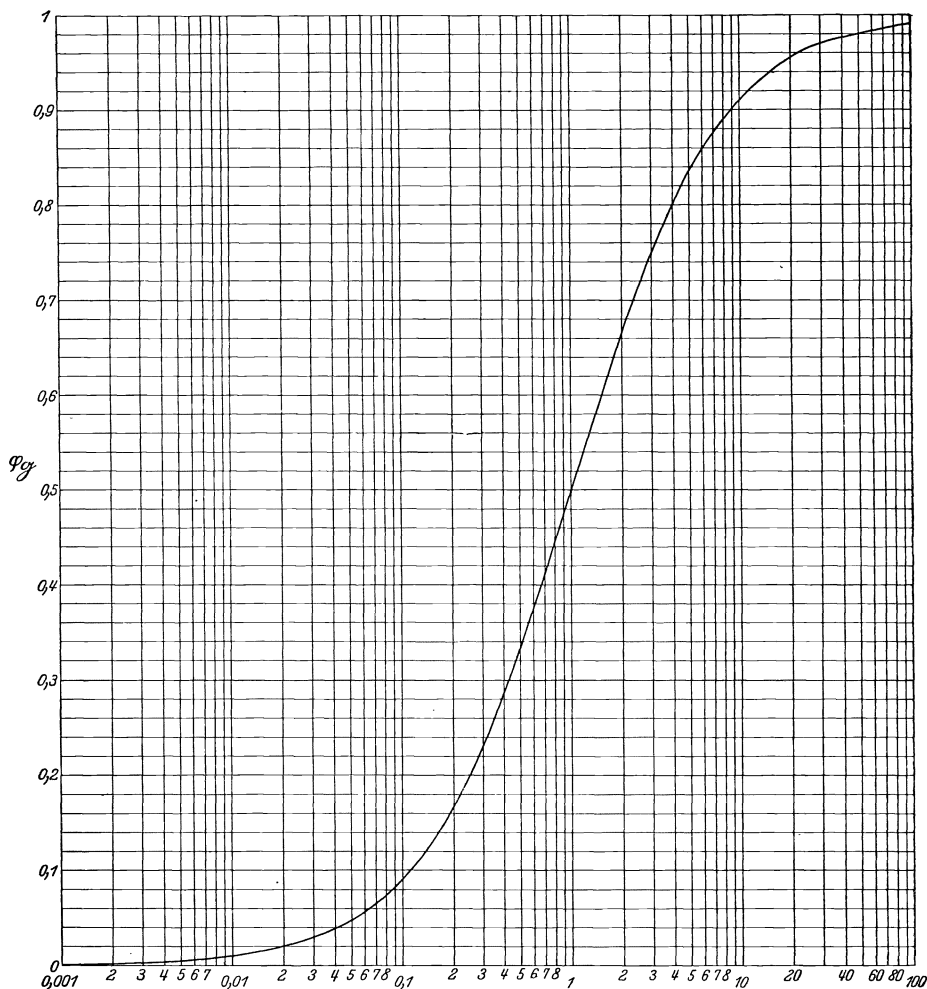


Abb. 48. Beziehung zwischen Feuchtigkeitsgehalt χ und Feuchtigkeitsgrad ϕ_G des Gutes.

wert erniedrigt wurde, bei dem die Entwicklung von Kleinlebewesen wirksam gehemmt ist. Auch die Versuche von Schwalbe und Teschner¹ haben diese Grundsätze bestätigt. Holzzellstoff- und Kunstseideproben die während 72 Stunden „tot“-getrocknet wurden, ergaben nach einer

¹ Schwalbe u. Teschner: Zur Kenntnis der Adsorption und Quellung bei Zellulose- und Zellstoffasern. Der Papierfabrikant. Festschrift Hamburg 1925.

Anfeuchtungsdauer von 8 Stunden für Zellstoff, 12 Stunden für Kunstseide eine Wiederaufnahmefähigkeit von etwa rund $\frac{2}{3}$ des ursprünglichen Wassergehaltes bei Zellstoff, bzw. rund $\frac{3}{4}$ bei Kunstseide.

Die Einbuße an Quellfähigkeit zeigt sich auch darin, daß „tot“-getrocknetes Gut in feuchter Luft im Beharrungszustande einen niedrigeren Feuchtigkeitsgehalt besitzt als das gleiche Gut in anfänglich feuchtem Zustand. Die Untersuchungen von Lurié¹ im Trockenlaboratorium des Wärmetechnischen Instituts Moskau über das Trocknen von Farben ergaben nach Abb. 49 für einen mittleren Feuchtigkeitsgrad der Luft in den letzten Tagen der Beobachtung von etwa 0,55, einen Feuchtigkeitsgehalt von etwa 0,38 für Kalenderrot, grünen Lack und

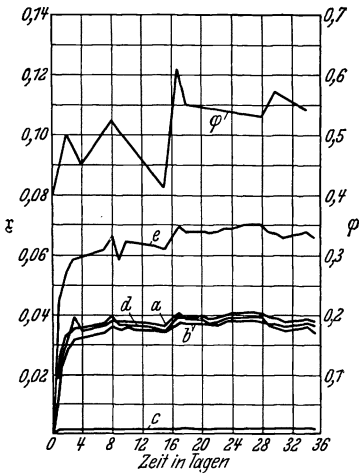


Abb. 49. Zunahme des Feuchtigkeitsgehaltes von getrockneten Farben in feuchter Luft (Lurié).
a Kalenderrot, b grüner Lack, c Chromgelb, d Miloriblauf, e Violettack.

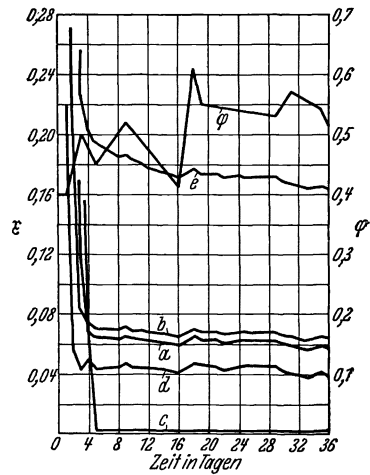


Abb. 50. Abnahme des Feuchtigkeitsgehaltes von nassen Farben in feuchter Luft (Lurié).
a Kalenderrot, b grüner Lack, c Chromgelb, d Miloriblauf, e Violettack.

Miloriblauf, 0,68 für Violettack, entsprechend einer scheinbaren Lage des hygroscopischen Punktes bei $\varepsilon_c = \frac{0,038}{0,55} \approx 0,07$ bzw. $\frac{0,068}{0,55} \approx 0,12$, wenn das anfänglich vollkommen trockene Gut während etwa eines Monats in feuchter Luft gelagert wurde. Wurde dagegen das anfangs feuchte Gut während etwa gleicher Zeitdauer der feuchten Luft ausgesetzt, so folgte nach Abb. 50 in Luft, die schließlich einen Feuchtigkeitsgrad von gleichfalls etwa 0,55 besaß, der Feuchtigkeitsgehalt für Kalenderrot zu etwa 0,06, für grünen Lack zu etwa 0,065, für Miloriblauf zu etwa 0,045 und für Violettack zu etwa 0,17, entsprechend einer Lage des hygroscopischen Punktes bei $\varepsilon_c \approx 0,11$ bzw. 0,12 bzw. 0,07 bzw. 0,31. Die Störung der Umkehrbarkeit durch Veränderung des Gefüges ist hiernach verschieden, bei grünem Lack und Violettack besonders groß, bei Miloriblauf verschwindend gering. Das in den Ver-

¹ Lurié: Trockenanlage für Buch- und Steindruckfarben. Arch. Wärme-wirtsch. 1929.

suchen aufgenommene Chromgelb fällt ganz aus der Reihe insofern, als die Feuchtigkeitsaufnahme in beiden Fällen ungewöhnlich niedrig ist. Bei dem untersuchten Chromgelb ist ein Feuchtigkeitsgehalt in Form von gebundener Flüssigkeit offensichtlich nicht oder doch nur in verhältnismäßig geringem Maße vorhanden. Die Rücksicht auf die nachträgliche Quellfähigkeit bildet daher einen weiteren Grund für die untere Begrenzung des Endfeuchtigkeitsgehaltes.

Nach den Untersuchungen der Staatlichen Materialprüfungsanstalt Stockholm verändert sich die Festigkeit schwedischen Föhrenholzes mit

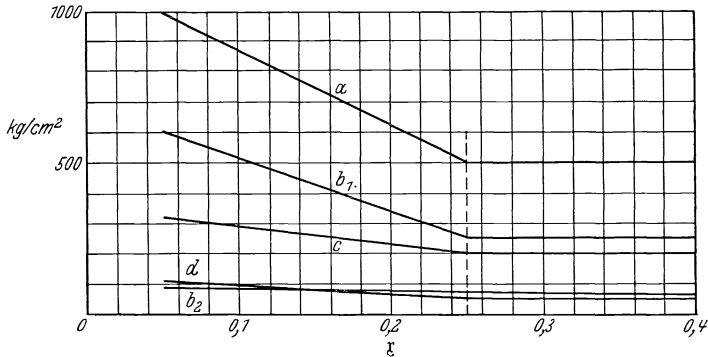


Abb. 51. Veränderung der Festigkeit schwedischen Föhrenholzes mit dem Feuchtigkeitsgehalt. a Biegefestigkeit, b_1 Druckfestigkeit parallel zur Faser, b_2 Druckfestigkeit senkrecht zur Faser, c Härte, d Scherfestigkeit.

einem Raumgewicht von etwa 450 kg/m^3 gemäß Abb. 51. Die Kurven stellen die Biege-, die Druckfestigkeit parallel und senkrecht zu Faser, die Härte und die Scherfestigkeit abhängig von dem Feuchtigkeitsgehalt ξ dar. Es scheint, daß mit dem Eindringen in das hygroscopische Gebiet die Festigkeit besonders stark zunimmt. Hierin liegt ein Anhalt für die obere Grenze des Endfeuchtigkeitsgehaltes von Bauhölzern, deren Festigkeitswerte Bedeutung besitzen.

Daneben treten mannigfache Rücksichten für die Festlegung des Endfeuchtigkeitsgehaltes auf, die bei den einzelnen Arten von Trockengut zu erörtern bleiben.

VII. Die Berechnung des Trockenvorganges mit Luft als Trockenmittel.

A. Das $i-x$ -Bild als Grundlage für die Berechnung des Trockenvorganges.

Das $i-x$ -Bild bildet die Grundlage, um ganz allgemein den Einfluß zu untersuchen, den Temperatur und Feuchtigkeit der Luft auf den Verlauf des Trockenvorganges besitzen. Zu diesem Zwecke ist zunächst Klarheit über die Vergleichsgrundlage zu schaffen. Der Anfangszustand

der Trockenluft vor der Anwärmung liegt durch die Witterung fest. Durch den Grad der Anwärmung der Luft vor ihrem Auftreffen auf das Trockengut können die Verhältnisse in weiten Grenzen beeinflusst werden. Äußere Wärmezufuhr bedeutet Bewegung des Luftzustandspunktes im i - x -Bild in Richtung der senkrechten x -Linien. Vermehrte Wärmeeinleitung erhöht die Lufttemperatur t und erniedrigt den Luftfeuchtigkeitsgrad φ . Der Luftfeuchtigkeitsgehalt x bleibt unverändert und nur von dem Anfangszustande der Luft abhängig. Ihr Endzustand beim Verlassen der Trockenvorrichtung hängt, wenn der Zustand beim Eintritt in die Trockenvorrichtung festgehalten wird, von dem Maße ihrer Ausnutzung ab. Die Ausnutzungsmöglichkeit ist mit Erreichen der Sättigungslinie erschöpft. Temperatur, Feuchtigkeitsgrad und Feuchtigkeitsgehalt der Luft hängen insofern zwangsläufig voneinander ab, als zwei Größen die dritte bestimmen. Weitestgehende Ausnutzung der Trockenluft scheint dann vorzuliegen, wenn die Temperatur der Abluft so niedrig wie möglich, ihr Feuchtigkeitsgrad und ihr Feuchtigkeitsgehalt so hoch wie möglich werden. Das sind Bedingungen, die einander widersprechen. Im allgemeinen wird daher der Vergleich so geführt, daß ein bestimmter Feuchtigkeitsgrad φ der Abluft angenommen und der Einfluß untersucht wird, den die eintretende Luft je nach ihrem möglichen Zustande ausübt. Dieses Verfahren ist zu beanstanden. Durch Vergleich der Tafeln I und III ergibt sich, daß es bei ein und derselben Vorrichtung um so leichter ist, einen bestimmten Endfeuchtigkeitsgrad φ zu erreichen, je höher der spezifische Wärmehalt i der Trockenluft liegt. Denn das Trockenpotential \varkappa nimmt bei Verfolgung einer bestimmten φ -Linie mit höheren i -Werten zu. Es ist daher richtiger, dem Vergleich, anstatt des Feuchtigkeitsgrades φ , ein bestimmtes Trockenpotential \varkappa der Abluft zugrunde zu legen. Denn Punkte, die auf einer Linie gleichen Trockenpotentials liegen, bezeichnen Luftzustände, bei denen im bestimmten Falle die stündliche Trockenleistung gleich ist, ohne Rücksicht darauf, in welcher Temperaturhöhe die \varkappa -Linie verläuft. Die allgemeine Aufgabe, die Abluft so weit wie möglich auszunutzen, läuft darauf hinaus, eine Trockenkraftlinie zu erreichen, bei der die Trockenwirkung so verlangsamt ist, daß ihre Unterschreitung unwirtschaftliche Verhältnisse ergäbe. Daher soll im folgenden bei veränderlichen Verhältnissen der Trockenluft im Anfangszustande der Vergleich für Zustände der Abluft geführt werden, die Punkten gleichen Trockenpotentials entsprechen. Die Abweichungen der \varkappa -Linien von den φ -Linien sind besonders bei tiefen Temperaturen und niedrigen Feuchtigkeitsgraden erheblich. Dagegen fallen beide nahezu zusammen, wenn mit hohen Feuchtigkeitsgraden und hohen Temperaturen gerechnet wird.

Unter dieser Voraussetzung lassen sich aus dem i - x -Bilde folgende Beziehungen ablesen:

1. Frischlufftemperatur t_r .

Je höher bei gegebenem Anfangsfeuchtigkeitsgehalt x_r und festliegendem Endtrockenpotential \varkappa_e die Anfangstemperatur der Luft t_r

liegt, um so geringer ist der spezifische Wärmeverbrauch. Der spezifische Luftbedarf entspricht dem Werte $\frac{1}{x_e - x_r}$, ist daher unabhängig von der Frischlufttemperatur t_r .

2. Feuchtigkeitsgehalt der Frischluft x_r .

Je höher bei gegebener Anfangstemperatur t_r und festliegendem Endtrockenpotential \varkappa_e der Anfangsfeuchtigkeitsgehalt x_r liegt, um so höher sind Wärmeverbrauch und Luftbedarf für eine bestimmte Trockenleistung.

Aus 1. und 2. ergibt sich die selbstverständliche Forderung, möglichst warme und trockene Frischluft zu verwenden. Im kalten Winter ist der Wärmeverbrauch stets größer als bei milder oder warmer Witterung. Dagegen können in der Übergangszeit und im Sommer Verhältnisse auftreten, die bei mäßiger Temperatur und niedrigem Feuchtigkeitsgrad zu geringerem Wärmeverbrauch führen als bei hoher Temperatur und hohem Feuchtigkeitsgrad.

3. Temperatur der Trockenluft nach der Vorwärmung t_a .

Wird Luft mit einem durch die Witterungsverhältnisse bestimmten Anfangsfeuchtigkeitsgehalt $x_a = x_r$ auf mehr oder weniger hohe Temperatur t_a vorgewärmt, so ändert sich die Endtemperatur t_e bei festliegendem Endtrockenpotential \varkappa_e in gleichem Sinne. Einem Höherentreiben der Vorwärmtemperatur t_a entspricht höheres Anfangstrockenpotential \varkappa_a , höhere Ablufttemperatur t_e und höherer Endfeuchtigkeitsgehalt x_e . Mit zunehmender Vorwärmung der Trockenluft sinkt deshalb die für eine bestimmte Trockenleistung erforderliche Trockenzeit im Verhältnis des vermehrten durchschnittlichen Trockenpotentials. Gleichzeitig nimmt der spezifische Luftbedarf $\frac{1}{x_e - x_a}$ ab, weil die Feuchtigkeitszunahme $x_e - x_r$ wächst. Der für eine bestimmte Trockenleistung erforderliche Wärmearaufwand ändert sich jedoch nicht in einheitlichem Sinne. Liegt der Anfangszustand der Frischluft auf der Sättigungslinie, so ergibt bei gleichem Endtrockenpotential \varkappa_e höhere Trockenlufttemperatur t_a eine Verminderung des spezifischen Wärmeverbrauches. Diese Beziehung gilt auch noch, wenn der Anfangszustand der Frischluft einem Punkte der gleichen Trockenpotentiallinie \varkappa_e zugeordnet ist, die dem Endzustand der Trockenluft entspricht. Liegt jedoch der Anfangszustand der Frischluft auf einer höheren Trockenpotentiallinie, so wird der Umkehrpunkt durch den Berührungspunkt einer Tangente gekennzeichnet, die von dem Punkt des Frischluftzustandes an die dem Endzustand der Trockenluft entsprechende Trockenpotentiallinie \varkappa_e gezogen ist. Höherrücken der Anfangstemperatur t_a der Trockenluft bedeutet für alle unterhalb dieses Berührungspunktes liegenden Endtemperaturen t_e der Trockenluft eine Zunahme, für alle oberhalb des Berührungspunktes liegenden Temperaturen t_e eine Abnahme des spezifischen Wärmeverbrauches. Da dessen Veränderung mit zunehmender Temperatur t_e im allgemeinen immer geringer wird, wirkt.

von dem Berührungspunkt ab gerechnet, Senkung der Temperatur t_e in stärkerem Maße günstig, als eine gleich große Steigerung ungünstig. Hiernach ergibt sich, daß theoretisch die Erhöhung der Trockenlufttemperatur nicht einheitlich eine Verbesserung in wärmewirtschaftlicher Hinsicht bedeutet. Es verdient ausdrücklich betont zu werden, daß die Fachwelt sich mit der Annahme vielfach in einem Irrtum befindet, daß durch möglichst hohe Vorwärmung der Luft auf alle Fälle erheblich an spezifischem Wärmeverbrauch gespart würde. Gegenüber der theoretischen Betrachtung ist allerdings darauf hinzuweisen, daß Erhöhung der Anwärmtemperatur t_a bei im übrigen bestimmten Verhältnissen stets eine Verminderung der benötigten Luftmenge ergibt. Außerdem bedeutet sie Vergrößerung des anfänglichen und durchschnittlichen Trockenpotentials, ergibt daher verkürzte Trockenzeit. Dies führt bei gegebener Trockenleistung zu einer kleineren Trockenanlage. Hieraus folgt, daß die theoretischen Vorteile, die unter gewissen Voraussetzungen bei niedriger Vorwärmtemperatur t_a zu erwarten sind, gegenüber dem erhöhten Aufwand für Luftbewegung und Anschaffung zurücktreten. Höhere Anwärmtemperatur t_a verbürgt in der Regel eine bessere *allgemeine* Wirtschaftlichkeit.

4. Endtemperatur der Trockenluft t_e .

Liegt der Zustand der angewärmten Trockenluft fest, so ist bei gegebener Endtrockenkraft \varkappa_e auch die Endtemperatur t_e bestimmt. Je geringer die Endtrockenkraft \varkappa_e , d. h. je besser die Ausnutzung der Trockenluft ist, um so niedriger wird ihre Endtemperatur t_e , um so geringer spezifischer Wärmeverbrauch und spezifischer Luftbedarf.

Der Einfluß der veränderlichen Verhältnisse geht aus Abb. 52 hervor.

Rückt der Zustandspunkt A_1 nach A_2 und damit E_1 nach E_2 , so bedeutet dies ein Höherrücken der Temperatur t_a . Der Neigungswinkel der Verbindungslinie R_1E_1 gegen die Waagerechte ist kleiner als der der Geraden R_1E_2 . (Nach dem früher Gesagten sind an Stelle der Punkte E eigentlich die senkrecht darunter auf der i_a -Linie liegenden Punkte E' mit den R -Punkten zu verbinden. Außerdem ist der Vergleich insofern ungenau, als er die Anwärmung des Gutes und die Streuverluste vernachlässigt, die in den verschiedenen Fällen nicht gleich sind.) Erhöhung der Vorwärmtemperatur t_a ergibt hier Vermehrung des spezifischen Wärmeverbrauches. Rückt R_3 nach R_4 , so bedeutet dies höhere Frischlufttemperatur t_r bei gleichbleibendem Anfangsfeuchtigkeitsgehalt x_r . Der Neigungswinkel der Geraden R_4E_3 gegen die Waagerechte wird gegenüber dem von R_3E_3 kleiner, hier sogar negativ, was einer Verminderung des spezifischen Wärmeverbrauches entspricht. Er sinkt unter den Grenzwert von 595 kcal für 1 kg aufgetrocknetes Wasser, wenn die Endtemperatur der Trockenluft merklich tiefer liegt als ihre Anfangstemperatur. In solchen Fällen genügt das Trockenpotential der Frischluft an sich, um ohne Vorwärmung zu arbeiten, wenn nur die Luftmenge entsprechend hoch gehalten wird. Die zusätzliche Vorwärmung ergibt

eine spezifische Trockenleistung, an der die mitausgenutzte Trockenkraft der Frischluft ihren Anteil behält. Rückt Punkt R_4 so hoch, daß er mit A_3 zusammenfällt, so ist der spezifische Wärmeverbrauch 0. Es liegt alsdann der Fall der natürlichen Trocknung vor. Die Verschiebung vom R_5 nach R_6 bedeutet Vergrößerung des Anfangsfeuchtigkeitsgehaltes x_r bei gleichbleibender Temperatur t_r . A_5 rückt hierbei nach A_6 . Der Neigungswinkel von R_5E_5 gegen die Waagerechte ist größer als der von R_5E_5 . Zunahme des Anfangsfeuchtigkeitsgehaltes x_r bedeutet daher Vermehrung des spezifischen Wärmeverbrauches. Wird die Endtrockenkraft κ_e , der Verschiebung von Punkt E_7 nach E_8 entsprechend, höher gehalten, so wird der Neigungswinkel der Geraden R_7E_8 gegen die Waagerechte größer als der von

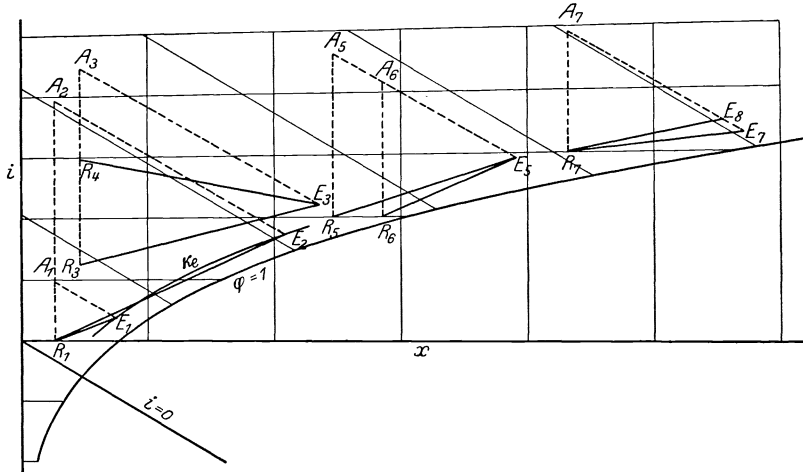


Abb. 52. Einfluß des Luftzustandes auf Wärme- und Luftbedarf.

R_7E_7 , d. h. der spezifische Wärmeverbrauch nimmt zu. Bezüglich der benötigten Luftmenge ergibt die Verschiebung von E_1 nach E_2 eine Verminderung, die Verschiebung von R_5 nach R_6 und von E_7 nach E_8 eine Vermehrung.

Mit Rücksicht darauf, daß mit der Neigung der RE -Geraden in der auf 1 kg/h Trockenleistung bezogenen Bilanzgleichung

$$\frac{Q}{G_L(x_h - x_r)} = \frac{i_h - i_r}{x_h - x_r} - i_{\text{ges } t} + \mathcal{C}_{\text{th}} \cdot \frac{t_h - t_r}{x_h - x_r} + \frac{Q_{\text{verl}}}{G_L(x_h - x_r)}$$

die drei letzten Glieder nicht zum Ausdruck kommen, sind die kritischen Erwägungen zu t_a und t_e zu berichtigen, wenn diese Beträge verhältnismäßig hoch sind. Höhere Temperaturen t_a und t_e beeinflussen $i_{\text{ges } t}$ nicht, die beiden letzten Glieder dagegen nehmen zu, so daß ein höherer Wärmeverbrauch vorliegt, als er sich aus der Neigung ergibt. Gleiche Neigung der RE -Geraden bedeutet, unter Berücksichtigung der Überschußwärme des Gutes und des Streuverlustes, daß die Verhältnisse nicht gleichwertig, sondern für die niedrigere Temperatur t_a und t_e

günstiger sind. Der den Übergang bestimmende Tangentialpunkt gibt daher den Grenzwert nicht genau an.

Die im vorstehenden durchgeführten Vergleiche haben zur Voraussetzung, daß während des ganzen Trockenvorganges die Luft sich längs der τ -Linien bewegt. Dies ist nur dann der Fall, wenn das Gut bei Beginn der Trocknung bereits eine Vorwärmung auf die Kühlgrenze erfahren hat und im Verlauf des gesamten Trockenvorganges feucht bleibt. Während der Vortrocknung und beim Trocknen von Gut im hyroskopischen Zustande verlieren die Trockenkraftlinien ihren Sinn, da sie nur unter der Voraussetzung gelten, daß das Gut im Ausgleichzustand die Temperatur der Kühlgrenze beibehält. Die Veränderung des Luftzustandes folgt in diesen Fällen nicht der τ -Linie. Während bei feuchtem Gut der günstigste Zustand der vorgewärmten Luft in der Regel dadurch festliegt, daß ihm als Kühlgrenze τ die für das Gut zulässige Höchsttemperatur t_{\max} entspricht, muß bei hyroskopischem Gut damit gerechnet werden, daß es im Grenzfalle die von dem trockenen Thermometer angezeigte fühlbare Lufttemperatur annimmt, wie dies bei vollständig wasserfreiem Gut im Beharrungszustande eintritt. Je nachdem das Gut im fertig getrockneten Zustande, bei dem die hyroskopische Eigenschaft sich im höchsten Grade zeigt, mit der eintretenden oder austretenden Luft zusammentrifft, ergibt sich daher die Bedingung, daß die am trockenen Thermometer beobachtete Temperatur t_a der eintretenden bzw. t_e der austretenden Luft die für das Gut noch zulässige Höchsttemperatur t_{\max} nicht überschreitet. Die Bedingung $t_a \leq t_{\max}$ entspricht einer Trockenvorrichtung, bei der das Gut ruht oder sich im Gegenstrom oder Querstrom zu der Luft bewegt, während die Bedingung $t_e \leq t_{\max}$ für Gleichstrom gilt.

Mit der Bedingung $t_a = t_{\max}$ kann nach Abb. 53 die Forderung verbunden werden, daß der spezifische Wärmeverbrauch bei allen durch die Witterungsverhältnisse möglichen Anfangszuständen der Luft einen bestimmten Wert behält. Das bedeutet, daß die Verbindungslinien der Punkte R und E , die dem Zustande der Luft vor der Erwärmung und nach der Trocknung entsprechen, die gleiche Neigung zur Waagerechten besitzen. Der geometrische Ort für die Punkte E ergibt sich alsdann durch die Schnittpunkte zweier Scharen von Parallelen, deren eine durch die Punkte R mit der dem spezifischen Wärmeverbrauch entsprechenden Neigung geht, während die andere durch die zu R gehörigen Punkte E parallel mit i -Linien (die hier angenähert als mit den τ -Linien zusammenfallend angesehen werden) verläuft. Die ausgezogene, die Punkte E_1 bis E_4 verbindende Kurve stellt diesen geometrischen Ort für den Fall dar, daß die Luft im Anfangszustande gesättigt ist, die gestrichelte Kurve, die die Punkte E'_1 bis E'_4 verbindet, für den Fall eines anfänglichen Feuchtigkeitsgrades $\varphi_r = 0,5$. Für eine bestimmte Anfangslufttemperatur t_r ist das für $\varphi_r = 1$ geltende Dreieck $R_2 A_2 E_2$ gleich dem für $\varphi_r = 0,5$ geltenden Dreieck $R'_1 A_1 E'_1$, wenn die verschiedene Neigung der t -Linien unberücksichtigt bleibt. Das bedeutet, daß hier bei gleicher Temperatur t_r der Frischluft sowohl der spezifische Wärmeverbrauch — gekennzeichnet durch die Neigung der Geraden $R_2 E_2$ bzw. $R'_1 E'_1$ zur Waage-

rechten — als auch die spezifische Trockenleistung — gekennzeichnet durch den waagerechten Abstand der Punkte E_2 bzw. E'_1 von den durch V_2 bzw. V_1 gehenden Ordinaten — unabhängig von dem Feuchtigkeitsgrad der Außenluft sind. Das Trockenpotential ist allerdings für die Punkte A_2 und E_2 und damit für alle auf der Linie A_2E_2 liegenden Punkte kleiner als für A_1 und E'_1 bzw. für die auf der Linie $A_1E'_1$ liegenden Zwischenpunkte. Niedriger Feuchtigkeitsgrad der Außenluft bietet auch hier Vorzüge. Für eine bestimmte stündliche Trockenleistung fällt die Trockenanlage bei höherem Feuchtigkeitsgrad φ_r größer aus. Die Trockenvorrichtung ist daher, wenn sie allen Witterungsverhältnissen

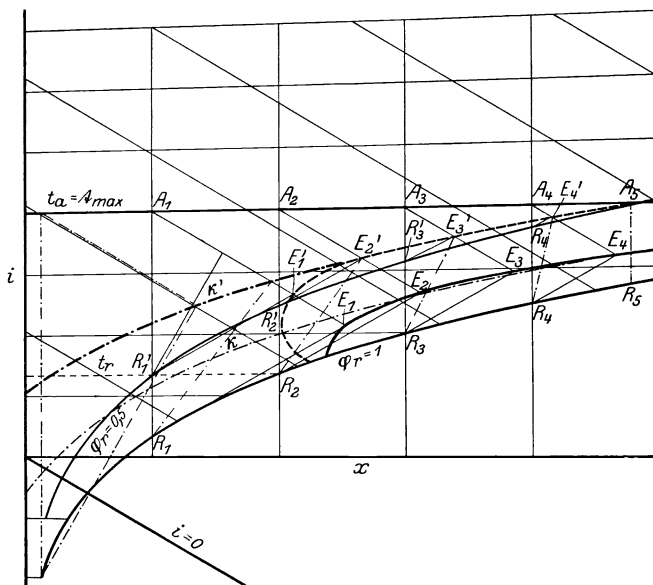


Abb. 53. Einfluß des Endzustandes der Luft auf Luft- und Wärmebedarf bei gleichbleibender Höchsttemperatur der Luft.

entsprechen soll, entweder für den höchstmöglichen Feuchtigkeitsgrad $\varphi_r = 1$ zu bemessen, oder es muß mit zunehmendem φ_r eine Verlängerung der Trockendauer in Kauf genommen werden. Ähnliches gilt mit Rücksicht auf veränderliche Temperaturen t_r der Außenluft. Je höher t_r liegt, um so niedriger ist das Trockenpotential längs der Strecke AE , so daß für Bemessung der Trockenvorrichtung der höchstmögliche Wert von t_r zugrunde zu legen ist. Hier kommt weiter hinzu, daß der spezifische Luftbedarf mit zunehmender Temperatur t_r wächst, also auch für den Höchstwert von t_r das ungünstigste Maß erreicht.

Würden statt der geometrischen Orte für die Punkte E bzw. E' die mit ihnen streckenweise nahezu zusammenfallenden Trockenpotentiallinien \varkappa bzw. \varkappa' zur Bestimmung des Endzustandes der Luft benutzt, so ergäbe sich für die linken Teile der Trockenpotentiallinie, nachdem sie die E - bzw. E' -Kurve verlassen hat, ein höherer spezifischer Wärme-

verbrauch. Unter Annahme, daß die Punkte R auf der Sättigungslinie liegen, also $\varphi_r = 1$ ist und der Endzustand der Luft einem Punkte auf der oberen Trockenkraftlinie α' entspricht, nimmt der spezifische Wärmeverbrauch mit niedrigerer Temperatur t_r ab, jedoch nur bis zu einem Mindestwerte, um danach wieder anzusteigen. Mit der Senkrechten $R_5 A_5$ erreicht er unendliche Größe. Wird daher gleichzeitig die $t_a = t_{\max}$ -Linie und die Trockenkraftlinie für die Grenzzustände der Luft festgehalten, so verändert sich der spezifische Wärmeverbrauch zwischen zwei Höchstwerten und einem dazwischenliegenden Mindestwert.

Ähnlich wie in Abb. 53 die Grenzbedingung $t_a = t_{\max}$ gestellt ist, sei der Abb. 54 die Grenzbedingung $t_e = t_{\max}$ zugrunde gelegt. Den

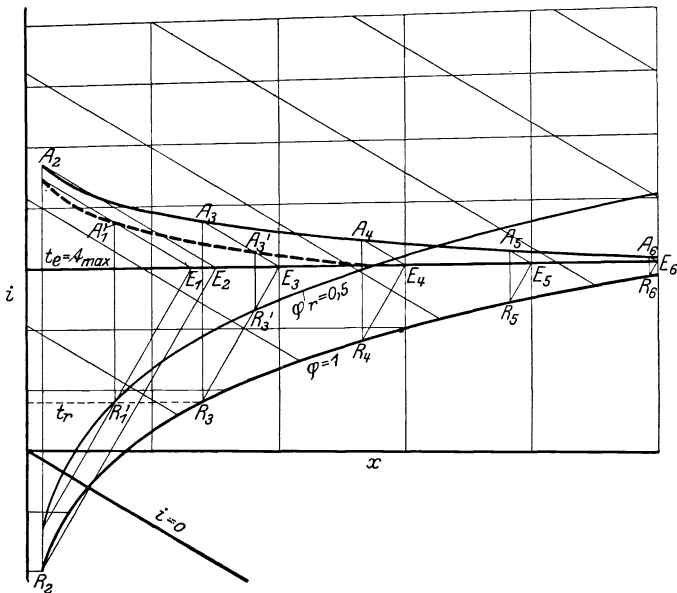


Abb. 54. Einfluß des Anfangszustandes der Luft auf Luft- und Wärmebedarf bei gleichbleibender Endtemperatur der Luft.

Ausgangspunkt bilden hier die E -Punkte. Werden durch sie Parallelen mit der Neigung zur Waagerechten gezogen, die einen angenommenen spezifischen Wärmeverbrauch kennzeichnet, und zum Schnitt mit der Sättigungslinie gebracht, so ergeben die Schnittpunkte R die Anfangstemperatur t_r der Frischluft, wenn diese gesättigt ist. Ebenso folgt für einen Feuchtigkeitsgrad $\varphi_r = 0,5$ der Frischluft deren Temperatur t_r aus den Schnittpunkten R' dieser Parallelen mit der $\varphi_r = 0,5$ -Kurve. Die durch die R - bzw. R' -Punkte gehenden Ordinaten liefern im Schnitt mit den durch die E -Punkte gezogenen Parallelen zu den i -Linien eine Kurve, die den geometrischen Ort für die A - bzw. A' -Punkte darstellt und die Vorwärmtemperatur t_a der Luft festlegt. Auch hier ergeben sich für eine bestimmte Temperatur t_r die maßgebenden Dreiecke $R_3 A_3 E_3$ bzw. $R'_1 A'_1 E_1$ in gleicher Größe, d. h. spezifischer Wärme-

verbrauch und spezifische Luftmenge sind bei gleicher Anfangstemperatur t_r der Frischluft unabhängig von ihrem anfänglichen Feuchtigkeitsgrad φ_r . Das Trockenpotential ist nach wie vor bei größerem Wert φ_r niedriger, woraus sich die zu Abb. 53 erörterten Folgerungen ergeben.

Bei Festlegung der Grenzbedingungen kommt es selbstverständlich auf die Möglichkeit ihrer praktischen Einhaltung an. Hierauf wird später bei Erörterung der Betriebsführung näher eingegangen. Grundsätzlich sei folgendes bemerkt: Einhaltung einer höchsten Vorwärmtemperatur der Luft, entsprechend Abb. 53, bedeutet Beeinflussung der Heizvorrichtung durch einen Temperaturregler, die leicht durchzuführen

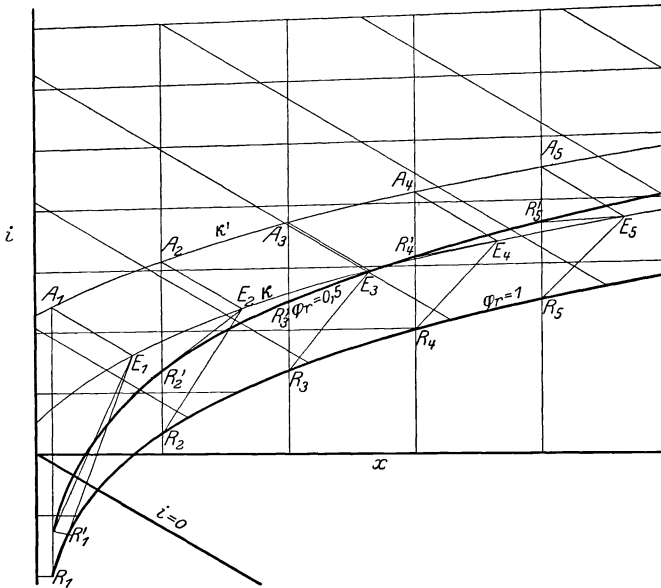


Abb. 55. Einfluß des Luftzustandes auf Luft- und Wärmebedarf bei Veränderung der Luft zwischen gleichen Trockenpotentiallinien.

ist. Weniger einfach ist die Änderung der umlaufenden Luftmenge, entsprechend den in Abb. 53 bzw. 54 festgelegten Bedingungen. Ähnliche Schwierigkeiten bestehen für die Einhaltung einer höchsten Austrittstemperatur $t_e = t_{\max}$ gemäß Abb. 54, schließlich und vor allem bezüglich Veränderung der Beschickungsmenge, die dem wechselnden Trockenpotential entsprechen soll. In der Regel hängt der Trockenvorgang derart mit dem Betriebe zusammen, daß als erste Bedingung die Forderung aufgestellt wird, die Trockenleistung unabhängig von den Witterungsverhältnissen zu halten. Das aber bedeutet, daß das mittlere Trockenpotential in allen Fällen gleich bleibt, also z. B. nach Abb. 55 der Zustand der Trockenluft sich zwischen zwei Linien gleichen Trockenpotentials κ und κ' bewegt. Hierbei verändern sich sowohl spezifische Luftmenge als auch spezifischer Wärmebedarf, beide jedoch in nicht allzu

weiten Grenzen, wenn der Feuchtigkeitsgrad der Außenluft der Sättigung oder doch einer φ_r -Linie entspricht, die genügend weit unterhalb der tieferen Trockenpotentiallinie liegt. Höchsttemperatur t_a und Endtemperatur t_e der Trockenluft steigen beide mit zunehmender Temperatur t_r der Frischluft. In Abb. 55 ist bei den R -Punkten angenommen, daß die Außenluft gesättigt sei, bei den R' -Punkten, daß sie einen Feuchtigkeitsgrad $\varphi_r = 0,5$ besitze. Auch die aus Abb. 55 sich ergebenden Grenzbedingungen sind im Betriebe nicht in wünschenswert einfacher Weise zu erfüllen. Eine brauchbare Lösung liefert erst die später erörterte Anwendung des Umluftverfahrens.

Zu den Abb. 53, 54 und 55 ist noch ausdrücklich darauf hinzuweisen, daß bei hygroskopischem Gute der verlangte Endfeuchtigkeitsgehalt ξ_h einen bestimmten Mindestwert des Feuchtigkeitsgrades der Luft bedingt, der bei ruhendem oder im Gegen- und Querstrom bewegtem Gute $\varphi_a \leq \frac{\mathfrak{P}}{P''}$, beim Gleichstrom $\varphi_e \leq \frac{\mathfrak{P}}{P''}$ beträgt und bei linearem Verlauf des $\frac{\mathfrak{P}}{P''}$ - ξ -Bildes durch den Wert $\frac{\mathfrak{P}}{P''} = \frac{\xi_h}{\xi_e}$ begrenzt wird. Ist im bestimmten Falle ξ_h und damit der Höchstwert φ_{\max} gegeben und wird in Abb. 53; 54 und 55 die φ_{\max} -Linie eingetragen, so sind alle Verhältnisse auszuschalten, bei denen die A - oder E -Punkte unterhalb der φ_{\max} -Linie liegen, je nachdem es sich um eine Trockenvorrichtung handelt, bei der das Gut ruht bzw. im Gegen- und Querstrom läuft oder Gleichstrom vorliegt.

Aus Abb. 19 geht hervor, daß der spezifische Wärmearaufwand mit abnehmendem Gesamtdrucke P sinkt, wenn Verhältnisse mit gleichem Anfangszustand der Luft (t_r, φ_r, x_r) nach dem Grade der Vorwärmungstemperatur t_a verglichen werden. Denn die für den spezifischen Wärmearaufwand maßgebende Verbindungslinie zwischen den Punkten R und E , die Anfangs- und Endzustand der Luft darstellen, besitzt mit abnehmendem Gesamtdruck kleinere Neigung zur Waagerechten.

Während bei offenen Trockenvorrichtungen der Gesamtdruck P dem Barometerstande entspricht, damit von der örtlichen Lage und den Witterungsverhältnissen abhängt und als gegeben anzusehen ist, stellt Trocknen im geschlossenen Raum, unter gleichzeitiger Verminderung des Gesamtdruckes, eine künstliche Maßnahme dar, durch die zunächst der Vorteil geringen spezifischen Wärmeverbrauches erreichbar scheint. Dem steht jedoch der Nachteil gegenüber, daß die Aufrechterhaltung des Unterdruckes eine Verwickelung durch Hinzutreten einer Luftabsaugvorrichtung ergibt, die einen nicht zu vernachlässigenden Arbeitsbedarf bedingt.

Zahlenbeispiel 7. In einer geschlossenen Trockenvorrichtung, die ohne unmittelbare Beheizung des Trockengutes arbeitet, werde bei einem äußeren Luftdruck von 10000 kg/m^2 ($735,5 \text{ mm Q.-S. Barometerstand}$) durch eine Luftpumpe ein Druck von 5000 kg/m^2 aufrechterhalten. Es sollen 100 kg/h Wasser aufgetrocknet werden, als Trockenmittel diene gesättigte Luft von 20° , die nach entsprechender Vorwärmung mit 30° gesättigt entweicht. Wie hoch ergibt sich Wärme- und Arbeitsaufwand?

Der Feuchtigkeitsgehalt gesättigter Luft beträgt bei $P = 10000 \text{ kg/m}^2$ Gesamtdruck und einer Temperatur $t_r = 20^\circ$, $x_r = 0,01519$, bei $P = 5000 \text{ kg/m}^2$

und $t_e = 30^{\circ}$, $x_e = 0,05892$. Die Feuchtigkeitsaufnahme, bezogen auf 1 kg Reinsluft, folgt hiermit zu

$$x_e - x_r = 0,05892 - 0,01519 = 0,04373$$

und die erforderliche Reinsluftmenge zu

$$G_L = \frac{100}{0,04373} \approx 2300 \text{ kg/h.}$$

Diese nimmt bei dem Druck von $P = 5000 \text{ kg/m}^2$, der 30° entsprechenden Sättigungsdampfspannung $P_D = 433 \text{ kg/m}^2$ und der Temperatur von 30° einen Rauminhalt von

$$G_L \cdot v_{L_e} = 2300 \cdot \frac{29,27 \cdot 303}{5000 - 433} \approx 4350 \text{ m}^3/\text{h}$$

ein, der auch den Rauminhalt des Luft-Dampfgemisches im Endzustande darstellt.

Da bei adiabatischer Verdichtung von 5000 auf 10000 kg/m^2 $1 \text{ m}^3/\text{h}$ etwa 0,0142 PSi theoretisch erfordert, beträgt der Mindestkraftbedarf zum Absaugen der Trockenluft $\approx 62 \text{ PS}$, entsprechend einem stündlich in Form von Arbeit aufzuwendenden Wärmewert von 39500 kcal/h. Hierzu kommt der Verbrauch für Erwärmung der Frischluft von 20 auf $36,5^{\circ}$ in Höhe von etwa $41,6 - 14 = 27,6 \text{ kcal}$ für 1 kg Reinsluft bzw. bei 2300 kg/h Reinsluft, 63500 kcal/h, insgesamt daher 103000 kcal/h oder, auf 1 kg Wasserverdampfung bezogen, 1030 kcal/h.

Dieser Betrag kann nicht als unmittelbare Vergleichszahl dienen, weil der theoretische Wärmewert der PSH nicht ausreicht, um diese in Wirklichkeit zu erzeugen. Gleichwohl zeigt er schon, daß der Vorteil niedrigen Druckes durch den Arbeitsbedarf der Luftpumpe aufgehoben wird. An sich wäre es denkbar, ihn teilweise dadurch wiederzugewinnen, daß die einströmende Luft in einem Luftmotor von dem äußeren auf den inneren Druck bei gleichbleibender Temperatur unter Arbeitsleistung entspannt würde.

Das Unterdruckverfahren mit Luft als Trockenmittel geht schließlich in die eigentliche Vakuumtrocknung über, bei der die Luft so weit wie möglich entfernt wird und nur noch als störender Fremdkörper auftritt. Für ihre Untersuchung scheidet daher das i - x -Bild aus.

B. Festlegung der Hauptpunkte im i - x -Bild, unter Berücksichtigung von Vorwärmung und hygroskopischen Eigenschaften des Gutes.

Im bestimmten Falle sind Anfangstemperatur t_r , Trocknstoffgewicht \mathcal{G}_x und Anfangsfeuchtigkeitsgehalt x_r des Gutes bekannt. Der Endfeuchtigkeitsgehalt x_b des Gutes wird in der Regel vorgeschrieben. Damit steht die stündliche Trockenleistung $\mathcal{G}_x (x_r - x_b)$ fest. Die Witterungsverhältnisse bestimmen außerdem den anfänglichen Feuchtigkeitsgehalt x_r der Trockenluft.

Wird der Trockenvorgang unbegrenzt fortgesetzt, so würde schließlich der Feuchtigkeitsgehalt x_i des Gutes im

Beharrungszustand

den Grenzwert erreichen, der dem Feuchtigkeitsgrad der Luft dort entspricht, wo sie mit dem fertig getrockneten Gute in Berührung

kommt, also beim Gleichstrom den Betrag

$$\varepsilon_{igl} = \varepsilon_e \cdot \frac{\mathfrak{P}_i}{P''_{t_i}} = \varepsilon_e \cdot \frac{P_{Di}}{P''_{t_i}} = \varepsilon_e \cdot \varphi_i, \quad (68)$$

beim Gegenstrom und Querstrom den Betrag

$$\varepsilon_{igg} = \varepsilon_e \cdot \frac{P_{Dv}}{P''_{t_v}} = \varepsilon_e \cdot \varphi_v. \quad (69)$$

Hierbei ist im bestimmten Falle der Grenzfeuchtigkeitsgehalt ε_e des Gutes im hygroskopischen Punkt bekannt.

Der in begrenzter Zeit angestrebte Feuchtigkeitsgehalt ε_h liegt um ein Sicherheitsmaß höher als ε_i , dessen Betrag die bei Abbruch des Trockenvorganges maßgebende Trockengeschwindigkeit bestimmt.

1. Gleichstrom.

In Abb. 56 stelle für einen Gleichstromtrockner Punkt J den Beharrungszustand, Punkt H den tatsächlich erreichten Endzustand der Trockenluft dar. Die im Beharrungszustande für Gut und Luft zusammenfallende Temperatur $t_i = t_i$ könnte im Gefahrenfalle nahezu erreicht werden. Sie darf daher nicht höher liegen als die Temperatur t_{\max} , die das betreffende Gut erfahrungsgemäß noch ohne Schädigung erträgt. Die t_i -Gerade liegt daher im besonderen Falle fest. Das Verhältnis $\frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_e}$ bestimmt einen φ_h -Betrag, der größer ist als φ_i und nicht erreicht werden darf, da die Trockengeschwindigkeit bei Abbruch des Trockenvorganges noch endlichen Wert besitzen muß. φ_i liegt daher um ein zu schätzendes Sicherheitsmaß niedriger als $\varphi_h = \frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_e}$ und bestimmt den Feuchtigkeitsgehalt im Beharrungszustande

$$\varepsilon_i = \varepsilon_e \cdot \varphi_i < \varepsilon_h.$$

Der Beharrungspunkt J ergibt sich als Schnittpunkt der t_i -Geraden mit der φ_i -Linie. Der Feuchtigkeitsgehalt x_i , den die Luft im Beharrungszustande erreichen würde, liegt mit Punkt J fest. Es folgt die Menge des aufzuwendenden Reinluftgewichtes G_L aus der Beziehung

$$\mathcal{G}_x(x_r - \varepsilon_i) = G_L(x_i - x_r)$$

zu

$$G_L = \frac{\mathcal{G}_x(x_r - \varepsilon_i)}{x_i - x_r}.$$

Bezeichnet Punkt V den Zustand der vorgewärmten Luft, so ergibt sich seine Lage aus der Überlegung, daß der Wärmehalt der Luft zwischen V und J um den Betrag abnimmt, um den der Wärmehalt des Gutes wächst. Es ist nämlich

$$G_L(i_v - i_i) = \mathcal{G}_x(i_i - i_r), \quad (70)$$

$$i_v = i_i + \frac{\mathcal{G}_x}{G_L}(i_i - i_r) = i_i + \frac{\mathcal{G}_x}{G_L}(\mathcal{C}_i \cdot t_i - \mathcal{C}_r \cdot t_r).$$

Der spezifische Wärmehalt i_v der vorgewärmten Luft läßt sich hieraus errechnen, da alle Werte der rechten Seite bekannt sind. Punkt V folgt als Schnittpunkt der i_v -Linie mit der x_r -Linie und legt gleichzeitig die Temperatur t_v der vorgewärmten Luft fest.

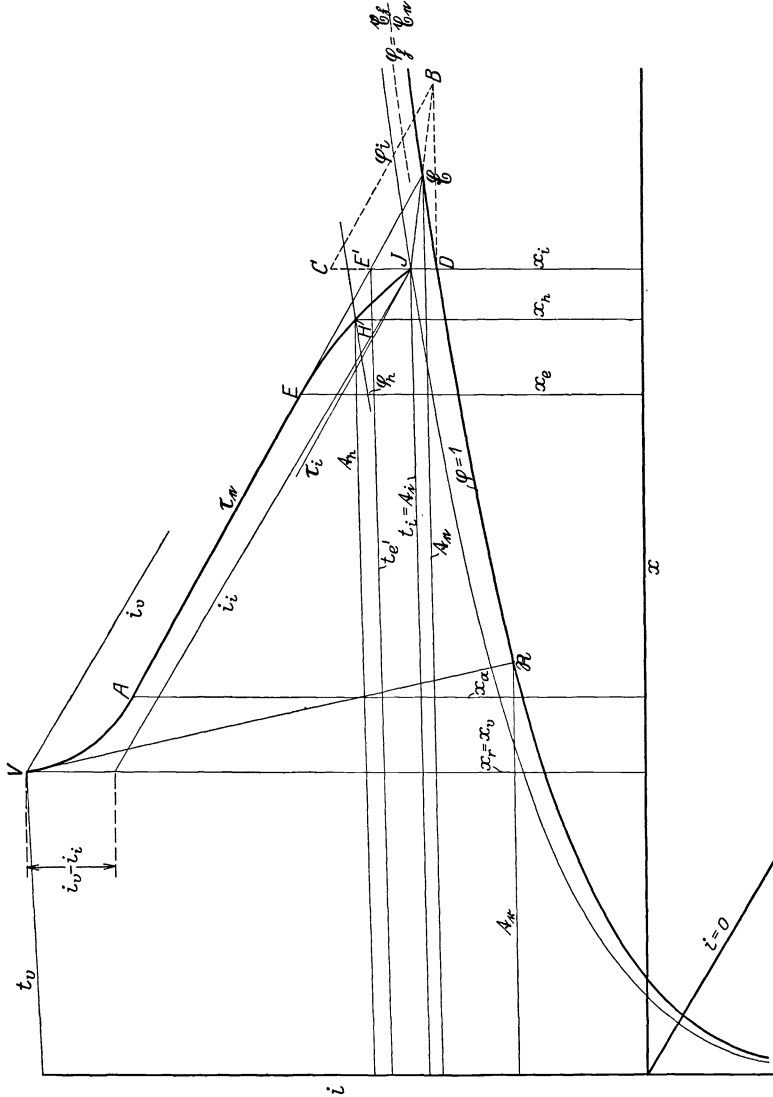


Abb. 56. Festlegung der Hauptpunkte im i - x -Bild (Gleichstromtrockner).

Der Punkt E' , in dem die Haupttrockenabschnitt entsprechende τ_e -Linie die x_i -Linie schneidet, ergibt sich aus folgender Überlegung: Die Strecke $E'J$ stellt, im Wärmemaßstab gemessen, die Verminderung des Wärmehaltes dar, die mit dem Temperaturabfall $t_e' - t_i$ der Luft ver-

bunden ist und die den Wert $G_L \cdot C_{pi}(t'_e - t_i)$ besitzt. Sie ist zahlenmäßig gleich dem Betrage $\mathfrak{G}_x \cdot \mathfrak{C}_i(t_i - t_e)$, der die Zunahme des Wärmeinhaltes des Gutes infolge Erhöhung seiner Temperatur von einem dem Punkt \mathfrak{C} zukommenden Wert t_e auf die Höhe $t_i = t_i$ darstellt.

Daher gilt

$$\mathfrak{G}_x \cdot \mathfrak{C}_i(t_i - t_e) = G_L \cdot C_{pi}(t'_e - t_i). \quad (71)$$

Hierbei ist angenommen, daß die Haupttrocknung sich zunächst ohne die Nebeneinflüsse des hygroskopischen Verhaltens längs der τ_e -Linie bis zum Punkte E' fortsetzen und danach, ohne Veränderung des erreichten Luftfeuchtigkeitsgehaltes x_i , die hygroskopische Eigenschaft sich auswirken würde. In der Formel (71) sind alle Werte mit Ausnahme von t_e und t_i bekannt. Durch Umformung ergibt sich die Beziehung

$$\frac{t_i - t_e}{t'_e - t_i} = \frac{G_L \cdot C_{pi}}{\mathfrak{G}_x \cdot \mathfrak{C}_i}. \quad (71a)$$

Da die Werte der rechten Seite feststehen, läuft die Ermittlung des Punktes \mathfrak{C} und damit der τ_e -Linie auf eine einfache geometrische Aufgabe hinaus. Die Richtung der t_e -Geraden steht genügend genau fest, da sie parallel der t_i -Geraden angenommen werden darf, ebenso die Richtung der τ_e -Linie, die etwa parallel der durch J gehenden τ_i -Linie verläuft. Es sind daher oberhalb und unterhalb von Punkt J auf der x_i -Linie zwei beliebige Strecken JC und JD derart abzutragen, daß die untere Strecke JD das $\frac{G_L \cdot C_{pi}}{\mathfrak{G}_x \cdot \mathfrak{C}_i}$ -fache der oberen Strecke JC darstellt, und durch den unteren Endpunkt D eine Parallele zu der t_i -Geraden, durch den oberen Endpunkt C eine Parallele zu der τ_i -Linie zu ziehen. Beide schneiden sich in einem Punkte B der Geraden $J\mathfrak{C}$ oder deren Verlängerung, da diese den geometrischen Ort für alle Punkte darstellt, die der Bedingung der Formel (71a) entsprechen. Die Verbindungslinie zwischen J und dem so gefundenen Punkt B schneidet die Sättigungslinie in Punkt \mathfrak{C} , mit dessen Lage die τ_e -Linie und die Kühlgrenztemperatur t_e während des Hauptabschnittes der Trocknung gegeben sind.

Der zu dem Grenzfeuchtigkeitsgehalt x_e des Gutes im hygroskopischen Punkt gehörige Wert des Feuchtigkeitsgehaltes x_e der Luft beim Verlassen der Kühlgrenze folgt aus der Beziehung

$$\mathfrak{G}_x(x_r - x_e) = G_L(x_e - x_r)$$

zu

$$x_e = x_r + \frac{\mathfrak{G}_x}{G_L}(x_r - x_e). \quad (72)$$

Damit ist auch die Lage des Punktes E auf der τ_e -Linie gegeben, und der Verlauf des Luftzustandes zwischen den Punkten E und J kann, wie später gezeigt, durch schrittweise Berechnung gefunden oder nach einiger Übung gefühlsmäßig genügend genau eingezeichnet werden.

Der Endfeuchtigkeitsgehalt x_h der Luft folgt aus der Beziehung

$$G_{\mathfrak{L}}(x_r - x_e) = G_L(x_h - x_r)$$

zu

$$x_h = x_r + \frac{G_{\mathfrak{L}}}{G_L}(x_r - x_e). \quad (73)$$

Der wirkliche Endzustand der Luft entspricht dem Punkte H , in dem die x_h -Linie die Kurve JE schneidet. Mit ihm ist die Endtemperatur t_h und der Endfeuchtigkeitsgrad φ_h der Luft gegeben und die nachträgliche Prüfung möglich, ob die zu Anfang getroffene Annahme für φ_i gegenüber φ_h noch ein ausreichendes Trockenpotential beim Abbruch des Trockenvorganges verbürgt. Die Bemerkungen zu Abb. 28 sind hierbei maßgebend.

Die Lage des Punktes A , bei dem der Hauptabschnitt der Trocknung beginnt, läßt sich durch schrittweise Berechnung (s. u.) von V aus ermitteln. Mit einiger Übung wird der Verlauf der Kurve VA gefühlsmäßig eingezeichnet werden können. Sie tangiert im Punkte V die Verbindungsgerade zwischen V und dem Punkte \mathfrak{R} , der dem Anfangszustande des Gutes entspricht.

2. Gegenstrom.

In Abb. 57 stelle für einen Gegenstromtrockner Punkt V den Beharrungszustand dar, für den die Temperaturen von Gut und Luft $t_v = t_i$ zusammenfallen würden. Im besonderen Falle liegt die Temperatur t_v der vorgewärmten Luft mit dem Werte t_{\max} fest, der

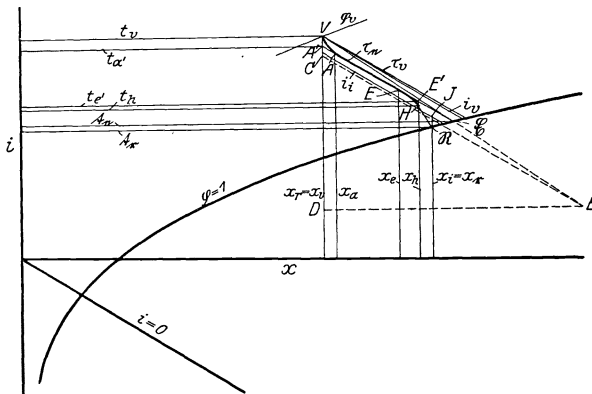


Abb. 57. Festlegung der Hauptpunkte im i - x -Bild (Gegenstromtrockner).

für das Gut noch ohne Schädigung zugelassen werden darf. Punkt V ergibt sich als Schnittpunkt der t_v -Linie mit der x_r -Linie. Hierbei ist nachzuprüfen, daß der Feuchtigkeitsgrad φ_v der vorgewärmten Luft den Wert $\varphi_h \frac{x_h}{x_e}$ genügend weit unterschreitet, um noch ein ausreichendes Trockenpotential bei Abbruch des Trockenvorganges zu

gewährleisten. Ist dies nicht der Fall, so muß zunächst eine Verlängerung der Trockenzeit, notfalls eine Erhöhung der Temperatur t_v in Kauf genommen oder statt der Lufttrocknung unter atmosphärischem Druck ein Verfahren mit Unterdruck angewandt werden. Mit der Lage von V folgt der Wert $x_i = x_e \cdot \varphi_v$. Würde der Beharrungszustand wirklich erreicht, so läge der Endzustand der Trockenluft bei Punkt J . In Abb. 57 ist J senkrecht über \mathfrak{H} angenommen und damit der Gefahr vorgebeugt, daß die Feuchtigkeit aus der abgehenden Luft auf das eintretende feuchte und kalte Gut niederschlägt. Von dieser Festlegung muß im allgemeinen abgesehen werden, weil sie einen großen Betrag für das stündlich aufzuwendende Reinluftgewicht G_L

$$G_L = \frac{\mathfrak{G}_x(x_r - x_i)}{x_i - x_r}$$

ergibt. Die Abweichung des Wertes x_i von dem Werte x_r ist auch fast stets unbedenklich. Es wird daher zweckmäßig das Verhältnis $\frac{\mathfrak{G}_x}{G_L}$ versuchsweise festgelegt und daraus der Wert

$$x_i = x_r + \frac{\mathfrak{G}_x}{G_L}(x_r - x_i) \quad (74)$$

errechnet. Auch hier gilt Gleichung (70) und liefert den Wert

$$i_i = i_v - \frac{\mathfrak{G}_x}{G_L}(\mathfrak{C}_i \cdot t_v - \mathfrak{C}_r \cdot t_r).$$

Mit x_i und i_i ergibt sich die Lage des Punktes J . Fällt sie zu nahe an die Sättigungslinie, so war das Verhältnis $\frac{\mathfrak{G}_x}{G_L}$ zu groß angenommen. Eine Wiederholung führt schließlich zum endgültigen Punkt J .

Für die Auffindung des Punktes A' , in dem die Kühlgrenzlinie τ_e die x_r -Linie schneidet, dient eine ähnliche Erwägung, wie beim Gleichstrom geführt. Beim Gegenstrom entspricht die Veränderung des Luftzustandes von V nach A dem hygroskopischen Gebiete, in dem das Gut seine Temperatur von dem Kühlgrenzwert $t_e = \tau_e$ bis auf t_v erhöhen würde, wenn es den Beharrungszustand erreichte. Es gilt daher die Beziehung

$$\mathfrak{G}_x \cdot \mathfrak{C}_i(t_v - t_e) = G_L \cdot C_{pr}(t_v - t'_a), \quad (75)$$

$$\frac{t_v - t_e}{t_v - t'_a} = \frac{G_L \cdot C_{pr}}{\mathfrak{G}_x \cdot \mathfrak{C}_i}. \quad (76)$$

Die geometrische Aufgabe gleicht der für Gleichstrom beschriebenen. Auf der x_r -Linie sind unterhalb V zwei beliebige Strecken VC und VD so abzutragen, daß die größere Strecke VD das $\frac{G_L \cdot C_{pr}}{\mathfrak{G}_x \cdot \mathfrak{C}_i}$ -fache der kleineren Strecke VC darstellt. Wird durch den Endpunkt C eine Parallele zur τ_v -Linie, durch den Endpunkt D eine Parallele zur t_e -Linie gezogen, so schneiden sich beide in einem Punkte B auf der Geraden $V\mathfrak{C}$ oder deren Verlängerung. Die Verbindungsgerade VB liefert im Schnittpunkte mit der Sättigungslinie den Punkt \mathfrak{C} und damit die

Kühlgrenztemperatur t_e während des Hauptabschnittes der Trocknung sowie die τ_e -Linie.

Der Feuchtigkeitsgehalt x_a der Luft beim Eintritt in die Kühlgrenze ergibt sich hier zu

$$x_a = x_r + \frac{\mathcal{G}_x}{G_L} (\xi_e - \xi_h). \quad (77)$$

Damit ist die Lage von Punkt A auf der τ_e -Linie gegeben und der Verlauf zwischen V und A kann schrittweise berechnet oder gefühlsmäßig eingezeichnet werden. Der Endfeuchtigkeitsgehalt x_h der Luft beträgt nach Formel (73)

$$x_h = x_r + \frac{\mathcal{G}_x}{G_L} (\xi_r - \xi_h).$$

Für Punkt E' gilt die Beziehung

$$\mathcal{G}_x \cdot \mathcal{C}_\tau (t_e - t_r) = G_L \cdot C_{ph} (t'_e - t_h), \quad (78)$$

aus der die Endtemperatur t_h der Luft errechnet werden kann, da alle anderen Größen bekannt sind. Mit x_h und t_h folgt die Lage H des Endzustandes der Luft. Von hier aus kann der Verlauf HE schrittweise errechnet oder gefühlsmäßig eingezeichnet werden. Die Kurve HE tangiert im Punkte H die Verbindungsgerade $\Re H$.

In der beschriebenen Bestimmung der Hauptpunkte bei Gegenstrom ist eine Unstimmigkeit nachträglich zu berichtigen. Der Abstand der Punkte A' und V ist in Wirklichkeit kleiner, als gefunden wurde, weil die tatsächliche Endtemperatur des Gutes nicht, wie in Formeln (74) und (75) angenommen ist, bei t_p , sondern tiefer liegt. Der Fehler wirkt sich so aus, daß bei der genauen Berechnung sich Punkt V niedriger ergibt, wenn die Untersuchung von Punkt H in der gefundenen Lage ausgeht.

C. Das verbundene i - x - i - τ -Bild.

Die Beziehung der Formeln (74) und (70)

$$x_i - x_r = \frac{\mathcal{G}_x}{G_L} (\xi_r - \xi_i), \quad (74a)$$

$$i_v - i_i = \frac{\mathcal{G}_x}{G_L} (i_i - i_r) \quad (70a)$$

deuten darauf hin, daß es zweckmäßig sein kann, das i - x -Bild mit einem i - τ -Bilde in der Weise zu verbinden, daß der Koordinatenmaßstab des i - τ -Bildes sich zu dem des i - x -Bildes wie \mathcal{G}_x zu G_L verhält. Wird der Koordinatenmaßstab des i - x -Bildes beibehalten, so sind die i - τ -Koordinaten in dem mit $\frac{\mathcal{G}_x}{G_L}$ vervielfältigten Maßstabe wiederzugeben.

Ein solches verbundenes i - x - i - τ -Bild kann daher für jeden besonderen Fall in der Weise entworfen werden, daß das i - τ -Bild für eine bestimmte Gutsart und ein bestimmtes Verhältnis zwischen Reinluft- und Trockenstoffgewicht dem unverändert bleibenden i - x -Bilde überlagert wird.

1. Gleichstrom.

Abb. 58 zeigt, wie dies für das Gleichstromverfahren geschehen kann, wenn der Punkt V gegeben ist, der den Zustand der vorgewärmten Luft nach Feuchtigkeitsgehalt x_r und Wärmeinhalt i_v wiedergibt. Die Ordinatenachse für das i - x -Bild ist in einem Abszissenabstand $\frac{\Theta_{\Sigma}}{G_L} \cdot x_r$ rechts von V gelegt. Die in Richtung der i -Linien verlaufende schräge

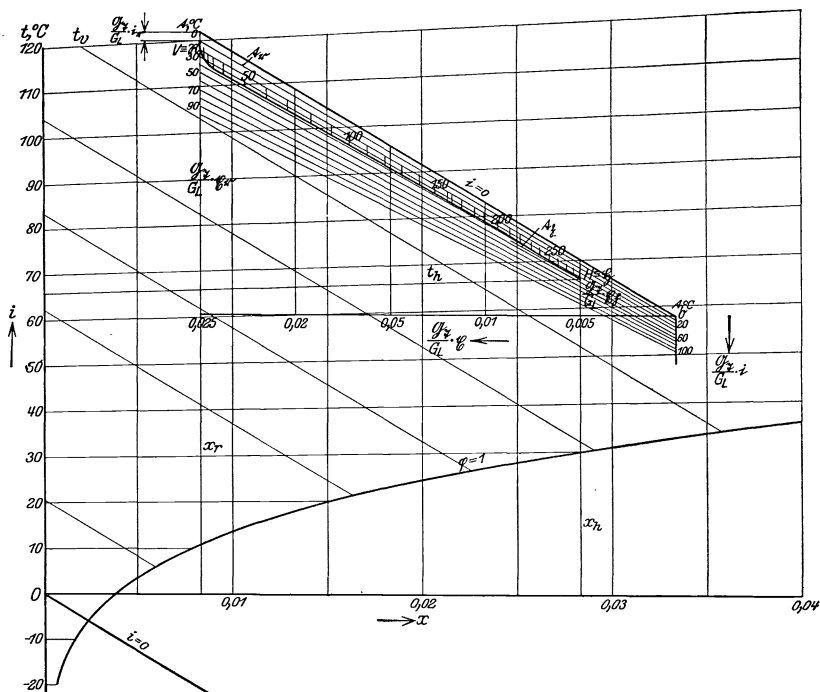


Abb. 58. i - x - i -Bild für Gleichstromtrockner.

Abszissenachse geht durch einen Punkt, der in einem Ordinatenabstand $\frac{\Theta_{\Sigma}}{G_L} \cdot i_r$ oberhalb V liegt. Der Koordinatenursprung \mathfrak{D} des i - x -Bildes liegt daher entgegengesetzt dem Koordinatenursprung 0 des i - x -Bildes. Positive Werte $\frac{\Theta_{\Sigma}}{G_L} \cdot x$ sind von \mathfrak{D} aus wagerecht nach links, positive Werte $\frac{\Theta_{\Sigma}}{G_L} \cdot i$ von \mathfrak{D} aus senkrecht nach abwärts zu zählen, also entgegengesetzt den x - und i -Werten des i - x -Bildes. Zu dem i - x -Bilde sind die t -Geraden, zu dem i - x -Bilde die t -Geraden eingezeichnet. Im Punkte V , der beiden Bildern gemein ist und gleichzeitig Punkt \mathfrak{H} darstellt, schneiden sich die t_v - und die t_r -Gerade. Bei dieser Darstellung gibt die Zustandskurve der Luft im i - x -Bilde gleichzeitig die Zustandskurve des Gutes im i - x -Bilde wieder. Punkt H stellt daher einerseits den Endzustand der Luft, andererseits den Endzustand

§ des Gutes dar. In ihm schneiden sich die für die Temperatur der austretenden Luft maßgebende t_h -Linie und die t_b -Linie, die die Endtemperatur des Gutes liefert. Bedeutet in Abb. 59 Punkt J den Beharrungszustand, so ist bei dieser Darstellungsweise der Abszissenabstand $x_i - x_r$ im i - x -Bilde gleichbedeutend mit dem Abszissenabstand $\frac{\Theta_x}{G_L} (\xi_r - \xi_i)$ im i - ξ -Bilde, wie dies Gleichung (74) fordert. Ebenso ist die Beziehung der Formel (70) erfüllt, weil der Ordinatenabstand $i_v - i_i$ im i - x -Bilde mit dem Ordinatenabstand $\frac{\Theta_x}{G_L} (i_i - i_r)$ im i - ξ -Bilde zusammenfällt. Durch Punkt J verläuft im i - x -Bilde die t_i -Gerade, im

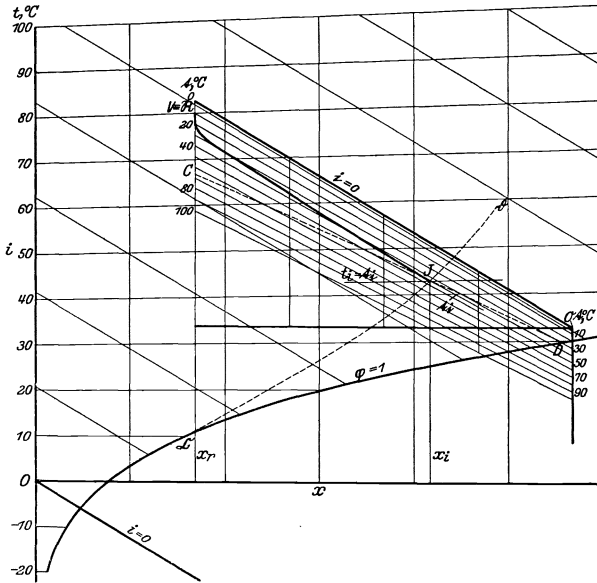


Abb. 59. Auffindung des Beharrungszustandes im i - x - i - ξ -Bild (Gleichstromtrockner).

i - ξ -Bilde die t_i -Gerade. Hierbei ist zahlenmäßig $t_i = t_i$. Soll daher Punkt J gesucht werden, so ist nach Abb. 59 als geometrischer Ort für seine Lage eine Kurve CD zu entwerfen, für die $t = t$ ist, die also die Schnittpunkte zahlenmäßig gleicher t - bzw. t -Geraden verbindet. Ein zweiter geometrischer Ort ergibt sich aus der Beziehung der Formel (68)

$$\xi_i = \xi_e \cdot \varphi_i.$$

Zu jedem Abszissenwert $\frac{\Theta_x}{G_L} \cdot \xi$ des i - ξ -Bildes ist daher eine bestimmte

$\varphi = \frac{\xi}{\xi_e}$ -Linie des i - x -Bildes zugeordnet. Die Schnittpunkte dieser

φ -Linien des i - x -Bildes mit den $\frac{\Theta_x}{G_L} \cdot \xi$ -Linien des i - ξ -Bildes bilden die

Kurve CD , die den zweiten geometrischen Ort für die Lage von J darstellt. Im allgemeinen erübrigt sich die Aufzeichnung der Kurve CD .

Der gesuchte Punkt J fällt auf der $\mathcal{C}\mathcal{D}$ -Linie dorthin, wo der Zahlenwert einer t -Linie gleich dem einer t -Linie, nämlich gleich $t_i = t_i$ ist.

Der voraussetzenden Untersuchung war die Aufgabe zugrunde gelegt, daß der Punkt V bekannt ist und der Ausgleichspunkt J zu suchen sei. Statt V kann jedoch ein beliebiger Luftzustandspunkt G als Ausgangspunkt gewählt werden. Bedingung ist nur, daß von ihm aus der Ordinatenursprung \mathcal{D} des i - x -Bildes so gewählt wird, daß er im Abszissenabstande $\frac{\mathcal{G}x}{GL} \cdot x_g$ und im Ordinatenabstande $\frac{\mathcal{G}x}{GL} \cdot i_g$ liegt, wenn x_g und i_g die zum Zustandspunkte \mathcal{G} des Gutes gehörigen Werte darstellen. \mathcal{G} entspricht hierbei dem Zustande des Gutes im gleichen Zeitpunkte, in dem dem Zustande des Gases die Lage G zukommt.

2. Gegenstrom.

Während beim Gleichstrom der Punkt \mathcal{D} sich aus dem Anfangszustande (V, x_v, i_v) allein ergibt, ist es beim Gegenstrom nötig, zuvor den Endzustand der Luft (H) oder auch, weil die Abszissenlage durch den im Ordinatenabstande $\frac{\mathcal{G}x}{GL} \cdot i_h$ unterhalb V liegenden Punkt gegeben ist, den Endzustand des Gutes (\mathcal{G}) festzulegen.

Bei gleichbleibendem Anfangszustande verändert sich der Koordinatenursprung des i - x -Bildes für Gegenstrom, während er für Gleichstrom festliegt.

Steht der Endfeuchtigkeitsgrad des Gutes x_h fest, so liegt nach Abb. 60 die Ordinatenachse im Abszissenabstande

$\frac{\mathcal{G}x}{GL} \cdot x_h$ links von V . Die schräge Abszissenachse ergibt sich im Ordinatenabstande $\frac{\mathcal{G}x}{GL} \cdot i_v$ senkrecht unter Punkt H . Damit ist auch der Koordinatenursprung \mathcal{D} festgelegt. Der senkrechte Abstand der Abszissenachse unter V entspricht dem Betrage $\frac{\mathcal{G}x}{GL} \cdot i_h$, woraus i_h und, weil

$$i_h = \mathcal{G}_h \cdot t_h$$

ist, die wirkliche Endtemperatur t_h des Gutes folgt.

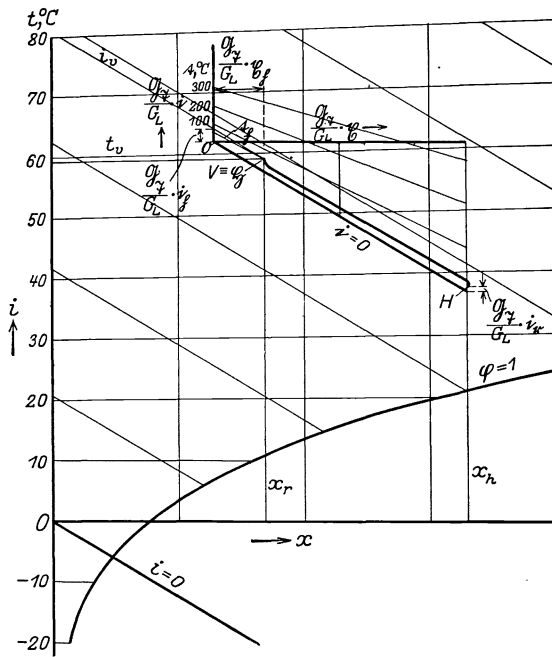


Abb. 60. i - x - i - x -Bild für Gegenstromtrockner.

D. Schrittweise Verfolgung der zeitlichen Zustandsänderung von Gas und Gut bei beliebigem Ausgangspunkt beider für Luft als Trockenmittel.

Formeln (55), (56), (62) ermöglichen vor allem, den zeitlichen Verlauf des Trockenvorganges im Hauptabschnitt zu verfolgen, für den die Voraussetzung eines unveränderlichen Wertes i_g zutrifft. Dagegen ist es nicht möglich, danach ohne weiteres die zeitliche Veränderung von Luft und Gut während der Vorwärmung und des hygroskopischen Zustandes des Gutes zu ermitteln. Die Untersuchung führt jedoch zum Ziele, wenn sie schrittweise von gegebenen, beliebigen Ausgangspunkten aus vorgeht. Werden in Formel (52), statt der unendlich kleinen, endliche und so kleine Werte eingesetzt, daß dafür mit einem gleichbleibenden Wärmeinhaltsgefälle $i_g - i$ gerechnet werden kann, so folgt die Zunahme des Wärmeinhaltes des Gases zu

$$\Delta i = \frac{F}{G_L} \cdot k' (i_g - i) \frac{\Delta z}{Z}. \quad (79)$$

Der Wert $\frac{F}{G_L} \cdot k' \cdot \frac{\Delta z}{Z}$ ist dimensionslos. Für die schrittweise Verfolgung der Zustandsänderung wird zweckmäßig $\frac{\Delta z}{Z}$ oder auch, für feststehende Verhältnisse, $\frac{F}{G_L} \cdot \alpha \cdot \frac{\Delta z}{Z}$ in einer einzigen runden Zahl, z. B. 0,001 oder einem Vielfachen davon, zusammengefaßt. Einsetzung von $\frac{F}{G_L} \cdot k' \cdot \frac{\Delta z}{Z} = 0,001$ bedeutet z. B., daß der Schritt $\frac{1}{1000}$ der Gesamtzeit umfaßt, die, unter Beibehaltung des augenblicklichen Wertes $i_g - i$, das gesamte Wärmeinhaltsgefälle zum Ausgleich brächte.

Das zu Δi zugehörige Δx , also die in der Zeit Δz eintretende Feuchtigkeitsvermehrung des Gases ergibt sich nach Formel (61) zu

$$\Delta x = \frac{F}{G_L} \cdot k' (x_g - x) \frac{\Delta z}{Z}, \quad (80)$$

wobei das Gefälle des Feuchtigkeitsgehaltes $x_g - x$ während der kurzen Zeit Δz als unveränderlich angesehen werden kann.

Aus Δi und Δx folgt die Lage des neuen Punktes im i - x -Bilde, der dem Gaszustande nach Ablauf der Zeit Δz entspricht. Seine Koordinaten sind $i + \Delta i$ bzw. $x + \Delta x$.

Für die Veränderung des Gutes ergibt sich aus Δx die Abnahme des Feuchtigkeitsgehaltes

$$-\Delta x = \Delta x \cdot \frac{G_L}{G_x} = \frac{F}{G_x} \cdot k' (x_g - x) \frac{\Delta z}{Z}. \quad (81)$$

$G_L \cdot \Delta i$ stellt die tatsächliche Zunahme des Wärmeinhaltes des Gases dar. Auf den Wärmeaustausch entfällt hiervon nur der Betrag

$$G_L (\Delta i - i_{\text{gft}} \cdot \Delta x).$$

Dieser ist gleichzusetzen der Abnahme des Wärmeinhaltes des Gutes,

die auf Wärmeaustausch zurückzuführen ist. Hieraus folgt, wenn kleine Werte zweiter Ordnung vernachlässigt werden,

$$\begin{aligned} G_L(\Delta i - i_{\text{WS}t} \cdot \Delta x) &= -\mathcal{G}_x(\Delta i - i_{\text{WS}t} \cdot \Delta x) \\ &= -\mathcal{G}_x[(c_x + c_{\text{WS}} \cdot x + c_{\text{WS}} \cdot \Delta x)(t + \Delta t) - (c_x + c_{\text{WS}} \cdot x)t - c_{\text{WS}} \cdot t \cdot \Delta x] \\ &= -\mathcal{G}_x(c_x + c_{\text{WS}} \cdot x) \Delta t = -\mathcal{G}_x \cdot \mathcal{C} \cdot \Delta t. \end{aligned} \quad (82)$$

Die Temperaturzunahme des Gutes Δt beträgt daher

$$\begin{aligned} \Delta t &= -\frac{G_L(\Delta i - i_{\text{WS}t} \cdot \Delta x)}{\mathcal{G}_x \cdot \mathcal{C}} = -\frac{F \cdot k' [i_g - i - i_{\text{WS}t}(x_g - x)]}{\mathcal{G}_x \cdot \mathcal{C}} \cdot \frac{\Delta z}{Z} \\ &= -\frac{F}{G_L} \cdot k' \cdot \frac{G_L}{\mathcal{G}_x \cdot \mathcal{C}} [i_g - i - i_{\text{WS}t}(x_g - x)] \frac{\Delta z}{Z}. \end{aligned} \quad (82a)$$

Ist der Körper feucht, so folgt mit Δt der Punkt, der dem neuen Zustande des Gutes im i - x -Bilde entspricht. Er liegt während der Vorwärmung und des Hauptabschnittes der Trocknung auf dem Schnittpunkte der Sättigungslinie mit der Temperaturlinie $t + \Delta t$.

Ist der Körper dagegen hygroskopisch und bezeichnet $\mathfrak{P}_e = P''_t$, die Dampfspannung des Gutes von dem Feuchtigkeitsgehalt x_e , bei dem die hygroskopische Wirkung beginnt, so gilt bei Annahme linearen Zusammenhanges zwischen $\frac{\mathfrak{P}}{P''}$ und x im hygroskopischen Gebiet

$$\begin{aligned} \frac{\mathfrak{P} + \Delta \mathfrak{P}}{P''_{t+\Delta t}} : (x + \Delta x) &= \frac{\mathfrak{P}_e}{P''_t} : x_e = 1 : x_e, \\ \mathfrak{P} + \Delta \mathfrak{P} &= P''_{t+\Delta t} \cdot \frac{x + \Delta x}{x_e}. \end{aligned} \quad (83)$$

Der Wert $\mathfrak{P} + \Delta \mathfrak{P}$ entspricht einem Punkte der P_D -Kurve im i - x -Bilde und legt mit diesem die Abszisse $x_g + \Delta x_g$ fest. Der Schnittpunkt der $(x_g + \Delta x_g)$ -Linie mit der $(t + \Delta t)$ -Linie liefert den neuen Zustandspunkt des hygroskopischen Gutes.

Auch für das i - x -Bild sind damit alle notwendigen Zahlen gefunden, um die Veränderung schrittweise zu verfolgen. Der Wert Δi folgt aus Formel (82) zu

$$\Delta i = \mathcal{C} \cdot \Delta t + i_{\text{WS}t} \cdot \Delta x. \quad (84)$$

Bewegen sich Gas und Gut im Gleichstrom, so sind die neu gefundenen Punkte G und \mathcal{G} einander zugeordnet. Bewegen sich beide jedoch im Gegenstrom, so gehört der neue Gaspunkt zu dem alten Guts- und der alte Gaspunkt zu dem neuen Guts- und Gutspunkt. Die schrittweise Berechnung kann daher beim Gleichstrom von dem Anfangszustand des Gases und des Gutes ausgehen. Beim Gegenstrom ist es nötig, vom Endzustand des Gases aus zu beginnen und seine Veränderung rückwärts zu verfolgen, während gleichzeitig der Zustand des Gutes sich vom Anfangs- zum Endwerte bewegt.

Zahlenbeispiel 8. Abb. 61 stellt das Ergebnis einer hiernach durchgeführten schrittweisen Berechnung der Zustandsänderung von Gas und Gut dar. Die hierfür nötige Rechenarbeit ist erheblich, wird aber reichlich gelohnt durch die wertvollen

Aufschlüsse, die sie bringt. Abb. 61 entspricht einem Gleichstromtrockner, bei dem die vorgewärmte Luft, entsprechend dem Punkte V , eine Temperatur von $t_v = 120^\circ$ und einen Feuchtigkeitsgehalt von $x_r = 0,0084$ besitzt. Der Anfangszustand des Gutes liegt bei R mit einer Temperatur $t_r = 10^\circ$. Der Nullpunkt \mathfrak{D} des mit dem i - x -Bilde verbundenen i - x -Bildes ist, wie beschrieben, festgelegt, wobei das Verhältnis $\frac{\text{Reinluft } G_L}{\text{Trockenstoff } G_x} = 20$, der anfängliche Feuchtigkeitsgehalt des Gutes $x_r = 0,5$, sein anfänglicher Wärmeinhalt $i_r = c_x \cdot t_r = (c_x + c_{xy} \cdot x_r) t_r = (0,37 + 1 \cdot 0,5) 10 = 8,7$ kcal/kg beträgt. Der Beharrungspunkt J wurde hierbei mit der Annahme $\xi_e = 0,2$ bei etwa 59° gefunden. Er liegt im i - x -Bilde bei einem

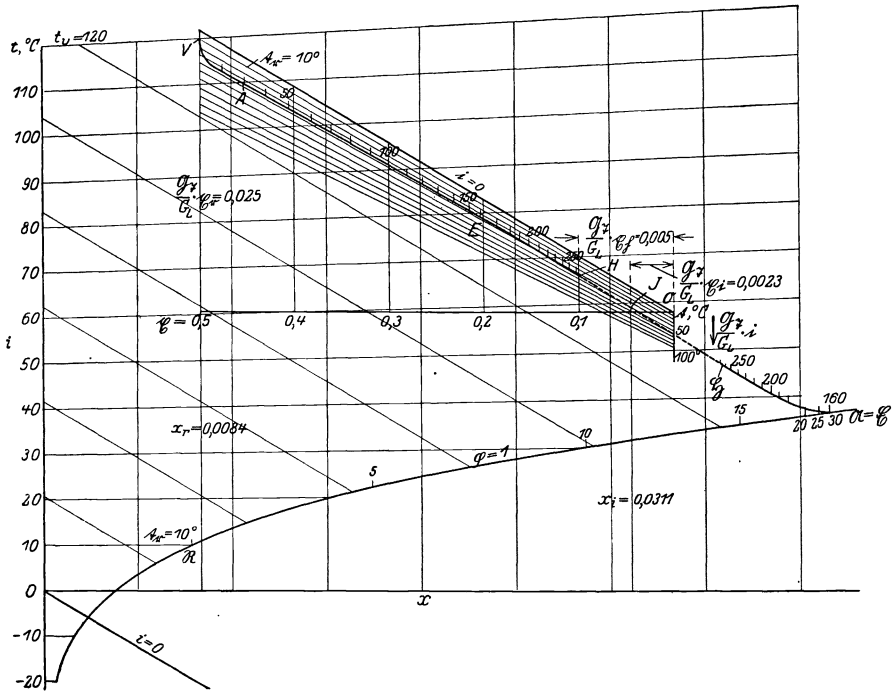


Abb. 61. Untersuchung eines Gleichstromtrockners $\left(\frac{G_x}{G_L} = \frac{1}{20} ; x_r = 0,5 ; \xi_e = 0,2 ; c_x = 0,37 \right)$.

Feuchtigkeitsgehalt $x_i = 0,0311$. Die im Grenzfalle mögliche Feuchtigkeitsaufnahme der Luft beträgt daher

$$0,0311 - 0,0084 = 0,0227 .$$

Ihr entspricht eine im Grenzfalle mögliche Entfeuchtung des Gutes in Höhe von $20 \cdot 0,0227 = 0,454$, also ein niedrigster Endfeuchtigkeitsgehalt von

$$x_i = 0,5 - 0,454 = 0,046 .$$

Die der Unterteilung der Zustandskurve beigeschriebenen Zahlen stellen die Vielfachen von $1000 \cdot \frac{F}{G_L} \cdot \alpha \cdot \frac{\Delta z}{Z}$ dar. Ihr wechselnder Abstand weist auf die Tatsache hin, daß die Trocknung nach Überwindung der Vorwärmung immer langsamer erfolgt. Die dem Zustande des Gutes im i - x -Bilde entsprechenden Punkte verlaufen zunächst auf der Sättigungslinie bis etwa zum Zeitpunkte 20. Der Zeit 20 bis 160 entspricht der Hauptabschnitt der Trocknung, währenddessen

der Gutspunkt unveränderlich bei $\mathfrak{A} \equiv \mathfrak{C}$ bleibt, der Luftzustand sich von A nach E längs der τ -Linie bewegt. Der Trockenvorgang ist bei dem Zeitpunkte H abgebrochen, in dem das Gut einen Endfeuchtigkeitsgehalt $\tau_H = 0,1$ und, entsprechend Punkt H im i - τ -Bilde, eine Temperatur von etwa 47° erreicht. Erscheint im bestimmten Falle diese Temperatur unzulässig hoch, so ergibt sich der frühere Punkt, mit dem die Trocknung abzuschließen ist, aus dem Schnittpunkt der für die zulässige Höchsttemperatur t_H geltenden Geraden des i - τ -Bildes mit der Zustandskurve $VAEH$. Die Zeitpunkteinteilung der Strecke $\mathfrak{A}\mathfrak{A}$ auf der Sättigungslinie zeigt, daß die Vorwärmung anfangs schneller als später erfolgt. Dies geht auch deutlich aus dem Verlauf der Zustandskurve zu den t -Linien des i - τ -Bildes hervor. Während des Ausgleichzustandes zwischen den Punkten A und E bleibt die Zustandskurve auf der $t = 36,6^\circ$ -Linie liegen. Sie entspricht der Kühlgrenztemperatur, wie sie Punkt $\mathfrak{A} \equiv \mathfrak{C}$ im i - x -Bilde angibt. Besonders klar

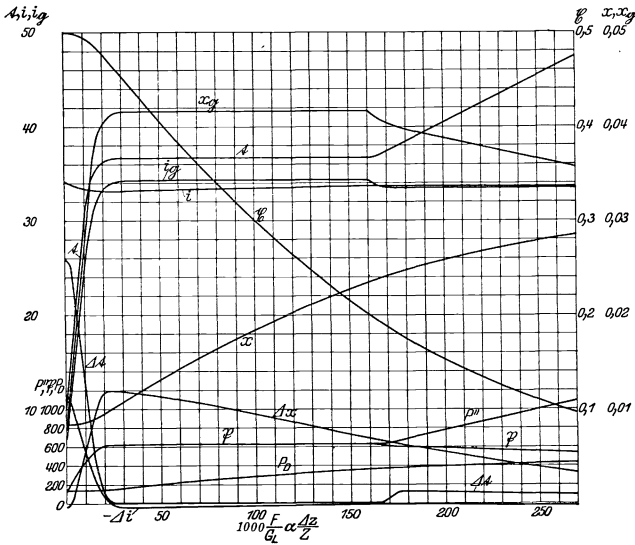


Abb. 62. Zeitbild zur Untersuchung eines Gleichstromtrockners
 $\left(\frac{G_x}{G_L} = \frac{1}{20}; \tau_e = 0,2; \tau_x = 0,37 \right)$.

werden diese Veränderungen, wenn nach Abb. 62 die wichtigsten Größen, die sich bei der schrittweisen Ermittlung ergeben, abhängig von dem Vielfachen von $1000 \cdot \frac{F}{G_L} \cdot \alpha \cdot \frac{\Delta z}{Z}$, also der Zeit als Abszissen, dargestellt werden. Sie zeigt in der Δx -Kurve, daß im ersten Augenblick der Feuchtigkeitsgehalt der Luft leicht abnimmt, d. h. Niederschlag auf das Gut eintritt. Die Schnelligkeit der Feuchtigkeitsaufnahme der Luft steigt rasch bis auf einen Höchstwert, um danach sich mehr und mehr zu verringern. Dem entspricht die Form der α - und der im umgekehrten Sinne verlaufenden τ -Kurve. Die Δt - und t -Kurven ergeben das rasche Ansteigen der Temperatur des Gutes während der Vorwärmung, ihr Verhalten bei etwa $36,6^\circ$ während des Hauptabschnittes der Trocknung und ihren abermaligen Anstieg im hygroscopischen Gebiete mit geringer Verzögerung bis zum Abbruch des Trockenvorganges. Der Abstand der in Abb. 62 aufgenommenen P_D - und β -Kurven stellt die für die augenblickliche Trockenkraft maßgebenden Beträge $\beta - P_D$ dar, wenn α' als unveränderlich angesehen wird. Ihr Höchstwert liegt mit rund 460 kg/m^2 etwa bei dem Punkt der beendigten Vorwärmung. Der Mindestwert beträgt im Augenblick des Abbruches der Trocknung mit rund 110 kg/m^2 noch knapp $\frac{1}{4}$ des Höchstwertes. Dieses Verhältnis muß natürlich

auch den Werten Δx zu Ende der Vorwärmung bzw. bei Abbruch der Trocknung entsprechen. Der scharfe Wendepunkt, den die t - und \mathfrak{R} -Kurve im hygrokopischen Punkt beim Zeitteil 160 nehmen, für den $\zeta_e = 0,2$ wird, entspricht der Annahme, daß hier plötzlich das hygrokopische Verhalten einsetzt, während es in Wirklichkeit natürlich allmählich beginnt.

Zahlenbeispiel 9. Eine zweite Untersuchung ist in den Abb. 63 und 64 niedergelegt. Der anfängliche Luftzustand entspricht hierbei einer Temperatur $t_p = 80^\circ$, sein Feuchtigkeitsgehalt x_r dem zuvor angenommenen Wert 0,0084. Auch die Anfangstemperatur des Gutes ist mit $t_r = 10^\circ$ beibehalten. Die Festlegung des i - x -Bildes hat jedoch geänderte Voraussetzungen, nämlich ein Verhältnis $\frac{G_L}{\Theta x} = 10$, $\zeta_r = \zeta_e = 0,2$, also Beginn des Trockenvorganges mit einem Feuchtigkeitsgehalt des Gutes, bei dem sein hygrokopisches Verhalten sofort einsetzt. Dementsprechend erhebt sich die Zustandskurve $\mathfrak{R}\mathfrak{S}$ des Gutes im i - x -Bild sofort, wenn auch anfangs langsam, über die Sättigungskurve. Ein ausgeprägter Hauptabschnitt der Trocknung fehlt. Der Beharrungspunkt $J \equiv \mathfrak{S}$ liegt bei etwa $42,8^\circ$ und einem im Grenzfalle denkbaren Endfeuchtigkeitsgehalt der Luft $x_i = 0,0208$, entsprechend einer möglichen Feuchtigkeitsaufnahme von $0,0208 - 0,0084 = 0,0124$, bzw. einer höchsten Feuchtigkeitsentziehung aus dem Gute von $10 \cdot 0,0124 = 0,124$. Der im Grenzfalle erreichbare Endfeuchtigkeitsgehalt des Gutes folgt hierbei zu

$$\zeta_i = 0,2 - 0,124 = 0,076.$$

Die zu Abb. 62 erwähnten Wendepunkte der t - und \mathfrak{R} -Kurven kommen bei Abb. 64 in Wegfall. Im übrigen stimmt der grundsätzliche Verlauf in beiden Fällen überein. Der die Trockenkraft bestimmende Spannungsunterschied erreicht beim Zeitpunkt 40 mit 250 kg/m^2 seinen Höchstwert und sinkt bei Abbruch der Trocknung mit etwa 65 kg/m^2 auch hier auf knapp $\frac{1}{4}$ des Höchstwertes.

Zahlenbeispiel 10. Die schrittweise Berechnung der Zustandsänderung für einen Gegenstromtrockner ist in Abb. 65 im i - x - i - x -Bilde und in Abb. 66 im Zeitbilde dargestellt. Sie entspricht dem Falle, daß die abgehende Luft, entsprechend Punkt H , eine Temperatur von etwa $t_h = 38^\circ$ und einen Feuchtigkeitsgehalt von $x_h = 0,0164$ besitzt. Der Anfangszustand des Gutes liegt bei \mathfrak{R} mit einer Temperatur von 10° . Der Nullpunkt \mathfrak{D} des mit dem i - x -Bild verbundenen i - x -Bildes ist für ein Verhältnis $\frac{G_L}{\Theta x} = 50$, einen anfänglichen Feuchtigkeitsgehalt

$\zeta_r = 0,5$ und einen anfänglichen Wärmeinhalt $i_r = (0,37 + 0,5) 10 = 8,7$ gefunden. $\zeta_e = 0,2$ entspricht dem Feuchtigkeitsgehalt im hygrokopischen Punkt. Der Feuchtigkeitsgehalt der Rohluft ist, wie in dem vorausgehenden Falle, mit $x_r = 0,0084$ angenommen. Die Untersuchung führt zu einem Punkt V , dem eine Temperatur $t_v = 59^\circ$ der vorgewärmten Luft entspricht.

Beim Entwurf des Zeitbildes Abb. 66 ist zu beachten, daß für die auf den Luftzustand bezogenen Werte Δx , x , i die Zeiten rückwärts zählen. Es fällt Punkt V mit \mathfrak{S} , A mit \mathfrak{C} , E mit \mathfrak{A} und H mit \mathfrak{R} zusammen. Aus dem Zeitbilde ergibt sich, daß der Hauptabschnitt der Trocknung etwa zwischen den Zeitpunkten 20 und 210 verläuft. Aus dem Verlauf der Δx -Kurve geht hervor, daß zunächst ein lebhafter Feuchtigkeitsniederschlag auf das Gut eintritt. Wie die x -Kurve zeigt, spielt er gleichwohl zahlenmäßig keine Rolle. Er kehrt außerdem alsbald in das Gegenteil um, so daß mit beendigter Vorwärmung der Niederschlag etwa wieder ausgeglichen ist. Im weiteren Verlauf zeigt die x -Kurve entgegengesetzte Krümmung wie in der dem Gleichstrom entsprechenden Abb. 62. Die Trocknung nimmt beim Gegenstrom einen mit dem Fortschreiten des Gutes mehr und mehr beschleunigten Verlauf, während beim Gleichstrom eine allmähliche Verzögerung eintritt. Dies geht auch aus dem Verlauf von Δx hervor. Die t -Kurve erreicht nach dem raschen Ansteigen während der Vorwärmung im Ausgleichszustande bei etwa $25,9^\circ$ die Kühlgrenze und steigt im hygrokopischen Gebiet im Zeitpunkte 258, mit dem der Endfeuchtigkeitsgehalt $\zeta_b = 0,1$ erreicht wird, auf etwa $34,4^\circ$. Ein Maß der Trockenkraft gibt neben Δx der Abstand der P_D - und \mathfrak{R} -Kurven. Er ist, entsprechend dem anfänglichen Feuchtigkeitsniederschlag, zunächst negativ,

nimmt nach dem Kreuzungspunkt bis zum Ende des Haupttrockenabschnittes ständig zu, im hygroskopischen Gebiete allmählich ab. Der Höchstwert liegt mit

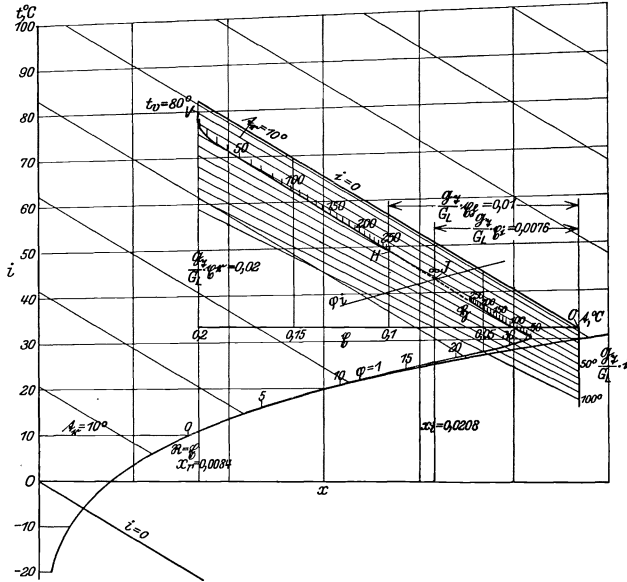


Abb. 63. Untersuchung eines Gleichstromtrockners $\left(\frac{G_T}{G_L} = \frac{1}{10}; \varepsilon_r = \varepsilon_e = 0,2; c_x = 0,37 \right)$.

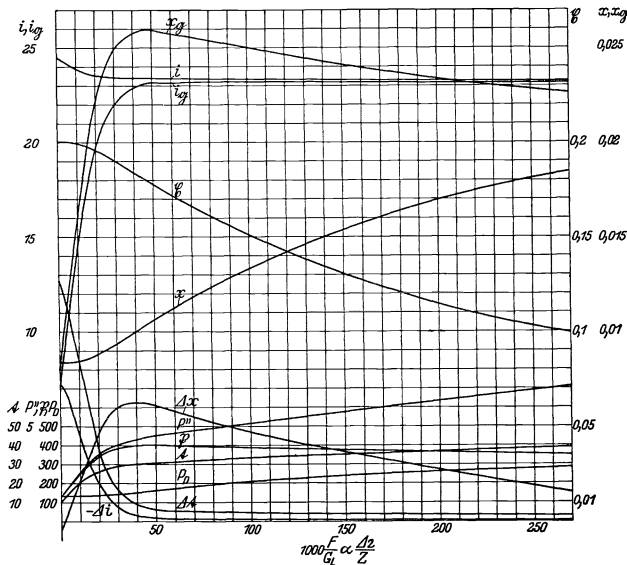


Abb. 64. Zeitbild zur Untersuchung eines Gleichstromtrockners

$$\left(\frac{G_T}{G_L} = \frac{1}{10}; \varepsilon_e = 0,2; c_x = 0,37 \right)$$

rund 180 kg/m^2 im Endpunkte des Hauptabschnittes. Dem Abbruch der Trocknung entspricht ein Wert von etwa 145 kg/m^2 .

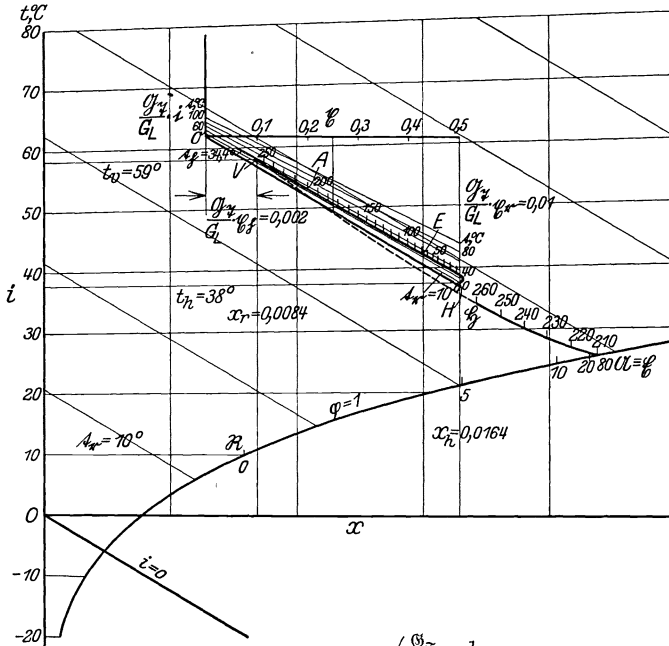


Abb. 65. Untersuchung eines Gegenstromtrockners $\left(\frac{G_x}{G_L} = \frac{1}{50}; x_i = 0,5; x_e = 0,2; c_x = 0,37 \right)$.

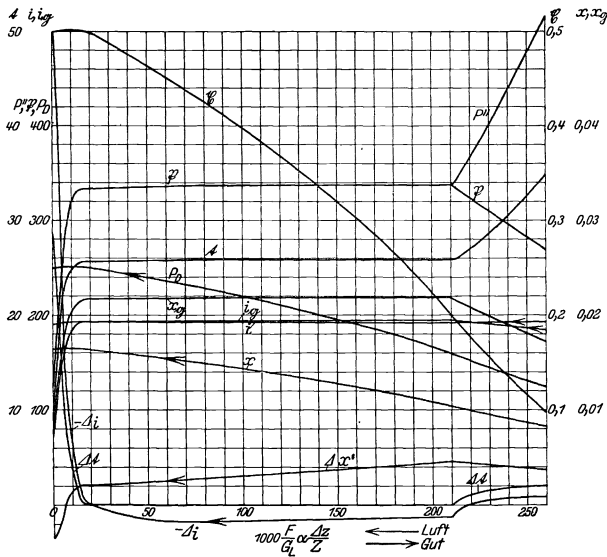


Abb. 66. Zeitbild zur Untersuchung eines Gegenstromtrockners

$$\left(\frac{G_x}{G_L} = \frac{1}{50}; x_e = 0,2; c_x = 0,37 \right)$$

E. Die rechnerische Verfolgung des Trockenvorganges.

Die genaue Verfolgung des Trockenvorganges im i - x - i - x -Bilde unter Berücksichtigung des zeitlichen Verlaufes ist zwar mühsam, wenn sie restlos alle Einzelheiten darstellen soll, gleichwohl aber wegen ihrer Anschaulichkeit das richtige Verfahren. Daneben tritt die rein rechnerische Behandlung in den Hintergrund. Berechtigung kommt ihr nur für die Teile des Trockenvorganges zu, bei denen einfache Formeln zum Ziele führen, wie bei der in Abschnitt V. E. durchgeführten zahlenmäßigen Untersuchung des Hauptabschnittes der Trocknung. Dagegen erscheinen die verwickelteren Vorgänge vor und nach dem Hauptabschnitt für die rechnerische Behandlung weniger geeignet. Sie kann gleichwohl in Betracht gezogen werden, wenn es sich um Untersuchungen handelt, für die Vernachlässigung von Nebenumständen zulässig ist.

1. Gleichstrom.

Kann im besonderen Falle die Zustandsänderung der Luft während der Vorwärmung vernachlässigt werden, wie dies z. B. zutrifft, wenn Gut mit hohem Anfangsfeuchtigkeitsgehalt durch große Mengen Luft getrocknet wird, und kann ferner von der Veränderung des Feuchtigkeitsgehaltes im Gute während der Vorwärmung abgesehen werden, so läßt sich eine rechnerische Beziehung für die zeitliche Temperaturänderung des Gutes aufstellen. Nach Formel (71) ist

$$dt = \frac{F}{G_x} \cdot \frac{k'}{C_r} \cdot \frac{dz}{Z} [i_v - i_g - i_{\text{St}}(x_v - x_g)],$$

wobei i_v und x_v die dem gleichbleibenden Luftzustande zukommenden Werte bedeuten. Liegt der Taupunkt t''_x der Luft und seine Kühlgrenze τ nicht allzu weit voneinander entfernt, so kann nach Abb. 67 das Stück CD der Sättigungslinie zwischen beiden in roher Annäherung als Gerade angesehen werden. Wird weiter von der Veränderung der spezifischen Wärme des Gutes abgesehen, so liefert Abb. 67 die Beziehung

$$\frac{CG}{FD} = \frac{BG}{VD}$$

oder

$$\frac{\tau - t}{\tau - t''_x} \approx \frac{i_v - i_g - i_{\text{St}}(x_v - x_g)}{i_v - i''_{t_x}}.$$

Wird die vorletzte Gleichung durch die letzte geteilt, so ergibt sich

$$\frac{dt}{\tau - t} \approx \frac{F}{G_x} \cdot \frac{k'}{C_r} \cdot \frac{i_v - i''_{t_x}}{\tau - t''_x} \cdot \frac{dz}{Z}.$$

Da τ und sämtliche auf der rechten Seite der Formel stehenden Größen als gleichbleibend angesehen werden dürfen, ist diese Gleichung integrierbar. Die Integrierung liefert, wenn die Ausgangszeit $z_r = 0$ gesetzt wird,

$$\ln \frac{\tau - t_r}{\tau - t} \approx \frac{F}{G_x} \cdot \frac{k'}{C_r} \cdot \frac{i_v - i''_{t_x}}{\tau - t''_x} \cdot \frac{z}{Z}. \quad (85)$$

Für den Grenzwert $t = \tau$ ergibt sich $\frac{z_a}{Z} = \infty$. Die Vernachlässigung der Veränderung des Feuchtigkeitsgehaltes von Luft und Gut führt

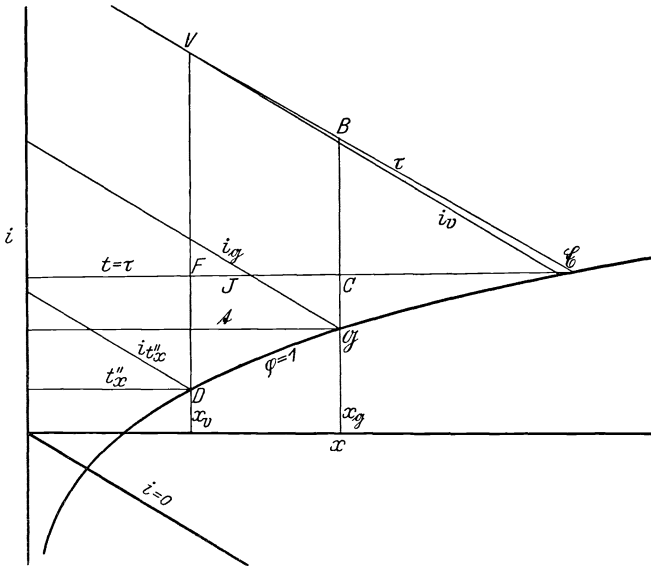


Abb. 67. i - x -Bild.

dazu, daß diese Formel für die Ermittlung des genauen Zeitpunktes, mit dem der Hauptabschnitt der Trocknung beginnt, nicht benutzt werden kann. Wird dagegen die Frage so gestellt, daß die Zeit gesucht wird, nach deren Ablauf der Temperaturunterschied $\tau - t$ nahezu verschwunden, also z. B. auf $\frac{1}{n}$ des ursprünglichen Wertes $\tau - t_r$ gesunken ist, so folgt

$$\frac{z'_a}{Z} = \ln n \cdot \frac{Gx}{F} \cdot \frac{c_r}{k'} \cdot \frac{\tau - t'_x}{i_v - i'_x} \quad (86)$$

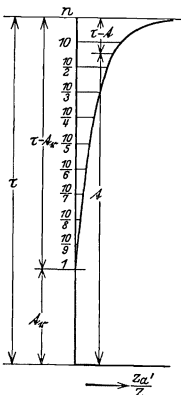


Abb. 68. Angenäherter zeitlicher Verlauf der Vorwärmung.

Für $\frac{1}{n} = \frac{1}{5}, \frac{1}{10}, \frac{1}{20}, \frac{1}{50}, \frac{1}{100}, \frac{1}{1000}$ verhalten sich daher die Zeiten z'_a wie 1,6, 2,3, 3, 3,9, 4,6, 6,9. Bei der überschlägigen Rechnung, wie sie die rohen Voraussetzungen erheischen, darf mit etwa $\frac{1}{n} = \frac{1}{10}$ die

Vorwärmung als abgeschlossen betrachtet und der weitere Verlauf als Hauptabschnitt der Trocknung angesehen werden. Wegen der vielfachen Annahmen eignet sich Formel (86) nicht zur genauen Berechnung, sondern nur zur Beurteilung der für die Vorwärmung erforderlichen Zeitdauer der Größenordnung nach. Für einen bestimmten, in Abb. 61 und 62 behandelten Fall gibt Abb. 68 den zeitlichen Verlauf der Temperatur t ,

wenn Formel (86) zugrunde gelegt wird und der Abszissenmaßstab mit Abb. 62 übereinstimmt.

Der zeitliche Verlauf des Trockenvorganges während des hygroskopischen Zustandes des Gutes läßt sich rechnerisch in Annäherung feststellen, wenn von der Temperaturänderung des Gutes abgesehen und der Zustand des Trockenmittels als gleichbleibend angenommen

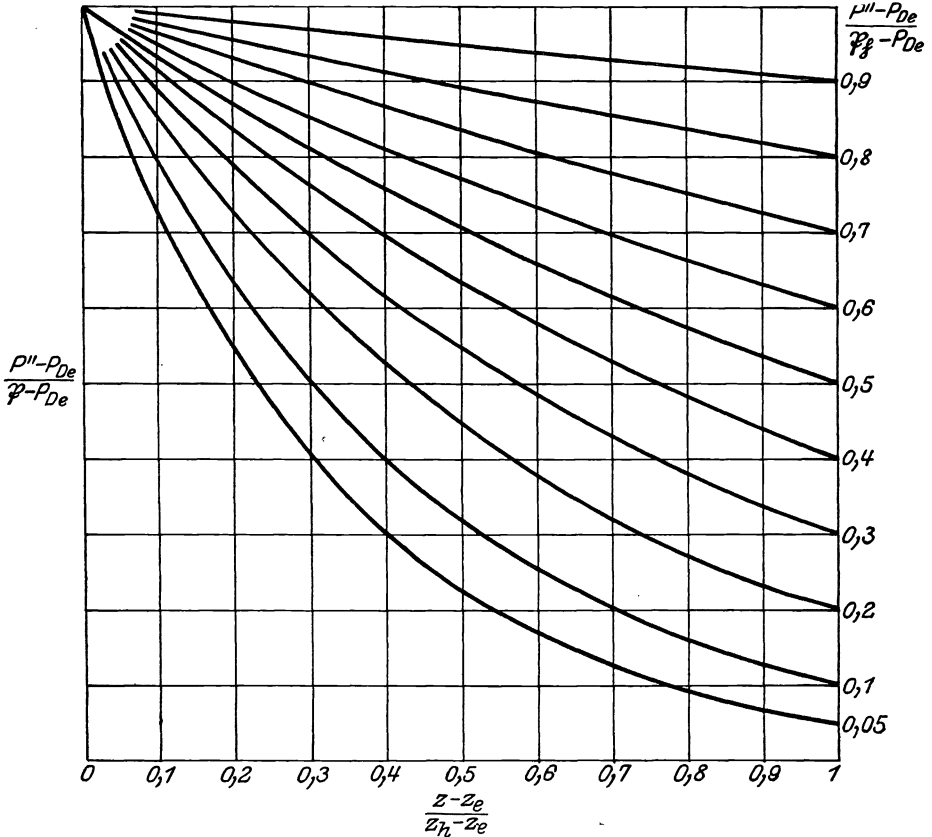


Abb. 69. Zeitlicher Verlauf der Trocknung im hygroskopischen Gebiet.

wird. Es folgt nämlich alsdann die übertragene Verdampfwärme zu

$$\Theta_x \cdot d\xi (i_{Dt} - i_{\text{St}t}) \approx F \cdot \alpha' (\mathfrak{P} - P_D) \frac{dz}{Z}.$$

Da

$$\mathfrak{P} = P'' \cdot \frac{\xi}{\xi_e}$$

gesetzt werden kann, ergibt sich

$$\frac{d\xi}{\frac{P''}{\xi_e} \cdot \xi - P_D} \approx \frac{F \cdot \alpha'}{\Theta_x (i_{Dt} - i_{\text{St}t})} \cdot \frac{dz}{Z}.$$

Die Gleichung ist integrierbar, wenn α' als gleichbleibend angenommen wird. Die Integrierung ergibt

$$\frac{z - z_e}{Z} \approx \frac{\mathcal{G}_x(i_{Dt} - i_{\mathfrak{B}t})}{F \cdot \alpha' \cdot \frac{P''}{\xi_e}} \cdot \ln \frac{\frac{P''}{\xi_e} \cdot \xi_e - P_{De}}{P'' \cdot \frac{\xi}{\xi_e} - P_{De}}.$$

Da ferner für $z = z_h$

$$\frac{z_h - z_e}{Z} \approx \frac{\mathcal{G}_x(i_{Dt} - i_{\mathfrak{B}t})}{F \cdot \alpha' \cdot \frac{P''}{\xi_e}} \cdot \ln \frac{P'' - P_{De}}{P'' \cdot \frac{\xi_h}{\xi_e} - P_{De}}$$

gilt, folgt

$$\frac{z - z_e}{z_h - z_e} \approx \frac{\ln \frac{P'' - P_{De}}{\frac{P''}{\xi_e} \cdot \xi - P_{De}}}{\ln \frac{P'' - P_{De}}{P'' \cdot \frac{\xi_h}{\xi_e} - P_{De}}} \approx \frac{\ln \frac{P'' - P_{De}}{\mathfrak{B} - P_{De}}}{\ln \frac{P'' - P_{De}}{\mathfrak{B}_h - P_{De}}},$$

$$\frac{P'' - P_{De}}{\mathfrak{B} - P_{De}} = \left(\frac{P'' - P_{De}}{\mathfrak{B}_h - P_{De}} \right)^{\frac{z - z_e}{z_h - z_e}}. \quad (87)$$

In Abb. 69 ist die Veränderung von $\frac{P'' - P_{De}}{\mathfrak{B} - P_{De}}$ abhängig von $\frac{z - z_e}{z_h - z_e}$ für verschiedene Endwerte $\frac{P'' - P_{De}}{\mathfrak{B}_h - P_{De}}$ dargestellt. Die Kurven verlaufen mit abnehmendem Verhältnis $\frac{P'' - P_{De}}{\mathfrak{B}_h - P_{De}}$ anfangs immer steiler.

Die Trockenleistung beträgt

$$\begin{aligned} \int_{z_e}^z dQ &= \frac{F \cdot \alpha'}{i_{Dt} - i_{\mathfrak{B}t}} \int_{\xi_e}^{\xi} \left(\frac{P''}{\xi_e} \cdot \xi - P_{De} \right) \frac{dz}{Z} = \frac{F \cdot \alpha'}{i_{Dt} - i_{\mathfrak{B}t}} \int_{\xi_e}^{\xi} (P'' - P_{De}) \cdot \left(\frac{P'' \cdot \frac{\xi_h}{\xi_e} - P_{De}}{P'' - P_{De}} \right)^{\frac{z - z_e}{z_h - z_e}} \cdot \frac{dz}{Z} \\ &= \frac{F \cdot \alpha' (P'' - P_{De})}{i_{Dt} - i_{\mathfrak{B}t}} \cdot \frac{\left(\frac{P'' \cdot \frac{\xi_h}{\xi_e} - P_{De}}{P'' - P_{De}} \right)^{\frac{z_e - z_e}{z_h - z_e}} - \left(\frac{P'' \cdot \frac{\xi_h}{\xi_e} - P_{De}}{P'' - P_{De}} \right)^{\frac{z - z_e}{z_h - z_e}}}{\ln \frac{P'' - P_{De}}{P'' \cdot \frac{\xi_h}{\xi_e} - P_{De}}} \cdot \frac{z - z_e}{Z} \\ &= \frac{F \cdot \alpha' (P'' - P_{De})}{i_{Dt} - i_{\mathfrak{B}t}} \cdot \frac{1 - \frac{P'' \cdot \frac{\xi}{\xi_e} - P_{De}}{P'' - P_{De}}}{\ln \frac{P'' - P_{De}}{P'' \cdot \frac{\xi_h}{\xi_e} - P_{De}}} \cdot \frac{z - z_e}{Z} \\ &= \frac{F \cdot \alpha'}{i_{Dt} - i_{\mathfrak{B}t}} \cdot \frac{P'' - \mathfrak{B}}{\ln \frac{P'' - P_{De}}{\mathfrak{B} - P_{De}}} \cdot \frac{z - z_e}{Z}. \end{aligned}$$

Der Verlauf von $\int_{z_e}^z dQ'$, d. h. der augenblicklichen Trockenleistung, wird gleichfalls durch Abb. 69 dargestellt. Die Ordinaten sind hierbei jedoch von der oberen Abszissenachse nach unten abzulesen. Für die gesamte Zeit der Fertigtrocknung im hygrokopischen Gebiet $z_h - z_e$ ergibt sich

$$\int_{z_e}^{z_h} dQ' = \frac{F \cdot \alpha'}{(i_{Dt} - i_{\text{St}})} \cdot \frac{P'' - \mathfrak{P}_h}{\ln \frac{P'' - P_{De}}{\mathfrak{P} - P_{De}}} \cdot \frac{z_h - z_e}{Z}$$

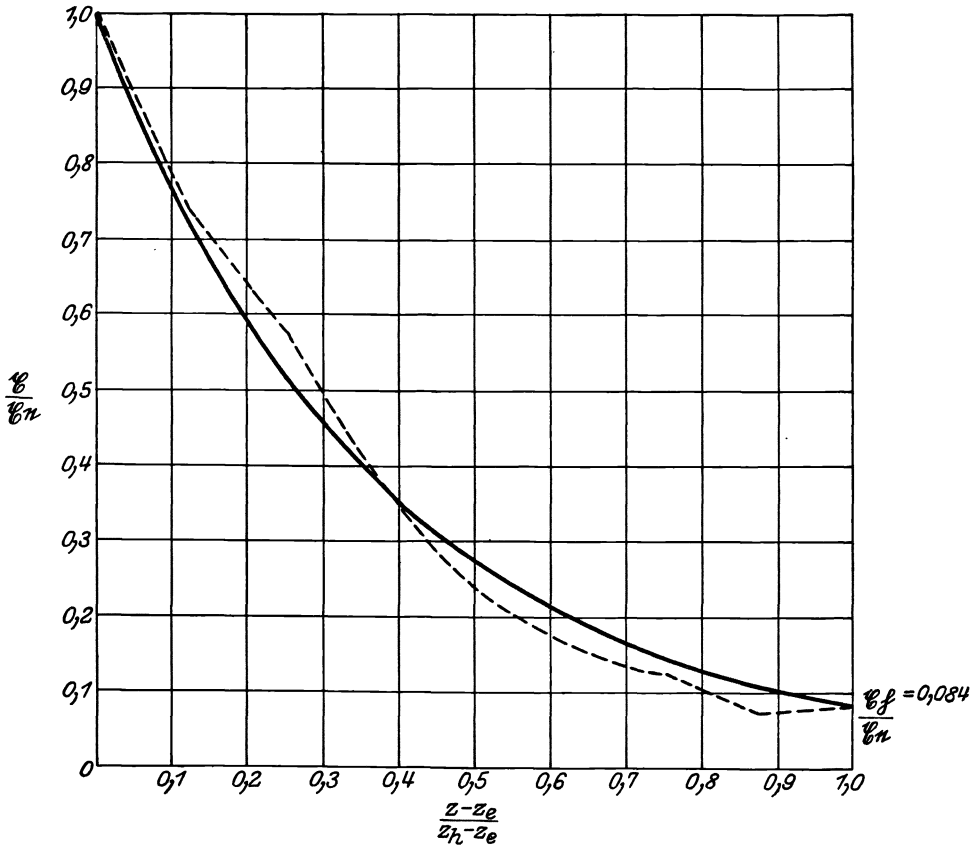


Abb. 70. Zeitlicher Verlauf der Maltrocknung im hygrokopischen Gebiet (Wagner-Fischer).

Der Betrag

$$\frac{P'' - \mathfrak{P}_h}{\ln \frac{P'' - P_{De}}{\mathfrak{P} - P_{De}}} = \frac{(P'' - P_{De}) - (\mathfrak{P}_h - P_{De})}{\ln \frac{P'' - P_{De}}{\mathfrak{P} - P_{De}}} \tag{88}$$

stellt den Mittelwert des Spannungsunterschiedes dar und entspricht in der Form genau dem Mittelwert des Temperaturunterschiedes bei Wärmeübertragung zwischen trockenen Körpern.

Daß diesen Erörterungen mehr als nur theoretische Bedeutung zukommt, ergibt sich aus Abb. 70, in der gestrichelt der durch Versuch festgestellte Verlauf bei der Malztrocknung eingetragen ist, wie ihn Wagner-Fischer¹ angeben. Die ausgezogene Kurve entspricht einer für $\frac{P'' - P_{De}}{P_h - P_{De}} = 0,084$ interpolierten Kurve der Abb. 69. Beide stimmen sehr befriedigend überein.

Die für den Hauptabschnitt durchgeführte Berechnung der zeitlichen Veränderung von x liefert auch die gleichzeitig sich vollziehende Änderung von χ . Die χ -Kurve kann infolgedessen im Zeitbild der Abb. 71 eingetragen werden, das die Zeit des Hauptabschnittes und der Trock-

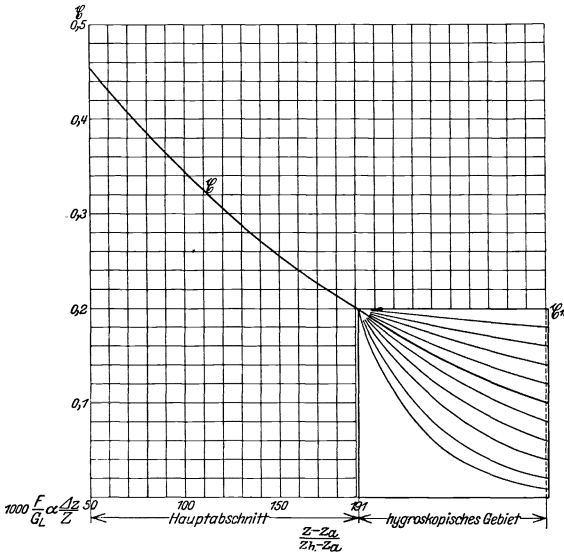


Abb. 71. Angenäherter zeitlicher Verlauf der Trocknung im Hauptabschnitt und im hygroskopischen Gebiet.

nung im hygroskopischen Gebiet im Maßstab der Abb. 62 umfaßt. Der weitere Verlauf in das Gebiet des hygroskopischen Verhaltens hinein läßt sich, unter Benutzung der Abbildung 69, in überraschend einfacher Weise feststellen. Sie ist zu diesem Zwecke für eine bestimmte Gutsart ein- für allemal in einem Maßstabe zu entwerfen, daß die gesamte Ordinatenhöhe den Wert χ_e in dem gleichen Maßstabe darstellt, der im Zeitbild für die χ -Ordinaten gewählt ist. Ist also z. B. $\chi_e = 0,2$ und wird dieser Wert im Zeitbild durch eine Ordinatenhöhe von 10 cm dargestellt, so muß auch Abb. 69 mit einer gesamten Ordinatenhöhe von 10 cm entworfen werden. Die Abszissenlänge der Abb. 69 ist zunächst ohne ausschlaggebende Bedeutung. Sie soll aus später erörterten Gründen nicht zu kurz sein. Wird die so entworfene Abb. 69, wie in Abb. 71 gezeigt, mit der oberen linken Ecke, in der die Kurven zusammenlaufen, auf den Punkt der χ -Kurve des Zeitbildes gelegt, dessen Ordinate χ_e entspricht, so stellt irgendeine der Kurven der Abb. 69 (in Abb. 71 die stark ausgezogene) die natürliche Fortsetzung der für den Hauptabschnitt der Trocknung gültigen χ -Kurve dar, nämlich die, bei der die anfängliche Neigung zur Abszissenachse gleich der Neigung der χ -Kurve in dem χ_e zugeordneten Endpunkt ist. Stimmt keine der Kurven genügend genau überein, so kann eine zwischen zwei benachbarten Kurven liegende gefühlsmäßig eingezeichnet werden. Die so gefundene Kurve stellt den Ver-

¹ Wagner-Fischer: Jahresberichte über die Leistungen der chemischen Technologie.

lauf der ϱ -Kurve im Zeitbilde dar. Die Wahl einer langen Abszissenachse soll dazu dienen, den Verlauf bis zum Ende des Zeitbildes zu verfolgen. Erfüllt z. B. die Kurve der Abb. 69, die dem Werte $\frac{P'' - P_{De}}{\varrho_{\text{h}} - P_{De}} = 0,5$ entspricht, die Bedingung, so bedeutet dies, daß in einem Zeitpunkt, der der Endabszisse der Abb. 69 entspricht, das Verhältnis $\frac{P'' - P_{De}}{\varrho_{\text{h}} - P_{De}}$ den Wert 0,5, d. i. $\varrho = 0,5 \cdot \varrho_{\text{e}}$ und in allen Zwischenlagen den durch die Ordinaten dieser Kurve gemessenen Wert ϱ besitzt.

Eine andere Entwurfsweise des im hygroskopischen Gebiet verlaufenden Stückes der ϱ -Kurve ergibt sich aus der Überlegung, daß die Kurven der Abb. 69 in Geraden übergehen, wenn für die Abszissen logarithmischer Maßstab gewählt ist. Das letzte Stück der ϱ -Kurve im Hauptabschnitt stellt die natürliche Fortsetzung einer der Kurven in Abb. 69 dar, muß also ebenfalls gerade verlaufen, wenn der logarithmische Abszissenmaßstab auch in das Gebiet des Hauptabschnittes hinein ausgedehnt wird. Die Gerade des letzten Stückes der ϱ -Kurve im Hauptabschnitt fällt in der Richtung mit einer Geraden der auf logarithmischen Abszissenmaßstab umgezeichneten Abb. 69 zusammen, d. h. die Fortsetzung des geraden Endstückes der ϱ -Kurve im Hauptabschnitt stellt den weiteren Verlauf im hygroskopischen Gebiete dar. Abb. 69 kann daher entbehrt werden. Nach Abb. 72 ist bis zu einem Punkte innerhalb des Hauptabschnittes, der nahe dem Endpunkte \mathcal{C} liegt, die Abszisseneinteilung von \mathcal{C} her in logarithmischem Maße fortgeführt und das Endstück der ϱ -Kurve darauf zu übertragen. Die geradlinige Fortsetzung kann alsdann von der logarithmischen Abszisseneinteilung in die gewöhnliche zurück übertragen werden.

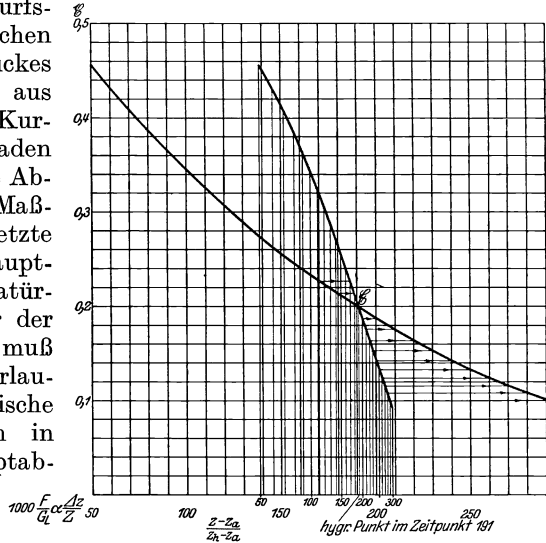


Abb. 72. Zeichnerische Festlegung des angenäherten zeitlichen Verlaufs der Trocknung im hygroskopischen Gebiet.

2. Gegenstrom.

Für den Gegenstrom ändert sich die Formel (85) in

$$\ln \frac{\tau - t_r}{\tau - t} = \frac{F}{G_x} \cdot \frac{k'}{G_x} \cdot \frac{i_h - i''_{t_2}}{\tau - t''_x} \cdot \frac{z}{Z}, \tag{85a}$$

ferner die Formel (86) in

$$\frac{z'_a}{Z} = \ln n \cdot \frac{G_x}{F} \cdot \frac{G_r}{k'} \cdot \frac{\tau - t''_x}{i_h - i''_x} \quad (86a)$$

Die danach errechneten Zeiten z'_a sind im Zeitbilde genau wie beim Gleichstrom einzutragen. Sie entsprechen der Vorwärmung des Gutes zwischen den Punkten \mathfrak{R} und \mathfrak{U} einerseits, der Veränderung des Luftzustandes zwischen den Punkten H und E andererseits.

Das auf logarithmischen Abszissenmaßstab übertragene Endstück der τ -Kurve im Hauptabschnitt liefert in seiner Richtung auch hier den

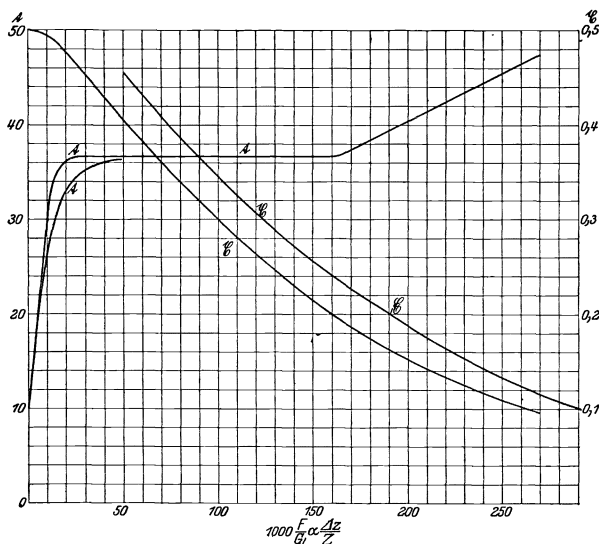


Abb. 73. Vergleich des rechnerischen Verfahrens mit der schrittweisen Ermittlung im Zeitbilde für einen Gleichstromtrockner.

Verlauf von τ im hygroscopischen Gebiet, zunächst für logarithmischen Abszissenmaßstab, von dem die Übertragung auf den gewöhnlichen ohne weiteres erfolgen kann.

Die Berechnungsweise für Vorwärmung, Hauptabschnitt und hygroscopisches Gebiet muß nach vorstehendem verschiedene Wege gehen. Sie führt bei der Vorwärmung zur Ermittlung der t -Kurve im Zeitbilde, die eine Annäherung

darstellt. Für den Hauptabschnitt liefert sie — genauer als die schrittweise Untersuchung — die τ -Werte im Zeitbilde. Für das hygroscopische Gebiet schließlich wird die τ -Kurve im Zeitbilde zwischen den Grenzen τ_e und τ_h gefunden. Um einen Vergleich über die Genauigkeit der beiden Verfahren zu ermöglichen, sind in Abb. 73 die nach Abb. 61 und 62 schrittweise gefundenen Kurven für t und τ im Zeitbilde wiederholt und die rechnerisch ermittelten Kurvenstücke für t während der Vorwärmung, τ während des Hauptabschnittes und im hygroscopischen Gebiet beigelegt. Der Vergleich zeigt:

die Vorwärmung verläuft rascher, als die angenäherte Rechnung ergibt,

der Hauptabschnitt der Trocknung verläuft nach der genaueren Rechnung langsamer, als sich bei schrittweiser Ermittlung findet,

die Übereinstimmung im hygroscopischen Gebiet ist überraschend gut.

Die Auswertung und Aneinanderschließung der rechnerisch gefundenen Kurvenstücke erfolgt ohne Schwierigkeit im verbundenen $i-x-i-x$ -Bild, wie in Abb. 58 angedeutet ist. Fest liegen die Hauptpunkte der Zustandskurve und die Lage des Koordinatenursprunges \mathcal{O} des $i-x$ -Bildes. Die für den Verlauf der Vorwärmung gefundene t -Kurve im Zeitbild liefert die Zeiteinteilung des der Vorwärmung entsprechenden Stückes der Zustandskurve im $i-x$ -Bilde und ermöglicht damit die Übertragung der x -Werte vom $i-x-i-x$ -Bilde ins Zeitbild. Wird schließlich für den hygrokopischen Verlauf die Zeiteinteilung auf die x -Kurve in das $i-x-i-x$ -Bild übertragen, so folgt hieraus für die einzelnen Zeitabschnitte der Wert t innerhalb der Grenzen t_e und t_h . Er kann zur Ergänzung in das Zeitbild übertragen werden. Für den Hauptabschnitt verläuft die t -Linie im Zeitbild, entsprechend der Beziehung $t_a = t_e$, parallel zur Abszissenachse.

Hiermit ist der geschlossene Verlauf der t - und x -Linie im Zeitbild gewonnen. Wird auch auf die im $i-x$ -Bilde dem Hauptabschnitt entsprechende τ -Linie die Zeiteinteilung aus dem Zeitbilde übertragen, so können auch die Zustandskurven der Trockenluft für t , x , i im Zeitbilde wiedergegeben werden. Im allgemeinen wird die Untersuchung sich mit der Darstellung der t - und x -Kurven im Zeitbilde begnügen, da sie das Mittel liefert, um die Hauptfragen zu beantworten:

Welche Zeit fordert die Trocknung innerhalb der Grenzen x_t und x_h ?

Welche Zeit entfällt auf die drei Abschnitte des Trockenvorganges?

Welche Abkürzung erfährt die Trockenzeit, wenn der Vorgang bei einem Endfeuchtigkeitsgehalt $x \leq x_h$ abgebrochen wird?

Wie lange wirken die verschiedenen Temperaturen auf das Gut?

Die letzte Frage ist besonders dann wichtig, wenn die Formgebung und Körpereigenschaften des Gutes insofern ungünstig sind, als sie nicht einen sofortigen Temperaturausgleich bis in den Kern der einzelnen Stücke sichern. Alsdann bedeutet rascher Temperaturwechsel im Zeitbilde ein starkes zeitliches Voreilen der äußeren Schichten, die z. B. rascher die Kühlgrenze bei der Vorwärmung erreichen und ihre Temperatur im hygrokopischen Gebiet längs einer steileren t -Linie, d. h. bis zu einem höheren Endwerte t_h , verändern, als aus dem Zeitbilde hervorgeht. Für die Kernteile ist das Umgekehrte der Fall. Im Hauptabschnitt der Trocknung kann, abgesehen von der Verschiebung des Beginns, eine gleichmäßige Trocknung erwartet werden, weil hier t sich nicht verändert. Dagegen bleiben auch hier die bei zu hoher Trockengeschwindigkeit auftretenden Unterschiede im Feuchtigkeitsgehalt des Kerns und der Oberfläche bei stark schrumpfendem und wenig elastischem Gut bedenklich.

Selbst wenn in dem beschriebenen Sinne die rechnerische Verfolgung des zeitlichen Verlaufes des Trockenvorganges, unter Verzicht auf die schrittweise Ermittlung, angenähert erfolgt, ergeben sich Aufschlüsse, die außerordentlich viel weiter gehen, als der früher übliche Rechnungsgang. Dieser betrachtete es nämlich als zulässig, den Endfeuchtigkeitsgrad φ_h der Trockenluft von vornherein anzunehmen und daraus, unter Festlegung der Höchsttemperatur der Luft, die Menge der auf-

zuwendenden Reinfluft G_L und die Höhe des Wärmeverbrauches für die jeweils vorliegenden Frischluftverhältnisse zu ermitteln. Die Berücksichtigung des für die Vorwärmung erforderlichen Wärmeverbrauches erfolgte durch einen Zuschlag, der auch die Streuverluste und den Wärmeverbrauch für die im hygroskopischen Gebiete über die Kühlgrenze hinaus eintretende Temperaturerhöhung des Gutes einschloß. Dieser Zuschlag war in der Regel von gleicher Größenordnung wie die rechnerisch ermittelte Zahl des theoretischen Wärmeverbrauches, häufig ein Vielfaches davon. Schon hieraus ergibt sich die Unzulässigkeit des rohen Annäherungsverfahrens. Noch klarer wird sie durch die Überlegung, daß dabei die Frage der Trockendauer Z rechnerisch überhaupt nicht angefaßt wurde, sondern nur als Erfahrungszahl auftrat, mit der das Fassungsvermögen $G_x \cdot Z$ schließlich festgelegt wurde. Die Untersuchung des hygroskopischen Verhaltens des Gutes wurde in der üblichen Behandlungsweise kaum erwähnt, geschweige denn der Versuch unternommen, die sich einstellende Endtemperatur des Gutes zu finden.

Das Verfahren für Überschlagsrechnungen ohne Berücksichtigung von Vorwärmung und hygroskopischem Gebiet ist in Zahlenbeispiel 6 beschrieben.

Die Untersuchung ist stets zweimal, einmal für die ungünstigsten Winterverhältnisse, dann für die ungünstigsten Sommerverhältnisse zu führen. Sie liefert für den Winter einen höchsten Wärmeverbrauch, der für die Bemessung der Heizvorrichtung maßgebend ist, für den Sommer den Höchstbetrag G_L der Trockenluft, der die Größe des Lüfters bzw., bei natürlicher Luftbewegung, die Schachtabmessungen bestimmt.

F. Verlauf des i - x -Bildes unter Berücksichtigung der Streuverluste Q_{verl} .

Die in Abschnitt III unter 1., 2. und 3. angeführten Beträge des Wärmeverbrauches sind in dem i - x -Bilde berücksichtigt, wenn es z. B. nach Abb. 56 und 57 sich auch auf Vorwärmung und Veränderung im hygroskopischen Gebiet erstreckt. Dagegen sieht es von dem unter 4. erwähnten, infolge mangelnder Wärmedichtheit der Trockenvorrichtung auftretenden Streuverlust ab. Die unter 5. angeführte eigentliche Nutzleistung ist, soweit sie den Energieaufwand für die Trennarbeit betrifft, ebenso wie der Einfluß des Siedeverzuges, in der hygroskopischen Eigenschaft des Gutes miteinfaßt und damit im i - x -Bilde berücksichtigt. Der Anteil der Nutzleistung, der auf Verstärkungswärme und Wärmetönung entfällt, bleibt jedoch noch in Rechnung zu ziehen, wenn er einen merklichen Betrag ausmacht, was nur in seltenen Fällen zutrifft. Dies kann z. B. annähernd dadurch geschehen, daß die Verdampfwärme im i - x -Bilde entsprechend angesetzt wird, läuft also auf eine Veränderung des i - x -Bild-Netztes hinaus.

Der Streuverlust ergibt sich im allgemeinen erst nachträglich, nachdem die baulichen Einzelheiten der Trockenvorrichtung festliegen. Er wird daher zunächst erfahrungsgemäß, unter Vorbehalt der nach-

träglichen Berichtigung, zu schätzen sein. Zweckmäßig wird hierbei der Wert $\frac{Q_{\text{verl}}}{G_L}$, d. h. der auf 1 kg Reinluft bezogene Streuverlust, eingeführt. Seine Berücksichtigung hat in verschiedener Weise zu erfolgen, je nachdem die Vorrichtung im Gleich- oder Gegenstrom arbeitet.

1. Gleichstrom.

Unabhängig davon, wie der Verlust sich über die einzelnen Abschnitte des Trockenvorganges verteilt, ist er in dem Augenblick auf volle Höhe angewachsen, in dem Luft und Gut die Vorrichtung verlassen. Hieraus ergibt sich eine Berichtigung des i - x -Bildes nach Abb. 74 in der Weise, daß die Vorwärmung der Luft so weit über die Temperatur t_v , die sich ohne Berücksichtigung des Streuverlustes ergibt, bis zum Punkte V_0

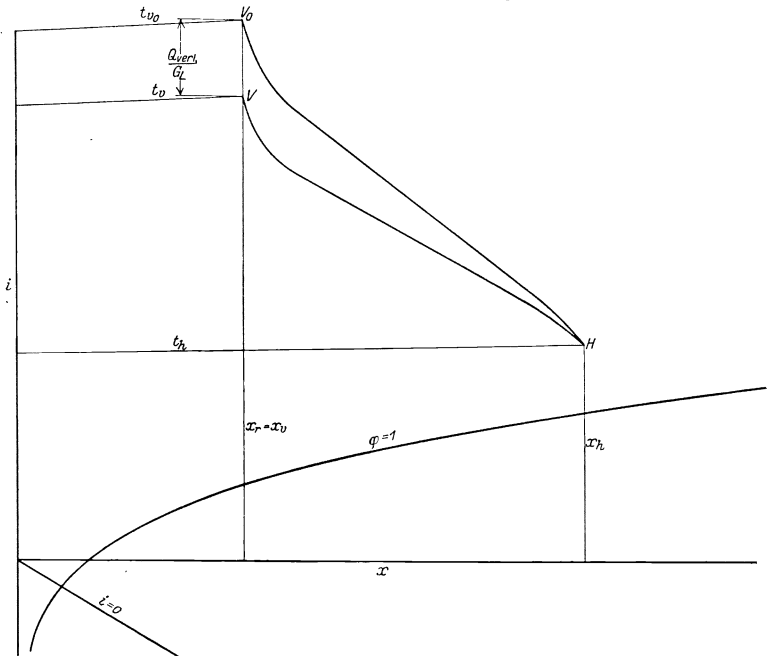


Abb. 74. Einfluß des Streuverlustes im i - x -Bild (Gleichstromtrockner).

getrieben wird, daß der Unterschied des Wärmehaltes zwischen den Punkten V und V_0 dem Betrage $\frac{Q_{\text{verl}}}{G_L}$ entspricht. Die Temperaturerhöhung ergibt sich hiernach aus der Beziehung

$$(t_{v0} - t_v) (0,24 + 0,46 \cdot x_r) = \frac{Q_{\text{verl}}}{G_L}. \quad (89)$$

Der Verlauf zwischen V_0 und H ist zunächst unbestimmt. Es steht jedoch so viel fest, daß er im gleichen Punkte H endigt, wie der, ohne Berücksichtigung des Streuverlustes, ermittelte Linienzug. Da mit

Rücksicht auf die hygroskopischen Eigenschaften des Gutes der Punkt H beim Gleichstrom der maßgebende Ausgangspunkt für die Entwicklung des i - x -Bildes war, ist hiermit eine wesentliche Vorbedingung für seine Gültigkeit erfüllt.

Infolge der Hebung des Verlaufes VH vergrößert sich die Trockenkraft, insbesondere zu Beginn der Trocknung. Der spezifische Luftbedarf bleibt unverändert.

2. Gegenstrom.

Hier verbietet sich die Hebung des Punktes V , weil für seine Höhenlage die, mit Rücksicht auf das hygroskopische Verhalten des Gutes, maßgebende Höchsttemperatur bestimmend war. Es ergibt sich infolgedessen nach Abb. 75 eine Senkung des dem Endzustande zukommenden Punktes H_0 bis zum Punkte H' , wobei der Temperaturunterschied aus der Beziehung

$$(t_{h_0} - t'_h) (0,24 + 0,46 \cdot x_{h_0}) = \frac{Q_{\text{verl}}}{G_L} \quad (90)$$

folgt, wenn der Wert x_{h_0} beibehalten werden kann. Dies trifft natürlich

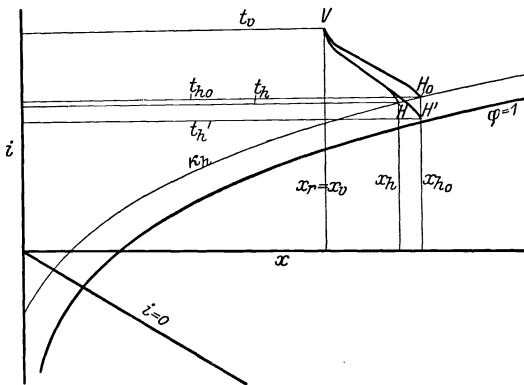


Abb. 75. Einfluß des Streuverlustes im i - x -Bild (Gegenstromtrockner).

nur dann zu, wenn H' oberhalb der Sättigungslinie liegen bleibt, was in Abbildung 75 gerade noch zutrifft. Hierbei sinkt die Trockenkraft, und zwar in einem Falle, wie er Abb. 75 entspricht, auf ein unzulässig niedriges Maß. Es wird daher zweckmäßiger davon ausgegangen, daß bei der Senkung H auf die dem Punkte H_0 entsprechende Trockenkraftlinie zu liegen kommt, wie dies in Abb. 75 gestrichelt angedeutet ist. Der spezifische

Luftverbrauch wird hierbei erhöht. Das Gegenstromverfahren tritt damit um einen weiteren Grad gegenüber den Vorzügen des Gleichstromverfahrens zurück.

Die Berücksichtigung des Streuverlustes im i - x -Bilde beim Gegenstromverfahren ist zweckmäßig dadurch vorzubereiten, daß für den Entwurf der Abb. 57 Punkt J weiter über der Sättigungslinie angesetzt wird, als der wirklich angestrebten Lage entspricht. Der Punkt H_0 der Abb. 75 kommt alsdann entsprechend höher auf der x_{h_0} -Linie zu liegen, so daß der gesenkten Lage des Punktes H' noch eine Trockenkraftlinie von genügendem Potential entspricht.

Die vorausstehenden Erwägungen werden überflüssig, wenn der Streuverlust nicht durch die Trockenluft gedeckt werden muß, sondern

hierfür zweckmäßigerweise eine besondere, an geeigneter Stelle angebrachte Heizvorrichtung vorgesehen wird, die den Verlust auf das Innere des Trockenraumes nicht zur Auswirkung gelangen läßt. Die Abb. 56 und 57 bleiben alsdann ohne Berichtigung gültig.

Wie der Linienzug VH bei der Senkung im einzelnen verläuft, hängt davon ab, in welcher Weise sich Q_{verl} auf die einzelnen Abschnitte des Trockenvorganges verteilt. Da Gut und Luft sich mit etwa gleichbleibender Geschwindigkeit fortbewegen und die Streuverluste in der Hauptsache von der Oberfläche der Trockenvorrichtung und dem Temperaturunterschiede zwischen innen und außen abhängen, verteilt sich Q_{verl} einerseits etwa verhältnismäßig der Trockenzeit. Diese ist verhältnismäßig der Trockenkraft. Die Teilbeträge von Q_{verl} nehmen daher von V gegen H hin zu. Andererseits ist das Umgekehrte der Fall mit Rücksicht darauf, daß Q_{verl} mit der Höhe der Innentemperatur der Trockenvorrichtung ansteigt. Beide Einflüsse heben sich teilweise auf, so daß die Berichtigung genügend genau die Verhältnisse trifft, wenn die Senkung zwischen V und H etwa gleichmäßig verteilt wird.

Streuverluste treten auch durch Undichtheiten auf, durch die bei Überdruck innerhalb der Trockenvorrichtung Luft entweicht. Beziehen sie sich auf Abluft vom Zustande H , so sind sie ohne Einfluß. Entweicht vorgewärmte Luft vom Zustande V , so erhöht sich der Luftbedarf im Verhältnis des Luftverlustes. Dazwischen liegen unzählige Möglichkeiten. Steht daher von vornherein nicht fest, wo die Luftverluste auftreten, so werden sie zweckmäßig in der Weise berücksichtigt, daß die Luftmenge entsprechend der Hälfte des Luftverlustes erhöht und mit einem in gleichem Maße vermehrten Wärmeverbrauch gerechnet wird. Ähnlich liegen die Beziehungen, wenn die Trockenvorrichtung mit Unterdruck arbeitet. Der Luftverbrauch ist alsdann auf die abgehende Luft zu beziehen und deshalb höher, weil die eindringende falsche Luft den Feuchtigkeitsgehalt der Abluft erniedrigt. Ebenso wächst der spezifische Wärmeverbrauch.

Im $i-x-i-r$ -Bilde ergibt sich die Berücksichtigung des Verlustes in der in Abb. 76 für einen Gleichstromtrockner angegebenen Weise. Die Kurve VH_0 stellt die Veränderung des Luftzustandes ohne Berücksichtigung des Streuverlustes, VH die verschobene Lage unter Berücksichtigung des Streuverlustes dar. Die im $i-r$ -Bild mit dem Verlauf VH_0 zusammenfallende Kurve $\mathfrak{H}\mathfrak{S}$ entspricht genügend genau dem berichtigten Verlauf VH (nicht vollständig, weil die Veränderung des Wärmehaltes der Luft durch die Wirkung des Streuverlustes von Einfluß auf die Veränderung des Gutes bleibt).

Ist der Verlauf von VH , z. B. durch Messungen, bekannt, so würde eine damit zusammenfallende Kurve $\mathfrak{H}\mathfrak{S}_0$ nicht die wirkliche Veränderung des Gutzustandes darstellen und daher so zu berichtigen sein, daß aus VH die zutreffende Kurve $\mathfrak{H}\mathfrak{S}$ abgeleitet wird. Verteilt sich z. B. der Streuverlust verhältnismäßig der Trockenleistung, d. h. entfällt auf je 1 kg Wasserverdampfung stets der gleiche Teil des Streuverlustes, so kann die Übertragung der VH -Kurve nach Abb. 76 in

der Weise erfolgen, daß die Punkte der Zustandskurve $\mathfrak{H}\mathfrak{S}$ um 'den Betrag $\frac{Q_{\text{verl}}}{G_L} \cdot \frac{x - x_r}{x_h - x_r}$ höher angenommen werden.

Ein für die Auswertung genügender Betriebsversuch wird stets Anfangs- und Endzustand von Luft und Gut ermitteln. Daraus ergibt sich die Lage der Punkte $V, \mathfrak{R}, H, \mathfrak{S}$ im i - x - i - x -Bilde. Der Ordinatenabstand $\mathfrak{S}H$ liefert alsdann das Maß $\frac{Q_{\text{verl}}}{G_L}$ des auf 1 kg Reinform abfallenden Streuverlustes. Sein Vergleich mit dem Ordinatenabstand zwischen Punkt V und R , d. h. dem spezifischen Wärmeverbrauch unter Berücksichtigung des Streuverlustes, gibt ein Bild über den Anteil, den der Streuverlust an dem gesamten Wärmeaufwand nimmt.

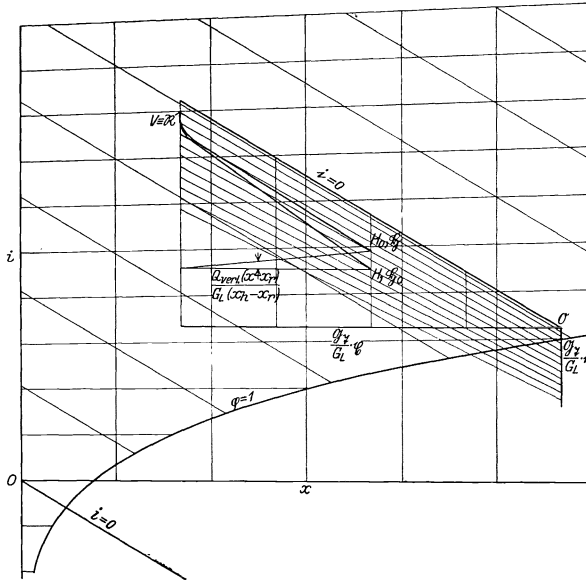


Abb. 76. Einfluß des Streuverlustes im i - x - i - x -Bild (Gleichstromtrockner).

Zahlenbeispiel 11. Der von der D. L. G. im Jahre 1913 an einem mit Verbrennungsgas-Luftgemisch arbeitenden Topfschen Gleichstromrieseltrockner durchgeführte Trockenversuch mit naturfeuchtem Weizen lieferte folgende Zahlen:

Stündlich verarbeitetes Naßgut	$G_L(1 + x_r) = 755 \text{ kg/h,}$
Feuchtigkeitsgrad des Gutes, anfangs	$\varphi \mathfrak{G}_x = 0,207,$
am Ende	$\varphi \mathfrak{G}_s = 0,145,$
Abluftmenge	$\frac{G_L(1 + x_h)}{\gamma_h} = 7360 \text{ m}^3/\text{h,}$
Ablufttemperatur	$t_h = 24^\circ,$
Abluftfeuchtigkeitsgrad	$\varphi_h = 0,68,$
Frischlufftemperatur	$t_r = 7^\circ,$
Frischlufffeuchtigkeitsgrad	$\varphi_r = 0,70,$
Eintrittstemperatur des Feuergas-Luftgemisches	$t_v = 74^\circ,$
Austrittstemperatur des Gutes	$t_{\mathfrak{h}} = 19,2^\circ.$

Hieraus errechnet sich

$$\varepsilon_r = \frac{\varphi \mathcal{G}_r}{1 - \varphi \mathcal{G}_r} = \frac{0,207}{1 - 0,207} = 0,261,$$

$$\mathcal{G}_x = \frac{755}{1 + 0,261} = 598 \text{ kg/h},$$

$$\varepsilon_h = \frac{\varphi \mathcal{G}_h}{1 - \varphi \mathcal{G}_h} = \frac{0,145}{1 - 0,145} = 0,169.$$

Aus dem i - x -Bilde der Abb. 77, dessen Anwendung für das hier vorliegende Gasgemisch eine wegen des hohen Luftüberschusses und der niedrigen Temperaturen

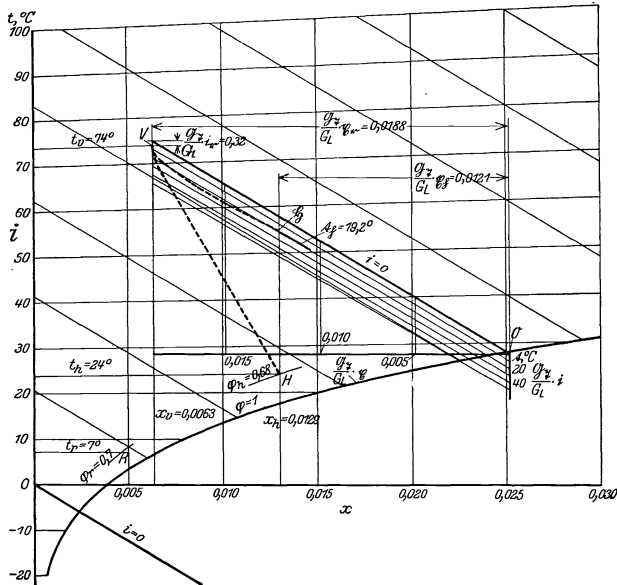


Abb. 77. Darstellung eines Betriebsversuches im i - x - i -Bild (Gleichstrom-Getreidetrockner).

zulässige Annäherung bedeutet, folgt für $t_h = 24^\circ$, $\varphi_h = 0,68$ der Punkt H . Ihm entspricht

$$x_h = 0,0129,$$

$$\gamma_h = 1,139.$$

Damit ergibt sich

$$G_L = \frac{7360 \cdot 1,139}{1 + 0,129} = 8300,$$

$$\frac{\mathcal{G}_x}{G_L} = \frac{598}{8300} = 0,072.$$

Punkt V in Abb. 77 liegt einerseits auf der Temperaturlinie für $t_v = 74^\circ$, andererseits auf der x_v -Linie. x_v ist hierbei nicht etwa gleich x_r , sondern wegen der bei Verbrennung sich bildenden Wasserdämpfe größer. Der errechnete Betrag

$$x_v = x_h - \frac{\mathcal{G}_x}{G_L} (\varepsilon_r - \varepsilon_h) = 0,0129 - 0,072 (0,261 - 0,169) = 0,0063$$

scheint zu hoch zu liegen, ist aber bei Festlegung des Punktes V beibehalten.

Der Koordinatenursprung \mathfrak{D} des i - x -Bildes liegt in der Ordinatenrichtung um

$$\frac{\mathcal{G}_{\mathfrak{D}}}{G_L} \cdot i_r = 0,072 (0,37 + 0,2615) 7 = 0,32 \text{ kcal,}$$

in der Abszissenrichtung um

$$\frac{\mathcal{G}_{\mathfrak{D}}}{G_L} \cdot x_r = 0,072 \cdot 0,2615 = 0,0188$$

über bzw. rechts von dem V -Punkt. Hierbei ist die spezifische Wärme des wasserfreien Weizenkorns zu $c_{\mathfrak{D}} = 0,37$ und die in dem Versuchsbericht nicht genannte Anfangstemperatur des Gutes gleich der Lufttemperatur zu $t_r = 7^\circ$ angenommen. Punkt \mathfrak{S} liegt senkrecht über H auf der $t_{\mathfrak{H}} = 19,2^\circ$ -Geraden.

Der Verlauf der Zustandsänderung längs $V\mathfrak{S}$ ist gefühlsmäßig eingezeichnet und hierbei angedeutet, daß er so erfolgt, daß die Gutstemperatur t nicht ständig ansteigt, sondern von einem Höchstwert wieder sinkt. Darin äußert sich der Einfluß des Streuverlustes auf die Veränderung des Gutes, dessen Endtemperatur beim Gleichstromtrockner niedriger rückt, als sie zuvor lag, und zwar um so mehr, je erheblicher der Streuverlust ist. Ferner ist der Verlauf $V\mathfrak{S}$ so angedeutet, daß er längs der dem Hauptabschnitt der Trocknung entsprechenden Strecke nicht mehr mit einer t -Geraden zusammenfällt. Durch die Wirkung des Streuverlustes fehlt eine Kühlgrenze als Ausgleichspunkt für die Temperatur des Gutes, ein ausgesprochener Hauptabschnitt der Trocknung besteht nicht mehr.

Wenn es auch möglich ist, für den Verlauf von $\frac{Q_{\text{verl}}}{G_L}$ bestimmte Annahmen zu machen und damit den genauen Verlauf $V\mathfrak{S}$ im besonderen Falle zu ermitteln, so erscheint es doch zweckmäßiger, die Untersuchungen zunächst unter Vernachlässigung des Streuverlustes zu führen und diesen durch entsprechende Zuschläge nachträglich zu berücksichtigen.

G. Verlauf der Zustandsänderung bei Trockenvorrichtungen mit ständig wechselndem Trockenbild.

Die vorausgehenden Betrachtungen müssen eine wesentliche Änderung erfahren, wenn die Trockenvorrichtung mit ständig wechselndem Trockenbild arbeitet, es sich also z. B. um einen Kammertrockner handelt, der mit Gut von einem bestimmten Anfangszustande gefüllt wird, das allmählich den Endzustand erreicht. Auch hier führt die schrittweise Verfolgung der Zustandsänderung zum Ergebnis. Die Form der Zustandskurve im i - x -Bilde weicht wesentlich von der für Gleich- und Gegenstromtrockner gefundenen ab.

Zur Vereinfachung der Lösung sei vorausgesetzt, daß die Trockenwirkung auf das gesamte, die Kammer füllende Gut gleichmäßig sei, entweder dadurch, daß das Gut ständig durchmischt wird, oder dadurch, daß das Trockenpotential der Luft beim Austritt sich von dem beim Eintritt nicht sehr unterscheidet. Weiter sei angenommen, daß der Zustand der Luft beim Eintritt stets derselbe sei und die Wärmezufuhr durch Vorwärmung der Luft außerhalb der Kammer erfolge. Im i - x -Bilde der Abb. 78 kennzeichnet alsdann Punkt V den Zustand der eintretenden Luft. Punkt \mathfrak{R} entspreche der Lage des Guts punktes zu Beginn der Trocknung. Die Zustandsänderung der Luft folgt zunächst der Verbindungsgeraden $V\mathfrak{R}$, wie bei dem Gleichstromtrockner. Während

jedoch bei diesem die Richtung $V \text{ R}$ nur für eine sehr kleine Zeitdauer angenommen werden darf, kann sie bei dem Kammertrockner für einen wesentlich längeren Zeitabschnitt beibehalten werden. Denn beim Gleich- und Gegenstromtrockner trifft die Luft nacheinander auf Gut, dessen Zustand in den äußersten Grenzen, also zwischen den Punkten R und S sich verändert, während beim Kammertrockner der Gutzustand

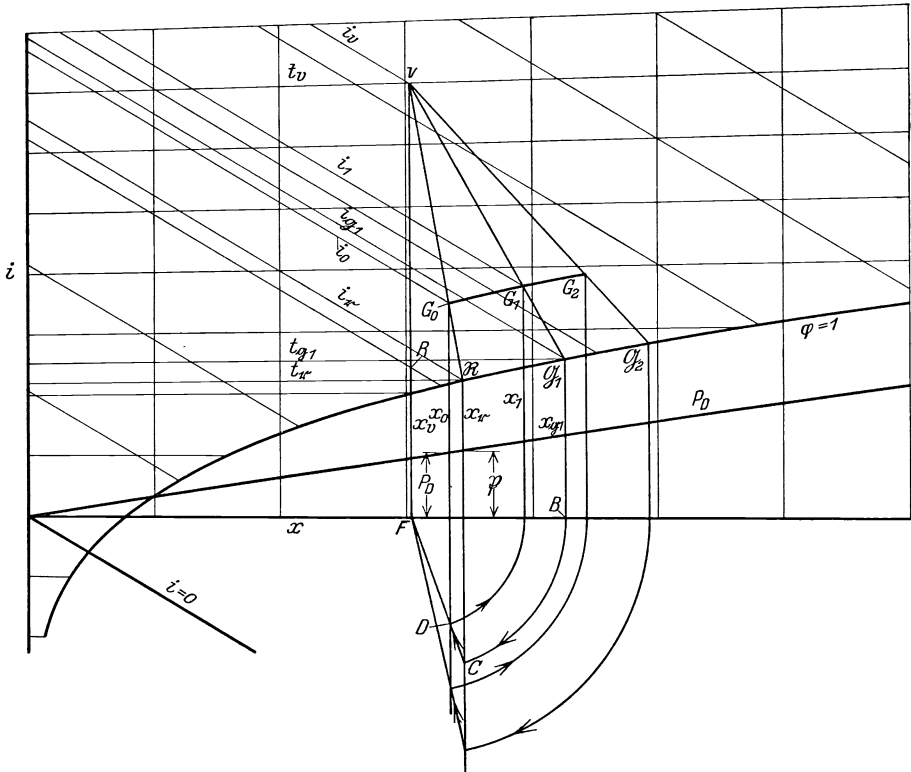


Abb. 78. Untersuchung eines Kammertrockners.

für den einmaligen Durchgang der Luft als unverändert angesehen werden darf.

Bedeutung

L die Länge des Luftweges innerhalb der Trockenkammer, in m,
 w die Luftgeschwindigkeit innerhalb der Trockenkammer, in m/s,

so stellt $\frac{L}{w}$ die Zeit in s dar, während der die Luft den Weg L zurücklegt.

Bezeichnen in Abb. 79

dl ein Element des Luftweges,

di die Zunahme des spezifischen Wärmeinhaltes der Luft auf dem Wege dl ,

dx die Zunahme des Feuchtigkeitsgehaltes der Luft auf dem Wege dl ,

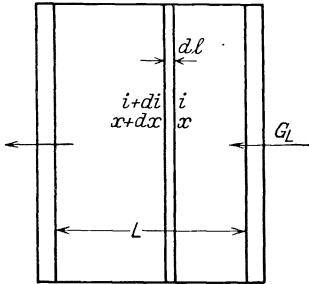
so treten in 1 h innerhalb des Raumelementes G_L kg/h Reinluft mit $\frac{\mathfrak{G}_x \cdot Z \cdot dl}{L}$ kg Trockenstoff des Gutes in Wärmeaustausch, wenn

Z die gesamte Trockendauer, in h,

$\mathfrak{G}_x \cdot Z$ daher das gesamte in der Trockenkammer befindliche Guts-trockengewicht, in kg,

bedeuten.

Die Formeln (52) und (61) behalten daher Gültigkeit, wenn darin das Flächenelement $\mathfrak{F} \cdot dz$ ersetzt wird durch $\mathfrak{F} \cdot Z \cdot \frac{dl}{L}$, und lauten alsdann



$$di = \frac{\mathfrak{F} \cdot Z \cdot k'}{L \cdot G_L} (i_g - i) dl,$$

$$\frac{di}{i_g - i} = \frac{\mathfrak{F} \cdot Z}{L \cdot G_L} \cdot k' \cdot dl, \tag{91}$$

$$\frac{dx}{x_g - x} = \frac{\mathfrak{F} \cdot Z}{L \cdot G_L} \cdot k' \cdot dl. \tag{92}$$

Wird die Integrierung für die Zeit eines Durchganges vorgenommen und dabei der Zustand des Gutes als gleichbleibend, i_g , x_g und k' also als unveränderlich angesehen, so folgt

$$\frac{i_g - i_v}{i_g - i_g} = e^{\frac{\mathfrak{F} \cdot Z}{G_L} \cdot k'}, \tag{93}$$

$$\frac{x_g - x_v}{x_g - x_g} = e^{\frac{\mathfrak{F} \cdot Z}{G_L} \cdot k'}. \tag{94}$$

Hieraus findet sich mit $x_g = x_r$, $i = i_0$, $x = x_0$ für den ersten Durchgang i_0 und x_0 und damit Punkt G_0 in Abb. 78, der den Zustand der austretenden Luft darstellt.

Die während des einmaligen Durchganges der Luft, also nach der Zeit $\frac{L}{3600 \cdot w}$ h eintretende Temperaturerhöhung Δt des Gutes ergibt sich wie folgt: Nach Formel (71) ist

$$G_L (\Delta i - i_{\text{st}} \cdot \Delta x) = - \mathfrak{G}_x \cdot \mathfrak{C} \cdot \Delta t.$$

Für den hier erörterten Fall ist zu setzen: $G_L \cdot \frac{L}{3600 \cdot w}$ statt G_L , $i_g - i_v$ statt Δi , $x_g - x_v$ statt Δx , $\mathfrak{G}_x \cdot Z$ statt \mathfrak{G}_x , und es wird

$$G_L \cdot \frac{L}{3600 \cdot w} [i_g - i_v - i_{\text{st}} (x_g - x_v)] = - \mathfrak{G}_x \cdot \mathfrak{C} \cdot Z \cdot \Delta t, \tag{95}$$

$$\Delta t = \frac{G_L \cdot L}{3600 \cdot \mathfrak{G}_x \cdot \mathfrak{C} \cdot w \cdot Z} [i_v - i_g + i_{\text{st}} (x_g - x_v)]. \tag{95a}$$

Ist die Temperaturveränderung Δt sehr klein, so bedeutet dies, daß der Gutzustand während mehrerer Durchgänge der Luft als gleichbleibend

angesehen werden darf. Die aus Formel (93) und (94) gefundenen Werte i und x und die Lage des Punktes G_0 entsprechen alsdann dem Zustande der austretenden Luft während eines Mehrfachen der Zeit $\frac{L}{3600 \cdot w}$ h, also der Dauer $\frac{n \cdot L}{3600 \cdot w}$ h. Die Temperaturerhöhung während n_1 -Durchgängen beträgt sodann

$$n_1 \cdot \Delta t = \frac{n_1 \cdot G_L \cdot L}{3600 \cdot \mathcal{G}_x \cdot \mathcal{G} \cdot w \cdot Z} [i_v - i_0 + i_{\text{st}}(x_0 - x_v)]. \quad (95b)$$

Mit $t_{g1} = t_r + n_1 \cdot \Delta t$ ist der Punkt \mathcal{G}_1 im i - x -Bilde festgelegt. Im weiteren Verlauf folgt die Zustandsänderung der Luft der Verbindungsgeraden $V\mathcal{G}_1$ nach der Beziehung

$$\frac{x_{g1} - x_v}{x_{g1} - x_1} = e^{\frac{\mathfrak{F} \cdot Z}{G_L} \cdot k'_1}. \quad (94a)$$

Danach ergibt sich

$$x_1 = x_{g1} - (x_{g1} - x_v) e^{-\frac{\mathfrak{F} \cdot Z}{G_L} \cdot k'_1}, \quad (94b)$$

bzw. allgemein für die folgenden Punkte

$$x_g = x_{g_n} - (x_{g_n} - x_v) e^{-\frac{\mathfrak{F} \cdot Z}{G_L} \cdot k'}. \quad (94c)$$

Wenn von der Veränderung von k' abgesehen wird, gilt die einfache Beziehung

$$\frac{x_r - x_l}{x_r - x_1} = \frac{x_g - x_v}{x_g - x_g}.$$

Wird daher durch Punkt B , in dem die x_{g1} -Linie irgendeine Waagerechte, z. B. die Hilfsabszissenachse, schneidet, ein Kreisbogen um den Schnittpunkt F der x_v -Linie mit der Waagerechten als Mittelpunkt bis zum Schnittpunkt C mit der x_r -Linie geschlagen und Punkt C mit Punkt F verbunden, so schneidet die Verbindungslinie die Ordinate im Abszissenabstand x_0 im Punkte D . Die Länge FD entspricht alsdann dem Betrage $x_1 - x_v$ und ermöglicht die Auffindung des gesuchten Punktes G_1 . In der beschriebenen Weise ergibt sich ferner die Temperaturerhöhung $t_{g2} - t_{g1}$, damit der Punkt \mathcal{G}_2 usw. Die für andere Anfangszustände gültige Abb. 80 zeigt, wie schließlich die Vorwärmung des Gutes im Punkte \mathfrak{A} zum Stillstande kommt, in dem die τ -Linie durch V die Sättigungslinie schneidet. Kurve G_0A gibt an, wie der Zustand der austretenden Trockenluft sich während der Vorwärmung des Gutes verändert. Im Zeitbilde der Abb. 81 kann hiernach die Veränderung von t und x_g eingetragen werden. Während des Hauptabschnittes der Trocknung bleibt der Zustandspunkt der Luft ebenso wie der des Gutes im i - x -Bilde unverändert liegen. t und x_g verlaufen längs einer Parallelen zur Abszissenachse. $G_L \cdot \frac{n \cdot L}{3600 \cdot w}$ stellt die Reinluftmenge bei n -maligem Durchgange, also in der Zeit $\frac{n \cdot L}{3600 \cdot w}$ h dar. Die entsprechende Trocken-

leistung beträgt $G_L \cdot \frac{n \cdot L}{3600 \cdot w} (x_n - x_v)$. Sie ist gleich der Feuchtigkeitsabgabe des Gutes in dieser Zeit, nämlich gleich $\mathcal{G}_x \cdot Z \cdot \Delta x_n$. Hieraus folgt

$$\mathcal{G}_x \cdot Z \int \Delta x_n = \mathcal{G}_x \cdot Z (x_r - x) = G_L \cdot \frac{n \cdot L}{3600 \cdot w} \int_{x_0}^{x_n} (x_g - x_v) .$$

Wird daher im Zeitbilde auch der Verlauf des gleichbleibenden Wertes x_v eingetragen, so entspricht der Flächenstreifen zwischen zwei Ordinaten

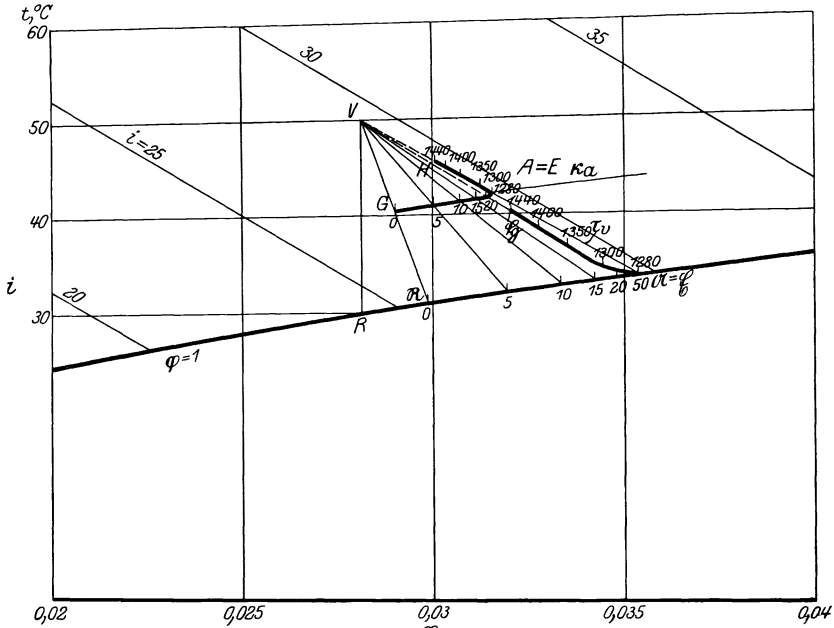


Abb. 80. Untersuchung eines Kammertrockners.

im Abstand $\frac{n \cdot L}{3600 \cdot w}$ mit der Höhe $x_g - x_v$ der in der Zeit $\frac{n \cdot L}{3600 \cdot w}$ auf 1 kg Reinform entfallenden Trockenleistung. Die zwischen x_v - und x_g -Kurve befindliche Fläche stellt also die auf 1 kg Reinform entfallende spezifische Trockenleistung zwischen bestimmten Grenzen dar, nämlich $\int_{x_0}^{x_n} (x_g - x_v) dz$, wenn die Fläche durch die linke Endordinate begrenzt wird. Die x -Kurve kann demnach gezeichnet werden. Sie verläuft für den Hauptabschnitt der Trocknung als Gerade. Das Ende des Hauptabschnittes tritt in dem Zeitpunkt ein, für den x gleich dem bekannten Werte x_e wird.

Der weitere Verlauf im hyroskopischen Gebiet ergibt sich in der Weise, daß der Gutspunkt sich von der Sättigungslinie entfernt und einem Druck $\mathfrak{B} = P'' \cdot \frac{x}{x_e}$ zugeordnet ist. Es kann daher die Zustands-

änderung bis zu den Punkten ξ für das Gut bzw. H für die Trockenluft verfolgt werden. Die Kurven $\mathcal{E}\xi$ und EH streben dem Beharrungszustande zu, der hier wie beim Gegenstrom durch die Lage von V gekennzeichnet ist.

Während für Gleich- und Gegenstromtrockner die Ermittlung des spezifischen Wärmeverbrauches sich in einfacher Weise aus dem i - x -Bild ergibt, muß hierfür beim Kammertrockner das Zeitbild herangezogen werden. Dieses liefert den Betrag der Trockenleistung

$$\mathcal{G}_x(x_r - x_h) = G_L \int_0^Z (x_g - x_v) dz. \quad (96)$$

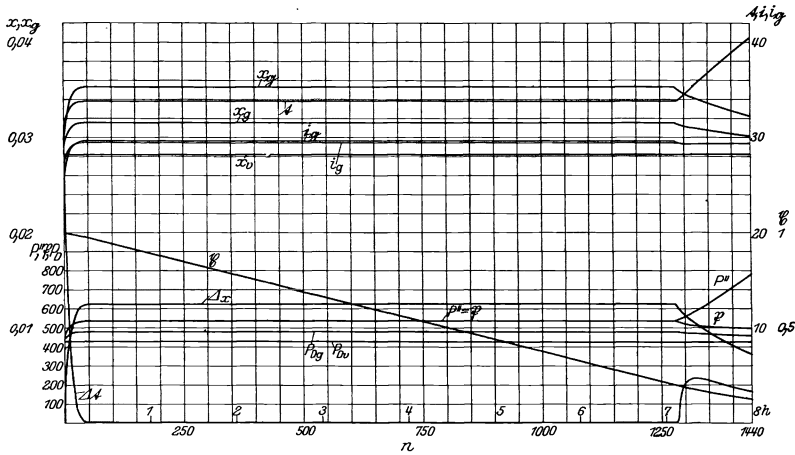


Abb. 81. Zeitbild zur Untersuchung eines Kammertrockners

$$\left(\frac{\mathcal{G}_x}{G_L} = \frac{1}{40}; x_c = 0,2; c_x = 0,37 \right).$$

Der Wärmeverbrauch folgt aus dem i - x -Bilde zu

$$Q = G_L(i_v - i_r). \quad (97)$$

Damit ergibt sich der spezifische Wärmeverbrauch zu

$$\frac{G_L(i_v - i_r)}{\mathcal{G}_x(x_r - x_h)} = \frac{i_v - i_r}{\int_0^Z (x_g - x_v) dz}. \quad (98)$$

Zahlenbeispiel 12. In einem Kammertrockner sollen 600 Häute, jede mit einer Oberfläche von 2 m² auf jeder der beiden Seiten, mit einem Trockenstoffgewicht von insgesamt $\mathcal{G}_x \cdot Z = 3000$ kg, $Z = 8$ h lang getrocknet werden. Der Feuchtigkeitsgehalt zu Anfang betrage $x_r = 1$. Zur Trocknung diene vorgewärmte Luft ohne Umluft. Die zur Verwendung gelangende Frischluft habe $t_r = 30^\circ$ und sei gesättigt. Ihre Vorwärmung erfolge auf $t_v = 50^\circ$. Die Anfangstemperatur des Gutes betrage $t_r = 31^\circ$. Die spezifische Wärme des Trockenstoffgehaltes sei zu $c_x = 0,37$ angenommen. Der hygroskopische Punkt liege bei einem Feuchtigkeitsgehalt $x_e = 0,2$.

In Abb. 80 stellt Punkt R den Zustand der Luft vor, Punkt V nach der Vorwärmung dar. Dem letzten entspricht ein Feuchtigkeitsgehalt $x_v = 0,02814$ und

ein spezifischer Wärmehalt $i_v = 29,4$. Punkt \mathfrak{R} gibt den Anfangszustand des Gutes wieder. Ihm entsprechen die Werte $x_r = 0,2988$, $i_r = 25,6$.

Bezüglich des stündlich umlaufenden Reinluftgewichtes G_L muß zunächst eine Annahme erfolgen. Ergibt sich mit ihr nach der mit $Z = 8$ h angenommenen Trockenzeit der Endfeuchtigkeitsgehalt x_b zu hoch oder zu niedrig, so muß in einer Nachrechnung eine Berichtigung eintreten. In Abb. 80 entspricht die Gerade $V\mathfrak{M}$ der durch V gehenden τ -Linie. Nach der kurz dauernden Vorwärmung vollzieht sich die Haupttrocknung unter Veränderung der Luft vom Zustande V nach dem zunächst unbekanntem Punkt A mit einer durch die x_a -Linie gegebenen Trockenkraft. Punkt A kann demnach unter Schätzung der Trockenkraft, die während des Beharrungszustandes in der austretenden Luft noch verbleiben soll, festgelegt und danach der Unterschied $x_a - x_b$ abgemessen werden. Er ergibt sich mit Annahme des Punktes A nach Abb. 80 zu rund 0,0034. Wird der Endfeuchtigkeitsgehalt des Gutes zu $x_b \approx 0,15$ vorausgeschätzt, so beträgt die stündlich aufzutrocknende Feuchtigkeitsmenge

$$G(x_r - x_b) = \frac{3000}{8} (1 - 0,15) \approx 320 \text{ kg/h}$$

und die benötigte Luftmenge

$$G_L \approx \frac{320}{0,0034} \approx 94000 \text{ kg/h Reinluft,}$$

die auf $G_L = 100000$ kg/h abgerundet werden mögen. Das spezifische Gewicht ergibt sich für den durchschnittlichen Luftzustand zu $\gamma \approx 1,05$, das Gewicht der feuchten Luft im Durchschnittszustand mit einem Feuchtigkeitsgehalt von x rund 0,03 zu

$$G_L(1 + x) = 100000 \cdot 1,03 = 103000 \text{ kg/h.}$$

Hieraus folgt das durchschnittliche Luftvolumen zu

$$\frac{G_L(1 + x)}{\gamma} = 98000 \text{ m}^3/\text{h.}$$

Das Fassungsvermögen von 600 Häuten legt die Abmessungen der Kammer fest. Diese möge eine Höhe von 2,5 m und eine Länge von 22 m besitzen und die Anordnung so getroffen sein, daß die Luft von der einen Längsseite nach der gegenüberliegenden strömt. Der Luftquerschnitt beträgt daher $2,5 \cdot 22 = 55 \text{ m}^2$ und die Luftgeschwindigkeit $w = \frac{980000}{55 \cdot 3600} \approx 0,5 \text{ m/s}$. Die Kammer besitze eine

Tiefe $L = 10$ m. Die Luft benötigt daher zum einmaligen Durchgang $\frac{10}{0,5} = 20$ s.

Die Durchgangszahl n beträgt $\frac{3600}{20} = 180$ in 1 h, bzw. 1440 in den 8 h der gesamten Trockenzeit. Mit $w = 0,5$ ergibt sich die Wärmeübergangszahl

$$\alpha = 5,3 + 3,6 \cdot 0,5 = 7,1 \text{ kcal/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{h.}$$

Es folgt ferner

$$C_{pr} = 0,24 + 0,46 \cdot 0,002988 \approx 0,25.$$

Hiermit sind in Formeln (93) und (94) alle Größen mit Ausnahme von i und x bekannt, und die letzten können errechnet werden. Es folgt für Punkt G

$$i_g = i_r - (i_r - i_v) e^{-\frac{\tilde{\gamma} \cdot Z}{G_L} \cdot \frac{\alpha}{C_{pr}}},$$

$$x_g = x_r - (x_r - x_v) e^{-\frac{\tilde{\gamma} \cdot Z}{G_L} \cdot \frac{\alpha}{C_{pr}}}.$$

Hieraus ergibt sich

$$i_1 = 25,6 - (25,6 - 29,4) e^{-\frac{600 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 7,1}{100000 \cdot 0,25}} = 27,2,$$

$$x_1 = 0,02988 - (0,02988 - 0,02814) e^{-\frac{0,17}{0,25}} = 0,02900.$$

Hiermit liegt die Lage des Punktes G fest.

Für den Ausgangspunkt \mathfrak{R} ergibt sich

$$\mathfrak{C}_r = 0,37 + 1 = 1,37.$$

Die Temperaturänderung des Gutes für den einmaligen Durchgang der Luft folgt nach Formel (95a) zu

$$t_{a1} - t_0 = \frac{100000 \cdot 10}{3000 \cdot 1,37 \cdot 1800} [29,4 - 27,2 + 31 (0,02900 - 0,02814)] = 0,25^\circ.$$

Werden für die Festlegung des nächstfolgenden Luftzustandpunktes 5 Durchgänge genommen, so liegt dieser auf der Sättigungslinie bei einer Temperatur $31 + 5 \cdot 0,25 = 32,25^\circ$, entsprechend dem mit 5 bezeichneten Punkt der Sättigungslinie.

Der Feuchtigkeitsgehalt des Gutes ändert sich für einen Durchgang um das Maß

$$\mathfrak{x}_r - \mathfrak{x}_1 = \frac{G_L}{\mathfrak{G}_x \cdot Z} \cdot \frac{L}{3600 \cdot w} (x_1 - x_v).$$

Hieraus folgt

$$\mathfrak{x}_1 = 1 - 0,185 (0,02900 - 0,02814) = 1 - 0,00016 = 0,99984,$$

bzw. nach 5 Durchgängen

$$\mathfrak{x}_5 = 1 - 5 \cdot 0,00016 = 0,9992.$$

Mit dem neuen Wert \mathfrak{x}_5 ergibt sich

$$\mathfrak{C}_5 = 0,37 + 0,9992 \approx 1,37,$$

und der nächste Punkt für Luft- und Gutzustand kann gefunden werden. Auf diese Weise ist in Abb. 80 die Untersuchung durchgeführt. Sie führt nach etwa 50 Durchgängen zu dem Punkt A bzw. \mathfrak{A} und Erreichung einer Kühlgrenztemperatur von $\tau = 33,8^\circ$.

Die zeitliche Veränderung der maßgebenden Größen ist in Abb. 81 abhängig von n , der Anzahl der Durchgänge, als Abszissen wiedergegeben. 180 Durchgänge stellen jedesmal 1 h dar.

In dem Ausgleichspunkt, in dem das Gut die Kühlgrenze annimmt, werden folgende Zahlen erreicht:

$$i_a = 29,5, \quad x_a = 0,03150, \quad i_a = 29,4, \quad x_a = 0,03530, \quad \mathfrak{x}_a = 0,9757, \quad C_{pa} = 0,26.$$

Die Anzahl der Durchgänge während des Hauptabschnittes der Trocknung ergibt sich mit diesen Werten zu

$$n = \frac{\mathfrak{x}_a - \mathfrak{x}_e}{\frac{G_L}{\mathfrak{G}_x \cdot Z} \cdot \frac{L}{3600 \cdot w} (x_a - x_v)} = \frac{0,9757 - 0,2}{0,185 (0,03150 - 0,02814)} \approx 1230.$$

Die Kühlgrenze wird also etwa nach dem 50ten Durchgang erreicht und nach dem $50 + 1230 = 1280$ ten Durchgang, d. i. nach $\frac{1280}{180} = 7,1$ h, verlassen. Während des Hauptabschnittes der Trocknung ergibt sich für jeden Durchgang eine Ab-

nahme des Feuchtigkeitsgehaltes um $\frac{0,9757 - 0,2}{1230} = 0,0006$. Für den folgenden Durchgang, der sich im hygroskopischen Gebiete abspielt, beträgt daher genügend genau

$$\begin{aligned}\chi_{1281} &= 0,2 - 0,0006 = 0,1994, \\ \mathfrak{C}_{1281} &= 0,37 + 0,1994 = 0,57.\end{aligned}$$

Entsprechend der Temperatur $\tau = 33,8^\circ$ beträgt $P'' = 537$ und

$$\mathfrak{P} = P'' \cdot \frac{\chi}{\chi_e} = 537 \cdot \frac{0,1994}{0,2} = 535.$$

Hierfür errechnet sich

$$\begin{aligned}x_g &= \frac{0,622 \cdot 535}{10000 - 535} = 0,03520, \\ i_g &= 0,24 \cdot 33,8 + (595 + 0,46 \cdot 33,8) 0,03520 = 29,6, \\ C_{p_g} &= 0,24 + 0,46 \cdot 0,03520 = 0,26, \\ i_g &= 29,6 - (29,6 - 29,4) e^{-\frac{0,17}{0,26}} \approx 29,5, \\ x_g &= 0,03520 - (0,03520 - 0,02814) e^{-\frac{0,17}{0,26}} \approx 0,03150, \\ t &= 33,8 + \frac{0,185}{0,57} [29,4 - 29,5 + 33,8 (0,03520 - 0,02814)] = 33,85.\end{aligned}$$

Nach dem ersten Durchgang im hygroskopischen Gebiet ist also der Zustandspunkt des Gutes bereits von der Kühlgrenze 33,8 auf eine etwas höhere Temperatur 33,85 gestiegen. Da gleichzeitig sein Dampfdruck \mathfrak{P} gefallen ist, rückt der Zustandspunkt des Gutes von der Sättigungslinie ab.

Für den folgenden Durchgang ergibt sich

$$\chi_{1282} = 0,1994 - 0,185 (0,03150 - 0,02814) = 0,1988.$$

Es zeigt sich also, daß die Abnahme von χ für die ersten Durchgänge noch gleich der Abnahme im Hauptabschnitt der Trocknung bleibt.

Die Durchführung der Rechnung ergibt schließlich, daß nach Abb. 80 die Luft im Punkte H , der dem 1440ten Durchgange nach 8 h entspricht, etwa in die Mitte zwischen V und A gerückt ist, also bei jedem Durchgange nur noch etwa halb soviel Feuchtigkeit aufnimmt wie im Hauptabschnitt. Der Punkt \mathfrak{S} , der gleichzeitig dem Endzustande des Gutes entspricht, ist von der Sättigungslinie weit abgerückt. Die Kurven AH und $\mathfrak{A}\mathfrak{S}$ streben dem Punkte V als Ausgleichpunkt zu, der nach unendlich langer Trockenzeit erreicht würde. Im Zeitbild der Abb. 81 zeigt sich, daß die Temperatur des Gutes im hygroskopischen Gebiet anfangs langsam, dann rasch und stetig ansteigt und nach 8 h $40,5^\circ$ erreicht hat. Der Feuchtigkeitsgehalt des Gutes sinkt im hygroskopischen Gebiet immer langsamer und erreicht nach 8 h den Wert 0,125. Die χ -Linie stellt im hygroskopischen Gebiet eine Kurve dar, die asymptotisch zu dem Wert $\chi_{\mathfrak{H}} = 0,2 \cdot \varphi_v$ verläuft, der nach unendlicher Zeit erreicht wird, wenn der Zustand von Gut und austretender Luft im Punkte V zusammenfällt. Wird die Trocknung nach 8 h, wie vorausgesetzt, abgebrochen, so hat die Trockenkraft, die im Zeitbilde aus dem Unterschied $\mathfrak{P} - P_{D_v}$ für die eintretende, $\mathfrak{P} - P_{D_g}$ für die austretende Luft hervorgeht, gegenüber dem Hauptabschnitt noch nicht wesentlich abgenommen, was auch durch den Verlauf der χ -Kurve bestätigt wird.

Im vorliegenden Falle kann die Untersuchung als beendet angesehen werden, da tatsächlich nach den angesetzten 8 h der Feuchtigkeitsgehalt des Gutes auf etwa das erwünschte Maß gesunken ist. Wäre dies nicht der Fall und der Feuchtigkeitsgehalt $\chi_{\mathfrak{H}}$ nach 8 h zu hoch geblieben, so müßte eine nachträgliche Berichtigung stattfinden. Sie ist in einfacher Weise möglich, wenn die Voraussetzungen so ge-

ändert werden, daß das i - x - und Zeitbild gültig bleiben und die Rechnung einfach fortgesetzt werden darf. Bedingung hierfür ist, daß die Werte $\frac{G_L \cdot Z}{\mathcal{G}_x} \cdot \frac{\bar{L}}{3600 \cdot w}$ und $\frac{\mathfrak{F} \cdot Z}{G_L}$ gleichbleiben. Wird also die Trockenzeit z. B. von 8 auf 16 h verdoppelt, so muß auch die Reinluftmenge G_L von 100000 auf 200000 kg/h erhöht werden. Hierbei wird die Länge der Kammer, da sie die doppelte Menge $\mathcal{G}_x \cdot Z = 6000$ kg, gemessen als Trockenstoff, fassen muß, $2 \cdot 22 = 44$ m lang. Die Geschwindigkeit w behält ihre Größe bei, da Luftmenge und Querschnitt sich beide im gleichen Verhältnis ändern. Bei bestimmter Tiefe L bleibt daher auch der Wert $\frac{L}{3600 \cdot w}$, d. h. die Zeit für einen Durchgang, dieselbe. Hieran würde sich nichts ändern, wenn die Kammer, statt in der Länge, in der Tiefe verdoppelt würde. Es ergäbe sich alsdann eine Tiefe von $2 \cdot 10 = 20$ m, eine sekundliche Geschwindigkeit von $w = 2 \cdot 0,5 = 1$ m/s und damit eine Durchgangsdauer von $\frac{20}{1} = 20$ s, wie ursprünglich angenommen.

Ist daher am Ende des Rechnungsganges der wünschenswerte Feuchtigkeitsgehalt des Gutes noch nicht erreicht, so kann die Untersuchung ungeändert weitergeführt werden, es muß nur im Verhältnis der sich schließlich ergebenden vergrößerten Trockenzeit Z auch die Menge G_L der angewandten Reinluft gegenüber der ursprünglichen Annahme erhöht werden. Umgekehrt ist zu verfahren, wenn die Durchführung der Trocknung über das für den Endfeuchtigkeitsgehalt des Gutes gesteckte Ziel hinaus führt. Die Untersuchung ist alsdann vorzeitig abzubrechen und gegenüber der ursprünglichen Annahme die angewandte Luftmenge im Verhältnis der berichtigten zur ursprünglich angenommenen Zeit zu verkleinern.

H. Verlauf der Zustandsänderung bei Trocken- vorrichtungen mit gleichbleibendem Trockenbild und Bewegung der Luft im Querstrom zum Gut.

Die vorausstehenden Erörterungen und die Abb. 80 und 81 liefern auch die Grundlagen für die Verfolgung des Trockenvorganges bei Vorrichtungen, die mit bewegtem Gut arbeiten, bei denen jedoch die Luftbewegung nicht der des Gutes gleich- oder entgegengerichtet ist, sondern quer dazu verläuft. Dieser Fall liegt z. B. vor, wenn als Gutsträger hordenartige, durchlochte, bewegte Bänder verwendet werden, durch die die Luft hindurch-

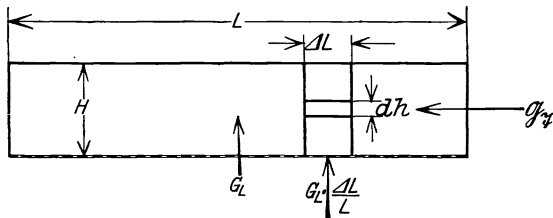


Abb. 82. Querstromtrockner.

dringt, oder wenn in Zerstäubungstrocknern der Flüssigkeitsschleier, wie üblich, senkrecht zu seiner Ebene von der Luft durchquert wird.

Wird der Weg des Gutes innerhalb der Trockenvorrichtung in einzelne Abschnitte derart unterteilt gedacht, daß jedem Abschnitt gleiche Menge von Gut und Luft zufällt, so kann bei genügender Unterteilung für den Teil, in dem das Rohgut im Zustande \mathfrak{R} eintritt, von der Veränderung des Gutes abgesehen werden. In einem beliebigen Abschnitt mit der Trocknerteillänge ΔL strömen nach Abb. 82, durch

das Raumelement mit der Schichthöhe dh , $\frac{G_L \cdot \Delta L}{L}$ kg/h Reinfluft. $\mathfrak{G}_x \cdot Z$ ist das gesamte Fassungsvermögen des Trockners, $\mathfrak{F} \cdot Z$ die entsprechende Oberfläche, die der gesamten Reinfluftmenge G_L kg/h ausgesetzt ist. Auf den Teil $\frac{G_L \cdot \Delta L}{L}$ entfällt im Abschnitt ΔL für die gesamte Schichthöhe die Fläche $\mathfrak{F} \cdot Z \cdot \frac{\Delta L}{L}$, für das Raumelement mit der Schichthöhe dh nur $\mathfrak{F} \cdot Z \cdot \frac{\Delta L}{L} \cdot \frac{dh}{H}$.

Die Formeln (50) und (51) behalten für den Abschnitt ΔL Gültigkeit, wenn darin $\frac{G_L \cdot \Delta L}{L}$ statt G_L und $\mathfrak{F} \cdot Z \cdot \frac{\Delta L}{L} \cdot \frac{dh}{H}$ statt $\mathfrak{F} \cdot dz$ gesetzt wird. Sie lauten alsdann

$$di = \frac{\mathfrak{F} \cdot Z \cdot \Delta L \cdot L \cdot dh}{L \cdot G_L \cdot \Delta L \cdot L \cdot H} \cdot k' (i_g - i_n),$$

$$\frac{di}{i_g - i_n} = \frac{\mathfrak{F} \cdot Z}{H \cdot G_L} \cdot k' \cdot dh, \quad (99)$$

$$\frac{i_g - i_v}{i_g - i_n} = e^{\frac{\mathfrak{F} \cdot Z}{G_L} \cdot k'}, \quad (93a)$$

$$\frac{x_g - x_t}{x_g - x_n} = e^{\frac{\mathfrak{F} \cdot Z}{G_L} \cdot k'}. \quad (94a)$$

Die Formeln (93a) und (94a) stimmen genau mit (93) und (94) überein.

Wird die Temperaturänderung Δt nach Fortbewegung des Gutes um ΔL gesucht, so ist in Formel (71) zu setzen: $\frac{G_L \cdot \Delta L}{L}$ statt G_L , $i_n - i_v$ statt Δi , $x_n - x_v$ statt Δx , und es wird

$$\frac{G_L \cdot \Delta L}{L} [i_n - i_v - i_{\text{St}}(x_n - x_v)] = - \mathfrak{G}_x \cdot \mathfrak{C} \cdot \Delta t, \quad (100)$$

$$\Delta t = \frac{G_L \cdot \Delta L}{\mathfrak{G}_x \cdot \mathfrak{C} \cdot L} [i_v - i_n + i_{\text{St}}(x_n - x_v)]. \quad (101)$$

Statt $\frac{L}{3600 \cdot w \cdot Z}$ in Formel (95a) steht hier $\frac{\Delta L}{L}$. Beide bedeuten einen Bruchteil der gesamten Trockenzeit, $\frac{L}{3600 \cdot w \cdot Z}$ den, der auf einmaligen Durchgang entfällt, $\frac{\Delta L}{L}$ den, der der Weglänge ΔL zukommt.

Es folgt hieraus eine vollständige Übereinstimmung des i - x -Bildes nach Abb. 80. Während jedoch beim Kammertrockner die Veränderung längs $G_0 A E H$ sich zeitlich nacheinander vollzieht, entspricht dieser Verlauf beim Querstromtrockner dem örtlich wechselnden Zustand der Luft. Die abgehende Mischluft setzt sich aus den Teilluftströmen verschiedener Beschaffenheit zusammen. Wird zu der Abb. 80 das Zeitbild nach Abb. 81 in beschriebener Weise entworfen, so kann durch Integrierung der x_p -Kurve die mittlere Höhe gefunden werden. Ihr Wert $x_{p\text{mittel}}$ stellt den zeitlich gleichbleibenden Feuchtigkeitsgehalt der ab-

gehenden Mischluft dar. Der Abstand einer im Zeitbild im Ordinatenabstand $x_{g\text{mittel}}$ gezogenen Geraden von der dem Anfangszustand der Luft entsprechenden Geraden für x_v bestimmt die Trockenleistung $G_L (x_v - x_{g\text{mittel}})$. Der in Abb. 81 wiedergegebene Verlauf von x, t und r bleibt gültig, wobei die Abszissen als Zeiten oder als Wege des bewegten Gutes aufgefaßt werden können. Die Länge der Abszissenachse entspricht der gesamten Trockendauer oder der Gesamtlänge des Trockners, in Richtung des Gutsweges gemessen.

Zahlenbeispiel 13. In einem mit beweglichen Horden arbeitenden Querstromkanaltrockner sollen Apfelscheiben mit einem Trockenstoffgewicht $\mathcal{G}_Z \cdot Z = 200 \text{ kg}$ 6 h lang getrocknet werden. Die gesamte Hordenfläche betrage $F = 100 \text{ m}^2$, die Schichtstärke $e = 0,04 \text{ m}$, der von dem Gut eingenommene Inhalt daher $V = \mathfrak{R} \cdot Z$

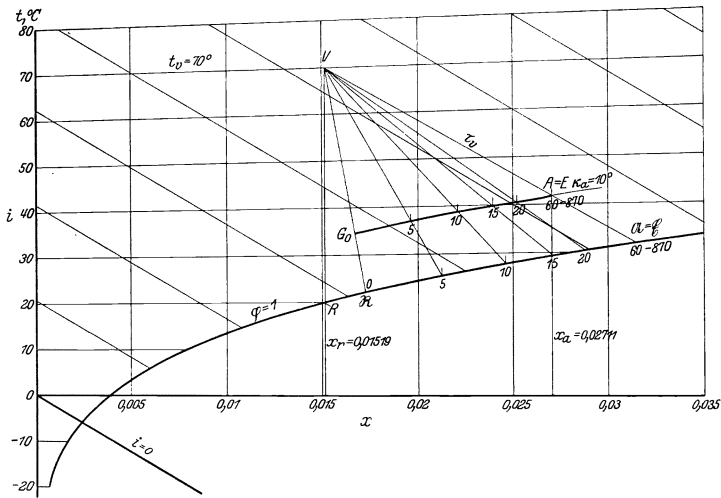


Abb. 83. Untersuchung eines Querstromtrockners $\left(\frac{\mathcal{G}_Z}{G_L} = \frac{1}{500}; \tau_r = 5,4; \tau_h = 0,3 > \tau_c \right)$.

$= 100 \cdot 0,04 = 4 \text{ m}^3$. Die zur Verwendung gelangende Frischluft besitze $t_r = 20^\circ$ und sei gesättigt; ihre Vorwärmung erfolge auf $t_v = 70^\circ$. Die Anfangstemperatur des Gutes betrage $t_r = 22^\circ$, die spezifische Wärme des Trockenstoffgehaltes der Äpfel sei zu $c_{\mathfrak{z}} = 0,37$ angenommen. Der Anfangsfeuchtigkeitsgehalt des Gutes sei $\tau_r = 5,4$. Bei der Trocknung soll ein Endfeuchtigkeitsgehalt $\tau_h = 0,3$ angestrebt werden. Der hygroscopische Punkt liege bei einem Feuchtigkeitsgehalt $\tau_e < \tau_h$, werde also nicht erreicht.

Der Zustand der Frischluft entspricht in Abb. 83 dem Punkte R mit einem anfänglichen Feuchtigkeitsgehalt der Luft von

$$x_r = x_v = 0,01519.$$

Punkt V ergibt einen spezifischen Wärmehalt nach Vorwärmung auf 70° von

$$i_v = 26,3.$$

Dem für den Anfangszustand des Gutes maßgebenden Punkte \mathfrak{R} sind die Werte

$$x_r = 0,01724,$$

$$t_r = 15,7$$

zugeordnet.

156 Die Berechnung des Trockenvorganges mit Luft als Trockenmittel.

In Abb. 83 stellt die Gerade $V\mathfrak{A}$ die τ -Linie dar, längs deren, abgesehen von der Vorwärmung, der Luftzustand sich verändert. Unter Annahme einer Trockenkraft der austretenden Luft von $\varkappa \approx 10^\circ$ sei Punkt A festgelegt. Der Unterschied $x_a - x_v$ beträgt alsdann rund 0,012. Die stündlich aufzutrocknende Feuchtigkeitsmenge ergibt sich zu

$$\mathfrak{G}_\mathfrak{X} (x_r - x_0) = \frac{200}{6} (5,4 - 0,3) = 170 \text{ kg/h}$$

und die stündlich benötigte Luftmenge in vorläufiger Annahme zu

$$G_L \approx \frac{170}{0,012} \approx 14200 \text{ kg/h Reinluft.}$$

Es werde mit einer reichlich bemessenen Luftmenge $G_L = 16667 \text{ kg/h}$, entsprechend einem Verhältnis von $\frac{\text{Reinluft}}{\text{Trockenstoffgewicht}} = \frac{G_L}{\mathfrak{G}_\mathfrak{X}} = 500$ gerechnet. Der durchschnittliche Feuchtigkeitsgehalt der Luft ergibt sich zu rund $x \approx 0,022$. Hieraus folgt das durchschnittliche Luftgewicht zu

$$G_L(1 + x) \approx 17000 \text{ kg/h.}$$

Die hier räumlich aufzufassende Wärmeübergangszahl α_V beträgt

$$\alpha_V = 1150 + 1,5 \cdot \frac{G_L(1 + x)}{f} = 1150 + 1,5 \cdot \frac{17000}{100} \approx 1400,$$

ferner

$$C_{pr} = 0,24 + 0,46 \cdot 0,01724 \approx 0,25.$$

Nach Formeln (93a) und (94a) können demnach errechnet werden

$$i_0 = i_r - (i_r - i_v) e^{-\frac{\mathfrak{B}_\mathfrak{X} \cdot Z}{G_L} \cdot \frac{\alpha_V}{C_{pr}}},$$

$$x_0 = x_r - (x_r - x_v) e^{-\frac{\mathfrak{B}_\mathfrak{X} \cdot Z}{G_L} \cdot \frac{\alpha_V}{C_{pr}}}.$$

Mit

$$\frac{\mathfrak{B}_\mathfrak{X} \cdot Z}{G_L} \cdot \alpha_V = \frac{4}{16667} \cdot 1400 = 0,336$$

folgt

$$i_0 = 15,7 - (15,7 - 16,3) e^{-\frac{0,336}{0,25}} = 18,5,$$

$$x_0 = 0,01724 - (0,01724 - 0,01519) e^{-\frac{0,336}{0,25}} = 0,01670.$$

Hiermit liegt die Lage des Punktes G_0 fest.

Die gesamte Trockenzeit $Z = 6 \text{ h}$ sei in 1000 Zeitabschnitte unterteilt, entsprechend einer Teillänge des Kanals $\frac{\Delta L}{L} = \frac{1}{1000}$. Mit

$$\mathfrak{C}_0 = 0,37 + 5,4 = 5,77$$

für den Ausgangspunkt \mathfrak{A} ergibt sich, wenn 5 Zeiteile zusammengefaßt werden, die Temperaturänderung des Gutes nach Ablauf von $\frac{5 \cdot Z}{1000} \text{ h}$ zu

$$t_{g_5} - t_0 = \frac{500 \cdot 5}{5,77 \cdot 1000} [26,3 - 18,5 + 22(0,01670 - 0,01519)] = 3,4^\circ.$$

Der Punkt 5, der dem Gutzustande nach $\frac{5 \cdot Z}{1000}$ h entspricht, liegt daher auf der Sättigungslinie bei einer Temperatur von $22 + 3,4 = 25,4^\circ$.

Der Feuchtigkeitsgehalt des Gutes ändert sich gleichzeitig um das Maß

$$\varepsilon_r - \varepsilon_5 = \frac{GL}{\Theta \varepsilon} \cdot \frac{\Delta L}{L} (x_0 - x_v) = \frac{500 \cdot 5}{1000} (0,01670 - 0,01519) \approx 0,004.$$

Der neue Wert $\varepsilon_5 = 5,396$ liefert

$$\zeta_5 = 0,37 + 5,396 \approx 5,77.$$

Hiernach können die folgenden Punkte für Luft- und Gutzustand in der in Abb. 83 dargestellten Weise gefunden werden. Die genaue Untersuchung führt nach 0,06 Z h, also im Punkte 60 des i - x -Bildes, zur Erreichung der τ -Linie mit einer Kühlgrenztemperatur $\tau = 31,9^\circ$.

Der zeitliche Verlauf, der im vorliegenden Falle auch gleichzeitig die örtliche Änderung längs des Kanaltrockners darstellt, ist in dem Zeitbilde der Abb. 84 wiedergegeben. Die in $\frac{0}{100}$ eingeteilte gesamte Abszissenlänge stellt die Trockenzeit $Z = 6$ h, 1 Teil also 0,006 h, dar. 166,7 Teile entsprechen 1 h.

Nach Erreichung der Kühlgrenze ergibt die Berechnung folgende Zahlen:

$$\begin{aligned} i_a &= 26,7, & x_a &= 0,2711, \\ i_a &= 26,8, & x_a &= 0,03149, \\ \varepsilon_a &= 5,120, & C_{pa} &= 0,25. \end{aligned}$$

Der Teil der gesamten Trockenzeit, der auf den Hauptabschnitt der Trocknung entfällt, folgt aus

$$\begin{aligned} \frac{z_h - z_a}{Z} &= \frac{\varepsilon_a - \varepsilon_h}{\frac{GL}{\Theta} (x_a - x_v)} \\ &= \frac{5,12 - 0,30}{500 (0,02711 - 0,01519)} = 0,81, \end{aligned}$$

wenn berücksichtigt wird, daß die Trocknung nach Erreichung eines Endfeuchtigkeitsgehaltes des Gutes von $\varepsilon_h = 0,3$ vor Eintritt in das hyroskopische Gebiet abgebrochen wird. Das bedeutet, daß die Kühlgrenze nach

$$0,06 \cdot 6 = 0,36 \text{ h}$$

erreicht und die Trocknung bis auf $\varepsilon_h = 0,3$ nach weiteren

$$0,81 \cdot 6 = 4,86 \text{ h,}$$

also vom Beginn ab gerechnet nach 5,22 h beendet ist.

Die ursprünglich zu 6 h angesetzte Trockenzeit ist daher nicht erforderlich, bzw. würde, unter Beibehaltung der getroffenen Annahmen, zu einer weitergehen-

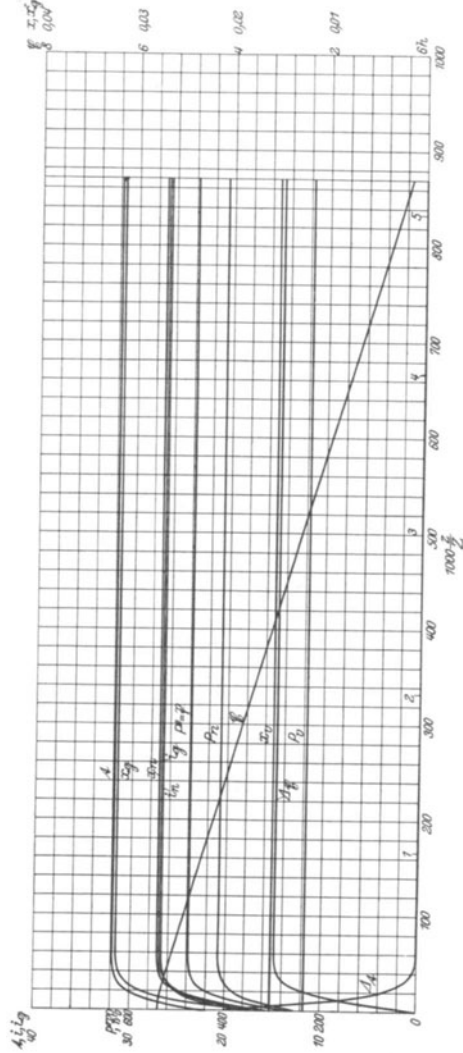


Abb. 84. Zeitbild zur Untersuchung eines Querstromtrockners.

den Trocknung führen, als verlangt ist. Wird aus diesem Grunde der Trockenvorgang nach 5,22 h beendet, d. h. der Trockenkanal im Verhältnis $\frac{5,22}{6}$ auf das 0,87fache seiner ursprünglichen Länge verkürzt, so bleibt der durchgeführte Rechnungsgang und damit das i - x - und Zeitbild gültig, wenn sich die Werte $\frac{G_L}{\mathcal{G}_x} \cdot \frac{\Delta L}{L}$ und $\frac{\mathfrak{B}_x \cdot Z}{G_L}$ nicht ändern. Dies ist der Fall, wenn, entsprechend der auf das 0,87fache verminderten Trockenzeit, die stündlich umlaufende Luftmenge auf $0,87 \cdot 16667 = 14500$ kg/h vermindert wird. Die Teile des Zeitbildes, die zuvor $\frac{1}{1000}$ der Trockenzeit = 0,006 h entsprachen, stellen nunmehr gleichfalls 0,006 h, d. h. den $\frac{1}{1000 \cdot 0,87} = \frac{1}{870}$ Teil der neuerlich gewählten Trockenzeit dar. \mathcal{G}_x und \mathfrak{B}_x und damit die stündlich durchlaufende Gutsmenge bleiben ungeändert.

VIII. Die Berechnung des Trockenvorganges bei Wärmeübertragung an das Gut durch beheizte Flächen.

A. Wärmeübertragung von Heizmittel durch metallische Trennflächen an Gut.

Die eigentlichen Heizvorrichtungen lassen sich bei Trockenanlagen nur dann von der Trockenvorrichtung trennen, wenn es sich um reine Lufttrocknung handelt, bei der die Vorwärmung der Luft ausschließlich vor ihrem Zusammentreffen mit dem Gute erfolgt. Es ist nicht Aufgabe dieser Arbeit, für die Berechnung derartiger Luftheritzer Anweisung zu geben.

Ähnliches gilt, wenn bei einer Trockenanlage mit Luft als Trockenmittel Heizvorrichtungen innerhalb des Trockenraumes untergebracht sind. Hier beginnt jedoch die Wechselwirkung zwischen Gut und Heizfläche. Nur die Wärmeübertragung durch Leitung und Strömung wird durch die Luft übermittelt. Daneben ergibt sich eine unmittelbare Wärmeübertragung zwischen Heizfläche und Gut durch Strahlung. Sie ist im allgemeinen unerwünscht, weil sie die einzelnen Teile des Gutes ungleichmäßig trifft. In der Regel wird daher eine Abblendung der Heizvorrichtung durch Holzwände oder andere schlecht leitende Mittel, gegebenenfalls unter entsprechender Oberflächenbehandlung der äußeren Seite, vorgenommen und dadurch die Wärmestrahlung auf ein Maß herabgesetzt, dessen zahlenmäßige Berücksichtigung kaum nötig ist.

Dagegen sind die Teile der Heizflächen, mit denen das Gut in unmittelbare Berührung kommt, von der Trockenvorrichtung selbst nicht zu trennen.

Es bedeute

F_i die vom Gut bedeckte, beheizte Fläche, in m^2 ,

ϑ die Temperatur der beheizten Wand, in $^{\circ}C$,

t_i die Temperatur des Heizmittels, in $^{\circ}C$,

p_i die absolute Spannung des Heizmittels, in kg/cm^2 ,

e_i die Stärke der trennenden Metallwand, in m,
 λ_i die Wärmeleitzahl der Wand, in kcal/m \cdot °C \cdot h,
 k_i die Wärmedurchgangszahl von Heizmittel an Gut, in kcal/m 2 \cdot °C \cdot h,
 t_i die Temperatur des Gutes an der Heizfläche, in °C,
 t die Temperatur des Gutes an der freien Fläche, in °C,
 Q_i den Wärmestrom vom Heizmittel an das Gut, in kcal/h.

1. Wärmeübergangszahl α .

Der Wärmeübergang erfolgt einerseits von dem Heizstoff an die Wand des Heizkörpers, andererseits von der entgegengesetzten Wand des Heizkörpers an das Gut. Der heizende Stoff besteht aus einem fließenden Körper im allgemeinsten Sinne, also aus einer tropfbaren Flüssigkeit, Gas oder Dampf.

Für den Wärmeübergang zwischen tropfbarer Flüssigkeit und der Wand eines kreisförmigen innen durchströmten Rohres liefert die Untersuchung von Soennecken¹ die Formel

$$\alpha = 1400 \cdot d^{0,16} \cdot w^{0,79} (1 + 0,016 \cdot \vartheta), \quad (102)$$

wenn für die Beiwerte die für mittlere Rauigkeitsgrade geltenden Zahlen und die Exponenten in der Höhe eingesetzt werden, wie sie der Nusselt-Gröberschen Formel entsprechen.

In Fortsetzung der Soenneckenschen Versuche hat Stender² den Einfluß von Wand und Flüssigkeitstemperatur auf den Wärmeübergang getrennt untersucht. Er ist hierbei für blanke Rohre von 17 und 28 mm Durchmesser zu der von Baustoff, Strömungsrichtung und Richtung des Wärmeüberganges unabhängigen Gleichung

$$\alpha = 2830 (1 + 0,0215 \cdot t_m - 0,00007 \cdot t_m^2) w^{0,91-0,00115 t_m} \quad (103)$$

gelangt, wobei $t_m = t_i + 0,1(\vartheta - t_i) = 0,9 \cdot t_i + 0,1 \cdot \vartheta$ ist. Die Stendersche Formel kann ebensowenig wie die von Soennecken als endgültige Lösung gelten, weil sie den sicher vorliegenden Einfluß von Rohrlänge und Rohrdurchmesser nicht zu berücksichtigen gestattet. Sie weist auf einen Einfluß der Temperatur, bzw. der darin ausgedrückten Stoffeigenschaften der Flüssigkeit, hin, der die Wirkung der Wandtemperatur überträgt.

In Anlehnung an die Nusselt-Gröbersche Formel haben McAdams und Frost³ die Formel

$$\alpha = b \left(1 + \frac{b_1}{t} \right) d^{-0,2} \cdot w^{0,8} \cdot \gamma^{0,8} \cdot \mu_0^{0,8} \quad (104)$$

entwickelt, in der b und b_1 Beiwerte sind und μ_0 die relative Zähigkeit,

¹ Soennecken: Der Wärmeübergang von Rohrwänden an strömendes Wasser. Forschungsheft 108/109.

² Stender: Der Wärmeübergang an strömendes Wasser in vertikalen Rohren. Berlin 1924.

³ McAdams u. Frost: Heat transfer for water flowing inside pipes. Refr. Engg. 1924.

verglichen mit der Zähigkeit von Wasser bei 20°, bedeutet. Sie unterscheidet sich von der in ähnliche Form gebrachten Nusselt-Gröberschen Gleichung

$$\alpha = 22,5 \left(\frac{l}{d} \right)^{-0,05} \cdot d^{-0,21} \cdot w^{0,79} \cdot \gamma^{0,79} \cdot c_p^{0,79} \cdot \lambda^{0,21},$$

abgesehen von den Beiwerten und dem geringfügigen Unterschied der Exponenten, durch die Annahme eines stärkeren Einflusses der Rohrlänge bzw. des Verhältnisses $\frac{l}{d}$ und durch Berücksichtigung des Einflusses der Zähigkeit, den in ähnlicher Weise Nusselt¹ für Strömung von Gasen senkrecht zur Rohrachse festgestellt hat. Die Darstellung der Formel (104) verdient deshalb den Vorzug, weil sie Aussicht bietet, Flüssigkeiten im weitesten Sinne einheitlich zu berücksichtigen.

ten Bosch² entwickelte eine für allgemeine Flüssigkeiten gültige Beziehung, die ungeformt lautet

$$\alpha = \frac{142 g^{0,25}}{1 - \frac{\delta}{\delta'} + 3600 g \cdot \frac{\delta}{\delta'} \cdot \frac{\gamma_{\mathfrak{G}}}{\gamma_k} \cdot \frac{c_{pk} \cdot \mu_k}{\lambda_{\mathfrak{G}}}} \cdot d^{-0,25} \cdot w^{0,75} \cdot \gamma_{\mathfrak{G}}^{0,75} \cdot c_{pg} \cdot \mu_{\mathfrak{G}}^{0,25}$$

und Ähnlichkeit mit der von McAdams und Frost aufgestellten Formel (104) besitzt. In der ten Bosch'schen Gleichung beziehen sich die mit Index \mathfrak{G} bzw. k gekennzeichneten Werte auf den Flüssigkeitszustand in der Grenzschicht bzw. in dem Flüssigkeitskern. $\frac{\delta}{\delta'}$ bedeutet das Verhältnis der wirklichen zur idealen Grenzschichtdicke.

Auf Grund einer Annäherungstheorie haben Schiller und Burbach³ für allgemeine Flüssigkeiten die Beziehung entwickelt

$$\alpha = 18,4 d^{-0,25} \cdot w^{0,75} \cdot \gamma^{0,75} \cdot c_p^{0,75} \cdot \lambda^{0,25},$$

die der Nusselt-Gröberschen Gleichung nachgebildet ist, wegen Vernachlässigung des Verhältnisses $\frac{l}{d}$, jedoch nur für große Anlaufängen gilt. Hierbei sind die Werte λ und c_p in der Höhe einzusetzen, die für die allgemeine Flüssigkeit bei der Wandtemperatur gilt, γ und w als die mittleren, für die allgemeine Flüssigkeit geltenden Beträge.

Schack⁴ gibt die von Stender aufgestellte Beziehung in der vereinfachten Form wieder

$$\alpha = 2440(1 + 0,014 t_i) d^{0,1} \cdot w^{0,85},$$

die den Einfluß des Rohrdurchmessers berücksichtigt.

Beim Vergleich der verschiedenen Formeln mit dem Ergebnis von Versuchen findet Schack die größten Abweichungen bei der Schiller-

¹ Nusselt: Die Kühlung eines Zylinders durch einen senkrecht zur Achse strömenden Luftstrom. Ges.-Ing. 1922.

² ten Bosch: Der Wärmeübergang in tropfbaren Flüssigkeiten. Z. V. d. I. 1926. Die Wärmeübertragung, 2. Aufl. Berlin: Julius Springer 1927.

³ Schiller-Burbach: Wärmeübergang strömender Flüssigkeit in Rohren. Z. V. d. I. 1929.

⁴ Schack: Der industrielle Wärmeübergang. Düsseldorf 1929.

schen Formel, die für die Anwendung noch nicht reif scheint. Bessere Übereinstimmung liegt vor bei McAdams-Frost und Soenneken, während bei der Formel von Stender in der ursprünglichen und vereinfachten Form die Unterschiede am geringsten werden. Für die hier vorliegenden Fälle kann daher vorläufig empfohlen werden, für Wasser die vereinfachte Stendersche Formel, für andere Flüssigkeiten die von McAdams-Frost zu verwenden.

Im vorstehenden war angenommen, daß die Heizfläche die Form eines Rohres von kreisförmigem Querschnitt besitzt und das Heizmittel mit einer Geschwindigkeit oberhalb des kritischen Wertes durch das Innere strömt. Bewegt sich dagegen die Flüssigkeit um die Rohre, so ist bei Trockenvorrichtungen der üblichen Bauweise die Bewegung der Flüssigkeit in der Regel als freie Strömung aufzufassen, für die nach Nusselt¹ die Beziehung gilt

$$\frac{\alpha_m \cdot d}{\lambda_m} = \Phi \left(\frac{\lambda_m}{3600 c_{pm} \cdot g \cdot \mu_m}, \frac{d^3 \cdot \gamma_m^2 \cdot \beta_m (t_i - \vartheta)}{g_m^2} \right),$$

wenn die Lage des Rohres waagrecht oder nahezu waagrecht verläuft. Hierbei bedeutet Φ eine Funktion des Klammerwerts. Die Form dieser Funktion entspricht der Abb. 31, wenn als Abszisse das Verhältnis der beiden in der Klammer stehenden Werte, also der Betrag $\frac{3600 d^3 \cdot \gamma_m^2 \cdot \beta_m \cdot c_{pm} (t_i - \vartheta)}{\lambda_m \cdot \mu_m}$ eingesetzt wird.

Außer erwärmtem Wasser wird als Heizflüssigkeit in Ausnahmefällen Öl wegen des höheren Siedepunktes verwendet. Der Wärmeübergang von Öl an Metall ist wegen der geringeren Wärmeleitfähigkeit und größeren Zähigkeit niedriger als bei Wasser und Dampf. Die spezifische Wärme von Öl liegt erheblich unter der von Wasser, so daß beim ersten größeren Mengen in Umlauf zu halten oder größere Temperaturgefälle zuzulassen sind. Das benutzte Öl muß einen hohen Flammpunkt besitzen, da der Hauptgrund für seine Verwendung in der damit möglichen Steigerung der Heizmitteltemperatur auf etwa 250° liegt, die bei Sattendampf eine im allgemeinen sich verbietende Steigerung des Betriebsdruckes auf etwa 40 at bedingen würde. Weiter ist das Heizöl so zu wählen, daß die Gefahr einer Verkohlungs- und Krustenbildung auf der Heizfläche vermieden wird, weil hierdurch der Wärmedurchgang eine erhebliche Verschlechterung erfahren würde.

Gase als mittelbarer Heizstoff kommen wohl nur in Form von Feuergasen in Betracht, weil wegen der schlechten Wärmeübergangszahl nur durch erhebliche Temperaturunterschiede einigermaßen befriedigende Leistungen zu erzielen sind. Für die Höhe des Wärmeübergangs bieten die Untersuchungen in Abschnitt V. B. einen Anhalt. Neben der Höhe der Temperatur ist die Geschwindigkeit von erheblichem Einfluß und soweit wie möglich zu steigern.

Besonders günstig sind die Wärmeübergangsverhältnisse zwischen

¹ Nusselt: Die Wärmeabgabe eines waagrecht liegenden Drahtes oder Rohres in Flüssigkeiten und Gasen. Z. V. d. I. 1929.

Sattdampf und Wand. Die Wärmeübergangszahl gibt Nusselt¹ für ruhenden oder mit einer Geschwindigkeit $w < 1 \text{ m/s}$ um waagerechte Rohre strömenden Dampf zu

$$\alpha_h = 2886 \sqrt[4]{\frac{2 \cdot r \cdot \gamma^2 \left(\frac{\lambda}{3600}\right)^3}{3 \cdot \mu \cdot d (t_i - \vartheta)}} \quad (105)$$

an, wobei die Werte γ , λ und μ für flüssiges Wasser bei der Temperatur $\frac{t_i + \vartheta}{2}$ gelten.

Für Wasserdampf von 100° ergibt sich hieraus

$$\alpha_h \approx \frac{8000}{\sqrt[4]{d (t_i - \vartheta)}},$$

für Wasserdampf von 160°

$$\alpha_h \approx \frac{9300}{\sqrt[4]{d (t_i - \vartheta)}}.$$

Erhöhung der Spannung wirkt daher günstig.

Mit der von Schack² vorgeschlagenen Vereinfachung

$$\sqrt[4]{\frac{r \cdot \gamma^2 \left(\frac{\lambda}{3600}\right)^3}{\mu}} \approx 1,72 + 0,0134 \cdot \frac{t_i + \vartheta}{2}$$

schreibt sich die Nusseltsche Formel

$$\alpha_h = \frac{4460 + 17,7 (t_i + \vartheta)}{\sqrt[4]{d (t_i - \vartheta)}}.$$

Für waagerechte, innen beheizte Rohre gibt diese Formel den oberen Grenzwert, der unter der Annahme sofortiger Abführung des sich sammelnden Kondensats gilt.

Besteht die Heizfläche aus einer senkrechten Wand oder aus senkrechten Rohren mit der Höhe $H \text{ m}$, so beträgt nach Nusselt

$$\alpha_v = 3400 \sqrt[4]{\frac{r \cdot \gamma^2 \left(\frac{\lambda}{3600}\right)^3}{\mu \cdot H (t_i - \vartheta)}}$$

bzw. mit der Vereinfachung nach Schack

$$\alpha_v = \frac{5800 + 23 (t_i + \vartheta)}{\sqrt[4]{H (t_i - \vartheta)}}.$$

Bildet die gerade Wand mit der Waagerechten den Winkel β , so nimmt die Wärmeübergangszahl auf

$$\alpha_\beta = \alpha_v \sqrt[4]{\sin \beta}$$

ab.

¹ Nusselt: Die Oberflächenkondensation des Wasserdampfes. Z. V. d. I. 1916.

² Schack: Der industrielle Wärmeübergang. Düsseldorf 1929.

Zuweilen besteht die Heizfläche aus Rohrbündeln. Liegen hierbei die Rohre waagrecht und so übereinander, daß das Niederschlagwasser nacheinander über n Rohre rieselt, so kann die mittlere Wärmeübergangszahl zu

$$\alpha_m = \frac{\alpha_h}{\sqrt[4]{n}}$$

angenommen werden.

Die Wirksamkeit dampfbeheizter Flächen ist, soweit der Wärmeübergang auf der Dampfseite in Betracht kommt, bedingt durch rasche Abführung des entstehenden Niederschlagwassers. Als natürliches Mittel hierfür bietet sich die Spülkraft des Dampfes, die mit seiner Fließgeschwindigkeit, bei gegebenem Querschnitt also mit seiner Menge, wächst. Von diesem Gesichtspunkte aus erscheint es richtig, wenn bei dampfbeheizten Flächen mit großem Querschnitt ein Kunstgriff insofern angewendet wird, als nicht nur die Dampfmenge durchströmt, die darin niederschlagen würde, sondern ein Mehrfaches. Der Überschuß muß hierbei weiterverwendet werden. Bietet sich die Möglichkeit innerhalb der Trockenvorrichtung, so ist die Lösung einfach. In anderen Fällen muß die Trockenanlage irgendwie mit anderen Betrieben gekuppelt werden, z. B. mit Heiz- und Dampfkraftanlagen. Verwirklicht findet sich dieses Verfahren bei den Papiertrockenzylindern der Firma Farnsworth & Co. Sie teilt die Trockenzylinder in zwei Gruppen ein, von denen die eine mit $\frac{1}{4}$ der Gesamtzahl sich am Naßende, die restlichen $\frac{3}{4}$ am Trockenende befinden. Der gesamte Dampf strömt der letzten Gruppe zu. Der nach Abscheidung des Niederschlagwassers verbleibende Rest wird der Naßendgruppe zugeleitet.

Hinsichtlich des Einflusses der Dampfüberhitzung kann heute als erwiesen gelten, daß mit ihr die übertragene Wärmemenge, verglichen mit der Anwendung von Sattdampf gleicher Spannung, zunimmt. Voraussetzung hierfür ist, daß die Verhältnisse auf der Gegenseite sich durch die Überhitzung des Dampfes nicht verschlechtern. Liegt die Wandtemperatur unter der Sättigungstemperatur des Dampfes, so ergibt sich nach Nusselt¹ das Verhältnis der übertragenen Heizleistung

$$\frac{Q_{\text{überh}}}{Q_{\text{ges}}} = \sqrt[4]{1 + \frac{c_{pm}}{r} (t_i - t'_i)},$$

wenn

t_i die Temperatur des überhitzten Dampfes, in °C,

t'_i seine Sättigungstemperatur, in °C,

c_{pm} die mittlere spezifische Wärme des überhitzten Dampfes zwischen t'_i und t_i , in kcal/kg·°C

bedeuten. Die Wärmeübergangszahl für überhitzten Dampf ist hierbei kleiner als für Sattdampf und zwar im Verhältnis

$$\frac{\alpha_{\text{überh}}}{\alpha_{\text{ges}}} = \sqrt[4]{1 + \frac{c_{pm}}{r} (t_i - t'_i)} \cdot \frac{t'_i - \vartheta}{t_i - \vartheta}.$$

¹ Nusselt: Der Wärmeübergang zwischen Arbeitsmedium und Zylinderwand in Kolbenmaschinen. Forschungsheft 300.

Auf diese Beziehung hat erstmalig Stender¹ klar hingewiesen. Die Untersuchungen von Jakob, Erk und Eck² fanden die Bestätigung durch den praktischen Versuch an Einzelrohren. Neuerdings hat Kaiser³ den Einfluß der Dampftemperatur auf den Wärmeübergang bei den dampfbeheizten Zylindern von Papiertrocknern geprüft und im besonderen Falle gefunden, daß bei einem Dampfdruck von 1,19 bzw. 1,42 at durch Überhitzung um je 100° die Wärmeleistung um etwa 3 bzw. 8% zunahm.

Während bei dem Wärmeübergang von Heizmittel an Wand gegenüber den allgemeinen Heizvorrichtungen keine grundsätzlichen Unterschiede bestehen, ergibt sich ein solcher für die Wärmeübergangszahl zwischen Wand und daran anliegendem Gut, weil es sich hierbei in der Regel nicht um einen einheitlichen Stoff handelt, sondern der Gutszustand mit dem Fortschreiten der Trocknung stark wechselt. Beim Auflaufen hat das Gut ganz oder nahezu flüssige Form, so daß mit Wärmeübergangszahlen gerechnet werden kann, wie sie ruhender Flüssigkeit zukommen. Mit abnehmendem Feuchtigkeitsgehalt nimmt das Gut mehr und mehr die Eigenschaften eines festen Körpers mit geringer Wärmeleitfähigkeit an. Dementsprechend ist mit einem Zunehmen des Wärmeübergangswiderstandes zu rechnen. Für die Beurteilung der Trockenwirkung auf das Gut ist der Temperaturabfall von Wichtigkeit, der an der Berührungsfläche auftritt. Er ergibt sich, wenn

F die wirksame Austauschfläche, in m^2 , bedeutet, zu

$$\vartheta - t_i = \frac{Q_i}{F \cdot \alpha},$$

ist also bei einer bestimmten Flächenbelastung $\frac{Q_i}{F}$ um so größer, je kleiner α wird. Schlechte Übergangsverhältnisse an der Trennschicht schützen das Gut vor übermäßiger Erwärmung.

2. Wärmeleitzahl λ_i .

Die Wärmeleitzahl der trennenden Metallwände liegt wohl ausnahmslos so hoch, daß der Wärmeleitwiderstand vernachlässigt werden kann.

3. Wärmedurchgangszahl k .

Maßgebend für die Höhe der Wärmeübertragung von Heizmittel an Gut ist der Wärmedurchgangswiderstand

$$\frac{1}{k_i} = \sum \frac{1}{\alpha} + \sum \frac{e}{\lambda}, \quad (106)$$

¹ Stender: Der Wärmeübergang bei kondensierendem Heißdampf. Z. V. d. I. 1925.

² Jakob-Erk: Der Wärmeübergang beim Kondensieren von Heiß- und Satt-dampf. Forschungsheft 310.

Jakob-Erk-Eck: Der Wärmeübergang in einem waagerechten Rohr beim Kondensieren von Satt- und Heißdampf. Z. V. d. I. 1929.

³ Kaiser: Das Verhalten von Papiermaschinen beim Betrieb mit Satt- und Heißdampf. Z. Bayer. Rev. Ver. 1930.

also die Summe der auftretenden Wärmeübergangswiderstände und der den einzelnen Schichten entsprechenden Wärmeleitwiderstände. Da der Wärmeleitwiderstand $\frac{e_i}{\lambda_i}$ der trennenden Metallwand gegenüber den Wärmeübergangswiderständen verschwindet, hängt der Wärmedurchgangswiderstand bei wesentlicher Verschiedenheit der Wärmeübergangswiderstände und Wärmeleitwiderstände vor allem von dem ungünstigsten Faktor ab, der nach einiger Erfahrung von vornherein leicht erkannt wird. Soll z. B. eine Flüssigkeit durch Feuergase getrocknet werden, so ist der Wärmeleitwiderstand an der gasberührten Seite allein ausschlaggebend, und es darf für ihn $\frac{1}{\alpha} \approx \frac{1}{k_i}$ gesetzt werden.

Auf die Festsetzung der an das Gut übertragenen Wärmemenge, d. h. die Ermittlung von k_i , kann sich die Untersuchung nur dann beschränken, wenn es sich um reine Verdampfung handelt. Wird sie in gleicher Weise auch auf Trockenverfahren ausgedehnt, bei denen einseitige Beheizung und Verdunstung an der freien Fläche des Gutes stattfindet, so handelt es sich um einen Notbehelf, der die richtige Schätzung oder Messung der Temperatur des Gutes zur Voraussetzung hat.

Mit dem Wärmeleitwiderstand $\frac{e}{\lambda_{\text{G}}}$ des Gutes nimmt der Temperaturunterschied an seinen beiden Seiten — beheizter und freier Fläche — zu. Verringerung der Schichtstärke ist daher mit abnehmender Wärmeleitfähigkeit, d. h. fortschreitender Trocknung, von besonderer Bedeutung. Es kann allgemein gesagt werden, daß die Auftragesgeschwindigkeit des Gutes auf die Heizvorrichtung, die in der Regel der Geschwindigkeit der meist zylinderförmigen Trockenvorrichtung entspricht, stets auf das Maß gesteigert werden soll, bei dem das Gut noch genügend haftet und noch sicher abgelöst werden kann, um eine bestimmte Leistung bei geringer Schichtstärke zu erzielen. Verdoppelung der Geschwindigkeit unter Halbierung der Schichtstärke führt zu einer Milderung der Trockenwirkung bei gleichbleibender Trockenleistung und nicht, wie zunächst angenommen werden könnte, zu einem unveränderten Ergebnis. Aus diesem Grunde ist es richtig, wenn bei empfindlichem Gut die Schichthöhe auf 0,2 mm und weniger herabgezogen wird.

Wegen des Wärmeübergangswiderstandes $\frac{1}{\alpha}$ zwischen Gut und freier Umgebung kann auf die Ausführung in Abschnitt V. B. verwiesen werden, wenn es sich um eine Trockenvorrichtung handelt, bei der Luft zur Abführung der Feuchtigkeit dient. Bei Verdampfanlagen, die unter Ausschluß der Umgebungsluft wirken, äußert sich der Übergangswiderstand an der freien Fläche durch eine Steigerung der Temperatur über die Sättigungstemperatur des darüber schwebenden Dampfes, die unwesentlich ist und gegenüber dem Siedeverzug aus anderen Gründen verschwindet.

Wegen der Ungewißheit des Wärmeleitwiderstandes λ_{G} des Gutes erscheint es vorläufig wenig aussichtsreich, eine zahlenmäßige Ermittlung der Wärmedurchgangszahl k zu versuchen. Wenn trotzdem die hierfür maßgebenden Einzelfaktoren ausführlicher besprochen wurden,

so geschah dies mit Rücksicht darauf, daß wohl der Versuch für die Feststellung von k maßgebend bleiben soll, daß jedoch dabei Klarheit über die Möglichkeit bestehen muß, das Ergebnis durch Veränderung der Einzeleinflüsse zu beherrschen. So zahlreich die an Trockenvorrichtungen vorgenommenen Untersuchungen auch sind, so wenige enthalten doch die für Ermittlung von k erforderlichen Zahlenangaben in lückenloser Weise.

Bei Verdampfanlagen entspricht die Temperatur t des Gutes der bei dem vorliegenden Druck sich einstellenden Siedetemperatur, die aus dem $\frac{\mathfrak{P}}{P''}$ - γ -Bild abgeleitet werden kann. Diese Beziehung stimmt zunächst nur für das Eindampfen von Flüssigkeiten, mit genügender Genauigkeit auch für die Trocknung fester Körper durch beheizte Flächen unter Luftabschluß, vorausgesetzt, daß durch entsprechende Maßnahmen eine Überhitzung des Gutes an der Heizfläche verhindert wird. Für Kaffee ergibt sich z. B. der Zusammenhang der Abb. 85, wenn der Druck zu 1000 kg/m^2 angenommen wird, das Trocknen also unter Luftleere erfolgt. Solange das Gut feucht ist, bleibt die Siedetemperatur mit $45,4^\circ$ unveränderlich. Für einen Feuchtigkeitsgehalt γ , dem ein Wert $\frac{\mathfrak{P}}{P''} = 0,5$ bzw. $\frac{P''}{\mathfrak{P}} = 2$ zukommt, ergibt sich die Siedetemperatur, entsprechend einer Sattdampfspannung von $2 \cdot 1000 = 2000 \text{ kg/m}^2$, zu $59,7^\circ$, für einen Feuchtigkeitsgehalt γ , zu dem ein Wert $\frac{\mathfrak{P}}{P''} = 0,25$ bzw. $\frac{P''}{\mathfrak{P}} = 4$ gehört, zu $75,4^\circ$. Für den Zustand der vollständigen Trockenheit wird $t = \infty$, d. h. das Austreiben der letzten Spur von Feuchtigkeit ist unmöglich. In der gleichen Abbildung ist auch der Verlauf der Temperatur für höhere Luftleere, $\mathfrak{P} = 500 \text{ kg/m}^2$, eingetragen. Die Temperaturen liegen hierbei niedriger, das Austreiben der Feuchtigkeit ist daher in höherem Grade möglich, wenn im Vergleichsfalle gleiche Temperaturen angewandt werden können.

Für die Verfolgung des Trockenvorganges sei die vereinfachende Annahme getroffen, daß die Wärmedurchgangszahl k_i zwischen Heizmittel und Gut unveränderlich sei und die Veränderung des Wärmeinhalts des Guts gegenüber dem Wärmeverbrauch für die Verdampfung vernachlässigt werde. Tatsächlich wird bei flüssigem Trockengut infolge der mit der Eindickung zunehmenden Zähigkeit der Wärmeübergangswiderstand zwischen Wand und Gut und damit der Wärmedurchgangswiderstand größer. Die Zunahme ist dann besonders groß, wenn mit fortschreitender Trocknung das Gut schließlich die Eigenschaft einer Flüssigkeit verliert oder von vornherein die Form des festen Körpers besitzt, weil alsdann die für den Wärmeübergang maßgebenden Stoffwerte (γ , c_p , λ) sich mit abnehmender Feuchtigkeit im Sinne eines sinkenden Wertes der Wärmeübergangszahl verändern. Die Annahme gleichen Wärmeinhalts des Gutes ist angenähert erfüllt, solange das Gut feucht ist, die Verdampfung daher bei der dem Druck zugeordneten gleichbleibenden Siedetemperatur erfolgt. Nach Eintritt in das hygroskopische Gebiet steigt die Temperatur des Gutes immer rascher.

Die entsprechende Zunahme des Wärmehalts gewinnt neben dem Wärmeverbrauch für die Verdampfung wachsende Bedeutung.

In Abb. 85 ist neben der Temperatur des Gutes t die zu 120° angenommene Temperatur t_i des Heizmittels eingetragen. Dem Schnittpunkt H ist als Abszisse der Feuchtigkeitsgehalt x_∞ zugeordnet, der im Grenzfalle erreicht werden kann. Das für die Wärmeübertragung

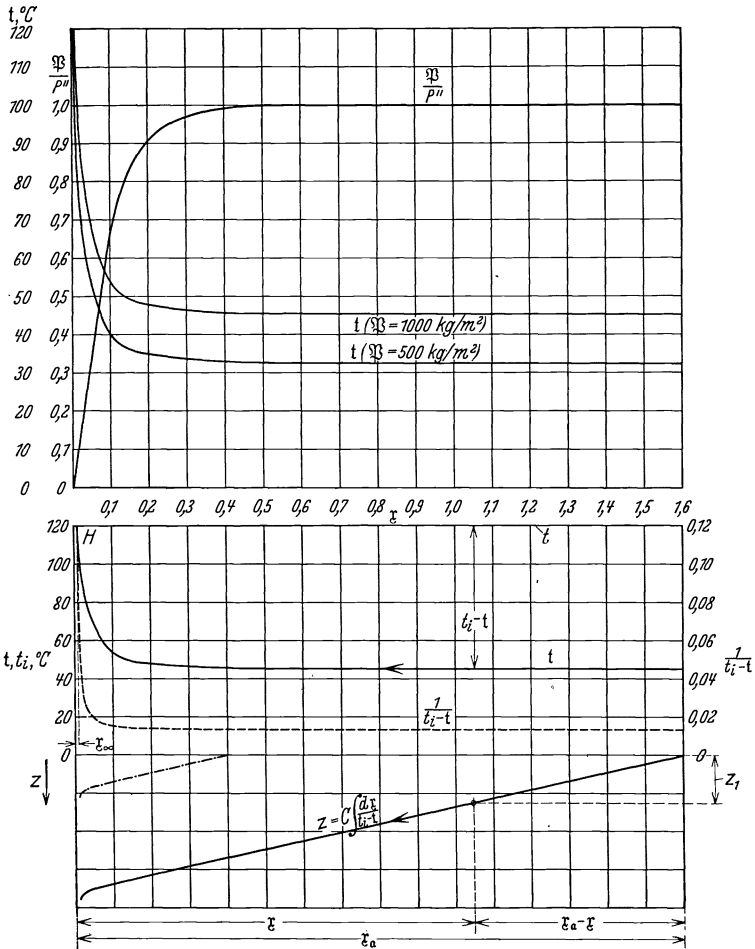


Abb. 85. Veränderung von Temperatur und Feuchtigkeit des Gutes beim Trocknen unter Luftleere.

und die ihr proportionale stündliche Verdampfleistung kennzeichnende Temperaturgefälle $t_i - t$ bleibt bis zum hygroskopischen Punkt gleich, im gewählten Beispiele $74,6^\circ$, nimmt danach beschleunigt ab und verschwindet im Punkt H vollständig.

Für einen kleinen Abschnitt gilt die Beziehung

$$\mathcal{G}_x \cdot \Delta x \cdot r = F \cdot k_i (t_i - t) \Delta z,$$

$$\Delta z = C \cdot \frac{\Delta x}{t_i - t}.$$

Für gleichbleibende Werte der Feuchtigkeitsabnahme $\Delta \chi$ wird

$$\Delta z = \frac{C'}{t_i - t}.$$

Die für eine gleichbleibende Feuchtigkeitsabnahme $\Delta \chi$ erforderliche Zeit ist daher veränderlich und umgekehrt proportional dem Temperaturgefälle $t_i - t$, entspricht also, abgesehen von dem Maßstab, den Ordinatenwerten der in Abb. 85 gestrichelt eingetragenen Kurve, die asymptotisch zu der durch Punkt H gehenden Ordinate verläuft. Die in Abb. 85 nach unten abgetragene Integralkurve hierzu liefert in ihren Ordinaten, abgesehen vom Maßstab, den Wert der Trockenzeit, gibt also die zeitliche Veränderung von χ wieder. Der Maßstab folgt schließlich aus der für einen beliebigen Wert z innerhalb des Feuchtgebietes geltenden Beziehung

$$z = \frac{\Phi \chi (\chi_a - \chi) r}{F \cdot k_i (t_i - t)},$$

wobei t mit dem für das feuchte Gebiet geltenden Wert der Siedetemperatur (im gewählten Beispiele 45,4°) einzusetzen ist.

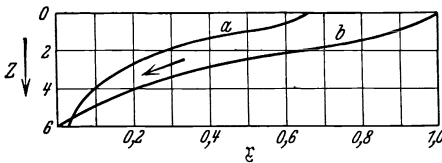


Abb. 86. Veränderung des Feuchtigkeitsgehaltes beim Trocknen unter Luftleere (Stokes).
a Bleiweiß, b Rohgummi.

Strichpunktiert ist in Abbildung 85 noch die Kurve für $z = \Phi(\chi)$ für den Fall eingetragen, daß die Trocknung erst mit einem Wert $\chi_a = 1$ einsetzt.

Nach Stokes verläuft die Trocknung von Bleiweiß und Rohgummi unter Luftleere gemäß Abb. 86 für folgende Verhältnisse:

- Bleiweiß $\chi_a = 0,67$
 $\chi_b = 0,002$
 $\Phi = 1300$, im Verlauf der Trocknung auf 700 kg/m² abnehmend
- Rohgummi $\chi_a = 1$
 $\chi_b = 0,02$
 Φ wie bei Bleiweiß.

Der tatsächliche Vorgang stimmt daher mit dem theoretischen grundsätzlich überein. Die Abweichung im Trockenbeginn ergibt sich durch die verzögernde Wirkung der Vorwärmung.

Zahlenbeispiel 14. Für eine Passburgsche Vakuumdoppeltrommel mit zwei Walzen von 1 m Durchmesser, 2,8 m Länge, entsprechend 17,6 m² gesamter Heizfläche, ergaben sich folgende Zahlen, wenn Fischbrei vorgetrocknet wurde:

- anfänglicher Feuchtigkeitsgehalt des Gutes $\chi_r = 3,35$,
- schließlicher Feuchtigkeitsgehalt des Gutes $\chi_b = 0,33$,
- stündliche Wasserverdampfung $\Phi \chi (\chi_r - \chi_b) = 865$ kg/h,
- Heizdampfspannung $p_i = 3$ kg/cm²,

entsprechend $t_i = 132,8^\circ$ Sättigungstemperatur und $r \approx 529$ kcal/kg Verdampfungswärme,

Luftleere $P = 0,082$ kg/m²,

entsprechend $t = 41,5^\circ$ Sättigungstemperatur.

Da die Heizfläche zu $\frac{2}{3}$ durch das Gut bedeckt wird und die Menge des nieder-schlagenden Heizdampfes wegen der auftretenden Verluste etwa das 1½fache der abgedampften Wassermenge beträgt, ergibt sich die Wärmedurchgangszahl k aus

der Beziehung

$$Q = F \cdot k (t_i - t), \quad (107)$$

$$k \approx \frac{1,5 \cdot 865 \cdot 520}{\frac{5}{6} \cdot 17,6 (132,8 - 41,5)} \approx 500 \text{ kcal/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{h}.$$

Die verhältnismäßig hohe Zahl erklärt sich daraus, daß der hohe Endfeuchtigkeitsgehalt des Gutes seinen Wärmeleitwiderstand noch in niedrigen Grenzen läßt.

Zahlenbeispiel 15. Die von Sprockhoff an einem Passburgschen Vakuumschaufeltrockner für Kartoffelstärke durchgeführten Untersuchungen ergaben:

Trommeldurchmesser 1,5 m,
 Trommellänge 10 m,
 gesamte Heizfläche, die sich aus dem Dampfmantel und
 einem inneren Heizröhrenbündel zusammensetzt . . 150 m²,
 hiervon vom Gut berührt etwa $\frac{3}{4}$ $F = 115 \text{ m}^2$,
 anfänglicher Feuchtigkeitsgehalt des Gutes . . . $\gamma_r = 0,67$,
 schließlicher Feuchtigkeitsgehalt des Gutes . . . $\gamma_h = 0,27$,
 stündliche Wasserverdampfung $\mathcal{G}_x (\gamma_r - \gamma_h) = 720 \text{ kg/h}$,
 Heizdampfspannung $p_i = 2 \text{ kg/cm}^2$,

entsprechend $t_i = 119,6^\circ$ Sättigungstemperatur,
 Luftleere $P = 0,082 \text{ kg/cm}^2$,
 entsprechend $t = 41,5^\circ$ Sättigungstemperatur.

Nach Angabe von Sprockhoff betragen die Verluste etwa 12%. Da ferner die Dampfzufuhr nach Ablauf von etwa $\frac{3}{4}$ der Trockenzeit unterbrochen wurde, ergibt sich eine Wärmedurchgangszahl

$$k \approx \frac{1,12 \cdot 720 \cdot 520}{\frac{3}{4} \cdot 115 (119,6 - 41,5)} \approx 60 \text{ kcal/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{h}.$$

Sie beträgt also für das lockere Gut nur etwa $\frac{1}{10}$ des zuvor für fließendes Gut festgestellten Wertes. Der Unterschied ist einmal durch den erhöhten Wärmeübergangswiderstand infolge des mangelhaften Anliegens an der Heizfläche, in zweiter Linie durch den hohen Wärmeleitwiderstand der losen Gutsschicht bedingt.

Zahlenbeispiel 16. Für einen Doppelwalzentrockner mit zwei Walzen von 0,9 m Durchmesser, 2,64 m Länge, entsprechend einer gesamten Heizfläche von 14,88 m² gibt die herstellende Firma Venuleth & Ellenberger folgende Zahlen eines Versuches mit Kartoffelflockentrocknung an:

Größe der vom Gut bedeckten Fläche $F = 11,65 \text{ m}^2$,
 anfänglicher Feuchtigkeitsgehalt des Gutes $\gamma_r = 3,2$,
 schließlicher Feuchtigkeitsgehalt des Gutes $\gamma_h = 0,143$,
 stündliche Wasserverdampfung $\mathcal{G}_x (\gamma_r - \gamma_h) = 937 \text{ kg/h}$,
 stündlicher Dampfverbrauch 951 kg/h.

Der geringe Unterschied zwischen Dampfverbrauch und verdampfter Feuchtigkeitsmenge erklärt sich z. T. durch die Vorwärmung der Kartoffeln auf 80°, setzt aber Ausnutzung eines Teiles der Flüssigkeitswärme für Erhitzung der Luft voraus. Die Durchgangszahl für die Wärmeübertragung zwischen Heizmittel und Gut läßt sich, unter Schätzung eines mittleren Temperaturunterschiedes von 90°, hieraus zu

$$k_i \approx \frac{951 \cdot 600}{11,6 \cdot 90} \approx 550 \text{ kcal/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{h}$$

schätzen. Im letzten Falle liegt die Wärmedurchgangszahl in gleicher Höhe wie bei dem feuchten Gut verarbeitenden Vakuumschaufeltrockner. Es ist jedoch zu beachten, daß dort der Wert k sich auf den gesamten Wärmedurchgang bezieht, während hier k_i mit der Wärmeübertragung an das Gut haltmacht, den Wärmeübergangswiderstand an die Umgebung also unberücksichtigt läßt.

Über die Veränderung der Wärmeübertragungsverhältnisse mit zunehmender Entfeuchtung liefern die Untersuchungen von Alliott¹ einen Beitrag insofern, als sie feststellen, daß bei dampfbeheizten Flächen die Leistung an verdampftem Wasser sich zwischen 15 und 10 kg/m²·h bewegt, solange das Gut feucht ist, dagegen auf 2½ bis 1½ kg/m²·h zurückgeht, wenn der Feuchtigkeitsgehalt auf 0,03 bis 0,005 sinkt. Die Zahlen selbst gelten nur für den besonderen Fall und dürfen keinesfalls allgemein übertragen werden.

Abgesehen von der Rohrleitung sind bei Trocknern mit beheizten Flächen Teile der eigentlichen Trockenvorrichtung von Gut frei und mit der umgebenden Luft in unmittelbarer Berührung. Die hierbei sich ergebende Erwärmung der Umgebung ist zunächst zwecklos, wenn es sich um eine reine Verdampfanlage handelt. Ein unter Luftleere arbeitender Walzentrockner bewirkt durch die vom Gut nicht bedeckten Stirn- und freien Mantelflächen Überhitzung der entstehenden Dämpfe, die einen Verlust darstellt. Das gleiche gilt, wenn eine derartige geschlossene Verdampferanlage gegen den Druck der Umgebung arbeitet, es sei denn, daß die durch Überhitzung des Dampfes sich ergebende verminderte oder ganz verhütete Nebelbildung an der Austrittsstelle des Schwadens in die freie Luft im besonderen Falle entsprechend bewertet wird. Anders liegen die Verhältnisse, wenn es sich um Verdunstung handelt, die Trockenvorrichtung also nur teilweise oder überhaupt nicht ummantelt ist. Alsdann tritt ein Wärmebedarf für Entnebelung des Arbeitsraumes und Verhütung von Tropfenbildung auf, der durch Erwärmung der zugeführten Luft zu decken ist. Diese Erwärmung erfolgt zweckmäßig durch die von Gut nicht bedeckten Heizflächenteile der Trockenvorrichtung und, nur soweit sie nicht ausreichen, durch zusätzliche Heizvorrichtungen. Der für Entnebelung nötige Wärmeverbrauch schwankt erheblich mit der Witterung und der Leistung der Anlage. Er ist an kühlen Wintertagen mit starker Belastung besonders hoch und kann an warmen Sommertagen bei schwacher Belastung so niedrig werden, daß die freien Heizflächen die Luft mehr erwärmen, als nötig ist, um Nebelfreiheit zu erzielen. Dieser Überschuß stellt alsdann Wärmeverwendung dar. In jedem einzelnen Falle soll daher geprüft werden, welche Wärmemenge die freien Heizflächen an die Umgebung bei günstigem Sommerwetter und der in Betracht kommenden geringsten Trockenleistung zu übertragen vermögen. Ist die errechnete Zahl höher als der unter diesen Verhältnissen auftretende Wärmeverbrauch für Verhütung der Nebelbildung, so sind Maßnahmen zu treffen, um ihn damit in Übereinstimmung zu bringen, z. B. durch Ausstattung der freien Zylinderböden mit Luft- oder anderen Wärmeschutzschichten. Es läßt sich hierbei nicht vermeiden, daß die Zusatzheizflächen entsprechend vergrößert werden, um den ihnen zufallenden Teil des besonders im Winter hohen Wärmebedarfes zu decken. Der selbstverständlichen Forderung, diese Zusatzheizflächen weitgehend zu unterteilen, um sie in Anpassung an die Wetter- und Belastungsverhältnisse abzustufen, wird bisher nicht

¹ Alliott: Drying by heat in conjunction with mechanical agitation and spreading. J. of the Soc. of Chem. Ind. 1919.

genügend entsprochen. Häufig ergibt sich durch die höhere Belastung der Zusatzflächen unter gleichzeitiger Entlastung der eigentlichen Heizfläche der Trockenvorrichtung dadurch ein besonderer Vorteil, daß für die Zusatzfläche ein minderwertiges Heizmittel, z. B. Dampf von niedrigerer Spannung als bei der eigentlichen Trockenvorrichtung oder auch das in der Trockenvorrichtung sich bildende heiße Niederschlagwasser, verwandt werden kann.

Bei den Teilen der beheizten Fläche, die zeitweise außer Berührung mit dem Gute treten, kommt die Wärmespeicherwirkung zur Geltung. Diese Teile erfahren, wenn der Einfluß der Umgebung ausgeschaltet ist, eindeutig eine Temperaturerhöhung, die schließlich genügend genau bis zur Temperatur des Heizmittels führt, wenn die Wärmeableitung durch das Gut lange genug ausgeschaltet ist. Solche Verhältnisse liegen vor, wenn z. B. ein beheizter Doppelmantel nur mit seinem unteren Teile in schaufelförmiges Gut eintaucht und die abziehenden Schwaden ebenso wie die für Aufnahme der Feuchtigkeit zugeführte Luft von dem heraustretenden oberen Teil des Heizmantels ferngehalten werden. Abgesehen davon, daß die letzte Bedingung absichtlich nicht erfüllt wird, weil die Anwärmung der Luft durch die aus dem Trockengut heraustretende Heizfläche in der Regel willkommen ist, spielt die erwähnte Speicherefähigkeit kaum eine Rolle, weil der Wasserwert der Heizfläche und das ausnutzbare Temperaturgefälle gering zu sein pflegen. So haben die Versuche von Kaiser¹ ergeben, daß bei den nur unvollständig umspannten Zylindern von Papiertrocknern die Temperatur der Wand an den papier- und luftberührten Teilen nicht wesentlich verschieden ist.

Ausschlaggebend dagegen wird das Speichervermögen fester Körper, wenn sie vorwiegend oder allein als Träger der für die Trocknung erforderlichen Wärme auftreten. Dies kann z. B. dadurch geschehen, daß feste Körper in einer besonderen Anwärmevorrichtung erhitzt werden, danach mit dem Trockengut in Berührung kommen und schließlich die Trockenvorrichtung zur neuerlichen Aufladung mit Wärme verlassen. Bedeutung gewinnt ein derartiges Verfahren dann, wenn das verfügbare Heizmittel für unmittelbare Berührung mit dem Gut ungeeignet ist und seine Verwendung als mittelbares Heizmittel zur Erwärmung von metallischen Trennflächen, auf deren Gegenseite das Gut sich bewegt, an der Kostspieligkeit der Ausführung scheitert.

Es ist z. B. der Vorschlag gemacht und in mehreren Anlagen ausgeführt worden (Smidth), Kohle dadurch zu trocknen, daß Eisenkugeln in einem Ofen durch Feuergase erhitzt, danach in einer Trommel mit der Kohle zusammengebracht werden, wobei die Kugeln nach dem Austritt von der getrockneten Kohle getrennt und durch Heizgase neuerlich erwärmt werden, um mit der feuchten Kohle in die Trockenvorrichtung zurückzukehren. Hierbei soll die Zerkleinerungswirkung der Eisenkugeln als günstige Nebenwirkung ausgenutzt werden.

Auf dieselben Grundsätze läuft die in dem Honigmann-Scheiben-

¹ Kaiser: Das Verhalten von Papiermaschinen beim Betrieb mit Satt- und Heißdampf. Z. Bayer. Rev.-Ver. 1930.

ofen¹ verwirklichte Ausführung hinaus, bei der Blechscheiben mit den unteren Teilen in das Trockengut eintauchen, während die oberen Teile durch Feuergase erhitzt werden. Die Scheiben drehen sich und übertragen auf diese Weise die aufgespeicherte Wärme auf das Gut. Auch hier ergibt die ständige Zerteilung des Gutes durch die eintauchenden Scheiben eine günstige Nebenwirkung.

Hierher gehört auch der Vorschlag, bei der Trocknung von Rohbraunkohle durch Feuergase das zu überraschem Trocknen neigende Feinkorn dem vorgetrockneten Grobkorn nachträglich beizufügen. Das letzte übernimmt dann neben den Feuergasen die Wärmelieferung an das Feinkorn. Als günstige Nebenwirkung ergibt sich hierbei die Übertragung von Feuchtigkeit aus dem Feinkorn an die äußeren Teile des Grobkorns und damit eine Zurückbildung des unerwünschten Voreilens der Trockenwirkung der Oberfläche vor dem Kern.

Solche Verfahren bieten in wärmewirtschaftlicher Beziehung keinen Vorteil gegenüber mittelbar beheizten Flächen, wenn die Temperatur der vom Gut berührten Metalloberfläche in beiden Teilen gleich ist. Sie haben wohl deshalb in größerem Ausmaße auch keine praktische Bedeutung gewonnen.

B. Wärmeübertragung von Heizmittel durch metallische Trennflächen und Gut an feuchte Gase.

Die Temperatur einseitig beheizten Gutes.

Die vorausgehenden Untersuchungen begnügten sich damit, die durch die metallische Trennfläche an das Gut übertragene Wärme zu ermitteln. Sie entsprechen daher nur Trockenvorrichtungen, die mit Verdampfung, also unter Luftabschluß arbeiten. Bei offenen Trockenanlagen dagegen, bei denen die Feuchtigkeit verdunstet, wird eine Annahme bezüglich der Gutstemperatur an der Berührungsstelle mit der Heizfläche nötig. Diese aber ist u. a. von der Beschaffenheit des gasförmigen Trockenmittels abhängig.

Es werde zunächst angenommen, daß die Austauschfläche F_i zwischen Gut und Heizkörper gleich der Austauschfläche F zwischen Gut und Luft sei. Ferner soll die Wärmeübertragung Q an die Luft nur durch das Gut hindurch erfolgen, also gleich der an dieses von dem Heizmittel übertragenen Wärmemenge Q_i sein.

Es gelten alsdann für die

1. vom Heizmittel mit der Temperatur t_i an das Gut mit der Temperatur t_g an der Heizflächenseite,
2. durch das Gut mit der Stärke e und der Wärmeleitzahl λ_{G} ,

¹ Pelzer: Braunkohlentrocknungsversuche mit dem neuen Scheibenofen von L. Honigmann. Braunkohle 1928, H. 44.

3. vom Gut mit der Temperatur t an der freien Seite an das Gas mit der Temperatur t_i wandernde Wärme Q_i die Beziehungen

$$1. Q_i = F_i \cdot k_i (t_i - t) \qquad Q_i \cdot \frac{1}{k_i} = F_i (t_i - t), \quad (108)$$

$$2. Q_i = F_i \cdot \frac{\lambda_{\text{G}}}{e} (t_i - t) \qquad Q_i \cdot \frac{e}{\lambda_{\text{G}}} = F_i (t_i - t), \quad (109)$$

$$3. Q_i = -Q = F_i [\alpha (t - t) + \alpha' (\mathfrak{P} - P_D)] \quad \left. \begin{aligned} Q_i \cdot \frac{1}{\alpha} = F_i (t - t) \\ + F_i \cdot \frac{\alpha'}{\alpha} (\mathfrak{P} - P_D). \end{aligned} \right\} \quad (110)$$

Werden die rechte und linke Seite der drei Gleichungen zusammengezählt, so ergibt sich

$$Q_i = F_i \cdot \frac{1}{\frac{1}{k_i} + \frac{e}{\lambda_{\text{G}}} + \frac{1}{\alpha}} (t_i - t) + F_i \cdot \frac{\alpha'}{\alpha} \cdot \frac{1}{\frac{1}{k_i} + \frac{e}{\lambda_{\text{G}}} + \frac{1}{\alpha}} (\mathfrak{P} - P_D). \quad (111)$$

Da $\frac{1}{k_i} + \frac{e}{\lambda_{\text{G}}} + \frac{1}{\alpha}$ den gesamten Durchgangswiderstand für Übertragung fühlbarer Wärme vom Heizmittel durch Heizfläche und Gut hindurch an das gasförmige Trockenmittel darstellt, kann, wenn dieser mit $\frac{1}{k}$ bezeichnet wird, die Formel (111) auch geschrieben werden

$$Q_i = F_i \cdot k (t_i - t) + F_i \cdot k \cdot \frac{\alpha'}{\alpha} (\mathfrak{P} - P_D). \quad (111a)$$

Das zweite Glied der rechten Seite stellt die Berücksichtigung der Verdunstungswirkung dar. Wird für die Errechnung von k die durch Versuch festgestellte Leistung Q_i und der beobachtete Temperaturunterschied $t_i - t$ allein zugrunde gelegt, so ergibt sich k zu niedrig.

Die Formel (111a) läßt sich umformen zu

$$Q_i = F_i \left(k + k \cdot \frac{\alpha'}{\alpha} \cdot \frac{\mathfrak{P} - P_D}{t_i - t} \right) (t_i - t) = F_i \cdot \mathfrak{k} (t_i - t), \quad (111b)$$

wobei

\mathfrak{k} die gleichwertige Wärmedurchgangszahl bei Wärmeübertragung durch beheizte Flächen und Gut an feuchtes Gas bedeutet. Mit ihr folgt, unter alleiniger Berücksichtigung des Temperaturunterschiedes $t_i - t$ zwischen Heizmittel und feuchtem Gas, die Wärmeleistung Q_i . Da

$$\frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{(i_{Dt} - i_{\text{St}t})(x_g - x)}{C_{p_g} (\mathfrak{P} - P_D)}$$

ist, ergibt sich

$$\mathfrak{k} = k \left(1 + \frac{(i_{Dt} - i_{\text{St}t})(x_g - x)}{C_{p_g} (t_i - t)} \right). \quad (112)$$

\mathfrak{k} ist außer von k , t_i , t , i_{Dt} und x , die als bekannt vorauszusetzen sind, abhängig von $i_{\text{St}t}$, x_g , C_{p_g} , die sich aus der unbekanntem Temperatur t des Gutes an der freien Seite ergeben.

Die Formel

$$Q_i = F_i \cdot k \left(1 + \frac{(i_{Dt} - i_{g,t})(x_g - x)}{C_{p,g}(t_i - t)} \right) (t_i - t) \quad (111c)$$

stellt daher den Zusammenhang zwischen der übertragenen Wärmeleistung Q_i und der Oberflächentemperatur t des Gutes dar. Für jeden Wert Q_i ergibt sich ein bestimmter Wert t und umgekehrt.

In anderer Form folgt die Beziehung zwischen Q_i und t , wenn die beiden Seiten der Gleichungen (108) und (109) zusammengezählt werden.

$$Q_i = F_i \cdot \frac{t_i - t}{\frac{1}{k_i} + \frac{e}{\lambda_g}}, \quad (113)$$

$$t = t_i - \frac{Q_i}{F_i} \left(\frac{1}{k_i} + \frac{e}{\lambda_g} \right). \quad (113a)$$

Da

$$\frac{1}{k_i} + \frac{e}{\lambda_g} = \frac{1}{k} - \frac{1}{\alpha},$$

kann die Beziehung auch geschrieben werden

$$t = t_i - \frac{Q_i}{F_i} \left(\frac{1}{k} - \frac{1}{\alpha} \right). \quad (113b)$$

Die Zusammenfassung der Formeln (111c) und (113b) und Ausstoßung des Wertes t scheitert daran, daß der Zusammenhang zwischen x_g und t sich nicht in einer einfachen mathematischen Beziehung darstellen läßt. Bei der Berechnung kann daher versuchsweise vorgegangen werden, indem für einen geschätzten Wert t nach Formel (111c) der Betrag Q_i errechnet wird. Liefert Formel (113b) nach Einsetzung dieses Wertes Q_i einen Wert t , der dem angenommenen genügend nahe liegt, so ist die Rechnung richtig, anderenfalls muß sie mit einem geänderten Wert t wiederholt werden.

Zahlenbeispiel 17. Ein Walzentrockner mit $F_i = 12 \text{ m}^2$ vom Gut bedeckter Fläche werde mit Satttdampf von $t_i = 150^\circ$, entsprechend $p_i = 4,855 \text{ kg/cm}^2$, beheizt. Die über den Flockenschleier streichende Luft habe im Durchschnitt eine Temperatur von $t = 40^\circ$ und sei gesättigt, $\varphi = 1$. Es betrage ferner $\frac{1}{k} - \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{500}$, $k = 20$. Wird versuchsweise die Temperatur des Flockenschleiers an der freien Oberfläche zu $t = 90^\circ$ angenommen, so errechnet sich nach Formel (111c)

$$Q_i = 12 \cdot 20 \left(1 + \frac{(613,5 - 90)(1,559 - 0,051)}{(0,24 + 0,46 \cdot 1,559)(150 - 40)} \right) (150 - 40) \approx 225\,000 \text{ kcal/h.}$$

Hierfür ergibt Formel (113b)

$$t = 150 - \frac{225\,000}{12} \cdot \frac{1}{500} \approx 112,5^\circ.$$

Die Temperatur t war daher mit 90° zu niedrig angenommen. Für die berichtigte Annahme $t = 98^\circ$ liefert der gleiche Rechnungsgang $Q_i = 285\,000 \text{ kcal/h}$ und $t = 102,5^\circ$. Auch hier liegt die angenommene Temperatur noch zu niedrig. Sie stellt sich mit fast 100° ein. Es findet daher ein Abdampfen der Feuchtigkeit statt. Der Einfluß des Trockenmittels tritt zurück. Die Ursache für diese mangelhafte Arbeitsweise liegt einmal in der niedrigen Lufttemperatur, da mit ihrer Erhöhung i_{Dt} und damit Q_i wächst, dann in dem hohen Feuchtigkeitsgehalt x der Luft, mit dessen Zunahme Q_i gleichfalls ansteigt, vor allem aber in dem niedrigen

Wert $k = 20$. Hier muß der Hebel angreifen und durch Kunstmittel, in erster Linie Erhöhung der Luftgeschwindigkeit, Abhilfe schaffen. Bei einer Steigerung auf den Wert $k \approx 32$ ergibt sich übereinstimmend $Q_i = 360000$ kcal/h und $t = 90^\circ$.

Der Wert von $\frac{1}{k}$ ist im vorliegenden Falle besonders von dem Wärmeübergangswiderstand $\frac{1}{\alpha}$ an der freien Oberfläche des Gutes abhängig und mit ihm zahlenmäßig fast gleich. Denn nach der Annahme war

$$\frac{1}{k} - \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{500},$$

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{k} - \frac{1}{500},$$

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{32} - \frac{1}{500} \approx \frac{1}{34},$$

$$\alpha \approx 34 \approx k.$$

Bei der versuchsweisen Rechnung erscheint es zweckmäßig, nach Abb. 87 wie folgt vorzugehen:

Zu den angenommenen Temperaturen t als Abszissen wird der Wert Q_i einmal nach Formel (111 c), ein andermal aus Gleichung (113 b) errechnet und als Ordinate eingetragen. Da Gleichung (113 b) eine lineare Beziehung zwischen Q_i und t darstellt, ergibt sich in Abb. 87 die Temperatur t als Schnittpunkt zwischen einer Geraden

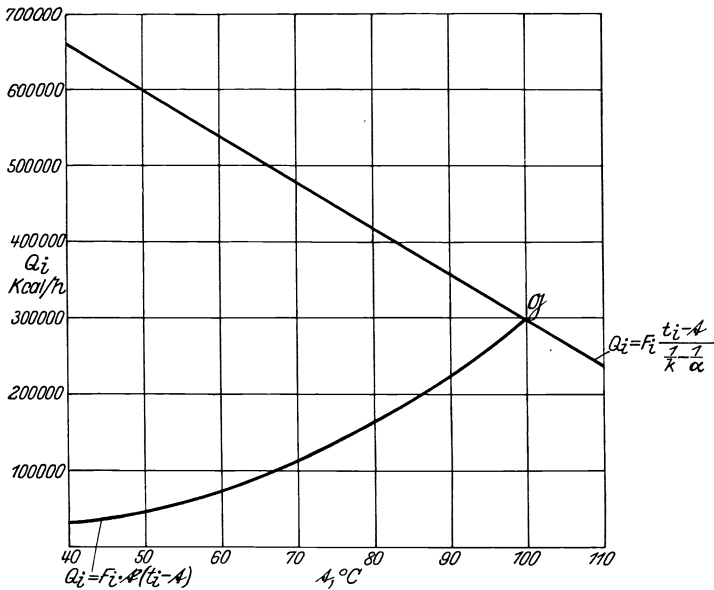


Abb. 87. Ermittlung der Temperatur einseitig beheizten Gutes an der freien Oberfläche.

und einer nach Gleichung (111 c) für verschiedene t ermittelten Kurve. Für die letzte genügen im allgemeinen zwei Punkte, um den Verlauf genügend genau festzustellen und damit den Schnittpunkt G zu ermitteln. Abb. 87 gilt für Zahlenbeispiel 17 mit $k = 20$. Sie liefert die Heizleistung mit $Q_i \approx 300000$ kcal/h und die Oberflächentemperatur t des Gutes an der freien Seite mit nahezu 100° .

Die bisher getroffene Voraussetzung, daß die Austauschfläche F_i zwischen Gut und Heizfläche und F zwischen Gut und Luft gleich seien, läuft auf die Bedingung hinaus, daß

1. das Gut selbst eine glatte Fläche darstellt, wie dies z. B. bei der Papierbahn und auch bei dem ausgewalzten Kartoffelschleier zutrifft,
2. ein Wärmeaustausch zwischen Luft und Gut vor dem Auftreffen des Gutes auf die Heizfläche und nach seinem Ablauf von der Heizfläche nicht stattfindet.

Die erste Voraussetzung fehlt, wenn es sich um unregelmäßig geformtes Gut handelt, dessen an dem Heizkörper anliegende Fläche F_i erheblich kleiner ist als die luftberührte Fläche F . Die zweite Annahme trifft meistens deshalb nicht zu, weil das von der Heizfläche ablaufende Gut in Wärmeaustausch mit der Luft bleibt, und zwar mit Recht, weil sich hierdurch ein Mittel bietet, die Überschußwärme des Gutes zur Vorwärmung der Luft auszunutzen.

Die rechnerische Berücksichtigung des letzten Falles bietet, wie später nachgewiesen wird, keine Schwierigkeiten, da das für reine Lufttrocknung beschriebene Verfahren mit schrittweiser Verfolgung der Veränderung nur sinngemäß angewendet zu werden braucht. Es handelt sich hier um einen Vorgang mit veränderlicher Temperatur des Gutes, wie er auch bei der Vorwärmung des Gutes vorliegt.

Die Berichtigung wird auch dann möglich, wenn es sich um Gut handelt, dessen luftberührte Fläche $F > F_i$ ist. Von vornherein steht fest, daß alsdann die Temperatur t des Gutes an der freien Seite niedriger ist, als sie sich nach den Formeln (111c) und (113b) errechnet. Infolgedessen ergibt sich für einen bestimmten Wert k ein höherer Wert \bar{k} und damit höhere Wärme- und Trockenleistung. Die Vergrößerung der luftberührten Fläche des Gutes bleibt daher bei Anwendung beheizter Flächen anzustreben.

Die Formeln (108) und (109) bleiben nach wie vor gültig. In Formel (110) ist F statt F_i , also

$$Q_i \cdot \frac{1}{\alpha} = F(t - t) + F \cdot \frac{\alpha'}{\alpha} (\mathfrak{P} - P_D) \tag{110a}$$

zu setzen. Es findet sich alsdann in Berichtigung der Formel (111)

$$Q_i = \frac{F_i(t_i - t) + F \left[t - t + \frac{\alpha'}{\alpha} (\mathfrak{P} - P_D) \right]}{\frac{1}{k_i} + \frac{e}{\lambda_{\mathfrak{G}}} + \frac{1}{\alpha}}$$

$$= F_i \cdot k \left[t_i - t + \frac{F}{F_i} (t - t) + \frac{F}{F_i} \cdot \frac{(i_{Dt} - i_{\mathfrak{G}t})(x_{\mathfrak{G}} - x)}{C_{p\mathfrak{G}}} \right]. \tag{111d}$$

Diese Formel zusammen mit der auch hier gültigen Gleichung (113b) kann nunmehr in der beschriebenen Weise benutzt werden, um Q_i und t durch versuchsweise Rechnung zu ermitteln, wenn das Verhältnis $\frac{F}{F_i}$ bekannt ist. Bei unregelmäßig geformtem Gut ist dies nicht der Fall, jedoch auch hier ein Ausweg möglich. Da

$$F \cdot \alpha = V \cdot \alpha_V$$

ist, kann für den bestimmten Fall α und α_V ermittelt und

$$F = \frac{V \cdot \alpha_V}{\alpha}$$

als die gleichwertige freie Oberfläche berechnet werden. V ist hierbei als der Rauminhalt des Gutes bekannt.

Es sei ausdrücklich darauf aufmerksam gemacht, daß in Formel (111 d) in dem Werte F nicht die gesamte freie Oberfläche des Gutes, sondern nur der Teil anzusetzen ist, der die Gegenseite zur beheizten Fläche des Gutes bildet, also nicht die frei auf und ablaufende Strecke, deren Berücksichtigung besonders zu erfolgen hat.

Formeln (108) und (109) ergeben, wenn beide Seiten zusammengezählt werden, die Beziehung

$$Q_i \left(\frac{1}{k_i} + \frac{e}{\lambda_{\mathcal{G}}} \right) = F_i (t_i - t).$$

Andererseits führen die Formeln (108), (109) und (110) zusammengezählt zu der Beziehung

$$Q_i \left(\frac{1}{k_i} + \frac{e}{\lambda_{\mathcal{G}}} + \frac{1}{\alpha} \right) = F_i \left[t_i - t + \frac{\alpha'}{\alpha} (\mathfrak{P} - P_D) \right],$$

die mit Gleichung (111) gleichbedeutend ist. Wird die vorletzte Formel durch die letzte geteilt, so folgt, unter Beachtung der Beziehungen,

$$\begin{aligned} \frac{1}{k_i} + \frac{e}{\lambda_{\mathcal{G}}} + \frac{1}{\alpha} &= \frac{1}{k}, \\ \frac{1}{k_i} + \frac{e}{\lambda_{\mathcal{G}}} &= \frac{1}{k} - \frac{1}{\alpha}, \end{aligned}$$

die Gleichung

$$\begin{aligned} 1 - \frac{k}{\alpha} &= \frac{t_i - t}{t_i - t + \frac{\alpha'}{\alpha} (\mathfrak{P} - P_D)} = \frac{t_i - t}{t_i - t + \frac{(i_{Dt} - i_{\mathfrak{B}t})(x_{\mathcal{G}} - x)}{C_{p\mathcal{G}}}}, \\ C_{p\mathcal{G}}(t_i - t) &= \left(1 - \frac{k}{\alpha} \right) [C_{p\mathcal{G}}(t_i - t) + (i_{Dt} - i_{\mathfrak{B}t})(x_{\mathcal{G}} - x)]. \end{aligned} \quad (114)$$

Diese wichtige Gleichung stellt die Beziehung dar zwischen den Temperaturen von Heizmittel, Luft und Gut, wenn alle drei zusammen wirken und der Ausgleichzustand erreicht ist. Es ist leicht, nachzuweisen, daß für den Fall der reinen Lufttrocknung sich aus dem Sinne der τ -Linie auch die Beziehung

$$C_{p\mathcal{G}}(t_i - t) = (i_{Dt} - i_{\mathfrak{B}t})(x_{\mathcal{G}} - x) \quad (115)$$

aufstellen läßt, die der Form nach der Gleichung (114) entspricht. Der Sinn der Formel (114) ergibt sich aus dem i - x -Bilde der Abb. 88, in dem Punkt \mathcal{G} den Zustand der Luft, \mathcal{G} den Zustand des als feucht angenommenen Gutes bedeutet. Durch Punkt \mathcal{G} ist eine Parallele zu der dem Punkte \mathcal{G} zugeordneten $\tau_{\mathcal{G}}$ -Linie gezogen. Bezeichnet Punkt J bzw. B den Schnittpunkt der durch \mathcal{G} gezogenen Ordinate mit der

t_i -Geraden bzw. Parallelen zur τ_g -Linie, so stellt die Länge $J\mathcal{G}$ den Wert

$$C_{p_g}(t_i - t),$$

die Länge JB den Wert

$$C_{p_g}(t_i - t) + (i_{Dt} - i_{ss t})(x_g - x)$$

dar, und die Gleichung (114) besagt, daß das Verhältnis beider Strecken

$$\frac{J\mathcal{G}}{JB} = 1 - \frac{k}{\alpha}$$

sein muß. Werden die Gerade für t_i und die Parallele zu τ_g in Punkt C

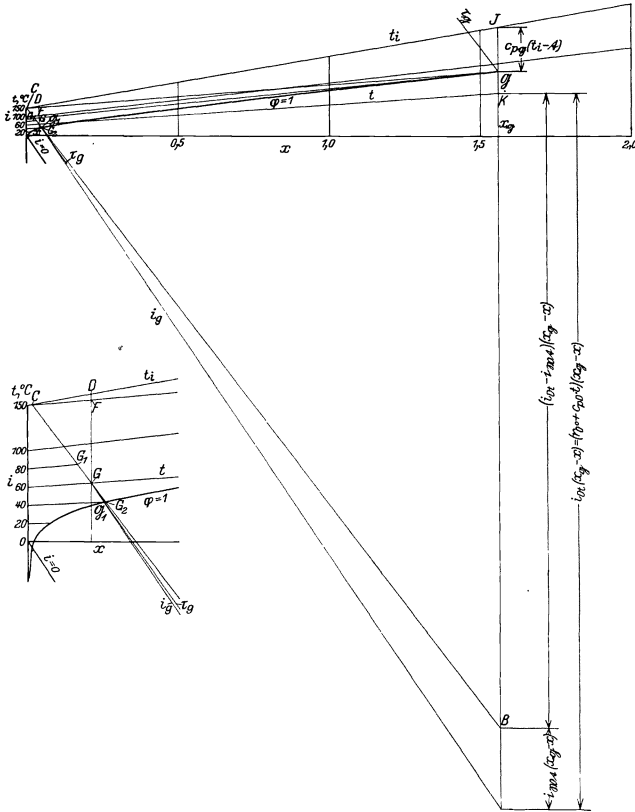


Abb. 88. t_i - x -Bild für Verdunstungstrocknung unter Anwendung beheizter Flächen.

zum Schnitt gebracht — in Abb. 88 fällt C zufällig fast auf die Nullordinate —, so liegt Punkt \mathcal{G} auf einer Geraden $C\mathcal{G}$, die den geometrischen Ort für alle Punkte \mathcal{G} darstellt, durch die die Ordinaten $B\mathcal{J}$ im Verhältnis $\frac{J\mathcal{G}}{JB} = 1 - \frac{k}{\alpha}$ geteilt werden. Es ist daher nur nötig, die Ordinate durch Punkt G in Punkt D zum Schnitt mit der t_i -Linie zu bringen, im Verhältnis $\frac{DF}{DG} = 1 - \frac{k}{\alpha}$ zu teilen und Punkt F mit Punkt C zu verbinden, um Punkt \mathcal{G} und damit die gesuchte Temperatur des Gutes

an der freien Fläche zu erhalten. Eine Schwierigkeit besteht nur insofern, als sich die genaue Neigung der zum Schnittpunkt C führenden τ_g -Linie erst nachträglich mit Punkt \mathcal{G} selbst ergibt. Da sie jedoch von der i_g -Linie nicht allzusehr abweicht, kann in erster Annäherung diese oder noch besser eine für einen geschätzten Wert t geltende τ_g -Linie zum Schnittpunkt mit der t_i -Linie gebracht werden.

Verändert Punkt G seine Lage auf der zu τ_g gezogenen Parallelen, rückt er also z. B. nach Punkt G_1 oder auf die Sättigungslinie nach Punkt G_2 , so ändern sich die vorausgehenden Entwicklungen nicht. Das bedeutet die wichtige Tatsache, daß allen Zustandspunkten der Trockenluft, die auf einer bestimmten Geraden liegen, gleiche Gutstemperaturen zugeordnet sind, wenn die Temperatur des Heizmittels sich nicht ändert. Bei der reinen Lufttrocknung wurde diese Gerade durch die dem Luftzustand entsprechende Kühlgrenzzlinie τ_g dargestellt. Bei dem Hinzutreten beheizter Flächen weicht sie von ihr nur wenig ab. Sie entspricht in ihrer Richtung der auf die Temperatur t des Gutes, nicht auf die dem Luftzustande zukommende Kühlgrenztemperatur τ_g , bezogenen τ_g -Linie. Bei der reinen Lufttrocknung liegt im Ausgleichszustande die Temperatur des Gutes bei der dem Luftzustande entsprechenden Kühlgrenztemperatur τ_g selbst, beim Hinzutreten beheizter Flächen jedoch zwischen dieser Temperatur und der des Heizmittels, also höher.

In der Regel ist es wünschenswert, die Temperatur t niedrig zu halten. Die Mittel hierfür ergeben sich aus Gleichung (114) im Zusammenhange mit Abb. 88. \mathcal{G} rückt um so tiefer, je mehr sich die Gerade CF von der t_i -Linie entfernt und der Geraden CG nähert. Gleichzeitig hiermit wird das Verhältnis $\frac{J_{\mathcal{G}}}{J_B} = 1 - \frac{k}{\alpha}$ größer. Die Aufgabe, die Gutstemperatur t zu erniedrigen, läuft daher darauf hinaus, den Wert

$$1 - \frac{k}{\alpha} = \frac{\frac{1}{k_i} + \frac{e}{\lambda_{\mathcal{G}}}}{\frac{1}{k_i} + \frac{e}{\lambda_{\mathcal{G}}} + \frac{1}{\alpha}}$$

zu verkleinern. Da der Wärmedurchgangswiderstand $\frac{1}{k_i}$ von Heizmittel an Gut ebenso wie der Wärmeleitwiderstand $\frac{e}{\lambda_{\mathcal{G}}}$ des Gutes als gegeben zu betrachten sind, stellt die Verringerung des Übergangswiderstandes $\frac{1}{\alpha}$ für fühlbare Wärme zwischen Gut und Luft das Mittel dar, um die Gutstemperatur t niedrig zu halten. Da α mit der Luftgeschwindigkeit w stark zunimmt, bedeutet lebhaftere Luftbewegung Schonung temperaturempfindlichen Gutes.

Es bleibt zu untersuchen, wie die Erniedrigung der Gutstemperatur auf die übertragene Wärmeleistung wirkt. Die Antwort hierauf liefert Formel (113), nach der die übertragene Wärmemenge dem Temperaturunterschied $t_i - t$ verhältnismäßig ist, also mit abnehmender Gutstempe-

ratur ansteigt. Niedrige Temperatur t ist daher mit Rücksicht auf Verbesserung der übertragenen Leistung auch dann anzustreben, wenn das Gut höhere Temperaturen erträgt.

Die höchste Lage des Punktes \mathcal{G} entspricht der Siedetemperatur t'' . Für sie erreicht Q_i den oberen Grenzwert. Die Trocknung geht in reine Verdampfung über, und der Einfluß der Luft als Trockenmittel entfällt.

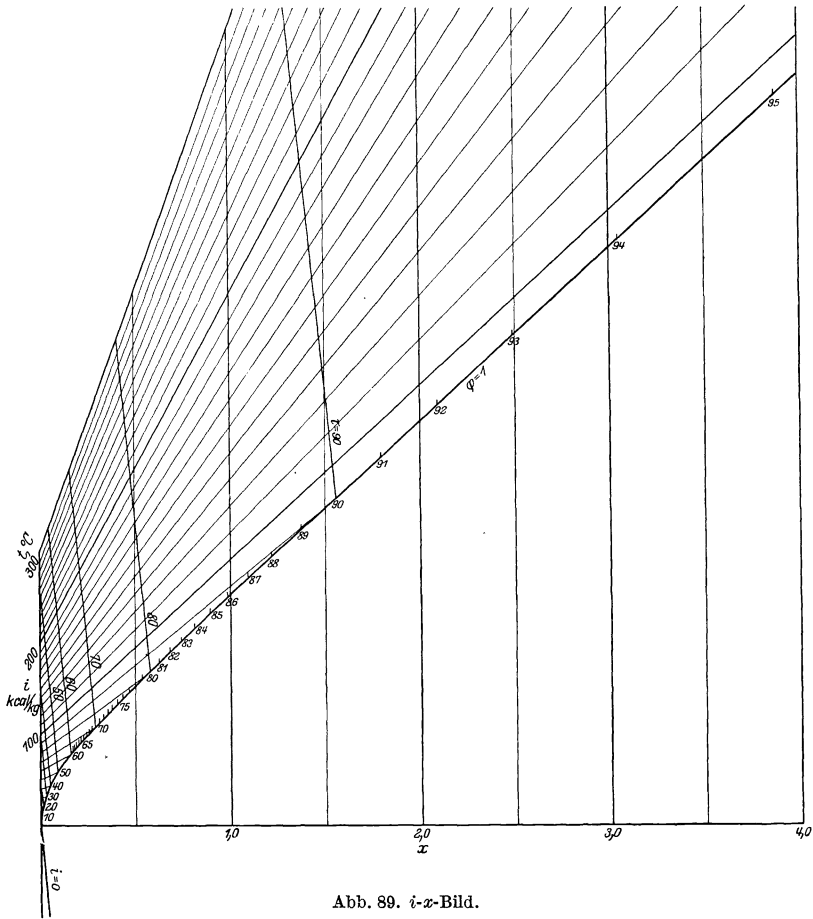


Abb. 89. i - z -Bild.

Rückt Punkt \mathcal{G} nach \mathcal{G}_1 , entsprechend dem Schnittpunkt der τ_θ -Linie mit der Sättigungslinie, so entspricht dies dem Falle der natürlichen Lufttrocknung. Es wird alsdann

$$\frac{1}{k_i} + \frac{e}{\lambda_{\mathcal{G}}} = 0,$$

$$1 - \frac{k}{\alpha} = 1,$$

$$t_i = t,$$

und Gleichung (114) geht in (115) über.

Wird Gleichung (112) in der Form

$$\frac{\dot{t}}{k} = \frac{(i_{Dt} - i_{\text{St}t})(x_g - x) + C_{p g}(t_i - t)}{C_{p g}(t_i - t)}$$

geschrieben, so ist das Verhältnis $\frac{\dot{t}}{k}$ nach Abb. 88 gleich dem Verhältnis der Strecke $\frac{JB}{JK}$, wenn K den Schnittpunkt der t -Linie mit der durch \mathcal{G} gezogenen Ordinaten darstellt.

Abb. 88 entspricht einem Augenblickszustand von Heizmittel, Gut und Luft. Ändern sich diese Zustände in nicht zu weiten Grenzen, so können für den ganzen Verlauf des Trockenvorganges Mittelwerte angenommen und mit ihnen die Untersuchungen in vorbeschriebener Weise durchgeführt werden. Abb. 89 stellt das i - x -Bild über einen weiten Bereich von t und x dar, das zur Verfolgung des Zusammenhanges bei Verdunstung unter Verwendung beheizter Flächen dienen kann.

Von Bedeutung ist noch die Temperatur t_i des Gutes an der beheizten Seite, weil sie höher liegt als die luftberührte Außenfläche. Sie ergibt sich aus Formel (108) zu

$$t_i = t_i - \frac{Q_i}{F_i} \cdot \frac{1}{k_i}. \tag{116}$$

Da die Erniedrigung der Temperatur t eine Erhöhung der übertragenen Wärmeleistung Q_i ergibt, hat sie nach Formel (116) auch zur Folge, daß die als höchste Temperatur zu betrachtende innere Gutstemperatur t_i niedriger, d. h. günstiger wird.

C. Wärmeübertragung durch metallische Trennflächen und Gut an feuchte Gase bei veränderlichem Zustand von Gut und Gas.

Die Voraussetzung, daß sich Temperatur des Heizmittels sowie Zustand von Gut und Luft im ganzen Verlauf der Trocknung nur in solch engen Grenzen verändern, daß mit einem Mittelwert gerechnet werden darf, trifft in manchen Fällen nicht zu. Dient gesättigter Dampf als Heizmittel, so ist die Annahme gleicher Temperatur t_i genügend genau erfüllt, wenn für sofortige Abführung des entstehenden Niederschlagwassers und Entfernung von Luft im Dampfraum gesorgt wird. Auch bei Verwendung von überhitztem Dampf und erwärmten Flüssigkeiten als Heizmittel kann mit einer Mitteltemperatur gerechnet werden, wenn die Strömungsgeschwindigkeit des Heizmittels gering ist und eine Mischung des zuströmenden Teiles mit der nahezu in Ruhe befindlichen, im Heizkörper enthaltenen Menge erwartet werden darf. Diese Annahme sei im folgenden getroffen und die Untersuchung auf einen Vorgang beschränkt, bei dem Zustand von Gut und Luft sich ändern. Bezeichnet dF einen unendlich kleinen Teil der Wärmeaustauschfläche zwischen Luft und Gut, so beträgt die durch sie stündlich von Luft

an Gut übertragene Wärmeabgabe

$$dQ_F = dF[\alpha(t - t) + \alpha'(P_D - \mathfrak{P})].$$

Die gleichzeitig von dem Heizmittel an das Gut übertragene Wärmemenge ist, wenn Formel (113) auf einen unendlich kleinen Flächenteil bezogen wird,

$$dQ_i = dF_i \cdot \frac{t_i - t}{\frac{1}{k_i} + \frac{e}{\lambda_{\mathfrak{G}}}}.$$

Die gesamte von Luft und Heizmittel an das Gut übergehende Wärme folgt hieraus zu

$$dQ_F + dQ_i = dF[\alpha(t - t) + \alpha'(P_D - \mathfrak{P})] + dF_i \cdot \frac{t_i - t}{\frac{1}{k_i} + \frac{e}{\lambda_{\mathfrak{G}}}}. \quad (117)$$

Die zur Abführung des Dunstes dienende Trockenluft sei zwangsläufig im Gleich- oder Gegenstrom über das Gut geführt, so daß mit jedem senkrecht zur Bewegungsrichtung des Gutes gemessenen Flächenstreifen dF die gesamte Luftmenge in Berührung kommt. Für die Veränderung des spezifischen Wärmehaltes der Luft gilt alsdann die früher entwickelte Beziehung

$$\begin{aligned} -G_L(di - i_{\mathfrak{B}t} \cdot dx) &= dF[\alpha(t - t) + \alpha'(P_D - \mathfrak{P})] \\ &= dF \cdot k'[i - i_g - i_{\mathfrak{B}t}(x - x_g)], \end{aligned}$$

oder auch

$$\int \frac{di}{i_g - i} = \int \frac{dF}{G_L} \cdot k'.$$

Das Integral ist lösbar, wenn die Temperatur t des Gutes und damit i_g und C_{p_g} bzw. k' sich nicht verändern, also nach dem voraus Erörterten der Luftzustand sich auf der τ_g -Linie bewegt und das Gut die für den Ausgleichzustand geltende Temperatur $t = \tau_g$ beibehält.

Die Integrierung liefert, ähnlich dem Falle der reinen Lufttrocknung, die Formel

$$\frac{i_g - i_a}{i_g - i_e} = e^{\frac{F_a - F_e}{G_L} \cdot k'}, \quad (118)$$

wobei $F_a - F_e$ die Teilfläche darstellt, längs deren der beschriebene Ausgleichzustand herrscht. Die für die Lufttrocknung ohne Flächenbeheizung entwickelten Formeln lassen sich nunmehr, sinngemäß geändert, unmittelbar niederschreiben

$$\begin{aligned} \frac{x_g - x_a}{x_g - x_e} &= e^{\frac{F_a - F_e}{G_L} \cdot k'}, \quad (119) \\ (i_g - i)_{\text{mittei}} &= \frac{i_e - i_a}{\ln \frac{i_g - i_a}{i_g - i_e}}, \\ (x_g - x)_{\text{mittel}} &= \frac{x_e - x_a}{\ln \frac{x_g - x_a}{x_g - x_e}}. \end{aligned}$$

Die stündliche Trockenleistung wird auch hier in der Feuchtigkeitszunahme der Luft gemessen und beträgt

$$G_L(x_e - x_a) = (F_a - F_e) k' (x_g - x)_{\text{mittel}}. \quad (120)$$

Die Aufgabe kann lauten, daß mit einer bestimmten Fläche, z. B. Anzahl von m^2 einer Papierbahn, die auf einem Zylindertrockner mit der Gegenseite die Zylinderfläche berührt, eine bestimmte Trockenleistung erzielt werden soll und nach der Beschaffenheit gefragt ist, die der umgebenden Luft hierbei zukommt. Bei Anwendung der Formel (120) beschränkt sich die Lösung alsdann auf den Ausgleichszustand, berücksichtigt also vor allem nicht eine Temperaturerhöhung des Gutes während der Trocknung. Steht in solchen Fällen die Flächengröße $F_a - F_e$ und die Trockenleistung $G_L(x_e - x_a)$ fest und wird ferner eine bestimmte Temperatur t des Gutes angenommen, so folgt aus Formel (120) der Wert $(x_g - x)_{\text{mittel}}$ und damit x_{mittel} selbst als der verlangte durchschnittliche Feuchtigkeitsgehalt der Luft. Ist der Feuchtigkeitsgehalt x_a der verfügbaren Luft niedriger als x_{mittel} , so folgt aus beiden Werten x_e und damit die Grenze des Luftzustandes. Ist dagegen $x_a > x_{\text{mittel}}$, so ist die Aufgabe nicht lösbar. Es muß entweder die Trockenleistung vermindert oder die Trockenfläche vergrößert oder schließlich eine höhere Temperatur t und damit ein größerer Wert x_g zugelassen werden. Wenn im vorstehenden nur nach den x -Werten gefragt wurde, so genügt dies deshalb, weil für den Ausgleichszustand mit der Temperatur t_i und t auch die Gerade festliegt, die nach Abb. 88 parallel zur τ_g -Linie verläuft und den geometrischen Ort für die Zustandsänderung der Luft bei gleichbleibenden Temperaturen t_i und t darstellt.

In anderer Weise kann die Frage aufgeworfen werden, bei bestimmtem Zustande der Trockenluft, also feststehender Lage des Punktes G der Abb. 88, die Temperatur des Gutes t zu ermitteln, die bei einer bestimmten Trockenleistung und einer bestimmten Fläche $F_a - F_e$ sich einstellt. Formel (120) liefert für diesen Fall x_g und damit die Temperatur t . Aus ihr und der Lage der Zustandslinie der Luft folgt alsdann die Temperatur t_i des anzuwendenden Heizmittels nach Abb. 88.

Schließlich kann nach Formel (120) die erforderliche Fläche berechnet werden, um bei bestimmter Temperatur von Gut und Heizmittel und gegebenem Zustand der Luft eine geforderte Trockenleistung zu liefern.

Der spezifische Wärmeverbrauch ist durch das Verhältnis $\frac{Q_i}{G_L(x_e - x_a)}$ gegeben, wenn die Trockenluft nur die mittelbare Erwärmung durch das Gut erfährt. Wird sie dagegen vorgewärmt, so ergibt sich der spezifische Wärmebedarf als das Verhältnis $\frac{i_a - i_r}{x_e - x_a} + \frac{Q_i}{G_L(x_e - x_a)}$. Für den letzten allgemeinen Fall findet sich mit Formeln (113) und (120)

$$\frac{Q}{G_L(x_e - x_a)} = \frac{i_a - i_r}{x_e - x_a} + \frac{(F_{ia} - F_{ie})(t_i - t)}{\left(\frac{1}{k_i} + \frac{e}{\lambda_{\text{G}}}\right)(F_a - F_e)k(x_g - x)_{\text{mittel}}}. \quad (121)$$

Darf schließlich die luftberührte Fläche gleich der beheizten Gegenfläche angesetzt werden, so folgt der spezifische Wärmeverbrauch zu

$$\frac{Q}{G_L(x_e - x_a)} = \frac{i_a - i_r}{x_e - x_a} + \frac{t_i + t}{\left(\frac{1}{k_i} + \frac{e}{\lambda_{\mathcal{G}}}\right)k'(x_g - x)_{\text{mittel}}}$$

D. Schrittweise Verfolgung der Zustandsänderung bei Wärmeübertragung von Heizmittel durch metallische Trennflächen und Gut an feuchte Gase bei beliebigem Ausgangszustand von Gut und Gas.

Werden in Formel (117) die unendlich kleinen Werte durch endliche, jedoch so kleine Beträge ersetzt, daß für sie mit einem gleichbleibenden Zustand von Gas und Gut gerechnet werden darf, so folgt die Wärmeübertragung von Luft und Heizmittel an Gut zu

$$\Delta Q_F + \Delta Q_i = \Delta F [\alpha(t - t) + \alpha'(P_D - \mathfrak{P})] + \Delta F_i \cdot \frac{t_i - t}{\frac{1}{k_i} + \frac{e}{\lambda_{\mathcal{G}}}}. \quad (117a)$$

Die Folge dieser beiderseitigen Wärmeübertragung ist eine Zunahme des Wärmehaltes des Gutes um den Betrag

$$\mathcal{G}_{\mathfrak{x}} \cdot \mathcal{C} \cdot \Delta t$$

und eine Temperatursteigerung

$$\Delta t = \frac{\Delta F [\alpha(t - t) + \alpha'(P_D - \mathfrak{P})] + \Delta F_i \cdot \frac{t_i - t}{\frac{1}{k_i} + \frac{e}{\lambda_{\mathcal{G}}}}}{\mathcal{G}_{\mathfrak{x}} \cdot \mathcal{C}}. \quad (122)$$

Hierbei stellen ΔF und ΔF_i die von der Luft auf der einen, der Heizfläche auf der anderen Seite berührten Flächenteile eines bestimmten Gutsgewichtes dar. In vielen Fällen wird $\Delta F = \Delta F_i$ gesetzt werden können.

Die schrittweise Untersuchung vollzieht sich wie folgt:

Menge und Anfangszustand der Luft (G_L, i, x), Menge und Anfangszustand des Gutes ($\mathcal{G}_{\mathfrak{x}}, t, \mathfrak{P}, \mathcal{C}$), Temperatur des Heizmittels (t_i), Wärmedurchgangswiderstand $\left(\frac{1}{k_i}\right)$ sowie Wärmeleitwiderstand $\left(\frac{e}{\lambda_{\mathcal{G}}}\right)$ sind gegeben. Nach Bestreichen einer bestimmten Teilfläche ΔF bzw. ΔF_i ergibt sich der neue Zustand der Luft aus der Zunahme ihres spezifischen Wärmehaltes

$$\Delta i = \frac{\Delta F}{G_L} \cdot k'(i_g - i)$$

und der Zunahme ihres Feuchtigkeitsgehaltes

$$\Delta x = \frac{\Delta F}{G_L} \cdot k'(x_g - x).$$

Die Temperaturerhöhung des Gutes beträgt, wenn Formel (122) zweckmäßig umgeformt wird,

$$\Delta t = \frac{\Delta F \cdot k' [i - i_g - i_{\text{st}}(x - x_g)] + \Delta F i \cdot \frac{t_i - t}{\frac{1}{k_i} - \frac{e}{\lambda_{\text{G}}}}}{\mathcal{G}_x \cdot \mathcal{C}}. \quad (122a)$$

Hieraus folgt der neue Zustandspunkt des Gutes, solange es feucht ist. Für hygroskopischen Stoff ergibt sich aus dem geänderten Feuchtigkeitsgehalt des Gutes

$$x + \Delta x = x - \frac{G_L \cdot \Delta x}{\mathcal{G}_x}$$

die dem Gute zukommende Dampfspannung

$$\mathfrak{P} + \Delta \mathfrak{P} = P'_t + \Delta t \cdot \frac{x + \Delta x}{x_e}$$

und damit der Zustandspunkt des Gutes selbst.

Wie bei der reinen Lufttrocknung ist auch hier zu unterscheiden, ob Luft und Gut im gleichen oder entgegengesetzten Sinne strömen. Beim Gegenstrom muß die schrittweise Untersuchung vom Endzustande der Luft ausgehen, dieser also vorweg angenommen werden. Die Untersuchung liefert schließlich, rückwärtsgehend, den Zustandspunkt V der Luft und damit das Maß der Vorwärmung, das nötig ist, um die für den Endzustand der Luft getroffene Voraussetzung zu erfüllen.

IX. Berechnung des Energieverbrauches.

A. Wärmeverbrauch.

Wird von der Möglichkeit abgesehen, den Anteil der verbrauchten Wärme wiederzugewinnen, der in Trockenmittel und Gut entweicht, so ergibt sich bei Lufttrockenanlagen die Höhe des Wärmeaufwandes nach der Bilanzgleichung zu

$$Q = G_L(i_h - i_r) + \mathcal{G}_x [\mathcal{C}_h(t_h - t_r) - i_{\text{st}}(x_r - x_h)] + Q_{\text{verl}}.$$

Auf der rechten Seite sind alle Größen aus den zahlenmäßigen Voraussetzungen und Ermittlungen im i - x -Bilde bekannt, und es bleibt nur noch der Betrag Q_{verl} zahlenmäßig festzustellen. Ähnliches gilt bei Verdampfanlagen, für die die Bilanzgleichung

$$Q = \mathcal{G}_x [\mathcal{C}_h(t_h - t_r) + (i_{D t_h} - i_{\text{st} t_r})(x_r - x_h)] + Q_{\text{verl}}$$

lautet und nach Festlegung der Temperatur- und Druckverhältnisse nur noch der Betrag Q_{verl} zu ermitteln bleibt, um Q zu finden.

Q_{verl} setzt sich in der Hauptsache aus drei Gliedern zusammen:

a) der wegen unvollkommener Wärmedichte der Umfassungswände in die Umgebung entweichenden Wärme,

b) der in dem angewandten Heizmittel am Ausgange der Trocken-
vorrichtung enthaltenen Überschußwärme,

c) der bei unterbrochenem Betriebe verlorengehenden Speicher-
wärme.

Zu a) Herrscht im Innern der Trockenvorrichtung die Temperatur t ,
in ihrer Umgebung die Temperatur t_r , so tritt durch eine Fläche F m²
stündlich eine Wärmemenge

$$Q_F = F \cdot k(t - t_r) \quad (123)$$

in die Umgebung, wenn k die Wärmedurchgangszahl bedeutet. Bei
hohen Temperaturen spielt neben dem Wärmedurchgang auch die
Wärmestrahlung eine Rolle. Die stündlich durch Strahlung an die
Umgebung übertretende Wärme beträgt

$$Q_F = F \cdot \frac{\left(\frac{\vartheta + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{t + 273}{100}\right)^4}{\frac{1}{C_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_s}\right)}. \quad (124)$$

Hierin bedeuten

F_1 und F_2 die Größe der strahlenden und bestrahlten Fläche, in m²,

ϑ die Wandtemperatur der strahlenden Fläche, in °C,

C_1 und C_2 die Strahlungskonstante der strahlenden und bestrahlten
Fläche, in kcal/m²·h·(° abs.)⁴,

$C_s = 4,96$ die Strahlungskonstante des vollkommen schwarzen Körpers.

Bezüglich der zahlenmäßigen Ermittlung von Wärmedurchgang
und strahlender Wärme sei auf die Forschungsergebnisse verwiesen, die
in zahlreichen Sonderwerken in unmittelbar anwendbarer Form ent-
halten sind. Hier sollen nur kurz die grundsätzlichen Punkte zusammen-
gestellt werden, die dazu dienen, Wärmedurchgang und Wärmestrahlung
niedrig zu halten. Hierzu ist es nötig:

die an die Umgebung grenzende Oberfläche der Trockenvorrichtung
so klein wie möglich zu halten, also bei feststehendem Fassungsvermögen
eine Form zu wählen, die der Kugel, dem Würfel, dem Zylinder mit
einer Mantellänge gleich dem Durchmesser nahe kommt, soweit nicht
andere, schwerer wiegende Rücksichten dem entgegenstehen;

die Wärmedurchgangszahl k niedrig zu halten, also die Umfassungs-
wände möglichst aus Stoffen mit niedrigerer Wärmeleitfähigkeit zu wählen
und zur Erhöhung des Wärmedurchgangswiderstandes künstliche Wärme-
schutzmittel aufzutragen. (Bei Anwendung hoher Temperaturen ist
auf Feuersicherheit der Bauweise besonderer Wert zu legen. In ge-
wissem Sinne gilt dies für Trockenanlagen ganz allgemein, weil brenn-
bare Baustoffe infolge ihres geringen Feuchtigkeitsgehaltes einen aus-
gebrochenen Brand leicht verbreiten. Viele Lacke entwickeln brennbare
Dämpfe und fordern daher, ebenso wie die leicht entflammbaren photo-
graphischen Filme, besondere Maßnahmen gegen Feuersgefahr.) Da
die Wärmedurchgangszahl k durch die Wärmeübergangszahl α maß-
gebend mitbestimmt wird, und diese mit der Geschwindigkeit der um-
gebenden Luft stark wächst, gehört hierher auch die Vorschrift, zugige
Orte für die Aufstellung möglichst zu vermeiden;

das Temperaturgefälle zwischen Trockenvorrichtung und Umgebung niedrig zu halten, für die Aufstellung daher einen Ort zu wählen, der möglichst warm liegt;

die äußere Oberfläche der Trockenvorrichtung ebenso wie die Wände des Aufstellungsraumes so zu behandeln, daß die Strahlungskonstante niedrig wird. Dies trifft z. B. zu bei Anstrich mit Aluminiumbronze, in besonderem Maße auch bei Aluminiumblechummantelung.

In manchen Fällen, z. B. bei Papiertrocknern, steht die Trockenvorrichtung offen im Raum und bewirkt eine Steigerung von dessen Temperatur, die zu Wärmeverlusten führt. Es liegt nahe, diesen Gebäudeverlust durch Abwärme zu decken, die in dem entstehenden Schwaden enthalten ist. Dies würde jedoch zu Feuchtigkeitsniederschlägen auf die Umfassungswände und, im allgemeinen unzulässigem, Tropfenfall auf das Gut führen, außerdem eine unerwünschte Nebelbildung ergeben, durch die die Bedienung erschwert und die Haltbarkeit der Einrichtung vermindert würde. Es muß daher zur Vermeidung der Nebelbildung der errechnete Wärmebedarf um das Maß dieser Verluste erhöht werden. Sie bewegen sich bei zweckmäßiger Bauweise um so mehr in erträglichen Grenzen, je größer die spezifische Trockenleistung ($\xi_r - \xi_h$) ist. Bei Papiertrocknern betragen sie nach Mallick¹ je nach Größe der Maschine 2,5 bis 3% des Gesamtwärmeverbrauches im Jahresmittel und steigen auf 3,5 bis 5,5% an kühlen Wintertagen. Maßnahmen zur Verringerung des Gebäudeverlustes sind daher lohnend, dürfen jedoch keinesfalls durch Übertreibung zur Erschwerung des Betriebes führen, wie dies z. B. bei Papiertrocknern durch Überbauung mit licht- und schmutzfangenden Hauben, Filzdächern u. dgl. geschieht.

Schutz gegen Tauwasserbildung.

Bedeutun

α die Wärmeübergangszahl auf der (wärmeren) Innenseite der Trockenvorrichtung, in kcal/m²·°C·h,

t die Lufttemperatur auf der (wärmeren) Innenseite, in °C,

t_r die Lufttemperatur auf der (kälteren) Außenseite, in °C,

t'_x den Taupunkt der Innenluft, in °C,

so muß zur Vermeidung eines Feuchtigkeitsniederschlages an den Innenwänden die Wärmeschutzschicht nach Hencky² so bemessen werden, daß die Wärmedurchgangszahl

$$k \leq \alpha \cdot \frac{t - t'_x}{t - t_r}$$

bleibt. Ist die Luft gesättigt, d. h. $t'_x = t$, so wird $k = 0$. Es ist alsdann auch bei Verwendung stärksten Wärmeschutzes nicht möglich, einen Niederschlag zu verhindern. Vollständige Sättigung muß daher überall dort vermieden werden, wo die Bildung von Tauwasser schädlich wirkt.

¹ Mallick: Über die Wirtschaftlichkeit der Papierzylindertrockner und ihre Entnebelungsanlagen, unter besonderer Berücksichtigung der Abwärmeverwertung. W. f. Pap. 1921

² Hencky: Die Wärmeverluste durch ebene Wände. München 1921.

Die Wärmeübergangszahl α bewegt sich etwa zwischen den Werten 8 bei ruhender Luft und 40 bei stark bewegter Luft. Die Temperatur auf der Außenseite kann für Trockenvorrichtungen, die durch Arbeitsräume umgeben werden, mit $t_r \geq 15^\circ$ angesetzt werden. Sie sinkt für die mit der Außenluft in Berührung stehenden Teile der Trockenvorrichtung bis auf etwa $t_r = -10^\circ$. Im Mittel kann angenommen werden, daß der Taupunkt der feuchten Trockenluft mindestens 3° unter ihrer Temperatur liegt. Unter dieser Voraussetzung muß $k \leq 8 \cdot \frac{3}{t-15}$ für Innenwände, bzw. $k \leq 8 \cdot \frac{3}{t+10}$ für Außenwände sein, wenn in toten Winkeln Niederschlag vermieden werden soll. Für eine Temperatur $t = 40$ bis 100° ergibt dies $k \approx 1$ bis $0,3$ für Innenwände, bzw. $k \approx 0,5$ bis $0,2$ für Außenwände. Das bedeutet, daß die Trockenvorrichtung, soweit sie durch Arbeitsräume umgeben ist, einen Wärmeschutz erhalten soll, der bei 40° Innentemperatur einer etwa 4 cm starken, bei 100° Innentemperatur einer etwa 12 cm starken Korkschiicht entspricht. Die mit der Außenluft in Berührung stehenden Teile müssen 8 bzw. 20 cm starke Korkschichten erhalten. Im allgemeinen liegt der hiermit verbundene Aufwand jenseits der wirtschaftlichen Grenze, so daß es besonders bei hohen Temperaturen und für die mit der Außenluft in Berührung stehenden Teile nötig ist, nach einem anderen Abhilfemittel Umschau zu halten. Als solches bietet sich in erster Linie Vermeidung von toten Ecken. Für $\alpha \approx 16$ folgt $k \approx 1,9$ bis $0,6$ für Innenwände, bzw. $0,9$ bis $0,4$ für Außenwände. Dies führt für den ungünstigsten Fall zu einem Wärmeschutz, wie er einer 10 cm starken Korkplatte entspricht.

Beim Gegenstromverfahren bewirkt Tauwasserbildung ein meist unbedenkliches Tropfen auf das feuchte Gut. Beim Gleichstromverfahren ist im allgemeinen der Wert $t - t''_s$ hoch und daher Tauwasserbildung weniger zu erwarten. Für die Stärke des Wärmeschutzes wird daher im allgemeinen der wirtschaftliche Gesichtspunkt des Wärmeverlustes maßgebend und die Prüfung auf Tauwasserbildung nur in besonderen Fällen nötig sein.

Eisenteile, die durch den Umbau durchtreten, werden stets beschlagen, wenn die Umgebungstemperatur wesentlich niedriger liegt als die Innentemperatur der Trockenvorrichtung. Die Aufbringung einer Wärmeschutzschicht sollte daher hier allgemeine Regel sein, u. a. auch mit Rücksicht auf die Rostgefahr.

Zu b) Für die Verluste, die bei der Fortleitung des Heizmittels vor und hinter der Trockenvorrichtung entstehen, ist diese nicht verantwortlich zu machen. Ihr obliegt nur die Aufgabe, die im Heizmittel zugeführte Wärme möglichst weitgehend auszunutzen. Der als Heizmittel in der Regel in Betracht kommende Dampf bedingt durch seine Spannung die Sättigungstemperatur des Niederschlagwassers und damit die für den Trockenvorgang im allgemeinen verlorengelende Überschußwärme des Dampfwassers.

Zu c) Während bei durchgehendem Betriebe die in den baulichen Teilen der Trockenvorrichtung aufgespeicherte Wärmemenge ohne Be-

deutung bleibt, tritt sie bei unterbrochenem Betrieb als Verlustquelle auf, weil die Wärme teilweise oder ganz während des Stillstandes verlorengeht und nach der Inbetriebnahme neuerlich aufgespeichert werden muß. Der Trocknung im Beharrungszustande geht daher eine Anheizzeit voraus, deren Dauer möglichst kurz sein soll. Aus diesem Grunde müssen bei unterbrochenem Betriebe die Umfassungswände und baulichen Innenteile (also auch die Trockengestelle) so ausgeführt werden, daß sie ein geringes Wärmeaufspeicherungsvermögen, also niedrige spezifische Wärme und geringes Gewicht, besitzen. Soweit es möglich ist, soll die Wärmeschutzschicht auf der Innenseite liegen, damit die äußeren Massen an der Wärmebewegung weniger teilnehmen. Bei kurzer Betriebszeit kommt hierzu die Vorschrift, für die Umfassungswände Stoffe zu benutzen, die möglichst wärmeträge sind, d. h. Temperaturänderungen nur langsam folgen. Bei Verdampfanlagen stößt die Durchführung der Vorschrift, die Wärmeschutzschicht auf der Innenseite anzubringen, in der Regel deshalb auf Schwierigkeiten, weil alsdann in besonderem Maße Widerstandsfähigkeit des Wärmeschutzmittels gegen Feuchtigkeit zu fordern ist. Bei Lufttrockenanlagen liegen Bedenken kaum vor, wenn die Schichtstärke so bemessen ist, daß innere Tauwasserbildung vermieden bleibt. Wegen der zahlenmäßigen Ermittlung der Anheizzeit sei auf die Untersuchungen von Schmidt¹ und Esser-Krischer² hingewiesen.

Zu den aufgeführten drei Posten tritt bei Lufttrockenanlagen noch ein Verlust dadurch, daß unausgenutzte Luft aus der Trockenvorrichtung nach außen entweicht oder kalte Außenluft nach innen dringt. Die Erörterungen über die Einwirkung dieses Verlustes auf das *i-x*-Bild liefern einen Anhalt für seine zahlenmäßige Berücksichtigung. Es ist selbstverständlich, daß bei einer mit Unterdruck in der Trockenvorrichtung arbeitenden Anlage die von außen eindringende Falschlufft unschädlich bleibt, wenn sie zunächst über die Heizvorrichtung streicht, die zur Vorwärmung der Außenluft bestimmt ist. Dagegen bedeutet es immerhin einen Verlust, wenn dieses Eindringen an einer späteren Stelle über Heizvorrichtungen erfolgt, da diese für Luft erhöhten Feuchtigkeitsgehaltes bestimmt sind und die eindringende Falschlufft bis zum Austritt nicht mehr voll ausgenutzt wird.

Nicht unerwähnt bleiben sollen Nebeneinflüsse, die zu einer Verminderung des äußeren Wärmebedarfes führen, weil sie selbst Wärme abgeben. Es handelt sich hierbei um die energieverbrauchenden Nebenvorgänge:

- Arbeitsverbrauch des Lüfters,
- Beleuchtung,
- Arbeitsmaschinen und Verkehr innerhalb der Trockenvorrichtung.

¹ Schmidt: Neuere Untersuchungen über den Wärmebedarf von Gebäuden und die Wärmeabgabe von Heizkörpern. Ges.-Ing. 1924.

² Esser-Krischer: Die Berechnung der Anheizzeit und Auskühlung ebener und zylindrischer Wände. Berlin: Julius Springer 1930.

Gegenüber dem gesamten Wärmeverbrauch spielen die ihnen entsprechenden Wärmemengen kaum eine Rolle. Das gleiche gilt für kraftverbrauchende Rührvorrichtungen, die bei Verdampfanlagen Anwendung finden.

B. Arbeitsverbrauch.

Solange das Trocknen energetisch unvollkommen durch unmittelbare Wärmeübertragung erfolgt, kann von einem Nutzarbeitsverbrauch nicht gesprochen werden. Die gesamte mechanische Leistung, die mit dem Trocknen verbunden ist, stellt daher einen Arbeitsverlust dar, soweit nicht etwa mit der Beförderung des Gutes eine Veränderung der Höhenlage verbunden ist. Abgesehen von diesem nebensächlichen Fall der Förderleistung, erstreckt sich der Arbeitsverbrauch einer Trockenvorrichtung hauptsächlich auf Vorrichtungen zum

1. Bewegen der Trockenvorrichtung selbst, z. B. bei Trommel-trocknern,
2. Bewegen des Gutes durch die Trockenvorrichtung; hierbei handelt es sich um
 - a) eine fortschreitende Bewegung vom Ein- zum Ausgang, oder
 - b) eine Mischbewegung,
3. Bewegen des Trockenmittels. Hierher gehört bei Lufttrocken-vorrichtungen der Antrieb des Lüfters, bei Verwendung beheizter Flä-chen mechanische Mittel zur Förderung des Heizmittels,
4. Antrieb der Luftpumpen und Ausbringvorrichtungen für das Gut bei Vakuumtrocknern,
5. Speisevorrichtungen für das Gut bei Trocknern, die mit Über-druck arbeiten.

Zu 1. Der Arbeitsverbrauch für die Bewegung der Trockenvorrichtung selbst hängt in erster Linie von der mechanischen Ausführung ab. Es erscheint aussichtslos und auch wenig lohnend, die Ermittlung auf rechnerischem Wege zu versuchen.

Zu 2. Soweit es sich hier um die Fortbewegung des Gutes durch die Trockenvorrichtung handelt, gilt das zu 1. Gesagte. Bei der Mischbewegung spielt die Geschwindigkeit eine ausschlaggebende Rolle. Sind feste Körper zu durchmischen, so können bei Überschreitung gewisser Grenzen leicht hohe Arbeitsverbrauchsahlen auftreten und die Wirtschaftlichkeit gefährden. Es ist daher in solchen Fällen stets die Mischgeschwindigkeit als obere Grenze einzuhalten, die ausreicht, um eine gleichmäßige Einwirkung des Trockenmittels auf das Gut zu sichern. Besteht das Gut aus Flüssigkeit, so kann darüber hinaus eine Erhöhung seiner Umlaufgeschwindigkeit zweckmäßig sein, um eine Verbesserung des Wärmeaustausches zu erzielen.

Zu 3. Der Arbeitsverbrauch des Lüfters hängt von dem zu fördernden Luftgewicht und dem zu überwindenden Widerstand ab. Das Luftgewicht ergibt sich aus der geforderten Trockenleistung und den, mit Rücksicht auf das Gut und die Wirtschaftlichkeit, festgelegten Verhältnissen des Trockenvorganges. Die Strömungswiderstände folgen

nach Festlegung der baulichen Einzelheiten. Während sie für den Durchgang der Luft durch das Gut innerhalb der Trockenvorrichtung sich nur in seltenen Fällen zahlenmäßig genau ermitteln lassen, bietet für längere Luftleitungen die zahlenmäßige Feststellung des Widerstandes keine Schwierigkeiten. Die Luftleitungen werden in der Regel aus Holz oder verputzten Baustoffen, rund oder viereckig, hergestellt. Die Geschwindigkeit bewegt sich zwischen 3 und 10 m/s in den Haupt-, 1 und 3 m/s in den Nebenkanälen. Der Reibungswiderstand beträgt nach Blasius¹

$$\Delta P_R = \lambda_R \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{w^2}{2 \cdot g} \cdot \gamma,$$

wobei

ΔP_R den Druckverlust, in kg/m²,

$g \approx 9,81$ die Beschleunigung der Erdschwere, in m/s²,

λ_R eine von den Eigenschaften des Gases, der Geschwindigkeit und dem Durchmesser abhängige Funktion.

bedeuten. Für Luftleitungen aus Holz oder verputzten Baustoffen kann $\lambda_R \approx 0,006$, für Leitungen aus Blech zu $\lambda_R \approx 0,003$ angesetzt werden, wenn die angegebenen Geschwindigkeiten nicht unterschritten sind.

Ist der Querschnitt viereckig, so ist statt d der gleichwertige Durchmesser $d' = \frac{2 \cdot B \cdot H}{B + H}$ zu setzen.

Zu 4. Die Vorausberechnung des genauen Kraftbedarfes für die Luftpumpen von Vakuumtrockenanlagen stößt auf Schwierigkeiten. Gegeben ist im allgemeinen die Guttemperatur t , die um das Maß des Siedeverzugs darunter liegende Sättigungstemperatur des Dampfes und damit die Höhe der geforderten Luftleere. Die zweite wichtige Größe, die Ansaugeleistung, hängt jedoch von mannigfaltigen Neben Umständen ab, nämlich:

von dem Verhältnis des Gutsgewichtes zu der mit ihm eingebrachten Luftmenge, daher auch in hohem Maße davon, ob die Einrichtung unterbrochen arbeitet oder fortlaufend, unter Anwendung von Luftschleusen, beschickt und entleert wird. Im ersten Falle ergibt sich die Luftmenge als Unterschied zwischen dem Fassungsvermögen der Trockenvorrichtung und dem Rauminhalt der auf jede Beschickung entfallenden Gutsmenge. Der Ansaugedruck ist anfangs gleich dem atmosphärischen und nimmt allmählich ab. Im zweiten Falle wechselt die Luftleere gleichfalls, jedoch in engeren Grenzen, besonders wenn nach dem Verfahren Passburg die Luftschleuse vor Verbindung mit dem Trockenraum durch eine besondere Pumpe entlüftet wird;

von der Undichtheit der Trockenvorrichtung nach außen. In dieser Beziehung sind die Bauweisen am vorteilhaftesten, die bei einem bestimmten Fassungsvermögen die geringste Länge dichtender Kanten aufweisen.

Der Luftgehalt des Gutes selbst spielt im allgemeinen keine Rolle. Gleichbedeutend mit Luft sind unter dem hier betrachteten Gesichtspunkte

¹ Blasius: Das Ähnlichkeitsgesetz bei Reibungsvorgängen in Flüssigkeiten. Forschungsheft 131.

punkt andere Gase, die nicht mit den aus dem Feuchtigkeitsgehalt sich entwickelnden Wasserdämpfen niederschlagen und von der Luftpumpe mit abgesaugt werden müssen.

Nach Untersuchungen von Passburg kommt z. B. für einen Vakuumschaufeltrockner von 1,2 m Durchmesser und 10 m Länge mit 100 m² Heizfläche, der in 24 h 30000 kg nasse Stärke von einem anfänglichen Feuchtigkeitsgehalt $x_r = 0,67$ auf einen Endfeuchtigkeitsgehalt $x_g = 0,25$ trocknet, also 7500 kg Wasser abdampft, eine Trockenluftpumpe mit einer Ansaugleistung von etwa 330 m³/h in Frage, die anfangs etwa 8,7 PS verbraucht. Mit der zunehmenden Trocknung und damit einhergehenden Verminderung des Luftdruckes nimmt auch der Kraftbedarf schließlich bis auf 4,3 PS ab. Der durchschnittliche Arbeitsbedarf von Naßluftpumpen ist etwa doppelt so hoch wie von Trockenluftpumpen. Zu berücksichtigen ist, daß der Kraftaufwand für Förderung des den Kondensator durchlaufenden Kühlwassers in beiden Fällen hinzukommt und bei Oberflächenkondensation mit Trockenluftpumpen wegen der benötigten größeren Kühlwassermenge höher ist.

Die Ausbringvorrichtung für Vakuumentrockner besteht bei durchlaufendem Betriebe aus Pumpen, wenn das Gut auch nach der Trocknung noch fließende Eigenschaft besitzt, dagegen aus Schleusen, falls es die Form eines festen Körpers annimmt. Bei unterbrochenem Betriebe entfällt die Ausbringvorrichtung in der Regel. Wird, mit Rücksicht auf den Arbeitsverbrauch der Luftpumpe, auch bei unterbrochenem Betriebe mit Pumpen bzw. Schleusen gearbeitet, so wird der erzielte Vorteil durch die Erschwerung des Betriebes meist aufgewogen.

Zu 5. Fälle, bei denen im Trockner gegenüber der Umgebung Überdruck herrscht, zählen zu den Ausnahmen. Bei durchgehendem Betriebe muß alsdann das Naßgut durch Pumpen oder schleusenartige Speisevorrichtungen eingeführt werden, während das getrocknete Gut infolge des Überdruckes selbsttätig nach außen tritt. Bei unterbrochenem Betriebe entfallen die Speisevorrichtungen. Der Kraftbedarf für Betätigung von Ausbring- und Speisevorrichtung ist im allgemeinen gering.

Ausführung und Betrieb.

I. Durchführung des Trockenvorganges.

A. Vorbereitung des Gutes.

Der Zustand des Gutes bei Beginn des Trockenvorganges entspricht entweder den Naturverhältnissen, z. B. bei tierischen und pflanzlichen Erzeugnissen, oder dem gesamten Arbeitsverfahren, in das sich die Trocknung als ein Glied einschreibt, z. B. bei künstlichen Erzeugnissen. Aufgabe der Vorbehandlung des Gutes ist es, die Voraussetzungen für rasche Trocknung mit geringstem Energieaufwand unter möglichster Erhaltung wertvoller Eigenschaften des Gutes zu verbessern. Die Mittel hierzu sind mannigfaltig und hängen von der besonderen Art des Gutes und des Trockenverfahrens ab. In der Hauptsache laufen sie hinaus auf:

1. Mechanische Entfeuchtung.

2. Zweckentsprechende Gestaltung.

Diese kann entweder darin bestehen, daß die Ware in die für die Trocknung geeignete Form gepreßt, oder daß eine Zerstückelung ohne besondere Formgebung vorgenommen wird. Beispiele sind:

für den ersten Fall: Auswalzen von Teigwaren und Seife in Bandform, von Gummimasse in Fellform, von Leim und Gelatine in Tafeln,

für den zweiten Fall: Zerschnitteln von Kartoffeln und Obst, zerreißen von Gemüse, zermahlen von Fischabfällen, zerzupfen von Wolle.

Die angeführten Vorbereitungsmaßnahmen werden zuweilen gleichzeitig mit der Trocknung durchgeführt oder fortgesetzt und bilden alsdann einen Bestandteil des eigentlichen Trockenverfahrens. Dies gilt z. B., wenn der Inhalt von Eiern oder Milch und Blut in zerstäubter Form dem trocknenden Luftstrom ausgesetzt, oder Kartoffeln in Form eines Schleiers auf die trocknende Walze aufgetragen werden.

3. Veränderung der Oberfläche des Gutes.

Diese ist vor allem bei Naturerzeugnissen dann geboten, wenn sie mit einer luftdichten Hülle umgeben sind. Hierher gehört bei Obst Schalen oder Behandeln mit kochender Lauge, um den wachsartigen Belag zu lösen und die Haut einzureißen.

4. Veränderung der natürlichen Eigenschaften des Gutes.

So werden z. B. bei Obst und Kartoffeln durch Dämpfen die Zellen aufgeschlossen. Hierunter fällt auch die Vorwärmung des Gutes.

Die Trocknung vorgewärmten Gutes.

In Ausnahmefällen ergibt sich die Anfangstemperatur des Gutes aus der der Trocknung vorausgehenden Behandlung höher, als der Kühlgrenze der Trockenluft entspricht. Wird z. B. Flüssigkeit vor der eigentlichen Trocknung eingedampft, so muß bei empfindlichem Gut der Siedepunkt, gegebenenfalls durch Eindampfen unter Luftleere, so geregelt werden, daß die zulässige Höchsttemperatur nicht überschritten wird. Die anschließende Trocknung wird in ihrem Hauptabschnitt mit einer Kühlgrenze arbeiten, die niedriger liegt, als diese gefährliche Temperatur, weil ja bei der Fertigtrocknung im hygrokopischen Gebiet eine Temperatursteigerung des Gutes eintritt, die erst bis zur Grenze der Höchsttemperatur reichen darf. In solchen Fällen wirft sich die Frage auf, ob und wie weit der von dem vorgewärmten Gut mitgebrachte Wärmeüberschuß zur Deckung des Wärmeverbrauches während der eigentlichen Trocknung ausreicht. Von vornherein kann erwartet werden, daß dies nicht in vollem Maße der Fall ist und die Anwendung vorgewärmter Luft nötig bleibt. An ihre Stelle könnte auch ein mehrmaliger Durchgang der zu trocknenden Flüssigkeit unter jeweiliger Zwischenerwärmung in Betracht gezogen werden. Hierbei ergeben sich jedoch Schwierigkeiten durch die Unmöglichkeit, den fertig getrockneten Teil des Gutes von dem für den neuerlichen Umlauf bestimmten zu trennen, was für die Durchführung eines ununterbrochenen Betriebes nötig wäre. Im allgemeinen läuft daher die Vorwärmung nur auf eine Verminderung der während der Trocknung zuzuführenden Wärmemenge hinaus. Bei festen Körpern, z. B. Holz und Zuckerbroten, erfolgt zuweilen im Trockenraum selbst eine wiederholte Anwärmung zwischen den einzelnen Abschnitten regelrechter Trocknung, beim Holz durch unmittelbare Einleitung von Dampf, beim Zuckerbrot durch Erwärmung der Trockenraumluft. Setzt nach der jeweiligen Aufladung des Gutes mit Wärme der Trockenvorgang neuerlich ein, so erfährt zunächst die Oberfläche eine Abkühlung. Es entsteht, wie bei jeder Erhöhung der Gutstemperatur über das Maß der Kühlgrenze der Trockenluft, ein Temperaturgefälle vom Kern nach außen, durch das der Austritt der inneren Feuchtigkeit begünstigt wird.

Im $i-x$ -Bilde der Abb. 90 entspreche Punkt V' dem Zustande der vorgewärmten Luft. Die durch V' gezogene τ'_0 -Linie legt mit Punkt \mathcal{U}' die Temperatur t'_a fest. Würde das Gut gerade bis auf diese Temperatur vorgewärmt, so würde die Haupttrocknung sofort einsetzen und der Zustand der Luft sich längs der Geraden $V'\mathcal{U}'$ verändern. Liegt dagegen die Temperatur des vorgewärmten Gutes entsprechend Punkt \mathfrak{Z} bei der höheren Temperatur t_b , so bewegt sich bei einem Gleichstromtrockner im ersten Augenblicke der Luftzustand längs der Verbindungsgeraden $V'\mathfrak{Z}$. In dem, im bestimmten Falle durch schrittweise Untersuchung zu findenden, Punkte A erreicht er eine gegenüber der vorherigen Annahme höher liegende τ -Linie, um danach dem Linienzug $A E H$ in der früher untersuchten Weise zu folgen. Der Gutzustand verläuft längs des Linienzuges $\mathfrak{Z}\mathcal{U}\mathfrak{G}$. J stellt den Beharrungszustand dar. Die ihm zukommende Temperatur t_i liegt höher als bei Vorwärmung

des Gutes bis zur Temperatur t_a und erst recht höher gegenüber dem Falle, daß das Gut mit einer Temperatur $t_r < t_a$ die Trockenvorrichtung betritt, um erst darin seine Vorwärmung zu erfahren. Hieraus ergibt sich ganz allgemein, daß die Anfangstemperatur t'_v der Trockenluft um so niedriger gehalten werden muß, je höher der Grad der Vorwärmung ist.

Wird Formel (76)

$$i_v - i_i = \frac{\mathcal{G}\mathfrak{x}}{G_L} (\mathfrak{C}_i \cdot t_i - \mathfrak{C}_r \cdot t_r)$$

und die hier gültige Beziehung

$$i_i - i'_v = \frac{\mathcal{G}\mathfrak{x}}{G_L} (\mathfrak{C}_r \cdot t_v - \mathfrak{C}_i \cdot t_i) \quad (76a)$$

beiderseits zusammengezählt und $x_b = x_r$, $\mathfrak{C}_v = \mathfrak{C}_r$ gesetzt, so ergibt sich,

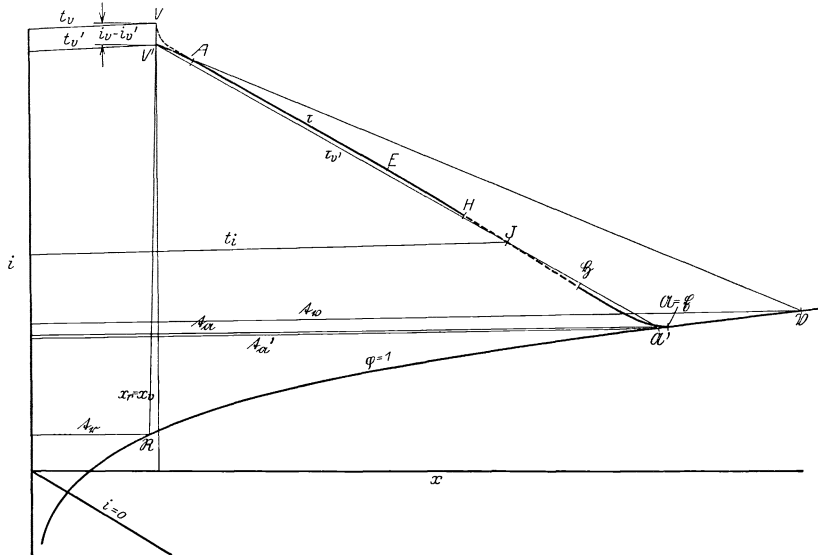


Abb. 90. Einfluß der Vorwärmung des Gutes im i - x -Bild (Gleichstromtrockner).

daß die Verwendung vorgewärmten Gutes auf das Trockenergebnis keinen Einfluß hat, wenn

$$i_v - i'_v = \frac{\mathcal{G}\mathfrak{x}}{G_L} \cdot \mathfrak{C}_r (t_v - t_r)$$

wird. Das heißt, daß Punkt V' alsdann um ein Maß tiefer rückt als Punkt V , das dem auf 1 kg Reinluft bezogenen Wärmeverbrauch für die vorausgehende Erhöhung der Gutstemperatur entspricht. Was an Vorwärmung des Gutes geleistet ist, wird an Vorwärmung der Luft gespart. Der spezifische Wärmeverbrauch bleibt im ganzen gleich, ebenso der spezifische Luftbedarf. Ein

grundsätzlicher Unterschied ergibt sich jedoch insofern, als Vorwärmung des Gutes ein lebhaftes Einsetzen der Trocknung zur Folge hat.

B. Grundsätze für die Durchführung des Trockenvorganges.

Die äußere Gestaltung der Trockenvorrichtungen ist derartig mannigfaltig, daß es schwer erscheint, eine Einteilung in wenige Gruppen vorzunehmen. Wird von der Wechselwirkung zwischen Trockenmittel und Gut ausgegangen, so handelt es sich darum, die Gesichtspunkte klar zu erkennen, die die maßgebenden Verhältnisse des Gutes — Temperatur, Feuchtigkeitsgehalt, Geschwindigkeit und Gleichmäßigkeit der Trocknung — beeinflussen. Es ergibt sich alsdann etwa folgende Gruppierung:

1. Trockenverfahren, bei denen Beharrungszustand vorliegt.

Das Gut wird hierbei gleichmäßig der Trockenvorrichtung am einen Ende zugeführt, am anderen entnommen. Sein Zustand wechselt örtlich mit der Fortbewegung, dagegen bleiben an irgendeiner bestimmten Stelle der Trockenvorrichtung die Verhältnisse von Gut und Trockenmittel stets dieselben. Für Behandlung nach solchen Verfahren eignen sich nur Waren gleicher Art und Abmessungen.

2. Trockenverfahren, bei denen das Trockenbild sich dauernd verändert.

Das Gut befindet sich hierbei entweder in Ruhe oder in einer Mischbewegung. Die Trockenvorrichtung wird abwechselnd beschickt und entleert. Der Zustand des Gutes ist örtlich verschieden, außerdem an jeder Stelle der Trockenvorrichtung zeitlich veränderlich. Da hier die Möglichkeit besteht, Teile des Gutes nach dem Fortschreiten der Trocknung vor anderen auszubringen, bieten derartige Verfahren Vorteile bei der Verarbeitung ungleicher, gegen Übertrocknung empfindlicher Waren.

Eine weitergehende Unterteilung ergibt sich für beide Gruppen wie folgt:

a) Der Zustand des Trockenmittels ist veränderlich.

Bei Trocknung im Beharrungszustande ist die Veränderlichkeit rein örtlich. Das Trockenmittel wandert über oder durch das Gut. Sein Zustand wechselt von einer Stelle zur anderen, ist jedoch an ein und derselben Stelle stets der gleiche. Bei Trocknung mit veränderlichem Trockenbild bezieht sich der Wechsel des Trockenmittelzustandes in der Regel auf Ort wie Zeit. Auch hier wandert das Trockenmittel über oder durch das Gut. Sein Zustand wechselt von Stelle zu Stelle, außerdem an ein und derselben Stelle mit der Zeit.

b) Der Zustand des Trockenmittels ist unveränderlich.

Dies ist nur dann möglich, wenn das Trockenmittel seinen Aggregatzustand ändert. Die Wärmezufuhr erfolgt hierbei ausschließlich durch dampfbeheizte Körper. Damit deren Oberflächentemperatur sich nicht durch Berührung mit dem Gute verändert, tritt hierzu die Bedingung, daß die Trocknung sich unter gleichbleibender Siedetemperatur der zu

verdampfenden Flüssigkeit vollzieht. Sie wird genügend genau bei Verdampfanlagen erfüllt, wobei der entstehende Dampf gegen den Druck der Umgebung oder den verminderten Druck einer Kondensationsanlage entweichen kann. Da mit zunehmender Eindampfung der Siedepunkt höher rückt, läßt sich die Voraussetzung eines unveränderlichen Zustandes des Trockenmittels stets nur angenähert erfüllen.

1. Trockenverfahren, bei denen Beharrungszustand vorliegt.

a) Trockenverfahren mit zeitlichem Beharrungszustande, jedoch örtlichem Wechsel des Zustandes von Gut und Trockenmittel.

Hierher gehören etwa nachstehende Ausführungsformen von Trocken-
vorrichtungen:

waagrecht oder senkrecht verlaufende Kanäle, durch die einerseits das Gut, andererseits das aus Luft oder beliebigem vollkommenem Gas bestehende Trockenmittel wandert. Die Form des Kanals spielt keine Rolle. Er kann aus einem Schacht mit einer im Verhältnis zu den Querschnittsabmessungen großen Länge oder aus einer sich drehenden Trommel bestehen. Schließlich gehören auch Vorrichtungen hierher, bei denen das Gut einen verhältnismäßig hohen Raum in Form einer waagerechten Schleierwand durchströmt (Zerstäubungstrockner);

Trockenvorrichtungen mit beheizten Flächen, bei denen die Feuchtigkeit verdunstet (nicht verdampft), also Luft oder ein beliebiges vollkommenes Gas für die Abführung der entstehenden Dämpfe hinzutritt. Gut und Trockenmittel bewegen sich über die Vorrichtung, die die Form einer sich drehenden Walze, Mulde, Heizplatte oder eines Röhrenbündels besitzen kann.

In jedem Falle kommt es nur darauf an, daß Gut und Trockenmittel systematisch bewegt werden. Für die Wechselwirkung zwischen beiden ist die Richtung ihrer Bewegung zueinander von Bedeutung. Sie kann erfolgen im

- I. Gleichstrom,
- II. Gegenstrom,
- III. Querstrom.

I. Gleichstrom. Beim reinen Gleichstromverfahren trifft Gut im Zustande seines höchsten Feuchtigkeitsgehaltes beim Eintritt mit Trockenmittel von höchster Temperatur und niedrigstem Feuchtigkeitsgehalt zusammen. Am Austritt wirkt das Trockenmittel mit seiner niedrigsten Temperatur und seinem höchsten Feuchtigkeitsgehalt auf Gut im Zustande seines geringsten Feuchtigkeitsgehaltes. Die Trockenkraft ist zu Anfang am stärksten, zu Ende am schwächsten. Die Trocknung erfolgt daher während des feuchten Zustandes des Gutes besonders lebhaft, mit zunehmender Entfeuchtung immer langsamer. Besteht das Trockenmittel aus vorgewärmter Luft und wird zunächst angenommen, daß das Gut die der Kühlgrenze entsprechende Ausgleichtemperatur während des ganzen Trockenvorganges behält — also nach Vorwärmung auf diese Temperatur eintritt und bis zum Schlusse als feucht angesehen werden kann —, so kennzeichnet in Abb. 91 Punkt A'_{gt} den Anfangszustand

der Luft, Punkt \mathcal{M}_{gl} den Ausgleichzustand des Gutes. Der Endzustand der Luft sei durch Punkt E'_{gl} gegeben. Die Temperatur des Gutes $t_{agl} = \tau$ hängt nur von der Lage des Punktes A'_{gl} , d. h. Wärmehalt und Feuchtigkeitsgehalt der vorgewärmten Luft, ab. Wird jedoch das Gut mit zunehmender Entfeuchtung hygroskopisch, so entspricht Punkt J_{gl} dem Beharrungszustande, den Luft und Gut gemeinsam annehmen. Die höchste Temperatur t_{igl} des Gutes wird gleich der am Austritte herrschenden tiefsten Temperatur t_{igl} der Luft. Der niedrigste Feuchtigkeitsgehalt x_{igl} des Gutes ist durch den höchsten Wert des Feuchtigkeitsgrades φ_{igl} der Luft gegeben. Dem Vorteile, daß die

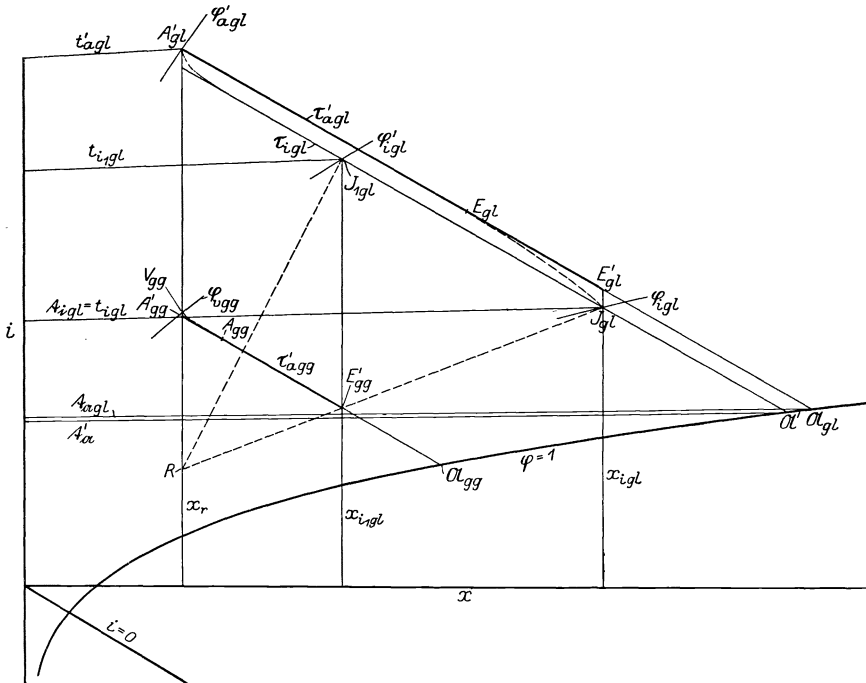


Abb. 91. Vergleich zwischen Gleich- und Gegenstromverfahren bei hygroskopischem Gut.

Temperatur des Gutes verhältnismäßig niedrig bleibt, steht daher bei dem Gleichstromverfahren der Nachteil gegenüber, daß der Endfeuchtigkeitsgehalt des Gutes einen bestimmten Wert nicht unterschreiten kann. Vor- und Nachteil vermindern sich in dem Maße, in dem der Feuchtigkeitsgehalt x_{igl} der austretenden Luft sich dem für die vorgewärmte Trockenluft geltenden Werte x_r nähert, also z. B. Punkt J_{gl} in Punkt J_{1gl} übergeht. Das aber bedeutet einen im Verhältnis $\frac{x_{igl} - x_r}{x_{i1gl} - x_r}$ vergrößerten spezifischen Luftbedarf, außerdem vermehrten spezifischen Wärmehaufwand wegen des zur Waagerechten steileren Verlaufes der Geraden RJ_{1gl} gegenüber RJ_{gl} , deren Neigung hier genügend genau zum Vergleich dienen kann. Auf der anderen

Seite steht allerdings der Vorteil einer erhöhten durchschnittlichen Trockenkraft. Das Gleichstromverfahren ist daher dann am Platze, wenn

1. das Gut im feuchten Zustande eine lebhaftere Trocknung besser erträgt als im getrockneten Zustande,

2. das getrocknete Gut empfindlich ist gegen hohe Temperaturen,

3. das Gut im Endzustande nur wenig hygroskopisch ist, daher eine gute Ausnutzung der Trockenluft zuläßt, oder

4. das Gut im Endzustande in beträchtlichem Grade hygroskopisch ist, die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens jedoch gegenüber der Schonung des Gutes zurücktritt.

II. Gegenstrom. Beim Gegenstromverfahren wirkt umgekehrt das Trockenmittel im Zustande seiner höchsten Temperatur und seines niedrigsten Feuchtigkeitsgehaltes auf das getrocknete Gut und im Zustande der niedrigsten Temperatur und des höchsten Feuchtigkeitsgehaltes auf das eintretende feuchte Gut. Die auf das feuchte Gut wirkende Trockenkraft ist verhältnismäßig gering. Wird auch hier zunächst angenommen, daß die Temperatur des Gutes t_a während des ganzen Trockenvorganges der Kühlgrenze τ entspricht, so besteht gegenüber dem Gleichstrom kein wesentlicher Unterschied, wenn in beiden Fällen der Zustand der vorgewärmten Luft dem gleichen Punkte A'_{gl} der Abb. 91 entspricht. Wird jedoch das Gut mit zunehmender Entfeuchtung hygroskopisch, so rückt auch hier der Endzustand der Luft nach Punkt J_{gl} , der jedoch nunmehr nicht den Beharrungszustand für Gut und Trockenmittel darstellt, sondern die Ausgleichstemperatur des „feuchten“ Gutes t'_a , entsprechend der Lage des Punktes \mathcal{A}' , tiefer verlegt. Denn die dem austretenden Gute entgegenströmende Luft gibt einen Teil ihres Wärmeinhaltes zur Temperatursteigerung des hygroskopischen Gutes an dieses ab. Bis zu der Stelle, wo die Luft mit Gut zusammentrifft, das eben noch feucht ist, ist daher ihr Zustand auf eine niedriger liegende τ -Linie gesunken. Der Beharrungszustand ist durch Punkt A'_{gl} gegeben, d. h. im Grenzfall nimmt das Gut die höchste Temperatur der vorgewärmten Luft an. Gleichzeitig ist der Endfeuchtigkeitsgehalt des Gutes so niedrig, wie dies dem Feuchtigkeitsgrad φ'_{agl} entspricht. Entgegen dem Gleichstromverfahren liegt hier der Vorteil in der Möglichkeit, einen niedrigen Endfeuchtigkeitsgrad des Gutes zu erreichen, dem allerdings der Nachteil gegenübersteht, daß das Gut zum Schluß eine hohe Temperatur annimmt. Wird, um diesem Nachteile zu begegnen, ohne den Vorteil eines niedrigen Endfeuchtigkeitsgehaltes aufzugeben, die Vorwärmtemperatur der Luft entsprechend der Lage des Punktes V_{gg} niedriger gehalten und ein Verlauf des Luftzustandes längs $V_{gg}E'_{gg}$ angenommen, so ergibt sich, ebenso wie bei dem Gleichstromverfahren, der Nachteil eines im Verhältnis $\frac{x_{igl} - x_r}{x_{i1gl} - x_r}$ vergrößerten Luftbedarfes. Der spezifische Wärmebedarf, gekennzeichnet durch die Schräge der Geraden RE'_{gg} bzw. der mit ihr in Abb. 91 zusammenfallenden Geraden RJ_{gl} , braucht hierbei nicht, wie beim Gleichstromverfahren, zuzunehmen. Bei diesem ent-

sprach der Verschiebung des Punktes J_{gl} nach J_{1gl} eine Erhöhung des durchschnittlichen Trockenpotentials. Die Verlegung des Verlaufes $A'_{gl} J_{gl}$ nach $V_{gg} E'_{gg}$ dagegen ergibt eine Verringerung des durchschnittlichen Trockenpotentials und damit Verlängerung der Trockenzeit bei einer gegebenen Vorrichtung bzw. eine Anlage von größerem Ausmaße bei vorgeschriebener Trockenleistung.

Das Gegenstromverfahren ist daher am Platze, wenn

1. das Gut im Zustande seines höchsten Feuchtigkeitsgehaltes eine lebhafte Trocknung nicht erträgt,
2. das Gut in getrocknetem Zustande gegen höhere Temperaturen wenig empfindlich ist, oder
3. das getrocknete Gut stark hygroskopisch und temperaturempfindlich ist, Trockenzeit und spezifischer Luftbedarf jedoch gegenüber der Forderung, bei niedriger Temperatur einen geringen Endfeuchtigkeitsgehalt zu erreichen, keine Rolle spielt.

In Ausnahmefällen spricht für den Gegenstrom der geringere Staubgehalt der Abluft. Maßgebend ist dieser Gesichtspunkt nicht, weil stets geeignete Abscheider hinter den Trockner geschaltet werden können.

Besonders ist darauf hinzuweisen, daß bei Gut, das während des ganzen Trockenvorganges feucht bleibt, die Unterschiede beim Vergleich von Gleichstrom mit Gegenstrom verschwinden. Temperatur des Gutes, spezifischer Luftbedarf und spezifischer Wärmeverbrauch sind in beiden Fällen gleich.

In Abb. 92 ist dargestellt, wie der Linienzug $A'_{gl} E_{gl} J_{gl}$ bzw. $V_{gg} A_{gg} E'_{gg}$ sich verändert, wenn die Trockenluft selbst die Vorwärmung des Gutes von dem Zustande \mathfrak{H} ab besorgt. Beim Gleichstrom entspricht $V_{gl} A_{gl}$, beim Gegenstrom $H_{gg} E_{gg}$ dem Verlauf des Luftzustandes während dieser Vorwärmung. Gegenüber den zuvor angegebenen Gesichtspunkten ändert sich hierdurch grundsätzlich vor allem der Unterschied zwischen den beiden äußersten Temperaturen $t_{v\ gl} - t_{i\ gl}$ bzw. $t_{v\ gg} - t_{h\ gg}$, der größer wird. Das bedeutet, daß beim Gleichstrom höhere Anfangstemperaturen zulässig sind, wenn die Endtemperatur $t_{i\ gl}$ ein bestimmtes Maß erreichen darf. Beim Gegenstrom tritt leicht der Fall ein, bei dem der dem Endzustande der Luft entsprechende Teildruck des Dampfes P_D höher liegt als der Dampfdruck \mathfrak{P} über dem kalten Gut, wenn dessen Anfangszustand z. B. dem Punkte \mathfrak{H} entspricht. Es tritt alsdann Niederschlag aus der Luft auf das Gut ein.

In Wirklichkeit wird der Beharrungszustand nicht erreicht. Das Gut bleibt kälter, als beim Gleichstrom dem Punkte J_{gl} , beim Gegenstrom dem Punkte V_{gg} entspricht, der erreichte Endfeuchtigkeitsgehalt bleibt höher als der dem Feuchtigkeitsgrad $\varphi_{i\ gl}$ bzw. $\varphi_{v\ gg}$ zukommende Wert χ_i . Trotzdem behält der geführte Vergleich Gültigkeit. Denn es ist stets damit zu rechnen, daß einzelne Teile des Trockengutes dem Beharrungszustande genügend nahe kommen, weil sie besonders lebhaft trocknen, z. B. die feinsten Teile bei schaufelförmigem Gut und die Kanten bei flächenartigem Gut.

In Abb. 93 sind die Ergebnisse der Abb. 55 und 56 zusammengetragen, um die Vor- und Nachteile des Gleich- und Gegenstroms zu vergleichen, wenn, wie hier angenommen, in beiden Fällen die Höchsttemperatur t_{\max} , der das Gut im getrockneten Zustand werden kann, und der durch den Zustand der Rohluft gegebene Wert x_r gleichgesetzt werden. Der Vergleich ergibt folgende wichtigen Gesichtspunkte:

Der spezifische Luftbedarf ist beim Gleichstrom gleich dem Werte $\frac{1}{x_{hgl} - x_r}$, beim Gegenstrom gleich dem Werte $\frac{1}{x_{hgg} - x_r}$, d.h. beim Gegenstrom in dem Verhältnis $\frac{x_{hgl} - x_r}{x_{hgg} - x_r}$ größer.

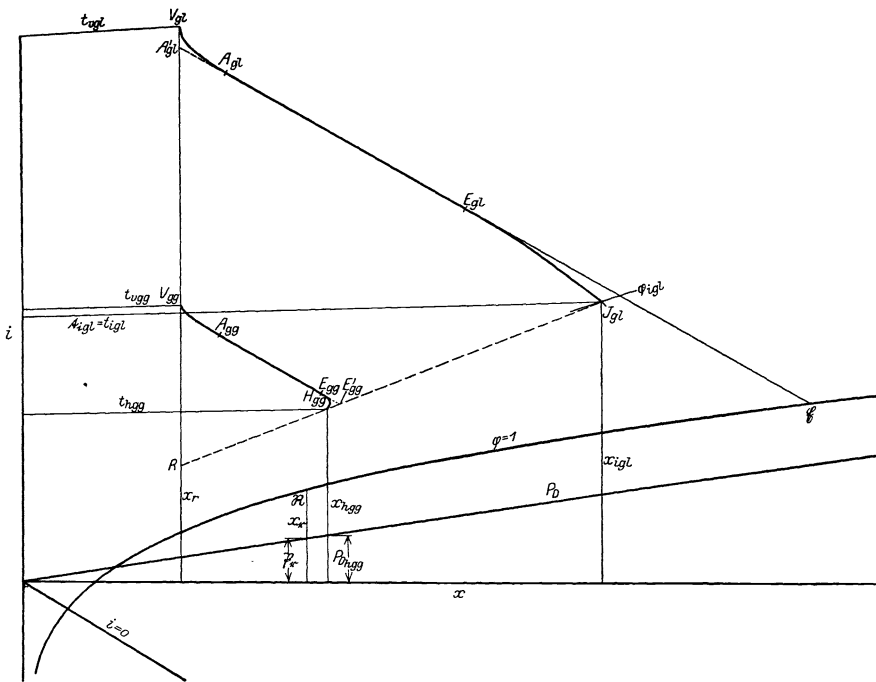


Abb. 92. Vergleich zwischen Gleich- und Gegenstromverfahren bei hygroskopischem Gut unter Berücksichtigung der Vorwärmung.

Der spezifische Wärmeverbrauch wird gekennzeichnet durch die Neigung der Verbindungsgeraden des senkrecht über H auf der i_v -Linie liegenden Punktes H' mit dem der Rohluft entsprechenden Zustandspunkt R gegen die Waagerechte. In Abb. 93 ist der Fall angenommen, daß Punkt R mit den Punkten H'_{gg} und H'_{gl} auf einer Geraden liegt, der spezifische Wärmeverbrauch daher für Gleich- und Gegenstrom derselbe ist. Liegt demgegenüber Punkt R höher, so ist der spezifische Wärmebedarf beim Gegenstrom niedriger als beim Gleichstrom. Umgekehrt liegen die Verhältnisse, wenn er tiefer rückt.

Ein Blick auf Abb. 93 zeigt, daß im Hauptabschnitt des Trockenvorganges die Trockenkraft beim Gleichstrom höher liegt als beim Gegenstrom. Diese Beziehung gilt in noch stärkerem Maße während der Vorwärmung des Gutes. Dagegen ist die Trockenkraft während der Fertig Trocknung im hygroskopischen Zustande des

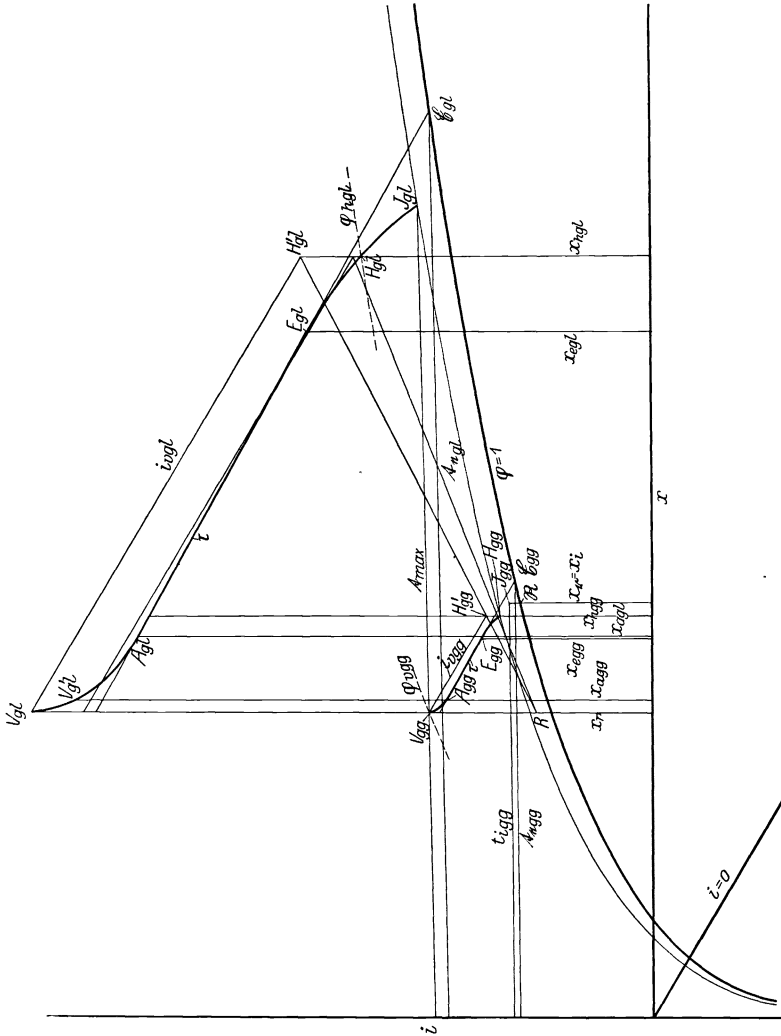


Abb. 93. Vergleich zwischen Gleich- und Gegenstromverfahren bei hygroskopischem Gut unter Berücksichtigung des wirklichen Endzustandes.

Gutes in beiden Fällen der Größenordnung nach gleich. Das bedeutet, daß beim Gleichstrom die Trockenwirkung mit besonderer Lebhaftigkeit einsetzt und die Trockenzeit wesentlich kürzer ist als beim Gegenstrom.

III. Querstrom. Beim Querstromverfahren strömt das Trockenmittel nach Abb. 94 senkrecht zur Bewegung des Gutes. Es trifft da-

her im Zustande seiner höchsten Temperatur und seines niedrigsten Feuchtigkeitsgehaltes (t_v, x_r) sowohl mit feuchtem als auch getrocknetem als auch solchem Gut zusammen, das einen beliebigen Zwischenzustand besitzt. Wird der Weg des Gutes in einzelne Abschnitte, z. B. nach Abb. 94 in drei, unterteilt und in grober Annäherung vorausgesetzt, daß innerhalb dieser Abschnitte die einzelnen Schichten des Gutes, wie sie in der Bewegungsrichtung des Trockenmittels aufeinander folgen, von gleicher Beschaffenheit seien, so folgt:

In dem vom Gut zuerst durchlaufenen Teile ist nach einer gewissen Zeit die dem Trockenmitteleintritt nächstliegende Schicht vorgewärmt und auf der durch die Kühlgrenze gegebenen Ausgleichtemperatur, die folgende Schicht in der Vorwärmung begriffen, die dem Trockenmittelaustritt nächstliegende Schicht steht zu Anfang der Vorwärmung. Im folgenden Teile hat die erste Schicht die Kühlgrenztemperatur verlassen und mit zunehmender hygroskopischer Eigenschaft eine höhere Temperatur angenommen.

Die mittlere Schicht besitzt die Kühlgrenztemperatur, die letzte hat die Vorwärmung abgeschlossen. Im dritten Teile schließlich ist die erste Schicht vollkommen getrocknet und besitzt die Tempera-

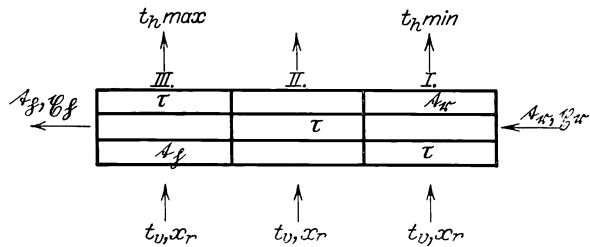


Abb. 94. Querstromtrockner.

tur $t_{\bar{g}}$. Die Temperatur der mittleren Schicht liegt zwischen $t_{\bar{g}}$ und der Kühlgrenze, die der letzten Schicht bei der Kühlgrenze. Das Trockenmittel verläßt den ersten Abschnitt mit erheblicher Erniedrigung seiner Anfangstemperatur, den letzten Abschnitt mit einer Temperatur, die von dem Anfangswerte sich weniger unterscheidet, und den mittleren Abschnitt in einem Zustande, der zwischen den Verhältnissen in den Endabschnitten liegt, das heißt, daß die Trockenluft in den einzelnen Abschnitten verschieden ausgenutzt wird. Das auf das feuchte Gut wirkende Trockenpotential ist, wie beim Gleichstromverfahren, besonders hoch. Es behält jedoch, wie beim Gegenstromverfahren, auch für das getrocknete Gut noch erhebliche Stärke. Im Grenzfall nimmt das Gut die höchste Temperatur der vorgewärmten Luft an. Sein Endfeuchtigkeitsgehalt ist durch den Feuchtigkeitsgrad φ_v der vorgewärmten Luft bedingt, liegt also so niedrig wie beim Gegenstrom. Entspricht, mit Rücksicht auf Vermeidung einer übermäßigen Erwärmung, der Anfangszustand der vorgewärmten Luft dem Punkte V_{gg} in Abb. 93, so können sich z. B. im ersten Abschnitte für den Endzustand der Luft Verhältnisse ergeben, wie sie dem Punkte H_{gg} zukommen. Im mittleren und letzten Abschnitte dagegen rückt der Endzustand dem Punkte V_{gg} näher, d. h. spezifischer Luftbedarf und spezifischer Wärmeaufwand nehmen zu. Beide sind daher im Durchschnitt ungünstiger als beim Gegenstromverfahren.

Das Querstromverfahren ist daher am Platze, wenn

1. das Gut in feuchtem und getrocknetem Zustande eine lebhaftere Trocknung erträgt,
2. das Gut in feuchtem und getrocknetem Zustande unempfindlich ist gegen hohe Temperaturen,
3. der spezifische Luftbedarf und Wärmeverbrauch gegenüber der Forderung, mit kurzer Trockenzeit einen niedrigen Endfeuchtigkeitsgehalt zu erreichen, zurücktritt.

Diese Grundsätze ändern sich nicht, wenn, entgegen der bisherigen Annahme, das fortschreitende Gut gleichzeitig eine Umwälzbewegung erfährt, durch die in den einzelnen Querschnitten senkrecht zur Gutsbewegung gleichartige Durchschnittsverhältnisse für das Gut hergestellt werden.

Die Bewegung des Trockenmittels quer zum Gut kommt in der in Abb. 94 dargestellten einfachen Form selten zur Anwendung; in der

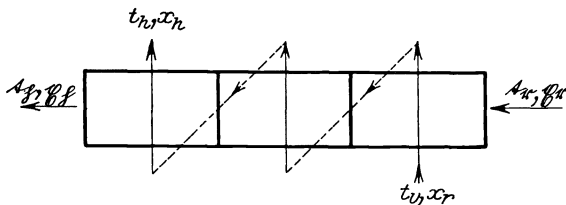


Abb. 95. Gleichstromtrockner mit Hilfsströmung des Trockenmittels quer zur Gutsbewegung.

Regel werden nach Abbildung 95 die einzelnen Teilströme des Trockenmittels hintereinander geschaltet. Damit aber geht das Wesen des Querstromes in das des Gleich- bzw. Gegenstromes über, je nachdem die Eintrittsstelle des

vorgewärmten Trockenmittels am gleichen bzw. entgegengesetzten Ende liegt wie die Eintrittsstelle des Gutes.

b) **Trockenverfahren mit zeitlichem Beharrungszustand und örtlich unverändertem Zustand des Trockenmittels.** Hierher gehören vor allem geschlossene Trockenvorrichtungen mit dampfbeheizten Flächen, bei denen die Zuführung von Luft oder anderen Gasen für Aufnahme der entstehenden Dämpfe entfällt. Das in der Regel flüssige Gut durchläuft die Vorrichtung, die hierbei die Form einer sich drehenden Walze, Mulde, Heizplatte besitzen kann. Abgesehen von der Austrittsöffnung für den entweichenden Dampf und den Anschlüssen für Zu- und Abgang des Gutes besteht keine Verbindung mit der Umgebung. Die Bewegungsrichtung des Gutes im Verhältnis zu der beheizten Fläche ist ohne grundsätzliche Bedeutung, da die letzte nahezu gleiche Oberflächenbeschaffenheit besitzt. Solange das Gut „feucht“ ist, entspricht seine Temperatur dem durch die Umgebung bedingten Siedepunkt. Mit zunehmender Austrocknung nähert sie sich der Temperatur der beheizten Fläche und nimmt sie schließlich im Zustande vollkommener Trockenheit an. Die Temperatur des Heizmittels spielt daher eine um so wesentlichere Rolle, je weiter die Entfeuchtung in das hygroscopische Gebiet hinein fortgesetzt wird.

2. Trockenverfahren, bei denen das Trockenbild ständig wechselt.

a) **Trockenverfahren mit ständig wechselndem Trockenbild und veränderlichem Zustand des Trockenmittels.** Hierunter fallen folgende Ausführungsformen von Trockenvorrichtungen:

Trockenräume in Schrank- oder Kammerform, die in unterbrochener Arbeitsweise mit Gut beschickt werden. Das aus Luft oder beliebigem vollkommenem Gas bestehende Trockenmittel durchströmt den Raum in irgendeiner Richtung. Auch feste Darren gehören hierher, auf denen das Gut sich in Ruhe befindet bzw. von Zeit zu Zeit oder dauernd durchmischt wird;

Trockner mit beheizten Flächen, bei denen die Feuchtigkeit verdunstet. Das Gut befindet sich hierbei meistens in Mischbewegung auf der Vorrichtung, die die Form einer Mulde oder Heizplatte besitzen kann.

Auch hier spielt die Bewegungsrichtung des Trockenmittels gegenüber dem Gute keine besondere Rolle. Die Verhältnisse liegen ähnlich den für die Querstrombewegung beschriebenen, nur sind die Verschiedenheiten hier zeitliche und örtliche zugleich. An der Stelle, wo das Trockenmittel mit höchster Temperatur und niedrigstem Feuchtigkeitsgehalt eintritt, vollzieht sich die Trocknung am lebhaftesten. Das zunächst getroffene Gut eilt den weiter entfernten Teilen in bezug auf Erreichung und, bei genügend weit fortgesetzter Entfeuchtung, Überschreitung der Kühlgrenze voraus. Im Grenzfall nimmt das Gut, die erst getroffenen Schichten zuerst, die entfernteren später, die Temperatur der vorgewärmten Luft an.

Wird der Unvollkommenheit dieses Verfahrens dadurch begegnet, daß durch Mischbewegung ein gleichmäßiger Durchschnittszustand des Gutes hergestellt wird, so verändert sich gleichwohl der Endzustand des Trockenmittels mit fortschreitender Entfeuchtung. Die Ausnutzung seines Trockenvermögens ist anfangs besser, gegen Ende schlechter.

Eine weitere Verbesserungsmöglichkeit besteht darin, daß der Zustand des vorgewärmten Trockenmittels veränderlich gehalten und eine allmählich abnehmende Vorwärmtemperatur t_v des Trockenmittels angewendet wird. Die Senkung von t_v ist hierbei von dem Augenblicke an gegeben, wo das Gut aufhört, feucht zu sein, weil alsdann die Überhitzungsgefahr beginnt. Der Senkung von t_v entspricht eine Verminderung der Trockenkraft. In Ausnahmefällen kann die Regelung umgekehrt mit späterer Erhöhung von t_v erfolgen, wenn das Gut im Zustande höchster Feuchtigkeit eine lebhaftere Trocknung nicht erträgt, weil hierbei die Oberfläche verkrustet und dadurch das Entweichen der Feuchtigkeit aus den tieferen Schichten erschwert wird.

b) **Trockenverfahren mit ständig wechselndem Trockenbild und unveränderlichem Zustand des Trockenmittels.** Hierbei handelt es sich um Vorrichtungen, die sich von den unter 1. b) erörterten nur dadurch unterscheiden, daß das Gut nicht ununterbrochen ein- und ausläuft, sondern abwechselnd eingebracht und nach der Trocknung entnommen

wird. Außer den unter 1. b) erwähnten Formen gehören hierher Trockenschränke, die unter dem Druck der Umgebung stehen oder unter Luftleere gehalten werden.

C. Trockenverfahren mit Nachheizung.

Bei den beschriebenen einfachsten Trockenverfahren war angenommen, daß die Wärmezufuhr zum trocknenden Gut entweder mittelbar aus dem vor Eintritt in die Trockenvorrichtung erwärmten Trockenmittel oder unmittelbar durch beheizte Flächen während des ganzen Trockenvorganges erfolgte. Abweichungen sind möglich insofern, als die Erwärmung des als Trockenmittel dienenden Gases während des eigentlichen Trockenvorganges geschehen kann. Dieser zerfällt hierbei entweder

a) in einzelne Stufen, wobei vor jeder Stufe eine Erwärmung des Trockenmittels erfolgt — Stufenheizung —; oder er wird

b) so gestaltet, daß während des ganzen Verlaufes das Trockenmittel gleichzeitig mit der Feuchtigkeitsaufnahme eine dauernde Nachheizung erfährt — Innenheizung —.

1. Stufenheizung.

Die stufenweise Erwärmung des Trockenmittels kann in Verbindung mit Gleich-, Gegen- oder Querstrombewegung des Trockenmittels erfolgen. Es wird hierdurch möglich, das Trockenmittel mit stark veränderlichem Wärmeinhalte auf das Gut wirken zu lassen.

Soll z. B. beim Gleichstrom der wegen der anfänglich besonders lebhaften Trockenwirkung bestehenden Gefahr einer Verkrustung der Guts Oberfläche begegnet werden, so kommt hierfür verringerte Vorwärmung der Luft mit anschließender Nachheizung in Frage, also in Abb. 93 etwa eine Veränderung des Luftzustandes nach dem Linienzug $R V_{gg} A_{gg} V'_{gl} A_{gl} E_{gl} H_{gl}$. Die Trockendauer während des Hauptabschnittes bleibt nach wie vor kurz.

Der spezifische Luftbedarf kann beim Gegenstrom auf das niedrige, dem Gleichstromverfahren zukommende Maß verringert werden, wenn außer der Vorwärmung der Luft eine Nachheizung erfolgt, sobald die Trockenluft im Haupttrockenabschnitt mit Gut von der Kühlgrenztemperatur zusammentrifft. Die Grenze bildet in Abb. 93 Verlauf des Luftzustandes etwa längs des gleichen Linienzuges $R V_{gg} A_{gg} V'_{gl} A_{gl} E_{gl} H_{gl}$, wenn angenähert angenommen wird, daß das Kurvenstück $E_{gl} H_{gl}$ der Vorwärmung beim Gegenstrom entspricht. In diesem Falle sind spezifischer Luft- und Wärmeverbrauch für Gleich- und Gegenstrom nahezu dieselben, auch die Trockenkraft und damit die Trockendauer nicht wesentlich verschieden.

Die Ansichten über die bei der Stufentrocknung anzuwendende Folge von Temperaturen des Trockenmittels sind nicht einheitlich. Häufig wird die Höchsttemperatur vor jeder Stufe gleich gehalten, d. h. jedesmal eine Erwärmung der Luft auf die Temperatur vorgenommen, die sie vor Eintritt in die vorausgehende Stufe besaß. Die Ansicht, daß hierbei das Gut ständig etwa gleiche Temperatur behält, ist selbstver-

ständig irrig. Denn trotz gleicher Höchsttemperatur und selbst dann noch, wenn die stufenweise Nachwärmung auf eine ständig abnehmende Höchsttemperatur erfolgt, nimmt der Wärmehalt der Luft von Stufe zu Stufe zu. Damit rückt auch die Kühlgrenze höher und die ihr im Ausgleichszustande gleichkommende Temperatur des feuchten Gutes. Arbeitet ein so geregelter Stufentrockner im Gleichstrom, so nimmt die Gutstemperatur mit fortschreitender Entfeuchtung zu.

In anderen Fällen wird die Höchsttemperatur von Stufe zu Stufe gesteigert. Wird dieses Verfahren beim Gegenstrom durchgeführt, so wirken die höheren Temperaturen auf das nasse, die niedrigeren auf das

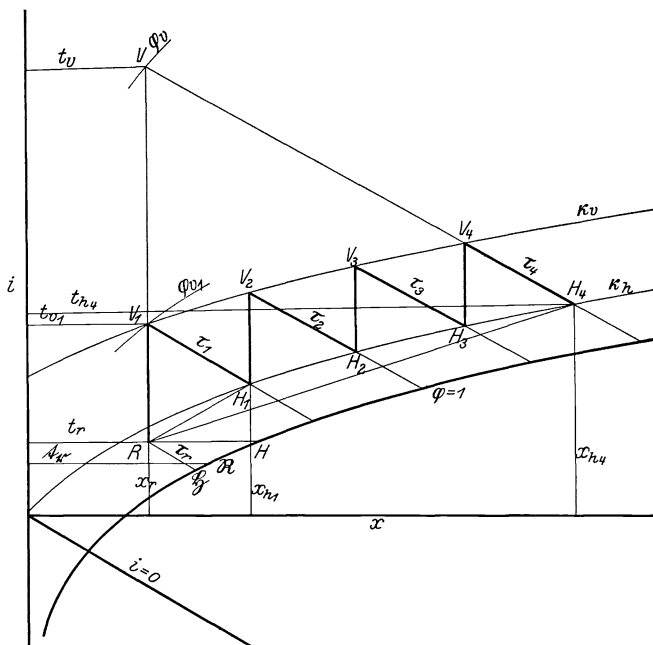


Abb. 96. Stufenheizung zwischen zwei Linien gleicher Trockenkraft.

getrocknete Gut. Der Gegenstromstufentrockner bietet dann besondere Vorteile für die Behandlung solchen Gutes, das im getrockneten Zustande gegen hohe Temperaturen empfindlich ist und dessen Entfeuchtung weitergetrieben werden soll, als sie im Gleichstromtrockner noch wirtschaftlich erreichbar ist.

Es liegt nahe, eine Abstufung in der Weise vorzunehmen, daß nach Abb. 96 der Zustand des Trockenmittels sich längs einer Zickzacklinie verändert, die zwischen zwei Linien gleicher Trockenkraft κ_v und κ_n verläuft. Auch hierbei nimmt die Kühlgrenztemperatur ständig zu, so daß das Verfahren zweckmäßig im Gegenstrom geleitet wird, weil alsdann die durch den anfänglichen Feuchtigkeitsgrad der Luft bedingte größtmögliche Entfeuchtung hygroskopischen Gutes erreichbar wird und gleichzeitig die Grenztemperatur des Gutes im getrockneten Zustand

der mäßigen Temperatur des Trockenmittels nach der erstmaligen Anheizung entspricht. In Abb. 96 bezeichne \mathfrak{R} den Anfangszustand des nassen Gutes. Verändert sich der Zustand der Trockenluft in der zuerst betretenen Stufe längs der Linie $V_4 H_4$, so hängt es von der Eigenart des Gutes und dessen anfänglichem Feuchtigkeitsgehalt ab, wie weit sich seine Anfangstemperatur t_r in der zuerst betretenen Stufe der durch $V_4 H_4$ gegebenen Kühlgrenze τ_4 nähert. Wäre die Annäherung eine vollständige und würde ebenso in der zweiten Stufe das Gut die durch den Verlauf $V_3 H_3$ gegebene Kühlgrenze τ_3 erreichen, so würde die durchschnittliche Gutstemperatur in der ersten Stufe unter τ_4 , in der zweiten Stufe zwischen τ_4 und τ_3 liegen. Das bedeutet, daß gegenüber der Annahme einer gleichbleibenden Temperatur τ_4 , τ_3 usw. in der ersten, zweiten und folgenden Stufe die Trockenkraft der ersten Stufe herabgemindert, die der zweiten und folgenden Stufen erhöht würde. Deshalb ist es unrichtig, allein mit Rücksicht auf die höhere Lufttemperatur der vom nassen Gut betretenen ersten Zone anzunehmen, daß hier die Trockenwirkung besonders lebhaft einsetze. Im Gegenteil wird zunächst Feuchtigkeit aus der Luft auf das Gut solange niederschlagen, bis seine Temperatur den Taupunkt der Luft überschritten hat.

Bei Stufentrocknung im Gleichstrom und Veränderung der Lufttemperatur nach Abb. 96 strebt die anfängliche Temperatur t_r des Gutes in der ersten Stufe dem Werte τ_1 zu, wie er durch den Verlauf $V_1 H_1$ gegeben ist. Die Gutstemperatur in der ersten Stufe liegt daher zwischen t_r und τ_1 , also niedriger, als der jeweiligen Kühlgrenze entspricht, ebenso in den folgenden Stufen. Das bedeutet für alle Stufen geringere Trockenkraft als bei Annahme des Ausgleichzustandes. Beim Gleichstrom wird die durch allmähliche Anwärmung des Gutes bedingte Verminderung der Trockenkraft etwa gleichmäßig auf alle Stufen verteilt. Beim Gegenstrom dagegen steht einer starken Verzögerung der Trockenwirkung in der ersten und gegebenenfalls folgenden Stufe eine Beschleunigung in den letzten Stufen gegenüber. Der Verlust bei „feucht“ bleibendem Gut und im übrigen gleichen Verhältnissen ist für Gegenstrom niedriger als für Gleichstrom, weil im ersten Falle das getrocknete Gut mit niedrigerer Temperatur austritt als im letzten.

Die Hauptmerkmale der Stufentrocknung, verglichen mit der einfachen Vorwärmung, ergeben sich nach Abb. 96 wie folgt:

Der Endfeuchtigkeitsgehalt der Luft im Punkte H_4 würde bei einfacher Vorwärmung die hohe Temperatur t_v bedingen, die dem Schnittpunkt der x -Linie mit der τ -Linie $V_4 H_4$ entspricht, wenn in beiden Fällen dieselbe Menge Luft bis auf das gleiche Resttrockenpotential ausgenutzt wird. Die Temperatur t_v führt auf die gleiche Kühlgrenze τ_4 , wie sie dem letzten Abschnitt der Stufentrocknung zukommt, ergibt daher im Ausgleichszustande für beide Fälle gleiche Temperatur des Gutes, wenn es dauernd als feucht angesehen werden kann. Der Unterschied beider Verfahren macht sich erst dann bemerkbar, wenn die hygroskopischen Eigenschaften des Gutes zur Geltung kommen und die Trocknung im Gegenstrom erfolgt. Im Beharrungszustande nimmt alsdann das Gut bei der einfachen Vorwärmung die hohe Temperatur t_v ,

bei der Mehrstufentrocknung nur die tiefere Temperatur t_{v_1} an. Sein im Grenzfalle erreichbarer Mindestfeuchtigkeitsgehalt $\xi_i = \varphi \cdot \xi_e$ liegt bei der einfachen Vorwärmung niedriger, weil $\varphi_v < \varphi_{v_1}$ ist. Entspricht die Temperatur t_{v_1} dem von dem Gut noch ertragbaren Höchstwert, so ist mit der Mehrstufentrocknung die einfache Vorwärmung auf die gleiche Temperatur t_{v_1} zu vergleichen, die dem Linienzug $V_1 H_1$ folgt. Der Grenzwert ξ_i wird alsdann in beiden Fällen gleich.

Abgesehen von dem Einfluß der in den einzelnen Stufen wechselnden Temperatur des Gutes, verändert sich bei der Stufentrocknung nach Abb. 96 das Trockenpotential in jeder Stufe in engen Grenzen, die Trockenwirkung ist daher gleichmäßig. Im Gegensatz hierzu bedeutet der Verlauf der Trocknung mit einfacher Vorwärmung längs VH_4 eine ständige Abnahme des Trockenpotentials, eine besonders lebhaftere Trockenwirkung für das von der vorgewärmten Luft zunächst getroffene Gut und eine besondere Verlangsamung des Trockenvorganges dort, wo die Luft das Gut verläßt. Die Unregelmäßigkeit gilt sowohl für Gleichstrom, wo sich die lebhaftere Trocknung auf das feuchte Gut bezieht, als auch für Gegenstrom, wo sie auf das getrocknete Gut wirkt. Für solche Stoffe, die in keinem Abschnitt des Trockenvorganges eine besonders rasche Austrocknung vertragen, ist daher die Stufentrocknung im Gebiet niedrigen Trockenpotentials am Platze, wobei selbstverständlich eine Verlängerung der Trockenzeit in Kauf genommen werden muß. Der Unterschied der Trockendauer und der damit Hand in Hand gehenden Größe der Trockenvorrichtung bei gegebener Trockenleistung wird ausgeglichen, wenn mit der Stufentrocknung die einfache Trocknung unter Vorwärmung auf t_{v_1} verglichen wird.

Die auf 1 kg Reinluft bezogene spezifische Trockenleistung entspricht beim Mehrstufenverfahren dem Unterschied $x_{h_4} - x_r$. Sie ist bei einfacher Vorwärmung auf die Temperatur t_v gleich groß, dagegen im Verhältnis $\frac{x_{h_1} - x_r}{x_{h_4} - x_r}$ kleiner, wenn die Vorwärmung auf die bei der Stufentrocknung auftretende Höchsttemperatur t_{v_1} der ersten Stufe erfolgt. Der spezifische Luftbedarf ist daher im allgemeinen bei der Stufentrocknung niedriger.

Der spezifische Wärmeverbrauch wird bei dem Mehrstufentrockner genügend genau gekennzeichnet durch die Neigung der Verbindungslinie RH_4 zur Waagerechten. Er ist daher für die Mehrstufentrocknung gleich hoch wie für die einfache Vorwärmung auf die Temperatur t_v , dagegen bei der dargestellten Lage von Punkt R niedriger als bei einmaliger Vorwärmung auf t_{v_1} als höchste Temperatur. Der Unterschied ist allerdings nicht sehr erheblich, und es genügt eine weitergehende Ausnutzung des Trockenvermögens bei der einfachen Vorwärmung, um ihn auszugleichen. Er wird größer, wenn Punkt R tiefer rückt, und kann in das Gegenteil umschlagen, wenn Punkt R so hoch liegt, daß die Verbindungslinie RH_4 die τ -Linie $V_1 H_1$ oberhalb der \varkappa_r -Linie schneidet.

Verläuft die Trocknung im Gleich- oder Gegenstrom und erfolgt die Erwärmung der Trockenluft zwischen den einzelnen Teilabschnitten des

Trockenvorganges derart, daß jede Stufe der gleichen Weglänge des Gutes bzw., wegen der gleichbleibenden Gutsgeschwindigkeit, dem gleichen Zeitabschnitte entspricht, so ist bei der Untersuchung im i - x - i - y - bzw. Zeitbild zweckmäßig wie folgt zu verfahren:

Bei Gleichstrom von Punkt V , bei Gegenstrom von Punkt H ausgehend, wird im Zeitbilde der Abb. 62 bzw. 64 ein Teilabschnitt abgetrennt, wie er der vom Gut zuerst durchlaufenen Stufe zukommen soll. Er stimmt genau mit dem für den Trockenvorgang mit einmaliger Vorwärmung gefundenen überein. Bezeichnet im i - x -Bilde der Punkt H_1 den Zustand der Luft am Ende der ersten Stufe, so entspricht der Zustand der Luft am Anfang der zweiten Stufe einem Punkte V_2 , der um ein Maß senkrecht über dem Punkte H_1 liegt, das durch die zwischen beiden Stufen erfolgende Erhöhung des Wärmeinhaltes der Luft gegeben ist. Mit diesem neuen Punkte ist alsdann die Untersuchung fortzusetzen. Da sie beim Gleichstrom in Punkt H , beim Gegenstrom in Punkt V endigen soll, muß sie beim Gleichstrom mit einem bei einer tieferen Temperatur liegenden Punkt V , beim Gegenstrom mit einem einer höheren Temperatur entsprechenden Punkt H beginnen. Im Grenzfall wäre für unendliche Stufenzahl beim Gleichstrom t_v , beim Gegenstrom t_h gleich dem Grenzwerte $t_i = t_{\max}$ zu wählen. Damit würden beide Verfahren ineinander übergehen. Die stufenweise Nachwärmung mildert also den Unterschied zwischen Gleich- und Gegenstromtrocknung.

2. Innenheizung.

Auf eine Stufentrocknung mit unbegrenzter Stufenzahl läuft das Verfahren hinaus, wenn die Anwärmung des Trockenmittels durch Heizvorrichtungen erfolgt, die im Trockenraum selbst untergebracht und so verteilt sind, daß die Wärmeabgabe durchaus gleichmäßig bleibt. Die Zickzacklinie der Abb. 96 geht alsdann in eine stetige Kurve über, deren Verlauf verschieden sein kann. Er kann z. B. der unteren Trockenkraftlinie \varkappa_h entsprechen, wenn die Heizvorrichtung so bemessen und verteilt ist, daß die Temperatur der Luft im Fortschreiten allmählich zunimmt. Eine derartige Trocknung kann in besonderem Maße als Mildtrocknung bezeichnet werden, weil das Trockenpotential ständig auf niedriger und durchaus gleichbleibender Höhe liegt. Die Trockenzeit ist allerdings besonders groß; der spezifische Luftverbrauch dagegen ergibt sich gleich niedrig wie bei der Mehrstufentrocknung. Die zuzuführende Wärmemenge ist in beiden Fällen durch den Unterschied des den Punkten H_4 bzw. R zukommenden spezifischen Wärmeinhaltes $i_{h_4} - i_r$ gegeben, wenn von dem Einfluß der Vorwärmung und der hygroskopischen Eigenschaften abgesehen wird. Die Innenheizung mit Veränderung des Luftzustandes längs einer Trockenkraftlinie bietet auch das Mittel, um bei Trockenkammern und ähnlichen Vorrichtungen mit ruhendem oder doch nur umgewälztem Gut ein gleichmäßiges Trocknen des ganzen Inhaltes zu erzielen. Unterschiede ergeben sich allerdings von dem Augenblicke an, mit dem das

Gut hygroskopisch wird, weil die Trockenkraftlinie von der φ -Linie abweicht und damit für verschiedene Punkte auf der Trockenkraftlinie der mögliche Endfeuchtigkeitsgehalt τ des Gutes verschieden ist.

Die Innenheizung ermöglicht im Grenzfalle auch, mit gleichbleibender Temperatur t_r zu trocknen, wie sie der Frischluft zukommt, wobei das Trockenpotential von dem der Frischluft in Punkt R zugeordneten Wert allmählich abnimmt, im Grenzfalle, nach Erreichung vollständiger Sättigung in Punkt H , zu 0 wird. Die Gefährdung des Gutes durch Überhitzung, die bei Innenheizung längs κ_h schon erheblich herabgedrückt und bei Gleichstrom durch die Temperatur t_h , begrenzt ist, wird hierbei noch geringer bzw. verschwindet vollständig. Die Trockenzeit ist wesentlich verlängert, der spezifische Wärmeverbrauch sinkt auf etwa 595 kcal/kg. Verglichen mit der natürlichen Lufttrocknung, die längs der τ_r -Linie verläuft, ergibt die Innenheizung längs t_r eine Verminderung des spezifischen Luftverbrauches.

Die Innenheizung ist neben der außerhalb des Trockenraumes erfolgenden einfachen oder stufenweisen Vorwärmung anwendbar. Ein Vorteil kann sich hieraus ergeben, wenn die durch die Innenheizung zugeführte Wärmemenge sich auf die Deckung des Streuverlustes beschränkt, der durch Wärmeabgabe der Trockenvorrichtung an die im allgemeinen kältere Umgebung auftritt. Das richtige Maß für die Innenheizung läßt sich dann bei der wirklichen Ausführung dadurch bestimmen, daß die mit der Anzeige des feuchten Thermometers übereinstimmende Kühlgrenze im Haupttrockenabschnitt für die zuströmende und abgehende Luft gleich ist, wenn die Nachheizung die Streuverluste gerade deckt.

Würde in dem durch die Abb. 76 dargestellten Falle Innenheizung in einem Maße angewandt, das genau dem jeweiligen Teilbetrage des auftretenden Streuverlustes entspräche, so würde die Kurve VH in die Lage VH_0 zurückgehoben. Hieraus ergibt sich die Art und Weise, wie der Einfluß der Innenheizung im i - x -Bilde zu berücksichtigen ist. Wird sie so geregelt, daß die Wärmeleistung der zeitlichen Trockenleistung verhältnismäßig bleibt, so wird hierdurch die zunächst ohne Berücksichtigung der Innenheizung gefundene Zustandskurve VH in einem Punkte, dem der Abszissenwert x entspricht, um das Maß $\frac{Q_i}{G_L} \cdot \frac{x - x_r}{x_h - x_r}$ höher gerückt, wenn Q_i die gesamte stündliche innere Wärmezufuhr bedeutet.

Auf Innenheizung läuft Trocknen unter Anwendung von beheizten Flächen hinaus, wenn die Feuchtigkeit verdunstet (nicht verdampft) und die Erwärmung der die freie Oberfläche berührenden Luft mittelbar durch das Gut hindurch von der beheizten Fläche her erfolgt. Da diese Voraussetzung nur dann erfüllt ist, wenn die Temperatur des Gutes an der freien Oberfläche höher liegt als die dem Zustande der Luft zukommende Kühlgrenze, verändert sich alsdann die Luft nicht nach der ihrer Kühlgrenze entsprechenden τ -Linie, sondern längs einer Linie, die im i - x -Bilde flacher liegt als diese. Tritt zu der mittelbaren Erwärmung noch eine Vorheizung der Luft, so wirkt sie in der Regel günstig,

weil sie auf eine Entlastung der in ihrem Ausmaße begrenzten Heizfläche hinausläuft und die der Luftveränderung entsprechende Linie von der Sättigungslinie abrückt, das Trockenvermögen daher vergrößert. Eine Erhöhung der Gutstemperatur muß hierbei in Kauf genommen werden. Der spezifische Luft- und Wärmeverbrauch ist bei verlustlosem Arbeiten unabhängig davon, wie die gesamte Wärmeleistung sich auf Erwärmung der Heizfläche und Vorwärmung der Luft verteilt. Beide hängen nur ab von der Lage der dem Anfangs- und Endzustande entsprechenden Punkte R und H . Wird für den Endzustand der Luft eine bestimmte Trockenpotentiallinie \varkappa_h festgehalten, so bewirkt die Vorwärmung der Luft ein Höherrücken des Endpunktes H auf der \varkappa_h -Linie und führt damit zu einer Verminderung des spezifischen Luftverbrauches.

D. Trocknen mit Mischluft.

Bisher war stets angenommen, daß die als Trockenmittel dienende Luft die Trockenvorrichtung einmal durchwandert. Es ist jedoch möglich, einen Teil der Abluft nach der Eintrittsstelle zurückzuführen und dort mit der Frischluft vor oder nach deren Erwärmung zu mischen.

Werden G_{Lr} kg/h Reinluft mit einem dem Frischluftzustande entsprechenden spezifischen Wärmeinhalt i_r und Feuchtigkeitsgehalt x_r und G_{Lh} kg/h Reinluft mit einem dem Abluftzustande entsprechenden spezifischen Wärmeinhalt i_h und Feuchtigkeitsgehalt x_h vereinigt, so entsteht eine Mischung von $G_{Lr} + G_{Lh}$ kg/h Reinluft mit einem Wärmeinhalt von $G_{Lr} \cdot i_r + G_{Lh} \cdot i_h$ kcal/h. Der spezifische Wärmeinhalt der Mischung ergibt sich zu

$$i_m = \frac{G_{Lr} \cdot i_r + G_{Lh} \cdot i_h}{G_{Lr} + G_{Lh}}. \quad (125)$$

Der Feuchtigkeitsgehalt der Mischung beträgt

$$x_m = \frac{G_{Lr} \cdot x_r + G_{Lh} \cdot x_h}{G_{Lr} + G_{Lh}}, \quad (126)$$

wobei zunächst die Frage offen gelassen sei, ob dieser Feuchtigkeitsgehalt der Mischung ganz in Form von Wasserdampf erhalten bleibt oder teilweise in flüssiger Form ausscheidet.

Die Formeln (125) und (126) lassen sich auch schreiben

$$i_m - i_r = \frac{G_{Lh}}{G_{Lr}} (i_h - i_m), \quad (125 a)$$

$$x_m - x_r = \frac{G_{Lh}}{G_{Lr}} (x_h - x_m). \quad (126 a)$$

Hieraus folgt

$$\frac{i_m - i_r}{x_m - x_r} = \frac{i_h - i_m}{x_h - x_m}. \quad (127)$$

Diese Beziehung ist erfüllt, wenn im i - x -Bilde nach Abb. 97 der dem Mischluftzustande entsprechende Punkt M auf der Verbindungsgeraden der Punkte R und H liegt, durch die der Zustand von Frisch- bzw. Abluft dargestellt wird.

Hiermit ist nachträglich die bisher getroffene Annahme begründet, daß der Zustand der Trockenluft sich im i - x -Bilde in jedem Augenblick in Richtung der Geraden verändert, die den Zustandspunkt der Luft (i, x, t, P_D) mit dem für den gleichen Augenblick geltenden Zustandspunkt des Gutes ($i_g, x_g, t, \mathfrak{P}$) verbindet. Denn auch hierbei handelt es sich um die Mischung von Luft verschiedener Beschaffenheit, deren einer Teil dem Zustande der Trockenluft entspricht, während der andere Teil durch die Eigenschaften i_g und x_g gekennzeichnet ist, wie sie die Luft in der das Gut unmittelbar begrenzenden Schicht annimmt.

Mit Festlegung des Punktes M ergibt sich auch die Mischtemperatur t_m und der Dampfdruck der Mischluft P_{Dm} . Liegt Punkt M oberhalb der Sättigungslinie, so bedeutet dies, daß die Feuchtigkeit in Dampfform erhalten bleibt. Fällt M unterhalb der Sättigungslinie, so ist die Mischluft übersättigt und scheidet den Überschuß von Feuchtigkeit in flüssiger Form aus.

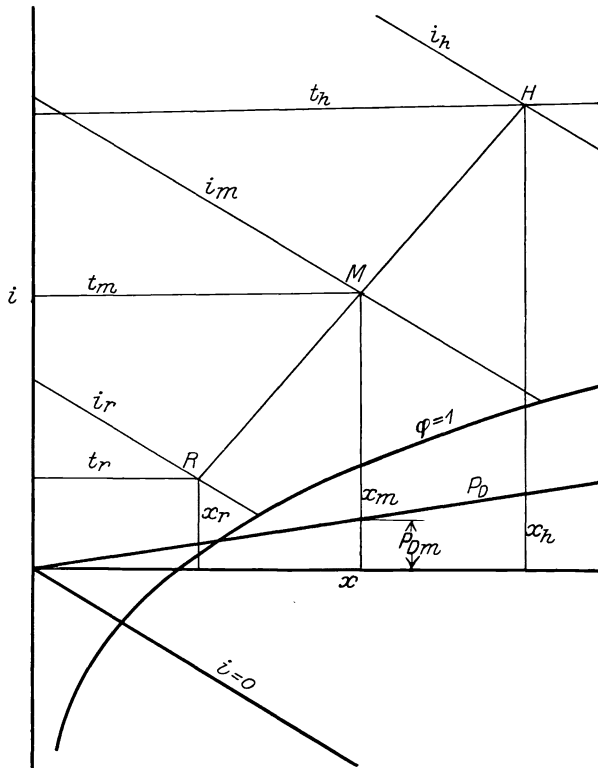


Abb. 97. Mischung von Luft verschiedenen Zustandes.

Es muß stets als eine Hauptaufgabe künstlicher Trocknung angesehen werden, die Verhältnisse unabhängig von der Witterung zu beherrschen und in der Trockenvorrichtung Bedingungen zu schaffen, die jahraus, jahrein gleichbleiben und den Bestwerten entsprechen. Hierfür ist es beim Trocknen mit Mischluft vor allem nötig, den Anfangszustand der Trockenluft (t_m, x_m) unveränderlich zu halten, um eine feststehende Trockenleistung mit gleichbleibender Trockenluftmenge und gleichartigem Verlauf des Luftzustandes zu erzielen.

Die Beimischung von Abluft führt nur dann zum Ziele, wenn der festgelegte anfängliche Feuchtigkeitsgehalt x_m der Mischluft höher

liegt als der wechselnde Feuchtigkeitsgehalt x_r der Frischluft, weil ja stets der Feuchtigkeitsgehalt der Abluft $x_h > x_r$ ist. Es ist daher nötig, bei Bestimmung des gleichzuhaltenden Anfangszustandes der Trockenluft x_m in der Höhe zu wählen, der x_r im ungünstigsten Falle bei feuchtem Sommerwetter entspricht.

Zahlenbeispiel 18. In Abb. 98 ist für den Anfangszustand der Mischluft ein Wert $x_m = 0,031$ angenommen, wie er gesättigter Luft von $31,7^\circ$ zukommt. Die dem Punkte M entsprechende Temperatur t_m ist mit 49° angesetzt. Der außerdem festzulegende Zustand der Abluft liege auf der durch M gehenden τ_m -Linie bei Punkt H . Nach dem über die Lage des M -Punktes Gesagten muß der Zustand der mit der Abluft zu mischenden Frischluft auf einem Punkt der τ_m -Linie HMV_0 liegen. Die Vorbereitung der Frischluft geschieht durch Erwärmung für alle Verhältnisse, die Punkten unterhalb der τ_m -Linie und links der x_m -Linie entsprechen. Liegt t_m tiefer als die zu erwartende Höchsttemperatur der Frischluft, so kann es in Ausnahmefällen auch nötig werden, die Frischluft vor der Mischung mit der Abluft zu kühlen, nämlich dann, wenn der ihren Zustand wiedergebende Punkt oberhalb der τ_m -Linie und links der x_m -Linie liegt.

Besitzt die Frischluft in dem in Abb. 98 gewählten Beispiele zufällig einen Feuchtigkeitsgehalt $x_r = x_m = 0,031$, d. h. entspricht ihr Zustand z. B. dem Punkt R' oder R'' auf der x_m -Linie, so ist der Fall reiner Frischluftvorwärmung gegeben. Rückt der Zustandspunkt der Frischluft nach R , so muß die Vorwärmung auf die dem Punkt V zukommende Temperatur t_v vor der Mischung erfolgen.

Das Mischungsverhältnis $\frac{GL_h}{GL_r}$ folgt hierbei aus Formel (126 a) zu

$$\frac{GL_h}{GL_r} = \frac{x_m - x_r}{x_h - x_m}. \quad (126 b)$$

Im gewählten Beispiele mit $x_m = 0,031$, $x_h = 0,035$, $x_r = 0,011$ ergibt sich

$$\frac{GL_h}{GL_r} = \frac{0,031 - 0,011}{0,035 - 0,031} = 5,$$

d. h. die Mischluft setzt sich aus 1 Teil Frischluft und 5 Teilen Abluft zusammen, bzw. 1 Teil Mischluft enthält $\frac{1}{6}$ Teil Frischluft und $\frac{5}{6}$ Teile Abluft, wobei alle

Zahlen auf den Gehalt an Reinluft bezogen sind. Wird das Verhältnis $\frac{GL_r}{GL_r + GL_h}$ abhängig von x_r dargestellt, so ergibt sich nach Abb. 98 oben eine Hyperbel, die jeweils durch den Feuchtigkeitsgehalt x_m der Mischluft und x_h der Abluft festgelegt ist. In der Nullpunktordinate kommt ihr der Wert $\frac{GL_r}{GL_r + GL_h} = 1 - \frac{x_m}{x_h}$,

in der durch x_m gehenden Ordinate der Wert $\frac{GL_r}{GL_r + GL_h} = 1$ zu. Die oberhalb

der Hyperbel bis zur Ordinate 1 gemessenen Höhen stellen das Verhältnis $\frac{GL_h}{GL_r + GL_h}$

dar. Die Hyperbel teilt daher die Ordinatenhöhe 1 im Verhältnis $\frac{GL_r}{GL_h}$. Die durch sie gelieferte zahlenmäßige Festlegung der Veränderung des Mischungsverhältnisses mit dem Feuchtigkeitsgehalt x_r der Frischluft ermöglicht, die Bedienung anzuweisen, wie stets gleichbleibende Trockenverhältnisse, allein durch Veränderung dieses Mischungsverhältnisses, zu erhalten sind.

Die Verbindungslinie RH bestimmt in ihrer Neigung zur Waagerechten genügend genau den spezifischen Wärmeverbrauch. Verglichen mit der Trocknung durch erwärmte Frischluft allein, ergibt daher das Mischluftverfahren in dieser Beziehung keinen Unterschied, wenn in beiden Fällen die Vorwärmung der Frischluft auf die gleiche Temperatur t_v erfolgt und die Ausnutzung im gleichen Punkt H endet. Die Kühlgrenze ist in beiden Fällen dieselbe, dagegen die Höchsttemperatur der auf das Gut treffenden Trockenluft bei reiner Frischluftanwendung höher.

Diesem bei Gegenstromtrocknern mit hygroskopischem Gut zur Geltung kommenden Vorteil des Mischluftverfahrens steht der Nach-

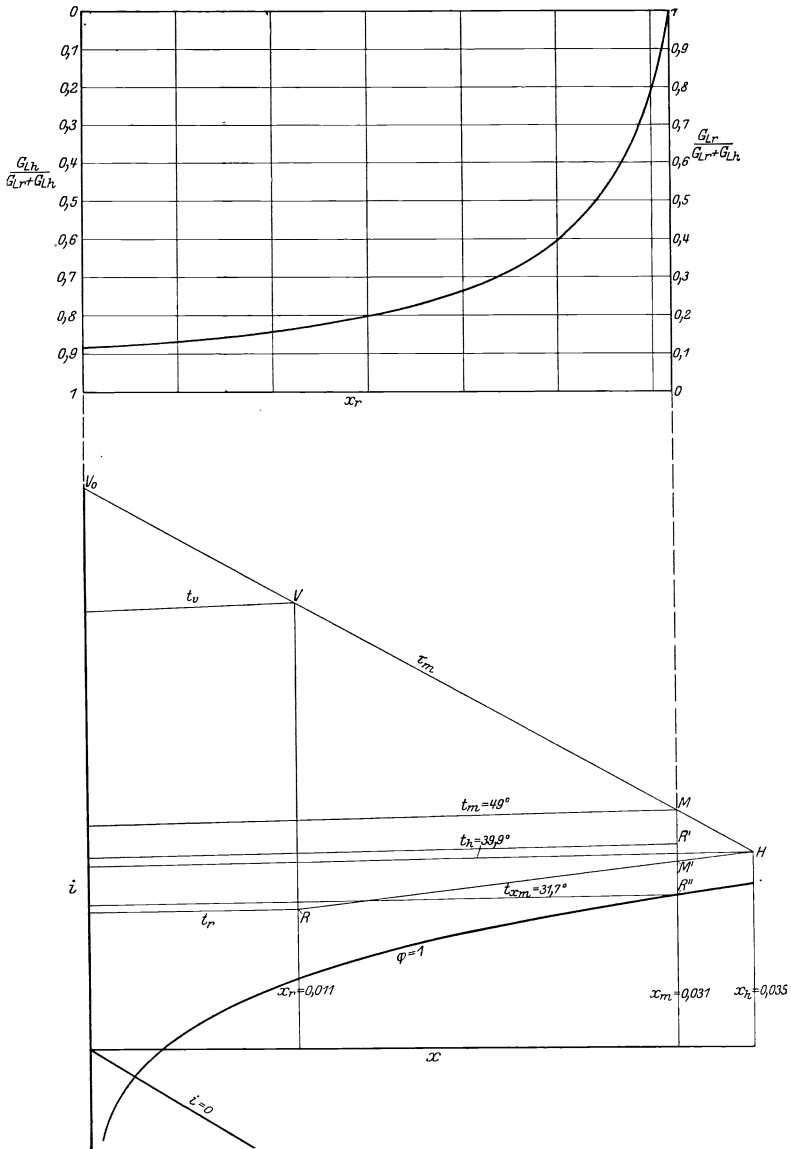


Abb. 98. Veränderung des Mischungsverhältnisses bei gleichbleibendem Mischzustand und veränderlichem Zustand der Frischluft.

teil gegenüber, daß das ihm zukommende mittlere Trockenpotential niedriger liegt und daher längere Trockenzeit bedingt. Die Mischlufttrocknung ist daher dann am Platze, wenn das Gut

eine lebhafte Trocknung weder im feuchten noch getrockneten Zustande erträgt. Seine Anwendung läßt sich außerdem in allen Fällen damit begründen, daß durch sie der Trockenvorgang unabhängig von den Frischluftverhältnissen bleibt, wenn nur das Mischungsverhältnis in bestimmter Weise verändert wird. Diese Regelung aber läßt sich im Betriebe in einfachster Weise durchführen, da die gesamte Luftmenge und die Temperatur der Mischluft unverändert bleibt.

Im vorstehenden wurde vorausgesetzt, daß eine Vorwärmung der Frischluft vor der Mischung mit der Abluft erfolgt. Es ist ohne Einfluß auf die betrachteten Verhältnisse, wenn die Wärme nach der Mischung, also im Punkt M' der Abb. 98, zugeführt wird. Im letzten Falle wird

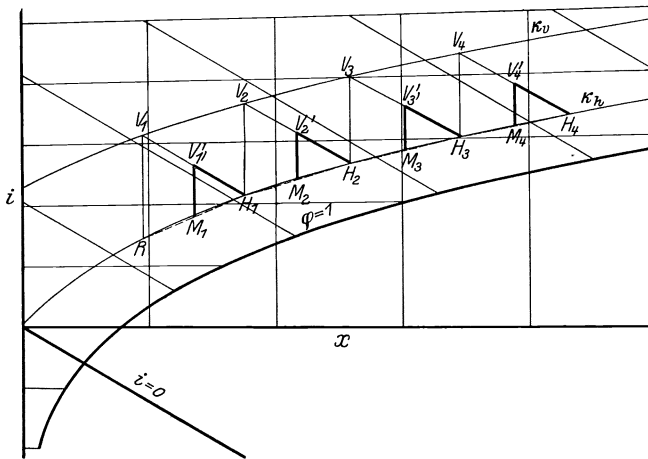


Abb. 99. Mischlufttrocknung mit Stufenheizung.

die Heizvorrichtung von einer größeren Luftmenge mit höherer Anfangs- und niedrigerer Endtemperatur durchströmt. Die höhere Luftgeschwindigkeit und die niedrigere Endtemperatur verbessern im allgemeinen die Wärmeübertragungsverhältnisse in höherem Maße, als sie die höhere Anfangstemperatur verschlechtert. Anwärmung der Mischluft bildet daher die Regel.

Diese Erörterungen lassen sich auch auf die Verbindung des Mischluftverfahrens mit der Stufenheizung anwenden. Entspricht in Abb. 99 Punkt R dem Zustande der Frischluft, Punkt V_1 dem Zustande der erstmalig vorgewärmten Luft, so stellt der Linienzug $V_1 H_1 V_2 H_2 V_3 H_3 V_4 H_4$ die Veränderung des Luftzustandes während der Trocknung bei stufenweiser Erwärmung dar, wenn die Luft nach der einmaligen Berührung mit dem Gut der nächsten Stufe zugeführt und als eine der mannigfaltigen Möglichkeiten z. B. angenommen wird, daß in jeder Stufe der Zustand der Luft sich zwischen zwei Linien gleicher Trockenkraft verändert. Wird jedoch die Luft mehrmals über ein und die-

selbe Trockenstufe geführt, so gilt der Linienzug $V_1H_1V_2H_2V_3H_3V_4H_4$ nicht mehr für die aufeinanderfolgenden, sondern nur die erst betrachtete Stufe.

In Wirklichkeit wird der mehrfach kreisenden Luft ständig eine bestimmte Luftmenge beigemischt, die für die erste Stufe aus Frischluft, für die folgenden Stufen aus Abluft der vorausgehenden Stufe besteht. Ist z. B. die Zusatzluftmenge, in kg Reinluft verglichen, gleich der beigemischten Abluftmenge, so bedeutet dies, daß von der in die Trockenstufe eintretenden Luft nur die Hälfte wieder in die zugehörige Heizstufe zurückgeführt wird, die andere Hälfte dagegen nach der nächsten Trockenstufe sich fortbewegt und ihren Ersatz in Luft aus der vorausgehenden Stufe findet. In der ersten Stufe mischt sich daher nach dem erstmaligen Umlauf Luft vom Zustand H_1 mit einer gleichen Menge Frischluft vom Zustande R zu Mischluft, entsprechend Punkt M_1 . Beim zweiten Bestreichen der Heizvorrichtung erfolgt Vorwärmung der Mischluft auf die Punkt V'_1 entsprechende Höhe. V'_1 liegt hierbei im Beharrungszustande auf der durch H_1 gehenden τ -Linie. Der Zustand der Luft folgt in der ersten Stufe dem Kreislauf $V'_1H_1M_1V'_1$.

An Stelle der Frischluft tritt für die zweite Stufe Luft, deren Zustand dem Punkte H_1 entspricht. Damit ergibt sich der Mischzustand gemäß Punkt M_2 und der Kreislauf im Beharrungszustande längs $V'_2H_2M_2V'_2$, usw. für die folgenden Stufen.

Die auf die Mischluftmenge bezogene spezifische Trockenleistung wird durch die Mischung auf die Hälfte herabgesetzt, das mittlere Trockenpotential nimmt gleichfalls ab. Da Punkt M_1 dem Punkt R um so näher rückt, je größer das Verhältnis $\frac{G_{Lr}}{G_{Lh_1}}$ der Frischluftmenge zur kreisenden Luftmenge wird, ist die erste Stufe mit Zunahme dieses Verhältnisses kleiner zu halten. Mit abnehmendem Verhältnis $\frac{G_{Lr}}{G_{Lh_1}}$ rückt M_1 gegen H_1 und geht schließlich in H_1 über, wenn Frischluft überhaupt fehlt. Ein Beharrungszustand ist alsdann unmöglich.

Aus Herstellungsgründen wird in der Regel das Fassungsvermögen der einzelnen Trockenstufen untereinander gleich sein. Die Stufeneinteilung muß alsdann so erfolgen, daß das Verhältnis $\frac{\text{Trockenteilleistung}}{\text{mittleres Trockenpotential}}$ für die einzelnen Stufen die gleiche Zahl ergibt. Im bestimmten Falle ist der Anfangszustand der Frischluft gegeben, der Endzustand H_n der aus der letzten Stufe entweichenden Abluft festzulegen, woraus sich der spezifische Wärme- und Luftverbrauch bestimmt. Der Vorgang zwischen diesen beiden Grenzpunkten kann sich in verschiedener Weise abwickeln. Da hiervon vor allem die Trockenzeit und Temperatur des Gutes abhängt, wird es sich in der Regel empfehlen, die Untersuchung versuchsweise im i - x -Bilde mehrfach durchzuführen und je nach den mit den verschiedenen Lösungen verbundenen Kosten die Entscheidung zu treffen.

Abb. 100 stellt die Verhältnisse dar, die sich bei Verbindung des Mischluftverfahrens mit Innenheizung einstellen, wenn z. B.

der Verlauf des Luftzustandes dem Linienzug MH auf einer bestimmten Trockenkraftlinie κ entspricht. Liegt der Zustand der Frischluft bei R , so muß Vorwärmung auf die Punkt V entsprechende Temperatur t_v erfolgen, wenn V den Schnittpunkt der x_r -Linie mit der Verlängerung

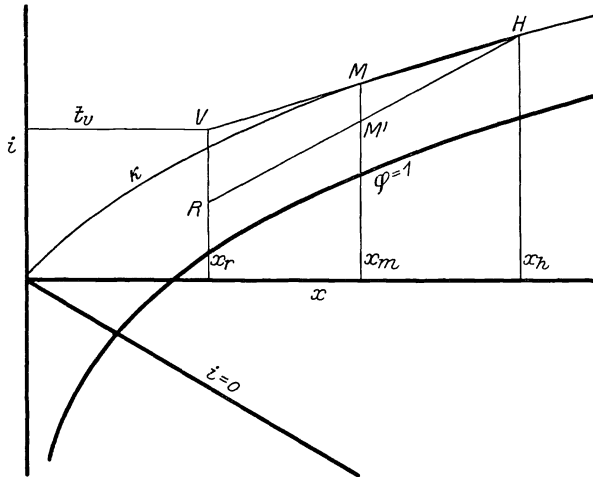


Abb. 100. Mischlufttrocknung mit Innenheizung.

der Verbindungsgeraden MH darstellt. Statt dessen kann auch Luft vom Zustande H und R gemischt und beider Erwärmung gemeinsam vorgenommen werden. Punkt M' entspricht hierbei dem Zustande der Luftmischung vor, Punkt M nach der Erwärmung.

E. Entfeuchtung der Frischluft. Bewetterungsanlagen.

Das Trocknen mit Mischluft bei stets gleichbleibender Zustandsänderung der Trockenluft hat zur Voraussetzung, daß der anfängliche Feuchtigkeitsgehalt x_m der Mischluft von vornherein nicht niedriger festgelegt ist als der im ungünstigsten Falle zu erwartende Feuchtigkeitsgehalt $x_{r\max}$ der Frischluft. Zusammen mit der gleichfalls bestimmten Höchsttemperatur $t_{r\max}$ der Mischluft ergibt sich alsdann eine Lage des Punktes M der Abb. 98, die höheren Luftbedarf und längere Trockendauer zur Folge hat, als wenn $x_m \leq x_{r\max}$ gewählt werden könnte. Bei hygroskopischem Gut äußert sich dieser Nachteil der Mischlufttrocknung auch noch darin, daß der schließlich erreichbare Endfeuchtigkeitsgrad x_i des Gutes eine bestimmte Grenze nicht unterschreiten kann, weil $x_{r\max}$ und $t_{m\max}$ den Wert $x_i = \varphi_m \cdot x_e$ festlegen. Besonders weitgehende Trocknung wird alsdann unmöglich.

Ein Mittel, um, unter Beibehaltung unveränderlicher Luftverhältnisse im Trockenraum, diesen Nachteilen zu begegnen, bietet sich darin, daß x_m beliebig tiefer als $x_{r\max}$ gelegt und bei Witterungsverhältnissen,

unter denen der Feuchtigkeitsgehalt x , der Frischluft höher liegt als x_m , die Frischluft entfeuchtet wird. Dies geschieht in einfachster Weise durch ihre Abkühlung auf eine Temperatur t''_m , die nach Abb. 101 dem angestrebten Werte x_m als Taupunkt zugeordnet ist. (Der Einfachheit halber ist im vorstehenden angenommen, daß die abgekühlte Luft gesättigt ist. Daß dies keine notwendige Voraussetzung ist, geht aus Zahlenbeispiel 3 hervor.) Die Abkühlung kann auch weiter, z. B. bis zum Punkt R' , fortgesetzt werden, dem ein Feuchtigkeitsgehalt $x'_r \leq x_m$ zukommt. Abgesehen von der Abkühlung, verläuft hierbei die Trocknung in der früher beschriebenen Weise. Punkt M'' entspricht der reinen Frischluftanwendung, bei der die Vorwärmung auf die Punkt M

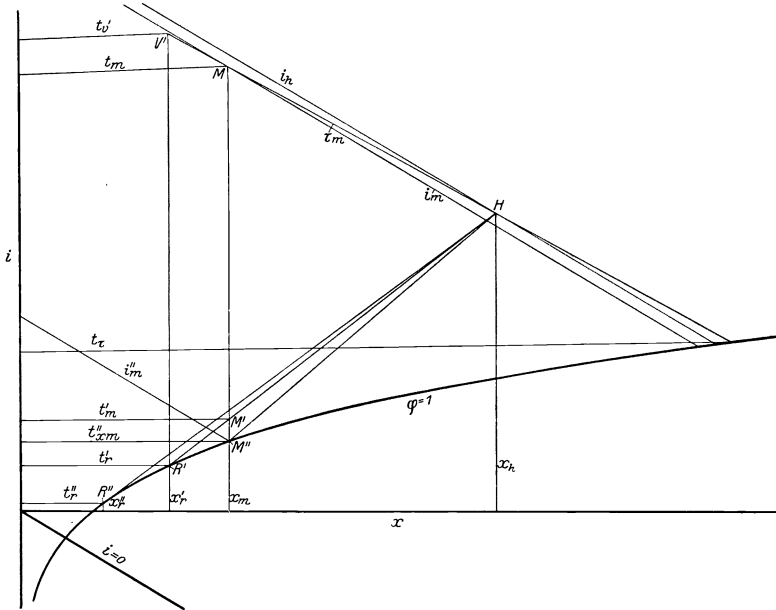


Abb. 101. Trocknen mit entfeuchteter Luft.

zugeordnete Temperatur t_m erfolgt. Bei Punkt R' ist der Fall der Mischlufttrocknung gegeben. Die Anwärmung erfolgt entweder vor der Mischung auf die Temperatur t'_p oder nach der Mischung von der Mischtemperatur t'_m auf t_m . Das Mischungsverhältnis bleibt auch hier $\frac{G_{Lh}}{G_{Lr}} = \frac{x_m - x'_r}{x_h - x_m}$. Seine Veränderung mit x'_r folgt aus dem Verlauf der in Abb. 98 oben dargestellten Hyperbel.

Es liegt nahe, $x'_r = x_{r \min}$ anzunehmen und festzuhalten, d. h. die Entfeuchtung stets so weit zu treiben, wie sie dem zu erwartenden niedrigsten Feuchtigkeitsgehalt der Frischluft entspricht. Alsdann bleibt auch das Mischungsverhältnis $\frac{G_{Lh}}{G_{Lr}}$ jahraus jahrein gleich und die Regelung des Trockenvorganges wird die denkbar einfachste. Diese

weitgehende Abkühlung der Frischluft verbietet sich jedoch in der Regel aus wirtschaftlichen Gründen. Denn nur solange die Temperatur t_f durch Verwendung verfügbaren Wassers erreichbar ist, erfolgt die Abkühlung nahezu kostenlos. Wird diese Grenze unterschritten, so ist die Heranziehung einer Kühlmaschine erforderlich, deren Energieverbrauch mit Senkung der Temperatur t_f wächst.

Mit der Verschiebung des Punktes R und dem Übergang von reiner Frischluft- zu Mischlufttrocknung verändert sich der spezifische Wärmeverbrauch. In Abb. 101 liegt er bei R' niedriger als bei M'' , weil die Neigung zur Waagerechten für die Verbindungslinie $M''H$ größer ist als für $R'H$. Der günstigste Punkt für die Abkühlung mit dem geringsten spezifischen Wärmeverbrauch liegt bei R'' dort, wo eine durch H an die Sättigungslinie gelegte Tangente diese berührt. Ob die Entfeuchtung auf den Grenzwert x'' die besten Gesamtverhältnisse ergibt, ist im bestimmten Falle, unter Berücksichtigung des für die Abkühlung erforderlichen Aufwandes, zu entscheiden. So viel kann von vornherein gesagt werden, daß die Entfeuchtung zweckmäßig so weit getrieben wird, wie dies durch Anwendung von verfügbarem Wasser noch möglich ist, jedoch keinesfalls tiefer als bis zu dem Grenzwerte x'' .

Die Verbindung einer Entfeuchtungsanlage mit der Trockenvorrichtung läuft darauf hinaus, den Einfluß der Witterungsverhältnisse, der z. B. bei der Malzerzeugung zur Unterbrechung während des Sommers führt, vollständig auszuschalten. Es sei daher vorgeschlagen, sie als „Bewetterungsanlage“ zu bezeichnen und sinngemäß der betreffenden Vorrichtung den Namen „Wetterfertiger“ beizulegen. Die Bedeutung solcher als „Bewetterungsanlagen“ bezeichneter, mit einem „Wetterfertiger“ ausgestatteten Einrichtungen wird immer mehr erkannt. Es handelt sich dabei nicht um eine nebensächliche Verbesserung, sondern um die Möglichkeit, den Trockenvorgang in allen Teilen und zu allen Zeiten zu beherrschen. Erst damit geht der Fortschritt der künstlichen Trocknung gegenüber der natürlichen, mit dem sich die Technik lange zufrieden gab, in die vollendete Trockenkunst über.

Die Entfeuchtung der Frischluft muß nach Abb. 101 für alle Frischluftverhältnisse vorgenommen werden, die einem Punkt unterhalb der Kühlgrenzl原因 MH und rechts der x_m -Linie entsprechen. Sie kann darüber hinaus in den gekennzeichneten Grenzen nützlich sein, wenn der Zustandspunkt der Luft unterhalb der von H an die Sättigungslinie gezogenen Tangenten HR'' und links der x_m -Linie liegt.

Bei niedrigem Feuchtigkeitsgehalt der Außenluft, wie er im Winter auftritt, kann der Fall vorkommen, daß die Vorwärmung ein Trockenpotential ergibt, das eine übermäßige Trockengeschwindigkeit und Gefährdung des Gutes befürchten läßt. Im allgemeinen schafft hier das Mischverfahren Abhilfe. Es ist jedoch nicht anwendbar, wenn, wie z. B. bei der Auftrocknung von Lösungsmitteln, die Abführung des Gasgemisches auf schnellstem Wege erfolgen soll, oder wenn, wie bei der Öllacktrocknung, der Luftsauerstoff für die Härtung in bestimmter Menge benötigt wird. Alsdann bleibt nur übrig, durch Erniedrigung der Vor-

wärmtemperatur die Trockenkraft zu verringern. Der naheliegende Gedanke, die stärker vorgewärmte Luft nachträglich künstlich zu befeuchten, und die Bewetterungsvorrichtungen als Befeuchtungsanlage zu benutzen, ist im allgemeinen zu verwerfen. Denn die Befeuchtung zehrt das durch die Erwärmung der Luft geschaffene Trockenvermögen teilweise auf. Wenn z. B. die durch die Befeuchtung in die Luft eingeführte Feuchtigkeitsmenge gerade der nachträglich bei der Nutztrocknung von ihr aufgenommenen Feuchtigkeitsmenge entspricht, wird nur die Hälfte der aufgewandten Wärme ausgenutzt. Dagegen ist es denkbar, die Befeuchtung in der Weise vorzunehmen, daß mit der Trocknung des Gutes, dessen Eigenart die Anwendung eines zu hohen Trockenpotentials verbietet, die Trocknung eines weniger empfindlichen Gutes verbunden wird, oder auch eines stark hygroskopischen Gutes, für das die Trockenkraft geringer ist, und daß beide Vorrichtungen hintereinander geschaltet werden.

F. Abkühlung feuchter Luft.

Das Nebelgebiet im i - x -Bild.

Für die Zustandsveränderung bei Kühlung feuchter Luft ist die Höhe der wirksamen Kühltemperatur, bei unmittelbarer Kühlung die Temperatur des Kühlmittels, bei mittelbarer Kühlung die Temperatur der luftberührten Wand, außerdem der Grad maßgebend, in dem die Lufttemperatur sich der wirksamen Kühltemperatur nähert. In Abb. 102 kennzeichnet Punkt G den Anfangszustand der feuchten Luft. Ihr Taupunkt liegt bei der Temperatur t'' entsprechend der Isothermen durch den Punkt T , in dem die Ordinate durch Punkt G die Sättigungslinie schneidet.

Liegt die wirksame Kühltemperatur t_0 zwischen t und t'' , so wird bei unmittelbarer Kühlung der Zustand des Kühlwassers durch den Punkt \mathcal{G}_0 gekennzeichnet. Die Abkühlung der Luft erfolgt alsdann längs der Geraden $G \mathcal{G}_0$, also unter Feuchtigkeitsaufnahme. Bei mittelbarer Kühlung lagert an der kühlenden Wand eine Grenzschicht, deren Zustand durch den Punkt G_0 wiedergegeben wird. Diese ist für den Wärmeaustausch maßgebend. Die Zustandsveränderung der Luft erfolgt daher längs der Geraden $G G_0$, also ohne Veränderung des Feuchtigkeitsgehalts.

Entspricht die wirksame Temperatur dem Taupunkt t'' , so erfolgt die Zustandsänderung in allen Fällen längs der Geraden $G T$ mit gleichbleibendem Feuchtigkeitsgehalt. Der Unterschied zwischen unmittelbarer und mittelbarer Kühlung verschwindet alsdann. Das gleiche gilt für alle wirksamen Kühltemperaturen, die niedriger als der Taupunkt, also z. B. bei t_0 liegen. Bei unmittelbarer Kühlung entspricht Punkt \mathcal{G}_0 dem Zustand des Kühlwassers. Bei mittelbarer Kühlung erfolgt sofort ein Niederschlag auf der kühlenden Wand, deren Zustand daher gleichfalls durch den Punkt \mathcal{G}_0 gekennzeichnet wird. Die Veränderung des Luftzustandes folgt daher eindeutig der Geraden $G \mathcal{G}_0$.

Wird die wirksame Kühltemperatur als unveränderlich angenommen, also eine unendlich große Menge des Kühlwassers vorausgesetzt, bei

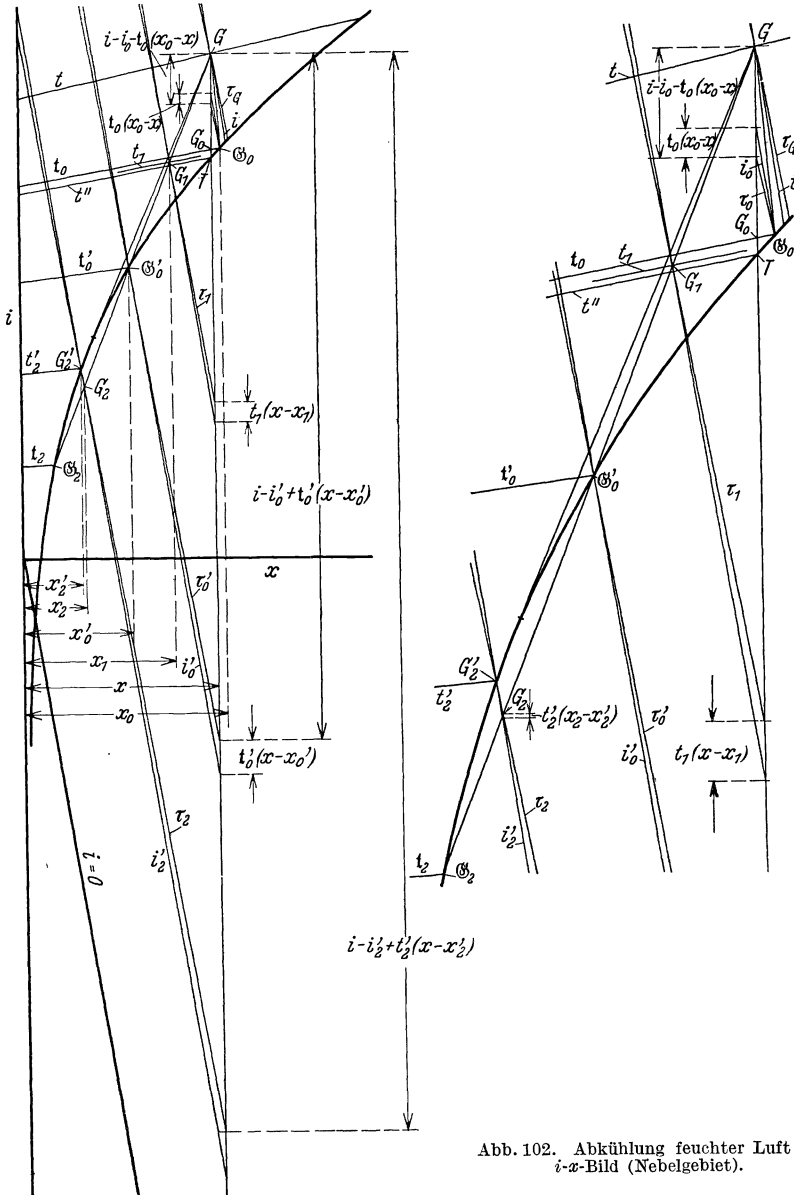


Abb. 102. Abkühlung feuchter Luft im i-x-Bild (Nebelgebiet).

mittelbarer Kühlung außerdem der Einfluß der Lufttemperatur auf die Temperatur der kühlenden Wand vernachlässigt, so erreicht die Luft schließlich einen Gleichgewichtszustand, der durch die Punkte \mathcal{G}_0

— Befeuchtung bis zur Sättigung —, G_0 — Erhöhung des Feuchtigkeitsgrades bei gleichbleibendem Feuchtigkeitsgehalt —, T — Taupunkt —, G'_0 — Entfeuchtung unter Annahme des Sättigungszustandes — dargestellt wird. Der Befeuchtung entspricht eine Feuchtigkeitsaufnahme $x_0 - x$, der Entfeuchtung eine Feuchtigkeitsabgabe $x - x_0$.

Bei der Ermittlung der Kühlleistung ist neben der Veränderung des Luftzustandes die Tatsache zu berücksichtigen, daß bei der Befeuchtung der Wärmeinhalt $t_0(x_0 - x)$ von außen durch Ortswechsel in die Luft eintritt, bei der Entfeuchtung der Wärmeinhalt $t'_0(x - x_0)$ unter Ortswechsel mit der ausfallenden Feuchtigkeit aus der Luft verschwindet. Werden daher durch die Punkte G_0 und G'_0 die τ -Linien gezogen, so ergibt sich nach dem in Abb. 102 angegebenen Zusammenhang die Kühlleistung bei der

$$\begin{array}{ll} \text{Befeuchtung zu} & i - i_0 - t_0(x_0 - x) \\ \text{Entfeuchtung zu} & i - i'_0 + t'_0(x - x_0), \end{array}$$

also in allen Fällen als Abstand des dem Anfangszustand entsprechenden Punktes G von dem Schnittpunkt der Ordinaten durch G mit der τ -Linie, die durch den dem Endzustand entsprechenden Punkt G_0 bzw. G'_0 läuft.

Dieser Zusammenhang gilt auch für den in Wirklichkeit eintretenden Zwischenzustand, den die Luft bei der Entfeuchtung im Punkt G_1 erreicht.

Liegt die wirksame Kühltemperatur niedriger, als dem Berührungspunkt der von Punkt G an die Sättigungslinie gezogenen Tangente entspricht, also z. B. bei t_2 , so kann je nach dem Grade der Annäherung an den Gleichgewichtszustand der Endzustand der abgekühlten Luft einem Punkt auf der Geraden $G G_2$ oberhalb oder unterhalb der Sättigungslinie, also auch dem Punkte G_2 entsprechen. Er fällt damit in das durch die Sättigungslinie nach oben hin begrenzte Nebelgebiet. Von dem schließlichen Feuchtigkeitsgehalt der abgekühlten Luft x_2 fällt alsdann die Menge noch aus, die dem Feuchtigkeitsgehalt im Sättigungszustand bei der zum Punkt G_2 gehörigen Temperatur überschreitet. Mollier¹ hat darauf hingewiesen, daß die Isothermen im Nebelgebiet anders verlaufen als oberhalb der Sättigungslinie und durch die Fortsetzung der τ -Linien dargestellt werden. Wird durch den Punkt G_2 die τ -Linie gezogen, so schneidet sie die Sättigungslinie in dem Punkt G'_2 , der den tatsächlichen Endzustand der abgekühlten Luft wiedergibt und dem die Temperatur t'_2 und der Feuchtigkeitsgehalt x'_2 zukommen. Der Betrag $x_2 - x'_2$ fällt bei der Abkühlung gleichzeitig mit dem Betrag $x - x_2$ aus. Der Wärmeinhalt des Gemisches im Punkt G_2 beträgt $i_2 + t_2(x_2 - x'_2)$. Die Abkühlleistung beim Übergang der feuchten Luft vom Zustand G nach dem Zustand G'_2 folgt zu $i - i'_2 + t'_2(x - x'_2)$. Der Verlauf $G'_0 G_2$ entspricht der Zustandsänderung des aus gesättigter Luft und flüssigem Nebel bestehenden Gemisches, der Zustand der vom Nebel befreiten Luft folgt nach Erreichung des Sättigungszustandes im Punkt G'_0 der Sättigungslinie bis zum Punkt G'_2 .

¹ Mollier: Das i - x -Diagramm für Dampf-Luftgemische. Z. V. d. I. 1929.

Die mögliche Lage des Endzustandes im Punkt G_1 bestätigt, daß die Abkühlung feuchter Luft unter gleichzeitiger Entfeuchtung möglich ist, ohne daß der Taupunkt unterschritten wird und daß Feuchtigkeit aus der Luft ausfallen kann, ohne daß sie gesättigt ist.

G. Trocknen mit Luft in geschlossenem Kreislauf. Kalte Trocknung.

Entspricht der Zustand der Frischluft in Abb. 101 einem Punkte, der oberhalb der Kühlgrenzlinie MH liegt, so ist ihre Entfeuchtung im Sinne der vorausgehenden Erörterung mit einer größeren Abkühlleistung verbunden, als wenn Abluft vom Zustande H verwandt wird. In diesem Falle ist es daher zweckmäßiger, den Trockenvorgang in geschlossenem Kreislauf derart zu vollziehen, daß stets ein und dasselbe Trockenmittel verwendet wird. Hierbei folgen nacheinander Abkühlung der Abluft vom Zustande H auf den Zustand M'' , Erwärmung auf den Zustand M und Trocknung unter Veränderung des Luftzustandes längs der Kühlgrenzlinie MH . Die Abkühlleistung wird etwa gleich der Anwärmlleistung und die Bedingung kleinsten spezifischen Wärmeverbrauches gleichbedeutend mit der Forderung, die zu entziehende Wärmemenge möglichst niedrig zu halten. (Genau genommen ist nach Abschnitt F die spezifische Abkühlleistung nicht gleich dem Unterschiede der spezifischen Wärmeleistung $i_m - i_m''$, sondern gleich $i_h - [i_m'' + (x_h - x_m)t_{x_m}'']$. Da $i_h - i_m = (x_h - x_m)\tau_m$ ist, kann die Abkühlleistung gleich $i_m - i_m'' + (x_h - x_m)(\tau_m - t_{x_m}'')$ gesetzt werden. Das letzte Glied stellt den Unterschied dar, um den die Abkühlleistung die Anwärmlleistung $i_m - i_m''$ überwiegt. Es entspricht der Abkühlung der aus dem Gut entzogenen Feuchtigkeitsmenge $x_h - x_m$ von der Temperatur τ_m des Gutes auf die Temperatur t_{x_m}'' . Daß Abkühlleistung und Anwärmlleistung einander nicht genau entsprechen, ist damit begründet, daß es sich nicht um einen vollkommen geschlossenen Vorgang handelt, vielmehr die Wärmemenge $\tau_m(x_h - x_m)$ von außen, nämlich aus dem Gut, zugeführt und die Wärmemenge $t_{x_m}''(x_h - x_m)$ als Niederschlag bei der Entfeuchtung der Luft nach außen abgegeben wird.)

Auch bei dem geschlossenen Kreislauf kann es vorteilhaft sein, mit Mischluft in dem Sinne zu arbeiten, daß nur ein Teil der Abluft, diese aber weitergehend, abgekühlt und mit dem Rest der Abluft in einem bestimmten Verhältnis gemischt wird. Die Beziehungen der Abb. 101 bleiben gültig und Punkt R'' ergibt den günstigsten Entfeuchtungsgrad bei einem Feuchtigkeitsgehalt x_r'' . Hieraus folgt das Mischungsverhältnis. Von der Abluftmenge G_{Lh} wird nur der Teil $G_{Lh} \cdot \frac{x_h - x_m}{x_h - x_r''}$ auf die Temperatur t_r'' entfeuchtet und der Rest $G_{Lh} \cdot \frac{x_m - x_r''}{x_h - x_r''}$ damit gemischt.

Auch hier ist der bei tieferen Temperaturen auftretende Energieverbrauch für künstliche Kühlung in Betracht zu ziehen. Er wird im allgemeinen zu einer Beschränkung der Entfeuchtung auf die Grenze führen, die ohne künstliche Kühlung mit verfügbarem Wasser allein erreichbar ist.

Je empfindlicher ein bestimmtes Gut gegen Anwendung hoher Temperaturen ist, um so mehr wird es bei Ersatz der natürlichen durch künstliche Trocknung gefährdet. In solchen Fällen bietet die Trocknung mit Luft in geschlossenem Kreislauf die Möglichkeit, der natürlichen Trocknung nicht nur nahezukommen, sondern sie dadurch zu übertreffen, daß bestimmte günstigste Verhältnisse unabhängig von der Witterung geschaffen werden können.

Der geschlossene Kreislauf, der hierbei zur kalten Trocknung führt, ermöglicht es, innerhalb der Trockenvorrichtung mit Temperaturen zu arbeiten, wie sie etwa den umgebenden Arbeitsräumen entsprechen. Infolgedessen erfährt das Gut zwischen Vorbereitung für die Trocknung und Weiterbehandlung nach der Trocknung keine wesentliche Temperaturveränderung, die ihm schädlich sein könnte und zudem mit Wärmeverlusten verbunden ist. Ebenso entfällt die bei höheren Trocken-

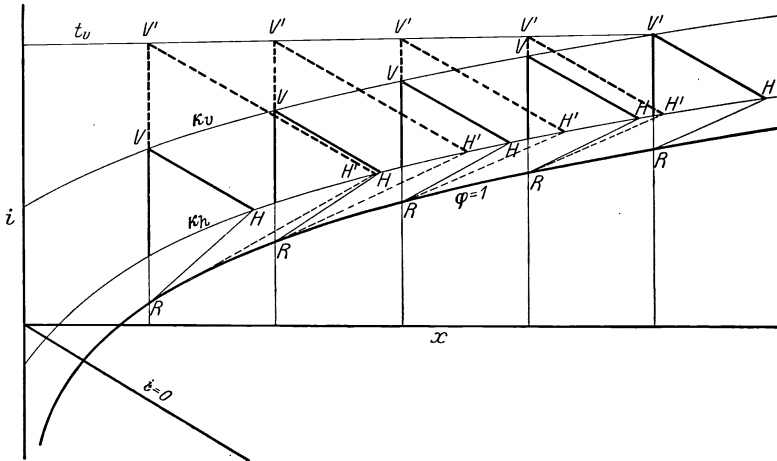


Abb. 103. Einfluß der Temperaturlage auf den spezifischen Wärmeverbrauch.

temperaturen unvermeidliche Wärmeabgabe an die Umgebung. Wärmeschutzmittel werden damit entbehrlich.

Für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit der kalten Trocknung bietet die Abb. 103 einen Anhalt. In ihr sind die Verhältnisse einmal für den Fall dargestellt, daß der Trockenvorgang zwischen zwei Linien gleicher Trockenkraft und mehr oder weniger tiefen Temperaturen verläuft, ein andermal für den Fall, daß eine bestimmte Höchsttemperatur und für die Abluft eine bestimmte Trockenkraftlinie festgehalten wird. Es ergibt sich alsdann, daß die Verbindungslinie der *R*- mit den *H*-Punkten zur Waagerechten um so weniger geneigt ist, je höher die Temperaturen liegen, in denen sich der Trockenvorgang vollzieht. Die Rücksicht auf den spezifischen Wärmeverbrauch läßt es daher empfehlenswert erscheinen, das ganze Trockenbild bei nicht zu tiefen Temperaturen abzuwickeln. Diese Beziehung gilt auch für den zweiten Vergleichsfall mit gleichbleibender Höchsttemperatur. Er ergibt zudem gegenüber dem ersten für gleiche *R*-Punkte, also gleiche Mindesttemperatur, einen nie-

drigeren spezifischen Wärmeverbrauch. Da die Abkühlleistung der Wärmeleistung gleichgesetzt werden kann, ist in jeder Richtung auch bei der geschlossenen kalten Trocknung der Verlauf bei möglichst hohen Temperaturen der wirtschaftliche.

Als Kühlmittel für die Entfeuchtung der Luft kommt in erster Linie Wasser in Betracht, und zwar in der Weise, daß entweder wasserdurchflossene Kühlkörper in den Luftstrom eingefügt werden oder, was billiger und einfacher ist, das Wasser in Düsenkammern, Fülltürmen oder ähnlichen Vorrichtungen mit der Luft in unmittelbare Berührung tritt. Die bei der Anwendung von Kühlwasser erzielbare Entfeuchtung entspricht in gemäßigten Zonen einem Taupunkt, der sich zwischen 10 und 15° bewegt.

Wird neben der Vorkühlung durch Wasser eine Kältemaschine herangezogen, um eine weitergehende Entfeuchtung zu erzielen, so liegt für mittlere Verhältnisse deren Arbeitsverbrauch etwa so hoch, daß bei Verwendung von Dampf als Betriebskraft der entfallende Abdampf die erforderliche Wärmeleistung gerade deckt. In solchen Fällen braucht der Energieaufwand für die künstliche Kühlung in der Regel nicht besonders berücksichtigt zu werden.

Da bei einer Kältemaschine die entzogene Wärme zusammen mit dem Wärmewert des Arbeitsbedarfes in dem Verflüssiger bei höheren Temperaturen wieder frei wird, bietet sie die Möglichkeit, die für die Anwärmung der Luft erforderliche Heizleistung als Abfallwärme aufzubringen. In diesem Falle wirkt die Kälteanlage als Heizmaschine, und der für ihren Betrieb aufzuwendende Arbeitsbedarf wird ausschlaggebend für die Wirtschaftlichkeit. Steht daher billige elektrische Energie zur Verfügung, so kann die kalte Trocknung am Platze sein, weil sie eine wirtschaftlichere Umwandlung des elektrischen Stromes in Wärme ermöglicht als bei unmittelbarer elektrischer Heizung. Noch weitergehende Aussichten eröffnen sich, wenn an die unmittelbare Ausnutzung von Wasserkraften zu Trocknungszwecken gedacht wird¹.

H. Trocknen mit veränderlicher Luftmenge.

Bisher war angenommen, daß der Gesamtstrom des Trockenmittels in einer gleichbleibenden Reinluftmenge vom Eingang zum Ausgang der Trockenvorrichtung geführt wird. Es ist jedoch möglich, unterwegs Teilströme des Trockenmittels zu- oder abzuleiten und damit den Trockenvorgang zu beeinflussen. In der Wirkung läuft dieses Verfahren auf eine Art Stufentrocknung hinaus, wobei jedoch nicht, wie dort zunächst angenommen, durch nachträgliche Wärmezufuhr der spezifische Wärmehalt des Trockenmittels eine allmähliche Erhöhung erfährt, sondern sich in beliebiger Weise verändern kann.

Nach Abb. 104 kann z. B. der einem Trommeltrockner zugeführte Heißluftstrom in drei etwa gleichen Teilen, einer am Trommelanfang, der zweite in einiger Entfernung vom Anfang, der dritte jenseits der

¹ Vgl. auch Hirsch: Kalte Trocknung. Z. ges. Kälteind. 1919.

Mitte eingeführt werden. Die Temperatur des Trockenmittels nehme hierbei den in Abb. 104 oben dargestellten Verlauf. Sie sinkt im ersten Abschnitt von t_{v1} auf t_{h1} , hebt sich nach Beimischung des zweiten Teil-

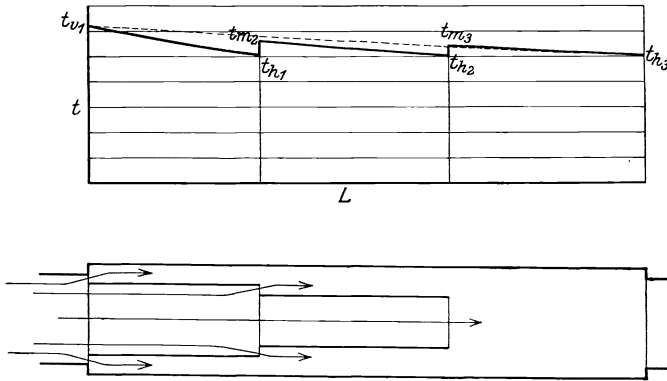


Abb. 104. Trockner mit veränderlicher Luftmenge.

stromes auf t_{m2} , die Temperatur der verdoppelten Menge sinkt im zweiten Abschnitt auf t_{h2} , steigt nach der Beimischung des dritten Teilstromes auf t_{m3} und sinkt schließlich bis zum Austritt auf t_{h3} .

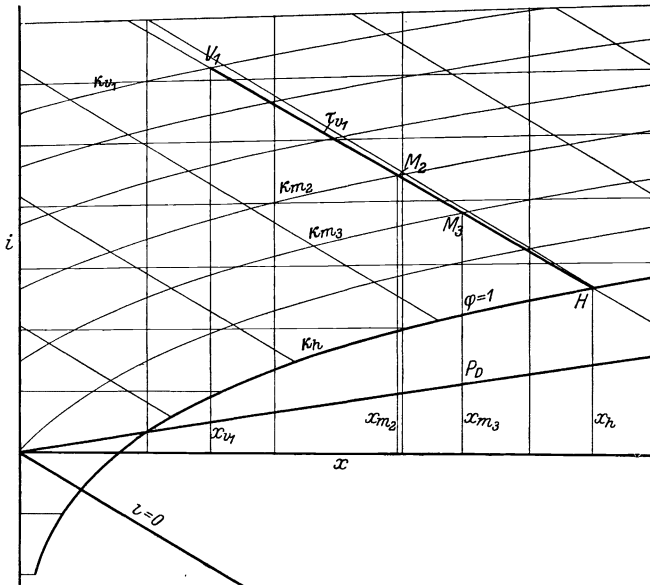


Abb. 105. Trocknen mit veränderlicher Luftmenge.

Bei Verfolgung dieses Vorganges im i - x -Bild nach Abb. 105 verändere sich der Zustand der Luft längs der τ -Linie zunächst von Punkt V_1 nach H zwischen den Trockenkraftlinien κ_{v1} und κ_h . Die Mischung

bringt den Zustand der doppelten Luftmenge auf Punkt M_2 . Er ist in Abb. 105 so gewählt, daß er in der Mitte zwischen κ_{v_1} und κ_h zu liegen kommt. Die Mischluft bewege sich vom Zustand M_2 abermals nach H . Da ihre Feuchtigkeitsaufnahme $x_h - x_{m_2}$ nach der getroffenen Annahme halb so groß ist wie $x_h - x_{v_1}$, ist die Trockenleistung, wegen der verdoppelten Luftmenge, im zweiten Abschnitt die gleiche wie im ersten. Für den dritten Abschnitt ist in ähnlicher Weise Punkt M_3 , der dem Anfangszustand der Luft nach der zweiten Beimischung entspricht, auf der Kühlgrenzlinie $V_1 H$ so gewählt, daß $\frac{M_3 H}{V_1 H} = \frac{1}{3}$. Die Feuchtigkeitsaufnahme $x_h - x_{m_3}$ wird daher im dritten Abschnitt nur $\frac{1}{3}$ so groß wie im ersten. Die Trockenleistung erreicht, wegen der dreifachen Luftmenge, die gleiche Höhe.

Bei der getroffenen Voraussetzung kommen die Punkte M_2 bzw. M_3 auf Trockenkraftlinien κ_{m_2} bzw. κ_{m_3} derart zu liegen, daß genügend genau das Trockenpotentialgefälle $\kappa_h - \kappa_{m_2}$ bzw. $\kappa_h - \kappa_{m_3} \frac{1}{2}$ bzw. $\frac{1}{3}$ des für den ersten Abschnitt gültigen Wertes $\kappa_h - \kappa_{v_1}$ beträgt.

In Abb. 105 ist angenommen, daß κ_h mit der Sättigungslinie zusammenfällt. Die mittlere Trockenkraft in den drei Abschnitten verhält sich alsdann angenähert wie 3 : 1,5 : 1 (genau genommen ist der Unterschied größer, weil nicht die arithmetischen, sondern logarithmischen Mittelwerte maßgebend sind). Im umgekehrten Verhältnis dieser Zahlen verändert sich die Trockenzeit. Da die Leistung in den einzelnen Abschnitten gleich vorausgesetzt ist, folgen hieraus bei gleichmäßiger Fortbewegung des Gutes Weglängen für die einzelnen Abschnitte, die sich wie 1 : 2 : 3 verhalten, also $\frac{1}{6}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{2}$ der gesamten Weglänge entsprechen. Die Beimischung des zweiten und dritten Teilstromes muß daher, abweichend von Abb. 104, in einer Entfernung von $\frac{1}{6}$ bzw. $\frac{1}{2}$ der gesamten Trommellänge erfolgen, wenn der Verlauf sich nach Abb. 105 abspielen soll.

In Wirklichkeit ist es unmöglich, vollkommene Sättigung der Abluft zu erreichen. Der Punkt H rückt daher nach Abb. 106 auf eine höhere Trockenkraftlinie κ_h , und der ganze Vorgang spielt sich in engerem Bereich ab. Die Bedingung gleichbleibender Trockenleistung für die drei Teilabschnitte ist auch hier festgehalten. Dabei entspricht das mittlere Trockenpotential der ersten Stufe etwa $\frac{\kappa_h + \kappa_{v_1}}{2} \approx \kappa_{m_2}$, das der zweiten Stufe $\frac{\kappa_h + \kappa_{m_2}}{2}$, das der dritten Stufe $\frac{\kappa_h + \kappa_{m_3}}{2}$. Der Unterschied des mittleren Trockenpotentials in den einzelnen Abschnitten bleibt dem Sinne nach bestehen, wird jedoch zahlenmäßig geringer, die Unterteilung der Trockenvorrichtung daher gleichmäßiger, wie in Abb. 104, anlehnend an Abb. 106, angedeutet.

Da nach Abb. 105 das gesamte mittlere Trockenpotential etwa halb so hoch liegt wie das des ersten Abschnittes, ergibt sich eine gesamte Weglänge, die doppelt so groß ist, wie wenn der Luftstrom ungeteilt von Anfang zu Ende strömen würde. Diese Verlängerung bleibt auch nach Abb. 106 bzw. 104, wenn auch in geringerer Maße, nötig.

Der in Abb. 104 oben, abhängig von der Weglänge L , dargestellte Verlauf der Temperaturen zeigt, verglichen mit der gestrichelt angedeuteten Änderung bei ungeteiltem Luftstrom, daß die Trocknung durch die Teilung eine Milderung erfährt, die besonders am Ende des ersten Abschnittes merklich ist.

War im vorstehenden angenommen, daß der Anfangszustand der drei Teilströme derselbe ist, so kann auch ein Verfahren ausgebildet werden, bei dem nachträglich ein Trockenmittel von anderer Beschaffenheit, z. B. niedrigerem Wärmeinhalt, als das anfänglich zugeführte, beigefügt wird.

Der zeitliche Verlauf der Vorwärmung des Gutes läßt sich vorausberechnen, also die Gutstemperatur finden, die bei gegebenen Verhältnissen des Trockenmittels nach einer bestimmten Zeit eintritt. Damit ist die Möglichkeit gegeben, die Wärmezufuhr in einem Augenblick zu ändern, in dem die Temperatur des Gutes die nach seiner Eigenart zulässige Höchstgrenze erreicht. Bis dahin ist die Lufttemperatur insofern gleichgültig, als von ihrer Höhenlage wohl die Schnelligkeit der

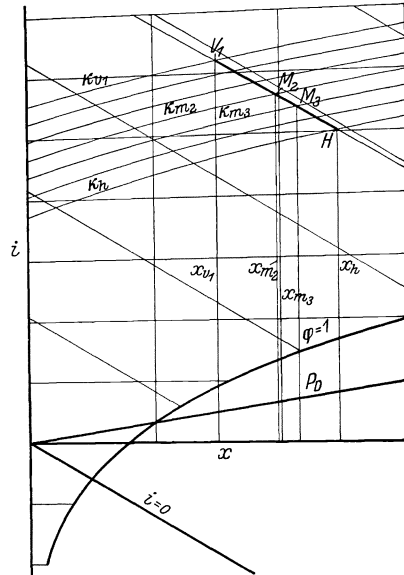


Abb. 106. Trocknen mit veränderlicher Luftmenge.

Vorwärmung abhängt, nicht aber die Vorwärmtemperatur des Gutes. Sie kann unter der Kühlgrenze gehalten werden, wenn nur die Wärmezufuhr rechtzeitig geändert wird. Dies weist auf die Möglichkeit hin, die Vortrocknung in Fällen, wo die auf sie entfallende Leistung verhältnismäßig groß ist, ohne Gefahr dadurch zu beschleunigen, daß für sie Luft mit einer höheren Kühlgrenze verwendet wird, als sie für den

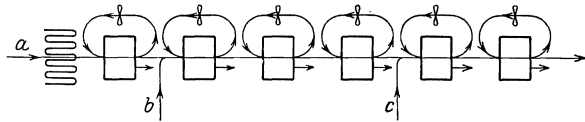
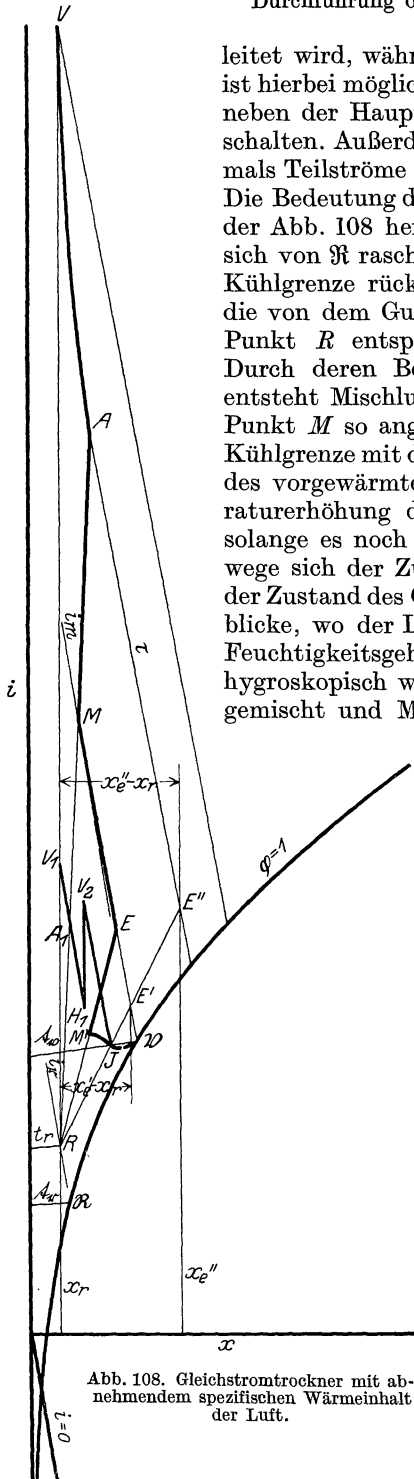


Abb. 107. Gleichstromtrockner mit abnehmendem spezifischen Wärmeinhalt der Luft.

Haupttrockenabschnitt nach Erreichung des Ausgleichszustandes zu-

lässig erscheint. Beim Gegenstromstufentrockner läßt sich dies durch Anwärmung der Luft vor der letzten Stufe verwirklichen. Die Verbesserung kann jedoch auch beim Gleichstromverfahren angewendet werden. Die Luft tritt mit höchstem Wärmeinhalt ein. An einer Stelle, wo die Vorwärmung nahezu vollzogen ist, erfolgt eine Herabziehung des Wärmeinhaltes dadurch, daß kalte Luft beigemischt wird. Bei diesem in Abb. 107 dargestellten Verfahren des Verfassers (D.R.P. 478324) wird der Zuluftstrom in zwei Teile geteilt, deren einer a über die Anwärmvorrichtung ge-

Durchführung des Trockenvorganges.



leitet wird, während der zweite b erst später zutritt. Es ist hierbei möglich und in vielen Fällen empfehlenswert, neben der Hauptluftbewegung Querströmungen einzuschalten. Außerdem ist es denkbar, statt einmal, mehrmals Teilströme zuzuführen, wie z. B. bei c angedeutet. Die Bedeutung dieses Verfahrens geht aus dem i - x -Bilde der Abb. 108 hervor. Der Zustand des Gutes bewegt sich von \mathfrak{R} rasch nach \mathfrak{B} , die Luft von V nach A . Ihre Kühlgrenze rückt auf den Wert τ und liegt höher als die von dem Gute noch ertragbare Höchsttemperatur. Punkt R entspreche dem Zustande der Frischluft. Durch deren Beimischung zu Luft vom Zustande A entsteht Mischluft vom Zustande M . In Abb. 108 ist Punkt M so angenommen, daß die ihm entsprechende Kühlgrenze mit der Punkt \mathfrak{B} zukommenden Temperatur des vorgewärmten Gutes zusammenfällt, eine Temperaturerhöhung des Gutes daher nicht eintreten kann, solange es noch feucht bleibt. Im weiteren Verlauf bewege sich der Zustand der Luft von M nach E , wobei der Zustand des Gutes bei \mathfrak{B} verharret. Ist in dem Augenblicke, wo der Luftzustand Punkt E erreicht hat, der Feuchtigkeitsgehalt des Gutes so weit gesunken, daß es hygroskopisch wird, so werde abermals Frischluft beigemischt und Mischluft vom Zustande M' gewonnen.

M' liege hierbei so, daß bei dem nachfolgenden Wärmeaustausch zwischen hygroskopischem Gut und Luft die im Grenzfalle sich bei J einstellende Beharrungstemperatur nicht höher liegt, als die der Eigenart des Gutes entsprechende Höchsttemperatur. Die Verbindungslinie RJ schneidet die durch M und A gehenden τ -Linien in den Punkten E' und E'' . Würde die Trocknung von Punkt A ab in gewöhnlicher Weise fortgesetzt, so entspräche, abgesehen von dem Wärmeverbrauch für die Vorwärmung, dem Streuverlust und der Abweichung zwischen τ - und i -Linie, der spezifische Wärmeverbrauch der Neigung der Geraden RE'' zur Waagerechten, wenn Punkt E'' zum Schlusse erreicht würde. Der Abstand $x_e'' - x_r$ bezeichnet die spezifische Trockenleistung, bezogen auf die erstmalig zugeführte Reinforme. Durch die Beimischung der Frischluft ändert sich

Abb. 108. Gleichstromtrockner mit abnehmendem spezifischen Wärmehalt der Luft.

an dem spezifischen Wärmeverbrauch nichts, wenn nur der Endzustand der Luft den Punkten E'' bzw. E' bzw. J entspricht. Da der Punkt A und der durch ihn bedingte Punkt E'' einen günstigen Wert des spezifischen Wärmeverbrauches, d. h. wirtschaftliche Verhältnisse, sichert, bedeutet dies, daß mit dem beschriebenen Verfahren günstigere Verhältnisse erreicht werden können, als wenn Nachheizung im Mehrstufenverfahren erfolgt. Denn im letzten Falle vollzieht sich die Trocknung etwa nach dem Linienzug $V_1 A_1 H_1 V_2 J$. Diesem Linienzug kommt geringeres Trockenpotential zu, als dem Verlauf $V A M E M' J$, d. h. die Trocknung erfolgt langsamer, erfordert daher größere und kostspieligere Vorrichtungen.

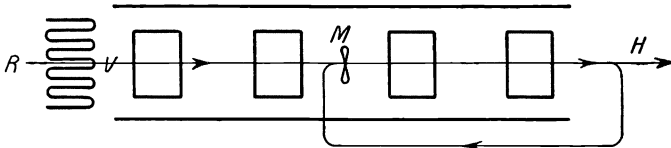


Abb. 109. Frischluft-Mischlufttrockner

Eine weitere Möglichkeit für Verfeinerung des Trockenverfahrens besteht darin, daß teilweise mit Frischluft-, teilweise mit Mischluft-trocknung gearbeitet wird, wie in Abb. 109 angedeutet. Die Teilstrecke zwischen den Punkten M und H wird von einer vergrößerten Luftmenge durchlaufen, die jedoch wegen der Herabsetzung der Trockenkraft durch Beimischung der Abluft milder wirkt. Beide Einflüsse heben sich teilweise auf. Arbeitet ein solcher Trockner im Gleichstrom, so erfährt das Gut im getrockneten Zustande eine noch weitergehende Schonung, als sie der Gleichstrom an sich bedingt.

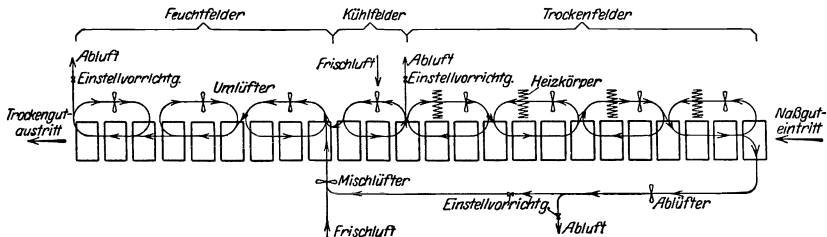


Abb. 110. Mehrstufenumlufttrockner (Schilder).

Als Beispiel für die außerordentliche Mannigfaltigkeit von Verbindungen einzelner Trockenverfahren ist in Abb. 110 das Schildesche Mehrstufenumlufttrockenverfahren dargestellt. Die Frischluft wird in zwei Ströme geteilt, deren einer sich mit Abluft vereinigt und die Aufgabe übernimmt, das getrocknete Gut zu kühlen und in gewissem Grade nachträglich wieder anzufeuchten, wie sich dies z. B. bei der Behandlung von Pappen empfiehlt. Luft und Gut wandern im Gleichstrom. Der zweite Luftstrom tritt etwa an gleicher Stelle ein, wandert jedoch dem Gut entgegen und vereinigt sich schließlich teilweise als feuchte Abluft mit dem ersten Strom, während der Rest entweicht. Unabhängig hiervon erfolgt in den einzelnen Abschnitten des Trockners ein Hilfs-

umlauf der Luft, der in dem eigentlichen Trockenteil mit stufenweiser Erwärmung verbunden ist. Auf diese Weise lassen sich Temperatur- und Feuchtigkeitsverhältnisse in willkürlicher Weise regeln und ein lebhafter Luftumlauf unabhängig von der Menge der Frischluft erhalten. Die in dem Gut enthaltene Überschußwärme wird in dem Kühlfeld teilweise auf den zweiten Frischluftstrom übertragen. Nach Angabe der Herstellerin erfährt in einem derart gebauten Pappetrockner die Luft in den Trockenfeldern eine 20- bis 30malige Erwärmung und wird so gut ausgenutzt, daß sie am Naßende des Kanals bei etwa 60° mit einem Feuchtigkeitsgrad von 0,7 bis 0,8 oder mehr entweicht.

Wird nach Abb. 111 das Trockengut durch zwei getrennte, stufenweise erwärmte Luftströme anfangs im Gleichstrom, zum Schluß im Gegenstrom getrocknet, so ergibt sich, verglichen mit reinem Gleichstrom eine niedrigere Temperatur des austretenden Gutes, verglichen mit reinem Gegenstrom ein langsames Ansteigen der Temperatur des eintretenden Gutes.

Hierher gehören auch die Trockenverfahren, bei denen das Gut nacheinander mehrere unabhängige Trockenvorrichtungen durchwandert. Jede kann hierbei durch einen beliebig geregelten Luftstrom versorgt sein, oder es können überhaupt verschiedenartige Trockenverfahren nacheinander angewandt werden. Beispiele hierfür bietet die Herstellung

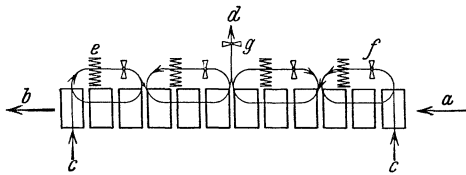


Abb. 111. Gleichstrom-Gegenstromtrockner.

von Ameisensäure nach dem Verfahren der Chemischen Fabrik Grünau, wobei unter Luftleere die Vortrocknung auf dampf-beheizten Walzen, die Nachtrocknung im Schaufeltrockner erfolgt, ferner die Fischmehlbereitung mit getrennter Vor- und Nachtrocknung, bei der gleichfalls Walzen- und Schaufeltrockner hintereinander geschaltet sind, schließlich die Mälzerei, bei der die Darren oder Trommeln für Vortrocknung und Abdarren hintereinander geschaltet werden. Da die Nachtrocknung hierbei eine nur teilweise Ausnutzung des Trockenmittels ermöglicht, bleibt in solchen Fällen anzustreben, das Trockenmittel hinter der Nachtrocknungsstufe noch zur Vortrocknung zu verwenden.

Bei den bisherigen Ausführungen handelt es sich durchweg um Anlagen, bei denen das Trockenbild unveränderlich ist, also örtlicher Beharrungszustand vorliegt. Auch in anderen Fällen, in denen sich das Trockenbild ständig ändert, können Verfeinerungen des Trockenverfahrens eintreten. An Stelle der örtlichen tritt die zeitliche Abstufung der Verhältnisse.

Bei der Kammertrocknung kann z. B. für die Vortrocknung Luft mit hohem Trockenpotential, also hoher Temperatur und niedrigem Feuchtigkeitsgehalt, angewandt und mit fortschreitender Trocknung durch Luft mit niedrigerem Wärmeinhalt ersetzt werden, oder es kann umgekehrt eine allmähliche Steigerung des Wärmeinhaltes eintreten,

z. B. bei einem mit Innenheizung versehenen Trockenraum dadurch, daß zeitweise ein und dieselbe Trockenluft in Umlauf gehalten wird.

Schließlich gehören hierher auch Vorrichtungen, bei denen das Trockenmittel in gewissen Abschnitten wechselt, z. B. die für die Trocknung von Ziegeln dienenden gangartigen Kammern, bei denen zuweilen für die Vortrocknung angewärmte Luft, für die Fertigtrocknung Verbrennungsgase angewandt werden. Begründet wird dieser Wechsel durch die Rücksicht einmal auf langsame Einleitung des Trockenvorganges unter Anwendung von Temperaturen, die 100° nicht überschreiten, dann auf die chemische Einwirkung des Trockenmittels, die bei hohem Feuchtigkeitsgehalt des Gutes im allgemeinen besonders lebhaft verläuft.

Eine noch weitergehende Annäherung an die Mehrstufentrocknung bei Vorrichtungen mit ständig wechselndem Trockenbild wird erreicht,

wenn statt einer mehrere Kammern zu einer Einheit verbunden sind und die Folge wechselt, in der das Trockenmittel die einzelnen Abteile nacheinander durchströmt. So zeigt Abb. 112 einen für die Verarbeitung von Wolle, Baumwolle, Seide, Kunstseide, Wirkwaren, Stranggarnen u. dgl. dienenden Mehrkammertrockner (Rud. Jahr) in verschiedenen Schaltungen. In der Darstellung *a* strömt die Luft zunächst von der ersten bis zur letzten Kammer, wird vor jedem Abteil erwärmt und tritt

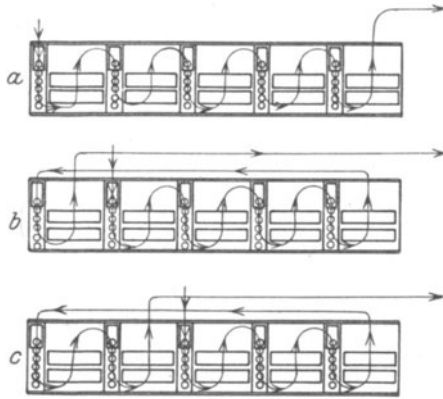


Abb. 112. Mehrkammertrockner (Rud. Jahr).

hinter der letzten Kammer ins Freie. Hierbei steht das in der ersten Kammer untergebrachte Gut unmittelbar vor der Entleerung. Das Gut der letzten Kammer ist gerade frisch eingeführt. Die Anlage arbeitet in einem zeitlich aufzufassenden Gegenstrom. Die Schaltung *b* entspricht einem folgenden Zeitabschnitt, in dem die erste Kammer entleert und mit nassem Gut neuerlich gefüllt ist, während die zweite sich dem Zustand der Fertigtrocknung nähert. In der Darstellung *c* ist die Trocknung um eine weitere Kammer fortgeschritten. Während bei einem Kanaltrockner das Gut allmählich oder ruckweise wandert, erfolgt hier eine ruckweise Veränderung des örtlichen Luftzustandes. Beide Einrichtungen ergeben daher eine um so weniger verschiedene Wirkung, je weiter die Unterteilung getrieben wird. Gegenüber dem Kanaltrockner, bei dem der Durchgang der einzelnen Stücke des Gutes zwangsläufig erfolgt, besteht bei dem Mehrkammertrockner die Möglichkeit, ungleichen Eigenschaften des Gutes dadurch Rechnung zu tragen, daß in dem Wechsel des Luftumlaufs eine mit langsamer trocknendem Gut gefüllte Kammer ein oder mehrmals übersprungen wird.

Auch bei der Kammertrocknung kann Mischluft während nur eines Teiles des Trockenvorganges angewandt werden. Der bei dem Kanaltrockner örtliche Wechsel tritt hier zeitlich auf, indem nach einer bestimmten Zeit eine Umschaltung von Frischluft- auf Mischlufttrocknung oder umgekehrt vorgenommen wird.

J. Maßnahmen zur Verteilung der Trockenwirkung. Bewegung von Gut und Trockenmittel.

Zur Vollkommenheit einer Trockenanlage gehört gleichmäßige Erfassung des Gutes hinsichtlich Temperatur und Feuchtigkeitsgehalt. Dies ist restlos bei geometrischen Gebilden, Punkten, Linien, Flächen möglich. Bei dem körperhaften Gut kann eine Annäherung erfolgen. Die maßgebenden Beziehungen hängen in verwickelter Weise von der Gestaltung und den Körpereigenschaften des Gutes ab und spielen bei einer bestimmten Gutsart eine um so wesentlichere Rolle, je größer die Stärkenabmessungen sind, durch die sich der wirkliche Körper von dem geometrischen Gebilde unterscheidet. Bei sehr vielen Arten von Trockengut sind die Dickenabmessungen verhältnismäßig gering. Die Ausbreitung der Trockenwirkung in die Tiefe erfolgt dann so schnell, daß der Zustand der tieferen Schichten gleich dem der Oberfläche angenommen werden kann. Unter dieser Voraussetzung lassen sich in einfacher Weise die Gesichtspunkte entwickeln, nach denen eine gleichmäßige Verteilung der Trockenwirkung anzustreben ist.

Temperatur und Feuchtigkeitsgehalt des Trockenmittels bestimmen, in dem Begriff des Trockenpotentials zusammengefaßt, den für die Trockenwirkung maßgebenden Zustand. Potentiallinien und Potentialflächen stellen die Verbindung von Punkten des vom Trockenmittel erfüllten Raumes dar, denen gleiches Trockenpotential zukommt.

In derselben Weise kann von einem Trockenpotential des Gutes gesprochen werden, das die für den Trockenvorgang maßgebenden Eigenschaften — Temperatur, Feuchtigkeitsgehalt und Dampfspannung — zusammenfaßt.

Vollkommene Gleichmäßigkeit der Trockenwirkung ergibt sich im Grenzfalle, wenn

a) die punktförmig gedachten kleinsten Teile des Trockengutes sich hintereinander in einer Stromlinie auf beliebigem Weg durch das Trockenfeld bewegen. Jedes einzelne Teilchen wird hierbei in gleicher Weise beeinflusst wie zuvor das vorausgehende und später das folgende;

b) die als unendlich dünne parallele Stäbe gedachten kleinsten Teile des Trockengutes sich hintereinander in einer Stromfläche so durch das Trockenfeld bewegen, daß die Stablinie stets mit Flächen gleichen Trockenpotentials des Trockenmittels zusammenfällt. Die einzelnen Stäbe werden hierbei sowohl in den verschiedenen Punkten ihrer Längenausdehnung als auch im ganzen untereinander gleichmäßig beeinflusst;

c) die als unendlich dünne parallele Platten gedachten kleinsten Teile des Trockengutes sich in einem Stromkörper so durch das Trockenfeld bewegen, daß die Plattenfläche stets mit Flächen gleichen Trocken-

potentials des Trockenmittels zusammenfällt. Hierbei werden die Flächen sowohl in den einzelnen Punkten der Platte als auch untereinander im ganzen gleichmäßig beeinflusst.

Als punktförmig kann Gut von Staub-, Pulver- und Körnerform, in weiterem Sinne auch der schaufelbare Körper ganz allgemein, betrachtet werden. Wird die Trockenvorrichtung z. B. durch eine sich drehende Heizfläche gebildet, die in der ganzen Achsenlänge gleiche Querschnittsform besitzt, und besteht längs den zur Achse parallelen Mantellinien gleiches Trockenpotential des Trockenmittels, so wird vollkommen gleichmäßige Trocknung erreicht, wenn die punktförmigen Einzelteile des Gutes sich in beliebiger Linie hintereinander über die Fläche bewegen. In der Regel läuft eine ganze Anzahl derartiger Stromlinien nebeneinander über den Umfang. Die Gleichmäßigkeit der Trocknung bleibt hierbei gewahrt, wenn alle Stromlinien mit gleicher Geschwindigkeit parallel zueinander verlaufen. Bei den hierunter fallenden Ausführungsformen von zylinderförmigen, geheizten Walzen, Röhrenbündeln mit zur Achse parallelen Rohren, Rohrschlangen mit zur Drehachse senkrechten Windungsebenen und Verbindungen dieser Grundformen läuft die Forderung gleichmäßiger Trockenwirkung auf die Bedingungen hinaus, die Heizfläche durch das Gut gleichmäßig zu betrieblen, und dem Gut in jedem einzelnen Teil einen in bezug auf die Drehachse gleichen Weg zuzuweisen. Hierzu tritt die weitere Voraussetzung, daß das Gut in dünner Schicht über die Heizfläche verteilt wird. Bei Röhrenbündeln oder Rohrschlangen läßt sich die Bedingung eines in bezug auf die Drehachse gleichen Weges aller Einzelteilchen im allgemeinen nicht erfüllen, weil das Gut in kleinerem oder größerem Abstand zur Achse niederrieselt. Hier sind alsdann Hilfsmaßnahmen erforderlich, die z. B. darin bestehen können, daß die Trocknung unter mehrmaligem Niederrieseln und gründlicher Durchmischung des Gutes erfolgt.

Besteht das Trockenmittel aus einem strömenden Gas, im allgemeinen erwärmter Luft, so bilden in der Regel, wenn für gleichmäßige Verteilung des Trockenmittels gesorgt wird, die zu einer Bewegungsrichtung senkrechten Ebenen Potentialflächen. Die nebeneinanderlaufenden Stromlinien punktförmigen Trockengutes bleiben daher gleichmäßigen Einflüssen unterworfen, wenn sie sich in gleichem oder entgegengesetztem Sinne mit dem Trockenmittel bewegen. Strömt dagegen das Trockenmittel senkrecht zu dem Gut, so wird durch dieses das Trockenfeld gestört, die Potentialflächen werden in Potentiallinien des Trockenmittels aufgelöst, die zur Bewegungsrichtung sowohl der Luft als auch des Gutes senkrecht stehen. Die Gleichförmigkeit der Trockenwirkung ist alsdann aufgehoben und nur durch Hilfsmaßnahmen, wie oben erwähnt, angenähert zu erreichen. Da die Störung des Trockenfeldes um so geringer wird, je kürzer der Weg des Trockenmittels ist, führt auch eine Verteilung des Gutes in Form eines dünnen Schleiers, dessen Ebene senkrecht zur Bewegungsrichtung des Trockenmittels steht, zum Ziele (Zerstäubungstrocknung). Hierbei ist vorausgesetzt, daß die Einzelteile des Gutes von gleicher Größe sind und gleiche Wege zurücklegen.

Das letzte ist z. B. der Fall, wenn der Trockenraum kreisförmigen Querschnitt des Luftweges besitzt und die Zerstäubung von der Mitte ausgeht. Ein Zwischenbild ergibt sich, wenn die Strömung des Gutes in der Hauptsache quer zum Trockenmittel gerichtet ist und eine ständige Durchmischung in der Weise erfolgt, daß die einzelnen Teile des Gutes sich zickzackförmig bald im gleichen, bald im entgegengesetzten Sinne mit dem Trockenmittel bewegen (Trockensäulen).

Besteht der kanalförmige Trockner aus einer umlaufenden Trommel, so ergibt sich die Forderung, das Gut über den ganzen Querschnitt möglichst gleichmäßig zu verteilen. Die Mittel hierzu sind zellenartige Einbauten, durch die das Gut entweder innerhalb der Einzelzellen ständig gewendet wird oder durch den ganzen Querschnitt von Zelle zu Zelle wandert, ferner Schaufeln am inneren Umfang der Trommel und Rührwerksvorrichtungen, die gegenüber der umlaufenden Trommel entweder feststehen oder im gleichen Sinne mit verschiedener Geschwindigkeit oder entgegengesetzt laufen.

Schwierigkeiten können sich dadurch ergeben, daß die mit der Bewegung verbundene Reibung des schaufelbaren Gutes bei empfindlicher Ware unerwünscht ist. Umgekehrt wirkt sie z. B. bei der Getreidetrocknung reinigend, indem sie die Sporen von der Hülse löst, so daß sie durch den Wind des Lüfters entführt werden können.

Stabförmige Form des Gutes tritt hauptsächlich bei künstlichen Erzeugnissen auf, z. B. bei Flachs- und Garnsträngen, bandartigen Geweben, Nudeln, Makkaroni u. dgl. Würde eine sich drehende Heizfläche für die Trocknung verwandt, deren Trockenpotentiallinien mit den Mantellinien zusammenfallen, so ergäbe sich gleichmäßige Trocknung nur dann, wenn die stabförmigen Einzelteile des Gutes mit den Mantellinien gleichlaufen. Solche Trockenvorrichtungen kommen kaum zur Anwendung.

Gleichmäßige Trocknung im Luftstrom ergibt sich bei stabförmigem Gut im allgemeinen dann, wenn die Stabachse senkrecht zur Luftbewegungsrichtung steht und das Gut sich gleich oder entgegengesetzt gerichtet zur Luft bewegt. Voraussetzung ist hierbei, daß die zur Luftbewegung senkrechten Ebenen Potentialflächen des Trockenmittels darstellen, was in der Regel zutrifft. Dies bedeutet, daß stabförmige Körper zweckmäßig in natürlicher Hängelage den waagrecht geführten Luftstrom durchwandern. Verlaufen die Stabachsen parallel zum Luftstrom, so führt dies zu einer Ungleichmäßigkeit der Trocknung, der dadurch begegnet werden kann, daß das Potentialgefälle des Trockenmittels niedrig gehalten wird. Das bedeutet, daß in solchen Fällen die Trockner eine große Längenausdehnung erhalten, wenn zwischen ein- und austretender Luft ein erhebliches Potentialgefälle besteht. Die Gleichmäßigkeit der Trockenwirkung ist auch dann aufgehoben, wenn Luft und Gut quer zueinander strömen.

Sehr zahlreich sind die Fälle, bei denen das Gut in Flächenform auftritt, z. B. als breites Band aus Papier, Gummi, Gewebe oder ausgewalztem Kartoffelbrei. Die übliche Trocknung, bei der das Gut stets in der gleichen Mantellinie auf die beheizte walzenförmige Trocken-

vorrichtung aufgetragen und an einer anderen stets gleichen Mantellinie abgenommen wird, ergibt keine vollkommene Gleichmäßigkeit des Trockenvorganges, auch dann nicht, wenn die Stärke des Gutes, senkrecht zu seiner Dicke gemessen, verschwindend klein ist. Diese Gleichmäßigkeit besteht nur längs der Mantellinien, die mit der Bandbreite zusammenfallen, so daß z. B. Spannungen in der Längsrichtung auftreten, denen die Ausbildung der Trockenvorrichtung Rechnung zu tragen hat. Diese Ungleichförmigkeit spielt in der Regel keine Rolle, weil die so behandelten Arten von Gut entweder genügend elastisch oder aber, wie bei Kartoffelbrei, Reißbildungen unbedenklich sind. Ist die Dickenabmessung des Bandes erheblich, so kann bei plastischen Körpern die Gleichmäßigkeit der Trockenwirkung dadurch erhöht werden, daß während der Fortbewegung ein Durchkneten des Gutes erfolgt.

Das bandartige Gut kann auch in strömender Luft getrocknet werden. Dieses Verfahren kommt ferner für Gut von Tafelform, z. B. bei der Trocknung von Pappe, Leder, Leim, lackierten Blechen, photographischen Trockenplatten in Betracht. Im weitesten Sinne fallen hierunter auch Ziegel, Bretter, Zuckerbrote, bei denen allerdings wegen der erheblichen Stärkenabmessungen die Körper-eigenschaften wesentlichen Einfluß besitzen.

Bewegen sich plattenartige Körper gleich oder entgegengesetzt dem Luftstrom, so wäre Anordnung der Plattenebene senkrecht zur Luftbewegungsrichtung Voraussetzung für Gleichmäßigkeit der Trockenwirkung. Sie ist im allgemeinen deshalb nicht möglich, weil hierdurch die gleichmäßige Verteilung der Luft über die Plattenflächen gestört und dadurch die Potentialflächen des Trockenmittels verändert werden. Die natürliche Anordnung ist daher Verlauf der Plattenebene parallel zur Luftbewegungsrichtung, bei der allerdings die Trockenwirkung insofern ungleichförmig bleibt, als nur die Schnittlinien der Plattenflächen mit den im allgemeinen senkrecht zur Luftströmung verlaufenden Potentialflächen des Trockenmittels gleichen Bedingungen ausgesetzt sind. Der Mangel wird dadurch behoben, daß das Potentialgefälle um so niedriger gehalten wird, je größer die Plattenausdehnung, in Richtung der Luftbewegung gemessen, ist. Bewegen sich Gut und Luft quer zueinander, und stehen die Plattenebenen parallel zur Luftbewegungsrichtung, so wird die Ungleichmäßigkeit der Trockenwirkung noch größer und jeder einzelne Punkt des Gutes in anderer Weise beeinflußt. Bei so angeordneten Trockenvorrichtungen ist es daher nötig, durch mehrfachen Umlauf der querströmenden Luft das Potentialgefälle in Richtung der Luftbewegung zu erniedrigen. Eine weitere Verbesserung wird dadurch erzielt, daß der Querstrom des Trockenmittels in zahlreiche Teilströme aufgelöst wird und die dem ersten Teilstrom zugeführte Frischluft nacheinander alle Stufen durchläuft. Die von Stufe zu Stufe strömende Luft übernimmt hierbei nur die Aufgabe, die verdunstete Feuchtigkeit wegzuführen, während die Querluftströme die Trockenwirkung hinsichtlich Gleichmäßigkeit, daneben auch, infolge der Verbesserung der Wärmeübertragung durch Steigerung der Luftgeschwindigkeit, hinsichtlich Trockendauer verbessern. Mit der Luftgeschwindigkeit

keit kann hierbei bis zu der Grenze gegangen werden, die durch die Beschaffenheit des Gutes bedingt ist und einerseits durch die Gefahr des Mitreißens im Luftstrom, andererseits durch die zulässige Trockengeschwindigkeit bestimmt wird. Es ist selbstverständlich ein Trugschluß, wenn angenommen wird, daß durch den Hilfsquerumlauf die Aufenthaltsdauer der Luft verlängert werde, denn diese hängt nur von dem Verhältnis $\frac{\text{Luftinhalt der Trockenvorrichtung}}{\text{stündliche Abluftmenge}}$, d. h., bei gegebenem

Querschnitt der Trockenvorrichtung, nur von der Geschwindigkeit des von Stufe zu Stufe tretenden Hauptluftstromes ab. Günstigere Ausnutzung der Trockenluft durch verlängerte Berührung mit dem Gut ist daher nicht, wie häufig angenommen wird, durch Vergrößerung der Querluftgeschwindigkeit, sondern nur durch Vergrößerung des Fassungsvermögens der Trockenvorrichtung, z. B. bei einem kanalartigen Trockner durch Erweiterung des Querschnittes oder Verlängerung zu erreichen.

Im vorstehenden war eine ständige Bewegung des Gutes und Trockenmittels vorausgesetzt. Sie findet auch fast ausnahmslos statt, wenn beheizte Flächen das Trockenmittel bilden. Dagegen ruht das Gut nicht selten, wenn Luft oder andere geeignete Gase als Trockenmittel angewandt werden. Bedingung für Gleichmäßigkeit des Trockenvorganges ist alsdann, daß bei punktförmigem Gut Ausbreitung in dünne Schicht erfolgt und gleichzeitig das Trockenmittel senkrecht zu der durch das Gut gebildeten Fläche strömt (Darre). Bei stabförmigem Gut in Hängelage soll die in Richtung der Luftbewegung gemessene Schichtstärke, d. h. die Anzahl Stäbe, in der Stromrichtung gemessen, gering sein. Schließlich lautet für flächenförmiges Gut die Vorschrift, möglichst wenig Flächen in der Stromrichtung aufeinander folgen zu lassen. Um der Ungleichheit zu begegnen, die in allen Fällen trotz der verringerten Schichtstärke verbleibt, sind die erwähnten Mittel anzuwenden, wie mehrfacher Luftumlauf zur Verringerung des in Richtung der Luftbewegung gemessenen Potentialgefälles, Durcharbeiten schaufelförmigen Gutes. Hierher gehören auch besondere Kunstgriffe, wie zeitweise Umkehr der Luftbewegungsrichtung, dauerndes oder zeitweises Drehen plattenförmigen Gutes u. dgl.

Die gleichmäßige Verteilung des Trockenpotentials im Trockenmittel muß durch besondere Maßnahmen gesichert werden.

Besteht das Trockenmittel aus einer beheizten Fläche, so entspricht der Forderung, das Potential, d. h. hier die Oberflächentemperatur der Heizfläche, möglichst gleichzuhalten, die Verwendung von Stoffen mit hoher Wärmeleitfähigkeit, d. h. Metallen, daneben die Vermeidung von Verschiedenheiten in der Einwirkung des in der Regel aus Dampf bestehenden Heizmittels. Die Temperaturgleichheit kann sich hierbei auf die Teile beschränken, in denen mit gleichem Potential gerechnet wird, also z. B. bei walzenartigen Trockenvorrichtungen die Mantellinien, während über dem Umfang der Walze verschiedene Temperaturen auftreten dürfen. Sie werden an der Auftragestelle des Gutes schon wegen der höheren Wärmeleitfähigkeit, die dem feuchteren Stoff in der Regel zu-

kommt, niedriger sein als an der Abführungsstelle. In diesem Sinne ist die Ansammlung von Niederschlagwasser in den unteren Teilen dampf-beheizter Zylinder wegen der Verschlechterung des Wärmedurchgangs unerwünscht, auf die Gleichmäßigkeit der Trocknung dagegen von untergeordnetem Einfluß. Andererseits äußert sich eine über die Zylinderlänge ungleiche Dampfverteilung in einer Verschiedenheit der Wandtemperatur und damit der Trockenwirkung. Beispielsweise hat Kaiser¹ beobachtet, daß der axial einströmende Dampf bei den Trockenzyklern von Papiermaschinen auf dem der Eintrittsseite entgegengesetzten Mantelumfang eine um mehrere Grad höhere Wandtemperatur ergab als auf der entgegengesetzten Seite, und daß der Unterschied zurückging, wenn durch Verbesserung der Verteilung der einseitige Aufprall des Dampfes gemildert wurde.

Bei Luft oder einem anderen Gas als Trockenmittel sind die im allgemeinen senkrecht zur Luftbewegungsrichtung verlaufenden Flächen gleichen Potentials vor dem Auftreffen auf das Gut durch innige Durchmischung des Trockenmittels herzustellen und während des Durchströmens des Gutes zu erhalten. Durch Veränderung des Potentials senkrecht zu den Potentialflächen wird die Voraussetzung nicht gestört. So kann z. B. bei Kanalstufentrocknern zunächst warme und feuchte, danach warme und trockene, schließlich kalte und feuchte Luft angewandt werden, ohne daß die gleichmäßige Trockenwirkung auf die einzelnen Teile des Gutes leidet. Gleichmäßige Luftbeschaffenheit über den Potentialflächen wird im allgemeinen schon durch Anwendung genügend hoher Geschwindigkeiten gesichert. Denn bei Geschwindigkeiten, die unterhalb des kritischen Wertes liegen, ergibt sich der für die Querschnittsmitte geltende Höchstwert etwa gleich dem Doppelten des Mittelwerts. Hierbei sinkt die Geschwindigkeit von der Mitte gegen die Wandung zu allmählich auf Null. Bei turbulenter Strömung dagegen beträgt die Höchstgeschwindigkeit nur etwa das 1,2fache der mittleren Geschwindigkeit und nimmt in der Wandnähe rasch auf Null ab. Bei dem rechteckigen Querschnitt, den die Trockenkanäle häufig besitzen, tritt darüber hinaus eine Störung dadurch ein, daß die Geschwindigkeit in den Ecken niedriger ist als am übrigen Umfang, wenn Punkte in gleicher Entfernung von der Wand verglichen werden. Hieraus folgt, daß es richtig ist, den Kanal über das Maß des von dem durchwandernden Gut eingenommenen Querschnitts allseitig zu erweitern, um die in der Nähe der Wandungen sich bildenden Zonen niedriger Geschwindigkeit auszuschalten. Hierbei ist nicht zu befürchten, daß längs der Kanalwandungen Teile des gesamten Luftstromes unausgenutzt durch den Trockner ziehen, wenn die mittlere Geschwindigkeit oberhalb des kritischen Wertes gehalten und damit eine ständige Durchwirbelung gesichert ist. Lenkflächen an den Wänden führen zu stehenden Randwirbeln und zu einer Erhöhung der Luftgeschwindigkeit in dem freien Kanalquerschnitt. Sie haben daher recht zweifelhaften Wert und er-

¹ Kaiser: Das Verhalten von Papiermaschinen beim Betrieb mit Satt- und Heißdampf. Z. Bayer. Rev. Ver. 1930.

geben meist, anstatt der angestrebten Verbesserung, eine Vergrößerung der Unregelmäßigkeit.

Bei starken Querschnittsänderungen, wie sie in der Regel an der Ein- und Austrittsstelle der Luft auftreten, genügt es nicht, durch schräge Überführung der verschiedenen Querschnitte eine gleichmäßige Luftverteilung vorzutauschen. Diese tritt nicht ein, wenn der Neigungswinkel der Seiten zur mittleren Strömungsrichtung etwa 15° überschreitet. Vielmehr löst sich die Luft von der Wandung los. Es ist daher zweckmäßig, den Luftstrom durch eingebaute Leitwände so zu unterteilen, daß der durch zwei benachbarte Leitflächen begrenzte Teilstrom die zulässige Querschnittserweiterung nicht überschreitet. In dieser

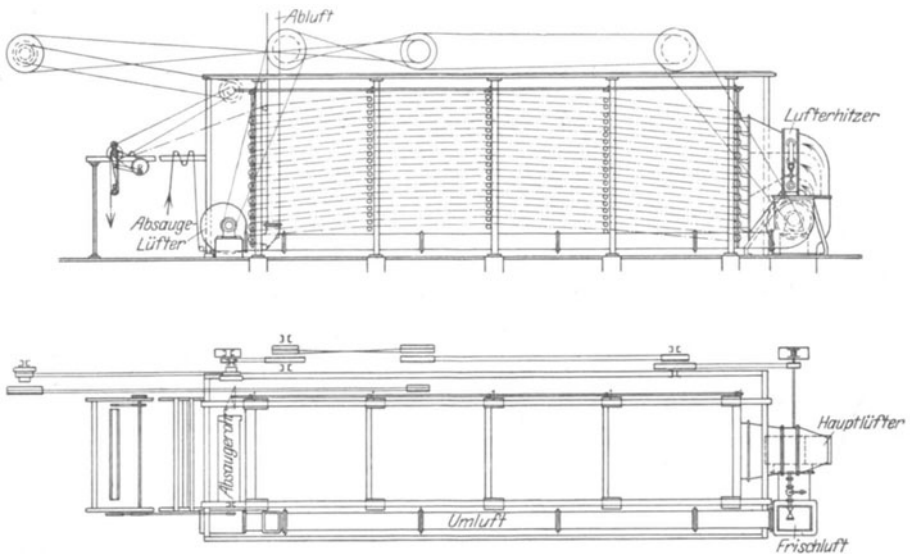


Abb. 113. Gewebetrockner (Zittau).

Weise ist die Trockenvorrichtung der Abb. 113 (Zittau) ausgebildet, bei der die Unterteilung sowohl zwischen Lüfteraustritt und Lufterhitzer, als auch zwischen dem letzten und dem Eintritt in die Trockenvorrichtung erfolgt. Ähnliche Maßnahmen sollten auch für die Austrittsstelle der Trockenluft in um so höherem Maße Anwendung finden, je größer die Luftgeschwindigkeit ist und je mehr eine künstlich erzwungene Luftbewegung von der natürlichen abweicht; denn eine ungleichmäßige Absaugewirkung kann ein Zusammendrängen der gleichmäßig verteilt eintretenden Luft gegen die Austrittsstelle zur Folge haben. Findet die Luft beim Ein- und Austritt ungewöhnlich große Querschnitte, wie dies z. B. bei Kanaltrocknern vorkommt, wenn die Luft sich senkrecht zur Kanalachse bewegt, so liegt die Ein- und Austrittsgeschwindigkeit häufig zu niedrig, um durch Unterteilung des Stromes eine gleichmäßige Verteilung zu erreichen. In solchen Fällen kann nach Abb. 114 (Daqua) durch Drosselung der Übertrittsquerchnitte das Ziel erreicht werden.

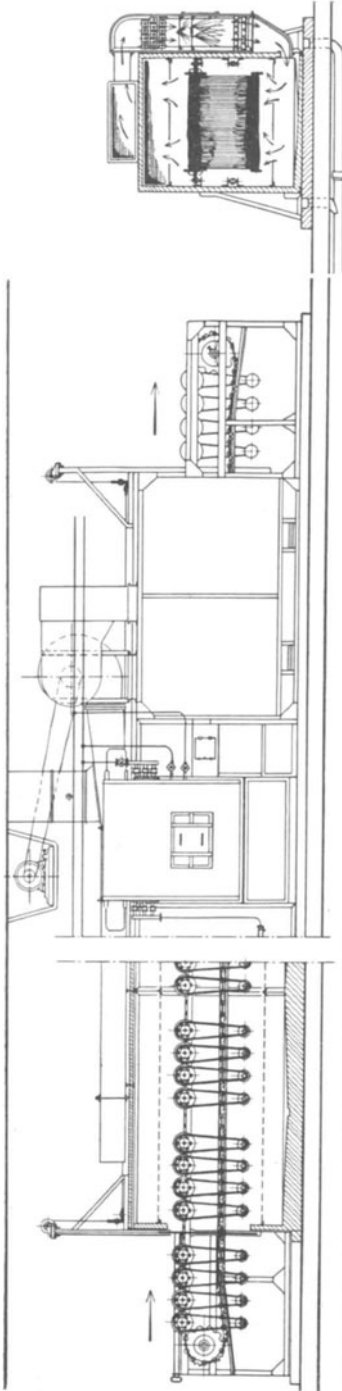


Abb. 114. Trocknungs- und Befeuchtungsvorrichtung für Garne (Daqua).

Zwischenböden und Zwischendecken mit verhältnismäßig kleinem freiem Durchlaß verhindern, daß die unten eintretende Luft einseitig nachströmt, gleichzeitig sichern sie eine Ausbreitung des

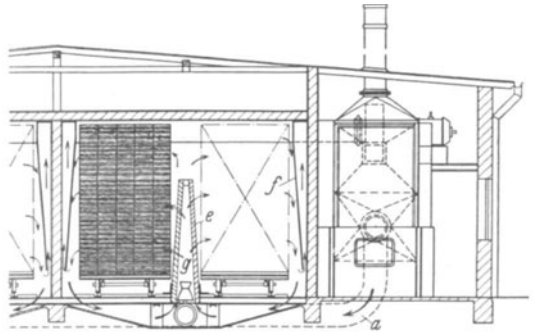


Abb. 115. Holztrockenkammer (Hahag).
 a Zuluft. b Umluft, c Lüfter, d Lufterhitzer, e Lenkflächen, f Leitwand, g Mischdüse.

ein- und austretenden Luftstromes in Richtung der Kanalachse über das beschränkte, durch den Anschluß bedingte Maß hinaus. Werden solche Verteilwände aus einzelnen verschiebbaren Teilen hergestellt, so läßt sich nachträglich durch

den Versuch der Luftumlauf einwandfrei regeln. Bei dem Trockner nach Abb. 115 (Hahag) wird die senkrecht von unten einströmende Luft durch Lenkflächen nach beiden Seiten verteilt und waagrecht gerichtet. Dort, wo die Luft das Trockengut verläßt und niedersinkt, ist die Wandbegrenzung schräg gehalten, um eine ungleichmäßige Rückwirkung von dieser Seite auf die Mitte zu verhindern. Verfeinerte Maßnahmen, wie sie hier angedeutet sind, haben nur Aussicht auf Erfolg, wenn die Luft die durch das Trockengut gebildeten Luftwege

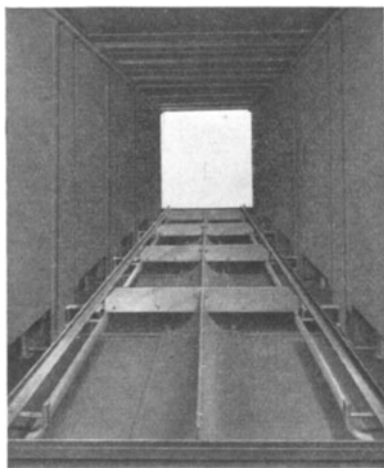


Abb. 116. Innenansicht des Trockenkanals mit Leitwänden für den Querluftstrom (Zittau).

mit einer Geschwindigkeit erreicht, die ein mehrfaches des durch die natürliche Luftbewegung bedingten Maßes darstellt. Nach Abb. 115 wird dies dadurch angestrebt, daß die im Trockenraum umlaufende Luftmenge auf ein Vielfaches der eintretenden Luftmenge gebracht wird. Diese dient als Treibmittel für ein Düsenrohr, durch das die Umluft in Bewegung gehalten wird. Die Anwendung von Leitwnden zur Führung und Verteilung des Querluftstromes bei Stufentrocknern zeigt Abb. 116 (Zittau). Der Querschnitt des Trockners soll möglichst gleichmäßig sein. Wo die örtliche Überwachung seitliche Ausbauten nötig macht, muß die Bildung stehender Luftwirbel durch feste oder nachgiebige Blenden (Türen, hängende Tücher) vermieden werden. Dasselbe gilt für die unregelmäßigen Teile des Trocknerquerschnittes, die durch den Antrieb u. a. eingenommen werden.

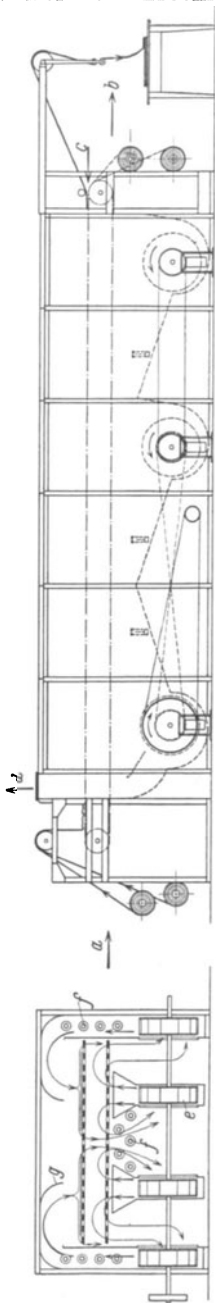


Abb. 117. Bandtrockner (Haas). a Einlaufseite, b Auslaufseite, c Frischluft, d Abluft, e Lüfter, f Lufterhitzer, g Leitwände.

Die Gleichmäßigkeit der Verteilung des Gutes bezieht sich stets auf die Potentialflächen des Trockenmittels, bei einem quer durchströmten Bandrockner also auf die Schichtstärke. Damit diese gleich wird, sind Randeinflüsse auszuschalten und beispielsweise die natürliche Böschung schaufelfähigen Gutes durch seitliche Wände aufzuheben. Strömt bei einem Bandrockner die senkrecht auf das undurchlässige Gut aufgeblasene Luft seitlich über die Ränder weg ab, so sind für ihre geregelte

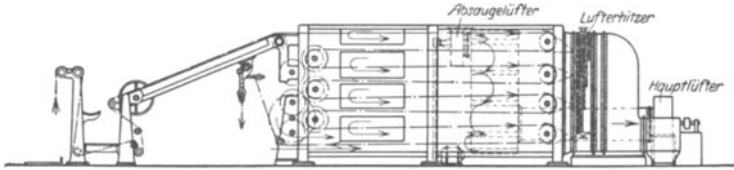


Abb. 118. Gewebetrockner (Kettling & Braun).

Führung ungewöhnliche Maßnahmen am Platze, wie sie nach Abb. 117 (Haas) angewandt werden. Denn die Prallwirkung ergibt eine außerordentlich günstige Wärmeübertragung. Unregelmäßigkeiten zeigen sich daher in besonderem Ausmaße durch ein Zurückbleiben der von der Aufprallstelle entfernteren Teile des Gutes in der Trockenwirkung. Die Zuhilfenahme zahlreicher Lüfter für Erzielung einer verfeinerten Luftverteilung erscheint berechtigt, wenn, wie im dargestellten Falle, eine besonders hohe Trockengeschwindigkeit erzielt und daneben die Behandlung empfindlichen Gutes ermöglicht wird. Bei einem Kanalstufentrockner mit Hilfsquerumlauf verlaufen die Potentialflächen des Trockenmittels senkrecht zur Richtung der Umluft, also parallel zur Richtung des in der Kanalachse fließenden Hauptluftstromes. Hier ist daher nicht etwa der ganze Kanalquerschnitt

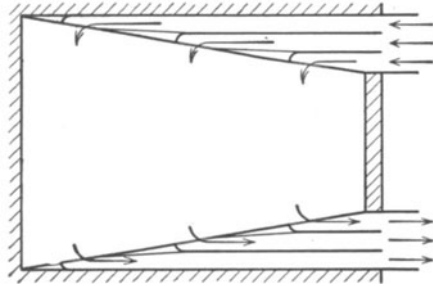


Abb. 119. Kammertrockner.

gleichmäßig mit Gut auszufüllen, sondern im Gegenteil ein Abrücken des Gutes von den Kanalwänden dort wünschenswert, wo der Querluftstrom ein- und austritt, um seine Ausbreitung zu erleichtern. Läuft das Gut in einem kanalartigen Trockner in mehreren bandartigen Schichten übereinander, so ist es nach Abb. 118 (Kettling & Braun) nötig, die Luft vor dem Eintritt über die durch je zwei Schichten gebildeten Teilkanäle gleichmäßig zu verteilen. Strömt bei einem Kammertrockner die Luft von einer Wand zur anderen, so ist ihre gleichmäßige Verteilung über die ganzen Wandflächen zu sichern. Dazu ist es nötig, die Wände mit zahlreichen, geregelt verteilten Öffnungen zu versehen und jeder Öffnung die gleiche Luftmenge zuzuführen. Ist die Längenausdehnung eines solchen Kammertrockners groß und sind die Luftkanäle in der Längsrichtung angeordnet, so kann die gleichmäßige

Verteilung über die ganze Länge entweder dadurch angestrebt werden, daß die Öffnungen auf eine mit ihrer Entfernung von der Lufteintrittsstelle veränderliche Weite einstellbar sind, oder dadurch, daß nach Abb. 119 der Luftstrom zerteilt wird. Ein nicht zu kleiner Abstand zwischen Luftverteilungskanal und Trockengut fördert die gleichmäßige Ausbreitung der Luft über den ganzen Kammerquerschnitt.

Bei den vorausgehenden Erwägungen ist mit Luftgeschwindigkeiten gerechnet, denen gegenüber die durch den natürlichen Auftrieb bedingte Luftgeschwindigkeit keine Rolle spielt. Ist dagegen die Luftgeschwindigkeit so niedrig, daß der Einfluß der natürlichen Luftbewegung überwiegt, so sind Maßnahmen für künstliche Erhaltung von Trockenpotentialflächen nicht nur entbehrlich, sondern schädlich. Die Luftverteilung soll alsdann so erfolgen, daß der natürliche Luftlauf unterstützt wird. Der sich durch ihn ergebenden Potentialverteilung hat sich die Verteilung des Gutes anzupassen. In besonderem Maße spielen diese Gesichtspunkte eine Rolle, wenn durch turmartige Ausbildung der Trockenvorrichtung lebhaftere natürliche Luftbewegung entsteht.

Der natürliche Luftumlauf.

In Abb. 120 ist, abhängig von der Temperatur als Abszisse, der Teildruck $P_D = \varphi \cdot P''$ des in feuchter Luft enthaltenen Dampfes als Ordinate für verschiedene Feuchtigkeitsgrade φ eingetragen. Der Abstand eines beliebigen Punktes von der in einer Ordinatenhöhe $P = 10000 \text{ kg/m}^2$ gezogenen Parallelen zur Abszissenachse ergibt für diesen Gesamtdruck den Teildruck P_L der Luft. Mit Abb. 120 läßt sich Abb. 121 finden, die, abhängig von der Temperatur als Abszisse, das spezifische Gewicht

$$\gamma = \frac{10000}{29,27(t + 273)} - 0,0129 \cdot \varphi \cdot P''$$

als Ordinate darstellt. Eine Parallele zur Abszissenachse schneidet die γ -Kurven in Punkten gleicher γ -Werte. Diese sind in Abb. 122 in das i - x -Bild übertragen. Aus ihm läßt sich ablesen:

Luft, die erwärmt wird, ohne ihren Feuchtigkeitsgehalt zu verändern — Bewegung des Zustandspunktes längs der Ordinaten aufwärts —, wird leichter. Diese Verhältnisse gelten z. B. für die außerhalb der Trockenvorrichtung angebrachte Vorwärmkammer. Die Luftführung hat hier zweckmäßig unten, die Luftentnahme oben zu erfolgen.

Luft, die Feuchtigkeit aufnimmt, ohne ihren Wärmehalt zu verändern — Bewegung des Zustandspunktes längs der i -Linien abwärts —, wird schwerer. Das gleiche gilt, wenn der Zustand der Luft sich längs der τ -Linien verändert. Innerhalb der Trockenvorrichtung besitzt die Luft das Bestreben, längs des Gutes niederzusenken, vorausgesetzt, daß Innenheizung fehlt. In solchen Fällen erfolgt naturgemäß die Luftführung oberhalb, die Luftentnahme unterhalb des Gutes.

Luft, die Feuchtigkeit aufnimmt, ohne ihre Temperatur zu verändern — Bewegung des Zustandspunktes längs der Isothermen nach rechts —, wird leichter. Ist daher Innenheizung vorhanden und so ver-

teilt, daß die Temperatur bei wechselndem Feuchtigkeitsgehalt gleichbleibt, so wird zweckmäßig die Einführung der Luft unterhalb, die Ableitung oberhalb des Gutes angeordnet.

Zwischen den beiden letzterwähnten Beziehungen tritt ein Grenzfall dann ein, wenn Nachheizung in geringerem Maße und gerade so stark erfolgt, daß der Luftzustand im $i-x$ -Bild sich längs der γ -Linie bewegt.

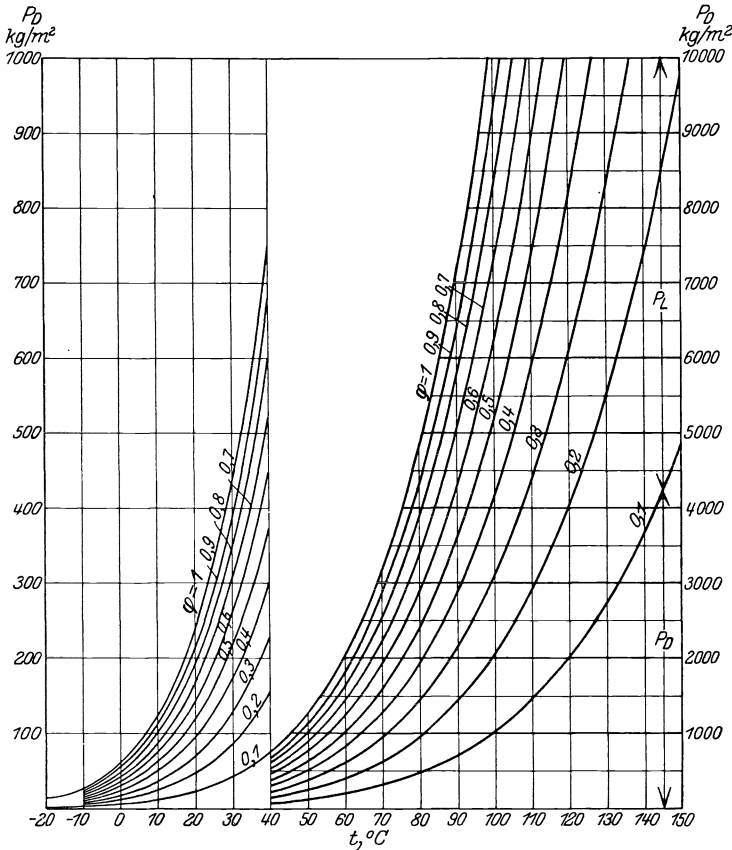


Abb. 120. Teildrücke in feuchter Luft bei $P = 10000 \text{ kg/m}^2$ Gesamtdruck.

Es herrscht alsdann Gleichgewicht, und die Stelle des Luftein- und -austritts ist gleichgültig.

Den natürlichen Luftumlauf stellt Abb. 123 für eine außenbeheizte, Abb. 124 für eine außen- und innenbeheizte Trockenvorrichtung dar, wenn im letzten Falle die Temperatur im Trockenraum auf unveränderlicher Höhe gehalten wird. Innenheizkörper, die nicht nach Abb. 124 über das Gut verteilt, sondern nach Abb. 125 oberhalb des Gutes angeordnet sind, wirken nur wie eine Vorheizung im Sinne der Abb. 123. Anordnung der Innenheizkörper am Boden nach Abb. 126 ergibt einen unregelmäßigen Luftumlauf, der sich sowohl auf den von der Heizvorrich-

tung als auch auf den vom Gut eingenommenen Raum erstreckt. Wird aus besonderen Gründen gleichwohl diese Ausführung gewählt, so kann es empfehlenswert sein, unter Anwendung hoher Luftgeschwindigkeit die Luftbewegung der natürlichen entgegengesetzt von unten nach oben über das Gut zu leiten. Dies gelingt bei Verwendung eines Lüfters, der die Abluft an höchster Stelle absaugt.

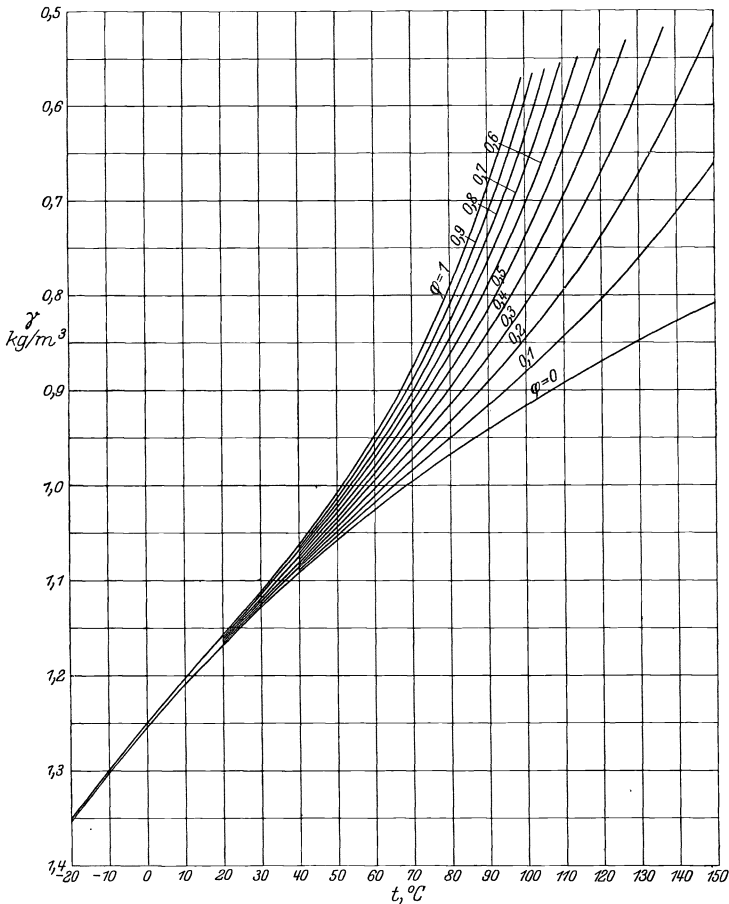


Abb. 121. Spezifisches Gewicht feuchter Luft.

Eine Störung des natürlichen Luftumlaufes kann durch den Einfluß der im allgemeinen kälteren Umgebung auftreten. An den außenliegenden Wänden der Heizkammer wird der Auftrieb vermindert, in Ausnahmefällen die Bewegung umgekehrt. Für Trockenräume ohne Innenheizung bedeutet die Abkühlung der Außenwände eine Verstärkung der abwärtsgerichteten Hauptbewegung.

Einhaltung der natürlichen Luftbewegung hat in der Regel zur Folge, daß die oberen Teile des Gutes wegen des höheren Trocken-

potentials der Luft fertig trocknen, ehe die unteren Teile genügend entfeuchtet sind. Der Nachteil läßt sich nach dem Verfahren des Verfassers dadurch vermeiden, daß vor vollständiger Austrocknung der oberen Teile die Eintrittshöhe der Luft gesenkt wird. Der Umlauf vollzieht

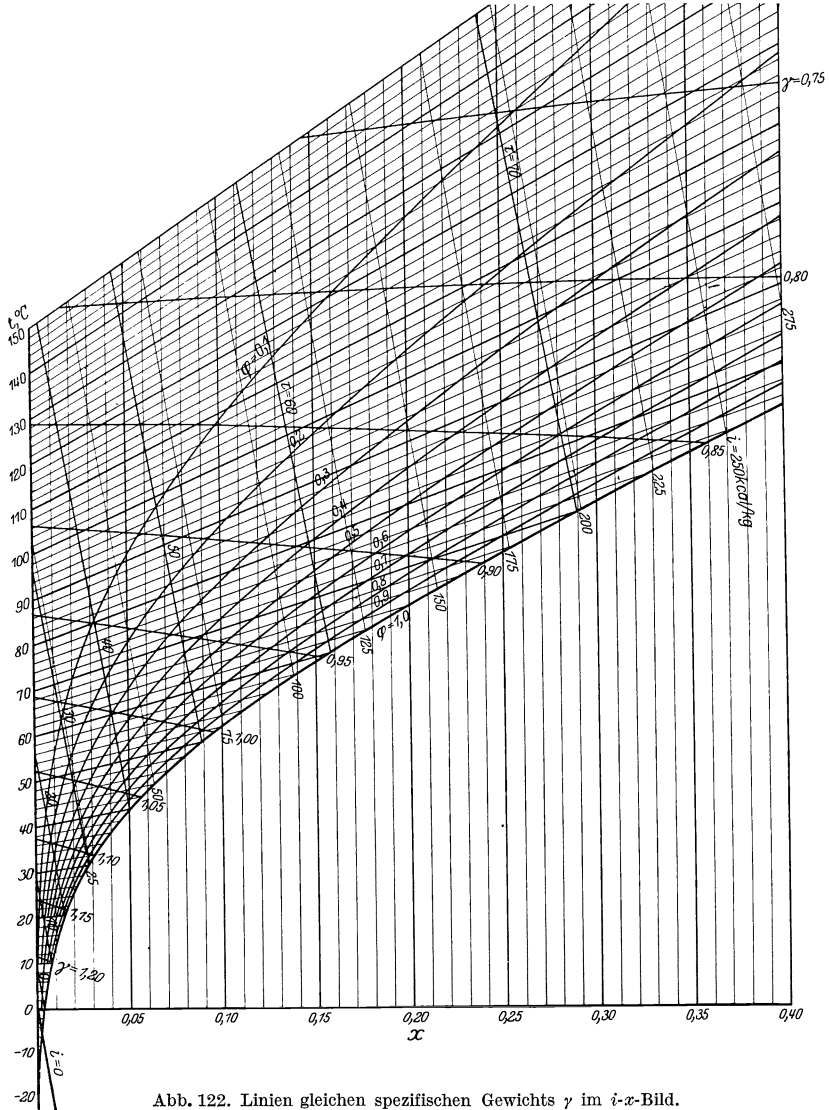


Abb. 122. Linien gleichen spezifischen Gewichts γ im i - x -Bild.

sich alsdann nach Abb. 127. Der aus dem Kreislauf ausgeschaltete obere Teil der Trockenvorrichtung wird von Luft erfüllt, deren Zusammensetzung dem Zustand am Eintritt entspricht. Ihre Trockenwirkung wird jedoch durch die wegfallende Luftbewegung verringert, so daß

Fertigtrocknung in den verschiedenen Höhenlagen gleichzeitig gelingt. Dies erklärt sich auch daraus, daß in die stillstehende obere Schicht Feuchtigkeit entgegen der natürlichen Luftströmung diffundiert. In ähnlicher Weise wirkt die Diffusion ausgleichend bei fehlerhafter Luftführung, wenn z. B. bei einer nach Abb. 123 oder Abb. 125 angeordneten Trockenvorrichtung die Abluft nicht unten, sondern oben weggeführt wird.

Die Lebhaftigkeit des natürlichen Luftlaufes wird durch die Anordnung von Schächten mitbestimmt, denen Zuführung der Frischluft und Wegschaffung der Abluft zufällt. Der Zug muß im Frischluft-

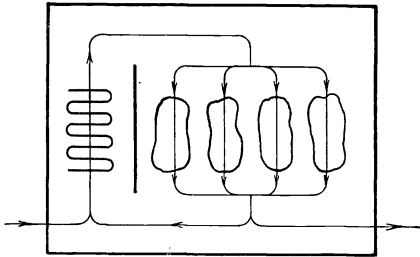


Abb. 123. Natürlicher Luftumlauf bei äußerer Vorwärmung der Luft.

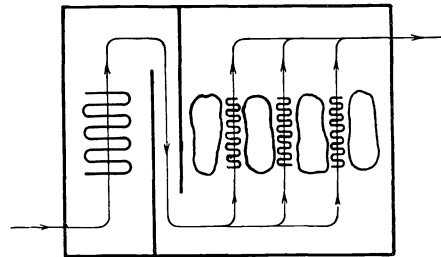


Abb. 124. Natürlicher Luftumlauf bei äußerer Vorwärmung der Luft und innerer Nachheizung auf gleichbleibende Lufttemperatur.

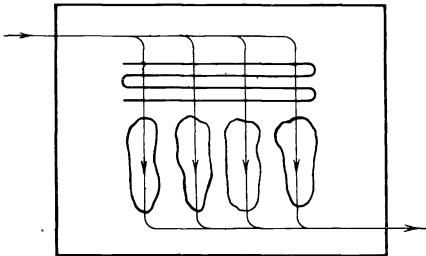


Abb. 125. Natürlicher Luftumlauf bei innerer Vorwärmung der Luft oberhalb des Gutes.

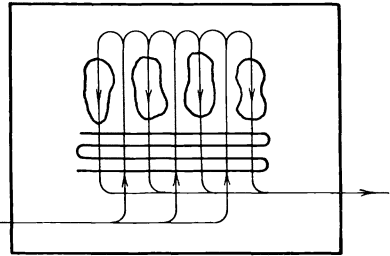


Abb. 126. Natürlicher Luftumlauf bei innerer Vorwärmung der Luft unterhalb des Gutes.

schacht negativ, nach dem Innern der Trockenvorrichtung gerichtet, im Abluftschacht positiv, nach außen gerichtet, sein. Die Zugstärke hängt von der Höhe der Luftsäule und dem Unterschied ihres spezifischen Gewichtes gegenüber dem der Außenluft ab. Da γ bei gleicher Temperatur mit Zunahme des Wassergehaltes sinkt, besteht bei dem Abluftschacht positive Zugwirkung auch dann noch, wenn die Temperatur im Trockenraum ebenso hoch ist wie die äußere, da der Feuchtigkeitsgehalt der Außenluft stets niedriger ist als der der Abluft. Beim Frischluftschacht, der von Luft in einer der Umgebung entsprechenden Beschaffenheit angefüllt ist, steht am Austrittsende in die Heizkammer oder den Trockenraum selbst Luft, die wärmer und im letzten Falle auch von höherem Feuchtigkeitsgehalt, daher aus doppelten Gründen leichter ist. Es kann daher eine Umkehr der Luftbewegung eintreten, der

Frishluftschaft als Abluftschaft wirken und umgekehrt. Abb. 128a zeigt, wie verhängnisvoll dies werden kann, wenn die angewärmte Luft aus der Heizkammer ungenutzt nach außen strömt und der Trockenraum selbst nur kalte Luft erhält. Nach Abb. 128b kann der falsche Umlauf durch Handhabung von Öffnungen verhütet werden, die das Entstehen einer Zugwirkung im Frishluftschaft verhindern und die Zugwirkung im Abluftschaft dadurch verbessern, daß ihm vorübergehend leichtere Luft zugeführt wird. Wenn auf die nicht ganz unbedenkliche Hochführung des Frishluftschaftes nicht vollständig verzichtet wird, so ist dies dadurch begründet, daß in höheren Schichten die Luft reiner und über Industriegelände außerdem trockener und damit geeigneter ist als in tieferen Schichten. So haben die Untersuchungen der Rombacher Hüttenwerke¹ in einer Höhe von 42 m über Fabriksohle eine Abnahme des Feuchtigkeitsgrades φ_r um 12% nachgewiesen.

Da bei den Abluftschaften Abkühlung im Sinne einer Zugverminderung wirkt, ist es falsch, außenliegende Abluftschaften aus gutleitendem Metall herzustellen und richtiger, Stoffe mit niedriger Wärmeleitzahl, wie Holz, zu verwenden. Auf gute Abdichtung ist besonders

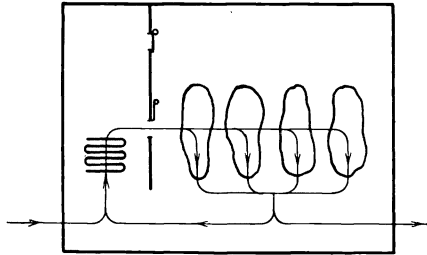


Abb. 127. Natürlicher Luftumlauf bei äußerer Vorwärmung der Luft und gesenkter Lufttrittshöhe.

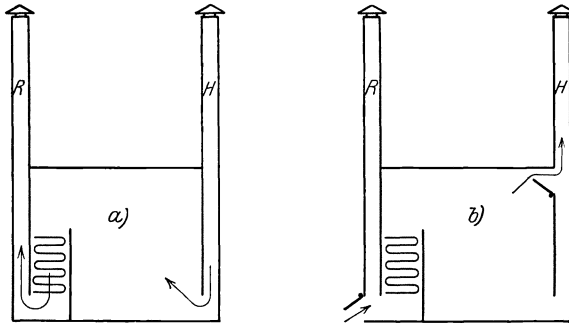


Abb. 128. Falscher Luftumlauf und seine Verhütung durch Hilfsöffnungen.

zu achten. In Ausnahmefällen kann die Anbringung einer Wärmeschutzschicht geboten sein.

Der durch einen Schacht von H m Höhe erzielbare Zug ΔP kg/m^2 ergibt sich zu

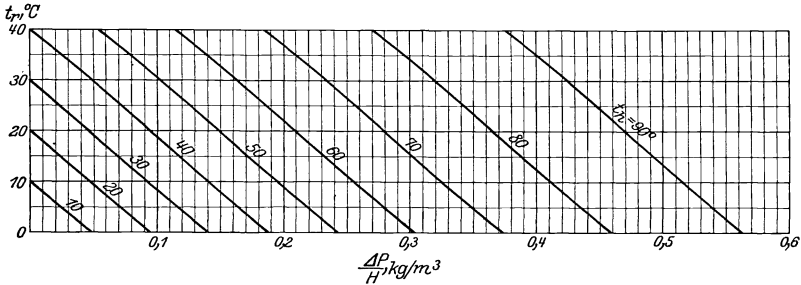
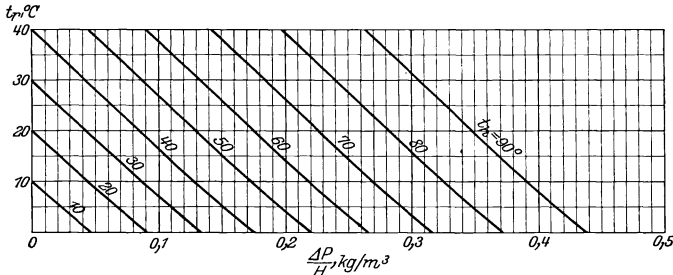
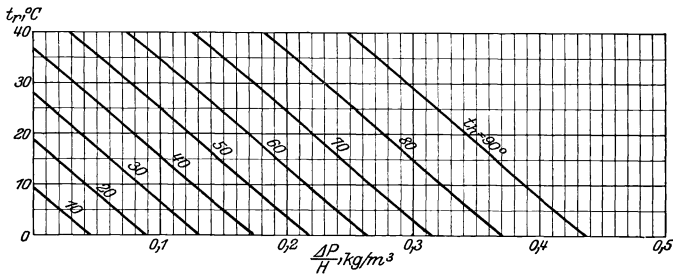
$$\Delta P = H(\gamma_r - \gamma_h),$$

wenn

γ das spezifische Gewicht der Frishluft, in kg/m^3 ,
 γ_h das spezifische Gewicht der Abluft, in kg/m^3 ,

¹ Bronn: Möglichkeit zur Beschaffung trockener Luft. Z. angew. Chem. 1921.

bezeichnen. Hierbei ist von Abkühlungs- und Reibungsverlusten im Schacht abgesehen. Unter der Annahme, daß die Luft in beiden Fällen gesättigt ist, gibt Abb. 129 die Zugstärke für 1 m Überhöhe des Schachtes. Ist die Außenluft nicht gesättigt, so bedeutet dies bei gleicher Temperatur t_r höheres spezifisches Gewicht γ_r und Verbesserung der Zugwirkung. Umgekehrt wird, bei gleicher Temperatur, der Zug ver-

Abb. 129. Zugstärke für 1 m Schachthöhe ($\varphi_r=1$; $\varphi_h=1$).Abb. 130. Zugstärke für 1 m Schachthöhe ($\varphi_r=0,5$; $\varphi_h=0,5$).Abb. 131. Zugstärke für 1 m Schachthöhe ($\varphi_r=1$; $\varphi_h=0,5$).

schlechtert, wenn die Abluft nicht gesättigt ist und demgemäß ein höheres spezifisches Gewicht γ_h besitzt. Z. B. verändert sich Abb. 129 nach Abb. 130, wenn $\varphi_r = 0,5$ und $\varphi_h = 0,5$ wird, bzw. nach Abb. 131 für $\varphi_r = 1$, $\varphi_h = 0,5$.

Während im Winter die Zugwirkung stets gesichert erscheint, kann im Sommer, besonders bei hohem Feuchtigkeitsgrad der Außenluft, ein Versagen und sogar Umschlagen eintreten, wenn die Trockenvorrichtung mit mäßigen Temperaturen arbeitet. Die Wegführung der Abluft muß

für solche Fälle dadurch gesichert werden, daß der natürliche Zug durch künstlichen ersetzt oder der Schacht ausgeschaltet und an seiner Stelle Öffnungen in der Trockenvorrichtung angebracht werden, durch die die schwerere Abluft unmittelbar in die Umgebung fällt. Eine zusätzliche Beheizung des Schachtes durch anderweitig entfallende Abwärme kann in Ausnahmefällen in Betracht gezogen werden.

Die nutzbare Zugstärke ist wegen des Druckverlustes in den Schächten geringer. Um ihn niedrig zu halten, soll die Innenwand möglichst glatt und die Form so gewählt werden, daß der geforderte Querschnitt mit möglichst kleinen Wandungsflächen erstellt wird. Das bedeutet runde oder, wo dies unmöglich ist, quadratische Schachtform, die bei den Abluftschächten auch die wünschenswerte geringste Wärmeaustauschfläche bietet.

Der künstliche Luftumlauf.

Die dem natürlichen Luftumlauf entsprechende Luftgeschwindigkeit ist bei festliegenden Verhältnissen um so geringer, je weniger der Zustand der Luft zwischen Ein- und Austritt sich ändert. Wird durch Hilfskreislauf die Menge der Luft vergrößert, so läßt sich in der Regel ein mechanisch angetriebener Lüfter nicht umgehen. Seine Anordnung ergibt sich durch die Rücksichtnahme auf den natürlichen Luftumlauf, dem er nicht entgegenwirken soll. Hiergegen wird häufig angewendet, daß der natürliche Luftumlauf ungleichmäßige Trocknung bedingen kann, wie sie sich z. B. bei ruhendem oder waagrecht wanderndem, hängendem Gut durch Zurückbleiben der tiefer liegenden Teile in der Trocknung äußert. Trotzdem ist künstlicher Luftumlauf im Sinne des natürlichen im allgemeinen richtiger als umgekehrt, weil sich alsdann mit verhältnismäßig geringem Arbeitsaufwand die Luftbewegung so verstärken läßt, daß die Unterschiede der Trockenkraft in verschiedenen Höhenlagen praktisch verschwinden.

Für die Schaltung des Lüfters bestehen verschiedene Möglichkeiten. Er kann die Luft vor oder hinter der Heizvorrichtung oder schließlich die Abluft ansaugen und weiterführen. Das Gewicht der Reinsluft ist in allen drei Fällen dasselbe, ihr Volumen jedoch verschieden und bei Verarbeitung der Luft vor der Heizvorrichtung am kleinsten. In Ausnahmefällen werden zwei Lüfter angewandt, von denen z. B. einer in die Trockenvorrichtung drückt, der andere aus ihr saugt. Eine Vielzahl wird dann nötig, wenn ein mehrfacher Hilfskreislauf in die Hauptbewegung der Luft eingeschaltet ist.

Je nach der Anordnung des Lüfters, der durch ihn zusammen mit dem natürlichen Auftrieb erzielten Druckwirkung und den auftretenden Widerständen ergibt sich in der Trockenvorrichtung gegenüber der Umgebung Über- und Unterdruck oder auch Druckgleichheit. Bei Überdruck entweicht die Trockenluft durch Öffnungen unter Wärmeverlust nach außen. Bei Unterdruck strömt die kältere Außenluft ein. Türen und Fenster sind daher bei Überdruck möglichst dort anzuordnen, wo die Luft das Gut verläßt, bei Unterdruck dort, wo sie einströmt. Ob das eine oder andere den Vorzug verdient, entscheidet der

besondere Fall. Führt das Ausströmen der Trockenluft zu einer Belästigung der Umgebung, so ist Unterdruck am Platze.

Auf die Umlaufweise des Trockenmittels übt zuweilen die Einfügung der Trockenvorrichtung in den gesamten Arbeitsgang einen ausschlaggebenden Einfluß aus. Wird z. B. ein Trockner für Ziegelsteine oberhalb des Brennofens angeordnet, um, neben der Innenheizung der Trockengänge, die ausgestrahlte Ofenwärme zu benutzen, so kann die Luft selbsttätig zunächst über den Ofen, danach durch die Trockenvorrichtung von unten nach oben strömen. Wird dagegen ein

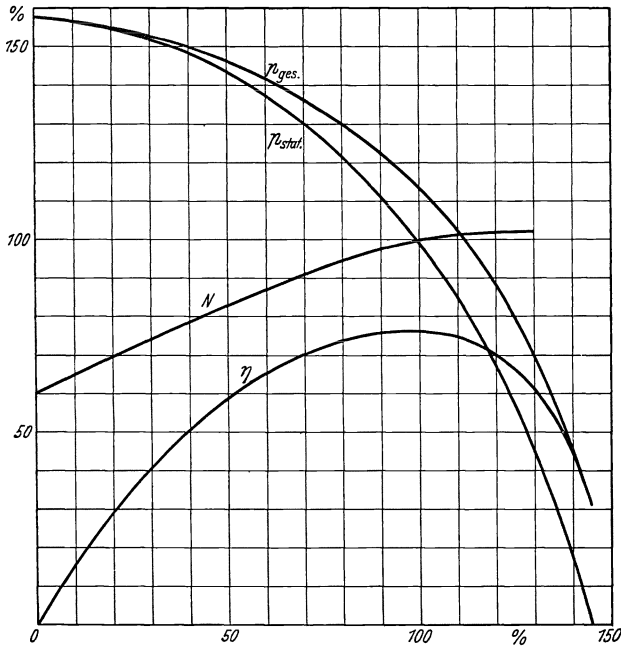


Abb. 132. Kennlinien eines Schleuderslüfters (Schilde).

Abzissen: % der Normalleistung; Ordinaten: N Arbeitsverbrauch PS_{eff.} für Normalleistung $N = 100$; p_{stat} statischer Druck, für Normalleistung $p_{stat} = 100$; p_{ges} Gesamtdruck, η Wirkungsgrad.

derartiger Trockner in gleicher Höhe mit dem Ofen aufgestellt, so bildet Verstärkung des Umlaufes durch Lüfter die Regel.

Der künstlich verstärkte Luftumlauf hat bei ununterbrochen arbeitenden Trocknern besondere Bedeutung, wenn empfindliches Gut zu verarbeiten, jedoch Zwischeneingriffen entzogen ist. Damit alsdann einzelne, schneller trocknende Stücke oder Teile nicht durch Über-temperatur oder Übertrocknung leiden, soll in der Fertigtrockenzone die Luft gegenüber dem gewünschten Endzustande des Gutes nur geringes Trockenpotential besitzen. Um gleichwohl die Lebhaftigkeit der Fertigtrocknung noch in wirtschaftlichen Grenzen zu halten, muß das geringe Trockenpotential anderweitig ausgeglichen werden. Hierfür aber bietet das Umwälzen großer Luftmengen in der Fertigtrockenzone

ein gutes Mittel. Es begünstigt gleichzeitig den Ausgleich verschiedenen Zustandes im Trockengut.

Bei Trockenanlagen ist die Vorausbestimmung des auftretenden Luftwiderstandes häufig besonders schwierig, wenn nicht unmöglich. Gleichwohl muß der Typ des Lüfters und sein Antrieb von vornherein festgelegt werden. Aus diesem Grunde bieten solche Lüfter Vorteile, deren Kennlinien etwa Abb. 132 (Schilder) entsprechen. Der steile Abfall der Druckkurve bestimmt neben dem flachen Verlauf der Linien für Kraftbedarf und Wirkungsgrad die gute Anpassungsfähigkeit für Fälle, in denen der Widerstand falsch eingeschätzt war. Im Gegensatz hierzu bringt ein Lüfertyp, bei dem mit abnehmendem Druck die Leistung und der Kraftverbrauch sehr stark zunehmen, oft Schwierigkeiten, wenn der Antrieb für einen zu hoch geschätzten Widerstand bemessen wurde. Die Drosselung des Luftaustrittes stellt dann einen unbefriedigenden Notbehelf dar.

K. Mischung von feuchten Gasen und gesättigten Dämpfen.

Bei offenen Verdampfanlagen mischt sich gesättigter Dampf mit der umgebenden Luft. Er entschwindet dem Blick, wenn die Bindung durch die Luft eine vollständige ist; im anderen Falle deutet mehr oder weniger dichte Nebelbildung auf Übersättigung der Mischung mit Feuchtigkeit.

Abb. 133 beantwortet die Frage, wieviel gesättigten Dampf Luft von bestimmter Zusammensetzung aufzunehmen vermag. Liegt der Zustand der Luft bei Punkt R und besitzt der gesättigte Dampf eine Temperatur t_d , also bei Verdampfen in die freie Luft und Wasser als Feuchtigkeit etwa 100° , so liefert eine durch Punkt R gezogene Parallele zu der t_d -Geraden den Punkt M als Schnittpunkt mit der Sättigungslinie. Der Unterschied zwischen dem Feuchtigkeitsgehalt, der Punkt M und R zukommt, also die Strecke $x_m - x_r$ kennzeichnet alsdann die Menge gesättigten Dampfes, die 1 kg Reinfluft aufzunehmen vermag, um gerade gesättigt zu sein; denn der Unterschied des spezifischen Wärmeinhaltes beträgt alsdann

$$i_m - i_r = r_0(x_m - x_r) + c_{pD} \cdot t_d(x_m - x_r) = i_{Dt_d}(x_m - x_r),$$

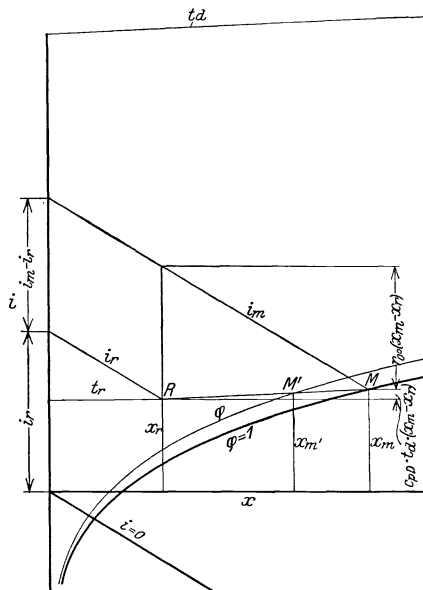


Abb. 133. Aufnahmefähigkeit feuchter Luft für gesättigten Dampf.

Hierfür gelten die Beziehungen der Abb. 135. Punkt H kennzeichnet den Zustand der von der Trockenvorrichtung abgehenden Luft, wenn ihre Aufnahmefähigkeit bis zur Sättigung gesteigert wird, R den Zustand der Außenluft, mit der sich der Schwaden mischt. Wird von Punkt H an die Sättigungslinie die Tangente HR_2 gezogen, so kann bei beliebiger Lage des Luftpunktes R oberhalb der Tangente keine Nebelbildung auftreten, gleichgültig, welches Mischungsverhältnis gewählt wird. Liegt dagegen der Zustand der umgebenden Luft bei Punkt R_1 unterhalb der Tangente, so bezeichnet M den Grenzzustand der Mischung und $x_m - x_r$ die von 1 kg Reinluft im höchsten Falle aufnehmbare Dampfmenge. Da

$$G_{Lr} \cdot x_r + G_{Lh} \cdot x_h = (G_{Lr} + G_{Lh}) x_m$$

sein muß, folgt

G_{Lr} das Reinluftgewicht der beizumischenden Außenluft zu

$$G_{Lr} = G_{Lh} \cdot \frac{x_h - x_m}{x_m - x_r},$$

wenn

G_{Lh} das Reinluftgewicht des aus der Trockenvorrichtung entweichenden Schwadens

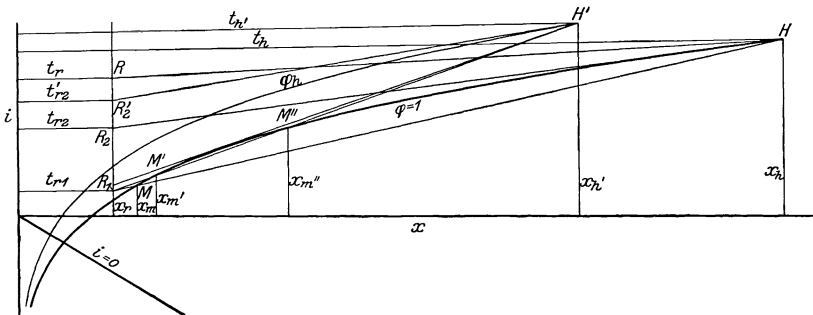


Abb. 135. Aufnahmefähigkeit feuchter Luft für Schwadendampf.

darstellt. Auch in solchen Fällen ist die Vorwärmung der beizumischenden Außenluft das Mittel, um den Schwaden unsichtbar zu machen und Niederschlag von Feuchtigkeit aus dem ausströmenden Schwaden zu vermeiden. Fortsetzung der Vorwärmung über die durch Punkt R_2 gekennzeichnete Höhe t_{r2} hat jedoch keinen Zweck, da bei Hebung der Umgebungstemperatur auf diese Höhe der Nebel verschwindet, mag die beigemischte Luftmenge auch noch so klein sein.

Im allgemeinen entweicht die Abluft nicht gesättigt, sondern mit einem Feuchtigkeitsgrad $\varphi < 1$, also etwa Punkt H' entsprechend. Für diesen Fall ergibt sich die obere Grenze der Vorwärmung mit Punkt R'_2 zu t'_{r2} , wenn R'_2 den Schnittpunkt der durch Punkt H' an die φ -Linie gezogenen Tangente mit der x_r -Linie darstellt und die Mischluft auf keinen Fall den Feuchtigkeitsgrad φ überschreiten soll. Wird die Tangente durch Punkt H' an die Sättigungslinie gezogen, so kommt für alle Zustandspunkte R , die oberhalb dieser Tangente liegen, niemals

Sättigung der Mischluft zustande. Für darunter liegende Punkte R_1 ergibt sich die benötigte Menge der beizumischenden Rohluft aus

$$G_{Lr} = G'_{Lh} \cdot \frac{x'_h - x'_m}{x'_m - x_r},$$

wobei x'_m dem R_1 zunächstliegenden Schnittpunkt der Geraden R_1H mit der Sättigungslinie zugeordnet ist. In Abb. 135 kennzeichnet Punkt M'' und der ihm zugeordnete Wert x''_m einen zweiten Grenzfall, für den

$$G_{Lr} = G'_{Lh} \cdot \frac{x'_h - x''_m}{x''_m - x_r}$$

wird. Nur innerhalb der durch M' und M'' gekennzeichneten unteren und oberen Grenze liegt die Gefahr der Nebelbildung vor. Wird $G_{Lr} < G'_{Lh} \cdot \frac{x'_h - x''_m}{x''_m - x_r}$ gehalten, so ist die Dunstgefahr ebenso vermieden, wie wenn $G_{Lr} > G'_{Lh} \cdot \frac{x'_h - x'_m}{x'_m - x_r}$ bemessen wird. Der erste Weg ist der wirtschaftlichere.

Während bei dem Entweichen von gesättigtem Dampf in die Umgebung Beimengung großer Luftmengen die Bedingung dafür ist, daß der Dampf unsichtbar wird, liegen bei dem Austritt von mit Luft gemischtem Schwaden die Verhältnisse meist umgekehrt. Die Bildung sichtbaren Nebels wird hier dadurch vermieden, daß die Mischung des austretenden Schwadens mit der umgebenden Luft möglichst eingeschränkt wird. Läßt sich jedoch hierbei eine bestimmte Menge G_{Lh} der beigemischten Rohluft nicht unterschreiten, so kann es nötig werden, noch mehr Luft beizufügen, um die Nebelbildung zu verhüten. Jedenfalls ist die Erscheinung sichtbaren Schwadens kein Beweis für Sättigung der austretenden Luft vor ihrer Mischung.

Arbeitet eine Trockenvorrichtung mit beheizten Flächen und fällt der umgebenden Luft die Aufgabe zu, den entstehenden Dunst unsichtbar zu entführen, so ist die genaue Untersuchung nach Abb. 88 vorzunehmen. Solange die Luft nicht gesättigt ist, besteht keine Gefahr der Nebelbildung. Die Berechnung muß hierbei allerdings den Streuverlust Q_{vert} berücksichtigen, d. h. der Luftzustand darf auch dann noch nicht die Sättigungslinie erreichen, wenn der ohne Berücksichtigung von Q_{vert} gefundene Endzustandspunkt H um das Maß $\frac{Q_{vert}}{G_L}$ auf der x_h -Linie tiefer rückt. In bezug auf Wärmeverlust sind hierbei alle Teile, mit denen der Schwaden in Berührung kommt, also vor allem Dunsthauben, Decke und Wände als Teile der Trockenvorrichtung anzusehen. Der Wärmeschutz des Aufstellungsraumes gewinnt hierdurch eine häufig übersehene Bedeutung.

Der genauen Untersuchung gegenüber bedeutet es eine, im allgemeinen zulässige, Annäherung,} wenn hier nur der Hauptabschnitt der Trocknung ins Auge gefaßt und angenommen wird, daß sich der Luftzustand auf seiner Kühlgrenzlinie bewegt.

Meist ist die Aufgabe gestellt, die Nebelbildung im Raum mit einer bestimmten Höchsttemperatur der Mischluft zu verhindern, wobei die Grenze durch die Rücksicht auf die Bedienungsmannschaft gezogen

ist. Dieser Fall liegt z. B. vor bei Papiertrocknern, bei denen nach Mallickh¹ die Mischlufttemperatur unter der Decke beim Eintritt in den Abzugschacht mit Rücksicht auf die Arbeiter, nebenbei auch, um die Ausstrahlungsverluste am Dach nicht zu hoch ansteigen zu lassen, 35 bis 45° nicht überschreiten soll. Damit ist nach Abb. 136 die Lage des Punktes *M* auf der Sättigungslinie zwischen den Schnittpunkten der Temperaturlinien für 35 und 45° mit der Sättigungslinie gegeben. Mit der Annahme, daß der Schwaden als gesättigter Dampf von 100° entweicht und die Mischung mit der Entnebelungsluft nachträglich erfolgt, ergibt sich die Lage des Vorwärmepunktes *V* der Luft auf einer durch *M* parallel zu der *t_d* = 100°-Geraden gezogenen Linie. Der Punkt *V* selbst liegt auf dem Schnittpunkt dieser Linie mit der durch den *R*-Punkt gehenden Ordinaten. In Abb. 136 sind die Grenz-

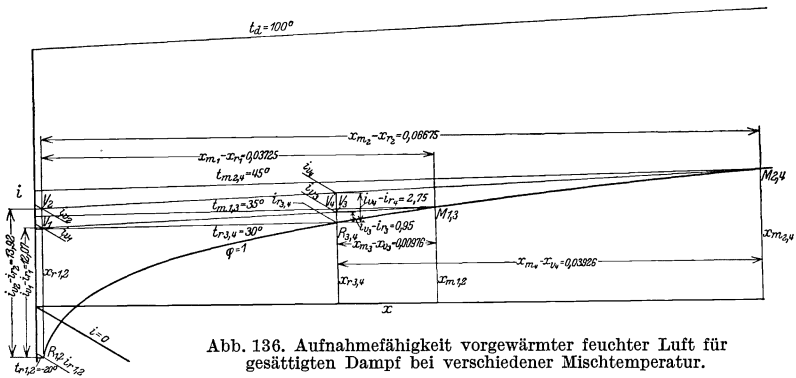


Abb. 136. Aufnahmefähigkeit vorgewärmter feuchter Luft für gesättigten Dampf bei verschiedener Mischtemperatur.

fälle angedeutet, wenn die Außenluft —20 bzw. 30° besitzt und in beiden Fällen gesättigt ist. Es lassen sich daraus folgende Beziehungen ablesen:

- | | | |
|-------------------------------------|---|-----------------|
| 1. Außenlufttemperatur | t_{r_1} | = - 20° |
| Mischlufttemperatur | t_{m_1} | = 35° |
| Aufnahmefähigkeit für 1 kg Reinluft | $x_{m_1} - x_{r_1}$ | = 0,03725 |
| Vorwärmtemperatur | t_{v_1} | = 30,5° |
| Wärmeaufwand für 1 kg Reinluft | $i_{v_1} - i_{r_1}$ | = 12,07 kcal/kg |
| Wärmeaufwand für 1 kg Dampfaufnahme | $\frac{i_{v_1} - i_{r_1}}{x_{m_1} - x_{v_1}}$ | = 324 kcal/kg |
| | | |
| 2. Außenlufttemperatur | t_{r_2} | = - 20° |
| Mischlufttemperatur | t_{m_2} | = 45° |
| Aufnahmefähigkeit für 1 kg Reinluft | $x_{m_2} - x_{r_2}$ | = 0,06675 |
| Vorwärmtemperatur | t_{v_2} | = 37,9° |
| Wärmeaufwand für 1 kg Reinluft | $i_{v_2} - i_{r_2}$ | = 13,9 kcal/kg |
| Wärmeaufwand für 1 kg Dampfaufnahme | $\frac{i_{v_2} - i_{r_2}}{x_{m_2} - x_{r_2}}$ | = 209 kcal/kg |

¹ Mallickh: Der Dampfverbrauch der Zylindertrockner. W. f. Pap. 1920. Hirsch, Trockentechnik. 2. Aufl.

3. Außenlufttemperatur	t_{r_3}	= 30°
Mischlufttemperatur	t_{m_3}	= 35°
Aufnahmefähigkeit für 1 kg Reinluft	$x_{m_3} - x_{r_3}$	= 0,00976
Vorwärmtemperatur	t_{v_3}	= 33,8°
Wärmeaufwand für 1 kg Reinluft	$i_{v_3} - i_{r_3}$	= 0,95 kcal/kg
Wärmeaufwand für 1 kg Dampfaufnahme	$\frac{i_{v_3} - i_{r_3}}{x_{m_3} - x_{r_3}}$	= 97,8 kcal/kg
4. Außenlufttemperatur	t_{r_4}	= 30°
Mischlufttemperatur	t_{m_4}	= 45°
Aufnahmefähigkeit für 1 kg Reinluft	$x_{m_4} - x_{r_4}$	= 0,03926
Vorwärmtemperatur	t_{v_4}	= 41,0°
Wärmeaufwand für 1 kg Reinluft	$i_{v_4} - i_{r_4}$	= 2,75 kcal/kg
Wärmeaufwand für 1 kg Dampfaufnahme	$\frac{i_{v_4} - i_{r_4}}{x_{m_4} - x_{r_4}}$	= 70,1 kcal/kg

Hieraus folgt, daß der Bedarf an gesättigter Frischluft bei höchster Frischluft- und niedrigster Mischlufttemperatur, entsprechend Punkt V_3 , am höchsten, dagegen bei niedrigster Frischluft- und höchster Mischlufttemperatur, entsprechend Punkt V_2 , am niedrigsten liegt. Der spezifische Wärmeverbrauch für 1 kg Dampfaufnahme ist für Punkt V_4 , bei höchster Frischluft- und höchster Mischlufttemperatur, am günstigsten, für Punkt V_1 , bei niedrigster Frischluft- und niedrigster Mischlufttemperatur, am höchsten. Dies ist insofern von Bedeutung, als die Rücksicht auf Wärmeersparnis verlangt, im Sommer, unter Aufwand großer Entnebelungsluftmengen, die Ablufttemperatur niedrig zu halten, während im Winter umgekehrt die kleinste Luftmenge den geringsten Wärmeverbrauch bei höchster Mischlufttemperatur ergibt.

Der erhebliche Wärmeverbrauch für die Entnebelung läßt die Forderung berechtigt erscheinen, sie soweit als möglich zu vermeiden. Dies läuft darauf hinaus, den entstehenden Dampf möglichst restlos und ohne Vermischung mit der Luft der Umgebung, ferner ohne Abkühlungsverluste nach außen zu führen, wenn es sich um Verdampfanlagen handelt, der Entnebelungsluft daher nicht gleichzeitig die Aufgabe zufällt, die Temperatur des Gutes herabzusetzen. Als weitere, für die Praxis vielleicht noch wichtigere Vorschrift ergibt sich hieraus, in allen Fällen, in denen die Ableitung des ungemischten Schwadens nicht restlos gelingt, also z. B. bei Papier trocknern, zwei Gebiete scharf zu trennen, und zwar einmal den Teil, in dem der Schwaden als reiner oder fast reiner gesättigter Dampf entweicht, und den Teil, in dem eine innige Mischung mit der umgebenden Luft erfolgt, entweder weil dies mit Rücksicht auf Entnebelung des Raumes nötig ist, oder weil in diesem zweiten Teil der Vorgang als Verdunstung mit niedrigerer Temperatur des Gutes geführt werden soll. Bisher werden beide Schwadenarten gemeinsam abgeführt; infolgedessen muß der zweite kühlere Teil vor Mischung mit dem ersten Teil noch einen bestimmten Wärmeüberschuß besitzen, um Flüssigkeitsausfall aus dem Mischschwaden zu vermeiden. Wird dagegen nach dem Verfahren des Verfassers (D.R.P. 481 500) jeder der beiden Teile für sich abgeführt, so kann der mit Luft gemischte Schwaden

des zweiten Teiles ohne Wärmeüberschuß abgeführt werden. Dem entspricht bei einer bestimmten Mischtemperatur eine geringere Menge der beizumischenden Luft.

L. Nachbehandlung des Gutes. Der lufttrockene Zustand.

Die Aufgabe der Nachbehandlung läuft darauf hinaus, das getrocknete Gut, wenn es als Fertigerzeugnis zu gelten hat, der Umgebung anzupassen oder gegen störende Einflüsse der Umgebung zu schützen. Schließt sich an die Trocknung die Weiterverarbeitung an, so ist das getrocknete Gut hierfür gegebenenfalls vorzubereiten. Die Nachbehandlung muß dem Grundsatz folgen, den Energieverbrauch des Verfahrens so niedrig wie möglich zu halten. Es handelt sich hierbei in der Hauptsache um folgende Leistungen:

1. Abkühlung,
2. Herstellung des lufttrockenen Zustandes,
3. Umhüllen,
4. besondere Behandlung zum Schutze gegen Verderb.

1. Abkühlung.

Da hohe Temperatur chemische und biologische Veränderungen begünstigt, ist anzustreben, das Gut unmittelbar nach der Trocknung zu kühlen und möglichst auf die Temperatur der Umgebung zu bringen. Es ist zweckmäßig, die Abkühlung zu einem Teil des eigentlichen Trockenvorganges zu machen und so zu leiten, daß die Überschußwärme des Gutes wiedergewonnen wird. Eine Möglichkeit hierfür besteht darin, daß die Frischluft zunächst über das getrocknete Gut streicht und erst

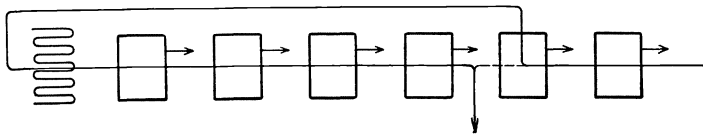


Abb. 137. Gleichstromtrockner mit Gegenstromkühlfeld.

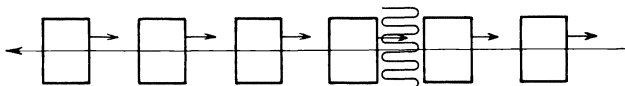


Abb. 138. Gegenstromtrockner mit Kühlfeld.

danach vorgewärmt wird. Die grundsätzliche Anordnung zeigt Abb. 137 für einen Gleichstromtrockner, Abb. 138 für einen Gegenstromtrockner. Im ersten Falle wird das Kühlfeld im Gegenstrom durchlaufen. Das Bedürfnis nach zusätzlicher Abkühlung ergibt sich beim Gleichstrom in geringerem Maße als beim Gegenstrom, wenn die Trockenluft eine einmalige Erwärmung erfährt; bei stufenweiser Erwärmung liegen die Verhältnisse für beide etwa gleich. In Vorrichtungen, bei denen das Trocken-

bild sich ständig ändert, also z. B. bei Kammertrocknern, kann die Abkühlung des Gutes, unter teilweiser Wiedergewinnung der Überschuwärme, dadurch bewirkt werden, daß gegen Schluß der Trocknung, unter Inkaufnahme einer Verzögerung, die Trockentemperatur allmählich gesenkt wird. Die äußere Wärmezufuhr wird hierbei mehr und mehr verringert und gegen Ende ganz unterbrochen, so daß schließlich die Überschuwärme des Gutes, daneben auch der Wärmevorrat der Trockengestelle und baulichen Umfassungen, die Wärmequellen darstellen.

In Fällen, bei denen der Endfeuchtigkeitsgrad des Gutes unter das Maß der Lufttrockenheit getrieben wird und in dieser Höhe erhalten werden soll, verbietet sich in der Regel die Abkühlung durch Frischluft wegen der Gefahr des Feuchtigkeitsniederschlags. Sie bleibt möglich, wenn die Frischluft vor ihrer Verwendung als Kühlluft entfeuchtet wird. Gut, das auch in getrocknetem Zustande noch als feucht zu gelten hat, kann durch Frischluft stets, selbst dann gekühlt werden, wenn sie gesättigt ist.

2. Herstellung des lufttrockenen Zustandes.

So lange Gut feucht bleibt, ist ein Ausgleich nur in gesättigter Luft möglich. Gut und Luft nehmen gleiche Temperatur an. In ungesättigter Luft stellt sich die Temperatur des feuchten Gutes auf die dem Luftzustande entsprechende Kühlgrenze ein. Die Entfeuchtung schreitet als natürliche Trocknung fort.

Der Beharrungszustand der Lufttrockenheit tritt bei hygrokopischem Gut ein. Er bedeutet, daß Temperatur und Dampfspannung in Gut und umgebender Luft gleich sind, also im i - x -Bild der Zustandspunkt für Gut und Luft im Punkte R zusammenfallen. Da die Witterung beständig wechselt, pendeln auch Temperatur und Feuchtigkeitsgehalt des Gutes ständig um Mittelwerte. Der Feuchtigkeitsgehalt hygrokopischen Gutes stellt sich in lufttrockenen Zustand auf einen Wert $\chi_i = \varphi_r \cdot \chi_e$ ein, der dem mittleren Feuchtigkeitsgrad φ_r der Luft entspricht, wenn die hygrokopische Wirkung mit einem Feuchtigkeitsgehalt χ_e einsetzt. Würde sich φ_r nicht ändern, so wären beliebige Temperaturschwankungen der Luft praktisch ohne Einfluß auf den Feuchtigkeitsgehalt des Gutes im Beharrungszustande.

Es erscheint zunächst selbstverständlich, bei Waren, die nachträglich an der offenen Luft lagern sollen, keinesfalls das Maß der Lufttrockenheit zu unterschreiten. Je lebhafter jedoch die Trocknung vor sich geht und je mehr die Dickenabmessungen und Körpereigenschaften des Gutes den Ausgleich der Temperatur und der damit zusammenhängenden Trockenwirkung verzögern, um so mehr eilt die Entfeuchtung der Oberfläche und äußeren Schichten der Trocknung im Kern voraus. Der Unterschied gleicht sich im allgemeinen bei der nachfolgenden Lagerung ebenso aus, wie Ungleichheiten der einzelnen Stücke des Gutes untereinander, so daß es bei richtig geleitetem Verfahren möglich bleibt, den durchschnittlichen Endfeuchtigkeitsgrad dem Zustande der Lufttrockenheit entsprechend zu wählen und damit eine Übertrocknung und anschließende Wiederbefeuchtung, die auf Energieverlust hinaus-

läuft, zu vermeiden. Bei bestimmten Waren jedoch, z. B. Papp und Garnen, wird aus stofftechnischen Gründen eine weitergehende Trocknung absichtlich durchgeführt und durch anschließende Befeuchtung ausgeglichen. Diese erfolgt im allgemeinen mit mäßig warmer, angefeuchteter Luft oder dem abziehenden Schwaden. Bei hygrokopischem Gut muß die Befeuchtungsluft einen Feuchtigkeitsgrad $\varphi > \frac{\xi}{\xi_e}$ besitzen, bei „feuchtem“ Gut durch schwebende Tröpfchen übersättigt sein.

Wird bei Lebensmitteln im Verlauf der Trocknung oder anschließend daran der Zustand der Lufttrockenheit hergestellt, so ist damit eine im allgemeinen ausreichende Sicherung gegen raschen Verderb gewonnen. Bei anderen Waren bedeutet der Beharrungszustand Vermeidung von Gewichtsveränderungen, die aus Handelsgründen stets unerwünscht sind. Sollen diese Vorteile restlos gewahrt werden, so sind allerdings zusätzliche Maßnahmen erforderlich, um den Einfluß des Witterungswechsels auszuschließen, also tatsächlich mit einem ganz bestimmten Luftfeuchtigkeitsgrad im Lagerraum rechnen zu können. Andernfalls ist an schwülen Sommertagen ein ungewöhnlich hoher Feuchtigkeitsgrad der Luft unter Feuchtigkeitsaufnahme des „lufttrockenen“ Gutes, umgekehrt im Winter eine Fortsetzung des Austrocknens in temperierten Lagerräumen unvermeidlich. Als solche Maßnahme kommt die „Bewetterung“ des Lagerraumes in Betracht, die sich meist in einfacher Weise durch Aufstellung eines „Wetterfertigers“ verwirklichen läßt. Die Luft verläßt den Wetterfertiger mit etwa 15° in gesättigtem Zustand, erfährt eine Erwärmung auf 20° — im Sommer durch die Umgebung, im Winter durch Heizung —, wobei sich der Feuchtigkeitsgrad der Raumluft auf etwa 0,75 einstellt. Hierbei genügen verhältnismäßig geringe Luftmengen. Sie sind vorzugsweise durch die Bedingung bestimmt, bei Frischluftbetrieb im Lagerraum leichten Überdruck gegen die Umgebung zu halten bzw. bei Führung der Bewetterung in geschlossenem Luftlauf die Störungen durch von außen zutretende Luft mit einem unerwünscht hohen oder niedrigen Feuchtigkeitsgehalt auszugleichen.

3. Umhüllen.

Bei allen Waren, bei denen die Entfeuchtung wesentlich unter das dem lufttrockenen Zustande entsprechende Maß fortgesetzt wird und in der erzielten Höhe bis zur Verwendung erhalten werden soll, ist luftdichte Umhüllung durch Paraffinpapier, Zellophan, verlötete Büchsen u. dgl. geboten. Hierdurch wird beispielsweise bei Trockenmilch dem schädigenden Einfluß der Feuchtigkeitsaufnahme aus der Luft — Geruch- und Geschmacksveränderung — entgegengewirkt.

4. Besondere Behandlung zum Schutze gegen Verderb.

Die unter 3. erwähnte Maßnahme dient gleichzeitig als Schutz gegen Insekten, z. B. bei getrockneten Früchten. Zum gleichen Zweck erfolgt ihre Behandlung mit überhitztem Dampf, dessen Verwendung

während 2 bis 4 Minuten vor dem Verpacken, z. B. für getrocknete Äpfel, empfohlen wird. Die Temperatur der Frucht steigt hierbei auf etwa 80°, was genügt, um Insekten, Larven und Eier zu zerstören. Die daneben einherlaufende Erweichung der Frucht ergibt ein gutes Anschmiegen in der Packung. In anderer Weise wird dies bei getrockneten Zwetschen dadurch erreicht, daß sie während kurzer Zeit in verdünnte angewärmte Sole eingetaucht bleiben.

Nach der Auftrocknung von Lacken empfiehlt sich mehrtägige Lagerung bei gleichbleibender Luftbeschaffenheit, ehe das Polieren vorgenommen wird. Zu diesem Zwecke kann der Trockenraum als Lageraum weiterbenutzt und die Heizvorrichtung zur Regelung der Luftbeschaffenheit verwendet werden.

Die Kaltlagerung bei etwa 4° stellt eine günstige Maßnahme für längere Aufbewahrung von Lebensmitteln jeder Art dar, die nach der Trocknung nicht als steril zu betrachten sind. Ihre Bedeutung nimmt in dem Maße ab, in dem durch weitergehenden Entzug der Feuchtigkeit die Entwicklung von Bakterien und Schimmelpilzen gehemmt bzw. schließlich unmöglich gemacht ist.

II. Ausführung der Trockenvorrichtungen in Anpassung an das Trockenverfahren.

Die Bauweise der Trockenvorrichtungen ist von übergroßer Mannigfaltigkeit. Sie wird bestimmt einmal durch die Bedingungen für Durchführung eines in bestimmtem Sinne geleiteten Trockenvorganges, daneben durch die Eigenart des verarbeiteten Gutes, in vielen Fällen auch durch Nichterkennen des Wesentlichen und Sichverlieren in Spielarten, denen die Berechtigung fehlt. Es ist zu erhoffen, daß mit der tieferdringenden Erkenntnis der maßgebenden Gesetze auch hier sich allmählich eine Vereinheitlichung durchsetzt.

In großen Zügen lassen sich alle Trockenverrichtungen in wenigen Gruppen unterbringen, deren kennzeichnende Formen durch das angewandte Trockenverfahren allein bedingt sind. Denn die Eigenschaften des Gutes bestimmen ihrerseits das Trockenverfahren. Es mag befremden, daß hier manche Trocknergattungen nebeneinander auftreten, die sich hinsichtlich der Form erheblich voneinander unterscheiden. Der Grund liegt darin, daß es dem Verfasser mehr darauf ankam, das Wesen des Trockenvorganges auch bei der Ausführung zu betonen, als den Stoff nach äußerlichen Gesichtspunkten zu trennen.

Wird von der in Abschnitt I. B. durchgeführten Einteilung der Haupttrockenverfahren ausgegangen, so zerfallen die Trockenvorrichtungen in folgende Gruppen:

A. Vorrichtungen zur Durchführung eines Trockenverfahrens, bei dem Beharrungszustand vorliegt,

B. Vorrichtungen zur Durchführung eines Trockenverfahrens, bei dem das Trockenbild ständig wechselt.

Eine Untergruppierung ergibt sich aus der Art des Trockenmittels, das aus

1. Luft oder einem anderen vollkommenen Gas,
2. beheizter Fläche zusammen mit Luft,
3. beheizter Fläche allein

bestehen kann.

A. Vorrichtungen zur Durchführung eines Trockenverfahrens, bei dem Beharrungszustand vorliegt.

1. Vorrichtungen zur Durchführung eines Trockenverfahrens, bei dem Beharrungszustand vorliegt, mit Luft oder einem anderen vollkommenen Gas als Trockenmittel.

a) **Waagerechter Kanaltrockner.** Als Kanaltrockner kann im weitesten Sinne ein umgrenzter Raum verstanden werden, den Gut und Trockenmittel in bestimmter Richtung durchwandern, wobei in einem beliebigen, senkrecht zu der Bewegungsrichtung liegenden Querschnitt ein durch gleichbleibende Eigenschaften von Trockengut und Trockenmittel bestimmter Beharrungszustand vorliegt. Hierzu kommt für den Kanaltrockner im engeren Sinne als weiteres Kennzeichen ein Fördermittel, das sich geradlinig fortbewegt und beliebige Form besitzen kann, in der Hauptsache aus Wagen, Ketten, Bändern besteht, ausnahmsweise auch durch fest gelagerte Rollen oder Rutschbahnen ersetzt ist. Das Trockengut wird auf der Fördervorrichtung entweder lose gestapelt oder vermittelt besonderer Gutsträger — Stangen, Drähte u. dgl. — daran befestigt. Es befindet sich relativ zum Fördermittel fast ausnahmslos in Ruhe. Für die Benennung „waagerechter“ bzw. „senkrechter“ Kanal wird häufig zu Unrecht die Richtung des größten Ausmaßes als ausschlaggebend betrachtet. Das wesentliche Kennzeichen liegt jedoch darin, daß das Trockengut im einen Falle seine Höhenlage nicht oder doch nur unbedeutend ändert, Ein- und Austrittsstelle also in einer Waagerechten liegen, im anderen Falle das Trockengut sich in der Hauptsache aufwärts oder abwärts bewegt, Ein- und Austrittsstelle daher übereinander angeordnet sind. Diese Kennzeichnung wird im folgenden festgehalten.

Da ein Gleichstromtrockner bei einfacher Vorwärmung mit verhältnismäßig kleinen Luftmengen und hohen Unterschieden der Lufttemperaturen am Ein- und Austritt arbeitet, äußert sich der Einfluß der natürlichen Luftbewegung in erheblichem Maße. Er führt bei waagerechten Kanälen zu unerwünschten Störungen, die am Eintritt sofort durch Niedersinken von feuchteren Luftschichten beginnen und sich bis zum Austritt fortsetzen. Aus diesem Grunde werden derartige Trockner mit Recht kaum ausgeführt.

Bei den waagerechten Gegenstrom-Kanaltrocknern mit einfacher Vorwärmung tritt eine Störung durch die natürliche Schich-

tung der Trockenluft in schwächerem Maße auf, weil die Geschwindigkeit der Luft höher und ihr Temperaturabfall geringer zu sein pflegen als bei dem Gleichstromtrockner. Zudem beschränkt sich das Absetzen der feuchteren Luftschichten in der Hauptsache auf das Kanalende,

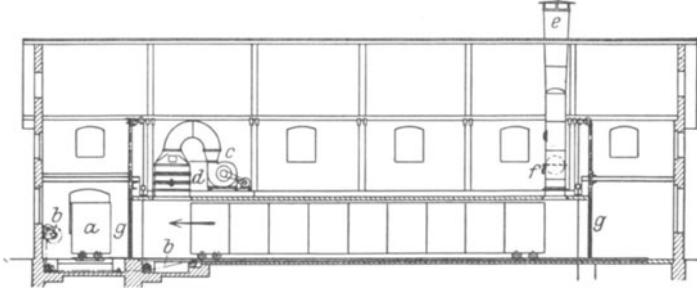


Abb. 139. Kanaltrockner (MAN). *a* Trockenwagen, *b* Zugvorrichtung, *c* Lüfter, *d* Luftherhitzer
e Abluft, *f* Regelklappe, *g* Verschlussüren.

an dem das Gut eintritt, die anfängliche Unregelmäßigkeit kann daher im Verlauf der Trocknung wieder ausgeglichen werden.

Gegen die Ausführung nach Abb. 139 (MAN) bestehen daher keine grundsätzlichen Bedenken. Zur Bewegung der Trockenwagen dient ein durch Handwinde betriebiger Seilzug; sie kann auch durch endlose Ketten und Mitnehmer für die einzelnen Wagen, oder durch Bewegung der

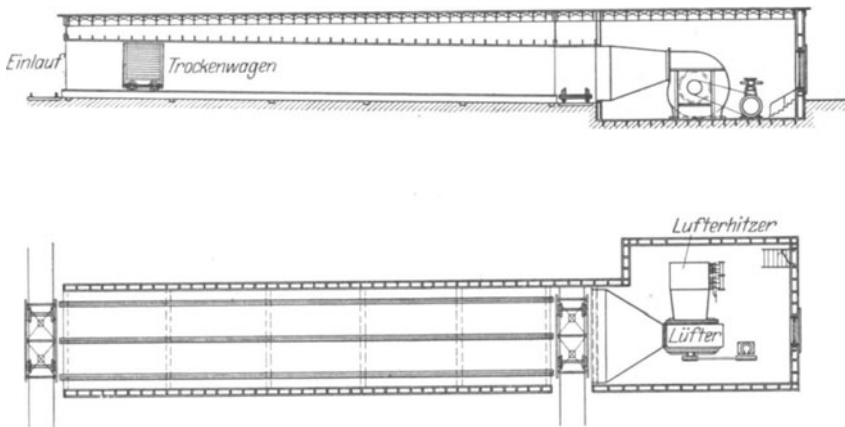
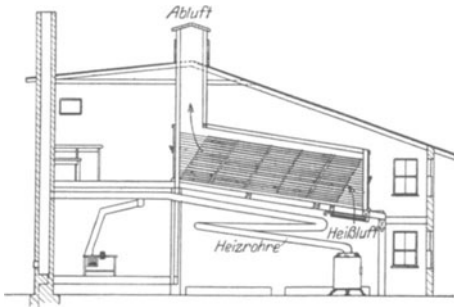


Abb. 140. Kanaltrockner für Furnierholz (American Blower).

Wagengestelle an hochliegenden Schienen, oder schließlich nach Abb. 140 (American Blower) durch geneigte Anlage der Schienenbahn erfolgen.

Unter Verzicht auf die Fahrräder wird bei dem für Farmen bestimmten, lüfterlosen Obsttrockner einfachster Bauart nach Abb. 141 (Am. Landw.-Kammer) der allmähliche Vorschub des auf Horden lagernden Gutes durch Anlage des Kanals mit einer Neigung 1 : 6 ermöglicht. Die Luftherwärmung erfolgt durch einen unterhalb der Kanäle

angeordneten Ofen, dessen Abgase durch ein ansteigendes, unter dem Trockner gleichmäßig verteiltes Heizrohrnetz strömen. Die Luft tritt durch Öffnungen von außen in den Ofenraum, nach Erwärmung durch die Bodenschlitze in die Kanäle und am entgegengesetzten höchsten Punkte durch einen Schacht, der den nötigen Zug erzeugt, ins Freie. Das Ende des Kanaltrockners kann nach Abb. 140 offen bleiben, wenn



die austretende Luft die Umgebung nicht belästigt. Die ungehinderte Einfahrmöglichkeit bedeutet dann eine Erleichterung des Betriebes. Ist diese Voraussetzung nicht erfüllt, so ist ein Verschluß vorzunehmen, der beispielsweise nach Abb. 139 durch Zugschleusen erfolgt. Bei dem Trockner der Abb. 141 besitzt die Einbringseite Flügeltüren in einer dem vollen Kanalquerschnitt ent-

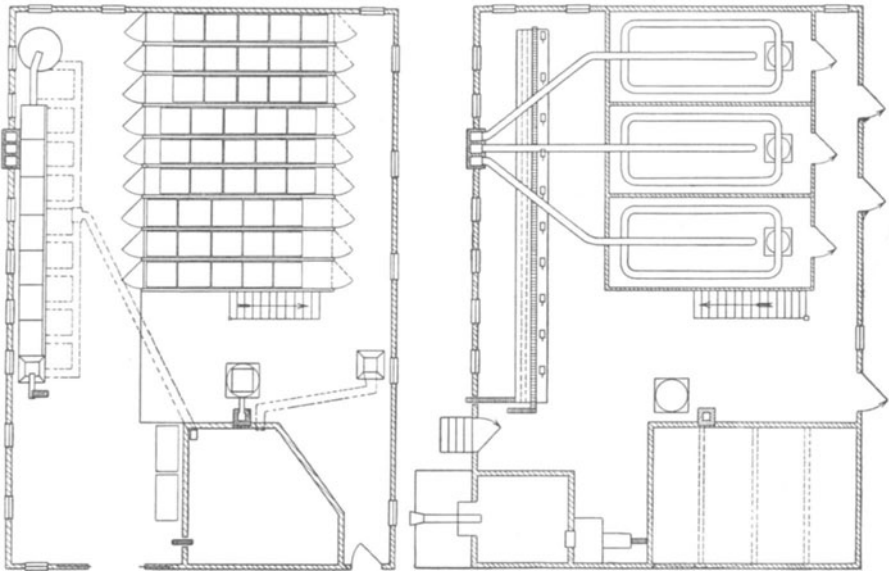


Abb. 141. Amerikanischer Kanaltrockner für Obst.

sprechenden Größe. Damit hier während des Schlackens des Feuers keine schädlichen Gase zu dem Gut treten, ist der Lufteintrittsschlitz durch eine Schiebetür absperrbar. An Stelle der Türen können aufrollbare Vorhänge aus luftdichtem Gewebe treten, die leicht zu bewegen sind, und die Gefährdung durch schwebende Gewichte vermeiden. Aus dem letzten Grunde verdienen waagrecht laufende Schiebetüren vor auf- und abbewegten den Vorzug, wo sie aus örtlichen Gründen anwendbar sind.

Beachtlich ist die in den Vereinigten Staaten bei Holztrocknern eingebürgerte Ausführung nach Abb. 142 (National). Die geschlossene Tür legt sich durch ihr Eigengewicht gegen die ringsum laufenden Dichtungsflächen, die in einer gegen die Senkrechte geneigt angeordneten Ebene liegen. Beim Öffnen wird die Tür durch eine fahrbare Vorrichtung mittels Hebels leicht angehoben und gleichzeitig nach außen bewegt, anschließend zur Seite gefahren. Zahlreiche nebeneinander angeordnete Schiebetüren können hierbei durch eine einzige Tragvorrichtung nacheinander bewegt werden. Da innerhalb des Trockenkanals gegenüber der Umgebung Über- oder Unterdruck herrscht, strömt beim Beschicken und Entleeren die Trockenluft aus oder die Außenluft ein. In besonderen Fällen kann es daher geboten sein, an den Enden Luftschleusen anzubringen, z. B. Doppeltüren in einem Abstände, der die Aufnahme eines Trockenwagens gestattet.

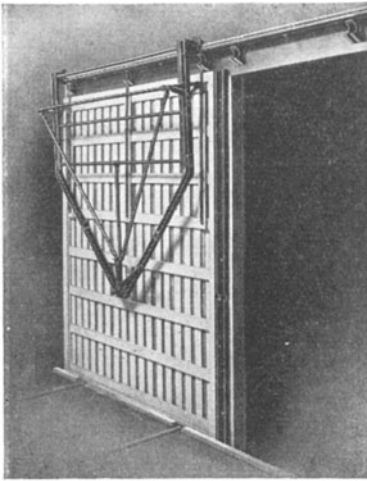


Abb. 142. Verschlussür mit Anhebe- und Verschiebevorrichtung (National).

Lange waagerechte Kanäle müssen häufig eine Unterteilung erfahren, um nicht zu weitgehende Ansprüche an die Länge des Trockenraumes zu stellen. Hierbei besteht die Möglichkeit, die zweite Hälfte des Kanals neben oder über der ersten Hälfte umkehren zu lassen und damit Beschickungs- und Entleerungsstelle neben- bzw. übereinander anzuordnen. Dies empfiehlt sich vor allem dann, wenn wenig Bedienung erforderlich ist, das Be- und Entladen daher durch den gleichen Arbeiter ausgeführt werden kann.

Als waagerechte Kanaltrockner sind auch die Ausführungen anzusprechen, bei denen das Gut zunächst senkrecht oder schräg aufwärts geführt wird, waagrecht weiterwandert und schließlich auf die ursprüngliche Höhe niederläuft. Diese bei dem Lacktrockner der Abb. 143 (Chevrolet) zum Ausdruck kommende geknickte Form hat ihren Grund einmal darin, daß die wärmere Trockenluft nach den hochliegenden Kanalteilen strebt, infolgedessen die tiefliegenden Ein- und Ausgänge offen gehalten werden können, dann auch darin, daß die Grundfläche günstige Ausnutzung findet. Die vorgewärmte Luft steigt, dem an Ketten wandernden Gut entgegen, hoch, fällt abgekühlt und feuchter am entgegengesetzten Ende nieder und wird an tiefster Stelle abgesaugt. Die Vorteile dieser Bauweise kommen besonders dann zur Geltung, wenn mit hohen Temperaturen getrocknet wird.

Querstrom mit einfacher Vorwärmung läßt sich bei waagerechten Kanaltrocknern in der Regel nur dann mit Erfolg anwenden, wenn die Länge verhältnismäßig klein ist. Unter dieser Vor-

aussetzung aber bietet das Verfahren besondere Vorzüge, wenn mit niedrigen Lufttemperaturen bzw. mit geringen Temperaturunterschieden gearbeitet und die Luft im Sinne der natürlichen Bewegung abwärts geführt wird. Bei Strömung der Luft nach oben sind besondere

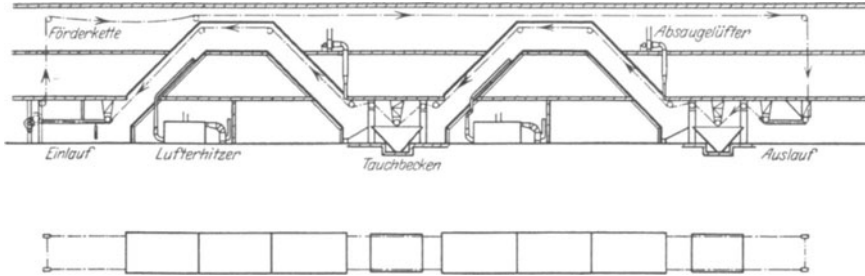


Abb. 143. Kanaltrockner für lackierte Blechteile (Lefèbre).

Maßnahmen erforderlich, um das Zurücksinken feuchter Luft zu verhindern.

Wandert das Gut wie bei dem Trockner für Teller der Abb. 144 (T. A. G.) unter ständiger Auf- und Abbewegung allmählich vorwärts, während die vorgewärmte Trockenluft in senkrechter Richtung geführt wird, so entsteht wohl eine Verzerrung des Querstromverfahrens,

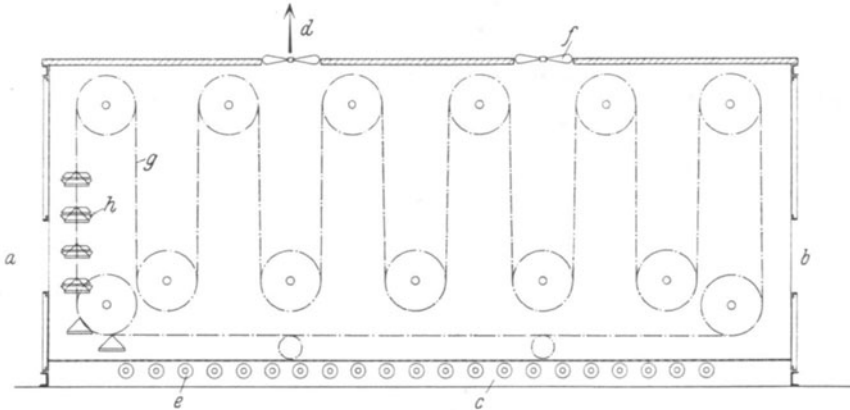


Abb. 144. Schaukeltrockner für Teller (T. A. G.).
a Einlaufseite, *b* Auslaufseite, *c* Frischluft, *d* Abluft, *e* Luftheizter, *f* Lüfter, *g* Förderkette, *h* Schaukel.

seine für die Wirkung ausschlaggebenden Merkmale bleiben jedoch erhalten. Das Trockengut wird im dargestellten Falle auf Schaukeln an Ketten getragen, die unten seitlich an die Heizrohre gelangende Luft durch künstlichen Zug nach oben gefördert. Die dabei unvermeidliche Unregelmäßigkeit in der Luftschichtung äußert sich deshalb nicht ungünstig auf das Gut, weil dieses im einzelnen den Trockner nicht etwa in der Richtung der Hauptluftströmung erfüllt, sondern infolge des als Mischbewegung zu deutenden Zickzacklaufes jede Stelle des Kanals in

seiner Höhe und Länge nacheinander erreicht. Die Höhe der Trockenkraft pendelt wohl in gewissen Grenzen auf und ab, die gesamte Wirkung der Trockenluft ist jedoch nicht nur für jedes Einzelstück, sondern auch für jeden Teil des Einzelstückes praktisch dieselbe.

Arbeitet ein waagerechter Kanaltrockner nach dem Gleichstromverfahren mit einfacher Vorwärmung und Umluft, so werden die Unterschiede, die eine unerwünschte natürliche Schichtung der Trockenluft veranlassen, verringert, einmal infolge Vergrößerung der Luftmenge, dann wegen des gleichzeitig abnehmenden Unterschiedes zwischen höchster und niedrigster Temperatur. Wenn gleichwohl derartige Ausführungen zu den Ausnahmen zählen, so liegt der Grund darin, daß bei ihnen die kennzeichnenden Merkmale des Gleichstroms verwischt sind. Werden Anfangstemperatur der Mischluft und Menge der Frischluft gleich hoch gewählt wie bei fehlendem Umlauf, so erfolgt die Trocknung im ganzen Verlauf langsamer, außerdem leidet die Fertigtrocknung unter dem höheren Feuchtigkeitsgehalt der Luft am Ende des Trockners, so daß schließlich der gewünschte Endfeuchtigkeitsgehalt hygroskopischen Gutes nur mit Verzögerung oder überhaupt nicht erreicht werden kann. Ein Ausgleich läßt sich dadurch schaffen, daß die Temperatur der Trockenluft im ganzen gehoben und ihr Feuchtigkeitsgrad am Austritt in gleicher Höhe gehalten wird wie ohne Umlauf.

Beim Gegenstromtrockner liegt ein Anlaß, die einfache Vorwärmung mit Umluft zu verbinden vor allem dann vor, wenn das getrocknete Gut gegen zu hohe Trockengeschwindigkeit geschützt werden soll. Die Umluft kann hierbei, wie bei dem Holztrockner der Abb. 145 (Balcke), vom Trocknerende oder, wie beiden Holztrockner der Abb. 146 (American Blower), von einer Zwischenstelle entnommen werden. Die Milderung der Trockenwirkung wird bei gleichem Verhältnis zwischen Frisch- und Umluft im ersten Falle größer. Bei der Ausführung nach Abb. 146 ist der Boden auf der Eintrittsseite des Gutes in ganzer Breite rostartig geöffnet, dahinter mit weiten jedoch schmalen Schlitzten versehen, schließlich am Auslaufende des Gutes mit einem Rost von mittlerer Breite ausgestattet. Die erwärmte Luft tritt unter dem letzten Rost ein, wird zum Teil durch die breiten Schlitzte der zweiten Gruppe als Umluft zurückgesaugt, der Rest entweicht durch den am Eingang sitzenden Rost nach außen. Infolgedessen wirkt die Trockenluft auf das Naßgut mit niedriger Trockenkraft, außerdem in verringerter Menge.

Die Anwendung des Querstroms beim waagerechten Kanaltrockner mit einfacher Vorwärmung wird durch Anwendung der Umluft erleichtert, weil die gleichmäßige Verteilung der vergrößerten Luftmenge alsdann eher gelingt. Infolgedessen ist die Brauchbarkeit des Verfahrens nicht auf besonders kurze Kanäle beschränkt. Angenähert ergibt sich die Querstromwirkung, wenn die vorgewärmte Luft am einen Kanalende oben eintritt, sich über die ganze Kanallänge oberhalb des Gutes ausbreitet, durch dieses hindurch niedersinkt und über die ganze Kanallänge unterhalb des Gutes am entgegengesetzten Ende unten austritt. In dieser Weise arbeiten die Trockenkanäle für Holzbretchen der Abb. 147 (Rietschel-Henneberg), bei denen ein Teil der Abluft

zurückgesaugt wird. Infolge der Führung der Mischluft im Sinne der natürlichen Luftbewegung von oben nach unten ist eine besonders

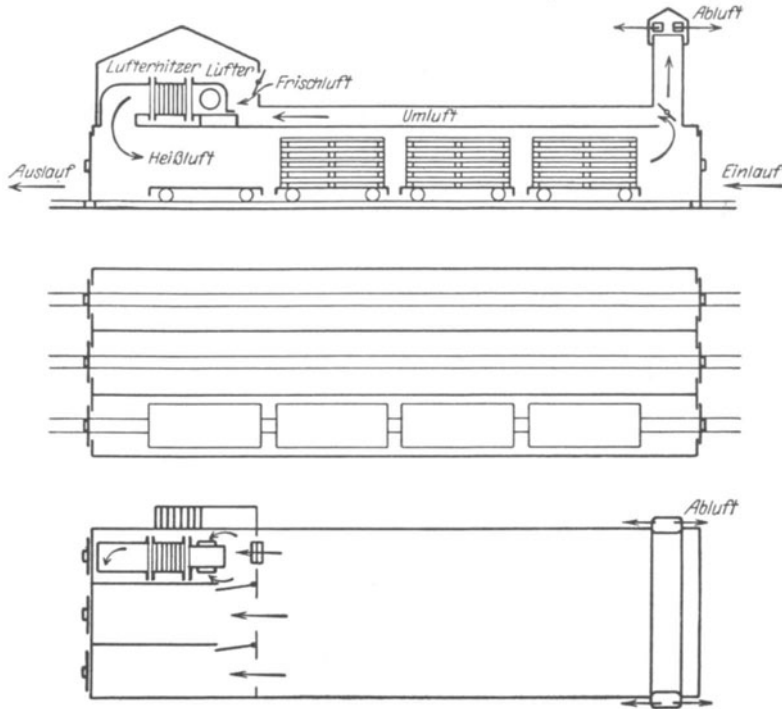


Abb. 145. Mehrfacher Kanaltrockner für Arbeiten mit Mischluft (Balcke).

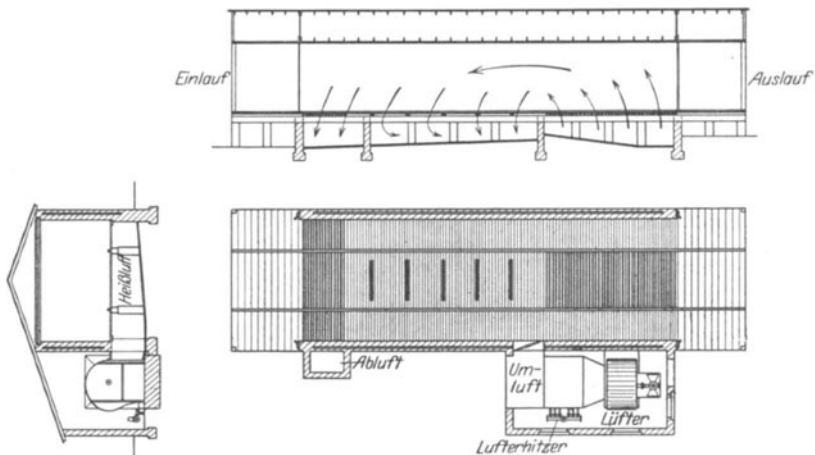


Abb. 146. Kanaltrockner für Holz (American Blower).

gleichmäßige Verteilung der Strömung über die ganze Kanalbreite zu erwarten, wobei die Vergrößerung der Luftgeschwindigkeit durch die

Mischluftbeimengung den Unterschied der Trockenkraft in den verschiedenen Höhenlagen verringert.

Wird bei einfacher Vorwärmung die Umluft an einer Zwischenstelle entnommen, so wirken auf die einzelnen Teile der Trockner-

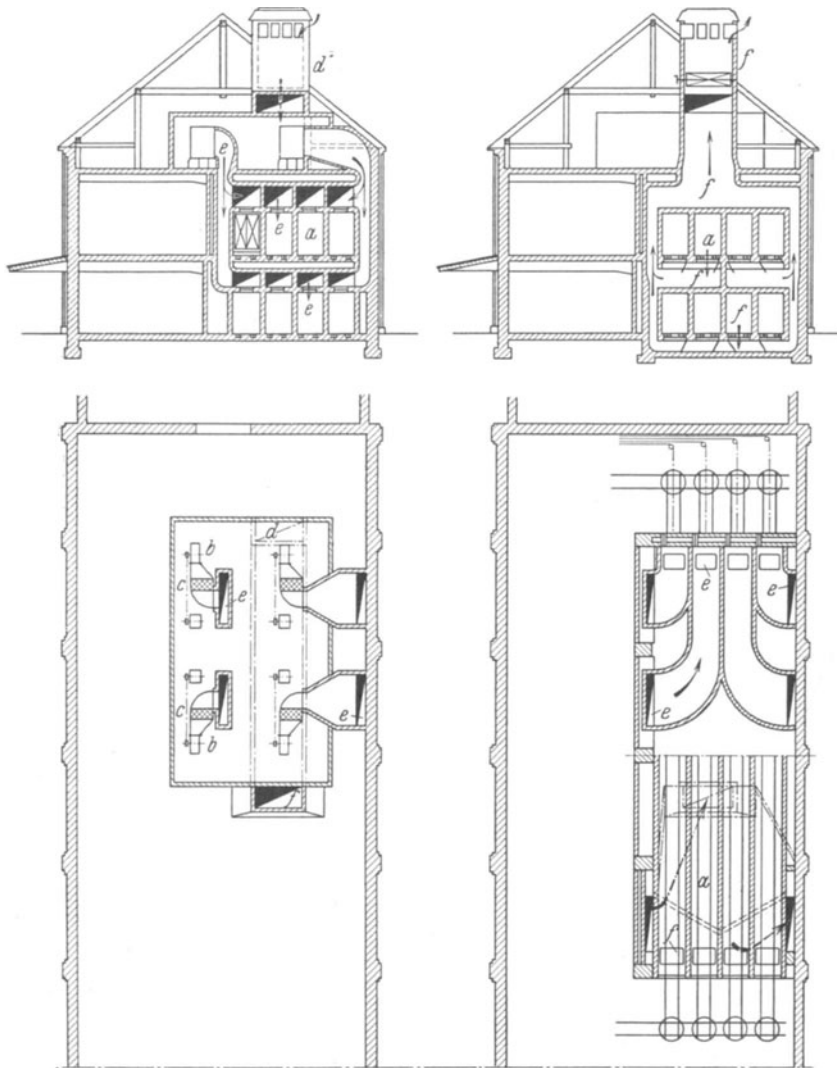


Abb. 147. Kanaltrockenanlage für Holzbrettchen (Rietschel-Henneberg).
a Trockenkanal, *b* Lüfter, *e* Lufterhitzer, *d* Frischluft, *e* Zuluft, *f* Abluft.

länge verschiedene Luftmengen. Für die Anwendung kommen waagerechte Gleichstrom- und Querstrom-Kanaltrockner kaum in Frage, in besonderen Fällen Gegenstromtrockner nach Abb. 146. Während hier die größere Luftmenge auf das austretende Gut wirkt,

tritt bei dem für den Garntrockner der Abb. 148 (Gruschwitz) angewandten Verfahren das Umgekehrte ein. Die Frischluft vereinigt sich mit einem Teil der zurückgeblasenen Abluft, wird gemeinsam mit ihr über einer kleinen Heizvorrichtung erwärmt und strömt dem Gut entgegen. Etwa in der Mitte des Kanals wird ein zweiter Luftteilstrom zugeführt. Er besteht aus Abluft, die durch eine größere Heizvorrichtung vorgewärmt ist. Das Gut wird hierdurch anfangs von einer großen Luftmenge mit hohem spezifischen Wärmeinhalt, im zweiten Teil der Trocknung von einer kleineren Luftmenge mit niedrigerem spezifischen Wärmeinhalt bestrichen. In Annäherung an das Gleichstromverfahren

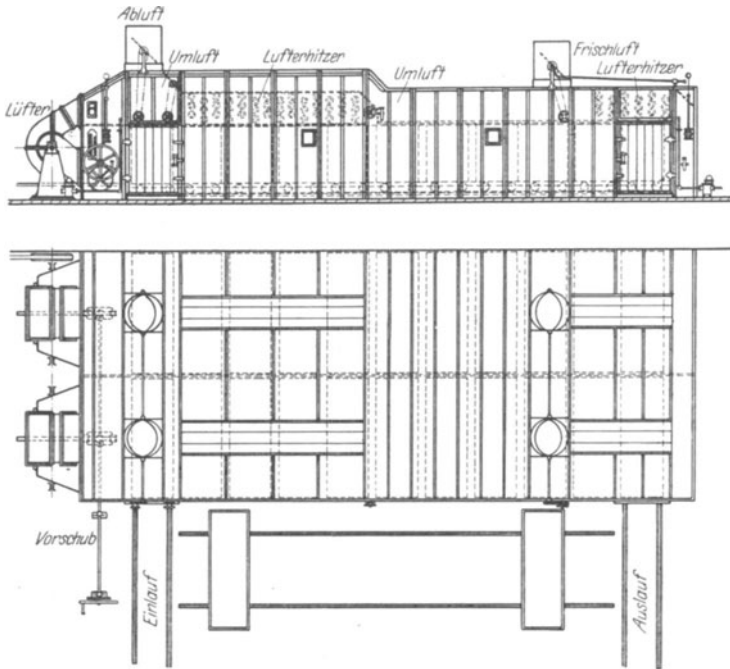


Abb. 148. Doppelter Kanaltrockner (Gruschwitz).

findet sich hier lebhaftere Vortrocknung mit schonender Nachtrocknung in vorteilhafter Weise verbunden. Ähnlich wie in Abb. 140 macht hier der Vorbau des Lüfters in der Kanalachse seitliche Zuführung des Gutes und Beweglichkeit der Wagen in zwei zueinander senkrecht stehenden Richtungen erforderlich.

Wird im Grenzfall die Trockenluft in geschlossenem Kreislauf durch einen Wetterfertiger geführt, auf Frischluft daher ganz oder nahezu ganz verzichtet, so entspricht der Verlauf der Trocknung nicht etwa dem Umluftverfahren, für das die Erhöhung der umlaufenden Luftmenge kennzeichnend ist, sondern dem reinen Frischluftverfahren, wobei die zurückgesaugte Luft durch die Behandlung im Wetterfertiger die Eigenschaften von Frischluft in einer bestimmten Zusammen-

setzung annimmt. Daher stellt der waagerechte Kanaltrockner für Schuhwerk nach Abb. 149 ein Beispiel für Querstrom mit einfacher Vorwärmung dar, bei dem wegen der geringen Baulänge die durch Abwärtsströmung der Trockenluft erreichbaren Vorteile zur Auswirkung kommen. Nach ihrem Austritt aus dem Trockner wird die Luft im Wetterfertiger durch kaltes Wasser entfeuchtet, danach vorgewärmt in den Trockner zurückgeführt. Die in Abb. 149 vorgesehene Möglichkeit, einen Teil der Luft in die Umgebung entweichen zu lassen und durch Frischluft zu ersetzen, ergibt den Übergang zur einfachen Vorwärmung mit Umluft. Die Aufgabe der Raumbewetterung läßt sich alsdann gleichzeitig mit der Trocknung lösen. Im Sommer wird kühle, im Winter angewärmte Luft aus der Zuleitung zum Trocknen ent-

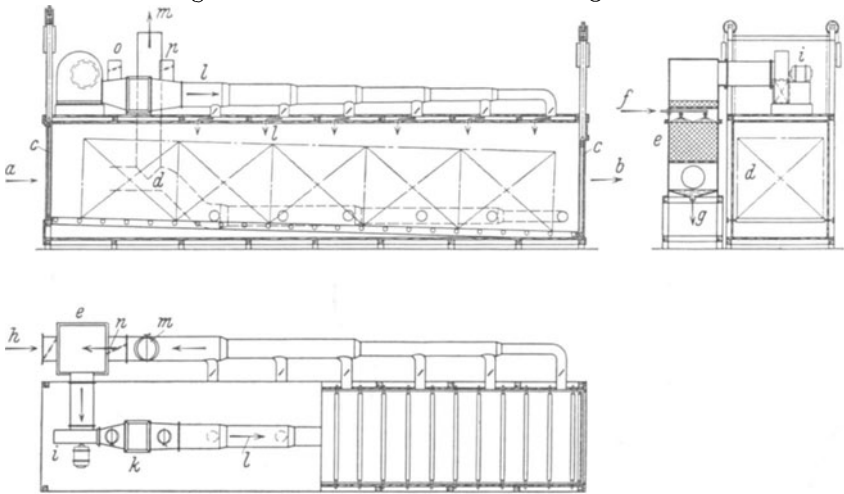


Abb. 149. Kanaltrockner für Schuhwerk.

a Einlaufseite, *b* Auslaufseite, *c* Schiebetür, *d* Rollgestell, *e* Wetterfertiger, *f* Wassereintritt, *g* Wasseraustritt, *h* Frischluft, *i* Lüfter, *k* Luffterhitzer, *l* Zuluft, *m* Abluft, *n* Umluft, *o, p* Raumbelüftung.

nommen und in den Arbeitsraum geführt, gleichzeitig die Ersatzluft aus dem Arbeitsraum gesaugt und durch den Wetterfertiger geleitet. Die Verbindung des geschlossenen Luftkreislaufs mit Frischluftzufuhr wird auch in den Fällen nötig, wo der Trockenraum im Innern einer dauernden Überwachung bedarf und die Luft durch das Trockengut eine Veränderung erfährt, die sie als Atemluft verschlechtert.

Die stufenweise Erwärmung bietet bei Gleichstrom gegenüber der einmaligen Vorwärmung keine besonderen Vorteile, wenn das Naßgut verhältnismäßig hohe Temperaturen erträgt. Der Fall, daß diese Voraussetzung nicht erfüllt ist und trotzdem im Gleichstrom gearbeitet wird, zählt zu den Ausnahmen. Der Ziegelrockner der Abb. 150 (Möller-Pfeifer) gibt ein Beispiel hierfür. Das auf Wagen angeordnete Gut wird im Sinne der Luft durch Windwerke bewegt. Neben dem Hauptlüfter bewirken zahlreiche Einzellüfter eine verstärkte Querluftströmung. Die Heizvorrichtungen sind neben den Geleisen ange-

ordnet und über die Kanallänge verteilt. Geringe Trockenkraft am Eintritt neben hoher Trockenkraft am Austritt führen zu einer Annäherung an das Gegenstromverfahren. Da hierbei eine schlechte Ausnutzung der zuletzt mit höchster Temperatur aufgewandten Wärme in Kauf genommen wird, läßt sich die Arbeitsweise neben der Rücksicht auf die besonderen Eigenschaften des Gutes nur dort vertreten, wo Abwärme mit hoher Temperatur zur Verfügung steht und anderweitig nicht ausgenutzt werden kann.

Unendlich viel größer ist die Anwendungsmöglichkeit stufenweiser Erwärmung bei waagerechten Kanaltrocknern, die im Gegenstrom arbeiten. Ihre Verbreitung ist mit Recht in ständiger Zunahme begriffen. Der durch die Hilfslüfter bewegte Luftstrom wird bald von oben nach unten, bald umgekehrt oder auch waagrecht durch das Gut geführt. Zweifellos bietet die Übereinstimmung zwischen natürlichem und künstlichem Luftlauf im ersten Falle besondere Vorzüge, wenn die Form des Trockengutes kein Hindernis bildet. Aus diesem Grunde kann die Ausführung nach Abb. 151 (Schilder), bei der tote Winkel sicher vermieden werden, als Richtschnur dienen. Das strangartige Gut wird durch den in Richtung des Hanges durchtretenden Luftstrom vor dem Verwirren geschützt. Die feuchte Luft

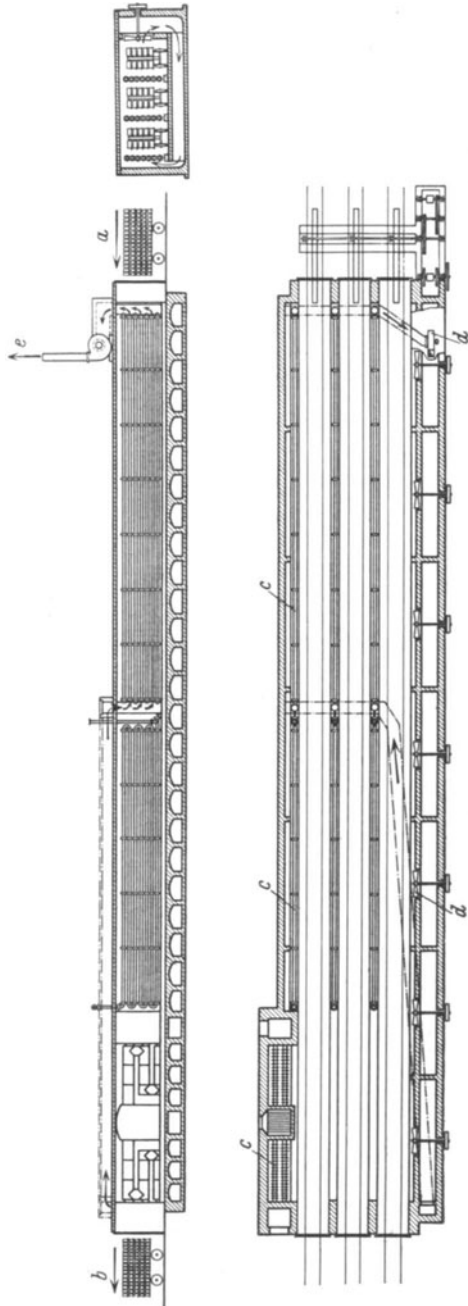


Abb. 150. Gleichstrom-Kanaltrockner (Möller-Pfeifer). *a* Einlaufseite, *b* Auslaufseite, *c* Luftheizer, *d* Lüfter, *e* Abluft.

tritt an der Aufgabeseite des Trockners

unten in einen Ablüfter, der sie ins Freie fördert. Die Frischluft findet durch das entgegengesetzte offene Ende des Kanals Eingang. Der waagerechte Querlauf der Luft kommt nach Abb. 152 (Schilde) in Ausnahmefällen in Betracht, wenn das Trockengut, wie hier aufgespulte Kunstseide, freie Luftkanäle vorzugsweise in diesem Sinne bietet. Für das Absaugen der Abluft ist alsdann ein Punkt zwischen der Stelle, wo die Luft das Gut seitlich verläßt, und dem Heiz-

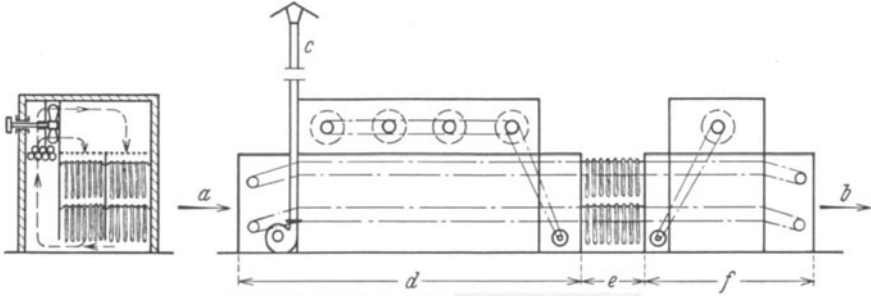


Abb. 151. Gegenstrom-Kanaltrockner (Schilde).

körper gegeben. Wird bandförmiges Gut flach durch den Trockner bewegt, so muß auch hier der Hilfsluftstrom, etwa nach Abb. 117, waagrecht über das Gut streichen, wenn dieses für die Luft undurchlässig ist. Ebenso wie bei senkrecht abwärts gerichteter Luftbewegung die Verschiedenheit der Trockenkraft in den einzelnen Höhenlagen deshalb keine Rolle spielt, weil sie, infolge der Vergrößerung der Luftgeschwindigkeit auf 7 bis 8 m/s durch den Querlauf, auf ein verschwindendes

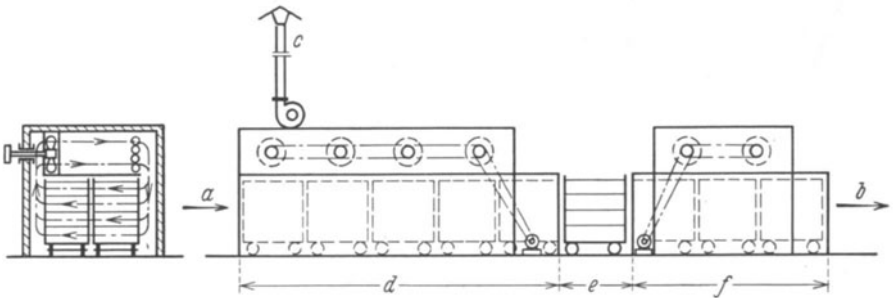


Abb. 152. Gegenstrom-Kanaltrockner (Schilde).

Maß verringert werden kann, erscheint es zulässig, die rasch strömende Luft entgegen der natürlichen Schichtung aufwärts zu richten, wenn durch geeignete Luftführung und Formgebung des Luftweges das Entstehen toter Winkel ausgeschlossen ist. Diese Voraussetzung wird bei dem Gewebetrockner der Abb. 153 (Zittau) erfüllt. Zudem wirkt sich bei einem waagerechten Kanaltrockner, den das Gut wie hier unter ständiger Auf- und Abwärtsbewegung durchwandert, der Unterschied der Trockenkraft in den einzelnen Höhenlagen auf das Gut praktisch aus den erwähnten Gründen überhaupt nicht aus. Die in Abb. 153 ange-

deutete gehäuselose Form der Querlüfter unter Ersatz der Gehäusewirkung durch entsprechende Anpassung der Deckenform findet in der Hauptsache dort Anwendung, wo es sich darum handelt, das Ansammeln von Staub einzuschränken. Eine Verbindung zwischen seitlicher und senkrecht von unten nach oben gerichteter Luftströmung ist bei der Ausführung des Winkler-Trockners der Abb. 154 (Beth) gewählt. Die zunächst aufsteigenden Bedenken wegen einer Verschiedenheit der Trockenwirkung auf die einzelnen Teile des hier in Strangform auftretenden Gutes verlieren ihre Bedeutung mit Rücksicht darauf, daß das Potentialgefälle im Querluftstrom praktisch verschwindet. Die für die stufenweise Erwärmung dienende Heizvorrichtung, die früher für jeden Querluftstrom einzeln ausgeführt war, wird neuerdings gemeinsam in Heizkammern untergebracht, die über die ganze Kanallänge mit Ausnahme der an den beiden Enden vorgezogenen Teile ver-

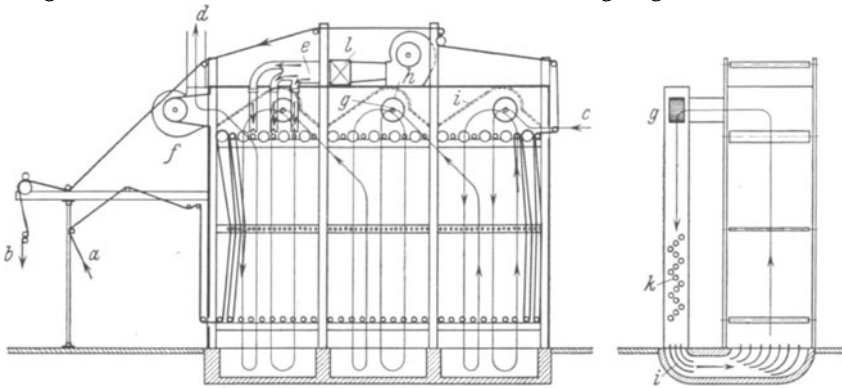


Abb. 153. Gewebetrockner (Zittau).

a Einlauf, *b* Auslauf, *c* Frischluft, *d* Abluft, *e* Zusatzluft, *f* Ablüfter, *g* Hilfslüfter, *h* Zusatzlüfter, *i* Leitwände, *k* Lüfterhitzer, *l* Zusatzlüfterhitzer.

laufen. Der Winkler-Trockner arbeitet mit ausgeglichenem Druck, so daß die Enden offen gehalten werden können, ohne Verluste in Kauf zu nehmen. Die Menge der Frischluft wird durch den am Beschickungsende angeordneten Abluftschacht geregelt. Das beiderseitige Herausziehen des eigentlichen inneren Kanals erfolgt mit dem Zweck, die Luftverluste auf der Beschickungsseite gering zu halten und gleichzeitig eine Kühlung des austretenden Gutes unter Übertragung seiner Überschußwärme an die Frischluft zu erzielen. Die Querlüfter sind als doppelseitig saugende Windräder ausgebildet und auf gemeinsamer Welle angeordnet. Die Luft wird in den seitlichen Heizkammern durch Klappen abgelenkt und erhält dadurch eine schraubenförmige Fortbewegung gegen das Beschickungsende zu. Eine Verfeinerung der stufenweisen Erwärmung läßt sich dadurch erzielen, daß die Heizvorrichtungen für die einzelnen Querluftzonen in ihrer Größe abgestuft werden. Unter Anordnung der Hilfslüfter seitlich in halber Kanalhöhe wird bei dem Gewebetrockner der Abb. 155 (Haas) die Luft aus den Hängen in der Mitte abgesaugt und gleichzeitig von oben nach unten zurückgeführt.

Einen Gegenstromstufentrockner mit veränderlicher Luftmenge gibt Abb. 156 (Haas) wieder. Der Querschnitt zeigt die Wagen einmal mit Horden zur Aufnahme von losen Stoffen, ein andermal mit Rahmen ausgerüstet, die zur Trocknung strangartigen Gutes die-

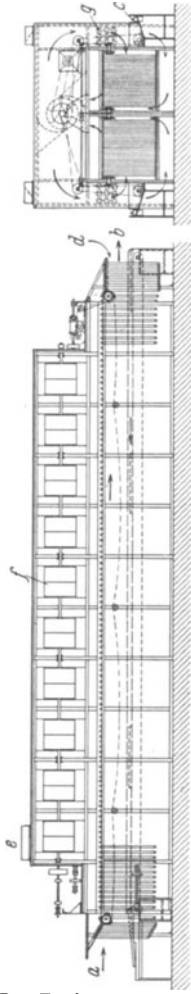


Abb. 154. Winkler-Gegenstromtrockner (Beth).
a Einlaufseite, *b* Auslaufseite, *c* Rücklauf der Stäbe, *d* Frischluft, *e* Abluft, *f* Lüfter, *g* Luffterhitzer.

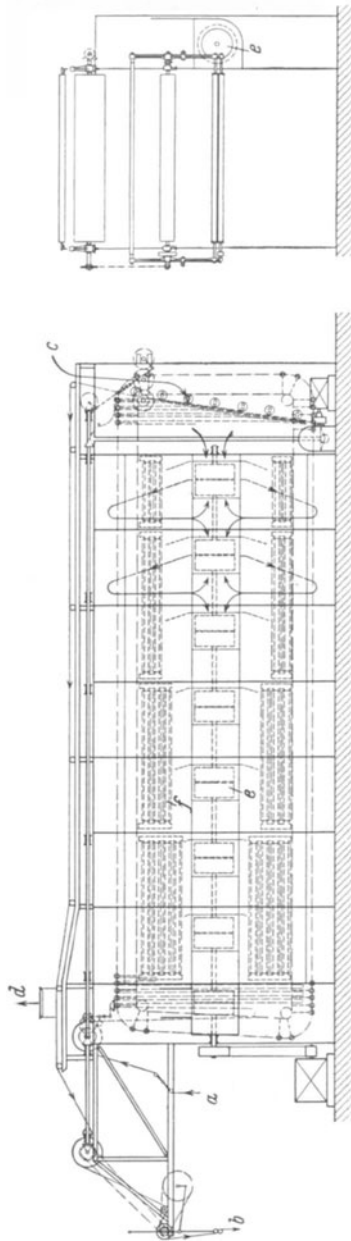
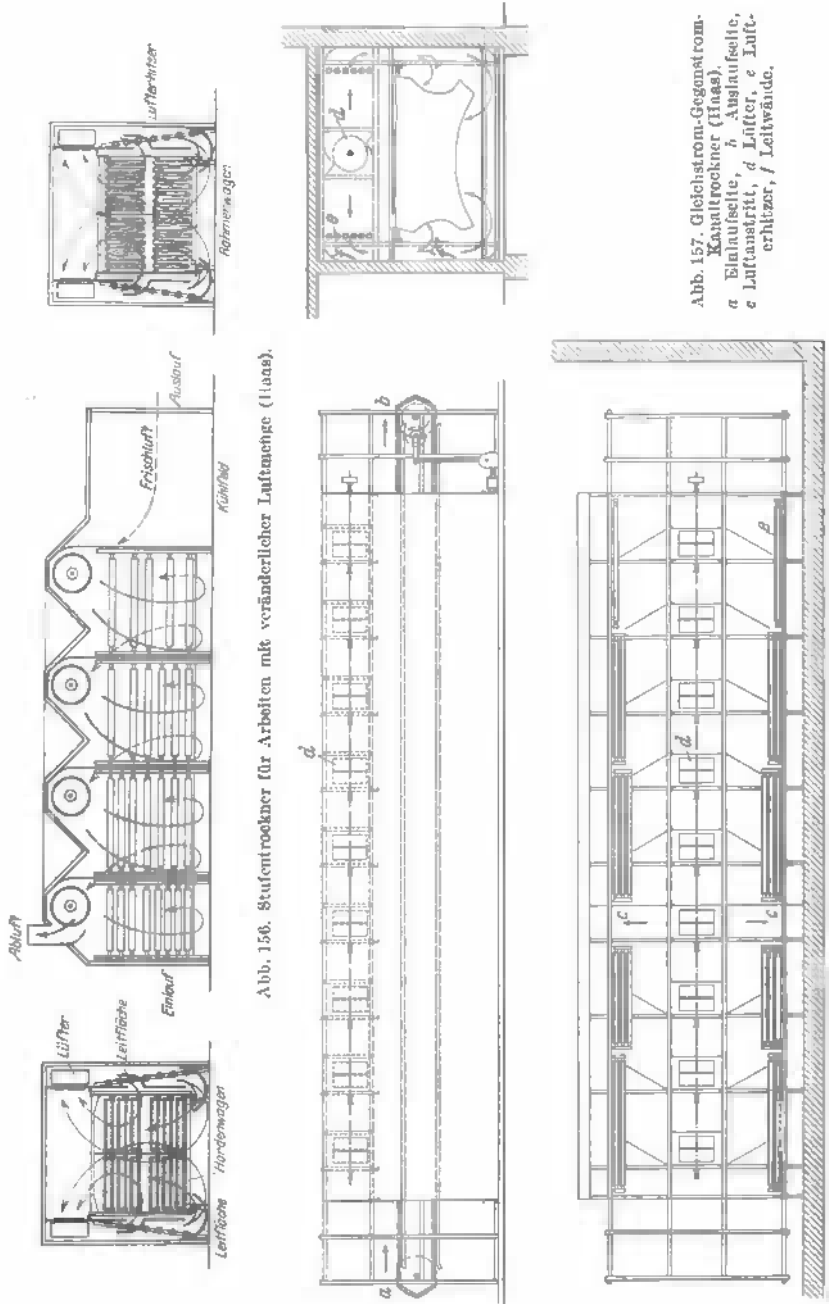


Abb. 155. Gewebetrockner (Haas). *a* Einlauf, *b* Auslauf, *c* Frischluft, *d* Abluft, *e* Lüfter, *f* Luffterhitzer.

nen. Der Luftstrom wird vor dem Auftreffen auf das Gut geteilt und dadurch ein Ausgleich der Trockenwirkung in verschiedener Höhenlage herbeigeführt.

Die untere Hälfte erhält weniger Luft von höherer mittlerer Trockenkraft, die obere Hälfte mehr Luft von niedrigerer mittlerer Trockenkraft.

Eine Verbindung von Gleich- und Gegenstrom mit stufenweiser Vorwärmung der Trockenluft ist bei dem Ledertrockner der Abb. 157



(Haas) durchgeführt. Das Trockengut wird über Stangen geschlagen und durch Ketten von der Aufgabe- zur Abnahmeseite gefördert. Der Luftstrom der auf gemeinsamer Achse oberhalb des Kanals sitzenden Lüfter wird durch Lenkflächen nach der Mitte zu gerichtet. Ein hier auf der gleichen Welle angeordneter Lüfter entfernt die Abluft. Die Heizvorrichtungen sind abgestuft derart, daß ihre Größe gegen das Austrittende hin zunimmt. Über die Felle streicht die Luft teilweise von unten, teilweise von den Seiten gleichmäßig nach oben. Durch eingebaute Leitwände wird der seitlich niedergeführte Luftstrom geteilt,

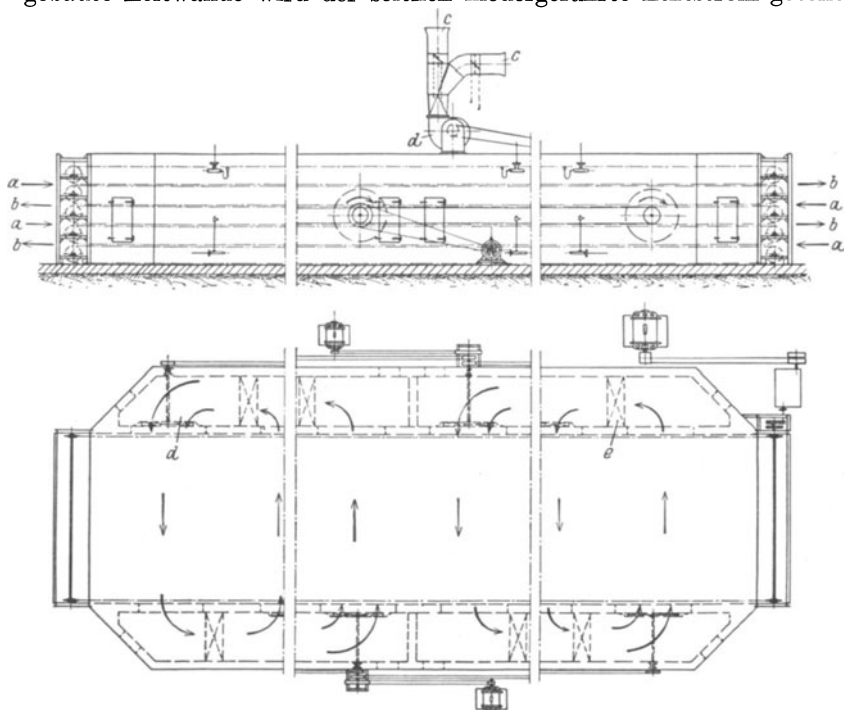


Abb. 158. Furniertrockner (Daqua).
a Einlauf, b Auslauf, c Luftaustritt, d Lüfter, e Luftheizer.

so daß sich die zu Abb. 156 angegebene Ausgleichwirkung einstellt. Besonders angebracht erscheint dieses Verfahren, wenn, wie bei dem Furniertrockner der Abb. 158 (Daqua), das Naßgut bald von der einen, bald von der anderen Seite eingeführt wird und auf verschiedenen Seiten getrocknet austritt. Die Frischluft strömt von beiden Enden in den Trockner ein, die Abluft wird in der Mitte des Kanals durch einen besonderen Lüfter entfernt. Infolgedessen steigt die Temperatur von beiden Seiten nach der Mitte zu an. Es ergibt sich ein allmählicher Übergang von schwacher zu starker, danach wieder zu schwacher Trockenwirkung in Verbindung mit einer Abkühlung des Gutes vor Verlassen des Kanals. Hierbei bleibt es gleichgültig, in welcher Richtung das Trockengut sich bewegt.

Trockner mit stufenweiser Erwärmung werden häufig aus einzelnen gleichartigen Bauelementen zusammengesetzt, die sich wirtschaftlich herstellen lassen. Diese Zerlegung in — nach Möglichkeit genormte — Abteile sollte die Regel bilden, wenn die Trockenluft sich in der Hauptsache quer zur Kanalachse bewegt, ihre in die Kanalachsenrichtung fallende Geschwindigkeitskomponente daher für die Bemessung des Kanalquerschnitts nicht mehr maßgebend ist.

Für die Durchführung reiner Innenheizung bei Trocknern mit örtlich unveränderlichem Trockenbild liegen merkwürdigerweise wenig Ausführungsbeispiele vor, offensichtlich deshalb, weil die Bedeutung der inneren Wärmezufuhr als Stufenheizung mit unendlicher Stufenzahl nicht voll erkannt wird. Es bietet keine baulichen Schwierigkeiten, der hierbei auftretenden Gefahr einer örtlichen Überhitzung des Gutes zu begegnen. Wird zur Verstärkung der Trockenwirkung ein Hilfsquerlauf der Trockenluft vorgesehen, so besitzt die Innenheizung kaum Vor-

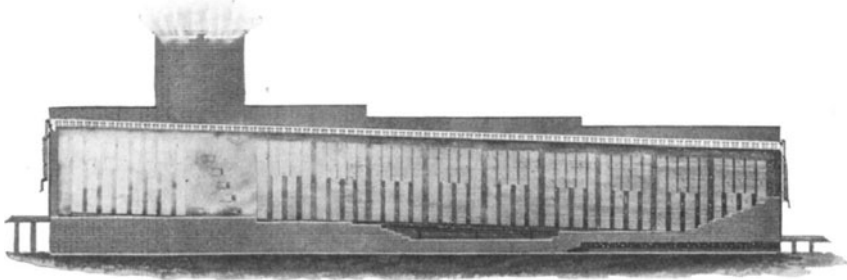


Abb. 159. Gegenstrom-Kanaltrockner (National).

züge vor der äußeren Mehrstufenheizung. Sie kommt vielmehr erst zur Geltung, wenn die äußere Vorwärmung der geradeaus strömenden Trockenluft durch innere Heizvorrichtungen ergänzt wird.

Da die Innenheizung auf eine allmähliche Erwärmung mit unendlicher Stufenzahl hinausläuft, gelten für sie die vorerwähnten Gesichtspunkte. Die Anwendung des Gleichstroms kommt daher auch hier kaum in Frage.

Ein Gegenstrom-Kanaltrockner für Holz mit Innenheizung stellt Abb. 159 (National) dar. Die Heizschlangen sind zwischen den Laufschielen unterhalb der Wagen angeordnet. Durch Kanäle, die an tiefster Stelle in der Längsrichtung verlaufen, strömt die Frischluft von der Stirnseite her ein und durch die Heizkörper hoch. Die feuchte Luft wird in der Nähe des Beschickungsendes durch einen Schacht abgeführt.

Bei dem Rollbahntrockner für flach liegende Pappe der Abb. 160 (Schilder) wirkt die über die ganze Kanallänge beiderseits des Trockenguts verteilte Innenheizung in dreifacher Weise. Frischluft strömt von beiden Enden aus ein. Das Trockengut trifft nach dem Eintritt mit Luft zusammen, deren Wärmeinhalt ständig zunimmt. Die hieraus sich ergebende Gleichstromtrocknung wirkt bis zu einer Stelle, wo die Ab-

saugung der feuchten Luft erfolgt. Hieran schließt sich eine Strecke,

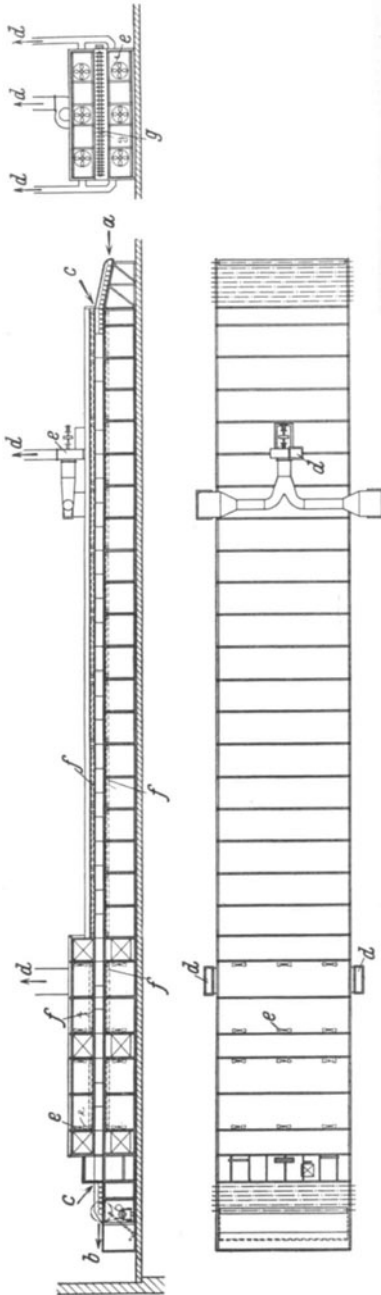


Abb. 160. Rollbahntrockner für Pappe (Schilde). *a* Einlauf, *b* Auslauf, *c* Frischluft, *d* Abluft, *e* Lüfter, *f* Luffterhitzer, *g* Rollbahn.

bei deren Durchlauf das Trockengut in der Hauptsache nur der Strahlwirkung der Heizrohre ohne Luftbewegung ausgesetzt ist. Zum Schluß läuft es im Gegenstrom mit der durch beiderseits angeordnete Lüfter kräftig bewegten und stufenweise durch Innenheizkörper erwärmten Luft, deren Austritt durch einen in einiger Entfernung von dem Auslauf sitzenden Schacht erfolgt. Die Ausführung der Fördervorrichtung als Rollenbahn mit gegeneinander versetzten Stützpunkten läßt bei der Fortbewegung stets wechselnde Teile des Trockenguts mit den Rollen in Berührung treten. Unregelmäßigkeiten, die bei fehlender Relativbewegung zwischen Tragvorrichtung und Gut infolge der stets gleichbleibenden Berührungspunkte unvermeidlich sind, werden hierdurch ausgeschaltet.

b) Senkrechter Kanaltrockner (Trockenturm). Wird der Kanaltrockner durch einen senkrecht verlaufenden Schacht gebildet, in dem Gut und Trockenmittel sich im Gleichstrom von oben nach unten bewegen, so äußert sich die natürliche Schichtung der Luft in günstigem Sinne. In großem Ausmaße finden sich derartige Trockner in den Vereinigten Staaten, wo die übliche große Gebäudehöhe ihre Ausführung erleichtert. Die Möglichkeit, den Schachttrockner gleichzeitig als Abfallvorrichtung zu benutzen, um das getrocknete Gut zur weiteren Verarbeitung oder Lagerung nach einem tiefer liegenden Stockwerk zu bringen, stellt, ebenso wie der geringe Grundflächenbedarf, einen beachtlichen Vorzug dar, der allerdings in der Regel durch hohe Baukosten überwogen wird. Was bei uns an

senkrechten Kanaltrocknern im engeren Sinne auftritt, ist als solcher

äußerlich kaum zu erkennen, weil das Längenmaß die Höhe meist übersteigt. Der in der Hauptsache von oben nach unten gerichtete Weg des Trockengutes erfährt eine Verlängerung und Verzerrung dadurch, daß die Bewegung zickzackförmig erfolgt.

Wird Gut und Trockenmittel bei senkrechten Kanaltrocknern im Gegenstrom geführt, so scheint die Rücksicht auf die Schichtung der Trockenluft Bewegung des Guts aufwärts, der Luft abwärts zu fordern. Hierbei ergeben sich jedoch Störungen durch den Auftrieb der verhältnismäßig hohen Luftsäule gegenüber der kälteren Umgebung. Infolgedessen ist die umgekehrte Bewegungsrichtung um so mehr am Platze, je größer die Ausdehnung des Trockners der Höhe nach ist. Sie wird beispielsweise angewandt bei Hordentrocknern für schaufelfähiges Gut. Die mit nasser Ware besetzte Horde wird durch Hebewerk hochgezogen, oben eingeführt, ruckweise gesenkt und am unteren Ende entnommen. Die vorgewärmte Trockenluft strömt dem Gut entgegen von unten nach oben.

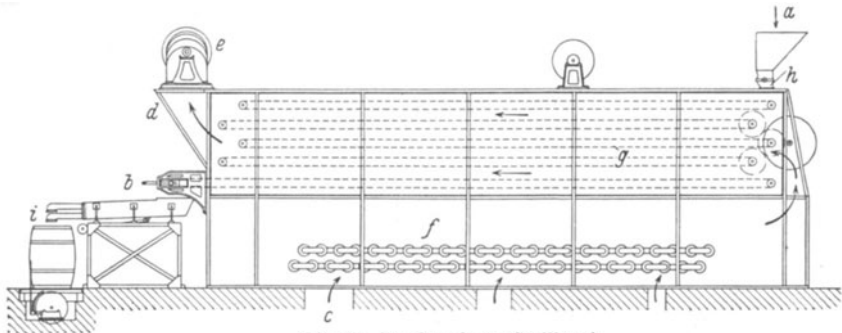


Abb. 161. Bandtrockner (Stollberg).
a Einlauf, *b* Auslauf, *c* Frischluft, *d* Abluft, *e* Lüfter, *f* Lüfterhitzer, *g* Förderbänder, *h* Aufgabevorrichtung, *i* Plansichter.

Der mit einfacher Vorwärmung arbeitende Mehrfach-Bandtrockner für Oxalsäure der Abb. 161 (Stollberg) läuft in seiner Wirkung auf einen senkrechten Querstromtrockner hinaus, da das Gut in seiner Hauptbewegung sich von oben nach unten bewegt, während die Luft waagrecht dazwischenströmt. Die Förderbänder sind aus feinmaschigem, geschmeidigem Bronzedrahtgewebe hergestellt. Die Beschickung erfolgt aus einem Aufgabetrichter mit Dosierungswalze, der Auslauf in einen doppelten Plansichter, der das Gut an die Versandfässer gibt. Die Luftbewegung durch den Trockner bewirkt ein Schraubenlüfter, unterstützt durch den natürlichen Auftrieb. Die Schichtung der Luft im eigentlichen Kanal ist ohne Einfluß auf die Gleichmäßigkeit des Trockengutes, das die verschiedenen Höhenlagen nacheinander durchläuft. Soll stark hygroskopisches Gut auf einen niedrigen Feuchtigkeitsgehalt getrocknet werden, so kann das hierfür ungünstige Niedersinken feuchter Luft dadurch verhindert werden, daß zwischen die Einzelbänder waagerechte Trennwände eingeschaltet und die Luft über die verschiedenen Höhenzonen verteilt wird. Bei schaufelfähigem Gut ergibt sich dann allerdings auf den Trennwänden eine unerwünschte Ablagerung von Teilen, die durch die Siebbänder fallen.

In gleicher Weise wie die waagerechten Kanaltrockner können die senkrechten mit Umluft, stufenweiser Erwärmung, Innenheizung und

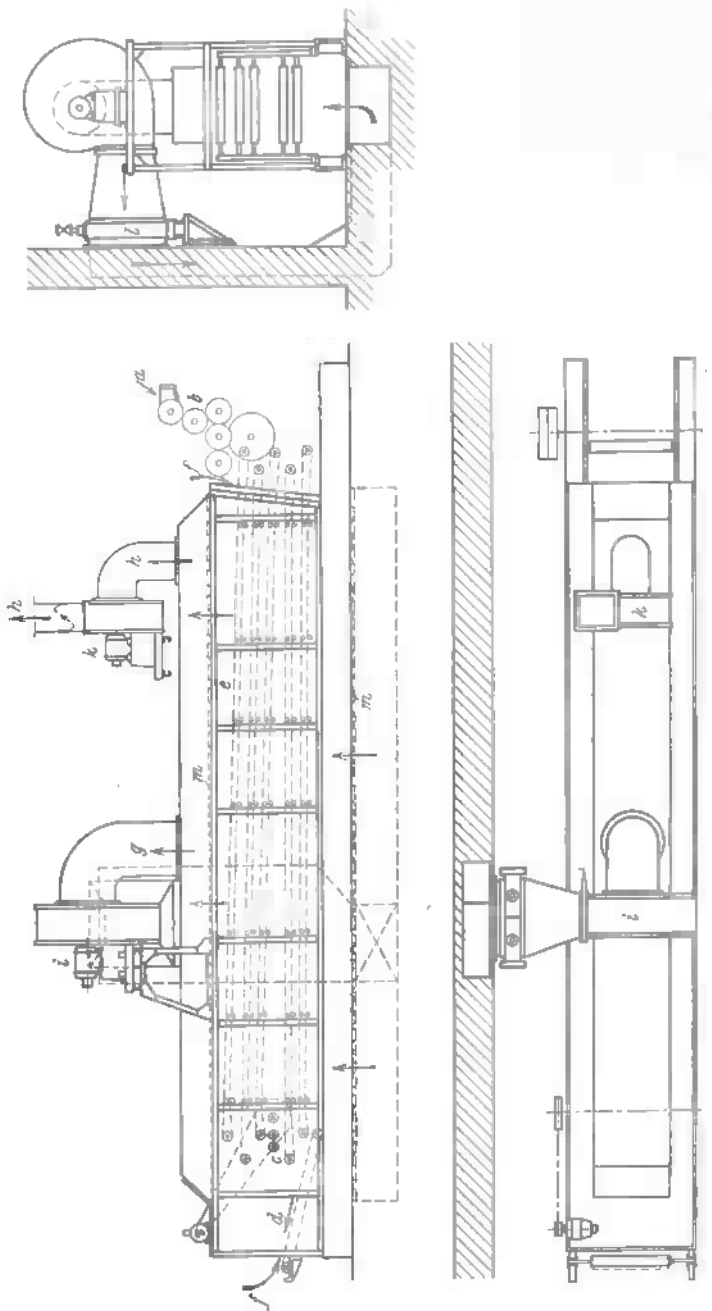


Abb. 162. Bandtrockner (Stollberg).
a Einlauf, *b* Kühlwalzwerk, *c* Zwischenwalzwerk, *d* Auslauf, *e* Förderbänder, *f* Frischluft, *g* Umluft, *h* Abluft, *i* Umlüfter, *k* Ablüfter, *l* Lufterhitzer, *m* Luftverteilerbohlen.

nach einem gemischten Verfahren arbeiten. Gegenstrom mit Umluft liegt vor bei dem nach den Angaben des Verfassers ausgeführten Seifenschnitzeltrockner der Abb. 162 (Stollberg). Die durch einen außenliegenden Lufterhitzer erwärmte Luft wird unterhalb der mehrfachen Siebbänder eingeführt, durch einen verschiebbaren, quer laufenden Bohlenbelag gleichmäßig auf den Kanal verteilt und durch die Siebbänder geführt. In gleicher Weise erfolgt die Regelung des Absaugens durch verschiebbare Bohlen, die oberhalb des eigentlichen Kanals quer verlaufen. Die überschüssige Luft wird durch einen besonderen Schleudlüfter am Einlaufende abgesaugt. Die Ersatzluft strömt von beiden Enden an der Ein- und Auslaufstelle nach. Die großen Luftmengen, die sich beim Umluftverfahren anwenden lassen, genügen, um der natürlichen Luftbewegung entgegenzuwirken, und er-

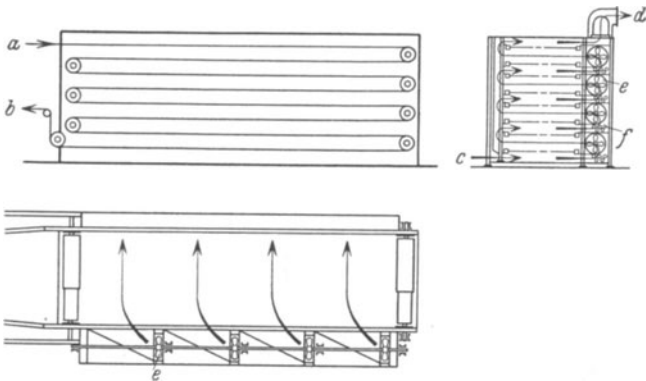


Abb. 163. Spann-, Rahm- und Trockenmaschine (Rud. Jahr).
a Einlauf, *b* Auslauf, *c* Frischluft, *d* Abluft, *e* Lüfter, *f* Lufterhitzer.

lauben, die Luft, entgegen dem allmählich von oben nach unten wandernden Trockengut, hochzuführen.

Im Querstrom mit Umluft arbeitet der als senkrechter Kanal anzusprechende Gewebetrockner der Abb. 118.

Als Beispiel für die Anwendung der stufenweisen Erwärmung bei einem senkrechten Gegenstrom-Kanaltrockner dient die Spann-, Rahm- und Trockenmaschine Abb. 163 (Rud. Jahr). Ihre besondere Eigentümlichkeit besteht darin, daß die unter ständiger Nachwärmung sich aufwärts schraubende Luft quer und nicht längs über das Gewebe geblasen wird. Die Stoffbahn läuft oben ein, unten aus. Bei stufenweiser Erwärmung ist die hier angewandte Luftführung von unten nach oben eindeutig richtig.

Dies gilt erst recht, wenn durch Innenheizung der Auftrieb der feuchten Luft aufrechterhalten wird, wie dies für den senkrechten Gegenstrom-Kanaltrockner für lackierte Gegenstände der Abb. 164 (Werner-Pfleiderer) zutrifft. Das auf Schaukeln liegende Gut wird durch endlose Ketten zunächst in den Trockner hoch, danach im Zickzack allmählich abwärts geführt.

c) **Trommeltrockner.** Den waagerechten Kanaltrocknern ganz nahe verwandt, wenn auch der Form nach durchaus verschieden, sind die Trommeltrockner, deren wesentliches Merkmal darin besteht, daß eine besondere Fördervorrichtung für das Gut fehlt. Sie wird durch die Bewegung der sich drehenden Trommel entbehrlich. Das schaufelfähige Trockengut wandert in der Hauptsache in Richtung der leicht geneigten Trommelachse und erfährt zudem eine lebhaftete Mischbewegung

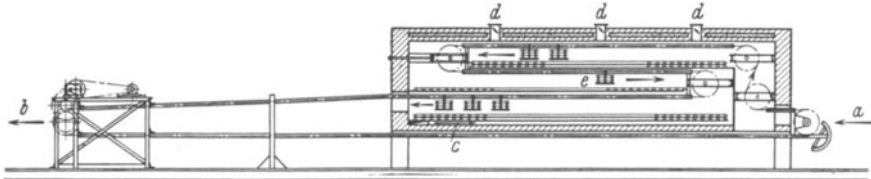


Abb. 164. Gegenstrom-Kanaltrockner (Werner-Pfleiderer).
a Einlauf, *b* Auslauf, *c* Frischluft, *d* Ablauf, *e* Schaukel.

durch besondere Einbauten. Infolgedessen äußern sich die beim waagerechten Kanal durch die natürliche Luftbewegung veranlaßten Störungen hier auch dann nicht, wenn, wie dies die Regel bildet, im Gleichstrom gearbeitet wird.

Die Verwendung von Luft als Trockenmittel bildet bei dem Gleichstrom-Trommeltrockner die Ausnahme. In der Regel wird ihm eine unmittelbar wirkende Feuerungsanlage vorgeschaltet, deren Verbrennungsgase als Trockenmittel dienen. Sie werden vor dem Ein-

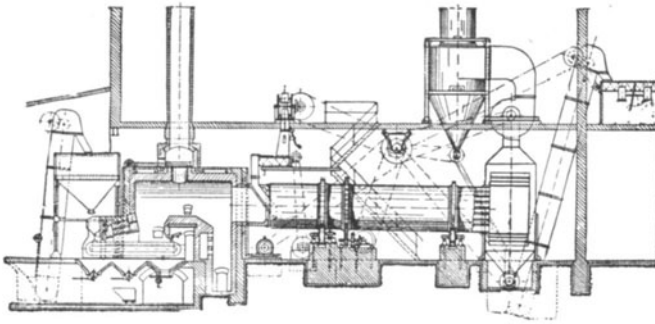


Abb. 165. Trommeltrockner (Büttner).

tritt in die Trommel mit Luft gemischt und auf eine dem Gut zuträgliche Temperatur gebracht. Bei dem Gleichstromtrockner der Abb. 165 (Büttner) dient der Kamin der Feuerung nur für die Inbetriebsetzung; während des Arbeitens bewirkt ein hinter den Trockner geschalteter Lüfter die Absaugung der Trockengase. Eine Ausbringkammer am Ende des Trockners nimmt das fertige Gut auf, ein an den Lüfter anschließender Abscheider bezweckt Entstaubung der Abgase und Wiedergewinnung mitgerissener Teilchen. Am Ausfallende ist eine Stauvorrichtung, Abb. 166 (Büttner), angeordnet, die aus einem Leitrad mit schrägen Flügeln besteht und zur Regelung der Trockendauer dient.

Um die Drosselung des Querschnittes nicht ungünstig auf den Brüdenaustritt zurückwirken zu lassen, wird mit der Stauvorrichtung ein Luftauslaß mit großem, freiem Querschnitt verbunden, durch den die Brüden unabhängig von dem Gut austreten. Verminderung des Staubverlustes ergibt sich nebenher.

Sollen Trommeltrockner verschiedenen Zwecken dienen, so kann Umdrehungsgeschwindigkeit und Neigung veränderlich gehalten werden. Die senkrechte Verstellung befindet sich am Auslaufende. Die Abdichtung der sich drehenden Trommel muß der Verschiebung folgen. Sie geschieht meist in Form einer Labyrinthdichtung, z. B. nach Abb. 167 (Humboldt).

Um Verschmutzungen und Entzündungsgefahr des Gutes zu vermeiden, werden zwischen Feuerung und Trommel Abscheidekammern für die Flugasche, in Ausnahmefällen Filterschichten eingeschaltet. Bei den mit heißen Gasen arbeitenden Trommeltrocknern ist die Sicherung einer ständigen Durchmischung des Gutes von besonderer Bedeutung. Die Ausführung des hierfür dienenden Einbaues ist sehr verschieden. Da es sich um schaufelbares Gut handelt, das von dem Trockengas bei richtiger Arbeitsweise durchdrungen und nicht oberflächlich bestrichen werden soll, ist in erster Linie die Raumwirkung, daneben das Fassungsvermögen bzw. der Füllungsgrad maßgebend.

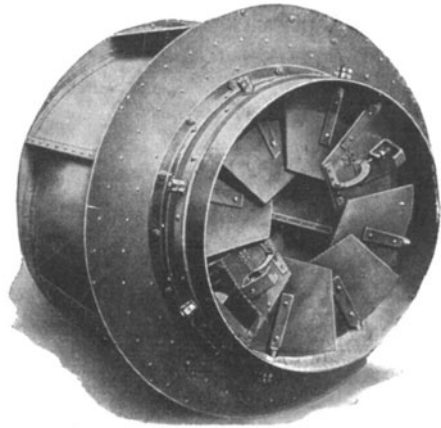


Abb. 166. Stauvorrichtung (Büttner).

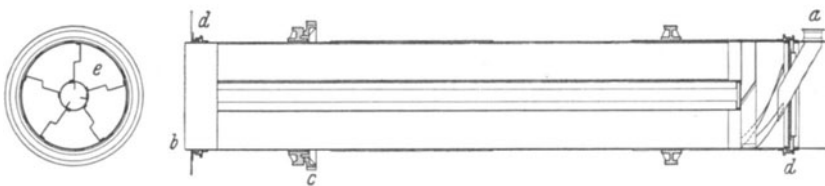


Abb. 167. Trockentrommel (Humboldt).
a Einlauf, b Auslauf, c Antrieb, d Labyrinthdichtung, e Großzellen.

Verhältnismäßig kleine Einzelzellen bedingen eine gleichmäßige Verteilung am Einlaufende, da ein nachträglicher Ausgleich nicht stattfindet. Die großen Einzelzellen nach Abb. 167 sind befahrbar, daher leicht zu überwachen und auszuwechseln. Die Kröpfung macht sie gegen Wärmedehnung unempfindlich. Die Ausführung hat mit Hubleisten den Vorteil gemeinsam, daß Verstopfungen weniger zu befürchten sind; diesen gegenüber kommt als Vorzug kleinere Fallhöhe, daher geringere Staubentwicklung zur Geltung.

Bei der Einbauweise der Abb. 168 (Büttner) entspricht jeder Drehung der angedeutete kreuzförmige Weg des Gutes mit viermaligem Abrieseln und Wenden. Das Gut wandert hierbei vorzugsweise in ein und derselben Zelle, daneben findet ein Ausgleich von Zelle zu Zelle statt, so daß auch bei ungleichmäßiger Aufgabe am Einlauf die Verteilung über den ganzen Querschnitt sich alsbald regelt.

Ähnlich wirkt der Einbau der Abb. 169 (Schilde), bei dem die Abrieselungen und Wendungen bei jeder Drehung dreimal erfolgen. Unter den erwähnten Gesichtspunkten bedeutet dies noch keine Unterlegenheit, wenn das verarbeitete Gut derart ist, daß Füllungsgrad und Raumwirkung für die Trockenleistung vorwiegend maßgebend sind.

Wird eine Rieselvorrichtung so ausgebildet, daß das Gut allmählich den ganzen Querschnitt durchzieht, so läßt es sich kaum vermeiden, daß, ebenso wie bei einfachen Schaufelwerken, die oberen Teile weniger gefüllt sind als die unteren, die Raumwirkung daher eine schlechtere

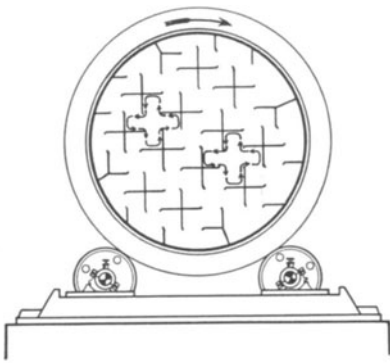


Abb. 168. Trommleinbau (Büttner).

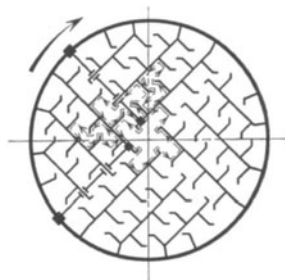


Abb. 169. Trommleinbau (Schilde).

ist. Demgegenüber stellt der geringere Strömungsverlust der Trockengase einen nur scheinbaren Vorzug dar.

Eine Zwischenlösung kann nach Abb. 170 (Fellner & Ziegler) gewählt werden. Kreuzwände und zylindrische Einsätze unterteilen den ganzen Querschnitt. Die Rieselwirkung vollzieht sich innerhalb der Großzellen. In der Trommelmitte ist hier der Einbau unterbrochen, um die gesamte Gutsmenge nachträglich nochmals zu durchmischen und neuerlich zu verteilen. Darüberhinaus kann nach dem Vorbilde der Abb. 171 (Mozar) auf halbem Wege des Gutes ein einfaches Mahlwerk eingeschaltet werden, um plastische und schlammige Stoffe, die während der Vortrocknung zum Zusammenballen neigen, zu zerkleinern und dadurch eine gleichmäßigere Nachrocknung zu sichern. Die besondere Form des Doppelkegels bedeutet hier Verkürzung gegenüber einer einfachen Trommel vom Querschnitt des Innenkegels bzw. des Ringraumes zwischen beiden Mänteln, ergibt daher, verglichen mit einem einfachen Trockner gleichen Inhalts und gleichen Außendurchmessers, größere Geschwindigkeiten für Gut und Trockenmittel. Der Wärmeaustausch beiderseits der leitenden Innenwand bedeutet eine Verzerrung des reinen Gleichstromver-

fahrens, die Luft wird im Ringkanal nacherwärmt, dafür in der Innentrommel abgekühlt

Je verwickelter der Trommeleinbau ist, um so mehr kommt die Frage der schwierigen Reinigung zur Geltung. Daher wird zuweilen auf den festen inneren Einbau verzichtet. Die Mischung des Gutes erfolgt durch Hubleisten. Vollkommene Verteilung gelingt hierbei durch eine große Anzahl kleiner Schaufeln. Wegen der großen Fallhöhe und Staubentwicklung eignen sie sich vorzugsweise für ballende Stoffe, wie Kohlenschlamm, der Zellen und Rieselbleche verstopfen würde.

Beim Gegenstrom-Trommeltrockner bildet die Anwendung vorgewärmter Luft die Regel, weil Feuergase das Gut durch Entzündung gefährden würden. Der Staubverlust ist hierbei geringer, weil die vom Luftstrom mitgerissenen Teile getrockneten Gutes Gelegenheit finden, sich vor Verlassen des Trockners auf dem feuchteren Gut abzusetzen. Das niederrieselnde Naßgut übernimmt hierbei die Rolle des Staubfängers. Die Bauweise der Trommel stimmt im übrigen mit der des Gleichstromtrockners überein. Die erwärmte Luft tritt durch den der Entladung des getrockneten Gutes dienenden Sammelkopf ein. Der innere Einbau kann auch hier aus Zellen, Rieselvorrichtungen oder Hubleisten bestehen. Der gleichfalls im Gegenstrom arbeitende Brownell-Trockner der Abb. 172 (Sturtevant) enthält eine Anzahl nebeneinander liegender, durch Drahtwände getrennter Spiralführungen, durch die das körnige Trockengut abwechselnd von außen nach innen und von innen nach außen rieselt. Im dargestellten Falle sind zwei Gruppen von je fünf Windungen hintereinander geschaltet und durch einen dazwischenliegenden Ausgleichraum getrennt. Um die Ansammlung des Trockengutes an tiefster Stelle zu vermeiden, sind die Spiralgänge mit besonders geformten Schaufeln versehen, die das Gut heben und zum Teil diesseits, zum Teil jenseits des höchsten Punktes niederrieseln lassen. Bei dem Brownell-Trockner sind wesentlich höhere Luftgeschwindigkeiten zulässig als bei einem Trommeltrockner ohne Sieb-

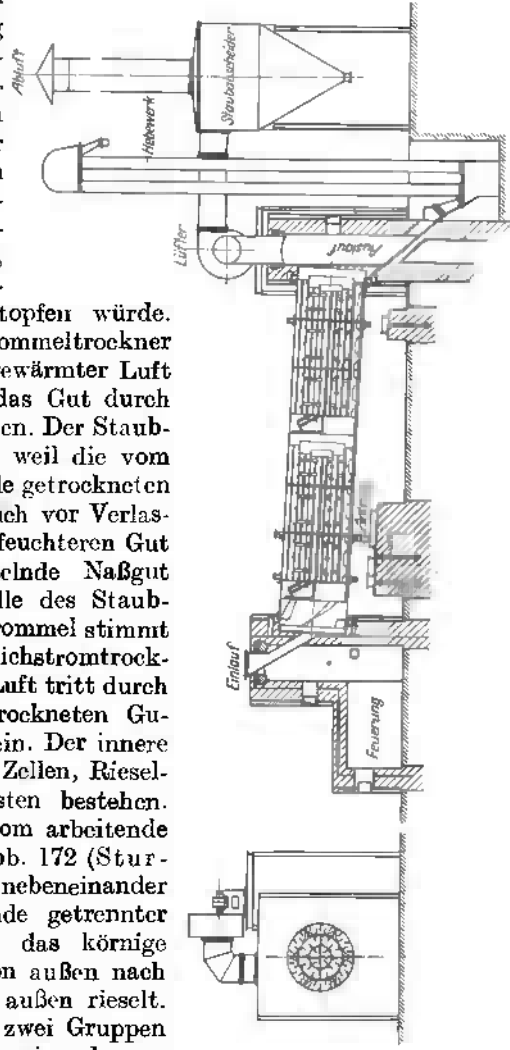


Abb. 170. Trommeltrockner (Fellner & Ziggler).

wände. Bei Trockengut, das vor der Lagerung eine gründliche Auskühlung verlangt, kann ein ähnlich gebauter Kühler seitlich so angegliedert werden, daß das im Gegenstrom getrocknete und daher warme Gut den Kühler durchrieselt und hierbei von Frischluft bespült wird, die alsdann den Trockner versorgt.

Im Querstrom arbeitet der Trommeltrockner Abb. 173 (Imperial). Die in der Regel als Trockenmittel angewandten Abgase treten durch

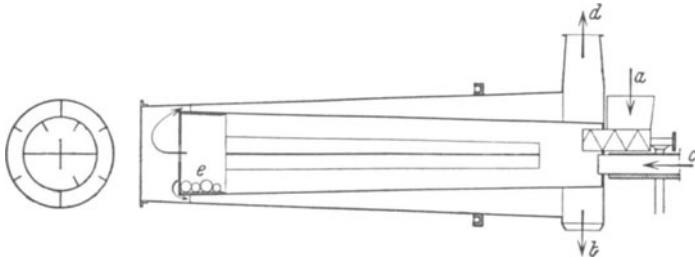


Abb. 171. Trockentrommel (Mozer). *a* Einlauf, *b* Auslauf, *c* Zuluft, *d* Abluft, *e* Mahlwerk.

einen inneren Verteilzylinder über die ganze Trocknerlänge gleichmäßig radial aus, durchdringen einen gelochten Zylinder, der das Trockengut von dem Innenrohr abhält und kommen danach mit dem durch Schaufeln und Rieselflächen in Bewegung gehaltenen Trockengut in Berührung. Dadurch, daß das Absaugegehäuse zwischen den beiden Trocknerenden angeordnet ist, ergibt sich eine Nebenbewegung der Gase, die auf das eintretende Gut im Sinne des Gleichstroms, auf das austretende im Sinne des Gegenstroms wirken, wobei gleichzeitig die

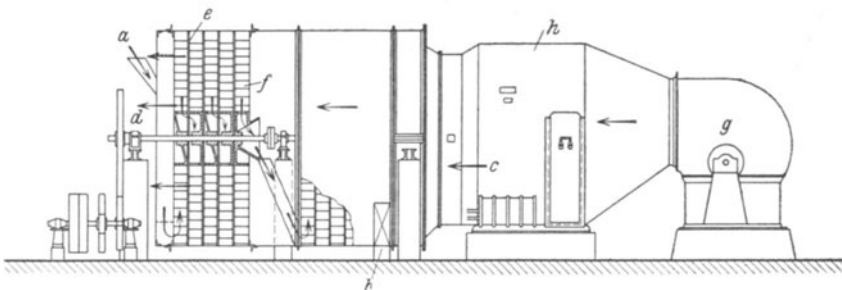


Abb. 172. Brownell-Trockner (Sturtevant). *a* Einlauf, *b* Auslauf, *c* Zuluft, *d* Abluft, *e* Drahtwände, *f* Spiralen, *g* Lüfter, *h* Lufterhitzer.

Gasmenge von den beiden Enden nach dem Absaugegehäuse zu wächst. Die Trommel wird durch das feststehende Absaugegehäuse unterbrochen und gegen dieses abgedichtet. Verstellbare Klappen am inneren Einsatzrohr ergeben die Möglichkeit, die Trockengase beliebig zu verteilen.

d) Rieseltrockner. Im Rieseltrockner sinkt schaufelbares Gut unter Ausnutzung seiner Schwere langsam abwärts und wird hierbei von dem luftförmigen Trockenmittel umspült. Die Wirkungsweise ist also ähnlich der des Trommeltrockners. Bei der Ausführung des Rieseltrockners ergibt sich die Aufgabe, das Gut ständig zu durchmischen

und die Luft so zu führen, daß sie das Gut zwangsläufig durchdringt. Die Schichtstärke wird dadurch begrenzt, daß mit ihr der Luftwiderstand wächst und gleichzeitig die Sicherheit für einen ständigen Wechsel der von der Luft zuerst getroffenen Teile abnimmt. Für die Richtung der Luftbewegung durch das Trockengut bildet der Querstrom die Regel. Er ist zuweilen dadurch verzerrt, daß die Luft mehrmals im Zickzack durch die niederrieselnde Schicht geführt wird. Die Rücksicht auf Begrenzung des Luftwiderstandes schränkt die Anzahl der Umdrehungen der Luft ein, so daß das Verfahren die kennzeichnenden Eigenschaften des Gleich- oder Gegenstroms in der Regel nicht annimmt. Ist dies ausnahmsweise der Fall, so bewegen sich Gut und Trockenmittel in einem gemeinsamen Schacht. Hierbei muß durch besondere Maßnahmen Vorsorge getroffen werden, daß einerseits der Durchfluß der Luft nicht zu sehr gehemmt ist, andererseits das nie-

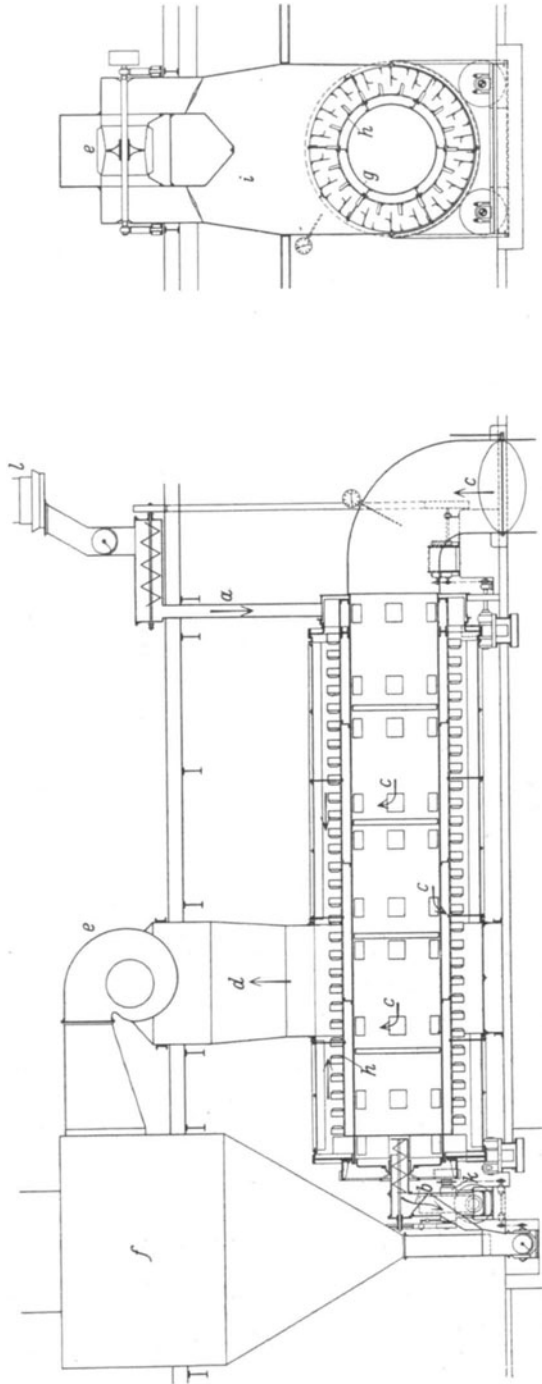


Abb. 173. Querstrom-Trommelrockner (Imperial).
a Einlauf, *b* Auslauf, *c* Heizgase, *d* Brüden, *e* Lüfter, *f* Zyklon, *g* Verteilzylinder, *h* Siebzylinder, *i* Absauggehäuse, *k* Antrieb, *l* Presse.

derrieselnde Gut aufgehallen wird. Bei dem Gegenstrom-Rieselrockner für Kohle der Abb. 174 (Universal) wird das Trockengut durch einen umlaufenden Verteiler gespeist und durch zahlreiche Rückhaltevorrichtungen allmählich abgesenkt, während die erwärmte Luft dem Gut entgegen von unten nach oben strömt. Die aufeinander folgenden rinnenförmigen Fangkörper drehen sich abwechselnd links und rechts herum, so daß sich stets der folgende Körper in Aufnahmestellung befindet, wenn der vorausgehende zur Entleerung kommt. Eingegossene Leitwände regeln die Richtung des einlaufenden Gutes. Reiner Querstrom liegt vor bei dem in Abb. 175 (Miag) wiedergegebenen Rieselrockner, bei

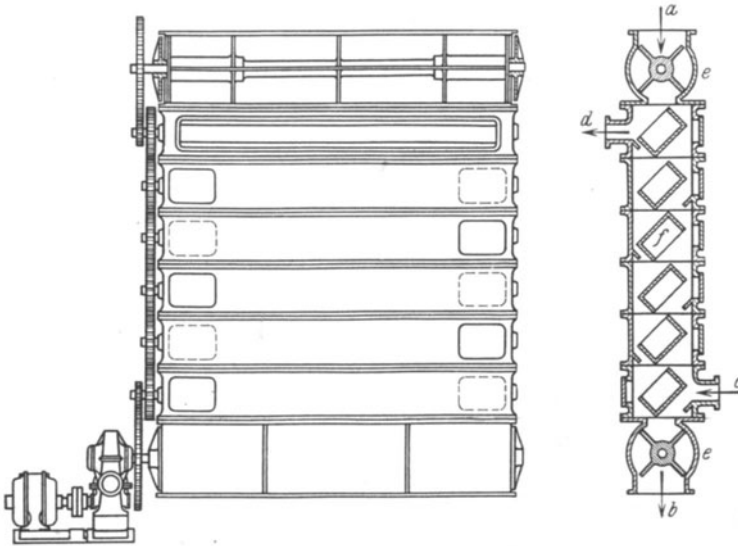


Abb. 174. Gegenstrom-Rieselrockner (Universal).
a Einlauf, *b* Auslauf, *c* Zuluft, *d* Abluft, *e* Schleusen, *f* Fangkörper.

dem die Heißluft in dem zwischen zwei Rieselsäulen entstehenden freien Raum an einer tief gelegenen Stelle eintritt, um sich über die ganze Höhe der Trockenzone auszudehnen und die Säulen des körnigen Gutes von innen nach außen zu durchdringen. Wendevorrichtungen leiten das Gut abwechselnd an die Innen- und Außenseite der aus gelochtem Blech bestehenden Fallschächte. Der untere Teil des mittleren Raumes ist von der eigentlichen Trockenzone getrennt. An tiefster Stelle tritt kalte Luft ein, die das getrocknete Gut durchdringt und hierbei kühlt, um sich danach mit der Heißluft zu vereinigen und mit dieser zu dem an höchster Stelle angeschlossenen Absaugelüfter zu strömen. Der in der Trennwand sitzende Schieber wird gelegentlich geöffnet, um den darüber lagernden Staub abzulassen. Die Regelung von Zu- und Ablauf erfolgt selbsttätig. Zuweilen wird bei derartigen Schachttrocknern auf die Ummantelung verzichtet. Alsdann sind zwei oder mehr Lüfter erforderlich. Erfolgt das Wenden des Gutes beim Niederrieseln in voll-

kommener Weise, so wirkt sich der Nachteil, daß die Luft stets auf der einen Seite der Rieselsäule ein-, auf der anderen austritt, nicht ungünstig aus. Gewähr in dieser Hinsicht ist dann gegeben, wenn die Leistung genügend groß ist und eine ausreichende Rieselgeschwindigkeit ergibt. Bei dem gleichfalls im reinen Querstrom arbeitenden Rieseltrockner der Abb. 176 (Ellis) findet sich eine Vielzahl von Rieselsäulen nebeneinander. Die Verkürzung der Bauhöhe wird durch eine Verringerung der Rieselgeschwindigkeit erkauft. Um sie auszugleichen sind die zwischen den Rieselsäulen entstehenden Luftkanäle zellenartig so unterteilt, daß die Luft das Gut der Höhe nach abwechselnd von der einen oder anderen Seite her durchdringt. Verglichen mit einseitiger Luftbewegung bei gleicher Schachthöhe und Rieselgeschwindigkeit wird hierdurch eine doppelte Schichtstärke zulässig, die allerdings wegen der gleichzeitig zu verdoppelnden Luftmenge den Strömungswiderstand etwa verachtfacht. Bei dem Rieseltrockner nach Abb. 177 (Topf) durchdringt die in mehreren parallelen Strängen geführte Luft mehrmals das niederrieselnde Gut. Die Wirkungsweise entspricht auch hier dem Trocknen im Querstrom. Die Unterteilung des Trockners erfolgt in einzelne Gruppen und ermöglicht Anpassung an stark schwankende Leistungen.

Daß es an sich möglich ist, einem Rieseltrockner trotz des Querlaufs der Luft das Gepräge des Gleich- oder Gegenstroms zu geben, je nachdem die Eigenart des Gutes das eine oder andere Verfahren empfehlenswert erscheinen läßt, ergibt sich aus Abb. 178, nach der die hoch erwärmte Luft zunächst das Naßgut im oberen Teil des Trockners, danach das vorgetrocknete Gut in mittlerer Höhe durchdringt, schließlich nach Beifügung von kalter Luft zur Fertig-trocknung im unteren Teil verwendet wird. Die Trocknung läuft hierbei auf das in Abb. 107 und 108 gekennzeichnete Verfahren hinaus und kommt dann in Betracht, wenn das Naßgut unter Anwendung hoher Lufttemperaturen rasch vorgetrocknet werden soll, das Trockengut aber nur verhältnismäßig niedrige Temperaturen erträgt. Wird derartige Gut im reinen Quer-

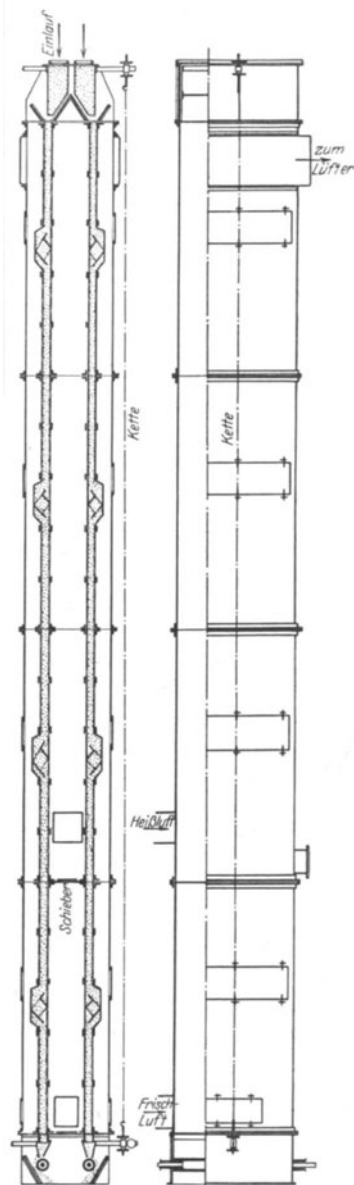


Abb. 175. Schachttrockner (Miang).

strom verarbeitet, so ist dies beim Rieseltrockner nur unter Anwendung der niedrigen Lufttemperatur möglich, die das getrocknete Gut vorschreibt,

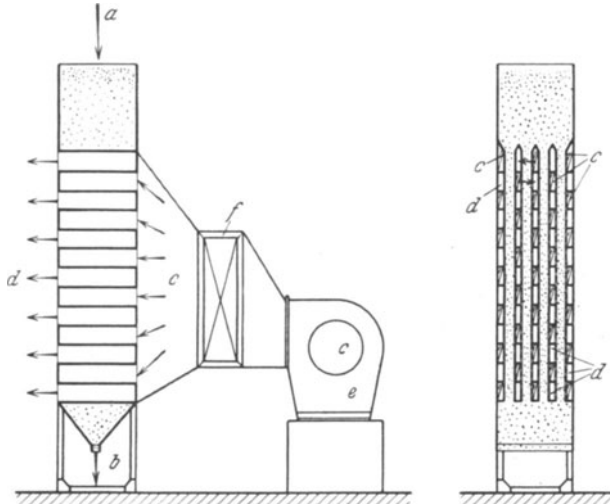


Abb. 176. Querstrom-Rieseltrockner (Ellis).
a Einlauf, *b* Auslauf, *c* Frischluft, *d* Abluft, *e* Lüfter, *f* Lufterhitzer.

oder das Trockengut muß, unter Verzicht auf den Dauerbetrieb, mehrmalig in Umlauf gesetzt und die Temperatur zum Schluß erniedrigt werden.

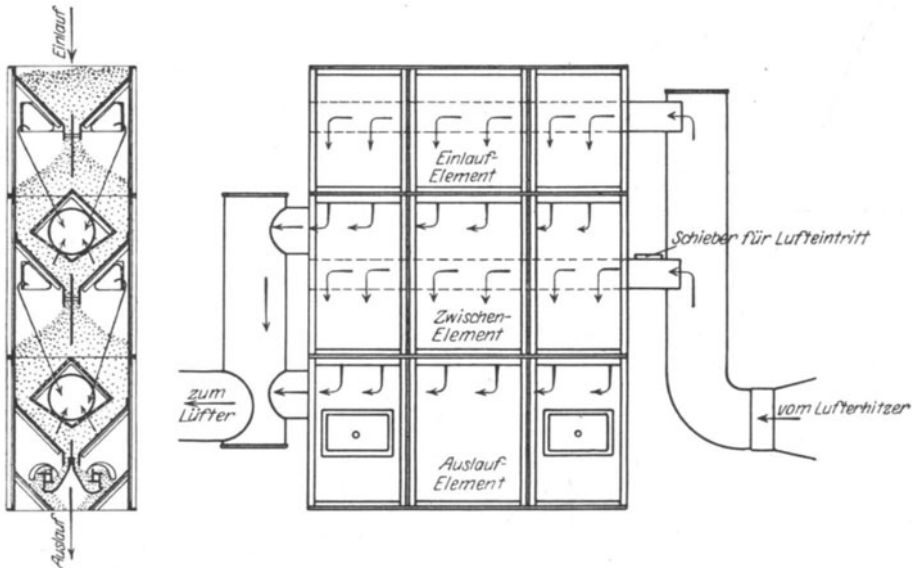


Abb. 177. Rieseltrockner (Topf).

e) Stromtrockner. Es liegt nahe, bei körnigem Trockengut, dessen Förderung im Luftstrom erfolgt, die als Fördermittel dienende Luft

vorzuwärmen und gleichzeitig als Trockenmittel zu benutzen. Gleichstrom ist hierbei selbstverständlich. Verwirklicht findet sich dieser Gedanke in dem Bühler-Stromtrockner, Abb. 179 (Salge). Das feuchte Gut wird durch einen Aufgaberegler und eine dahinter angeordnete Eintragwalze in den Warmluftstrom eingestreut, in einen Stoßfänger hochgefördert und nach der Umkehr in einem Zyklon von der Luft getrennt. Das getrocknete Gut wird ausgetragen, während die feuchte Luft einen über dem Zyklon angeordneten Filter durchströmt und schließlich entweicht. Da die Länge der Förderleitung begrenzt ist, kommt ein derartiger Stromtrockner in erster Linie für die Behandlung von solchen Stoffen in Betracht, bei denen verhältnismäßig geringe Feuchtigkeitsmengen auszutreiben sind und der hier durchgeführte Gleichstrom in trockentechnischer und wirtschaftlicher Beziehung angebracht ist.

An sich besteht keine Schwierigkeit, die Abluft zwischen Zyklon und Filter teilweise zurückzusaugen und dadurch das Verfahren wärmetechnisch zu verbessern, wenn die Eigenschaften des Gutes nicht eine Hebung des

ganzen Temperaturfeldes verbieten bzw. nicht gegen einen bei gleicher Temperaturhöhe sich ergebenden höheren Feuchtigkeitsgrad der Abluft sprechen. Die Möglichkeit, das Trockengut mehrmalig den Förderluftstrom durchlaufen zu lassen, findet sich bei den Mahltrocknern ausgenutzt. Das Mahlgut kreist hierbei nach Abb. 180 (Rema) zwischen Mühle und Sieber, aus dem nur der getrocknete Staub durch den Luftstrom weggeführt wird, während der feuchte und grobkörnige Rest in die Mühle zurückfällt. Die hier frei werdende Reibungswärme unterstützt die Trockenwirkung des heißen Luftstromes. Dieser besteht bei Kohlentrocknung in der Regel aus Verbrennungsgasen der gleichen Feuerung, in der der Kohlenstaub als Brennstoff ausgenutzt wird. Die Mahltrocknung wirkt bei körnigem Gut dadurch besonders günstig, daß ständig die trockenen Teile der Kornoberfläche losgelöst und feuchtere Stellen freigelegt werden. Die Trockenzeit der kleinsten Teilchen wird hierdurch auf ein Mindestmaß herabgesetzt, der Trockeninhalt ungewöhnlich verkleinert und daher die Anwendung wesentlich höherer Temperaturen als bei der Trocknung im Korn möglich. Der durch die Zwischenmahlung in manchen Trommeltrocknern verfolgte Zweck wird hier restlos erreicht. Das von

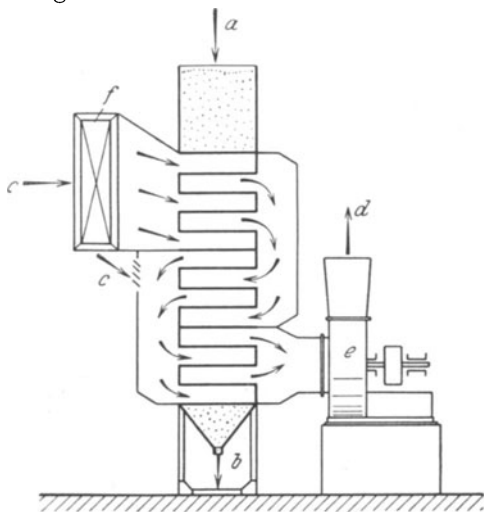


Abb. 178. Gleichstrom-Rieselstrockner.
a Einlauf, *b* Auslauf, *c* Frischluft, *d* Abluft, *e* Lüfter,
f Luftheizer.

Rosin¹ für die Verarbeitung von Rohbraunkohle zu Brennstoff entwickelte Verfahren läuft auf die Verbindung zweier Stromtrockner hinaus, von denen der eine als Vortrockner, der andere als Umlauf-

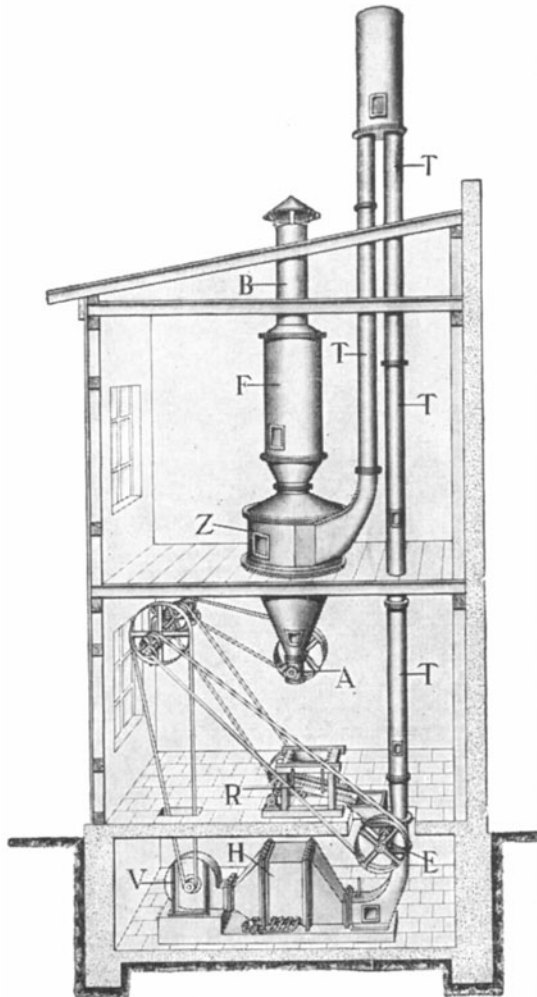


Abb. 179. Bühler-Stromtrockner (Salge).
A Auslauf, B Abluft, E Einlauf, F Filter, H Luft-
erhitzer, R Aufgaberegler, T Trockenrohr, V Lüfter,
Zyklon.

Mahlrockner wirkt. Das Naßgut wird durch eine Schleuder in den aufsteigenden Strom der als Trockenmittel angewandten Rauchgase eingeführt und gelangt nach zweimaliger Umkehr in den umlaufenden Strom des Mahlrockners. Aus diesem wird der getrocknete Staub zusammen mit den Abgasen fortgeführt und in einem Sammler getrennt. Zur Förderung der Trockengase dient ein an letzter Stelle angeordneter und dadurch gegen die zerstörende Wirkung des Staubes und den Einfluß hoher Temperaturen geschützter Absaugelüfter.

f) Zerstäubungstrockner.

Flüssigkeiten, die in einem Arbeitsgang Pulverform erhalten sollen, werden zerstäubt und so der Trockenluft ausgesetzt. Die Ausbreitung erfolgt in der Hauptsache entweder in der Form einer waagerechten Schleierwand oder eines senkrecht oder schräg abwärts gerichteten Kegels. Der häufig betonte Vorteil der Zerstäubungstrocknung, durch augenblickliche Verdunstung eine sofortige Senkung der Temperatur der Trockenluft herbeizuführen und hierdurch das Trockengut der Einwirkung höherer Temperaturen zu entziehen, ist nur bedingt stich-

haltig. Denn hierfür ist Bewegung der Trockenluft im Gleichstrom Voraussetzung, weil alsdann tatsächlich das getrocknete Pulver nur mit niedrig temperierter Luft zusammentrifft. Reiner Gleichstrom findet sich aber kaum angewandt. Wenn trotzdem das Ergebnis der

¹ Rosin-Rammler: Herstellung von Braunkohlenstaub mit der pneumatischen Umlauf-trocknung. Braunkohle 1930.

ausgeführten Zerstäubungstrockner befriedigt, so liegt die Ursache darin, daß die verarbeiteten Stoffe im getrockneten Zustande gegen den Einfluß hoher Temperaturen weniger empfindlich sind als im flüssigen Zustande und daß ferner wegen der ungewöhnlich kurzen Trockendauer das Fassungsvermögen des Trockners die denkbare untere Grenze erreicht.

Wird in einem zylindrischen Schacht die Flüssigkeit durch Düsen zerstäubt, deren Streukegel in der Hauptsache von oben nach unten gerichtet ist und die Trockenluft tangential oberhalb der Düsen eingeführt und schraubenförmig niederbewegt, um am tiefsten Punkte zusammen mit dem getrockneten Pulver zu entweichen, so liegt ein Verfahren mit großer Annäherung an den Gleichstrom vor. Da es sich hierbei jedoch nicht vermeiden läßt, daß Teile des erwärmten Luftstromes das an tieferen Stellen schwebende getrocknete Gut treffen, ohne zuvor durch Berührung mit der Flüssigkeit Gelegenheit zur Temperatursenkung gefunden zu haben, wird der Gleichstrom auch hier durch die dem Querstrome eigentümliche Wirkung verzerrt. In dieser Weise arbeitet der Zerstäubungstrockner Abb. 181 (Nubilososa). Die Aufteilung der Flüssigkeit erfolgt mittels

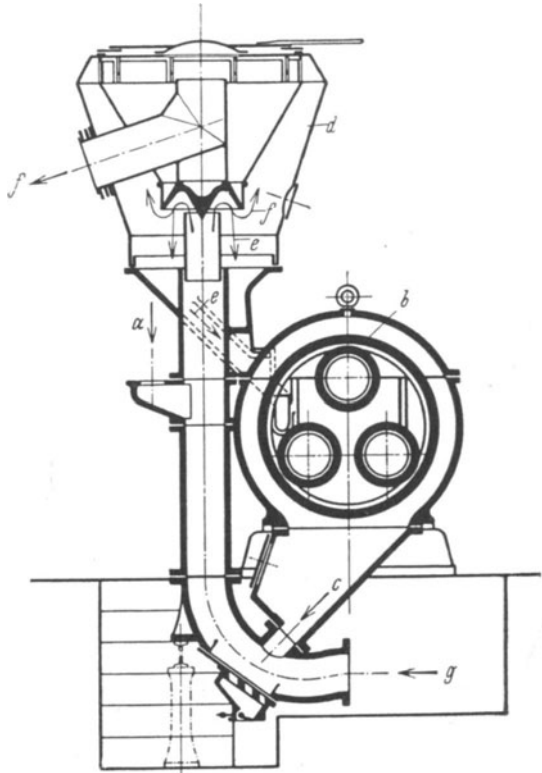


Abb. 180. Mahltrockner (Rema).
a Einlauf, *b* Mühlenring, *c* Ablauf, *d* Sichter, *e* Rücklauf,
f Auslauf, *g* Lufteintritt.

geformten Düse, durch die die Flüssigkeit mit der Preßluft erst außerhalb der Düsenkanäle zusammengeführt und in feinsten Nebel zerrissen wird. Die an höchster Stelle zugeführte Trockenluft erhält durch ein verstellbares Lenkblech die gewünschte schraubenförmige Bewegung. Der Luftverteilteraum ist von dem eigentlichen Trockenschacht durch eine Siebwand getrennt, deren Löcher verschieden groß und so bemessen sind, daß rings um die Düse herum eine vergrößerte Warmluftmenge Zutritt und verhindert, daß zerstäubte Flüssigkeitsteilchen kurz hinter der Düse die Schachtwand erreichen und dort vor vollständiger Trocknung haften bleiben. Der Trockenluftstrom umhüllt also zunächst den Flüssigkeitskegel, um ihn erst in etwa halber Höhe des Trockenschachts zu durchdringen. Dies ergibt eine recht beachtliche Annähe-

nung an die vorteilhafte Gleichstromwirkung. Die hier wie bei allen Zerstäubungstrocknern angewandte künstliche Verlängerung des Weges der Luft durch den Trockner ergibt eine Verbesserung der Wirkung, wie sie in dem Einfluß der Geschwindigkeit auf die Wärmeübertragung zum Ausdruck kommt. Jede andere Deutung ist abwegig. Luft und Staub werden in einem Abscheider getrennt. Die Abluft strömt danach in einen Wäscher, in dem die letzten Staubteilchen zurückgehalten werden.

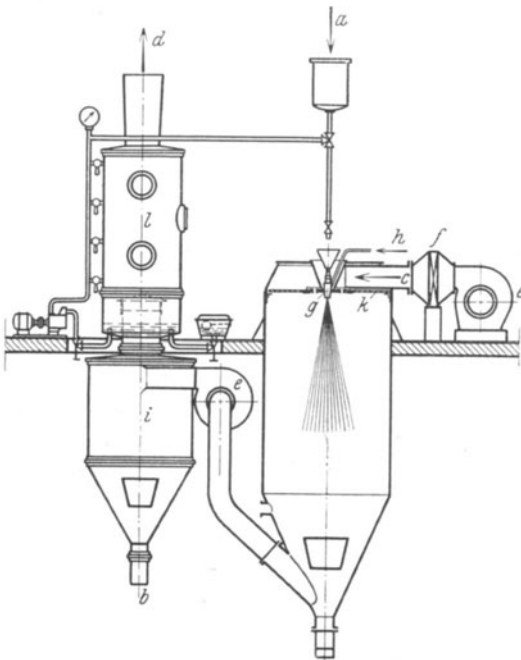


Abb. 181. Zerstäubungstrockner (Nubilos).
a Einlauf, *b* Auslauf, *c* Zuluft, *d* Abluft, *e* Lüfter, *f* Luft-
 erhitzer, *g* Zerstäubungsdüse, *h* Preßluft, *i* Zyklon,
k Siebwand, *l* Wäscher.

Druck zerstäubt. Die Vernebelungsdüse dreht sich. Das getrocknete Pulver wird durch einen umlaufenden Schaber von den Wänden gelöst und am tiefsten Punkt abgesaugt. Die Trockenluft wirbelt zunächst am Umfang nach unten, kehrt dann um und verläßt den Trockner in der Mitte am höchsten Punkt. Der Warmluftstrom hüllt daher zunächst die aus der zerstäubten Flüssigkeit bestehende Nebelwolke ein und kommt hierbei vorzugsweise mit dem fertig getrockneten Gut in Berührung, während der die eigentliche Trocknung bewirkende Wärmeaustausch nach der Umkehr vor sich geht. Hieraus ergibt sich eine Annäherung an das Gegenstromverfahren. Die Möglichkeit, das Verfahren hierbei dadurch wirtschaftlich zu verbessern, daß der Feuchtigkeitsgrad der austretenden Luft hoch gehalten wird, darf nicht überschätzt werden. Ihre Verwirklichung würde Verzicht auf eine be-

Als Waschflüssigkeit kann die zu trocknende Lösung dienen. Sie erfährt hierbei eine Voreindickung, vorausgesetzt, daß die Austrittstemperatur der Luft aus dem Wäscher höher liegt, als dem Taupunkt in dem Zustand zuzukommen, in dem die Luft den Wäscher betritt.

Der in den Vereinigten Staaten weit verbreitete Zerstäubungstrockner nach Gray-Jensen hat mit dem vorbeschriebenen die Einführung der Trockenluft oberhalb der Zerstäubungsdüse und die kreisende Luftbewegung gemeinsam. Bei beiden wird die Abluft zur Voreindickung benutzt. Ein grundsätzlicher Unterschied besteht jedoch in folgendem: nach Gray-Jensen wird die Flüssigkeit durch ihren eigenen

sonders rasche anfängliche Trocknung bedeuten. Da aber bei der Zerstäubungstrocknung stets Wert auf eine schlagartige Entziehung der Feuchtigkeit gelegt wird, kommt der Vorzug des Gegenstroms nicht zur Geltung.

Bei der Krause-Trocknung wird nach Abb. 182 (Lurgi) die Auflösung der Flüssigkeit in einen waagerechten Schleier durch die Schleuderkraft einer rasch umlaufenden Scheibe bewirkt. Ihr Antrieb erfolgt durch Elektromotor oder Dampfturbine, deren Abwärme zur Heizung der Trockenluft dient. Die Luft wird gefiltert, erwärmt, tritt durch Leitschaufeln in den Trockenraum aus und schraubt sich, das Gut durch-

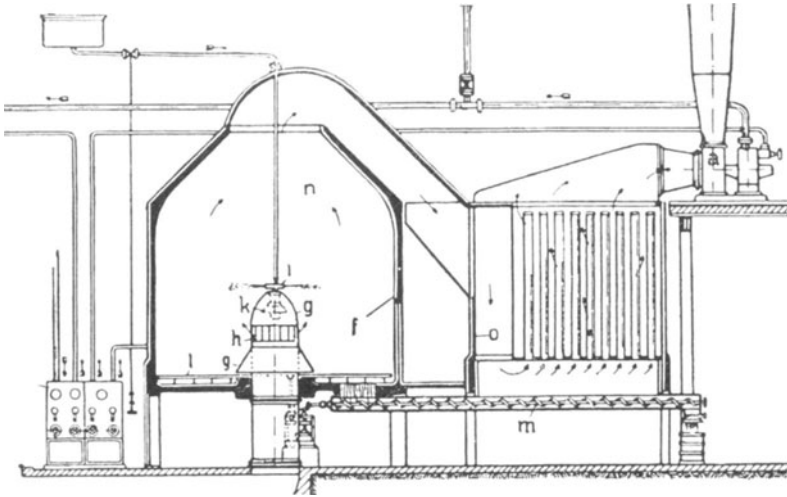


Abb. 182. Krause-Trockner (Lurgi).

a Lüfter, *f* Trockenraum, *g* Luftzuführung, *h* Leitschaufeln, *i* Zerstäuberscheibe, *k* Antrieb, *l* Räumler, *m* Förderschnecke, *n* Luftaustritt, *o* Schlauchfilter.

dringend, hoch. Das getrocknete staubförmige Gut fällt teilweise zu Boden, um von da durch Räumler und Schnecke abgeführt zu werden; teilweise wird es durch den Luftstrom mitgerissen und nachträglich mittels Filter getrennt. Die Krause-Trocknung arbeitet im Querstromverfahren.

Das gleiche gilt für den Ravo-Rapid-Zerstäubungstrockner der Abb. 183 (Zahn). Die erwärmte Trockenluft wird hier in der Hauptsache vom Umfang des Trockenschachtes her tangential eingeführt. Zusätzliche von der Zerstäuberscheibe gegen die Wand zu gerichtete Luftströme bezwecken die Erzielung eines höheren durchschnittlichen Feuchtigkeitsgehaltes.

Wenn auch nach den vorliegenden Erfahrungen mit Zerstäubungstrocknern verschiedener Form das Gut in getrocknetem Zustande die angewandte anfänglich hohe Temperatur der Luft erträgt, ohne Schaden zu nehmen, so gilt dies sicher doch nur mit der Einschränkung, daß die Einwirkungsdauer so kurz wie möglich ist. Diese Bedingung ist für die Teile des getrockneten Gutes, die an den Gehäusewänden längere Zeit

hängen bleiben, nicht erfüllt, wenn die Warmluft im ganzen oder in Teilströmen sich längs dieser Wände bewegt. In dieser Hinsicht bedeutet die Anwendung von Schabevorrichtungen bei dem Gray-Jensen-Trockner einen unbestrittenen Vorzug. In anderer Weise ließe sich Abhilfe dadurch schaffen, daß neben der Warmluft ein Zusatz-

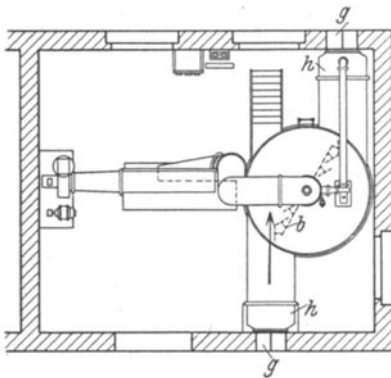
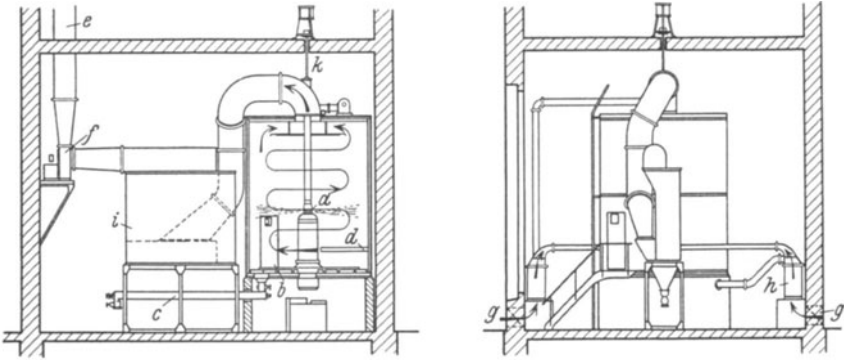


Abb. 183. Ravo-Rapid-Zerstäubungstrockner (Zahn).

a Aufgabe, *b* Räumer, *c* Auslauf, *d* Zuluft, *e* Abluft, *f* Lüfter, *g* Frischluftfilter, *h* Luft-erhitzer, *i* Abluftfilter, *k* Zuluft.

luftstrom von niedrigerer Temperatur angewandt würde. Er wäre in jedem Falle so zu führen, daß er das Gut nach seiner Trocknung durchströmt und vorzugsweise die Wandungen bestreicht. Das Verfahren läuft auf das zu Abb. 108 beschriebene hinaus und läßt sich bei dem Krause-Trockner z. B. dadurch verwirklichen, daß der zusätzliche kühlere Luftstrom durch eine zweite, tiefer sitzende Luftleitvorrichtung mit besonders großer Geschwindigkeit eingeführt wird. Bei dem Ravo-Rapid-Trockner wäre der Trockenluftstrom durch den Kühlluftstrom zu ersetzen und die zusätzlichen Luftströme zu dem Rang des Hauptluftstromes zu

erheben. Es ist zweifellos, daß hierdurch der Anwendungsbereich der Zerstäubungstrocknung eine Erweiterung erfahren könnte. Für die Bewertung der verschiedenen Zerstäubungsmittel — Preßluft, Flüssigkeitsdruck, Schleuderkraft — sind Feinheit der entstehenden Tröpfchen und Gleichmäßigkeit des gebildeten Nebels maßgebend. Einwandfreie Versuche sind nicht bekannt geworden. Die Zerstäubung durch Preßluft bewirkt eine innige Mischung zwischen Luft und Gut. Ihre Anwendung ist bei Waren bedenklich, die vor der Einwirkung des Luftsauerstoffes zu schützen sind.

Bei Zerstäubung durch Flüssigkeitsdruck ergibt sich durch dessen Veränderung eine einfache Möglichkeit zur Regelung der Tropfengröße und damit der Pulverkörnung. Der Grad der Tropfenfeinheit hängt auch davon ab, ob die im allgemeinen vorausgehende Eindickung mehr oder weniger weit getrieben wurde. Je geringer der anfängliche Feuchtigkeitsgehalt und je höher damit die Zähigkeit der zu zerstäubenden Lösung ist, um so gröber werden Tropfen und Pulver. Bei Lösungen, die so zäh sind, daß ihre Zerstäubung durch Düsen nicht gelingt, bleibt das Krause-Trockenverfahren anwendbar.

2. Vorrichtungen zur Durchführung eines Trockenverfahrens, bei dem Beharrungszustand vorliegt, unter Anwendung beheizter Flächen zusammen mit Luft oder einem anderen vollkommenen Gas.

Bei dem Entwurf von Trockenvorrichtungen mit beheizten Flächen ist die Abführung der ausgetriebenen Feuchtigkeit auf der freien Seite des Gutes durch Umspülen mit Luft zu sichern, wenn Verdunstungswirkung angestrebt wird, die Temperatur des Gutes also unter der Höhe bleiben soll, die dem Druck der Umgebung als Siedetemperatur entspricht. Diesem naheliegenden Gesichtspunkt wird erst in neuerer Zeit die gebührende Beachtung geschenkt. Der zahlenmäßige Zusammenhang zwischen Temperatur des Heizmittels, des Gutes und Beschaffenheit der umgebenden Luft liegt mit den Ausführungen in Abschnitt VIII des ersten Teiles fest und ermöglicht nunmehr eine mehr als gefühlsmäßige Berücksichtigung bei der baulichen Ausführung.

Die hier betrachteten Trockenvorrichtungen zerfallen in zwei an Ausführungen reiche Gruppen, bei denen

1. das Gut bandartig die zylinderförmige Trockenvorrichtung umschlingt und in gleicher Geschwindigkeit mit dieser, also ohne Relativbewegung zu ihr, fortläuft,

2. die Bewegung von Gut und Trockenvorrichtung verschieden ist.

Zu der ersten Gruppe gehören die Zylindertrockner für Verarbeitung von bandartigem Gut, vor allem Papier, oder in Bandform ausgebreitetem Gut, wie die Walzentrockner für Herstellung von Kartoffelflocken, und die Tauchtrommeltrockner zur Entwässerung von mehr oder weniger zähen Flüssigkeiten. Die zweite Gruppe umfaßt Röhren- und Trommeltrockner, bei denen das Gut um oder durch röhrenförmige, auf der Gegenseite beheizte Vorrichtungen wandert, Muldentrockner, bei denen das Gut in einer Rinne bewegt wird, wobei entweder die Rinne oder die Bewegungsvorrichtung oder beide als Heizkörper ausgebildet sind; schließlich Tellertrockner, bei denen die Heizfläche eben gestaltet ist und das Gut sich, meist in radialer Richtung, darüber bewegt.

Dampfbeheizte umlaufende Zylinder bedingen eine doppelte Stopfbüchse zur Einführung des Dampfes und Ableitung des Niederschlagwassers. Die Entwässerung erfolgt durch Schöpfwerke nach Abb. 184 (Voith). Durch die axiale Einführung des Dampfes ergibt sich auf der von dem Dampfstrahl getroffenen Seite des Zylinders eine höhere

Temperatur. In gleichem Sinne wirkt die einseitige Ableitung des Niederschlagwassers. Es empfiehlt sich daher, ein Dampfverteihr in ganzer Länge des Zylinders durchzuführen und den Dampf radial austreten zu lassen. Neben der gleichmäßigen Dampfverteilung hat die Prallwirkung eine Verbesserung des inneren Wärmeübergangs zur Folge. Bei langen Zylindern werden Schöpfkasten angewandt, die über die ganze Länge reichen und mit einem oder mehreren Schöpfrohren versehen sind. Da das Niederschlagwasser sich stets am tiefsten Punkt ansammelt, empfiehlt es sich, bei teilweise umschlungenen Zylindern vor allem den höher liegenden Umfang auszunutzen. Diesem Hinweis kommt allerdings um so weniger Bedeutung zu, je höher die Umfangsgeschwindigkeit der Trockenzyylinder ist, weil mit ihr allmählich ein praktisch vollkommener Temperatúrausgleich über den Umfang eintritt.

Der Luftgehalt in dem dampferfüllten Zylinderinnern ist unmittelbar oberhalb des Niederschlagwasserspiegels am höchsten. Die Entlüftung

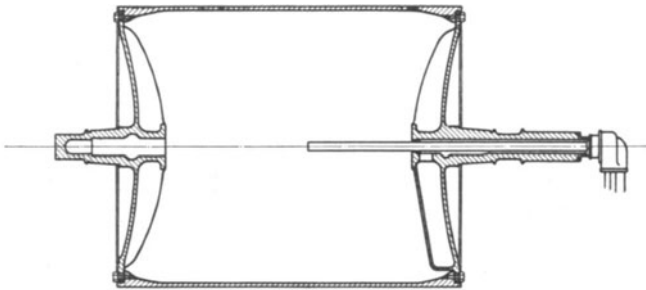


Abb. 184. Papiertrockenzylinder (Voith).

erfolgt daher in einfachster Weise gleichzeitig mit der Entwässerung unter Ausnutzung der Schöpfvorrichtung als Luftsauger und unter Anwendung von Pumpen, deren Förderleistung größer ist, als der entfallenden Niederschlagwassermenge allein entspräche. Die Ausführung der Trockenzylinder stellt an die Werkstätte besonders hohe Ansprüche. Die Zylinderoberfläche muß hart und porenfrei sein. Alle Zylinder einer Maschine müssen genau gleiche Durchmesser besitzen. Der Mantel wird im Naßschliffverfahren auf Hochglanz poliert. Ausdrehen des Zylinderinnern erhöht die Sicherheit des Betriebes und die Gleichmäßigkeit der Trocknung. Der angewandte hohe Heizdampfdruck unterwirft die Trockenzylinder hinsichtlich Wahl des Baustoffes und Ausführung in der Regel den Vorschriften für Dampffässer.

a) **Trockenzylinder.** Die Bearbeitung des Papiers erfolgt durch innen beheizte Trockenzylinder, die nach Abb. 185 (Voith) in großer Anzahl hintereinander geschaltet sind. Das Papier umspannt die Heizfläche so, daß bei zwei aufeinanderfolgenden Zylindern abwechselnd beide Papierseiten auflaufen. Beheizte und freie Fläche wechseln daher von einem zum anderen Zylinder. Um das Papier in innige Berührung mit dem Trockenzylinder zu bringen, laufen Filzbänder mit, die das Anpressen bewirken. Zum Austrocknen des von ihnen aufgenommenen

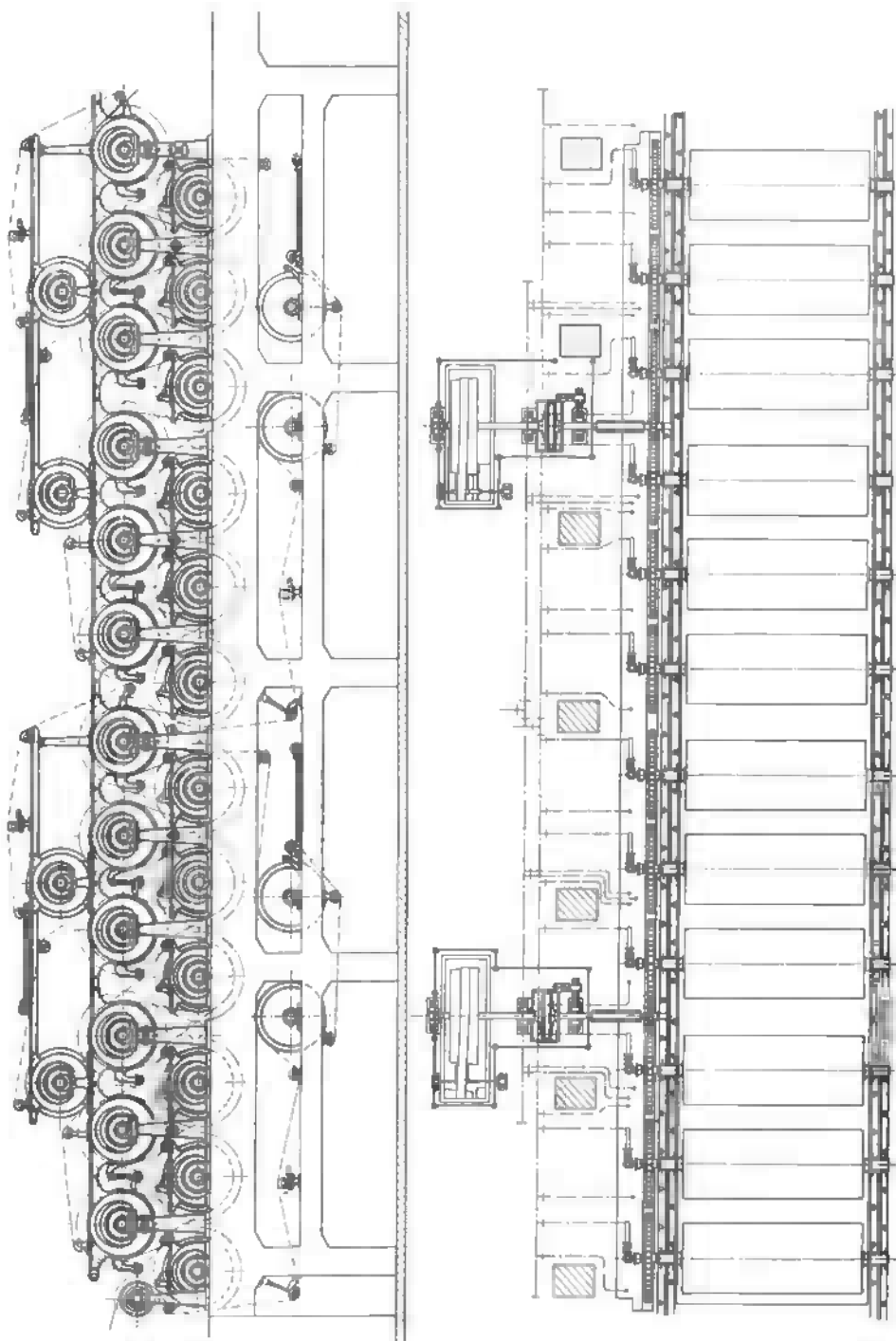


Abb. 188. Papiertrockner (Voith).

Feuchtigkeitsgehaltes dienen besondere Filztrockenzylinder. Da das Papierband das Durchstreichen der Trockenluft von unten nach oben hindert, ist eine durchschlagende Verbesserung, aus doppelten Gründen bei Anwendung von Filzen, zu erwarten, wenn nach dem Verfahren von Grewin, Abb. 186 (Voith), waagerechte Luftströme in die freien Räume zwischen den oberen und unteren Zylindern und zwischen die Filzläufe eingeführt werden.

Während Grewin hoch gespannte Luft mit großer Geschwindigkeit parallel der Papierbahn austreten läßt, um die Trockenluft ejektorartig nachzuziehen, wird nach dem Verfahren von v. Asten erwärmte Luft in großer Menge senkrecht oder schräg zur Papierbahn eingeführt. Hierzu dienen umlaufende Walzen mit Schlitzen, die einer von der Mitte aus halb rechts-, halb linksgängigen Schraubenlinie folgen, so daß die Luft seitlich herausgeschoben wird. Werden die Filzleit-

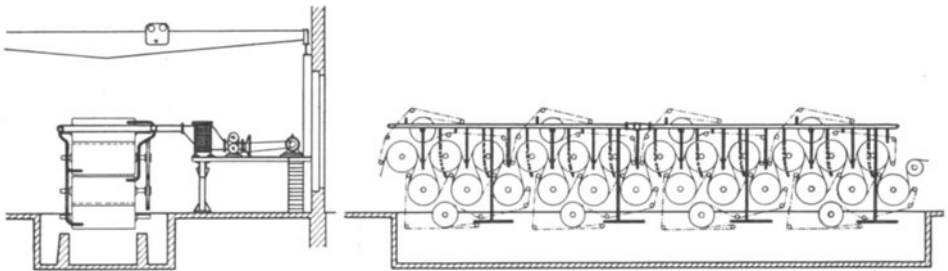


Abb. 186. Papiertrockner mit Blaseinrichtung (Grewin-Voith).

walzen entsprechend ausgebildet, so bläst die Luft auf die Rückseite des Filzes. Wirksamer ist daher die Einfügung besonderer Walzen, durch die Papierbahn und Papierseite des Trockenfilzes belüftet werden. Derartige Maßnahmen sind bei zwei oder mehr übereinander angeordneten Zylinderreihen besonders angebracht.

b) Walzentrockner. Der mit einem einzigen Heizzyylinder versehene Walzentrockner Abb. 187 (Venuleth und Ellenberger) dient zur Verarbeitung breiiger, stärkehaltiger Stoffe, vor allem für die Herstellung von Kartoffelflocken. Das breiartige Gut wird oben seitlich zugeführt, durch Rührwerke verteilt, durch mehrere Auftragwalzen zu einem Schleier ausgebreitet und an die Walzenfläche angepreßt. Die Loslösung des getrockneten Gutes erfolgt durch unmittelbar vor dem Einlauftrichter angeordnete Messer, so daß fast der ganze Umfang als Nutzfläche zur Geltung kommt. Wird durch Ummantelung des Trockners und Absaugung der Brüden nach Abb. 187 die Trockenluft in regelbarer Menge zwangsläufig geleitet, so läßt sich hohe Leistung bei guter Wärmeausnutzung erzielen. Die Luft wird zweckmäßig so geführt, daß sie dort eintritt, wo der losgelöste Schleier niederfällt und dort abströmt, wo das frisch aufgetragene Gut den stärksten Schwaden entwickelt. Um einwandfreies Zusammenarbeiten des Hauptzylinders mit den Andrückwalzen und Messern trotz der in der Regel sehr kleinen Schichtstärke zu sichern, sollen die Zylinder unter Dampf geschliffen werden.

Aus baulichen Gründen werden häufig zwei Trockenzyylinder nach Abb. 188 (Büttner) in Zweiwalzentrocknern vereinigt. Der ausgewalzte Schleier bedeckt nur die Hälfte der Zylinderfläche, während über dem Rest die ungeformte Masse vortrocknet. Durch Exzenter angetriebene Rührwerke ergreifen den Brei etwa in der Mitte des Aufgaberaumes und geben ihn bei der Aufwärtsbewegung an die Trockenzyylinder, ohne diese zu berühren. Die Auftragwalzen sind federnd gelagert.

Dadurch, daß die Walzen sich nach außen drehen und die Messer an tiefster Stelle angeordnet sind, gehen die Schwaden frei ab. Die bei gegenläufigen Walzen unter der Stelle ihrer größten Annäherung eintretende Stauung wird hier vermieden und künstliche Absaugung des Schwadens entbehrlich.

Werden bei Zweiwalzentrocknern nach Abb. 189 (Venuleth und Ellenberger) die Zylinder einander genügend weit genähert und der eine Zylinder zur Regelung der Schichtstärke verstellbar gehalten, so kommen die Auftragwalzen in Wegfall. Diese Ausführung eignet sich für die Trocknung von pasten-, salbenartigen und zähflüssigen Stoffen, deren Aufgabe durch Auftragwalzen Schwierigkeiten bietet. Der Gefährdung der Walzen durch Fremdkörper kann dadurch vorgebeugt werden, daß die eine Walze frei beweglich gelagert wird. Die Zerlegung des Messers in einzelne Teile unter getrennter Regelung des Anpressungsdruckes durch Einzelgewichte bedeutet eine weitere Sicherung. Durch vollständige Ummantelung wird jede Belästigung der Umgebung aus-

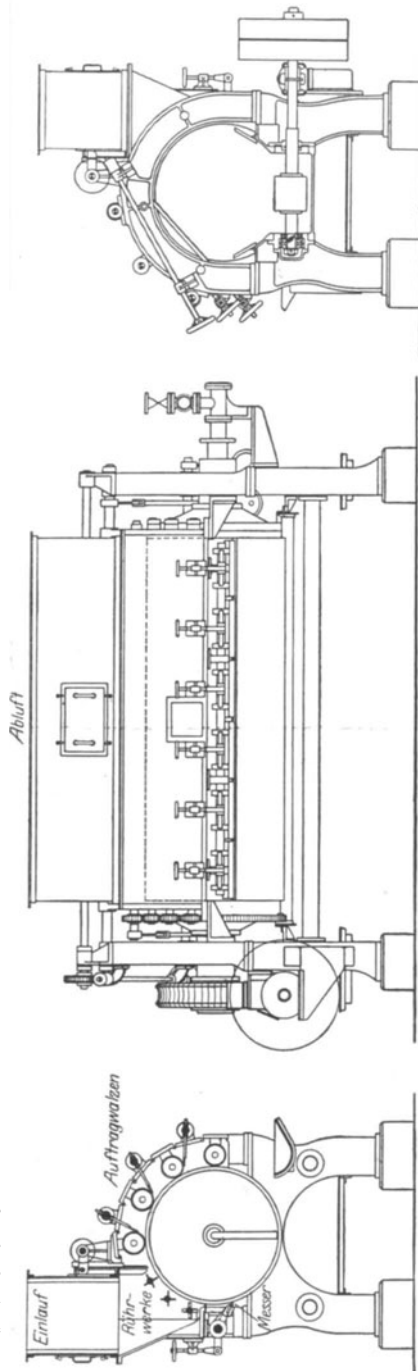


Abb. 187. Einwalzentrockner (Venuleth und Ellenberger).

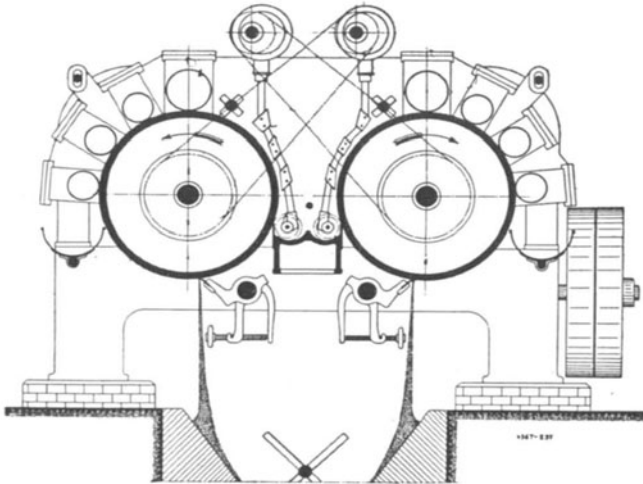


Abb. 188. Zweiwalzentrockner (Büttner).

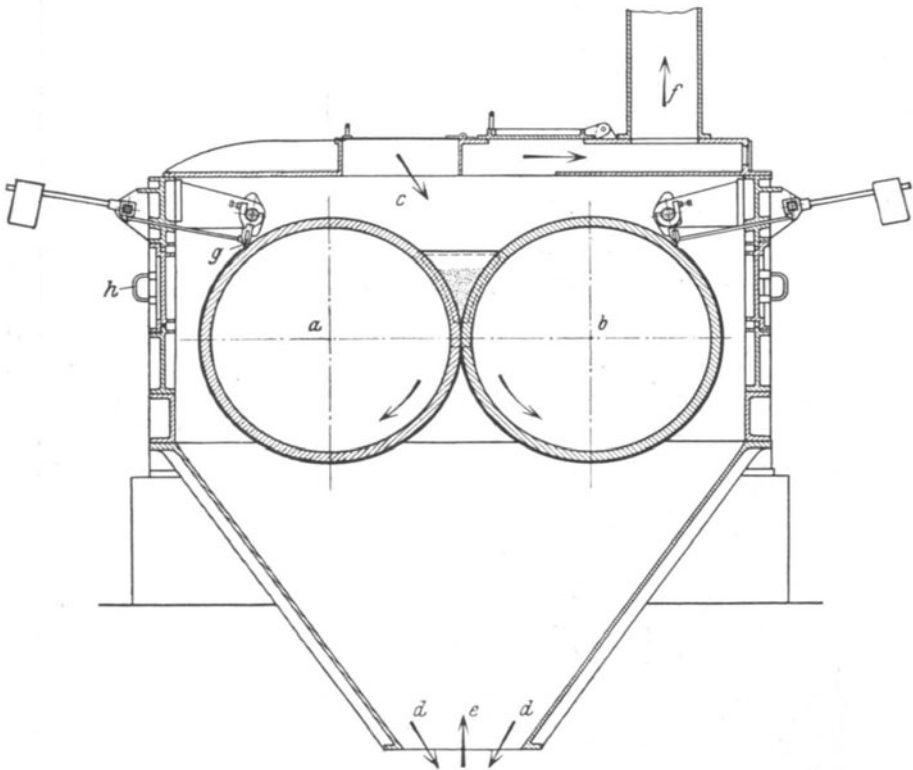


Abb. 189. Zweiwalzentrockner (Venuleth und Ellenberger).
a feste Walze, *b* bewegliche Walze, *c* Einlauf, *d* Auslauf, *e* Zuluft, *f* Abluft, *g* Messer, *h* Bedienungstür.

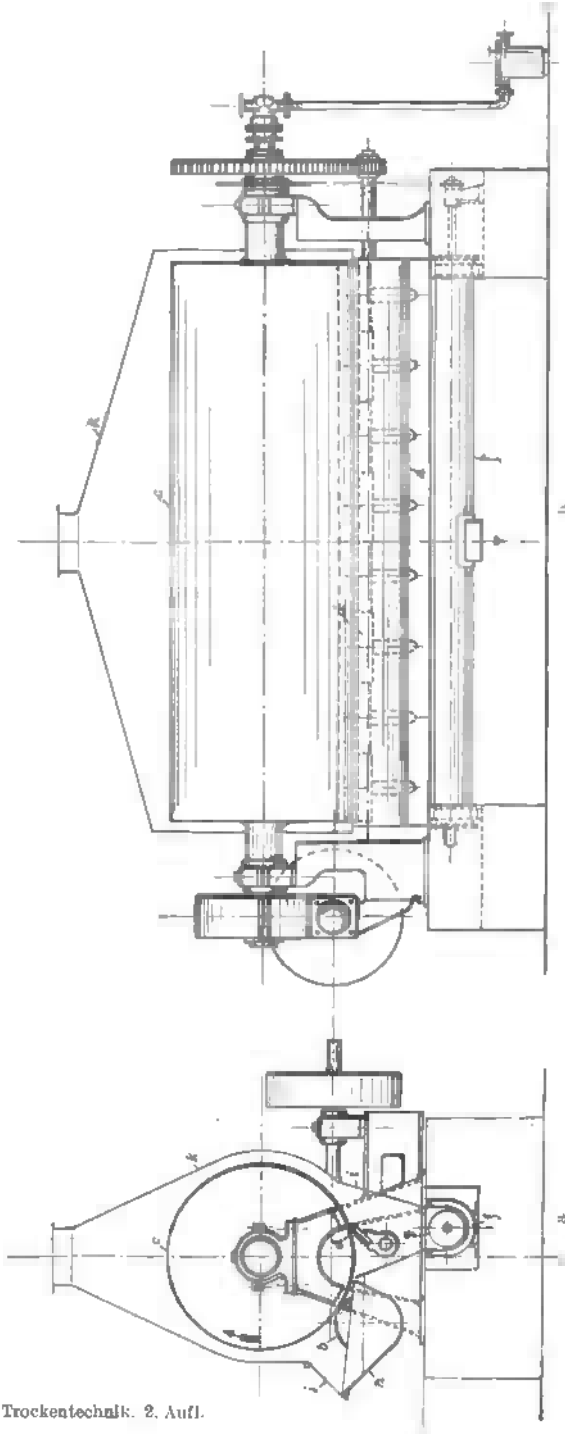


Abb. 190a und b. Walzentrockner mit tief liegender Auftragwalze (Oschatz).
a Speisemulde, *b* Auftragwalze, *c* Trockenwalze, *d* Messer, *e* Förder Schnecke, *f* Bedienungsklappe, *g* Dunsthaube.

geschlossen. Eine Erschwerung der Bedienung muß hierbei in Kauf genommen werden. Der unten zwischen den Walzen gebildete Schwaden geht waagrecht ab und wird gemeinsam mit dem übrigen an höchster Stelle weggeführt.

Während die Vorwärmung bei der Aufgabe für manche Stoffe erwünscht ist, verbietet sie sich häufig wegen der Temperaturempfindlichkeit des Gutes. Für solche Fälle wird nach Abb. 190 (Oschatz) der Speiseraum von dem beheizten Zylinder getrennt und die Verbindung zwischen beiden durch eine tiefliegende Auftragwalze hergestellt. Die Zeit, während der das Gut dem Einfluß hoher Temperaturen ausgesetzt ist, sinkt damit auf wenige Sekunden, so daß dieses Verfahren mit der

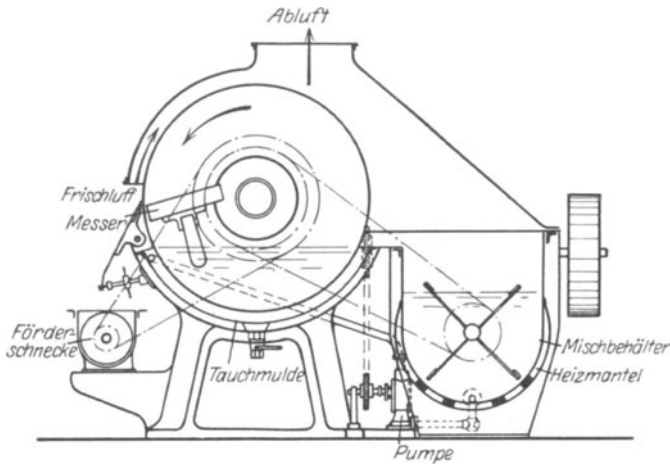


Abb. 191. Tauchtrommeltrockner (Oschatz).

Zerstäubungstrocknung vielfach erfolgreich in Wettbewerb tritt. Voraussetzung für seine Anwendung ist gutes Haften des pastenartig oder flüssig aufgegebenen Gutes. Die Speisemulde kann geheizt oder gekühlt werden, je nachdem die Eigenschaften des Naßgutes das eine oder andere vorteilhaft erscheinen lassen. Die angedeutete vollständige Ummantelung macht es möglich, die Menge der zur Aufnahme des Schwadens nötigen Luft genau zu regeln und ein wegen der Oxydationswirkung des Luftsauerstoffes oft unerwünschtes Übermaß zu vermeiden.

e) Tauchtrommeln. Bei den zum Trocknen von fließendem, genügend haftendem Gut dienenden Tauchtrommeln wird mit verschiedener Eintauchtiefe gearbeitet. Reicht sie bis nahe an die Achse, so ist Abstreifen des Gutes auch von den Stirnflächen wichtig; soll dies vermieden werden, so kann die Wirksamkeit der Stirnflächen durch doppelmantelige Ausführung mit zwischenliegender Wärmeschutzschicht ausgeschaltet werden. Das tiefe Eintauchen kommt nur dann in Frage, wenn das Gut die hierbei sich ergebende Erwärmung und Eindickung erträgt. Unterschiede in der Zusammensetzung lassen sich nicht vermeiden, jedoch auf ein zulässiges Maß herabsetzen, wenn die Tauch-

mulde zur Verringerung des Inhaltes eng an den Trockenzylinder anschließt oder dadurch, daß nach Abb. 191 (Oschatz) seitlich ein Behälter angeordnet und zwischen diesen und die Mulde eine Umlaufpumpe eingefügt wird. Die Pumpenleistung ist hierbei größer, als der Trockenleistung entspricht, so daß ständig ein Überschuß von der Mulde in den Behälter zurückläuft, um dort durch eine Rührvorrichtung durch-

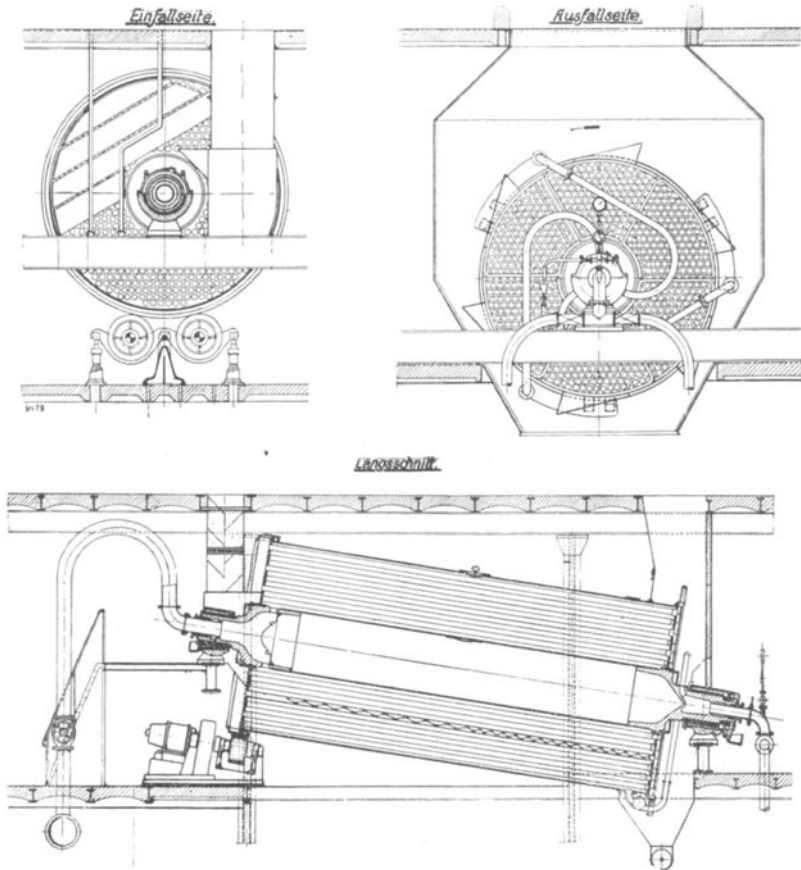


Abb. 192. Röhrentrockner (Buckau).

mischt zu werden. Durch die Ummantelung des Sammelbehälters fließt das Niederschlagwasser der Trockentrommel. Der Trockenzylinder ist so umkleidet, daß auch hier die Trockenluft dem Gute entgegenströmt.

d) **Röhrentrockner**, bei denen das Gut die von außen durch Dampf beheizten bündelartig angeordneten Röhren durchrieselt, gelangen fast ausschließlich bei der Trocknung von Rohbraunkohle zur Verwendung. Der Trockner wird nach Abb. 192 (Buckau) geneigt angeordnet. Dampf und Luft strömen in Richtung des allmählich niederrieselnden

Gutes. Dampfzuführung und Ableitung des durch gebogene Schöpfrohre gesammelten Niederschlagwassers sind mit den Lagern des Trockners verbunden und diese zur Aufnahme des Axialschubes als Kugellager ausgebildet. Das durchgehende Tragrohr hält den Trockner im übrigen frei von Biegungsbeanspruchungen. Zum Antrieb dienen Reibräder, die gegenüber Zahnrädern einen erhöhten Schutz bei plötzlich auftretenden Bewegungshemmungen bieten. Das Trockengut wird durch Schraubenwendeleisten gestaut. Sie beginnen kurz hinter dem Einlauf und besitzen eine mit Annäherung an den Auslauf zunehmende

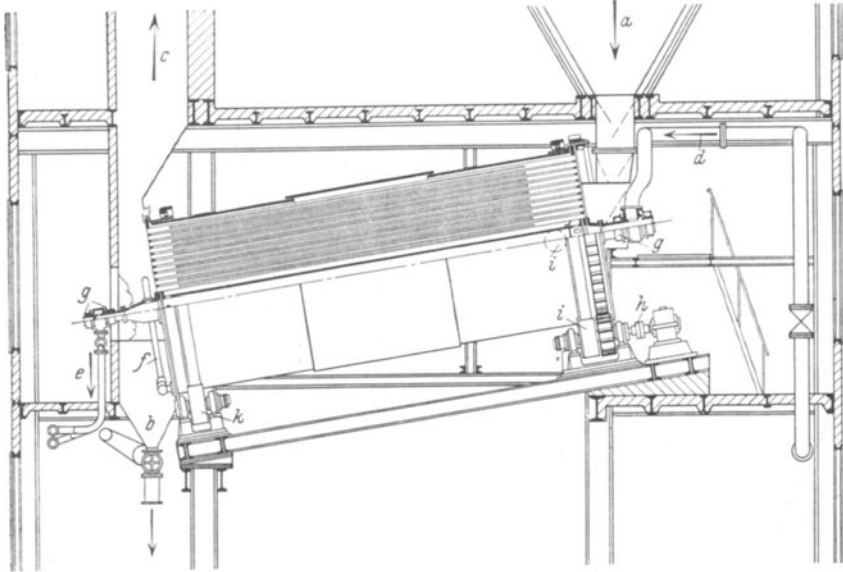


Abb. 193. Röhrentrockner (Humboldt).

a Einlauf, *b* Auslauf, *c* Abluft, *d* Heizdampf, *e* Niederschlagwasser, *f* Schöpfrohr, *g* Stopfbüchsen, *h* Antrieb, *i* Druckrollen, *k* Stützrollen.

Steigung. Ausfallrinnen in Verbindung mit Ausfallkapseln führen das getrocknete Gut unter Vermeidung großer Staubentwicklung in den Ausfallkasten, aus dem es unten durch Schnecke ausgetragen wird, während der staubhaltige Schwaden nach oben entweicht. Die Sechseckteilung der Rohranordnung ermöglicht gegenüber Kreisteilung die Unterbringung einer höheren Rohrzahl, außerdem, wegen des Wanderns der Einlaufstellen, eine bessere Aufnahme des Naßguts vom Füllrumpf. Die Rohre sind an den Einwalzstellen eingezogen, um eine möglichst große Heizfläche bei gegebenem Manteldurchmesser unterzubringen. Durch Ausführung des wassergeschweißten Mantels mit Bördelrand kommen innen liegende Nietköpfe in Wegfall.

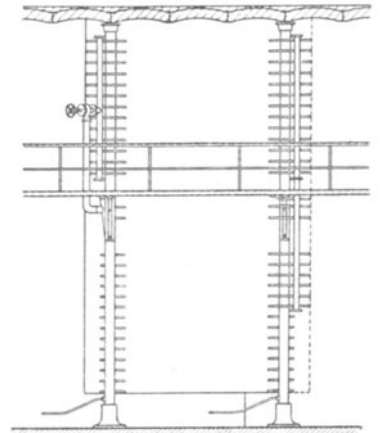
Bei dem Röhrentrockner Abb. 193 (Humboldt) wird die Lagerung nach dem Vorbilde der Trommeltrockner von der dampfbeheizten Achse nach dem Umfang verlegt. Die Rohre besitzen die aus Abb. 194 (Humboldt) hervorgehende eigentümliche Zweiteilung des Querschnitts,

durch die die Heizfläche und damit die Leistung, verglichen mit gleicher Anzahl gewöhnlicher Rohre, ansteigt. Dem entspricht die Neigung der Trocknerachse, die den vergrößerten Durchsatz ermöglicht.



Abb. 194. Heizrohr zum Röhrentrockner der Abb. 193 (Humboldt).

e) **Tellerrockner**, deren Anwendung in der Hauptsache gleichfalls auf die Verarbeitung von Braunkohle beschränkt ist, bestehen nach Abb. 195 (Zeit) aus waagerechten, hohlen, mit Dampf beheizten Scheiben, über die das zu trocknende Gut abwechselnd von der Achse zum Rand und vom Rand zur Achse läuft, um durch Öffnungen nach dem unten folgenden Teller einzutreten. Für die unmittelbare Beheizung des Gutes kommt die obere Fläche des Tellers in Betracht. Die untere Fläche wirkt durch Strahlung und Erwärmung der zur Aufnahme des Schwadens dienenden Trockenluft.



f) **Muldentrockner** gelangen in zahlreichen Abarten für verschiedene Gutssorten zur Anwendung. Sie unterscheiden sich voneinander vor allem durch die Formgebung des Heizkörpers. Er besteht bei dem in Abb. 196 dargestellten Muldentrockner (Soest) aus einem beiderseits in Dampfkammern endigenden waagerechten Röhrenbündel, das gleichzeitig mit einem Schaufelwerk umläuft. Die Abführung des Niederschlagwassers erfolgt am einen Ende durch ein in der Dampfkammer eingebautes Schöpfwerk. Zur Vorwärmung der in die Mulde eingeführten Trockenluft dienen Rippenheizkörper, die unterhalb der Mulde angeordnet und mit dem Niederschlagwasser des Röhrenbündels gespeist werden.

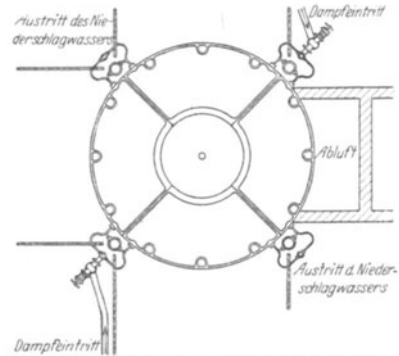


Abb. 195. Tellerrockner für Rohbraunkohle (Zeit).

Es ist einleuchtend, daß bei gleicher Leistung Vergrößerung der Heizfläche die Möglichkeit bietet, niedrigere Temperaturen des Heizmittels anzuwenden und damit ein höherwertiges Erzeugnis zu gewinnen. In diesem Sinne wird nach Abb. 197 (Petry und Hecking) außer dem ringförmig gestalteten, sich drehenden Heizkörper eine dampf-beheizte Mulde angewandt. Das Trockengut durchwandert zunächst das Zylinderinnere, danach die Mulde. Noch weiter geht die Ausführung

der Abb. 198 (Petry und Hecking), bei der die vorherbeschriebenen Heizvorrichtungen durch ein Röhrenbündel ergänzt werden. Der äußere Mantel der beheizten Mulde bewirkt, ebenso wie die darunter angeordneten Rippenrohre, die Vorwärmung der Trockenluft, die am

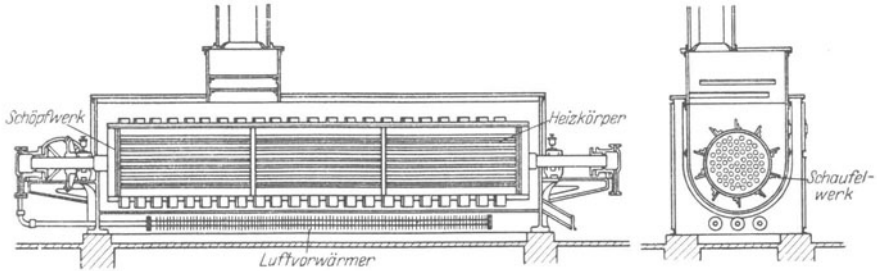


Abb. 196. Muldentrockner (Soest).

Auslaufende in die Mulde einströmt und sich im Gegenstrom zu dem Gut fortbewegt.

Abb. 199 (Buckau) bietet ein kennzeichnendes Beispiel für einen Muldentrockner, bei dem neben dem Trockenmittel eine beheizte Fläche

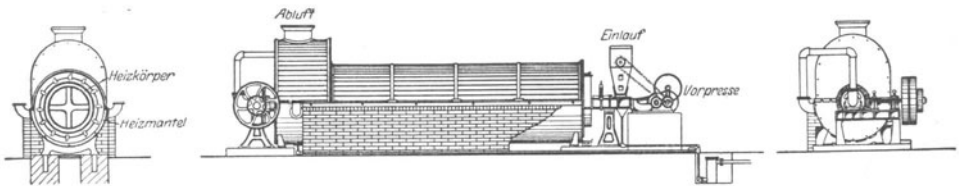


Abb. 197. Muldentrockner (Petry und Hecking).

wohl vorhanden ist, in ihrer Wirkung jedoch vollkommen zurücktritt, weil die als Heizmittel dienenden Abgase durch den gelochten Zylinder sofort in das die Mulde erfüllende Gut übertreten. Das Trockenbild ähnelt infolgedessen dem eines Rieseltrockners, bei dem das Gut von

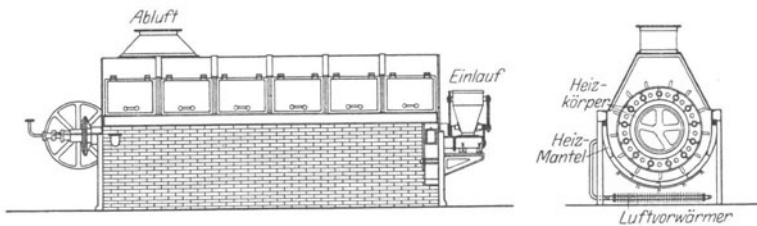


Abb. 198. Muldentrockner (Petry und Hecking).

der Trockenluft im Querstrom durchdrungen wird. Ein beachtliches Merkmal besitzt der Muldentrockner der Abb. 199 in der Unterteilung des Muldenraums durch senkrechte Wände unter Verbindung der einzelnen Zonen mit dem Absaugeraum durch einstellbare Klappen.

Hierdurch läßt sich die Verteilung der Trockengase über die Länge regeln, z. B. so, daß am Einlaufende mehr, am Auslaufende weniger Gase wirken.

g) **Trommeltrockner.** Wird bei einem Muldentrockner die Rinne zum Zylinder erweitert und gleichzeitig mit der Heizvorrichtung in

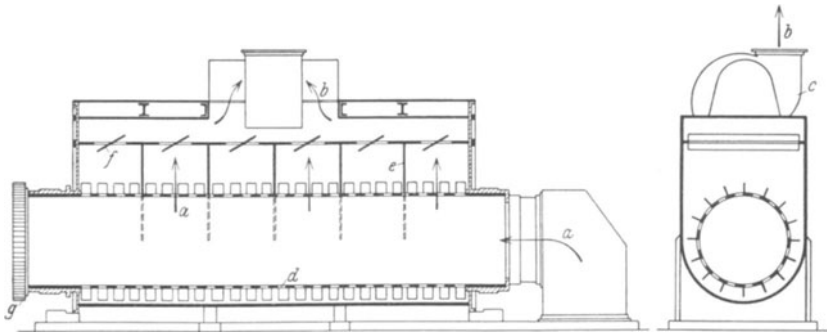


Abb. 199. Muldentrockner (Buckau).

a Heizgase, *b* Brüden, *c* Lüfter, *d* Siebzylinder, *e* Trennwände, *f* Regelklappe, *g* Antrieb.

Umlauf gebracht, so entsteht der in Abb. 200 (Louisville) wiedergegebene Trommeltrockner. Die dampfbeheizten Rohre sind einseitig eingewalzt, auf der anderen Seite verschiebbar gelagert. Luft und Gut bewegen sich im Gegenstrom. Bei der Ausführung nach Abb. 201 und 202 (Manlove-Alliott) werden umlaufende, mit Schaufelwerk ausge-

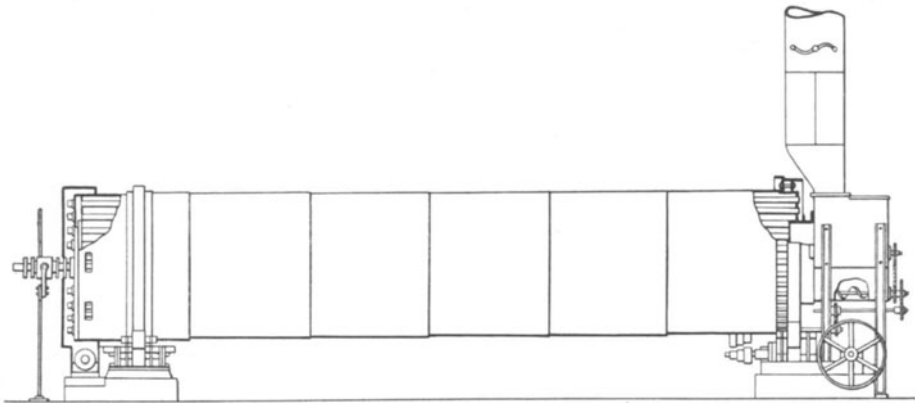


Abb. 200. Dampfheizter Trommeltrockner (Louisville).

stattete Trommeln durch einen äußeren Doppelmantel oder ein inneres Rohr beheizt. Die vorgewärmte Trockenluft durchströmt das Trommelinnere bzw. den Ringraum entgegen dem der Trommelneigung folgenden Gut.

Ausnahmsweise erfolgt die Beheizung von Trockentrommeln von außen durch Feuergase, wenn hohe Temperaturen an sich zulässig sind, Verunreinigung durch Flugasche aber auf alle Fälle ver-

mieden werden soll. Für die Abführung des Feuchtigkeitsgehaltes muß hierbei Luft die von dem Gut erfüllte Trommel durchziehen. Ihre Vorwärmung erfolgt zweckmäßig mittelbar durch die Feuergase nach deren Austritt aus der Trommelummantelung.

In ganz besonderen Fällen umgeben elektrische Widerstände die Trommel, um die äußere Beheizung in feinsten Weise zu regeln. Wegen

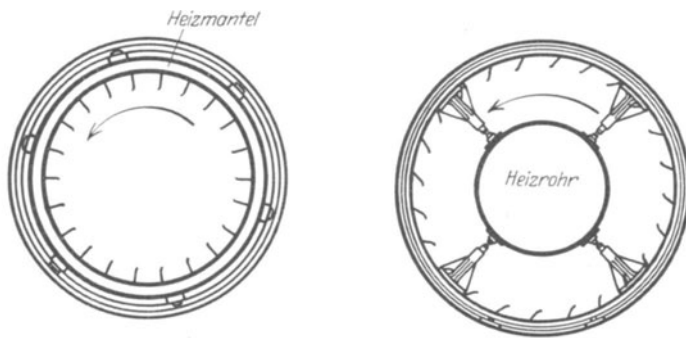


Abb. 201.

Abb. 202.

Abb. 201 und 202. Dampfbeheizte Trommelrockner (Manlove-Alliott).

der Kostspieligkeit der Ausführung und des Betriebes kommen derartige Trockner nur für die Verarbeitung wertvoller Stoffe in Betracht.

In anderen Fällen werden die Feuergase selbst als Trockenluft benutzt, z. B. bei Ausführung nach Abb. 203 (Fellner und Ziegler), bei der die Heizgase zunächst die Trommel umpülen, um danach in voller Menge oder teilweise ihr Inneres zu durchlaufen.

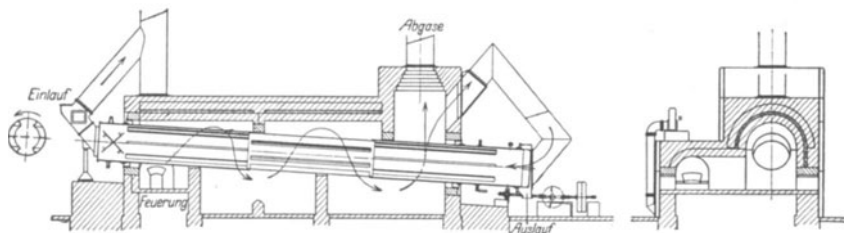


Abb. 203. Trommelrockner mit Außenheizung (Fellner und Ziegler).

Ist hierbei der Weg der Heizgase dem des Gutes außen gleich, innen entgegengesetzt gerichtet, so ist die Wirkung mit der eines Kanaltrockners zu vergleichen, bei dem die Luft zunächst außen, danach während des Durchströmens des Kanals ständig innen erwärmt wird. Gegenüber dem einfachen, innen von heißen Feuergasen im Gleichstrom gespeisten Trommelrockner ergibt sich durch die zusätzliche Außenbeheizung die Möglichkeit eines günstigeren spezifischen Wärmeverbrauchs, wenn im Vergleichsfalle gleiche Temperaturen am Auslaufende vorausgesetzt werden, insbesondere dann, wenn das verarbeitete Gut im Endzustande stark hygroskopisch ist.

Die umgekehrte Führung der Feuergase nach Abb. 204 (Louisville) läuft auf eine ähnliche Wirkungsweise hinaus. Ein Vorzug besteht darin, daß die äußere Einmauerung entfällt. Er wird, wegen der kleineren Heizfläche des Innenrohrs, dadurch ausgeglichen, daß die Gase

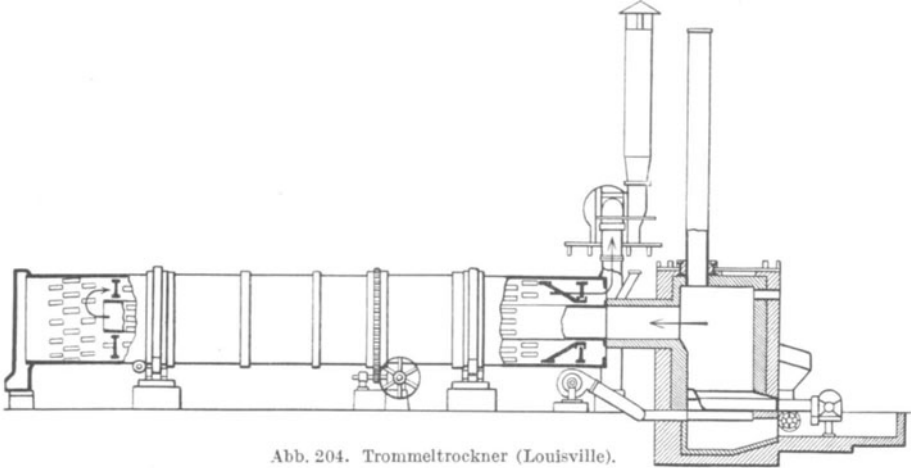


Abb. 204. Trommeltrockner (Louisville).

das Auslaufende mit höherer Temperatur erreichen. Damit kommen die Bedenken zur Geltung, die gegen Anwendung des Gegenstroms beim feuergasbeheizten Trommeltrockner sprechen, wenn das getrocknete Gut, wegen der Entzündungsgefahr oder aus anderen Gründen, sehr hohe Temperaturen nicht zuläßt.

3. Vorrichtungen zur Durchführung eines Trockenverfahrens, bei dem Beharrungszustand vorliegt, unter Anwendung beheizter Flächen allein. (Verdampfanlagen.)

Auch bei den hier zu betrachtenden Trocknern, die auf Anwendung von Luft und anderen vollkommenen Gasen zur Abführung der Feuchtigkeit verzichten und mit der dem Druck der Umgebung entsprechenden Siedetemperatur arbeiten, sind zweierlei Bauweisen zu unterscheiden, je nachdem

1. das Gut sich in gleicher Geschwindigkeit mit der heizenden Fläche bewegt,
2. die Bewegung von Gut und Heizvorrichtung verschieden ist.

An sich ist es denkbar, jede der im vorausgehenden Abschnitt behandelten Trockenvorrichtungen von der Umgebung abzuschließen und damit in eine Verdampfanlage zu verwandeln. Es ist unverkennbar, daß die Entwicklung der Technik sich, wenn auch nur zögernd, in dieser Richtung bewegt. Hierbei wird, neben dem Ausschluß des oxydierenden Einflusses der Luft, fast stets und hauptsächlich Senkung der Trockentemperatur angestrebt, daher regelmäßig unter Luftleere gearbeitet.

Trockner, die als Verdampfanlagen angesprochen werden und unter atmosphärischem Druck arbeiten, erweisen sich bei genauerem Zusehen fast ausnahmslos als mangelhaft belüftete Ausführungen der

voraus behandelten Gattung, bei denen naturgemäß die Temperatur des Trockengutes der Siedetemperatur sehr nahe kommt, bei feuchtem Zustand sich daher um 100° herum bewegt, bei hygroskopischem Zustand darüber liegen kann. Da hiernach die ausschließliche Anwendung beheizter Flächen mit der Vakuumtrocknung zusammenfällt, erwachsen dem Konstrukteur neue, nicht immer leicht zu lösende Aufgaben:

Ein- und Ausführung des Gutes unter Abdichtung gegen die Umgebung,

Widerstandsfähigkeit gegen den äußeren Überdruck,

Bedienungsmöglichkeit trotz der geschlossenen Bauart.

Ihre Lösung ist vielfach auch dort gelungen, wo sie zunächst ausichtslos erschien.

a) Trockenzylinder. Das ungewöhnlich schwierige Problem, den Grundsatz der Vakuumtrocknung auf die Papiermaschine mit ihren schwer beherrschbaren Ausmaßen zu übertragen, hat Minton zielbewußt aufgegriffen und zu praktischem Gelingen geführt. Nach Abb. 205 (Minton) befindet sich der ganze Trockner in einem luftdichten und drucksicheren Gehäuse, das durch stark verrippte Gußplatten gebildet wird. Um die Ein- und Ausführung unter Luftabschluß zu halten, führt Minton die Papierbahn zwischen einer Bronze- und einer Gummiwalze hindurch, wobei die letzte sich noch gegen eine zweite Bronzewalze anlegt. Die Gummiwalze wird durch Gewicht und Luftdruck in den beiden Dich-

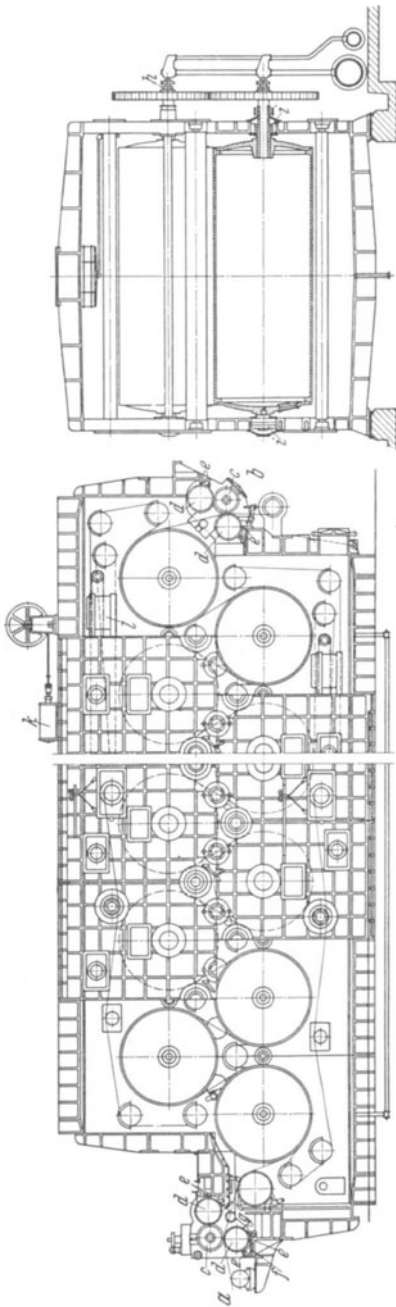


Abb. 205. Vakuumtrockner (Minton).
 a Einlauf, b Auslauf, c Gummiwalzen, d Bronzewalzen, e Gummidichtung, f Dichtungswasser, g Abstreifer, h Stopfbüchsen, i Rollenlager, k Luftzylinder, l Filzspanner.

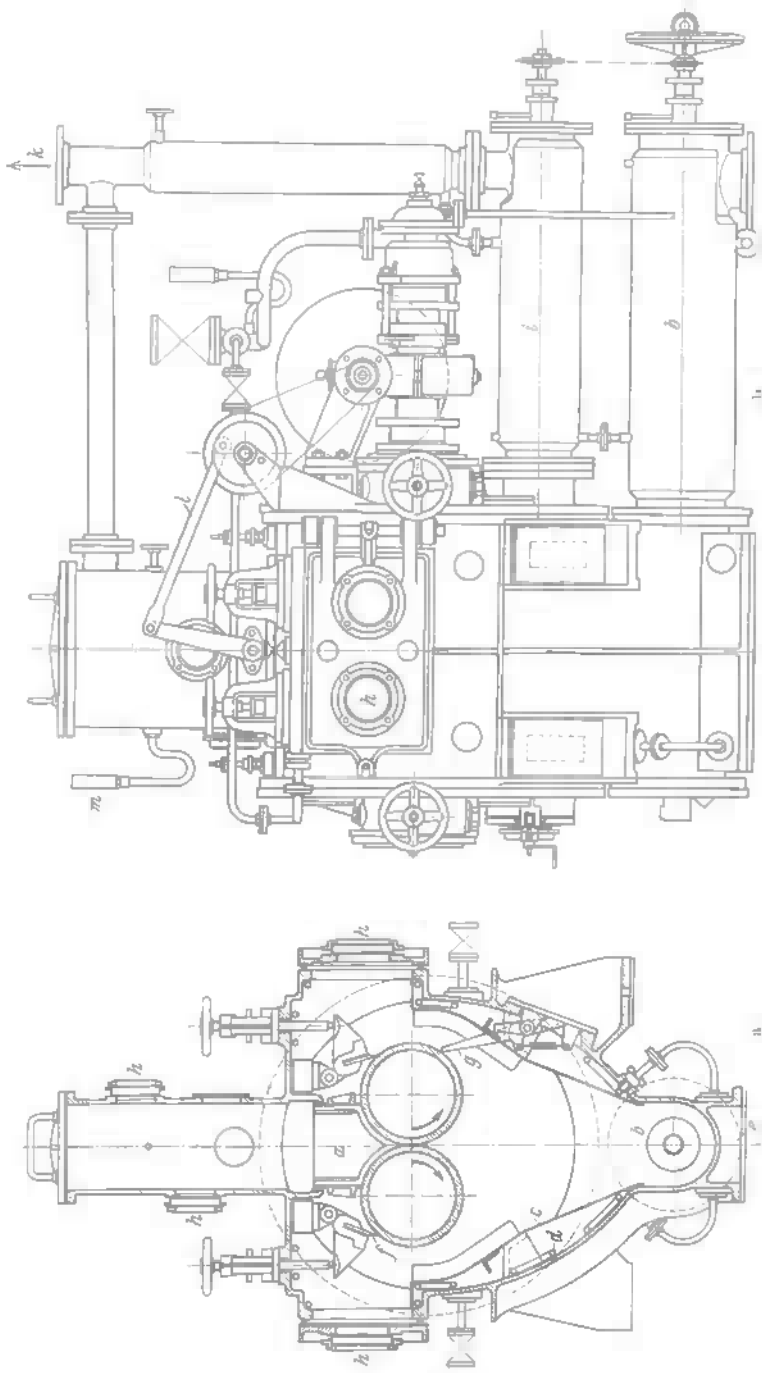


Abb. 206 a und b. Vakuum-Zweizwalentrockner (Vacuutrockner).
a Einlauf, *b* Austragschnecke, *c* Gleitbleche, *e* Heizschlange, *e* Schneckenheizung, *f* Messer, *g* Klopfwerk, *h* Schauglas, *i* Brüdenschnecke, *k* Brüdenausstritt, *l* Rüttelvorrichtung, *m* Vakuummeter.

tungslinien festgepreßt; das Abdichten der Bronzewalzen erfolgt durch je einen unter Wasserverschluß stehenden Gummistreifen, der durch ein unter Druck stehendes Gummirohr angepreßt wird. Das Dichtungswasser wird durch einen Gummiabstreifer von der Papierbahn ferngehalten. Alle auf der einen Seite durch das Gehäuse hindurchtretenden angetriebenen Wellenenden werden durch Stopfbüchsen gedichtet. Die Lagerung erfolgt in Rollenlagern, die mit schwer siedendem Öl geschmiert sind.

b) Walzentrockner. Fließendes Gut kann bei Vakuumwalzentrocknern unter Ausnutzung der Luftleere eingesaugt werden; pastenförmiges Gut wird eingepreßt. Das in Brocken-, Schleier-, Schuppen- oder Pulverform gewonnene Erzeugnis fällt in Sammelkammern. Aus diesen erfolgt die Entnahme in der Regel unter teilweiser Absperrung von der eigentlichen Trockenvorrichtung. Doppelzahl der Sammelkammern ermöglicht ununterbrochenen Betrieb. Luftschleusen vermindern die bei jedesmaligem Wechsel auftretenden Störungen der

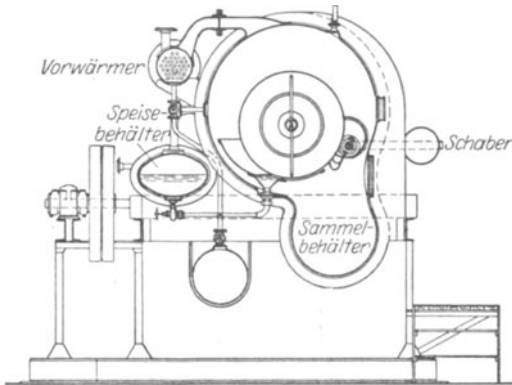


Abb. 207. Vakuumbauchtrommel (Neubäcker).

Luftleere. Der Paßburg-Vakuumtrockner Abb. 206 (Vacuumtrockner) besitzt die kennzeichnenden Merkmale des Zweiwalzentrockners mit Drehung der Zylinder gegeneinander und Ersatz der Auftragwalzen durch Verstellbarkeit des einen Zylinders. Um Störungen durch Niederschlag zu vermeiden, der durch die Abkühlung der Wände entstehen könnte, wird der zwischen den eingebauten Gleitblechen und der Wand verbleibende Raum mit Zusatzheizung versehen. Die an tiefster Stelle eingebaute Schnecke fördert das getrocknete Gut in einen Ausfüllkasten. Dieser kann von dem Schneckengehäuse abgesperrt werden, wenn die das Trockengut aufnehmenden Wagen wechseln.

c) Tauchtrommel. Abb. 207 (Neubäcker) stellt eine Vakuumbauchtrommel dar. Um das Eindicken in der Speisemulde zu verhüten, befindet sich die zu entfeuchtende Flüssigkeit in einem außerhalb des Trommelgehäuses angeordneten Behälter und fließt von da in die eigentliche Tauchmulde, deren Fassungsvermögen so gering gehalten ist, daß mit einer ständigen Erneuerung ihres Inhaltes gerechnet werden kann. Die in der Tauchmulde befindliche Flüssigkeit kocht mit Bläschen von 1 bis 4 mm Durchmesser und verteilt sich auf der Trommel in Form dichten Schaumes, liefert daher ein leicht lösliches Erzeugnis. Die Schaber sind, von dem Üblichen abweichend, hakenförmig und federnd ausgebildet, um eine Bremsung der Trommel zu verhindern.

Soll das Schäumen des Gutes vermieden werden, so wird nach Paßburg das Flüssigkeitsbad unter die der Luftleere entsprechende Siedetemperatur gekühlt.

Überhitzung des Gutes tritt leicht an den beheizten Stirnflächen der Tauchtrommel auf, die deshalb nach Paßburg, Abb. 208 (Vacuumtrockner), flüssigkeitsdicht von dem Gut abgeschlossen werden.

Die Vakuumtauchtrommeln treten für die Behandlung temperaturempfindlicher Flüssigkeiten in ersten Wettbewerb mit den Zerstäubungstrocknern.

Bei mancherlei Trockengut, wie Milch, Extrakten, bedeutet der Ausschluß der Luft einen Vorzug, dem allerdings die etwas längere Trockendauer als Nachteil gegenübertritt. Schließlich ist nicht zu übersehen, daß durch die übliche Beheizung der Zylinder mit Überdruckdampf die der Heizfläche unmittelbar benachbarten Schichten des Trockenguts eine wesentlich höhere Temperatur annehmen als die der jeweiligen Luftleere entsprechende Siedetemperatur. Wird als Heizmittel Unterdruckdampf angewandt, so nimmt zwar bei gleicher Luftleere im Trockenraum die Trockenleistung ab, dafür aber ist eine Verbesserung des Erzeugnisses zu erwarten, das den Vakuumtauchtrommeln ein neues Feld zu eröffnen vermag. Günstig wirkt hierbei auch der niedrige Dampfverbrauch und die noch hinzukommende Möglichkeit, Abdampf einer Dampfkraftanlage oder Überschußbrüden der

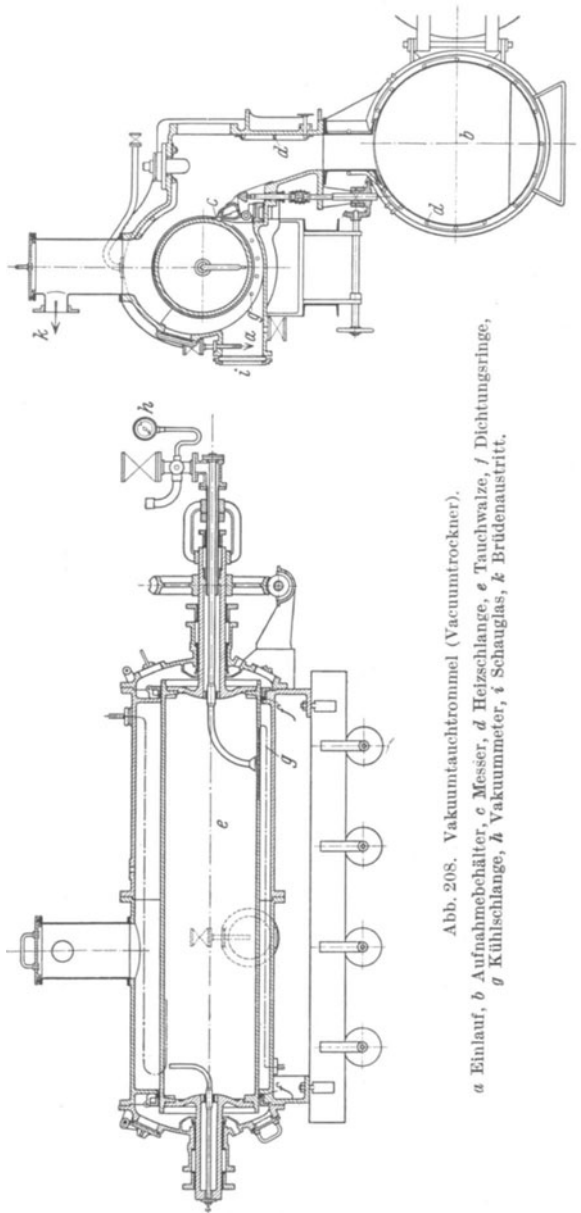


Abb. 208. Vakuumtauchtrommel (Vacuumtrockner).

a Einlauf, *b* Aufnahmebehälter, *c* Messer, *d* Heizschlange, *e* Tauchwalze, *f* Dichtungsringe, *g* Kühlschlange, *h* Vakuummeter, *i* Schauglas, *k* Brüdenaustritt.

häufig mit dem Trockner verbundenen Eindampfanlage zu verwenden.

d) **Tellertrockner.** Während Röhrentrockner kaum für Arbeiten unter Luftleere ausgeführt werden, finden sich die wesentlichen Eigenschaften des Tellertrockners bei dem

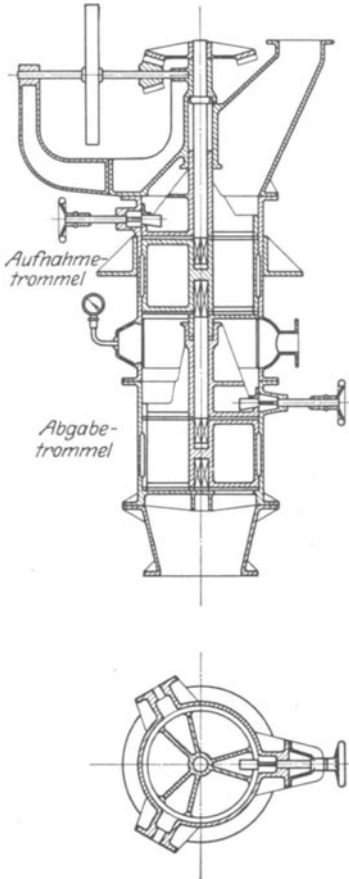


Abb. 209. Luftscheule für Getreidetrockner (Paßburg).

Vakuumbandrockner von Volckmar Hänig vertreten. Er besteht aus einem Vakuumkessel mit mehreren übereinander angeordneten Bändern, die am einen Ende das Gut aufnehmen, am andern Ende abwerfen und sich über beheizte Platten bewegen. Zur Verarbeitung gelangen Stoffe, die in der losen Form von Schuppen oder Pulver gewonnen werden sollen.

e) **Muldentrockner.** Bei der Ausführung des Vakuumentrockners nach Abb. 206 erfährt das getrocknete Gut eine zusätzliche Nachtrocknung dadurch, daß die tief sitzende Förderschnecke außenseitig beheizt wird. Der Form nach läuft dieser Teil auf einen Vakuummuldentrockner hinaus. Für die selbständige Anwendung des Vakuummuldentrockners mit ununterbrochenem Betrieb ist das Feld dadurch stark eingegrenzt, daß die Einführung des schaufelfähigen Gutes unter Luftabschluß kostspielige und empfindliche Vorrichtungen fordert. Vakuumschaufeltrockner arbeiten daher in der Regel mit unterbrochenem Betrieb, bei dem das Trockenbild ständig wechselt. Ununterbrochene Beschickung und Entleerung ermöglichen die von Paßburg nach Abb. 209 entworfenen Luftscheulen. Sie bestehen aus einer Aufnahmetrommel

und einer Abgabetrommel, die gegen den zwischenliegenden Raum abwechselnd abdichten und öffnen. An diesen schließt eine besondere Luftpumpe an, die, mit Rücksicht auf die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens, die mit dem Gut eindringende Luft bei höherem Druck absaugt als er in der eigentlichen Trockenvorrichtung herrscht. Noch größer werden die Schwierigkeiten bei ununterbrochener Betriebsweise von Vakuumentrocknern, die deshalb nicht zu finden sind.

Bei allen Vakuumentrocknern ist zur Aufrechterhaltung der Luftleere eine Kondensationsanlage erforderlich. Sie wird in der Regel als

Einspritzkondensation ausgeführt. Ihr gegenüber bietet die Anwendung eines Oberflächenkondensators die Möglichkeit, das Niederschlagwasser zu beobachten und damit Fortgang und Beendigung der Trocknung zu beurteilen. Bei wärmeempfindlichem Gut bedeutet dies einen Vorzug.

B. Vorrichtungen zur Durchführung eines Trockenverfahrens, bei dem das Trockenbild ständig wechselt.

1. Vorrichtungen zur Durchführung eines Trockenverfahrens, bei dem das Trockenbild ständig wechselt, mit Luft oder einem anderen vollkommenen Gas als Trockenmittel.

Hierher gehören die Trockner einfachster Bauweise in Form von Schränken, Kammern und Darren, bei denen Füllen und Entleeren in bestimmten, durch die Trockendauer festgelegten Zeitabschnitten erfolgt, der Betrieb daher mit Unterbrechung vor sich geht.

a) **Trockenschränke und Trockenkammern.** Schränke und Kammern unterscheiden sich rein äußerlich dadurch, daß die ersten von außen beschickt und geleert werden, während die zweiten begehbar sind. Hieraus ergibt es sich, daß Schränke im allgemeinen kleinere Ausmaße besitzen als Kammern. Trockentechnisch dagegen liegt zwischen beiden Ausführungsformen kaum ein grundsätzlicher Unterschied vor, so daß ihre gemeinsame Behandlung berechtigt erscheint. Damit kommt auch zum Ausdruck, daß ein Trockenschrank nicht etwa wegen der geringen darin verarbeiteten Trockengutmengen eine weniger sorgfältige Ausführung gestattet. Allzu häufig wird hier gegen die Grundsätze richtiger Luftführung verstoßen und eine willkürlich ausgebildete Heizvorrichtung irgendwie untergebracht. Wenn auch die wirtschaftlichen Gesichtspunkte bei kleinen Trocknern zurücktreten, so leidet doch die Güte des Erzeugnisses unter solchen Verstößen. Andererseits ist ein zweckmäßig gebauter Trockenschrank wegen der Leichtigkeit der Überwachung ganz besonders zur Behandlung wertvoller und empfindlicher Stoffe geeignet, weil in jedem Augenblick ein Eingriff in die Führung des Trockenvorganges möglich ist.

Durch Unterbringung der Heizvorrichtung im Innern von Schrank oder Kammer werden keinesfalls ohne weiteres die Kennzeichen einer Erwärmung mit unendlicher Stufenzahl erreicht. Hierfür ist es nötig, daß die Heizvorrichtung über den ganzen Raum verteilt ist, den die Luft durchläuft, also z. B. bei Aufwärtsbewegung der Luft die ganze Höhe des Trockenraumes. Derartige Anordnungen sind jedoch kaum zu finden. Vielmehr ist eine innere Heizvorrichtung fast ausnahmslos am Boden eingebaut. Die Luft trifft das Trockengut erst nach Verlassen der Heizvorrichtung. Damit aber nehmen solche Anordnungen die Eigentümlichkeit der einfachen Vorwärmung an, unterscheiden sich daher grundsätzlich nicht von den Fällern, in denen die Vorwärmung der Luft außerhalb des Trockenraumes erfolgt.

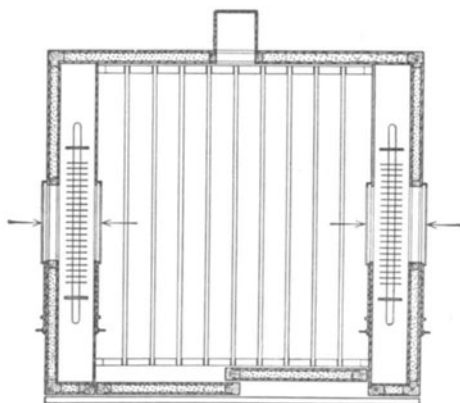
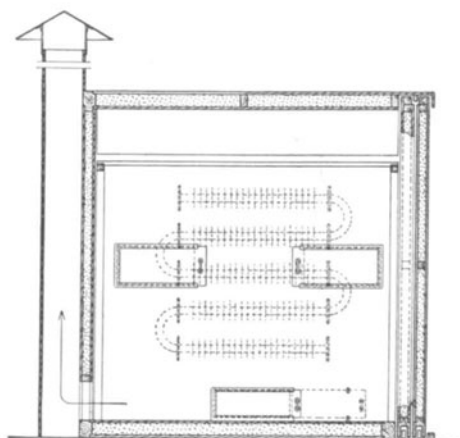
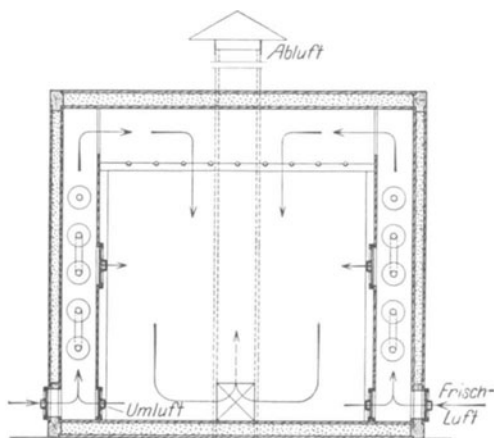


Abb. 210. Trockenkammer.

Das Arbeiten mit Umluft bildet die Regel. Bei Führung der Luft abwärts über das Gut im Sinne der natürlichen Luftbewegung und Anwendung von vorgewärmter Frischluft allein läßt sich ein Voreilen der Trockenwirkung im oberen Teil des Trockenraumes nicht vermeiden. Dies ist stets unerwünscht, häufig schädlich. Zum Ausgleich der Unregelmäßigkeit wird daher die Luft stets aufwärts über das Trockengut geführt, wenn Umluft fehlt.

Ein Beispiel für die zweckmäßige Ausbildung einer mit Umluft und natürlicher Luftbewegung arbeitenden Trockenkammer zeigt der nach Entwurf des Verfassers ausgeführte Wäschetrockner der Abb. 210. Die Vorwärmung der Luft erfolgt durch seitlich angeordnete, von dem eigentlichen Trockenraum durch Scheidewände getrennte Heizvorrichtungen. Innerhalb des Trockenraumes wird die Luft, ihrem natürlichen Bestreben entsprechend, von oben nach unten geführt und an tiefster Stelle dem Abzugschacht zugeleitet. Schieber in mittlerer Kammerhöhe und am Boden ermöglichen, die Luft auch an tieferer Stelle eintreten zu lassen bzw. die an tiefster Stelle sich ansammelnde feuchteste Luft neuerlich in den Kreislauf zu bringen.

Eine nach Entwurf des Verfassers ausgeführte Trockenkammer für die Behandlung von hängenden oder auf Rahmen gespannten Fellen stellt Abb. 211 dar. Saug- und Druckkanäle sind hierbei durch äußere Doppelwände gebildet, die auf der

Saugseite im unteren Teil durch Bedienungsstüren unterbrochen werden. Luftaustritts- und Rückströmöffnungen befinden sich in drei verschiedenen Höhenlagen, um die Führung des Luftstromes mit fort-

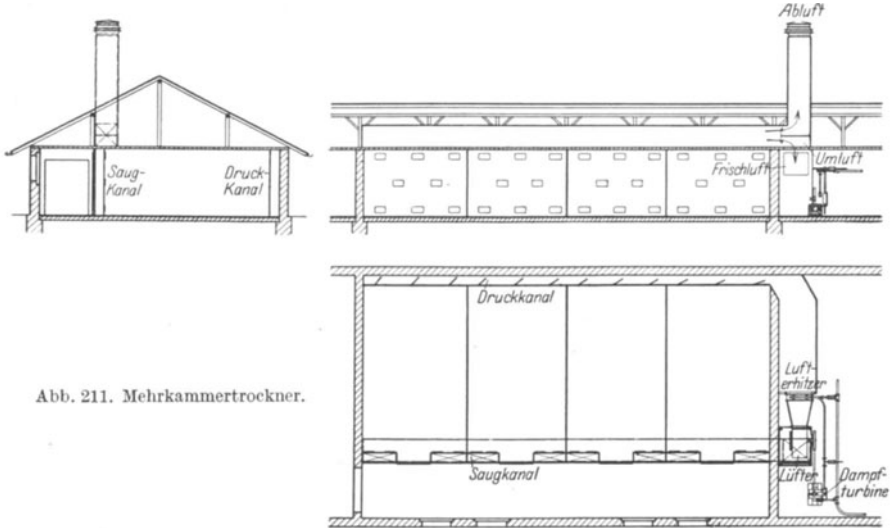


Abb. 211. Mehrkammertrockner.

schreitender Trocknung verändern zu können. Geschieht dies nicht, so erfahren die obersten Teile der Felle eine Übertrocknung, ehe die unteren Teile genügend entfeuchtet sind.

Der Antrieb des Lüfters erfolgt im dargestellten Falle durch eine Dampfturbine, deren Abdampf als Heizmittel für den Lufterhitzer dient. Die Luft bewegt sich nicht, wie dies bei oberflächlicher Betrachtung scheinen könnte, in waagerechter Richtung durch die Kammern. Bei der geringen Luftgeschwindigkeit gibt die natürliche Luftschichtung allein den Ausschlag. Über dem Trockengut breitet sich die Warmluft aus und sinkt über das hängende Gut nieder. Die abgekühlte feuchte Luft schwebt über dem Boden.

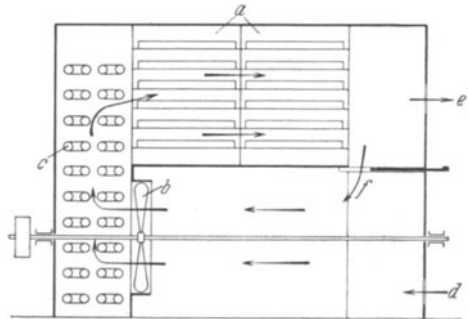


Abb. 212. Trockenschrank.
a Trockenabteile, b Lüfter, c Lufterhitzer,
d Frischluft, e Abluft, f Umluft.

Häufig wird das Gut waagrecht ausgebreitet, sei es, um es in dünner Schicht zu trocknen, sei es, weil die waagerechte Lage die natürliche ist. In solchen Fällen bildet eine Vielzahl der waagerechten Schichten die Regel. Die Führung der Luft waagrecht über das Gut ergibt sich alsdann von selbst. Zur Verstärkung des Luftumlaufes wird ein mechanischer Lüfter nötig. Bei kleinen Schränken, die das Trockengut auf

Horden tragen, läßt sich nach Abb. 212 durch Tieflegen des Lüfters das eigentliche Trockenabteil auf handlicher Höhe halten. Die hier angedeutete Schaltung mehrerer Abteile im Luftweg hintereinander muß bei empfindlichem Gut durch Parallelschaltung ersetzt werden, wie sie bei dem Mehrfachtrockenschrank der Abb. 213 (Daqua) durchgeführt

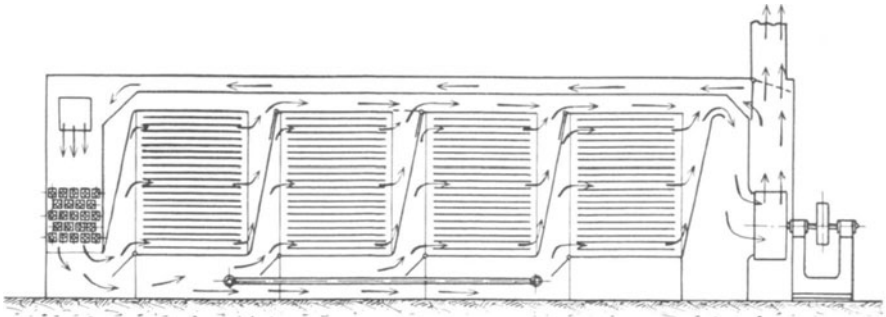


Abb. 213. Mehrkammertrockenschrank (Daqua).

ist, der für die Trocknung von Serum und ähnlichen empfindlichen Stoffen dient. Der Warmluftstrom wird für jede Einzelzelle in einer durch Regelklappen einstellbaren Menge ein- und ausgelassen. Die Parallelschaltung ermöglicht auch Abschaltung der Zellen aus dem Luftkreislauf beim Entleeren und Wiederfüllen. Die hier angewandte Hochführung der Luft nach dem Verlassen des Trockengutes ist unbedenklich, weil die Keilform des Luftweges zusammen mit der angewandten hohen

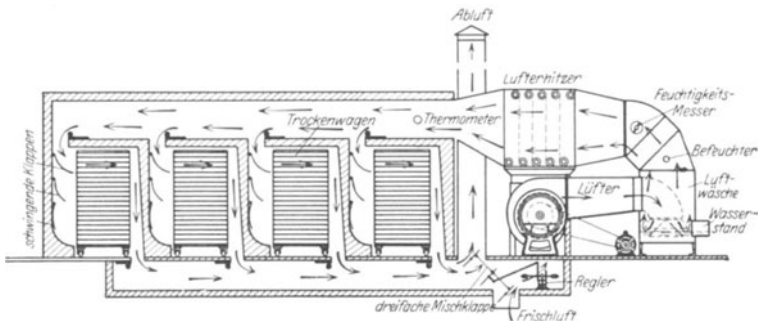


Abb. 214. Mehrkammertrockenschrank (Drying-Systems).

Luftgeschwindigkeit ein Zurücksinken der Luft unter Wirkung ihrer natürlichen Schwere verhindert. Im allgemeinen empfiehlt es sich, nach Abb. 214 (Drying-Systems) die Bewegung der Luft aus dem Einzelschrank nach unten vorzusehen. Im dargestellten Falle sind die Schränke gerade groß genug bemessen, um einen Trockenwagen aufzunehmen. Bemerkenswert sind die auf der Lufteintrittseite angeordneten Leitvorrichtungen, die ständig auf- und abschnwingen, und den Luftstrom abwechselnd durch die oberen, mittleren und unteren Schichten des Gutes leiten. Dort, wo auf diese Weise die Trocknung zeitweise unter-

brochen wird, kann die Feuchtigkeit vom Kern des Gutes nach der äußeren Oberfläche zu diffundieren. Die Regelung der Luftmischung erfolgt durch drei miteinander gekuppelte Drehklappen. Wird die Frischluftzufuhr gedrosselt, so verkleinert sich in gleichem Maße der Abluftquerschnitt, während der Umluftweg weiter geöffnet wird. Bei dem Kammertrockner für Holz der Abb. 215 (Sturtevant) wird die Trockenwirkung dadurch besonders gleichmäßig, daß die Holzstapel in der Mitte einen keilförmigen Raum frei lassen, durch den die Luft hochstrebt, um auf dem so verkürzten Weg waagrecht durch die einzelnen Lagen zu streichen. Der Lüfter befindet sich außerhalb der Trockenkammer. Im Gegensatz hierzu arbeitet die Holztrockenkammer der Abb. 216 nach Thelen¹ mit einer auf gemeinsamer Welle im Trockenraum unterhalb der Schienen angeordneten Vielzahl von Schraubenlüftern. Die Drehrichtung der Lüfter ist umkehrbar. Die Luftbewegung erfolgt durch die Stapel waagrecht hindurch. Überbrückung der beiden Stapel und seitliche Begrenzung durch Vorhänge sichern die richtige Luftführung. Gelochte Böden oberhalb der Lüfter dienen als Verteiler und Gleichrichter. Werden die Lüftergruppen mitsamt den Heizvorrichtungen, statt unten, oberhalb der Trockenkammerdecke angeordnet, so muß die warme Luft abwärts, die feuchte Luft aufwärts gezwungen werden, was selbstverständlich weniger günstig ist.

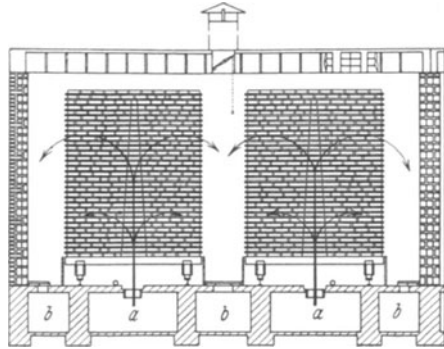


Abb. 215. Kammertrockner (Sturtevant).
a Zuluft, b Abluft.

Die bei der Ziegelrocknung angewandten Trockengänge erinnern nur hinsichtlich ihrer Längenverhältnisse an Kanaltrockner, sind aber in Wirklichkeit Kammertrockner mit ruhendem Gut. Aus diesem Grunde überrascht es, daß die Trockenluft hier noch häufig in der Längsrichtung der Kammer geführt wird. Zulässig wird dies einmal deshalb, weil der Luftweg

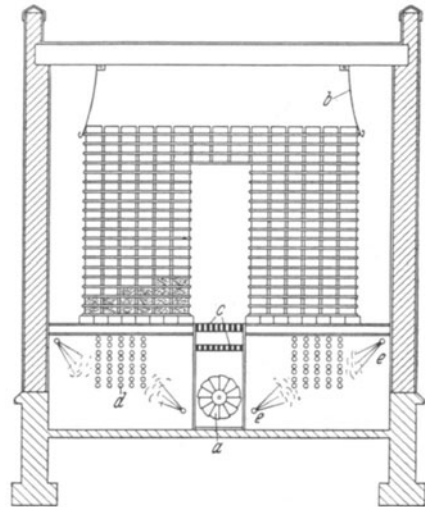


Abb. 216. Kammertrockner (Thelen).
a Umkehrbarer Lüfter, b Vorhang, c Luftverteiler, d Lüfterhitzer, e Dampfrohre.

1 Thelen: Kiln drying handbook. 1929. Deutsch von P. Warlimont: Das künstliche Holzrocknen. 1929.

in der Regel umschaltbar gehalten ist, der Eintritt daher bald am einen, bald am andern Ende erfolgt. Hinzu kommt, daß die Luft, die ein in der Trocknung vorgeschrittenes Abteil verläßt, einem anderen zugeleitet zu werden pflegt, in dem das Gut zu trocknen beginnt. Hiermit aber ergibt sich ein Übergang zum Gegenstromverfahren.

Abb. 217 bietet ein Beispiel für eine Trockenkammer, die im geschlossenen Luftkreislauf arbeitet und deren Anwendung z. B. für die Verarbeitung von Gummifellen in Betracht kommt. Die Luftbewegung innerhalb des Trockenraumes entspricht hierbei der zu Abb. 211 beschriebenen.

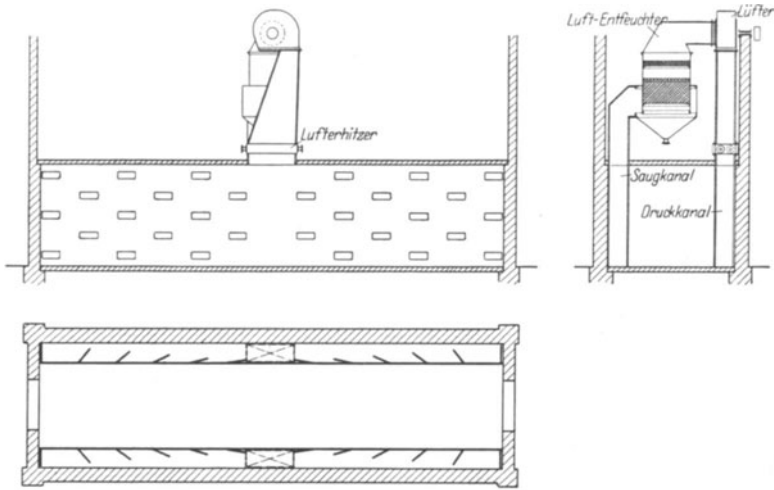


Abb. 217. Trockner für Gummifelle mit geschlossenem Kreislauf der Luft.

Der Kammertrockner nach Abb. 218 (Hahag) ähnelt hinsichtlich Luftverteilung und Luftführung dem der Abb. 215. An Stelle des keilförmigen freien Raumes im Stapel selbst ist eine entsprechend ausgebildete Doppelleitwand so eingebaut, daß die Warmluft von der senkrechten Richtung waagrecht abgelenkt wird. Die Umluftbewegung wird durch genaue Beachtung der natürlichen Luftschichtung besonders lebhaft. Zur Regelung der Frischluftmenge sind die Abluftschächte heizbar eingerichtet. Hierdurch wird es möglich, den bei warmer Außenluft sich ergebenden höheren Frischluftbedarf zu decken, während bei fehlender Schachtheizung der verschlechterte natürliche Zug im entgegengesetzten Sinne wirken und einen Ausgleich durch Anwendung höherer Trockentemperaturen fordern würde.

b) **Darren.** Die zweite hierher gehörige große Gruppe von Trocknern stellen die festen oder beweglichen Darren dar, bei denen die Trockenluft durch eine gelochte Trennwand zum Gut gelangt und dieses durchdringt. Bei den einfachsten Darren haben sich allmählich Normen herausgebildet. So besteht z. B. ein Zimmermannsches Darrfeld aus 4 Tafeln von 2×1 m, entsprechend einer Fläche von 8 m^2 . Zu-

sammenfassung von 4 solchen Darrfeldern nach Abb. 219 stellt eine übliche Anordnung dar. Damit lassen sich bei etwa 0,2 m Schütthöhe 3000 bis 4000 kg Naßgut fassen. Der gelochte Darrboden befindet sich etwa in halber Höhe des Darrfeldes. Die Erzeugung der Trockenluft erfolgt in einer Sammelanlage und ihre Verteilung auf die einzelnen Darren durch einen an der Stirnseite laufenden Heißluftkanal. Je weiter die Ausnutzung der Trockenluft getrieben wird, um so näher liegt die Gefahr der Schwadenbildung im Raum. Aus diesem Grunde werden die Darren häufig abgedeckt und mit einem Dunstabzug versehen. Ein Hauptvorteil der Trockendarre kommt hierbei allerdings in Wegfall, nämlich die leichte Wartung und die einfache Möglichkeit, den Inhalt zweier Felder auf einem zu vereinen, wenn das Gut mit fortschreitender Trocknung stark schrumpft und ohne dieses Zusammenwerfen die Darre nicht mehr genügend füllt.

Um eine gleichmäßige Trockenwirkung über das ganze Darrfeld zu erzielen, werden besondere Maßnahmen für die Luftverteilung um so mehr notwendig, je geringer die Luftmengen sind und je niedriger die Schütthöhe des Trockengutes gehalten wird, weil sich dann leicht an einzelnen Stellen besonders geringe Durchströmwiderstände ergeben, durch die die Trockenluft unausgenutzt entweicht. Die Regelung der Luftverteilung kann alsdann z. B. nach Abb. 220 (T. A. G.) unter Verwendung drehbarer, über die ganze Tiefe

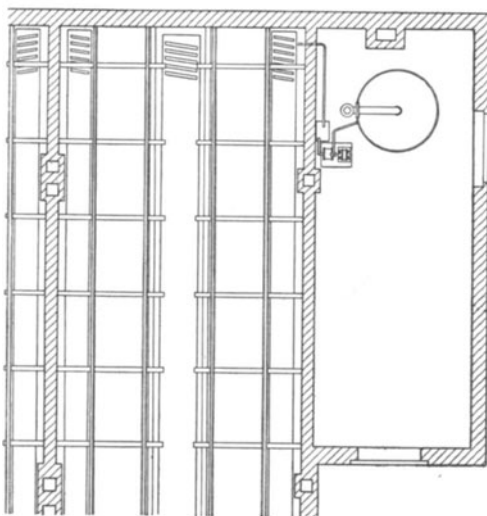
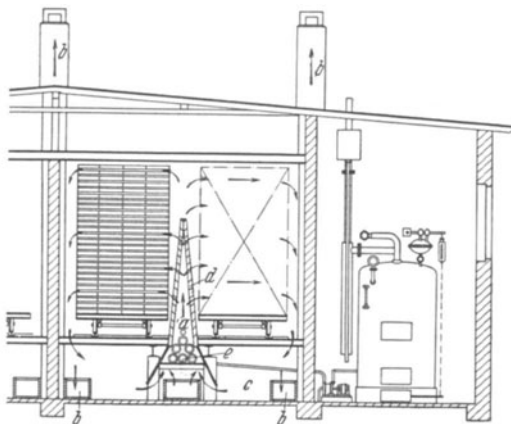


Abb. 218. Kammertrockner (Hahag).
a Zuluft, b Abluft, c Umluft, d Lenflächen, e Lufterhitzer.

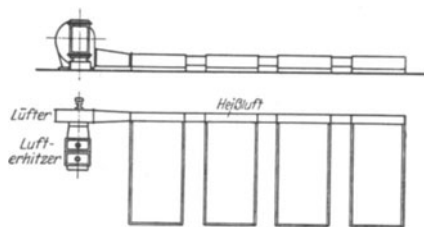


Abb. 219. Vierfelderdarre (Zimmermann).

des Darrfeldes verteilter Klappen erfolgen. Bei großen Luftmengen und hoher Schütthöhe werden derartige Verwicklungen überflüssig.



Abb. 220. Luftverteilung unter Darrenboden (T. A. G.).

amerikanischen Farmen und den Plantagen der kolonialen Länder vielfach angewandt. Dabei ist manche Ausführung hinsichtlich des spezifischen Wärmeverbrauchs als hochwertig zu bezeichnen. Mehr und mehr

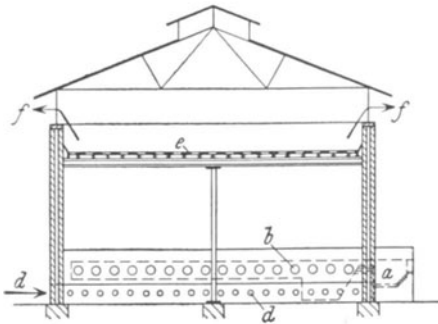


Abb. 221. Kaffeetrockenhaus (Driessen-Holman).
a Feuerung, *b* Heizrohre, *c* Abgase, *d* Frischluft,
e Trockenplatten, *f* Abluft.

werden jedoch auch hier vervollkommnete Trockenvorrichtungen angewandt, die durchgehenden Betrieb ermöglichen, weniger Arbeitskräfte fordern und vor allem den Erfolg in geringerem Maße von der Sorgfalt der Bedienung abhängig machen. Das Trockenhaus der Abb. 221 (Driessen-Holman) dient für die Verarbeitung von Kaffee und ist so eingerichtet, daß die für das ständige Wenden des Trockengutes nötige Bedienung sich dauernd im Trockenraum befindet. Dadurch, daß die Wände in einer Höhe von etwa 1 m über den Trockenplatten offen sind, erfolgt der Abzug besonders leicht und unter Vermeidung einer ungewöhnlichen Belästigung der Bedienung.

Zu den Darren gehören auch die Trockenhäuser. Sie finden sich wegen der einfachen Herstellungsmöglichkeit auf

Die Rücksicht auf wirtschaftliches Arbeiten verlangt bei einfachen Darren eine Anpassung des Trockenvorganges an den veränderlichen Zustand des Trockengutes, in der Regel daher eine Senkung der Lufttemperatur, sobald das Trockengut in den hygroskopischen Zustand eintritt.

Werden mehrere Darren hintereinander geschaltet und die Luft nacheinander durch die einzelnen Lagen geleitet, so läßt es sich nicht vermeiden, daß die zuerst getroffenen Schichten rascher trocknen. Dies gilt vor allem für die zahlreichen schrankförmigen Hordentrockner, wie sie für das Dörren von Obst und Gemüse in kleinerem und mittlerem Ausmaße ver-

wendet werden. Eine Verbesserung wird hier nach dem Verfahren von Schlatter dadurch erzielt, daß die Luftbewegung umgekehrt wird, sobald die unterste Schicht den gewünschten Endfeuchtigkeitsgrad nahezu erreicht hat. Das erforderliche Umsetzen der Horden kann hierdurch eingeschränkt werden.

Die Anordnung mehrerer Trockenböden übereinander bildet bei den Malzdarren die Regel. Abb. 222 (Topf) stellt z. B. eine Dreihordendarre dar, die den in allen Teilen ihr angepaßten Bau in seiner ganzen Grundfläche beansprucht. Auf der oberen Schwelkhorde erfolgt die Vortrocknung, auf der mittleren Trockenhorde die vollständige Austrocknung. Auf der untersten Abdarrhorde findet kein eigentliches Trocknen mehr statt. Während die beiden oberen Horden von der hochsteigenden Heißluft nacheinander durchströmt werden und zu diesem Zweck zwischen mittlerer und unterer Horde eine besondere Luftverteilungskammer angeordnet ist, erhält die untere Horde besondere Heißluftzufuhr. Die Heizvorrichtung besteht aus Rohren, die von Feuer gasen durchströmt und von Luft umspült werden. Sie werden neuerdings mehr und mehr durch Dampfrohrnetze verdrängt. Um eine günstige Ausnutzung des Brennstoffs zu erreichen, durchziehen nach Abb. 222 die Feuergase die beiden Rohrnetze im Gegenstrom zu der Luft von oben nach unten. Die erwärmte Luft strömt zum Teil unmittelbar nach der unteren Horde, zum Teil durch einen in der Wand hochsteigenden Kanal nach der mittleren Luftverteilungskammer. Durch einstellbare Schieber in verschiedenen Höhenlagen wird ermöglicht, daß die untere Horde

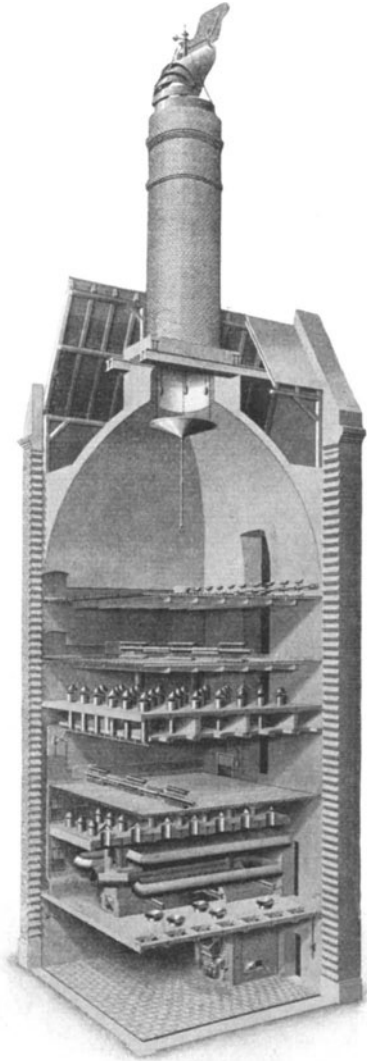


Abb. 222. Dreihordendarre (Topf).

mit wenig Luft von hoher Temperatur, die beiden oberen Horden mit viel Luft von niedriger Temperatur arbeiten. Der Abzug des Schwadens erfolgt durch einen Dunstschacht. An seiner Stelle werden neuerdings mechanische Lüfter verwandt, um den Betrieb unab-

hängig von den Witterungsverhältnissen zu machen. Werden sie als Schraubenlüfter ausgebildet und mit einem beweglichen Ringschieber

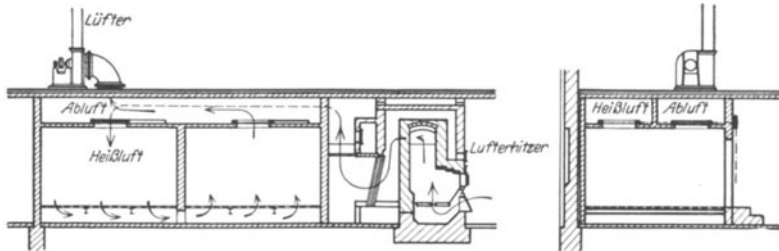


Abb. 223. Doppeldarre (Topf).

verbunden, so läßt sich bei Stillstand des Lüfters der natürliche Zug unbehindert ausnutzen. In gleichmäßigen Zeitabschnitten wird das Trockengut von der unteren Horde abgeräumt, von der mittleren auf die untere, von der oberen auf die mittlere umgeladen und die obere Horde neu beschickt. Hierdurch ergibt sich eine Annäherung an die Trocknung im Gegenstrom mit gleichbleibendem Trockenbild. Die Ausnutzung der Trockenluft ist besonders auf der mittleren Horde starken Schwankungen unterworfen, weil hier das Trockengut aus dem feuchten in den hygroskopischen Zustand überzugehen pflegt. Ein Ausgleich wird auf der oberen Horde geschaffen, auf der das Trockengut stets noch feucht bleibt.

Das erforderliche Wenden des Guts während der Trocknung erfolgt bei Malz durch selbsttätige Schaufelvorrichtungen, die längs der Darre wandern. Für die Beschickung werden vorzugsweise pneumatische Förderanlagen angewandt.

Bei der in Abb. 223 (Topf) dargestellten Doppeldarre geschlossener Bauart tritt die Trockenluft in der ersten Kammer von oben durch das Gut unter den Darrboden, strömt nach der zweiten Darre über und durchläuft dort das Gut von

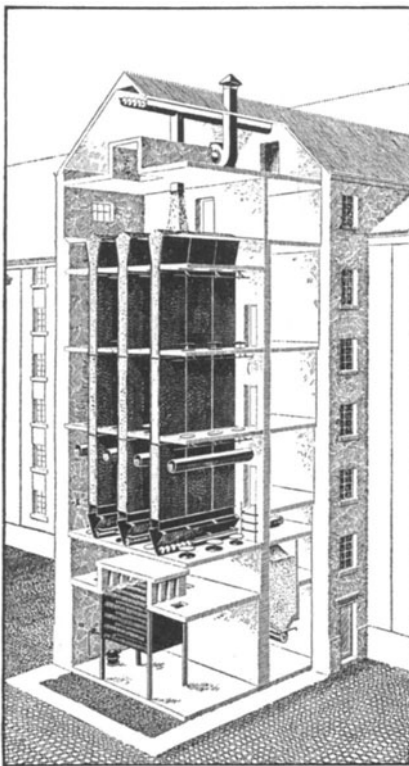


Abb. 224. Vertikaldarre (Topf).

unten nach oben. Die erste Kammer ist hierbei mit nassem, die zweite mit vorgetrocknetem Gut gefüllt, so daß sich eine Annäherung an Gleichstromtrocknung mit Beharrungszustand ergibt. Nach Entleerung

und Neufüllung der zweiten Kammer wird der Luftweg umgekehrt. Die Führung der Luft kann ohne weiteres im Gegenstrom erfolgen, wenn das Gut im Endzustande empfindlich ist und ein niedriger Endfeuchtigkeits-

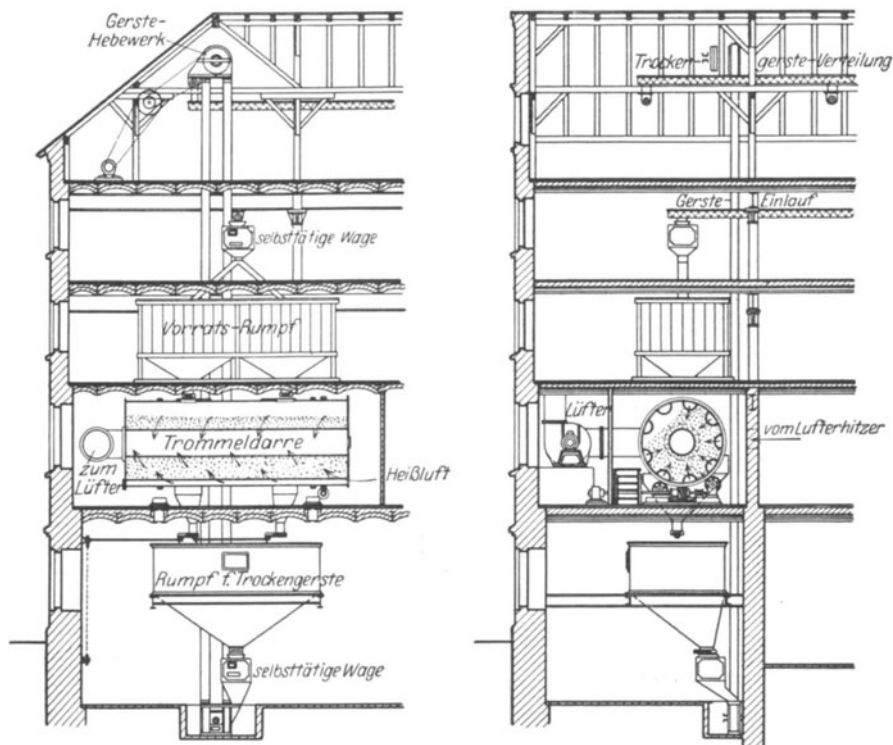
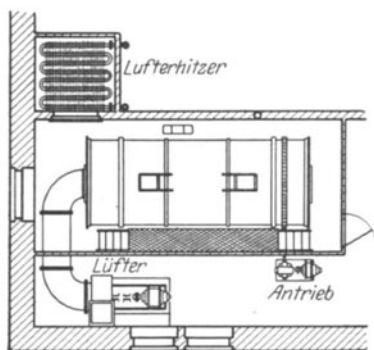


Abb. 225. Trommeldarre (Freund).



grad angestrebt wird. Bei anderen Ausführungen sind in jedem der beiden Abteile mehrere Horden übereinander angeordnet. Zuweilen erfolgt das Umsteuern des Luftweges selbsttätig in bestimmten Zeitabschnitten, wobei das Trockengut abwechselnd von oben nach unten und umgekehrt durchströmt wird.

Um die kostspieligen Wende-, Verteil- und Abräumvorrichtungen

zu umgehen, hat Topf eine senkrecht angeordnete Darre, Abb. 224, entwickelt. Das Trockengut rieselt zwischen Wänden aus Drahtgewebe nieder. Die ganze Höhe ist in drei Teile zerlegt, die durch Verschlüsse voneinander trennbar sind. Die Heißluft durchdringt die durch das

Gut gebildete Säule abwechselnd von der einen nach der anderen Seite, um eine gleichmäßige Trockenwirkung zu erzielen. Besondere Luftkanäle machen es möglich, für jede Abteilung verschiedene Temperaturen anzuwenden. Auch hier wird das Trockengut in bestimmten Zeitabschnitten unten entnommen, von den beiden oberen Abteilen gesenkt und oben neu beladen. Das Trockenbild läuft in der Hauptsache auch hier auf Gegenstrom hinaus.

Werden ausnahmsweise Trommeltrockner für chargenweisen Betrieb angewandt, so wird auf Durchführung von Gegenstrom oder Gleichstrom verzichtet. Damit aber verliert die kostspielige Ausführung als Trommeltrockner ihre Berechtigung. Diese an sich mögliche Betriebsweise kommt daher mit Recht nicht zur Anwendung.

Bei der Trommeldarre bewirkt die Drehung der Darre selbst die Durchmischung des Gutes. Sie besteht nach Abb. 225 (Freund) aus einem geschlossenen Zylinder, an dessen Umfang Luftzuführungskanäle mit durchbrochenen Wänden verteilt sind. Die Abführung der Luft erfolgt durch ein gelochtes Kernrohr. Die Schichtstärke ist durch den Abstand der Luftzuführungskanäle von dem Kernrohr gegeben. Sie ist in dem oberen, im Drehsinn vorauseilenden Ringabschnitt infolge des Schwundes am kleinsten, so daß der hier durchströmende Luftteil weniger gut ausgenutzt wird. Die am Umfang verteilten Kanäle werden an der einen Stirnseite zu einer Kammer vereinigt und diese an eine Rohrleitung angeschlossen, oder der Aufstellungsraum der Trommel wird im ganzen von der Trockenluft erfüllt, die, wie bei der Ausführung der Abb. 225, unmittelbar in die frei an den Stirnenden ausmündenden Luftverteilungskanäle einströmt. Bei dieser Bauweise liegt die Möglichkeit vor, den Luftkanal ganz oder teilweise abzudecken, sobald er die oben erwähnte Lage der geringsten Schichtstärke des Gutes durchläuft, um auf diese Weise der Ungleichmäßigkeit zu begegnen. Da bei der an die Trocknung sich nach etwa 5 bis 8 Stunden anschließenden Kühlung der Aufstellungsraum von Frischluft durchströmt wird und seinen Wärmeüberschuß größtenteils verliert, bildet die Anordnung nach Abb. 225 ein klares Beispiel für die Notwendigkeit, durch Aufbringung einer inneren Wärmeschutzschicht diesen Verlust niedrig zu halten.

2. Vorrichtungen zur Durchführung eines Trockenverfahrens, bei dem das Trockenbild ständig wechselt, unter Anwendung beheizter Flächen zusammen mit Luft oder einem anderen vollkommenen Gas.

Hierher gehört die einfachste, aus einer beheizten Platte bestehende Trocknerform, bei der das Gut an der freien Seite mit der umgebenden Luft in Berührung tritt. Die Beheizung kann durch Feuergase erfolgen, wie bei dem in Abb. 226 (Petry und Hecking) dargestellten Teller-trockner. Das über die flache Schale verteilte Trockengut wird durch Rühr- und Förderflügelwerke in ständiger Bewegung gehalten.

Der Muldentrockner verliert bei Verwendung zur Durchführung eines Trockenverfahrens im Chargenbetrieb gegenüber dem in der Regel möglichen ununterbrochenen Betrieb an Wert. Infolgedessen kommt diese Arbeitsweise nur in seltenen Fällen zur Durchführung, vor allem wenn das Trockengut in seiner Beschaffenheit stark wechselt und eine befriedigende Trocknung nur unter Anpassung an die jeweiligen Voraussetzungen gelingt. Hierbei wird die Leistung einer Charge durch das Fassungsvermögen des Trockners begrenzt. Der Zeitaufwand für Füllen und Entleeren beeinträchtigt die Höhe der Tagesleistung.

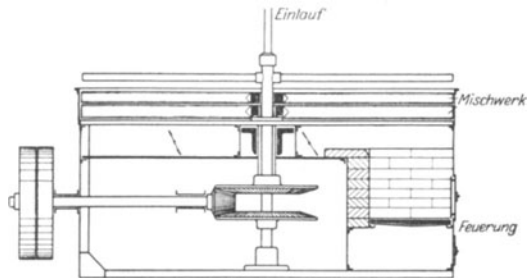


Abb. 226. Tellertrockner (Petry und Hecking).

3. Vorrichtungen zur Durchführung eines Trockenverfahrens, bei dem das Trockenbild ständig wechselt, unter Anwendung beheizter Flächen allein. (Verdampfanlagen.)

Bei den unter Luftabschluß arbeitenden Trockenvorrichtungen dieser Art ergibt der chargenweise Betrieb eine Vereinfachung in der Ausführung insofern, als die verhältnismäßig hohen Kosten für besondere Endladevorrichtungen, bei nicht flüssigem Gut auch für die Beschickungsvorrichtungen, entfallen. Sie nehmen daher einen breiten Raum ein. Auch hier fällt die ausschließliche Anwendung beheizter Flächen regelmäßig mit der Vakuumtrocknung zusammen.

a) **Trockenschränke** arbeiten mit dampfbeheizten Platten als Gutträgern. Rechteckige Form bildet die Regel, weil sich bei ihr tote Räume leichter vermeiden lassen als der bei mit Rücksicht auf die Widerstandsfähigkeit gegen den äußeren Überdruck näher liegenden zylindrischen Form. Gegenüber dem im allgemeinen üblichen gesonderten Einbau der Heizplatten bedeutet die Ausbildung des Vakuumtrockenschrankes nach Abb. 227 (Vakuumtrockner) einen Fortschritt. Er wird aus einzelnen, aufeinander sitzenden Elementen zusammengebaut, bei denen die Heizplatte und die auf das Einzelement entfallenden Teile der Seitenwände aus einem Stück bestehen. Dampf- und Kondensatanschlüsse kommen hierbei nach außen zu liegen, so daß Störungen durch Austritt des Dampfes in das Innere des Trockenraumes wegfallen. Bei Vakuumtrockenschränken besitzen die im allgemeinen verrippten und aus Gußeisen bestehenden Türen verhältnismäßig hohes Gewicht. Die Verwendung einer einfachen Schwenkvorrichtung zur Erleichterung der Handhabung bildet daher die Regel. Je zahlreicher die übereinander angeordneten Heizplatten sind, um so mehr kommen für die Beschickung und Entladung besondere Wagen in Betracht, die das Trockengut auf

Unterlagen in genau entsprechender Höhe aufnehmen und das Einschieben und Ausziehen mit einfachen Handhabungen ermöglichen. Die unmittelbare Aufbringung des Gutes auf die Heizplatte ist auf die Ausnahmen beschränkt, bei denen das Gut Flächenform besitzt. Im übrigen kommen Horden oder Trockenschalen aus geeigneten Metallen in Betracht. Ist die Berührung zwischen Heizplatte und Horde bzw. Schale keine innige, so wirkt neben der Wärmeleitung die Strahlung auf das Gut. Bei der gegen die darüber befindliche Heizplatte gerichteten Oberfläche des Gutes ist dies ausschließlich der Fall.

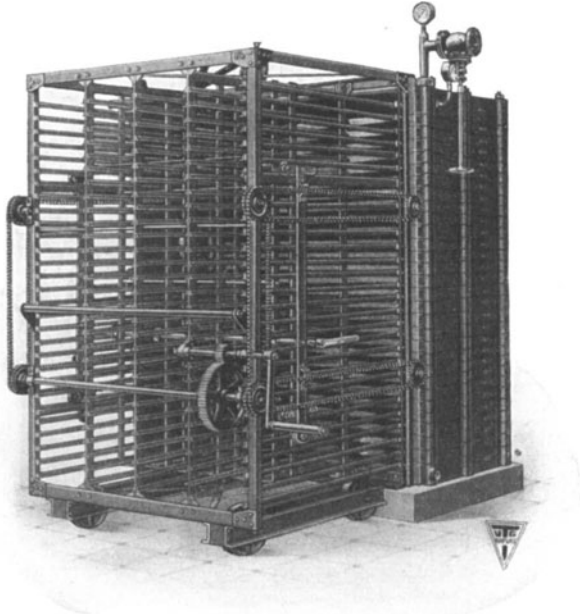


Abb. 227. Vakuumtrockenschrank mit fahrbarem Bedienungsgestell (Vakuumtrockner).

Aus der Erkenntnis heraus, daß nicht, wie so häufig angenommen wird, die Höhe der Luftleere allein die Temperatur des Trockengutes bestimmt und die Oberflächentemperatur der Heizplatte gleichgültig ist, versieht die Vacuumtrockner G. m. b. H. neuerdings ihre Vakuumtrockenschränke mit zwei Anschlüssen, um zunächst mit gespanntem Dampf, später mit Warmwasser oder Unterdruckdampf zu arbeiten.

Zylindrische Vakuumtrockenschränke erhalten fast ausnahmslos schmiedeeiserne Mäntel und Deckel. Die beiderseitige Anordnung herauschwenkbarer Türen erleichtert die Beschickung.

Ausnahmsweise erhält die Heizvorrichtung von Trockenschränken eine andere als plattenartige Form. Beispielsweise stellt Abb. 228 (Pintsch) einen mit Gleis versehenen zylindrischen Trockner dar, der

zum Trocknen von Motorankern und elektrischen Drahtspulen dient. Die Heizfläche umsäumt in Rohrschlangenform die Wandungen und wirkt ausschließlich durch Strahlung. Für das Trocknen von Kabeltrommeln werden Vakuumtrockner verwandt, die neben der Mantelheizung einen doppelwandigen beheizten inneren Einsatz besitzen, um den sich die Trommel legt. Hiermit ist der Übergang zu Formen geschaffen, die äußerlich nicht als Schränke erscheinen, deren Wirkungsweise jedoch mit der des Vakuumtrockenschrankes zusammenfällt.

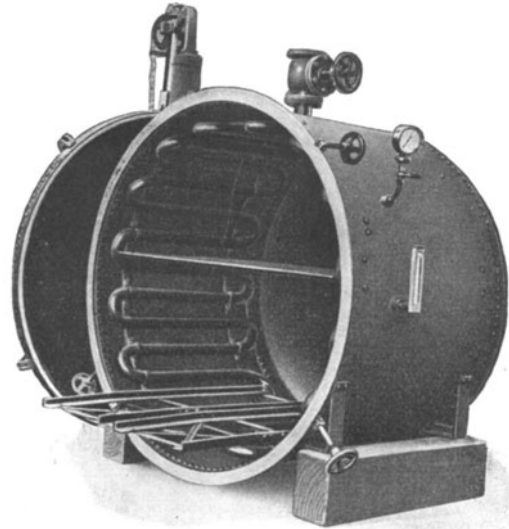


Abb. 228. Zylindrischer Vakuumtrockner (Pintsch).

b) Tellertrockner. Bei empfindlichen Stoffen muß eine ständige Durchmischung stattfinden. Hierfür nehmen Tellertrockner z. B. die Form der Abb. 229 (Manlove-Alliott) an. Flügel- und Rechenwerke arbeiten zusammen. Neben dem Boden ist auch der untere Mantelteil als Heizfläche ausgebildet. Die Beschickung erfolgt von oben, die Entleerung seitlich selbsttätig nach Öffnung der herumschwenkbaren Tür.

c) Schaufeltrockner. Für Arbeiten unter Luftleere geht nach Abb. 230 (Manlove-Alliott) der Muldentrockner in zylindrische Form über. Der Doppelmantel wird mit Dampf beheizt. Im Innern arbeitet eine Mischvorrichtung, deren Form sich nach der Eigenart des Gutes richtet.

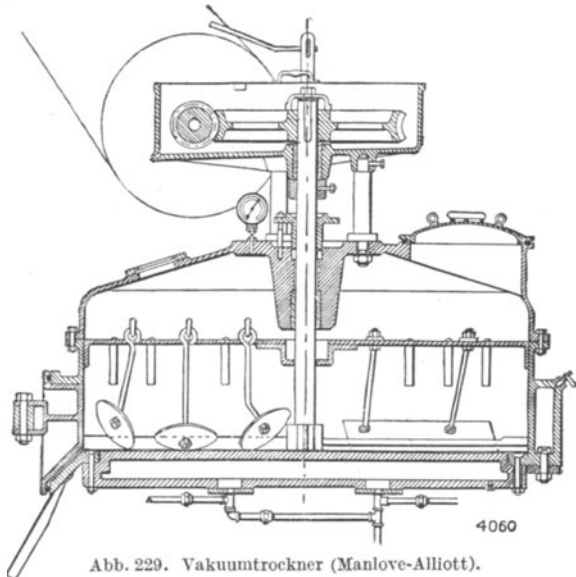


Abb. 229. Vakuumtrockner (Manlove-Alliott).

d) Trommeltrockner. Wird der dampfbeheizte Zylinder in Drehung versetzt, so geht der Vakuumschaufeltrockner in den Vakuumtrommel-

trockner über. Wegen der durch die Drehung sich von selbst ergebenden Durchmischung entfällt hierbei das innere Rührwerk. Ein Vorteil gegenüber dem Vakuumschaufeltrockner besteht trockentechnisch nicht.

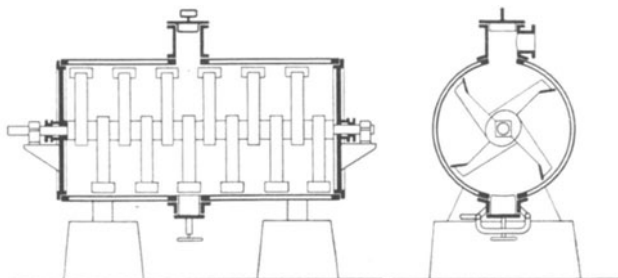


Abb. 230. Vakuumschaufeltrockner (Manlove-Alliott).

Dieser verdient daher wegen des Wegfalls einer Stopfbüchsenabdichtung für Dampf und Kondensat den Vorzug, wenn die Eigenart des Trocken-gutes die Verwendung eines Rührwerks gestattet.

C. Trockenvorrichtungen mit Heißdampf als Wärmeträger.

Eine Sonderstellung nehmen solche Trockenvorrichtungen ein, bei denen als Trockenmittel überhitzter Dampf zur Anwendung gelangt. Auch hier handelt es sich, wie bei den zuletzt beschriebenen, um ein Verdampfen der zu entziehenden Feuchtigkeit bei einer Temperatur, die bei oder über dem durch den Druck der Umgebung bestimmten Siedepunkt liegt. Das wohl zuerst von Hausbrand empfohlene Verfahren ist verschiedentlich zur Anwendung gelangt, insbesondere zur Trocknung von Holz. Der Erfolg war jedoch nirgends so eindeutig, daß die Heißdampftrocknung bisher besondere Bedeutung angenommen hätte. Manche Verfahren werden als solche angesprochen, entpuppen sich jedoch bei genauer Prüfung als offene Trocknung mit mangelhafter Belüftung.

Eine besondere Verlockung für die Anwendung von Heißdampf als Trockenmittel liegt bei den Zerstäubungstrocknern vor, weil hier, wegen der Kürze der Trockenzeit, hohe Temperaturen des Trockenmittels zulässig erscheinen.

III. Ausführung der Trockenvorrichtungen in Anpassung an die besonderen Eigenschaften verschiedener Gutsarten.

Die für die Trocknung maßgebenden besonderen Eigenschaften sind für wichtige Gutsarten in den letzten Jahren eifrig erforscht worden, für die meisten Stoffe jedoch immer noch unbekannt. Damit fehlen

aber bestimmte Grundlagen für die Entwicklung des bestgeeigneten Trockenverfahrens und für den Entwurf der jeweils zweckmäßigsten Trockenvorrichtung. Hierin liegt wohl ein Grund, weshalb die Hersteller von Trocknern sich vielfach der Verarbeitung ganz bestimmter Gutsarten zugewandt haben. Da sich jedoch zweifellos in den meisten Fällen Trockner gleicher Bauart für verschiedene Waren eignen, durften in den vorausgehenden Abschnitten die hauptsächlichlichen Ausführungsformen als Mittel zur Durchführung eines bestimmten Trockenverfahrens beschrieben werden. Die Art des Gutes wurde hierbei entweder gar nicht oder nur nebenher mit der Absicht angeführt, auf die hauptsächlichliche oder ausschließliche Verwendung hinzuweisen, die zurzeit üblich ist. Hierbei bleibt jedoch noch eine Anzahl von Trocknerformen übrig, die ausschließlich die Eigenart eines besonderen Gutes berücksichtigen und daher im folgenden näher beschrieben sind. Diese Abgrenzung ist begreiflicherweise keine sehr scharfe. Sie wird vermutlich mit der Weiterentwicklung wirtschaftlicher Herstellungsverfahren immer mehr verschwinden und hat in der vorliegenden Behandlung daher mehr geschichtliche als rein wissenschaftliche Bedeutung insofern, als sie dem gegenwärtigen Stande der angewandten Trockentechnik Rechnung trägt. Die Trocknung hat für die Herstellung und Verarbeitung zahlreicher Stoffe ausschlaggebende Bedeutung angenommen, die ihren Ausdruck u. a. auch darin findet, daß sich zahlreiche Fachzeitschriften¹ und Handbücher über Technologie² damit beschäftigen. Es ist nicht beabsichtigt, die bisherigen Veröffentlichungen über bestimmte Anwendungsgebiete durch die nachstehenden Erörterungen auszuschalten. Für diese ist in der Hauptsache das Bestreben maßgebend, kennzeichnende Beispiele anzuführen, Lücken aufzudecken, Anregungen zu geben und, in weiterer Entwicklung, eine verwirrende Mannigfaltigkeit durch ein klareres System abzulösen.

A. Organische Stoffe.

1. Tierstoffe.

a) **Fleisch.** Um den wertvollen Eiweißgehalt des Fleisches in löslicher Form zu erhalten, ist es wünschenswert, eine Temperatur von etwa $t = 40^{\circ}$ bei der Trocknung nicht zu überschreiten. Die Trockengeschwindigkeit soll gleichzeitig möglichst groß sein, weil die Quellfähigkeit des getrockneten Erzeugnisses alsdann hoch bleibt. Aus beiden Gründen ist die Vakuumtrocknung das gegebene Verfahren, zumal hierbei die Gefahr der unerwünschten Entfärbung des Fleisches durch den Einfluß des Luftsauerstoffes vermieden wird. Die Trocknung von Fleisch in großem Maßstabe wird bisher nicht angewendet. An ihre Stelle tritt die Herstellung von Fleischkonserven und gefrorenem Fleisch. Bei Fleischkonserven gelangen Temperaturen zur Anwendung, durch die die Vitamine teilweise zerstört werden. Bei den üblichen Verfahren

¹ Papierfabrikant, Braunkohle u. a.

² Block in der Enzyklopädie der technischen Chemie u. a.

zur Herstellung von Gefrierfleisch konnten bisher Gefügeveränderungen und daraus folgende Saftverluste beim nachfolgenden Auftauen nicht vollkommen vermieden werden. Es erscheint daher möglich, mit der Herstellung von Trockenfleisch Ergebnisse zu erzielen, die denen der bisher vorliegenden Verfahren nahe kommen oder gar überlegen sind. Allerdings erfordert die Herstellung von getrocknetem Fleisch eine weitgehende Zerstückelung, kann also das Gefrierverfahren, das sich auf ganze, halbe oder viertel Tiere erstreckt, nicht ersetzen.

Der Wassergehalt des Fleisches schwankt außerordentlich; er sinkt mit zunehmendem Fettgehalt. Seine Verteilung innerhalb des tierischen Körpers ist ungleichmäßig, weil das Fettgewebe fast wasserfrei ist. Nach König beträgt der Wassergehalt je nach Fettgehalt bei

Rindfleisch	$\epsilon_r = 1,3$ bis 3,2,
Kalbfleisch	$\epsilon_r = 2,2$ „ 3,5,
Schweinefleisch	$\epsilon_r = 0,82$ „ 2,7,
Hammelfleisch	$\epsilon_r = 1,04$ „ 3,2.

Mit dem Trocknen des Fleisches geht bei den bisherigen Verfahren ein Salzen einher, das die Entziehung der Feuchtigkeit begünstigt. Wird hierbei auf weitgehende Zerteilung verzichtet und das Trocknen in freier Luft vorgenommen, so wirkt wegen der langen Trockenzeit der Luftsauerstoff in ungünstiger Weise auf die Fettbestandteile. Bei der Herstellung von Rauchfleisch kommt den Rauchgasen in der Hauptsache die Aufgabe der Erhaltung zu, nebenher läuft eine Verminderung des Wassergehaltes. In all diesen Fällen bedingt die lange Trockenzeit ein nicht vollwertiges Erzeugnis, weil ungenügende Quellfähigkeit dem nachträglich eingeweichten Fleisch die leichte Verdaulichkeit des frischen Fleisches nimmt.

Fleischreste und Knochen, die in Großschlachtereien entfallen, werden in Schaufeltrocknern zu Fleischmehl verarbeitet. Sie dienen sowohl zum Ausschmelzen des Fettes als auch anschließend zum Trocknen der Rückstände und arbeiten in der Regel unter Luftleere, einmal um hohe Temperaturen zu vermeiden, dann um die sich entwickelnden Geruchstoffe niederzuschlagen. Die Beheizung erfolgt durch Dampfmantel. Die im Innern angeordnete Schaufelvorrichtung kann als Schlagwerk ausgebildet werden, um sofort ein handelsfähiges Erzeugnis zu gewinnen.

Soll der Magen- und Darminhalt der Schlachttiere getrocknet werden, um als leichtverdauliches Beifutter für Kleinvieh zu dienen, so bildet die Temperatur von 65° die obere Grenze, weil hierbei die Verdauungsfermente vernichtet werden.

b) Blut. Trockenblut wird als Nähr-, Futter-, Düngemittel, ferner für technische Zwecke angewendet. Beispielsweise findet wasserlösliches Blutpulver als Ersatz für Kasein vielfach Benutzung zum Verleimen von Sperrhölzern. Blut besitzt im Rohzustande einen Feuchtigkeitsgehalt von $\epsilon_r \approx 4,2$. Zur Herstellung von Futter- und Düngelut wird nach Winckel¹ das von Fibrin durch Schlagen befreite frische Blut unter Zusatz von Essigsäure erhitzt und der geronnene

¹ Winckel: Die Aufbereitung und das Trocknen von Blut und Schlachthofnebenprodukten. Chemiker-Zeitung 1925.

eiweißreiche Anteil in Mulden- oder Trommeltrocknern verarbeitet. Für die Kunststoffherstellung wird das von Fibrin befreite, jedoch nicht geronnene Blut in Vakuumvorrichtungen getrocknet. Durch Behandlung des beim Stehen frischen Blutes sich abscheidenden Flüssigkeitsanteiles, des Serums, in Horden- und Kanaltrocknern wird Blutserum in kristallinen Blättchen gewonnen, während der verbleibende feste Teil, der Blutkuchen, in Mulden-, Trommel-, Walzen- oder Hordentrocknern zu Dünge- und Futtermitteln, oder in Vakuumschaufeltrocknern zu pharmazeutischen Blut-Eiweißpräparaten verarbeitet wird. Die Zerstäubungstrocknung ermöglicht die Erhaltung der natürlichen Eigenschaften des Blutes, kommt daher in Betracht, wenn das Erzeugnis besonders hochwertig sein soll. Der Zerstäubungstrockner der Zerstäubungs-Trocknungs-G. m. b. H. mit Preßpumpe und Düsenring wird für die Herstellung von Trockenblut angewendet, das zu plastischen Massen Verarbeitung findet. Die Herstellerin gibt als Dampfverbrauch 1,82 kg für 1 kg Wasserverdampfung und als Kraftbedarf für 100 kg verarbeitetes Naßgut 2,7 bis 7,2 PSe, je nach Größe der Trockenvorrichtung an.

e) **Leder.** Dies ist nach Körner¹ tierische Haut, die durch Einlagerung der Gerbstoffe größtenteils das Aufnahmevermögen für Quellwasser verloren hat, während die Aufsaugefähigkeit für Kapillarwasser verblieben ist.

Die zulässige Höchsttemperatur schwankt nach Art des Leders und Gerbverfahrens zwischen $t \approx 30$ bis 50° . Die niedrigen Temperaturen kommen für vegetabilische, die höheren für mineralische Gerbung in Betracht. Die Empfindlichkeit des Gerbstoffes verbietet Anwendung hoher Temperaturen, wenn es sich um die Herstellung heller Leder handelt.

Die Trockendauer richtet sich nach Stärke und Feuchtigkeitsgehalt. Sie beträgt bei natürlicher Trocknung schwerer Häute mehrere Tage und sinkt bei künstlicher Trocknung leichtester Felle bis auf etwa eine Stunde. Je nasser das Leder ist, um so mehr liegt bei hoher Trockengeschwindigkeit die Gefahr vor, daß die äußeren Poren sich vorzeitig schließen und die Fertigtrocknung darunter leidet. Bei Anwendung des Schnellgerbverfahrens neigt der Gerbstoff zum Vortreten an die Oberfläche und Dunkeln unter der Einwirkung des Luftsauerstoffes. Um helle Leder zu erhalten, soll daher die Trocknung langsam, also in runder oder nur schwach bewegter feucht-kalter Luft einsetzen. Aus diesem Grunde bietet Trocknen in geschlossenem Luftkreislauf Vorteile. Kalte Trocknung unter Anwendung von Höchsttemperaturen wenig über dem Gefrierpunkt schafft die besonders günstigen Verhältnisse natürlicher Winterluft-Trocknung. Ihre Anwendung scheidet in der Regel an den hohen Anschaffungs- und Betriebskosten.

Der für die Trockenvorrichtung in Betracht kommende anfängliche Feuchtigkeitsgehalt schwankt nach Art des Leders und Gerbverfahrens in den weiten Grenzen von $\chi_r \approx 1$ bis 3. Die Wasseraufnahmefähigkeit

¹ Körner: Beiträge zur Kenntnis der wissenschaftlichen Grundlagen der Gerberei. Jahresbericht der deutschen Gerberschule Freiberg.

des Leders hängt von seiner Porosität ab. Sie ist bei mineralischer Gerbung im allgemeinen höher als bei vegetabilischer. Die Feuchtigkeitsaufnahme bewirkt eine Vergrößerung des Ledervolumens um ein Zehntel bis ein Drittel. Während der Verarbeitung wird das Leder manchmal nachbefeuchtet, um seine Weichheit wiederherzustellen. Der für die folgende Trocknung in Betracht kommende Anfangsfeuchtigkeitsgehalt liegt bei $\zeta_r \approx 0,3$ bis $0,5$. Der Endfeuchtigkeitsgehalt soll etwa dem Zustand der Lufttrockenheit entsprechen. Auch dieser verändert sich je nach der Art von Leder und Gerbverfahren und kann zu etwa $\zeta_g \approx 0,15$ bis $0,25$ angenommen werden. Für die im einzelnen geltenden Werte geben die Abb. 6 bis 8 einen Anhalt. Nach diesen kann auch die Höhe des Feuchtigkeitsgehalts ζ_e , bei dem die hygrokopischen Eigenschaften einsetzen, geschätzt werden.

Das zu trocknende Leder wird nach der Gerbung durch Pressen mechanisch vorentfeuchtet.

In der Lederindustrie hat es auffallend lange gedauert, bis zeitgemäße Trockenverfahren Einführung fanden. Auch heute sind zahlreiche Betriebe, und nicht die unbedeutendsten, vorhanden, in denen als Trockenvorrichtung Räume bezeichnet werden, die diesen Namen keineswegs rechtfertigen. Hiervon abgesehen erfolgt die Ledertrocknung:

1. als natürliche Lufttrocknung in offenen Böden, unter Regelung des äußeren Luftzutrittes durch allseitige Lattenvorhänge,
2. in Trockenräumen mit vorgewärmter Luft,
3. in Trockenkammern mit reiner Innenheizung,
4. in Trockenräumen mit verbundener Vorwärmung und Innenheizung,
5. in Trockenkanälen.

Die natürliche Lufttrocknung wurde hauptsächlich für lohgares Schleder beibehalten. Bei der Kammertrocknung ergeben sich häufig Tiefenmaße in Richtung der Luftströmung, bei denen eine gleichmäßige Verteilung der Trockenwirkung in Frage gestellt ist. Trockenkanäle kommen für gleich schwere und gleichartige Felle in Betracht. Bei der Trocknung wird das Leder entweder über Stangen geschlagen oder an den Enden aufgehängt oder, zur Vermeidung des Schrumpfens, auf hölzerne Spannrahmen genagelt. An den gegen die Unterlage fest anliegenden Lederteilen läßt sich hierbei eine Verzögerung der Trocknung nicht vermeiden. Zweckmäßigerweise werden daher die Felle durch Klammern gespannt, die mit einer Nase in die siebartige Spannfläche eingreifen und so geformt sind, daß das Fell an keiner Stelle an der Unterlage aufliegt. Der Kammertrockner Abb. 231 (Proctor) besitzt die Eigentümlichkeit, daß die senkrecht stehenden, luftdicht aneinander gereihten Spannrahmen mit ihrem äußeren Rand die Kammerwände bilden. Der anschließende Bedienungsraum steht infolgedessen außerhalb des Einflusses der Trockenluft, was das jederzeitige Eingreifen und die unterschiedliche Behandlung der einzelnen Felle begünstigt. Die Handhabung ist dadurch vereinfacht, daß die an hochliegenden Schienen ausfahrbaren Rahmen in mittlerer Höhe drehbar gelagert sind und das Aufbringen der Felle durch einfaches Herumschwenken

um 90° nach dieser und jener Richtung vorgenommen wird. Durch zahlreiche, in der Kammermitte auf gemeinsamer Welle sitzende Schraubenlüfter wird die Luft parallel zu der Fläche des Felles bewegt. Abb. 211 stellt einen zur Lederverarbeitung dienenden Kammertrockner, Abb. 157 einen zu Anfang im Gleichstrom, danach im Gegenstrom arbeitenden Kanaltrockner dar. Das Antrocknen des nachbefeuchteten Leders wird häufig im Arbeitsraum selbst vorgenommen, um unnötige Wege zu sparen. Aufhängen an der Decke scheint sehr einfach, ergibt aber ungleichmäßige Wirkung. Richtig ist es, hierfür einen Trockenkanal zu schaffen und das Leder durch ihn von der Befeuchtungsstelle zum folgenden Arbeitsplatz wandern zu lassen.

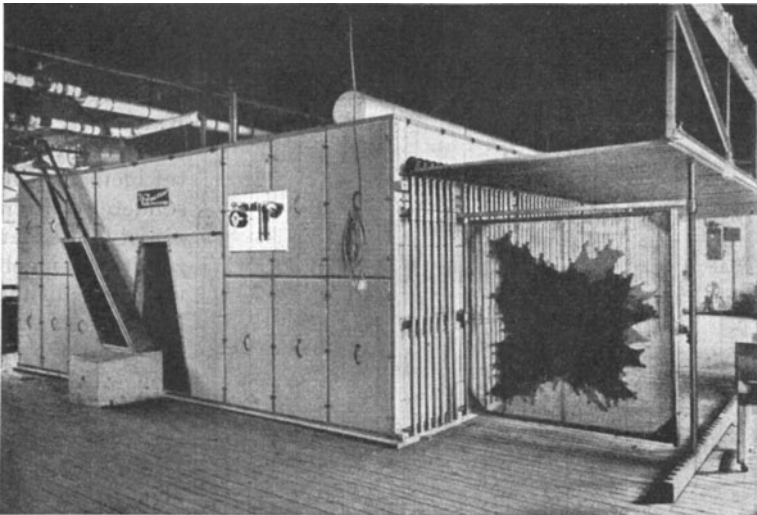
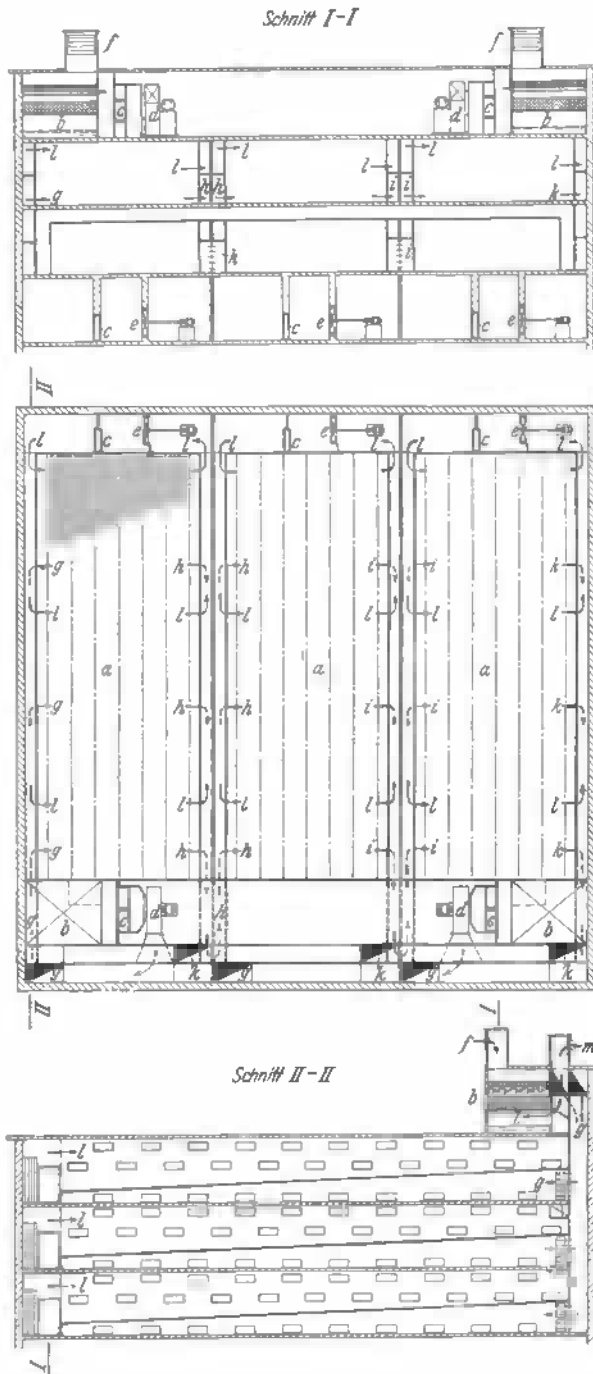


Abb. 231. Kammertrockner für gespannte Felle (Proctor).

Eine Trockenanlage von ungewöhnlichem Ausmaß für die Behandlung empfindlichen vegetabilisch gegerbten Leders unter Anwendung geschlossenen Luftkreislaufs ist nach dem Entwurf des Verfassers bei den Lederwerken Joh. Knecht & Söhne mit Erfolg zur Ausführung gelangt. Nach Abb. 232 befinden sich in drei übereinanderliegenden Stockwerken je drei Trockenkammern, die im Luftkreislauf hintereinandergeschaltet sind. Zur Entfeuchtung dienen zwei Wetterfertiger. Von den drei nebeneinanderliegenden Kammern ist stets eine mit nassen Fellen gefüllt und in der Antrocknung begriffen; in der zweiten vollzieht sich die Hauptrocknung, in der dritten die Fertigtrocknung. Die aus den Wetterfertigern entfeuchtet und gekühlt abgesaugte Luft wird der Fertigtrockenkammer zugeführt. Von hier aus wandert sie nacheinander zur Haupt- und Vortrockenkammer. Ein Hilfskreislauf erfolgt durch Einzellüfter, die zu jeder Kammer gehören und auf je einen Lufterhitzer arbeiten. Das Verfahren besitzt hiernach die Kennzeichen der Gegen-



stromtrocknung mit stufenweiser Erwärmung und ermöglicht tatsächlich eine Ausnutzung der Trockenluft bis zur Sättigung. Die Einzelluftrohre werden in ihrer Heizwirkung abgestuft. In den ersten Stunden arbeitet die Vortrockenkammer ohne Anwärmung und parallel mit den beiden anderen Kammern, die hintereinandergeschaltet bleiben. Ein besonderer Lufterhitzer ist in die Hauptzuleitung eingebaut und ermöglicht eine leichte Vorwärmung der gesamten Luftmenge. Eine derartige Anlage gestattet, die Trocknung jahraus jahrein mit gleicher Höchsttemperatur durchzuführen. Dies liegt niedriger als die äußere Lufttemperatur im Hochsommer. Das Verfahren ist daher in bezug auf scho-

Abb. 232. Trockenanlage für vegetabilisch gegerbtes Leder mit geschlossenem Luftkreislauf.
 a Trockenkammer, b Wetterfertiger, c Lufterhitzer, d Schieberlüfter, e Schraubenlüfter, f Frischluft, g Zuluft, h Luft von Vortrockenkammer zur Haupttrockenkammer, i Luft von Haupttrockenkammer zur Fertig-trockenkammer, k Luft von Fertig-trockenkammer, l Umluft, m Abluft.

nende Behandlung des Leders der natürlichen Trocknung nicht nur ebenbürtig, sondern sogar überlegen. Durchführbar wird es nur unter der Voraussetzung, daß genügend große Kühlwassermengen verfügbar sind. Der große Wasserverbrauch der Gerberei für andere Zwecke wird daher zweckmäßigerweise nicht unabhängig für sich, sondern aus dem Abwasser der Wetterfertiger bestritten. Diese fallen dann mit dem Hauptwassersammelbehälter zusammen (D. R. P. 490924). Die leichte Erwärmung des Wassers im Wetterfertiger ist für die Zwecke der Gerberei erwünscht. In ihr kommt der Wärmeverbrauch für die Luft-erhitzung fast restlos zum Vorschein. Das aber bedeutet, daß der für die Trocknung aufgewandte Wärmeverbrauch nicht als Verlust zu betrachten ist, sondern eine im Grenzfalle gleiche Ersparnis im übrigen Wärmeverbrauch der Gerberei bringt.

Lackierte Leder werden in Kammern bei einer Temperatur getrocknet, die mit etwa 30° einsetzt und allmählich bis auf etwa 50° gesteigert wird. Wegen der Vorschrift vollkommener Staubfreiheit der Luft wird auf künstlichen Luftumlauf meist verzichtet und reine Innenheizung angewandt.

Werden Felle durch Benzol oder andere Lösungsmittel entfettet, so erfolgt anschließend Austreibung des Lösungsmittels in Vorrichtungen, die mit einer Rückgewinnungsanlage für die Lösungsmittel verbunden sind. Die Regel bildet geschlossene Ausbildung und Arbeiten unter Luftleere.

Bei der Bearbeitung des ledernen Schuhwerks werden die Rohstoffe zur Verbesserung ihrer Bildsamkeit mehrmals befeuchtet und anschließend getrocknet. Hierzu dienen behelfsmäßig die Arbeitsräume, neuerdings jedoch immer mehr Kanaltrockner, die an zwei oder mehr Stellen in das fließende Arbeitsverfahren eingeschaltet werden. Abb. 149 zeigt eine Ausführung, bei der die Luft in geschlossenem Kreislauf arbeitet.

d) Leim. Die zulässige Höchsttemperatur liegt bei $t \approx 30^\circ$, eine Unterschreitung dieser Grenze ist zweckmäßig. Der geschlossene Kreislauf der Trockenluft bietet auch hier besondere Vorteile.

Beim Leim liegt die Gefahr des Umschlagens durch den Einfluß von Kleinlebewesen vor. Abkürzung der Trockenzeit ist daher erwünscht. Sie bewegt sich bei der üblichen Trocknung in Tafeln in den Grenzen von 3 bis 5 Wochen. Die Herstellung von Leim in Perlenform nach dem Verfahren der A. G. für chemische Produkte vorm. H. Scheidemandel, Berlin, ermöglicht eine Herabsetzung der Trockenzeit auf 8 bis 10 Stunden. Auf etwa 30 Sek. wird sie verringert, wenn die Trocknung auf Tauchtrommeln erfolgt. Der Anfangsfeuchtigkeitsgehalt bewegt sich zwischen $\zeta_r \approx 2$ bis 6. Der Endfeuchtigkeitsgehalt soll 0,2 keinesfalls überschreiten. Er schwankt bei besseren Sorten (Haut-Tafelleim) zwischen 0,16 und 0,2, bei minderwertigen Sorten (Knochen-Tafelleim) zwischen 0,14 und 0,16.

Für die Herstellung von Leim in Tafeln, die aus eingedickten Brühen gegossen werden, dienen Trockenkanäle. Die erwärmte Luft tritt am einen Ende mit den in Horden auf Gleiswagen ruhenden Tafeln ein und etwa in der Mitte des Kanales aus. Gleichzeitig wird Frischluft

vom entgegengesetzten Ende her nach der Mitte gesaugt. Hierdurch ergibt sich anschließend an die Haupttrocknung eine Abkühlung des Gutes unter gleichzeitiger Fertigrocknung.

In feinkörniger Form wird Leim durch Trocknung der Leimbrühen auf Vakuumtauchtrommeln in leicht löslicher Form gewonnen.

e) **Gelatine.** Für Trockentemperatur, Trockenzeit und Endfeuchtigkeitsgehalt gelten die für die Trocknung von Leim maßgebenden Gesichtspunkte. Der Anfangsfeuchtigkeitsgehalt von $\chi \approx 20$ wird durch Eindampfen auf $\chi_r \approx 4$ bis 7 herabgesetzt. Neben den für die Leimtrocknung angewandten Verfahren kommt hier die Behandlung in Zerstäubungstrocknern in Betracht.

Dem niedrigen Schmelzpunkt von Gelatine Rechnung tragend, wird in den Vereinigten Staaten das Verfahren der kalten Trocknung ausgiebig angewandt, da sonst bei heißer Sommertemperatur eine zuverlässige Trocknung überhaupt unmöglich ist. Die Luft wird hierbei auf 5 bis 8° abgekühlt, dementsprechend entfeuchtet und anschließend auf 25 bis 30° erwärmt.

f) **Trockenplatten und Filme.** Die Höchsttemperatur der Trockenluft wird durch den bei $t \approx 30$ bis 40° liegenden niedrigen Schmelzpunkt der Emulsion eng begrenzt. Die Trockendauer darf einerseits, wegen der Gefahr einer Zersetzung bei hohen Temperaturen, nicht zu lang, andererseits nicht zu kurz sein, um Formänderungen der Emulsionsschicht zu verhüten. 2 bis 3 Stunden stellen einen bewährten Mittelwert dar.

Die Forderung vollkommener Staubfreiheit macht Filterung der Luft nötig. Dieser Umstand und die tiefe Trockentemperatur lassen das geschlossene Verfahren, unter Entfeuchtung der rückgesaugten Luft, besonders geeignet erscheinen.

Der Feuchtigkeitsgehalt der Emulsion beträgt $\chi_r \approx 4$. Er soll während der Trocknung mindestens auf den Grad der Lufttrockenheit vermindert werden, dem ein Wert $\chi_h \approx 0,15$ entsprechen dürfte.

Bei der Herstellung von Trockenplatten schließt sich an die Aufbringung des aus Chromgelatinelösung bestehenden Untergusses eine oberflächliche Trocknung der unbedeckten Glasseite durch Warmluft an. Sie erfolgt im allgemeinen in einem Kanal, der in zweckmäßiger Weise in den Arbeitsgang eingeschaltet wird. Nach Aufbringung der Emulsion folgt die Haupttrocknung, die sich vor allem auf die bedeckte Glasseite erstreckt und bis jetzt fast ausnahmslos in Trockenkammern erfolgt.

Die Bedingung, die Trocknung in den allgemeinen Arbeitsgang einzuschalten, läßt für die Filmtrocknung die Durchführung des Filmbandes durch den Trockenluftstrom, unter gleichzeitiger Beförderung von der Gieß- zur Abnahmestelle, als zweckmäßig erscheinen. Bei größeren Anlagen erfolgt die Filmtrocknung in Hängevorrichtungen. Da hierbei, ähnlich wie bei der Papiertrocknung, die Abführung des Dunstes nicht ohne weiteres gesichert ist, empfiehlt sich nach dem Verfahren Grewin Führung des Trockenluftstromes in waagerechter Richtung. Das in Abb. 233 wiedergegebene geschlossene Verfahren für die

Trocknung von Filmen arbeitet mit einem Wetterfertiger, der, neben der Entfeuchtung, die Reinigung der Luft besorgt. Seine Anwendung kommt nur dann in Betracht, wenn genügende Mengen kalten Wassers zur Verfügung stehen. Wegen der außerordentlichen Empfindlichkeit von Filmen gegen feinste Staubteilchen sind für die Fortleitung der Luft ungewöhnliche Maßnahmen am Platze, z. B. Ausführung der Luftkanäle und Lufterhitzer aus Kupfer, abwaschbarer Anstrich der inneren Umfassung des Trockenraumes. Aus dem gleichen Grunde soll der Lüfter stets vor dem Wetterfertiger angeordnet werden. Die in der Zeichnung angedeutete Ausgleichzone dient zur Aufhebung der Spannungen, die das unvermeidliche Voreilen der Ränder im Trocknen mit sich bringt. Außerdem findet hier die innere Feuchtigkeit Zeit, nach der stärker getrockneten Oberfläche zu diffundieren, um von hier aus bei der anschließenden Trocknung so weit entfernt zu werden, daß kein Kleben des aufgerollten Films stattfindet.

Das Trocknen der entwickelten Filme erfolgt entweder auf dem Entwicklungsrahmen in Kanaltrocknern oder nach Aufwickeln auf Holzzylindern in Trockenkammern. Im letzten Falle wird das Haftwasser dadurch größtenteils entfernt, daß der Film beim Aufwickeln durch feuchtes Gensleder läuft. An das eigentliche Trocknen schließt sich auch hier zweckmäßig eine Nachbehandlung an, bei der ein Ausgleich der verschieden starken Trockenwirkung unter gleichzeitiger Abkühlung des Filmes stattfindet.

g) **Milch.** Die Trocknung der Milch erstreckt sich sowohl auf Voll-

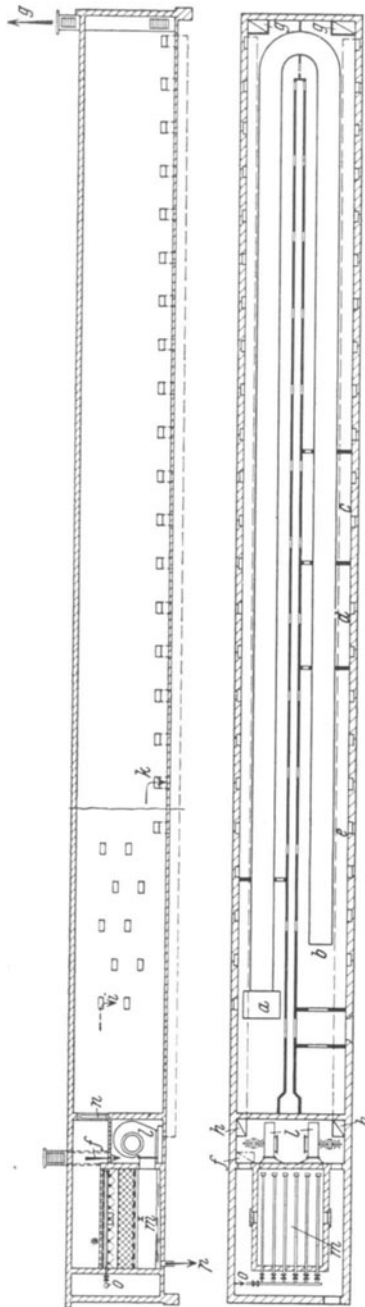


Abb. 233. Trockenanlage für Filme mit geschlossenem Luftkreislauf.

a Gießmaschine (Einlauf), b Rolle (Auslauf), c Befeuchtungszone, d Nachtrockenzone, e Ausgleichzone, f Frischluft, g Abluft, h Umluft, i Zuluft, k Luftaustritt, l Lüfter, m Wetterfertiger, n Lufterhitzer, o Wassereintritt, p Wasseraustritt.

milch als auch auf deren Bestandteile: Magermilch, Kasein und Milchsucker.

Die zulässige Höchsttemperatur ergibt sich mit $t \approx 40$ bis 45° aus der Überlegung, daß unterhalb dieser Grenze das Gerinnen von Eiweiß ausgeschlossen ist, das so gewonnene Milchpulver daher in Wasser löslich bleibt. Bei Kasein verringert eine Temperatur $t > 35$ bis 40° die nachträgliche Aufnahmefähigkeit für Füllstoffe und macht das Erzeugnis für die Kunststoffherstellung weniger geeignet.

Je kürzer die Trockenzeit ist, um so hochwertiger ist das gewonnene Erzeugnis. Es handelt sich auf alle Fälle stets um Sekunden — bei Vakuumentrockentrommeln etwa 8 Sekunden — oder — bei der Zerstäubungstrocknung — um Bruchteile hiervon.

Da der Luftsauerstoff auf die Fettbestandteile oxydierend wirkt, soll sein Einfluß vermindert werden. Dies geschieht durch Ausnutzung der zulässigen Temperaturen bis zur Grenze, in Ausnahmefällen Trocknen unter Luftleere.

Der Wassergehalt der Rohmilch beträgt $x_r \approx 7$. Der Feuchtigkeitsgehalt der Milchbestandteile weicht von dieser Zahl erheblich ab und beträgt z. B. bei Kasein $x_k \approx 1,2$. Der Endfeuchtigkeitsgehalt schwankt zwischen $x_{\bar{y}} \approx 0,1$ bis $0,05$. Soll Milch in Pulverform gewonnen werden, so darf er den Wert $0,05$ nicht überschreiten. Wichtig ist die Forderung, daß die getrocknete Milch, mit Wasser gemischt, eine milchgleiche Emulsion ergibt. Sie gilt vor allem für Vollmilch, die als Beigabe zu Kindermehl oder als Frischmilch bestimmt ist, und für Magermilch, die zum Backen dient, dagegen weniger für Vollmilch, die in Schokoladefabriken verarbeitet wird. Zu diesem Zwecke muß die ursprüngliche Form erhalten bleiben, bei der das Butterfett in kleinsten Teilchen mit einer dünnen Eiweißschicht bedeckt ist. Bei Walzentrocknern bleibt nach Knoch¹ die Löslichkeit bis 80% , bei Zerstäubungstrocknern fast restlos erhalten, wenn das gewonnene Pulver gegen Feuchtigkeitsaufnahme aus der Luft durch dichte Hüllen und gegen Zersetzung durch Kaltlagerung geschützt wird.

Als Trockenvorrichtung kommen vor allem Zerstäubungstrockner, daneben Walzentrockner in Betracht. Die letzteren arbeiten in der Regel nach Abb. 234 (Vakuumentrockner) mit Vakuumentrockentrommeln. Bei Zerstäubungstrocknung sind wegen der außergewöhnlich kurzen Trockenzeit für die Trockenluft hohe Temperaturen zulässig, die bei längerer Einwirkung das Erzeugnis schädigen würden. Hieraus ergibt sich die Möglichkeit, die Trockenluftmenge zu verringern. Läßt sich, wie bei dem Zerstäubungsverfahren, ein verhältnismäßig hoher spezifischer Wärmeverbrauch nicht vermeiden, so ist das vorherige Eindicken der Milch unter Luftleere das gegebene Verfahren, um die Wirtschaftlichkeit zu sichern. Bei dem Zerstäubungsverfahren nach Gray-Jensen wird die Milch auf 77° erwärmt, in einem von der austretenden Trockenluft durchströmten Behälter zerstäubt und dabei eingedickt. Gleichzeitig kühlt sich die Luft von etwa 70 auf etwa 50° ab. Danach

¹ Knoch: Das Trocknen kolloidaler Flüssigkeiten, insbesondere der Milch. 1927.

wird die Milch neuerlich auf 74° erwärmt und in der Trockenkammer vernebelt. Die durch einen Luftvorwärmer auf etwa 125° erhitze Luft durchwirbelt den eigentlichen Trockner, die am Mantel abgestreifte pulverförmige Trockenmilch wird am Boden abgesaugt, gesiebt und in die Versandbehälter gefüllt.

Die Trocknung von Kasein geschieht noch vielfach auf natürlichem Wege durch Horden, die in Schränken, Kanälen oder auch im Freien von Frischluft bestrichen werden. Daneben gelangen Vakuumtrockenschränke und Zerstäubungstrockner zur Anwendung.

Die aus der Molke abgeschiedenen Albumosen werden auf Walzentrocknern oder auf Horden in Vakuumschränken getrocknet. Das aus

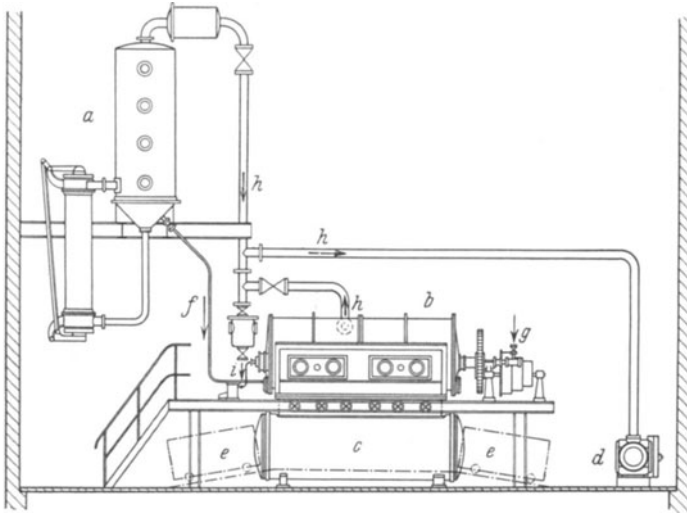


Abb. 234. Milchtrockenanlage (Vacuumtrockner).

a Verdampfer, *b* Vakuum-Tauchtrommel, *e* Ausfüllkasten, *d* Vakuumpumpe, *e* Aufnahmewagen, *f* Einlauf, *g* Heizdampf, *h* Brüden, *i* Niederschlagwasser.

der Molke entfallende Milchserum wird zunächst auf einen Feuchtigkeitsgehalt $\chi \approx 3,3$ bis 5 eingedickt und danach unter Luftleere oder nach dem Zerstäubungsverfahren zu Rohmilchzucker verarbeitet. Das gleiche Verfahren kommt für die Herstellung von Fleischextraktersatz aus Magermilch in Frage.

h) Eier. Die Eiertrocknung spielt in China wegen des großen Eierüberschusses eine besondere Rolle, weil die dadurch erreichte Gewichtsverminderung und Haltbarkeit die Versorgung des europäischen und amerikanischen Marktes in ähnlichem Maße erleichtert, wie dies mit künstlich gekühlten oder ausgeschlagenen und danach eingefrorenen Eiern möglich ist. Getrocknet wird entweder Vollei oder Eiweiß und Eigelb getrennt. Die durch Eintauchen in eine 6 bis 8%ige NaCl-Lösung oder vermittels Durchleuchtens gesichteten Eier werden von Hand aufgeschlagen und, soweit nicht das Vollei getrocknet werden soll, in Eiweiß und Eigelb getrennt, danach zur Entfernung der Eifäden ge-

siebt. Das für die Herstellung von Albumin bestimmte Eiweiß gärt vor der Trocknung mehrere Tage in Bottichen.

Bezüglich Höchsttemperatur, Trockengeschwindigkeit und Trockenverfahren gelten ähnliche Gesichtspunkte wie bei der Herstellung von Trockenmilch.

Der natürliche Wassergehalt ist in den einzelnen Bestandteilen des Eies verschieden und beträgt beim Eiweiß $x_t \approx 6$, beim Eigelb $x_t \approx 0,6$. Ein Durchschnittsei mit einem Gesamtgewicht von 61 g setzt sich aus etwa 31 g Eiweiß-, 22 g Eigelb- und 8 g Schalengewicht zusammen.

Die Trocknung geschieht für Vollei und Eigelb durch Vakuumtauchtrommeln und Zerstäubungstrockner. Das vergorene Eiweiß wird auf Blechschalen in Trockenkammern, unter möglicher Beschränkung der Trockenluftmenge, während etwa zweier Tage zu Albumin-Kristallblättchen verarbeitet.

i) **Fische.** Für die obere Begrenzung der Trockentemperatur sind bei der Fischtrocknung dieselben Gesichtspunkte maßgebend wie bei der Fleischtrocknung. Bei Trockenfisch, der für menschliche Ernährung bestimmt ist, handelt es sich vor allem um Erhaltung der Eiweißstoffe in der natürlichen Form. Bei der Kammertrocknung, die eine Trockenzeit von etwa drei Tagen bedingt, ist in dieser Richtung das Mögliche noch keinesfalls erreicht, ebensowenig bei der natürlichen Trocknung. Um die Quellfähigkeit zu erhalten und bei dem nachträglichen Einweichen leicht verdauliche Ware zu erhalten, ist es günstig, die Trockenzeit so weit wie möglich abzukürzen. Der Wassergehalt der Fische schwankt, je nach dem Fettgehalt, zwischen $x_t \approx 3,5$ bei Weißfischen und $x_t \approx 1,6$ bei Aalen. Er soll durch die künstliche Trocknung, um den Verderb zu vermeiden, auf etwa $x_h \approx 0,12$ vermindert werden.

Die Herstellung von getrockneten Klippfischen erfolgt in überwiegender Maße durch natürliche Lufttrocknung, wobei die Trockendauer oft Monate beträgt. Zur Ausnahme gehört die Anwendung von Trockenkammern oder Trockenkanälen.

Handelt es sich um die Verarbeitung von für die menschliche Ernährung nicht tauglichen Fischen und Fischabfällen zu Futter- und Düngemitteln, so wird die zu Brei zerquetschte oder zerrissene Ware nach dem Verfahren von Paßburg zunächst auf Walzentrocknern unter Luftleere auf einen Zwischenfeuchtigkeitsgehalt von $x \approx 0,33$ vorgetrocknet und danach in Vakuumschaufeltrocknern in die Form von Fischmehl gebracht. Anwendung der Luftleere sichert ein hochwertiges Erzeugnis. Wird darauf zum Zwecke der Verbilligung verzichtet, so ist Ummantelung der Trockenvorrichtung erforderlich, um die Ausbreitung des entstehenden widerlichen Geruches zu vermeiden und den von der Trockenluft mitgerissenen Staub zu erfassen. Eine derartige Paßburg-Vakuumtrockenanlage ist in Abb. 235 (Vakuumtrockner) dargestellt. Das Gut wird in einem Kessel gedämpft, durch Walzen und Mühlen zerkleinert und der Brei durch eine Kolbenpresse der Vakuumdoppeltrommel ununterbrochen zugeführt. Das vorgetrocknete Gut fällt dem Schaufeltrockner zu und wird diesem als feines Pulver entnommen. Die entweichenden Brüden durchlaufen Staub-

fänger und treten danach in die Kondensation. Für bescheidenere Ansprüche kommt die Fischmehlbereitung unter Anwendung von Trockentrommeln in Frage. Hierbei ist es nach Eisener¹ zweckmäßig, aus der ersten Hälfte des Trockners den Zelleneinbau wegzulassen, um bis zum Eintritt in das Zellengehäuse eine für den gleichmäßigen Durchgang hinreichende Zerkleinerung zu erreichen.

k) Seife. Für die Trocknung von Seife können Temperaturen bis $t \approx 60^\circ$ angewandt werden. Die Trockendauer der Grundseife schwankt, je nach dem Verfahren, zwischen etwa $\frac{1}{2}$ Stunde bei Bandtrocknung, und 8 Sekunden bei Walzentrocknung. Flüssige Seife enthält Feuchtigkeit entsprechend $x_r \approx 0,5$ bis $0,7$. Der Endfeuchtigkeitsgehalt ist abhängig von der Hochwertigkeit des Erzeugnisses. Er schwankt zwischen $x_g \approx 0,25$ bis $0,1$.

Die Trocknung erfolgt unter Verwendung von Bandtrocknern oder

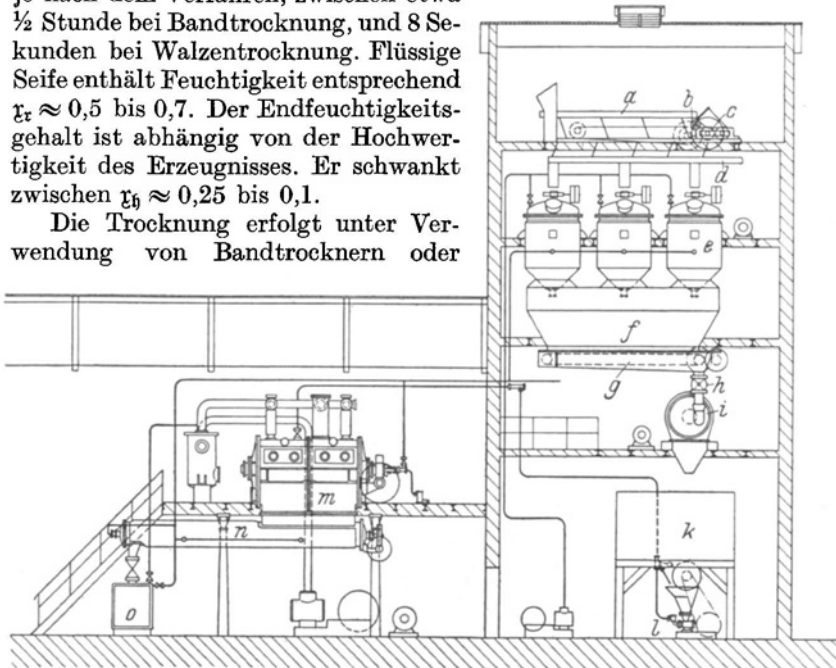


Abb. 235. Trockenanlage für Fischabfälle (Vacuumtrockner).

a Ausleserinne, *b* Magnettrommel, *c* Brechwalzwerk, *d* Verteilrinne, *e* Dämpfkessel, *f* Zwischen-
aufnehmer, *g* Schaberförderer, *h* Speisevorrichtung, *i* Mühle, *k* Behälter, *l* Kolbenpresse, *m* Vakuum-
Doppeltrommel, *n* Schaufeltrockner, *o* Ausfüllkasten.

dampfbeheizten Walzentrocknern. Im ersten Falle wird die heißflüssige Seife einem Kühlwalzenwerk zugeleitet, das seinen Platz am besten nach Abb. 162 über dem Trockner findet, wenn genügend Raumhöhe zur Verfügung steht. Das Walzwerk zerteilt die erstarrte Seife in Schnitzel. Bei beschränkter Raumhöhe steht das Walzwerk nach Abb. 236 (Proctor) zu ebener Erde. Die Schnitzel werden durch ein Hebwerk auf den Trockner gefördert. Dieser besteht aus mehreren übereinander angeordneten, endlosen Siebbändern. Deren Bauweise nach Abb. 236 ist insofern beachtenswert, als einzelne durch Kettenglieder verbundene Hordentafeln mit Seitenrändern verwendet werden, um die bei einem biegsamen Band auftretende mechanische Beanspruchung zu vermeiden.

¹ Eisener: Fischtrocknung. Die Trocknungs-Industrie 1925.

Die Lüfter sind auf beiden Längsseiten angeordnet, je zwei gegenüberliegende auf gemeinsamer Welle mit Lagerung außerhalb des Trockners. Die Heizvorrichtungen liegen seitlich unterhalb der Lüfter, so daß keine Abfälle auf die heißen Flächen fallen können. Die Luft läuft quer durch die Hordenbänder von unten nach oben und kehrt durch die seit-

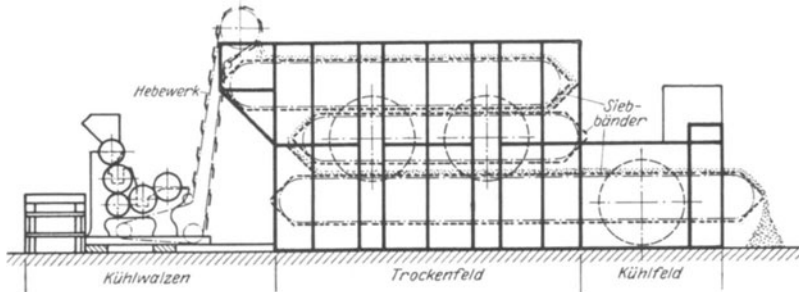


Abb. 236. Trockner für Seifenschnitzel (Proctor).

lichen Heizkammern zurück. Bei anderen Ausführungen werden die Bänder durch Führungsrollen gestützt und diese zwangsläufig angetrieben, um ein Verziehen der Bänder zu verhüten (Rost), oder es werden beide Läufe der Bänder zur Trocknung ausgenutzt, wobei die Schnitzel vom oberen Lauf auf den unteren entladen werden, Abb. 237 (Lehmann).

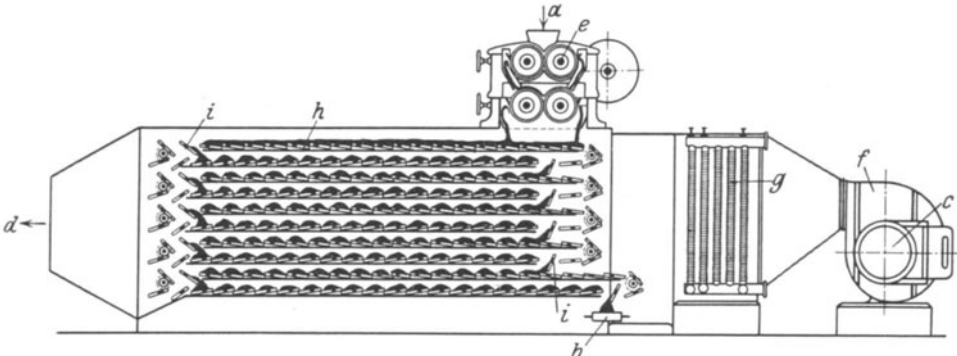


Abb. 237. Trockner für Seifenschnitzel (Lehmann).

a Einlauf, *b* Austragevorrichtung, *c* Frischluft, *d* Abluft, *e* Kühlwalzwerk, *f* Lüfter, *g* Lufterhitzer, *h* Förderband, *i* Abwurf.

Bei Walzentrocknern wird entweder die flüssige Seife unmittelbar aufgetragen oder die zuvor zu Platten oder Spänen geformte Seife zunächst geschmolzen, mit beginnender Trocknung zum Erstarren gebracht und in Schuppenform durch Abstreifer losgelöst. Durch Steigerung der Trockenleistung läßt es sich ermöglichen, den Wassergehalt so weit zu entfernen, daß ein pulverförmiges Erzeugnis gewonnen wird.

An die Trocknung schließt in beiden Ausführungsformen eine Kühlung, um Verluste durch Wärmestauung zu vermeiden. Bei Kanaltrocknern kann sie nach Abb. 236 dadurch erfolgen, daß das unterste Hordenband vorgezogen und als Kühlfeld ausgebildet wird. Bei Walzen-

trocknern wird nach Abb. 238 (T.A.G.) neuerdings ein gekühltes Walzenpaar hinter die Trockenwalze geschaltet, auf dem die Seife erhärtet. Das unmittelbare Aufleiten der aus dem Sud kommenden heißflüssigen Seife erklärt den niedrigen Dampfverbrauch, den die Herstellerin mit 1,15 kg für 1 kg Wasserverdampfung angibt.

Für das Antrocknen von Stückseife werden Kammertrockner, bei großen Leistungen Kanaltrockner angewandt, die nach dem Gegenstrom-Mehrstufenverfahren arbeiten. Die Luft erfährt eine Temperatursteigerung gegen das Einbringende zu, um die Oberfläche der Seifenstücke für das nachfolgende Pressen und Packen absichtlich äußerlich zu verkrusten. Das Ausbringende ist als Kühlfeld ausgebildet.

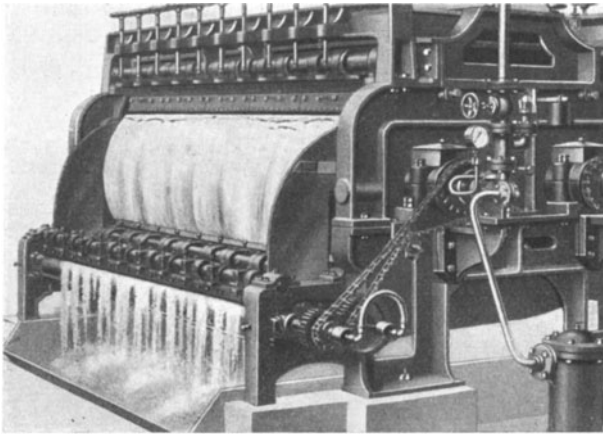


Abb. 238. Seife-Walzentrockner (T. A. G.).

Bei der Erzeugung von Seifenpulver im Sprühtrockenverfahren entfällt das umständliche Auskühlen auf Böden und nachträgliche Verarbeiten. Die flüssige Masse wird hierbei nach Abb. 239 (Simon) durch Düsen zerstäubt, weiches, dünnes und trockenes Pulver gewonnen und in einem Zyklon von der Abluft getrennt.

1) **Haare und Wolle.** Die Höchsttemperatur, bei der durch Zersetzung des Säuregehaltes die Gefahr des Spröde- und Stumpfwerdens auftritt, liegt bei Wolle zwischen $t \approx 30$ und 40° , bei Haaren höher bis 60° . Wolle und Haare entfallen bei der Gerbung, werden durch Schleudern zunächst mechanisch entfeuchtet und besitzen danach einen Feuchtigkeitsgehalt $x_r \approx 0,43$ bis $0,67$. Sie werden für mittlere Leistung auf Hordentrocknern verarbeitet, deren Ausführung etwa nach Abb. 240 (Schilder) mit Stufenheizung erfolgt. Die an dem Heizkörper *a* vorgewärmte Luft strömt über die zur Entleerung kommende Horde *b*, erfährt bei *c* eine Nachwärmung und läuft im Gleichstrom mit dem zuletzt eingebrachten Gut. Hieran schließt sich bei *d* eine nochmalige Erwärmung der Luft, die sich im Gegenstrom zu dem in der Trocknung fortgeschrittenen Gut weiterbewegt und schließlich durch den Lüfter

abgeht. Die Schichthöhe beträgt 0,2 bis 0,3 m, der Endfeuchtigkeitsgehalt bewegt sich um $x_h \approx 0,17$. Um eine für die Wärmeübertragung günstige, nicht zu niedrige Luftgeschwindigkeit einhalten zu können, gelangen zuweilen Abdecksiebe zur Anwendung. Große Leistungen werden durch Bandtrockner bewältigt. Die Wolle wandert auf Drahtgeflecht durch den Kanal, die Luft wird von oben her durch das Gut geblasen. Anwendung zahlreicher Lüfter und stufenweise Erwärmung bildet die Regel.

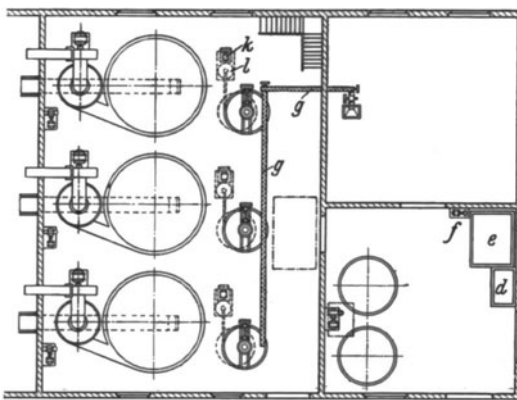
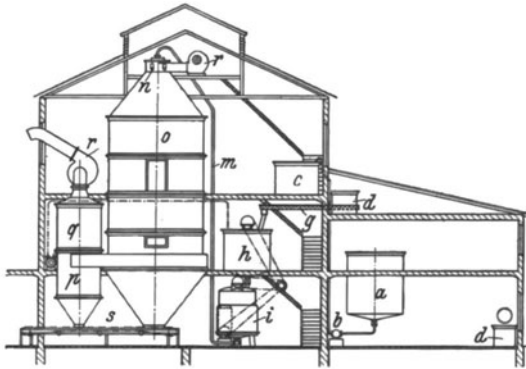


Abb. 239. Trockenanlage für Seifenpulver (Simon).
a Siedekessel, *b* Seifenpumpe, *c* Seifenbehälter, *d* Laugenbehälter, *e* Ölbehälter, *f* Ölpumpe, *g* Sodaschnecke, *h* Mischkessel, *i* Druckkessel, *k* Kompressor, *l* Preßluftbehälter, *m* Zubringleitung, *n* Zerstäubungsdüse, *o* Trockenturm, *p* Zyklon, *q* Naßfilter, *r* Lüfter, *s* Förderband.

tigkeitsgehalt $x_h \approx 0,18$, bei einem Feuchtigkeitsgrad $\varphi_h \approx 0,41$ der mit 47° abgehenden Luft; ein andermal, mit Umluft arbeitend, bei Beschickung mit 240 kg Wolle von einem Feuchtigkeitsgehalt $x_r \approx 0,7$ die gleiche Verdunstung von 91 kg, entsprechend einem Endfeuchtigkeitsgehalt von weniger als $x_h \approx 0,06$, bei Abluft von 38° und einem Endfeuchtigkeitsgrad $\varphi_h \approx 0,41$. Bei dem untersuchten Kastentrockner strömte die Abluft mit 59° und einem Feuchtigkeitsgrad $\varphi_h \approx 0,24$ ab.

¹ Eberle: Wärmewirtschaft in der Textilindustrie. Z. V. d. I. 1923.

Eberle¹ berichtet über Versuche an Woll- und Tuchtrockenvorrichtungen, wobei für die Wolltrocknung an einem dreilagigen Bandtrockner der Dampfverbrauch etwa 3,33, bei einem einstufigen Kastentrockner mit übereinander angeordneten Horden etwa 7,64 kg für 1 kg Wasserverdunstung betrug. Bei dem untersuchten Bandtrockner ist das kaum befriedigende Ergebnis durch Ausstrahlungsverluste und ungünstige Ausnutzung der Luft erklärlich, die mit einem Feuchtigkeitsgrad von $\varphi_h \approx 0,14$ abging. Zwei von Eberle beschriebene Versuche an der gleichen Vorrichtung ergaben einmal bei reiner Luftvorwärmung und Beschickung mit 314 kg Wolle von $x_r = 0,67$ Feuchtigkeitsgehalt eine Wasserverdunstung von 91 kg, entsprechend einem Endfeuchtigkeits-

Nach diesen Versuchen läßt sich eine Verbesserung durch Vermehrung der übereinander angeordneten Hordenschichten erwarten. Das Arbeiten mit Umluft ermöglicht, eine Trocknung unter den erwünschten Endfeuchtigkeitsgehalt zu vermeiden.

Eine Trockenvorrichtung für die Behandlung gewaschenen Kopfhaares stellt die unter dem Namen Fön verbreitete Verbindung eines Lüfters mit einer elektrischen Heizvorrichtung dar. Es ist auffallend, daß sich mit ihm die Trockentechnik bisher kaum befaßt hat, obwohl es sich dabei doch um die Erhaltung von Werten handelt, die über tierischen Erzeugnissen stehen sollten. Solche Haartrockner können erst dann als vollkommen betrachtet werden, wenn sie folgende Bedingungen erfüllen:

Selbsttätiges Abschalten des Heizstromes, sobald die Lufttemperatur etwa 50° beträgt, Regelbarkeit des Luftstroms, um eine zu rasche Trocknung zu vermeiden.

Es ist einleuchtend, daß der scharfe Heißluftstrom die Trocknung wohl beschleunigt, aber ungünstiger wirkt als ein fächelnder Wind, der sich durch Ausbreitung des Luftstroms ergibt, und die Trockenwirkung mildert, wenn auch verlangsamt.

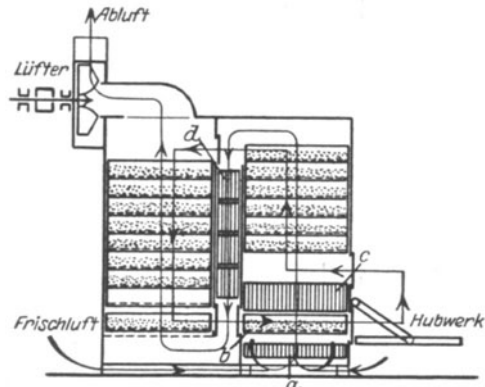


Abb. 240. Hordentrockner mit Stufenheizung (Schilde).

2. Pflanzenstoffe.

a) **Kartoffeln.** Die Trockenweise von Kartoffeln hängt davon ab, ob das getrocknete Gut für menschliche Ernährung oder Futterzwecke bestimmt ist, dann von der Form, in der es gewonnen werden soll, ob als Schnitzel, Scheibe oder Flocke.

Die obere Grenztemperatur scheint dadurch gegeben, daß eine Verkleisterung des Stärkegehaltes bei über etwa 60° eintritt. Diese Bedingung ist jedoch bei dem üblichen Verfahren gegenstandslos, weil dem Trocknen in der Regel ein Dämpfen der Rohkartoffel bei höheren Temperaturen vorausgeht. Das Gut darf deshalb während der Trocknung unbedenklich einer Temperatur von $t \approx 80^{\circ}$ unterworfen werden bzw. einer noch höheren, wenn es zur Verfütterung dienen soll, und die Vorschrift, eine Geschmackschädigung auf alle Fälle zu vermeiden, weniger in Betracht kommt. Die Trockendauer schwankt, je nach dem Verfahren, zwischen wenigen Sekunden bei der Herstellung von Flocken, und mehreren Stunden bei der Erzeugung von Schnitzeln. Der Feuchtigkeitsgehalt der Rohkartoffel liegt zwischen $\chi_r \approx 2$ und 4. Er soll auf ein Maß vermindert werden, das $\chi_b \approx 0,175$ nicht überschreitet. Spe-

zifisches Gewicht, Trockenstoff- und Stärkegehalt stehen bei der Kartoffel in bestimmtem, durch Abb. 241 nach Foth wiedergegebenem Zusammenhang. Der Unterschied zwischen Trockenstoff- und Stärkegehalt ist bei allen Kartoffeln fast gleichbleibend 5,752%. Er entfällt auf Holzfaserteile, Stickstoffgehalt, Mineralstoffe u. dgl.

Bei der Erzeugung von Kartoffelschnitzeln und -scheiben wird die gereinigte Kartoffel in Schnitzelmaschinen zerkleinert und durch Dämpfung oder chemische Behandlung von den ein Blauwerden der zerteilten Kartoffel bewirkenden Oxydasen befreit. Die Trocknung erfolgt für Schnitzel und Scheiben zu Futterzwecken in umlaufenden Trommeln durch Feuergas-Luftgemische oder auch auf Darren. Soll das Erzeugnis zur menschlichen Ernährung dienen, so schließt sich an das Waschen der Rohkartoffel ein Schälen an. Die Trocknung erfolgt dann zweckmäßig durch Heißluft in Kanaltrocknern.

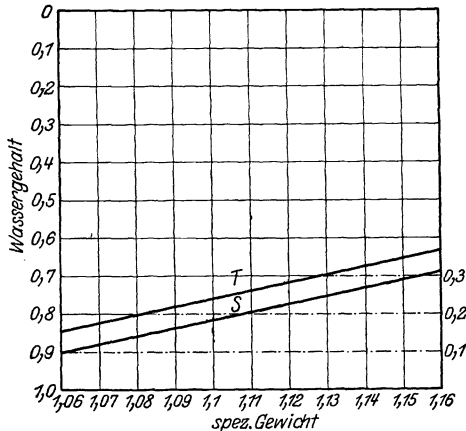


Abb. 241. Abhängigkeit des spezifischen Gewichts der Kartoffel vom Stärkegehalt (Foth). (T Trockenstoffgehalt, S Stärkegehalt.)

Die danach zu Brei zerdrückten Kartoffeln werden Walzentrocknern nach Art der Abb. 187 und 188 zugeführt, das in Bandform entfallende Gut durch Kühlschnecken befördert, die gleichzeitig der Vorzerkleinerung dienen. Anschließend erfolgt Auflösung in Flocken und Absiebung der Schalen in einer Sichttrommel, an die eine zum Lagerraum führende Fördervorrichtung anschließt. Neuerdings wird die Bewegung der Flocken bei großen Anlagen durch Preßluft bewirkt, die hierbei gleichzeitig die Nachkühlung übernimmt. Eisener¹ weist auf die Wichtigkeit hin, die Förderluft aus dem Flockenboden anzusaugen, einmal um dort Überdruck zu vermeiden, dann um Niederschlag zu verhüten, wie er bei Entnahme warmer und feuchter Luft aus dem Trockenraum leicht entsteht.

Über die Durchbildung der verschiedenen Trockenverfahren und Versuchsbeobachtungen an ausgeführten Anlagen werden von Parow² zahlreiche wertvolle Angaben gemacht, auf die hier verwiesen sei. Als Anhalt kann dienen, daß eine Vierfelderdarre von 4·2 m² in 12 Stunden aus 5000 kg nassen Schnitzeln 3500 kg Wasser bei einer Temperatur der Trockenluft von 70 bis 80° austreibt und etwa 12000 kg Dampf verbraucht. Walzentrockner besitzen eine Leistung, die zwischen 40

¹ Eisener: Flockengebläse. Die Trocknungs-Industrie 1926.

² Parow: Handbuch der Kartoffeltrocknerei. Berlin 1916.

und 75 kg/h Wasserverdampfung für 1 m² Walzenoberfläche schwankt, wobei die niedrigen Zahlen für die heute weniger in Betracht kommenden Zweiwalzentrockner mit unmittelbar benachbarten Walzen gelten.

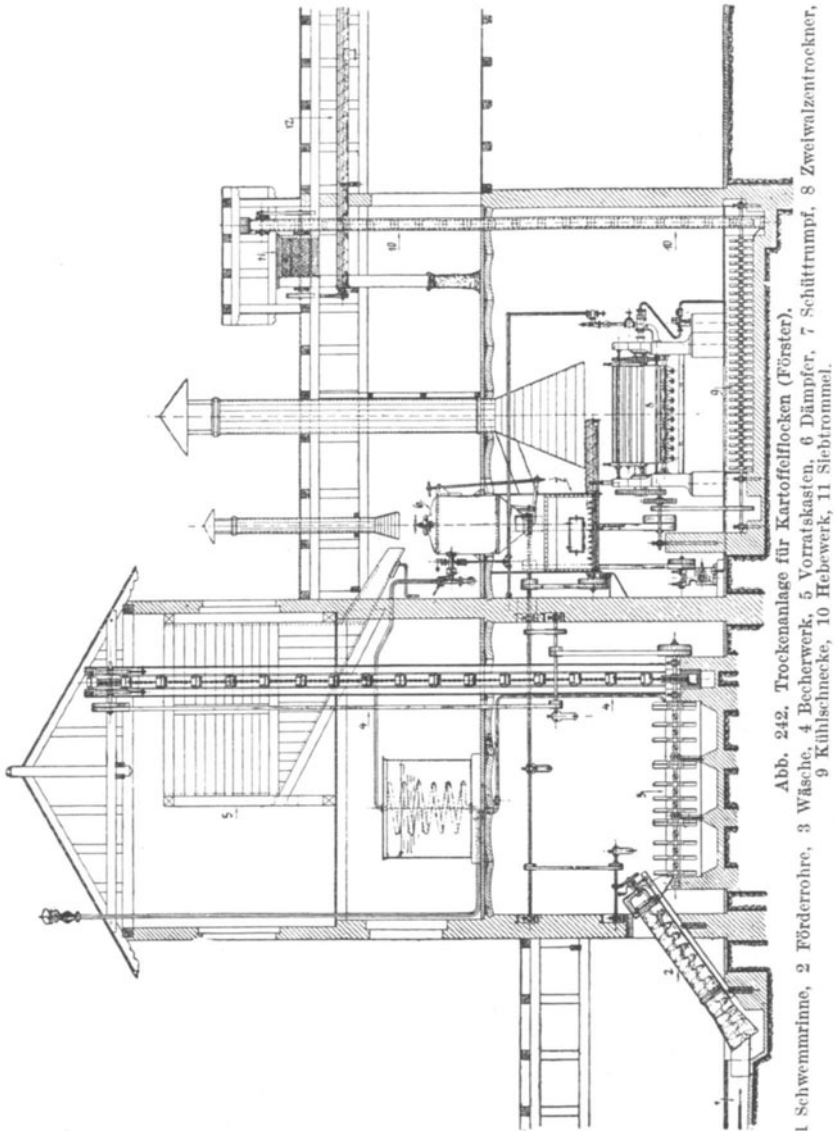


Abb. 242. Trockenanlage für Kartoffelflocken (Förster).
 1 Schwemminne, 2 Förderrohre, 3 Wäsche, 4 Becherwerk, 5 Vorratskasten, 6 Dämpfer, 7 Schilttrumpf, 8 Zweiwalzentrockner, 9 Kühlschnecke, 10 Hebewerk, 11 Siebtrommel.

Der Dampfverbrauch beträgt bei einem Dampfdruck von 5 bis 6 at 1 bis 1,25 kg für 1 kg Wasserverdampfung, worin der Wärmeverbrauch für das Dämpfen nicht eingeschlossen ist.

b) Stärke. Als Strahlen- und Stückenstärke kommt Mais-, Reis- und Weizenstärke, als Stärkemehl Kartoffel- und Maisstärke in den

Handel. Die Vorschrift, der Stärke ihre Weiße zu erhalten und eine Verkleisterung zu vermeiden, begrenzt die bei der Trocknung anzuwendende Temperatur auf $t \approx 50^\circ$. Daneben kommt der Verkürzung der Trockendauer Bedeutung zu. Das Trocknen unter Luftleere bietet auch hier besondere Vorteile, wenn es sich um hochwertiges Erzeugnis handelt.

Vor der eigentlichen Trocknung wird die Stärke mechanisch auf einen Feuchtigkeitsgehalt $\chi_r \approx 0,6$ bis $0,8$ ausgeschleudert. Der Endfeuchtigkeitsgehalt schwankt zwischen $\chi_b \approx 0,02$ bis $0,04$, wenn es sich um lösliche Trockenstärke handelt, und $0,16$ bis $0,25$ für gewöhnliche

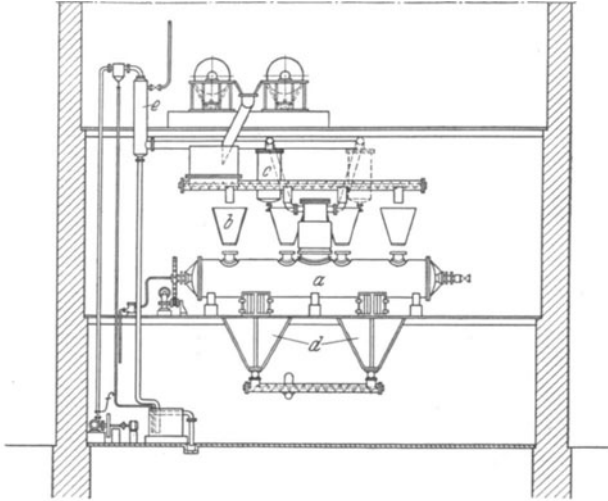


Abb. 243. Trockenanlage für Stärke (Paßburg-Block).

a Vakuum-Schaufeltrockner, *b* Meßkasten, *c* Brüdenentstauber, *d* Ausfüllkasten, *e* Einspritzkondensator, *f* Luftpumpe.

Handelsware. Über das hygroskopische Verhalten der Stärke liegen die in Abb. 1 niedergelegten Beobachtungen nach Hoffmann vor.

Die Verarbeitung der Stärke zu Krümel- und Puderstärke erfolgt nach Abb. 243 (Paßburg-Block) in dampfbeheizten Vakuumschaufeltrocknern. Besondere Trennvorrichtungen halten hierbei die mit den Brüden entweichenden Staubteilchen zurück. Meßkästen, deren Inhalt einer Füllung des Trockners entspricht, dienen wechselweise zur Beschickung. Daneben kommen für Strahlen- und Stückenstärke Kammer-, Kanal- und Bandtrockner zur Anwendung. Die letzten sind häufig so ausgebildet, daß die Stärke in dünner Schicht über ein Tuch ausgebreitet ist, das sich über die als Hohlkörper ausgebildeten Heizflächen bewegt.

Die bei der Stärkeherstellung sich ergebenden Abfälle müssen wegen des hohen Wassergehalts $\chi \approx 20$ vor der Trocknung weitestgehend mechanisch entfeuchtet werden. Dies geschieht bei Kartoffelpülpe, Maiskeimen, Mais- und Weizenstärke durch Schneckenpressen, bei Kartoffelpülpe im Großbetrieb durch Walzenpressen. Zusatz von Kalkmilch erleichtert die Vorentwässerung. Sollen Reis- und Maisprotein,

Reiszellulose und ähnliche, aus feinen Teilen bestehende, Rückstände getrocknet werden, so dienen Filterpressen zur mechanischen Entfeuchtung. Bei der Vorbehandlung, die zu einem Feuchtigkeitsgehalt $x_r \approx 3$ bis 8 führt, gehen lösliche Bestandteile mit dem Wasser verloren; ihre Erhaltung durch Eindampfen ohne vorherige mechanische Entfeuchtung ist kaum lohnend.

Neben Zerkleinerung der zusammenbackenden ausgepreßten Rückstände ist es wichtig, die Trockenvorrichtung so auszubilden, daß Klumpenbildung, besonders bei Beginn der Trocknung, vermieden wird. Umland verteilt bei stark backenden Waren die Trocknung auf einen Vor- und Nachtrockner mit zwischengeschalteter Zerkleinerungsvorrichtung.

Für wenig empfindliche und wenig wertvolle Rückstände kommen feuerbeheizte Trommeltrockner zur Anwendung, bei hohem Proteingehalt dampfheheizte Röhrenbündeltrockner. Als Versuchsergebnis mit einem unmittelbar beheizten Trommeltrockner von 1,6 m Durchmesser und 7 m Länge gibt die Herstellerin Venuleth und Ellenberger eine Leistung von 950 kg nasser Kartoffelpülpe von einem Anfangsfeuchtigkeitsgehalt $x_r \approx 2,33$, einem Endfeuchtigkeitsgehalt $x_h \approx 0,67$ bei einem Brennstoffverbrauch von 130 kg Koks, entsprechend einer Verdampfleistung von 3,65 kg für 1 kg Koks.

c) Getreide. In feuchten Sommern trocknet das Getreide am Halm nicht genügend aus, um während des folgenden Lagerns und Versands vor Verderb sicher zu sein. Von dem spät geernteten Mais und Reis gilt dies in besonderem Maße. Beim Ausdreschen feucht geernteten Getreides entstehen Verluste dadurch, daß Körner im Stroh verbleiben. Während in unseren Gegenden mit der künstlichen Nachtrocknung nur in Ausnahmefällen zu rechnen ist, wird sie in England und den nordischen Ländern wegen des Klimas, z. B. bei der für Vermälzung bestimmten Gerste, regelmäßig angewandt.

Die zulässige Temperatur liegt bei Roggen und Weizen, mit Rücksicht auf Erhaltung der Back- und Keimfähigkeit, bei $t \approx 45^\circ$, bei Braugerste und Saatgetreide in ähnlicher Höhe. Die Baustoffe der Trockenvorrichtung spielen hierbei nach Hoffmann insofern eine Rolle, als bei hölzernem Einbau die Temperatur um etwa 5° überschritten werden darf, während bei Ausführung in Eisen es sich empfiehlt, etwa 5° darunter zu bleiben. Sind Gerste, Hafer und Erbsen zur Vermahlung bestimmt, so kann eine Steigerung der Temperatur bis 70° und darüber in Kauf genommen werden.

Durch übertrieben rasche Trocknung wird die Güte herabgesetzt. Die Trockenzeit soll nach Hoffmann für je 5% Verminderung des Feuchtigkeitsgrades φ_{G} nicht weniger als eine Stunde, bei Braugerste sogar nicht weniger als zwei Stunden betragen.

Von den verschiedenen Trockenverfahren bietet die Vakuumtrocknung besondere Vorzüge, demnächst kommt die Verwendung von vorgewärmter Luft in Frage, in Ausnahmefällen die Benutzung von Feuer- gas-Luftgemischen, das letzte vor allem dann, wenn das getrocknete Gut nicht zur menschlichen Nahrung bestimmt ist. Hoffmann emp-

fiehlt, die Trocknung zu Anfang im Gleichstrom erfolgen zu lassen, um die an dem Getreide haftenden Kleinlebewesen abzutöten und danach durch den Trockenwind abzublasen, da sie sonst die Poren verstopfen und die weitere Trocknung erschweren. Bei hohem Anfangsfeuchtigkeitsgehalt, wie er z. B. bei gebeiztem Getreide künstlich herbeigeführt wird, erfolgt die Trocknung in der Regel unter mehrmaligem Durchgang des Gutes.

Der anfängliche Feuchtigkeitsgehalt steigt im allgemeinen bei naturfeuchtem Getreide nicht über $\chi_r \approx 0,27$. Schiffsunfälle erhöhen ausnahmsweise die Zahl auf $\chi_r \approx 0,4$ bis 0,65. Die natürliche Feuchtigkeit

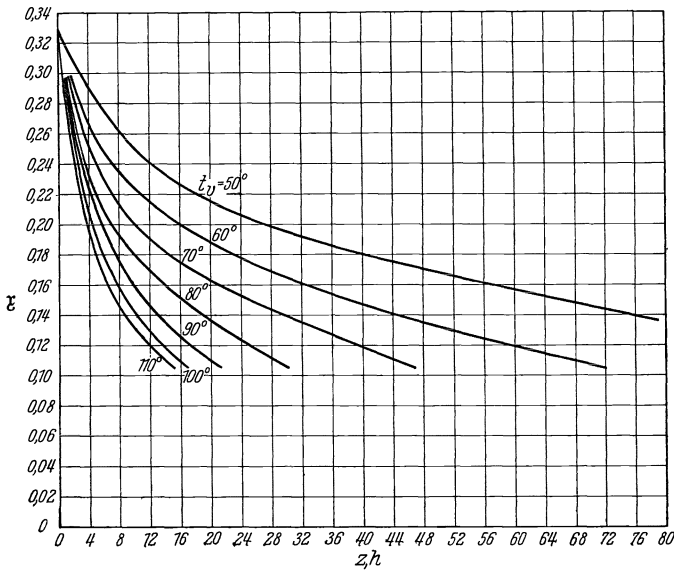


Abb. 244. Verlauf der Trocknung von Weizen auf Horden bei verschiedener Lufttritttemperatur. Schichtstärke 1 Korn (Lurié).

von Mais schwankt zwischen $\chi_r \approx 0,28$ bis 0,4. Das als Saatgut bestimmte gebeizte Getreide erfährt durch das Weichen eine Erhöhung des Feuchtigkeitsgehalts bis auf $\chi_r \approx 0,32$, bei Heißbeize sogar bis 0,61, im letzten Falle unter gleichzeitiger Erwärmung auf etwa 50°.

Der Zustand der Lufttrockenheit entspricht nach Hoffmann¹ einem Feuchtigkeitsgehalt $\chi \approx 0,22$ bis 0,25. Der Feuchtigkeitsgehalt am Ende der Trocknung soll nicht wesentlich tiefer liegen. Für die übliche Lagerzeit empfiehlt Hoffmann einen Wert $\chi_h \approx 0,19$, dagegen nur 0,11 bis 0,135 bei langer Lagerdauer, wie sie in Mälzereien vorkommt, wenn das Getreide übersommern soll, außerdem dann, wenn die Lagerung in großen Silos erfolgt. Bei Saatgetreide stellt $\chi_h \approx 0,16$ den wünschenswerten Endzustand dar. Die Versandfähigkeit von Mais verlangt eine Verminderung des Feuchtigkeitsgehaltes auf $\chi_h \approx 0,15$ bis 0,16.

¹ Hoffmann: Versuchsbericht über die Hauptprüfung der Getreidetrockner. 1913.

In dem Trockenlaboratorium des Wärmetechnischen Instituts Moskau wurden durch Lurié¹ systematische Versuche durchgeführt, um den Verlauf der Trocknung von Getreide auf Horden festzustellen. Die auf die Einheit des Durchgangsquerschnitts bezogene Luftmenge wurde hierbei unveränderlich gehalten und entsprach einer auf den freien Querschnitt und Normalzustand (0°, 760 mm Barometerstand) bezogenen Luftgeschwindigkeit von 0,3 m/s. Die Eintrittstemperatur der Luft wurde zwischen 50 und 110° veränderlich, für jede Versuchsreihe jedoch gleich hoch gehalten. Bei der Untersuchung von Weizen ergaben sich die Kurven der Abb. 244, wenn das Gut in der durch ein Korn gebildeten elementaren Schichtstärke verarbeitet wurde. Die Trocknung geht hierbei durchweg im hygrokopischen Gebiet vor sich

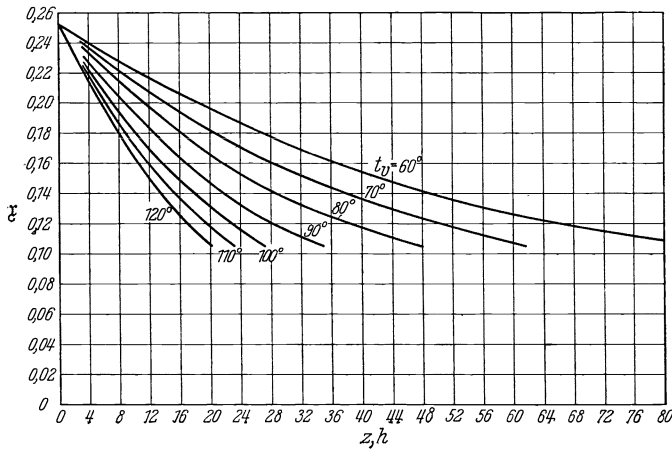


Abb. 245. Verlauf der Trocknung von Weizen auf Horden bei verschiedener Lufttemperatur. Schichtstärke 36 mm (Lurié).

und nimmt den Verlauf, wie er nach Abb. 68 und 69 grundsätzlich zu erwarten steht. Bei Vergrößerung der Schichtstärke auf 36 mm trat die aus Abb. 245 ersichtliche Verzögerung der Trockenwirkung ein. Der Feuchtigkeitsgehalt ist hierbei als Mittelwert der Gesamtmenge aufzufassen. Die Verzögerung ist ohne weiteres daraus erklärlich, daß bei gleichbleibender Anfangsbeschaffenheit der Luft die Trockenkraft mit fortschreitender Durchdringung des Gutes abnimmt. Lurié beobachtete auch die Veränderung des Feuchtigkeitsgehalts in verschiedener Schichthöhe und fand hierfür den aus Abb. 246 hervorgehenden Zusammenhang, wenn die Luft eine Anfangstemperatur von 90° besaß. Wurde unter den gleichen Verhältnissen Mais getrocknet, so ergab sich für eine bestimmte Feuchtigkeitsabnahme ein Mehrfaches an Trockendauer, verursacht dadurch, daß die spezifische Oberfläche bei Mais wesentlich geringer ist als bei Weizen. Umgekehrt ergab sich aus

¹ Lurié: Die Trocknung von Getreide in unbewegter Schicht und ihre Wirkung auf die Keimung. Z. ges. Getreidewesen 1930.

dem angeführten Grunde bei Hafer eine raschere Trocknung als bei Weizen.

Zum Trocknen des ungedroschenen Getreides unmittelbar nach der Ernte dienen fahrbare Bandtrockner (T. A. G.). Zwei endlose je 5 m lange, 2 m breite Bänder nehmen die Halmfrüchte auf. Die Trocknung erfolgt durch Heißluft vermittelt eines Dampflufferhitzers und eines Lüfters, der quer durch die Bänder von unten nach oben fördert, während das Getreide umgekehrt niederläuft. Die Durchgangsdauer läßt sich zwischen 4 und 12 Minuten regeln, um dem verschiedenen Feuchtigkeitsgehalt des Gutes Rechnung zu tragen.

Bei den für die Getreidetrocknung vorteilhaften Vakuumschaufeltrocknern, die für den Großbetrieb in Größen bis 2 m Durchmesser und

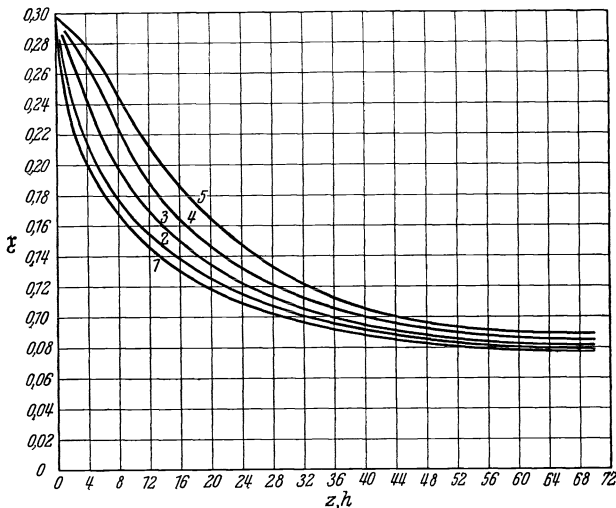


Abb. 246. Verlauf der Trocknung von Weizen auf Horden in verschiedener Schichthöhe. Schichtstärke 36 mm (Lurié). 1—5 Schichtenfolge in Richtung des Luftdurchgangs.

11 m Länge bei einer Heizfläche bis 200 m² gebaut werden, ist es zweckmäßig, an Stelle unterbrochener Beschickungsweise Luftschleusen nach Abb. 209 als selbsttätige Ein- und Ausbringvorrichtungen anzuwenden. Bei großen Anlagen werden mehrere Vakuumschaufeltrockner hintereinander geschaltet. Von dem letzten läuft nach Paßburg das Getreide mit etwa 45° in mehrere wechselweise arbeitende Kühlgefäße. Diese stehen unter besonders hoher Luftleere, etwa 0,05 at, und ergeben, unter Ausnutzung der aufgespeicherten Überschußwärme des Gutes allein, Trocknung und Kühlung der Ware auf den für die weitere Lagerung geeigneten Grad. Wird durch Schiffsunfälle stark beschädigtes Getreide in Vakuumschaufeltrocknern behandelt, so erfährt es eine Verbesserung durch starke Minderung des anhaftenden üblen Geruches.

Beispiele für mit vorgewärmter Luft arbeitende Getreidetrockner sind in den Abb. 175, 176 und 177 wiedergegeben. Hierzu gehört auch Abb. 225 eines Getreidetrommeltrockners, der chargenweise mit 5 bis 8 Stunden

Trockendauer arbeitet. Das Auffüllen der Trommel erfolgt jeweils aus den hoch angeordneten Vorratsrumpfen, die Entleerung in den tief angeordneten Sammelrumpf, von dem aus das getrocknete Gut über eine selbsttätige Waage durch Becherwerk auf den Lagerboden gehoben und dort durch Schnecken verteilt wird. An die Trocknung schließt sich Abkühlung durch Frischluft an. Der für die Absaugung dienende Lüfter fördert durch eine Staubkammer ins Freie. Der in Abb. 172 dargestellte Brownell-Trockner dient für die Verarbeitung von Leinsaat, Kopra, Bohnen, Mais, Reis, Getreide, Kaffee und allgemein solchen körnigen Stoffen, die nicht zum Zusammenballen neigen.

Die ausnahmsweise durchgeführte Anwendung von Feuergas-Luftgemischen zur Trocknung von Getreide erfolgt in Trommeltrocknern.

Als Ergebnis einer großen Getreidetrockenanlage, die mit vier Vakuumschaufeltrocknern von 1,5 m Durchmesser, 9 m Länge arbeitet, gibt Paßburg an, daß in 24 Stunden aus 285000 kg Weizen mit einem anfänglichen Feuchtigkeitsgehalt von $x_r = 0,297$ 35000 kg Wasser entzogen und ein Endfeuchtigkeitsgehalt von $x_h = 0,137$ erzielt wurde. Der gleichzeitig auftretende Dampfverbrauch wurde bei einer verminderten Trockenleistung gemessen und ergab einschließlich Betriebskraft bei einer Verminderung des Feuchtigkeitsgrades φ_{G} um 7% 120 kg Dampf für je 1000 kg feuchtes Getreide, d. i. rund 1,7 kg Dampf für 1 kg aufgetrocknete Feuchtigkeit.

Als Leistung seiner mit Heißluft im Querstrom arbeitenden Getreiderieselstrockner gibt Jaeger 1 kg/h Wasserverdunstung für 1 m² Trockenfläche an, die als Summe der innen- und außenseitigen Rieselwandfläche gerechnet ist, wobei auf 1 m² bei Weizen etwa 50 kg Fassungsvermögen kommt. Vorausgesetzt ist ein Feuchtigkeitsgehalt des Gutes $x_r = 0,235$ zu Anfang, $x_h = 0,163$ zu Ende, eine höchste Lufttemperatur von 70° und eine Auslauftemperatur des Gutes von 44°.

Der Dampfverbrauch für einen Gleichstromtrockner nach Abb. 177 wird bei einem Dampfdruck von 6,5 at, im mittel zu 7,5 kg für 100 kg feuchtes Getreide angegeben, wenn sein Feuchtigkeitsgehalt von $x_r = 0,25$ auf $x_h = 0,177$ vermindert und dementsprechend 6 kg Wasser entzogen werden. Die höchste Lufttemperatur liegt bei etwa 70°.

Über Versuche an einem Getreidetrockner der Firma Winde und Kleist, bei dem das Trockengut in dünnen Schichten senkrecht niederfällt und vorgewärmte Luft waagrecht durch das Getreide hindurchgesaugt wird, berichtet Fischer¹. Zur Verarbeitung gelangte naturfeuchter Roggen bei folgenden Verhältnissen: Lufttemperatur $t_v = 45^{\circ}$, $t_h = 39^{\circ}$, Feuchtigkeitsgehalt $x_r = 0,185$, $x_h = 0,151$, Ausbringtemperatur $t_h = 28^{\circ}$, Höchsttemperatur des Gutes innerhalb der Trockenzellen $29,5^{\circ}$, Wärmeverbrauch 4470 kcal für 1 kg Wasserentziehung. Günstiger waren die Verhältnisse bei benetztem Roggen: Lufttemperatur $t_v = 49^{\circ}$, $t_h = 19^{\circ}$, Feuchtigkeitsgehalt $x_r = 0,356$, $x_h = 0,182$, Ausbringtemperatur $t_h = 23,5^{\circ}$, Höchsttemperatur des Getreides 28° , Wärmeverbrauch 1130 kcal für 1 kg Wasserentziehung. Ein dritter Versuch mit in der

¹ Fischer: Mitteilungen der deutschen landwirtschaftlichen Gesellschaft 1925.

Warmwasserbeize aufgequollener Gerste ergab: Lufttemperatur $t_v = 46,5^\circ$, $t_h = 22,5^\circ$, Feuchtigkeitsgehalt $\varepsilon_r = 0,46$, $\varepsilon_h = 0,258$, Auslauftemperatur $t_h = 23,5^\circ$, Höchsttemperatur der Gerste 39° , Wärmeverbrauch 1345 kcal für 1 kg Wasserentziehung. Der Endfeuchtigkeitsgehalt im letzten Falle ist ungenügend und macht eine Nachdrocknung erforderlich. Bei Beurteilung der Versuche ist zu beachten, daß die Raumtemperatur in den beiden ersten Fällen 2° , im dritten Falle $\frac{1}{2}^\circ$ betrug. Die Temperatur des feuchten Getreides lag in den beiden ersten Fällen mit 2° bzw. $2,5^\circ$ ganz nahe bei der Temperatur der Luft, im dritten Falle mit 19° wesentlich darüber. Der verwandte Heizdampf besaß einen Druck von 8,9 bzw. 9,3 bzw. 8,5 at. Das Niederschlagswasser lief mit 95,5° ab. In den Wärmeverbrauchsahlen ist der Verlust in einer langen ungeschützten Dampfleitung mitenthalten, so daß die Wirkungsweise zu ungünstig erscheint. Die Leistung betrug 932 bzw. 822 bzw. 684 kg/h nasses Gut, der Kraftbedarf 7,1 bzw. 7,54 bzw. 7,32 PSe. Die erheblichen Unterschiede zwischen den drei Versuchen werden erklärlich durch die absichtlich unterlassene Regelung der Luftmenge. Infolgedessen war der gesamte Wärmeverbrauch mit 116400 bzw. 117200 bzw. 124000 kcal/h bei allen drei Versuchen nahezu gleich, die Feuchtigkeitsaufnahme, bezogen auf 1 kg Reinsluft, um so niedriger, je höher ihre Abgangstemperatur lag, statt richtiger umgekehrt.

Der Bericht der A/S. Tuborgs Fabrikker, Kopenhagen, über eine mit zwei übereinander angeordneten und hintereinander geschalteten Friendschen Trommeltrocknern umfaßt eine Beobachtungszeit von etwa fünf Wochen, während deren durchschnittlich 50000 kg Gerste in 24 Stunden getrocknet wurden. Der Feuchtigkeitsgehalt betrug $\varepsilon_r = 0,226$, $\varepsilon_h = 0,123$, die Getreidetemperatur in der oberen Trommel 32° , in der unteren 38 bis 40° . Der Wärmeverbrauch ergibt sich aus dem beobachteten Aufwand von 0,208 kg Kohle für 1 kg Wasserauftrocknung und dem unteren Heizwert des Brennstoffes von 7136 kcal/kg zu 1484 kcal für 1 kg Wasserentziehung. Er ist bemerkenswert niedrig, zumal wenn berücksichtigt wird, daß er sich auf die verheizte Kohle bezieht und das Durchschnittsergebnis einer längeren Betriebszeit darstellt. Die Zahl ist nur erklärlich durch das Zusammenwirken eines hohen Feuerungswirkungsgrades mit guter Ausnutzung der mittelbar angewärmten Trockenluft.

Für einstufig arbeitende Trommeltrockner gibt Freund den Kohlenverbrauch zu 0,34 kg für 1 kg Wasserverdampfung bei einem unteren Heizwert von 7000 kcal/kg an, wenn Gerste von $\varepsilon_r = 0,19$ auf $\varepsilon_h = 0,136$ getrocknet wird. Die Innentemperatur soll hierbei 50 bis 55° nicht überschreiten.

Ein Versuchsergebnis über den in Abb. 172 dargestellten Brownell-Trockner bringt Alliott¹. In einer Trommel von 2,75 m Durchmesser und 4,57 m Länge, die 14 Spiralen enthält und mit vier Umdrehungen pro Minute läuft, wurden 3000 bis 4000 kg/h Leinsaat von einem Feuch-

¹ Alliott: *Drying by heat in conjunction with mechanical agitation and spreading.* Journ. of the Soc. of Chem. Ind. 1919.

tigkeitsgehalt $x_t = 0,333$ auf $x_h = 0,053$ mit Luft getrocknet, die am Eintritt 90° , am Austritt 45° besaß und mit Umlauf arbeitete.

Wertvolle Beobachtungen liefern auch die von der D.L.G. 1913 vorgenommenen Untersuchungen verschiedener Getreidetrockner.

Während trockne Gerste im Ruhezustande kaum mehr Atmungssauerstoff bedarf und daher im Silo oder in hohen Haufen auf Böden längere Zeit ohne Umlagerung verbleiben kann, bedarf wasserreiche und daher unreife Gerste reichliche Sauerstoffzufuhr und daher häufiges Umlagern oder Belüften. Wegen des ständigen Wechsels der äußeren Atmosphäre birgt jedoch das wahllose Lüften insofern eine Gefahr in sich, als bei trockener Hitze ein rasches aber ungleichmäßiges Trocknen der Gerste dort einsetzt, wo der Luftstrom auftritt, umgekehrt bei feuchtem Wetter leicht eine Feuchtigkeitsaufnahme des hygroskopischen Gutes stattfindet, die zu unerwünschter Erwärmung und neuerlich erhöhtem Sauerstoffbedarf führt, dersich schließlich in verringerter Ausgiebigkeit auswirkt. Um diesem Übelstande zu begegnen, ist bei der Brauerei Henninger-Kempff-Stern A.G., Frankfurt a. M., für die Belüftung feuchten, in Silos eingelagerten Getreides nach dem Vorschlage des Verfassers die in Abb. 247 dargestellte Bewetterungsanlage zur Anwendung gelangt. Sie bezweckt, die erforderliche Nach-trocknung ständig durchzuführen, und erreicht dies dadurch, daß unabhängig von der Witterung die Einblaseluft auf niedrige Temperatur und einen allmählich abnehmenden Feuchtigkeitsgrad eingestellt werden kann. Die Luft durchläuft zu diesem Zwecke einen mit Brunnenwasser versorgten Wetterfertiger, danach einen mit künstlich gekühltem Wasser beschickten Luftnachkühler, schließlich einen Lufterhitzer. Die Abkühlung der Luft erfolgt auf 6 bis 10° , die Anwärmung auf 12 bis höchstens 15° . Maßgebend für die Regelung ist die Vorschrift, daß einerseits die Temperatur von 15° nicht überschritten wird, andererseits der Feuchtigkeitsgrad der erwärmten Luft um 1 bis 2% niedriger liegt als der Feuchtigkeitsgrad, der sich im Gleichgewichtszustande über dem Getreide bei seinem jeweiligen Feuchtigkeitsgehalt einstellt und dessen Höhe sich durch Ablesen eines in das Getreide eingeführten Stechhygrometers ergibt.

d) **Malz.** Die Malztrocknung ist nahe verwandt mit der Getreide-trocknung, unterscheidet sich von dieser jedoch vor allem dadurch, daß bei ihr chemische und biologische Veränderungen vor sich gehen und

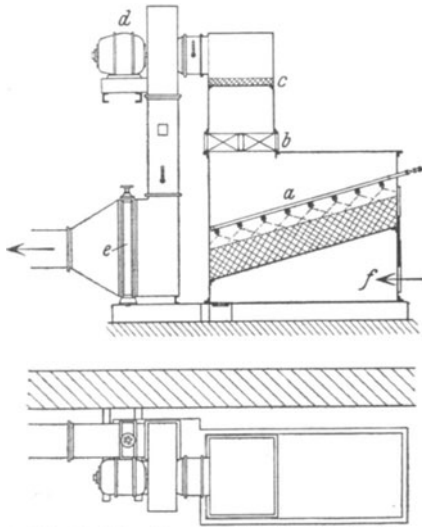


Abb. 247. Bewetterungsanlage für Getreidesilo.
a Wetterfertiger, *b* Nachkühler, *c* Trockenschicht, *d* Lüfter, *e* Lufterhitzer, *f* Frischluft.

das Verfahren erheblich beeinflussen. Bei der Herstellung von Malz sind zwei Abschnitte zu unterscheiden: das eigentliche Trocknen und das Abdarren zur Bildung aromatischer Stoffe.

Im ersten Abschnitt wird die Trockentemperatur allmählich mit etwa 45° auf die Grenze gesteigert, bei der das Leben des Kornes aufhört. Die bei dem Abdarren angewandten Temperaturen hängen von der Art des Erzeugnisses ab; sie liegen zwischen 70 und 110°, bei hellem Malz tiefer als bei dunklem. Die Bildung von Geschmacksstoffen beginnt mit etwa 75°, wobei Voraussetzung ist, daß der Feuchtigkeitsgehalt bei beginnender Einwirkung dieser Temperatur 0,16 bis 0,22 nicht überschritten hat.

Hohe Trockengeschwindigkeit führt zu der unerwünschten Bildung von Glasmalz infolge Lösung von Eiweiß- und Gummistoffen. Die gesamte Trocknung dauert zwischen 24 und 48 Stunden, wovon etwa 2 bis 3 Stunden auf das Abdarren bei hohen Temperaturen entfallen. Zu langsames Vortrocknen begünstigt nach Kropff¹ die Entstehung unerwünschter Eiweißkörper. Bei Malz mit viel löslichem, nicht gerinnbarem Eiweiß muß ausnahmsweise die Abdarrzeit auf 8 bis 10 Stunden ausgedehnt werden.

Die Verarbeitung des Malzes erfolgt heute nur noch selten auf Rauchdarren, die unmittelbar von Feuergasen durchzogen werden. Die Regel bilden Luftdarren.

Der Feuchtigkeitsgehalt des Grünmalzes beträgt $x_r \approx 0,67$ bis 0,82. Er wird auf einen schließlichen Wert von $x_b \approx 0,015$ bis 0,04 herabgesetzt, im einzelnen nach Lintner auf 0,015 bei Münchener, 0,025 bei Wiener und 0,035 bei Pilsener Malz.

Die Luftdarren werden bei neuzeitlichen Anlagen meist als Dreihordenböden, etwa nach Abb. 222, ausgebildet.

Eine Abart stellt die Brüne-Darre dar, bei der unter jeder Horde eine besondere Luftkammer angeordnet ist, um die Abhängigkeit der Darren voneinander aufzuheben und das Malz während des Trocknens und Darrens nach Belieben zu beeinflussen.

Bei der Zweihordendarre der Abb. 248 (Miag) wird die mittelbar durch Feuergase erhitzte Luft zwangsläufig durch Schleudерlüfter bewegt, die über der Darrkuppel sitzen. Kaltluftzüge führen unter die Horden und ermöglichen Abstufung von Temperatur und Menge der Trockenluft.

Die senkrecht angeordnete Darre, Abb. 224, kann neben der Herstellung von Malz auch für die Trocknung von Gerste Verwendung finden. Der Betrieb der Senkrechtdarren gestaltet sich bei der Malzherstellung so, daß etwa alle zwölf Stunden die untere Abteilung vermittels einer unter dem Malzschacht liegenden Schnecke ausgeräumt, danach der Inhalt der mittleren nach unten und schließlich das in der obersten Abteilung befindliche Malz nach der mittleren entladen wird.

Die Leistung einer Dreihordenmalzdarre beträgt nach Topf 90 bis 110 kg fertiges Malz für 1 m² Hordengrundfläche in 24 Stunden, der

¹ Kropff: Was hat man beim Vermälzen einer unbekanntnen Gerste zu beachten, um ein gutes Braumalz zu erzielen? Wschr. Brauerei 1927.

Brennstoffverbrauch schwankt zwischen 11 und 18 kg Kohle von 7500 kcal/kg unterem Heizwert für 100 kg fertiges Malz. Die Höhe der Grünmalzschicht bewegt sich, je nach Eigenart des Malzes, zwischen 0,1 und 0,2 m, wobei die niedrigen Zahlen für helles, die hohen für dunkles Malz gelten.

Schlenk¹ gibt für die Veränderung des Feuchtigkeitsgehalts von Malz während dreimal zwölfstündiger Trockenzeit auf einer Dreihordendarre den in Abb. 249 dargestellten Verlauf. Auf der oberen Horde wird der Höchstwert der Trockengeschwindigkeit erst zum Schlusse erreicht. Die Ursache liegt in der Abhängigkeit der oberen Horde von der Abdarrhorde bei der gewöhnlichen Drei- oder auch Zweihordendarre. Die Luftmenge ist für alle gleich, hohe Temperaturen treten nur während des Abdarrrens auf der unteren Horde auf und wirken sich auch auf die oberen Horden aus. Es wäre falsch, die Luft hinter der unteren Horde nachzuheizen, weil alsdann durch vorzeitige Einwirkung hoher Temperaturen auf das noch feuchte Malz sich unerwünschte Farbwirkung ergäbe. Wird daher die Abhängigkeit der einzelnen Darren durch Anordnung einer zweiten Luftkammer oberhalb der Abdarrhorde nach Abb. 222 aufgehoben, so geschieht dies, um die vorzeitige Einwirkung hoher Temperatur beim Abdarren auf der unteren Horde von den oberen Horden abzuhalten und zu verhindern, daß das Malz schon oben Farbe fängt. Den gleichen Zwecken dient die Zuführung unerwärmter Außenluft oberhalb der unteren Darre. Hierdurch wird es möglich, unten mit wenig, oben mit mehr

Temperaturen auf die Trockengeschwindigkeit auszugleichen.

Für die Miag-Darre wird die Leistung mit $200 \text{ kg/m}^2 \cdot 24 \text{ h}$ und der Brennstoffverbrauch für 100 kg fertiges Malz mit 12 kg Kohle von 7500 kcal/kg unterem Heizwert angegeben.

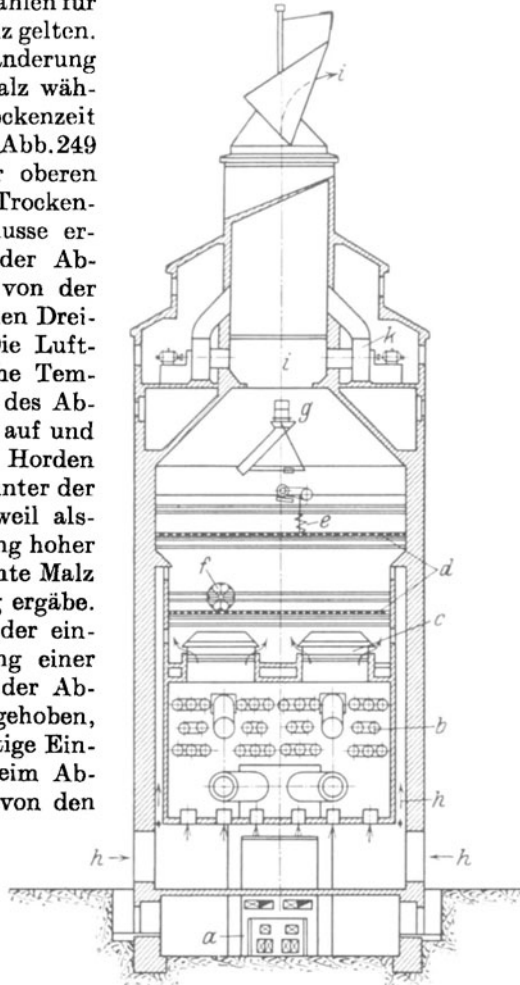


Abb. 248. Zwischendarre (Miag).

a Feuerung, *b* Lufterhitzer, *c* Luftverteiler, *d* Hordenboden, *e* Schraubenwender, *f* Klappschaufelwender, *g* Beschickung, *h* Frischluft, *i* Abluft, *k* Absaugelüfter.

¹ Schlenk: Das Darren von Malz. Wschr. Brauerei 1928.

Wendet eine Brauerei Trommeltrockner für Trocknung der Gerste an, so bietet sich ihre Ausnutzung zur Malztrocknung im Frühjahr von selber. Wegen des starken Schwindens des Grünmalzes erfolgt Vortrocknung und Abdarren in zwei getrennten Trommeln, die zweckmäßig untereinander angeordnet werden.

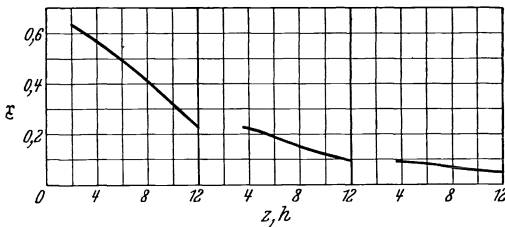


Abb. 249. Verlauf der Trocknung von Malz auf der Dreihordendarre (Schlenk).

Der Grund, weshalb die arbeitssparenden Trommeltrockner die Hordendarren nicht zu verdrängen vermochten, liegt darin, daß die ersten mit stärkeren Malzschichten arbeiten und infolgedessen nicht die gleichmäßige Einwirkung der Trockenluft sichern wie die dünne gleichmäßige Malzschicht auf der Hordendarre.

e) **Hopfen.** Frisch gepflückter Hopfen besitzt einen Feuchtigkeitsgehalt von $\epsilon_r \approx 1,8$ bis 3. In diesem Zustande ist seine Haltbarkeit gering. Er wird daher möglichst schnell auf den Zustand der Lufttrockenheit entsprechend einem Feuchtigkeitsgehalt von $\epsilon \approx 0,14$ gebracht. Dies geschieht auf Horden in geschlossenen, gut belüfteten Räumen. Nach den Untersuchungen von Chapman-Hugo¹ kann die antiseptische Wirkung des grünen Hopfens beim Darren leicht auf ein Drittel zurückgehen, weil der Gehalt an kristallisiertem Lupulin sich bei höherer Temperatur rasch verringert. Bei künstlicher Trocknung stellt daher eine Temperatur des Hopfens von $t \approx 25$ bis 30° die obere Grenze dar. Die Hopfentrockner für den Großbetrieb gleichen den für Malztrocknung dienenden Dreihordendarren. Der feuchte Hopfen wird in etwa 0,1 m hoher Schicht auf der obersten Horde vorgetrocknet, fällt dann auf die mittlere und schließlich auf die unterste wagenförmig gestaltete Horde. Die Trockendauer beträgt etwa $3 \cdot 1\frac{1}{2} = 4\frac{1}{2}$ Stunden. An die Trocknung schließt sich ein Auskühlen während etwa 10 Stunden an. Die Trockenluft wird mit niedriger Temperatur — etwa 25° — unter die unterste Horde geleitet, während der unter die beiden oberen Horden geführte Zusatzluftstrom höhere Temperatur, bei der mittleren Horde etwa 35° , bei der obersten bis 45° , besitzen darf, ohne daß die Temperatur des feuchten Hopfens die zulässige obere Grenze überschreitet.

f) **Hefe.** An Hefe entfällt auf 1 hl Bier mit 12 bis 14% Extraktgehalt etwa 1 kg mit einem Feuchtigkeitsgehalt $\epsilon \approx 4$ bis 6. Die gewonnene Trockenhefe ist um so wertvoller, je niedriger die bei ihrer Herstellung angewandte Temperatur liegt. $t \approx 50^\circ$ stellt die obere Grenze dar, wenn die Hefe für menschliche Ernährung Verwendung finden soll. Bei Verarbeitung zu Futterzwecken erscheinen höhere Temperaturen zulässig.

Der natürliche Feuchtigkeitsgehalt der Rohhefe beträgt $\epsilon = 7$ bis 7,5. Er kann durch Pressen auf $\epsilon_r \approx 2,3$ bis 3 vermindert werden. Bezüg-

¹ Chapman und Hugo: Journal of the Institute of Brewing. 1927.

lich des wünschenswerten Endfeuchtigkeitsgehaltes besteht ein Unterschied zwischen deutscher und englischer Hefe. Er liegt im ersten Falle bei $x_h \approx 0,083$, im zweiten Falle bei $x_h \approx 0,133$.

Für die Trocknung von Hefe kommen hauptsächlich Walzentrockner, daneben Tauchtrommeln zur Anwendung. Sie wird in vorgewärmtem Zustande zugeführt und entfällt in Form von Schuppen.

Zur Trocknung von Hefe mit einem mittleren Wassergehalt $x_r \approx 7,3$ zu Anfang, $x_h \approx 0,083$ zu Ende wird für 1 kg Wasserverdampfung 1,25 bis 1,5 kg Dampf verbraucht und, bezogen auf 1 m² gesamte Heizfläche der Trommeln, eine Leistung bis 38 kg/h abgedampftes Wasser erzielt.

g) Treber. Mit Rücksicht auf Erhaltung des Nährwertes sollen bei der Trocknung der im Brauereibetrieb entfallenden Treber Temperaturen von $t = 60$ bis 70° nicht überschritten werden. Der Anfangsfeuchtigkeitsgehalt beträgt $x \approx 4$ bis 5. Er wird durch Vorpressen möglichst auf $x_r \approx 1,5$ bis 2 herabgesetzt. Der Endfeuchtigkeitsgehalt soll $x_h \approx 0,1$ nicht überschreiten. Für die Trocknung kommen in der Hauptsache dampfbeheizte Muldentrockner nach Abb. 196 bis 198 zur Anwendung. Die Füllpresse dient gleichzeitig zur Vorentfeuchtung. Als Baustoff für die Mulde hat sich Gußeisen besser bewährt als Schmiedeeisen, das bei saurem Treber leicht zerstört wird.

Die Leistung eines Röhrenbündelmuldentrockners von 100 m² Heizfläche wird zu etwa 1600 kg Naßtreber mit einem Feuchtigkeitsgehalt $x = 5$, entsprechend 1250 kg Einmischung, angegeben. Der Feuchtigkeitsgehalt der vorgepreßten Treber beträgt hierbei anfangs $x_r = 1,63$, schließlich $x_h = 0,1$ bis 0,125. Dies ergibt eine Verdampfleistung von etwa 5 kg auf 1 m² Heizfläche. Der Dampfdruck liegt bei 2,5 bis 3 at, der Dampfverbrauch nahe an der Grenze von 1 kg für 1 kg Wasserverdampfung.

Die im gärungstechnischen Betrieb bei Verarbeitung von Malz, Mais, Reis, Roggen und Weizen entfallende Schlempe besitzt einen anfänglichen Wassergehalt von $x \approx 15$ bis 50. Wegen des verhältnismäßig geringen Wertes des Trockengutes kommen für das der eigentlichen Trocknung vorausgehende Eindicken nur Verfahren ohne großen Kostenaufwand in Betracht, z. B. Anwendung anderweitig nicht ausnutzbarer Abdämpfe und Abgase einer Feuerung. Die Fertigtrocknung von dem so auf $x_r \approx 4$ verminderten Feuchtigkeitsgehalt auf $x_h \approx 0,1$ kann in Trommel- und Walzentrocknern erfolgen.

h) Teigwaren. Die zulässige Temperatur liegt bei Teigwaren mit $t \approx 50^\circ$ höher, als sie im allgemeinen angewandt wird. Der Grund ist wohl darin zu suchen, daß bisher nur selten mit Umluft gearbeitet wird und bei Steigerung der Vorwärmtemperatur der Luft bis zu dieser Grenze sich Trockengeschwindigkeiten in unzulässiger Höhe um so mehr ergeben, je dicker die Teigwaren sind. Die Trockenzeit beträgt bei Nudeln, je nach Stärke, 1 bis 2, bei Makkaroni sogar 3 bis 6 Tage.

Im Winter ist die künstliche Trocknung nicht zu entbehren, wenn sie auch zuweilen dadurch scheinbar umgangen ist, daß der Trockenrichtung die wärmere Luft der Arbeitsräume zugeführt wird. Im Sommer wird die Vorwärmung der Trockenluft häufig unterlassen und

natürliche Trocknung, unter künstlicher Erhöhung der Frischluftmenge, angewandt.

Der Anfangsfeuchtigkeitsgehalt schwankt erheblich und liegt im Durchschnitt bei $x_r \approx 0,4$. Er soll durch die Trocknung auf $x_g \approx 0,05$ bis 0,1 herabgesetzt werden.

Die Trocknung von Teigwaren erfolgt zuweilen in den Arbeitsräumen selbst, unter Beheizung und Belüftung der Arbeitstische. Während der nächtlichen Unterbrechung darf alsdann die Raumtemperatur nicht zu tief sinken, um Niederschlag auf die angetrocknete Ware, Entfärben und Sauerwerden zu vermeiden. Neben diesem Notbehelf kommen Schränke, Kammern und Kanäle in Frage. Nudeln werden im allgemeinen auf Wagengestellen mit einer großen Anzahl übereinander angeordneten Hordenflächen in nebeneinanderliegende Kammern geschoben, deren jede durch Öffnung von Schiebern an die ober- und unterhalb laufenden Luftkanäle angeschlossen ist. Zuweilen werden auch die Hordenwagen durch einzelne Horden ersetzt, die Schubladenform erhalten und zu mehreren übereinander angeordnet sind. In beiden Fällen strömt die Luft in senkrechter Richtung durch die Horden hindurch. Für die Trocknung von Makkaroni kommt neben der Unterbringung in Horden Aufhängung an Stäbchen zur Anwendung.

i) **Obst.** Die Trocknung von Obst spielt in den Vereinigten Staaten und anderen Überschußländern eine bedeutendere Rolle als bei uns. Hierdurch kommt es, daß dort das Trockenverfahren eine Ausbildung erfahren hat, die der hier üblichen Arbeitsweise überlegen ist. Für die Trocknung eignen sich besonders die Spätsorten von Äpfeln, die vollreif, nicht überreif geerntet wurden, ferner Aprikosen, die nicht zu weich sein dürfen.

Die zulässige Höchsttemperatur liegt bei $t = 60$ bis 100° . Das untere Temperaturgebiet, zwischen 60 und 70° , wird bei der eigentlichen Trocknung unter allmählicher Steigerung der Temperatur erreicht. Besonders zuckerreiche Früchte, vor allem Trauben, ertragen Temperaturen bis etwa 85° . Das höhere Temperaturgebiet, zwischen 70 und 100° , kommt ausnahmsweise, z. B. bei Pflaumen während des Abdarrens, zur Anwendung und bewirkt die Entwicklung von Geschmacksstoffen und den Glanz der Ware. Die Luftdichtheit der Fruchthülle spielt hierbei insofern eine Rolle, als die dichte Haut von Kirschen und Pflaumen alsbald nach Beginn der Trocknung platzt, wenn sie mit einer Temperatur über 60° einsetzt.

Die Trockendauer steht in engem Zusammenhang mit dem angewandten Trockenverfahren. Apfelschnitten auf künstlich belüfteten, amerikanischen Darren werden z. B. während 5 bis 6 Stunden bei einer Gutstemperatur von etwa 50 bis 60° vorgetrocknet, danach gewendet und bei verstärkter Luftbewegung während weiterer 6 Stunden bei einer um etwa 10° höheren Gutstemperatur fertig getrocknet. Die Schichtstärke beträgt hierbei $0,12$ bis $0,15$ m. Gevierteilte Äpfel erfordern etwa die doppelte, ganze Äpfel die dreifache Zeit. Bei Verwendung von Kanaltrocknern mit einer Schichtstärke von $0,04$ m sinkt die gesamte Trockendauer für Apfelschnitten auf etwa die Hälfte. Für Pflirsiche und

Aprikosen schwankt die Trockenzeit bei Anwendung von Kanaltrocknern, je nach dem Wassergehalt, zwischen 5 und 15 Stunden, wenn mit etwa 45° vor- und mit etwa 60° fertiggetrocknet wird. In ähnlichen Grenzen bewegt sich die Trockendauer bei anderen Früchten. Bei Birnen, Preiselbeeren und Trauben liegt sie mit 15 bis 30 Stunden besonders hoch.

Bulgarische Pflaumen werden in Feueröfen während etwa 6 Stunden mit 40 bis 50° vorgetrocknet, daran schließt ein mehrfach unterbrochenes Trocknen mit stufenweise gesteigerter Temperatur zwischen 60 und 90° und Abkühlung der Früchte während der einzelnen Abschnitte. Das scharfe Abdarren unter Steigerung der Temperatur bis schließlich 100° dauert etwa eine halbe Stunde, der gesamte Trockenvorgang 24 Stunden. Ähnlich ist die Trocknung für amerikanische Pflaumen, bei denen jedoch die Behandlung auf Heißluftdarren und in Trockenkanälen vorgenommen und eine Temperatur von etwa 65 bis 70° nicht überschritten wird. Die Trockendauer beträgt hier je nach Größe 20 bis 30 Stunden.

Eine zuweit gehende Ausdehnung der Trockenzeit wirkt ungünstig, weil bei hohen Temperaturen die Früchte alsdann im eigenen Saft kochen.

Der Feuchtigkeitsgehalt des rohen Obstes liegt für Kernobst im mittel bei $\chi_r \approx 5,4$, bei Steinobst im nicht entsteineten Zustande bei etwa 3,4, ohne Stein gerechnet dagegen ebenfalls bei etwa 5,4. Für die zur Trocknung besonders geeigneten Heidelbeeren kann mit $\chi_r \approx 4,5$ gerechnet werden. Während die meisten Obstsorten auf einen Endfeuchtigkeitsgehalt $\chi_n \approx 0,1$ bis 0,15 getrocknet werden, liegt der Endfeuchtigkeitsgehalt bei stark zuckerhaltigen Obstarten höher, z. B. für Trauben und Pflaumen bei 0,25 bis 0,4, für Pfirsiche und Birnen bei 0,2 bis 0,3. Zur Beurteilung des richtigen Trockenheitsgrades dient als Regel die Vorschrift, daß getrocknete, in der Hand zusammengeballte Früchte beim Loslassen auseinanderfallen, und unter Druck keinen freien Saft aus der Schnittfläche austreten lassen, außerdem sich weich und samtig anfühlen sollen. Aprikosen und Pfirsiche sollen sich ledern anfühlen, Bananen klebrig und biegsam sein.

Um die Ungleichmäßigkeiten, die sich bei der Trocknung nicht vermeiden lassen, auszugleichen, wird das getrocknete Gut durch tägliches Wenden während längerer Zeit auf dem Lagerboden gemischt. Dieser soll auf einer gleichmäßigen Temperatur von etwa 20° gehalten und zur Abhaltung von Sonnenlicht und Insekten mit dicht schließenden Vorhängen versehen werden.

Die Vorbereitung der Früchte besteht in: Auslesen nach Güte und Größe, Waschen, Entkernen. Pflaumen werden zweckmäßig zur Entfernung der oberflächlich anhaftenden Wachsschicht und zum Öffnen der Hautporen zunächst in eine kochende Lösung mit 1 bis 1½% kaustischer Soda getaucht, Äpfel und Birnen vor der Entkernung geschält, Bananen, Kirschen, Trauben und Beeren vom Stengel gelöst. Die Teilung der Frucht, Äpfel in Scheiben oder Schnitze, Aprikosen, Pfirsiche und Birnen in Hälften, erfolgt unmittelbar vor Beginn des Trocknens, um den schädlichen Einfluß des Luftsauerstoffes abzukürzen. Hierzu gehört auch das Bleichen der zu trocknenden Äpfel durch Salz-

wasser oder Schwefeldampf. Das deutsche Gesetz beschränkt den zulässigen Gehalt der zu trocknenden Frucht an schwefliger Säure auf 0,125%.

Das Verhältnis des Gewichts von getrockneter zu roher Ware bewegt sich in den weiten Grenzen von 10 bis 40%, an deren Enden Äpfel bzw. Pflaumen mit Stein stehen.

Beim Trocknen befindet sich das Obst durchweg auf Horden, deren Belegung bei Beeren 4 bis 6, bei Äpfeln 6 bis 8, bei Aprikosen 8 bis 10, bei Birnen 10 bis 12, bei Pflaumen 12 bis 14 und bei Trauben 14 bis 16 kg/m² beträgt.

Das in Bulgarien weitverbreitete Trocknen der Pflaumen erfolgt in einfachen Dörröfen. Zwischen zwei Dörräumen ist der eigentliche holzgefeuerte Ofen angeordnet. Die Luft strömt über den Außenmantel, ehe sie in die Feuerräume eintritt. Auf jeder Seite können sechs Horden von 1 m Breite, 2,3 m Tiefe eingeschoben werden. In kleineren Betrieben werden häufig ähnliche Vorrichtungen (Mayfarth) angewandt, bei denen die Luft zur Vorwärmung um einen doppelmanteligen Ofen und danach über und durch die Horden geführt wird. Die heißeste Luft strömt hierbei zum Teil über das frisch eingebrachte, zum Teil über das fertig getrocknete Gut. Zu diesem Zweck werden die Horden in zwei Lagen angeordnet und laufen zunächst von der Feuerstelle im Gleichstrom mit dem einen Teil der Heißluft nach dem entgegengesetzten Ende, danach im Gegenstrom mit dem Rest der Heißluft nach der Feuerstelle zurück. Für mittlere Leistungen bewähren sich Mehrkammertrockner nach Abb. 213 und 214.

Für die Ausführung einfacher, zur Trocknung von Äpfeln dienender Darren durch die Farmer selbst, gibt die Landwirtschaftskammer der Vereinigten Staaten¹ die in Abb. 250 wiedergegebene Anweisung. Zur Heizung dient ein gußeiserner Ofen, der, zwecks gleichmäßiger Luftströmung und Ausnutzung der Strahlwirkung, eine unten von Öffnungen durchbrochene Ummauerung erhält, die sich kegelförmig bis nahe unter den Darrenboden fortsetzt. Die Abgase des Ofens werden durch ein Röhrennetz geleitet, das leicht ansteigend in den Kamin mündet und unterhalb des Darrenbodens liegt. Bemerkenswert ist die Anordnung des Daches, das auf der einen, für die Bedienung vorgesehenen Seite mit geringer, auf der entgegengesetzten Seite mit starker Neigung verläuft und den in ganzer Länge der Darre sich erstreckenden Abzug trägt. Er ist mit einer über seinen höchsten Punkt reichenden, unten mit Öffnungen versehenen Schutzwand umgeben, um den Wind zur Verbesserung des Zuges auszunutzen und den Regen über das Dach abzuführen. Bei der Wahl der Baustoffe ist auf die Empfindlichkeit des Gutes gegen fremde Gerüche Rücksicht zu nehmen. Insbesondere muß das für die Darre verwendete Holz frei von Geruch und Harz sein und darf sich unter dem Einfluß der Hitze nicht werfen oder splintern. In den Vereinigten Staaten wird whitewood oder basswood verwendet, das mehrmals mit sehr heißem Öl gestrichen wird. Nach der Inbetrieb-

¹ United States Department of Agriculture, Bulletin Nr 1141, 1923.

nahme wird die Ölung mehrmals jährlich wiederholt. Metalle als Baustoffe für das Gebäude und insbesondere das Dach sind, mit Rücksicht auf den ungünstigen Einfluß der Schwefeldämpfe, die sich bei dem der Trocknung vorausgehenden Bleichvorgang entwickeln, möglichst zu vermeiden.

Die Leistung einer Darre von der üblichen Größe 6×6 m wird mit 1000 bis 1500 kg frische Äpfel in 24 Stunden angegeben und eine Vereinigung mehrerer Darren, mindestens 4, empfohlen.

Für die Trocknung von Zwetschen, Pfirsichen, Aprikosen, Beeren, werden Trockenkanäle angewandt, die auch zur gelegentlichen Verarbeitung von Äpfeln dienen, bei ausschließlicher Trocknung von Äpfeln jedoch gegenüber den billiger arbeitenden Darren zurückstehen. Eine besonders einfache Bauweise ergibt sich aus Abb. 141. Die zweckmäßige Größe der Trockenkanäle wird mit etwa 7 m Länge, 2 m Höhe und 1 m Breite angegeben. Für Wände und Decke wird Holz oder verzinktes Eisen, für den Boden nur das letzte verwandt. Innerhalb der Kanäle laufen auf etwa 18 Bahnen übereinander jedesmal fünf Horden aus verzinktem Drahtgeflecht mit etwa 6 mm Maschenweite. Die gesamte Trockenfläche der Horden beträgt für jeden Kanal etwa 100 m^2 . Die Horden sind in den einzelnen Lagen so gestaffelt, daß die Trockenluft von unten nach oben auf der Eintrittseite abnehmenden, auf der Austrittseite zunehmenden freien Querschnitt findet und infolgedessen veranlaßt wird, gleichmäßig zwischen den einzelnen Reihen hindurchzustreichen und hierbei das Gut von beiden Seiten zu trocknen. Dieses wandert, der Neigung entsprechend, von oben nach unten und wird zunächst von der verhältnismäßig kalten und feuchten Trockenluft erfaßt.

Eine Verbesserung ergibt sich, wenn neben der natürlichen Luftbewegung ein Lüfter wirkt, der die Trockenluft am höchsten Punkte des Kanalbodens absaugt und über den Ofen und die Ofenrohre in den Eintrittschlitz am tiefsten Ende des Kanals zurückdrückt. Zur Regelung von Frisch- und Umluft sind hierbei Klappen an den Luftzutrittsöffnungen zu der Feuerung und dem Rücksaugschlitz angeordnet.

Um das Festkleben des Gutes an den Hordendrähten zu verhindern, werden sie vor jeder Benutzung mit einem leicht eingefetteten Lappen abgerieben.

Während die Trockner der Abb. 141 und 250 dazu bestimmt sind, das Obst auf der Plantage selbst in einfachen Anlagen kleiner und mittlerer Leistung zu verarbeiten, kommen für die industrielle Trock-

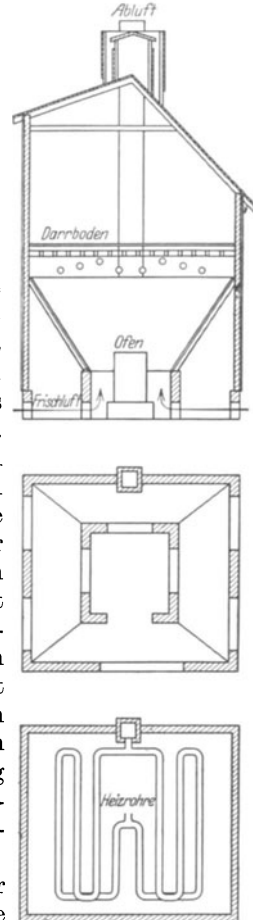


Abb. 250. Amerikanische Äpfeldarre.

nung vervollkommnete Einrichtungen zur Anwendung, bei denen die Wirtschaftlichkeit der Einfachheit voransteht, und zwar Kammer-trockner, bei denen die Trockenluft parallel durch die übereinander angeordneten Horden streicht, Kanaltrockner, durch die auf Wagen gestapelte Horden wandern, während die Luft entgegenströmt und häufig Hilfslüfter den geradlinigen Durchgang der Luft durch Querlauf verbessern, schließlich Bandtrockner, insbesondere für Trauben.

k) Gemüse. Der Trocknung von Gemüse kommt für die Versorgung des Heeres mit Dauerware besondere Bedeutung zu. Mangelhafte Verfahren in der Zeit des Weltkrieges haben dem Markte ungeeignete Erzeugnisse zugeführt und die Trocknungsindustrie geschädigt. Daneben besteht am allgemeinen Lebensmittelmarkt Nachfrage für hochwertige Erzeugnisse. Gemüse für menschliche Ernährung soll eine gleich pflegliche Behandlung erfahren wie Obst. Dagegen ist für Futterpflanzen in Großbetrieben die einfache Behandlung mit Feuergas-Luftgemischen statthaft.

Die zulässige Höchsttemperatur liegt mit $t \approx 50$ bis 70° in den gleichen Grenzen wie bei Obst. Auch bei Gemüse schließt sich an die längere Vortrocknung mit niedrigen Temperaturen das Abdarren mit höherer Temperatur während kürzerer Zeit an.

Die Trockendauer beträgt für Kohl, grüne Bohnen, enthülste Erbsen, geschnittene Karotten, Rüben in Schnitzeln und Tomaten in Scheiben etwa 8 bis 12 Stunden, für Spinat 5 bis 7 Stunden. Werden bei Sellerie und Kohl Blätter und Rippen getrennt, so erfordern die ersten 4 bis 7, die letzten 8 bis 10 Stunden.

Die Hordenbelegung bewegt sich zwischen $0,8$ und $1,5 \text{ kg/m}^2$.

Werden Blätter mit unmittelbarer Beheizung, unter Anwendung einer Mischlufttemperatur am Eintritt von nicht über 100° , verarbeitet, so wird die Trockenzeit erheblich, bis auf etwa 3 Stunden, abgekürzt.

Der Anfangsfeuchtigkeitsgehalt ist sehr verschieden. Er liegt mit $x_r \approx 16,5$ bei Kopfsalat besonders hoch, beträgt jedoch im allgemeinen, z. B. bei Wirsing, Kohl, Spinat, Rüben, grünen Bohnen, Erbsen und Zwiebeln, $x_r \approx 6$ bis 8 . Futterrüben werden bei Verarbeitung zu Rübenschnitzeln auf der Schnitzelpresse bis auf einen Feuchtigkeitsgehalt von $x_r \approx 2,5$ entfeuchtet. Der Endfeuchtigkeitsgehalt soll $x_h \approx 0,16$ bis $0,175$ nicht überschreiten. Wegen der Wiederaufnahme von Feuchtigkeit während der Lagerung ist bei offener Lagerung eine Trocknung unter $x_h \approx 0,12$ zwecklos. Bei der meist üblichen Anwendung geeigneter Hüllen ist ein niedrigerer Endfeuchtigkeitsgehalt von $x_h \approx 0,05$ bis $0,1$ anzustreben, weil er bessere Haltbarkeit verbürgt.

Das zu trocknende Gemüse bedarf im allgemeinen einer Vorbereitung durch Putzen, Waschen, Zerkleinern.

Lupinen müssen vor der Trocknung entbittert werden. Bei den zu Futtermitteln bestimmten Feldfrüchten beschränkt sich die Vorbereitung meist auf eine weitgehende Zerteilung.

Die getrocknete Ware bedarf in der Regel einer Abkühlung unter mehrmaligem Umschaufeln. Bei blattförmigem Gemüse, wie Spinat, werden die Blätter sperrig und spröde, wenn, wie erforderlich, die

Trocknung bis zur genügenden Entfeuchtung der Rippen fortgesetzt wird. Um die Ware für den Versand zusammenpressen zu können, ist es nötig, die Blätter nach der Trocknung in einem Strom kühler, feuchter Luft so viel Feuchtigkeit wieder aufnehmen zu lassen, daß sie weich werden.

Als Trockenvorrichtungen kommen die für die Obstverarbeitung angewandten Horden, Darren und Kanaltrockner in Betracht.

Einen besonders breiten Raum nimmt die Trocknung von Rüben und Rübenblättern zu Futterzwecken ein. Hierbei darf die Temperatur des Trockengutes auf 100° gesteigert werden, um die geforderten großen Leistungen mit einem bei dem geringen Wert des Erzeugnisses vertretbaren Aufwand zu erzielen. Die Verarbeitung erfolgt fast ausnahmslos unter Anwendung von Feuergasen in Trommeltrocknern oder Abgasen in Muldentrocknern, etwa nach Abb. 199.

Künstlich getrocknetes Grünfutter enthält nach Ruths¹ bei starker Stickstoffdüngung und frühem Schnitt 18 bis 30 % Eiweiß, stellt daher ein hochwertiges Futtermittel dar. Der hohe Eiweißgehalt verlangt schonendes Trocknen. Geeignet scheint der mehrlagige Bandtrockner. Ein Versuch, bei dem die Luft mit 160° ein-, mit etwa 40° austrat und die Bänder im Gegenstrom nacheinander durchlief, ergab gute Ware von frischer Farbe mit einem Wassergehalt $\gamma_0 \approx 0,1$. Trotz der hohen Luftanfangstemperatur blieb die Temperatur des Gutes unter der zulässigen Grenze von 80°.

Die Verarbeitung von Zuckerrüben auf Zucker muß innerhalb weniger Wochen erfolgen, um Verluste an Zuckergehalt durch Atmung zu vermeiden. Versuche, durch Trocknung der geschnitzelten Rüben die Verarbeitungszeit zu verlängern und außerdem den bei ungünstiger Witterung auftretenden Zersetzungsverlust zu vermeiden, wurden alsbald als unwirtschaftlich aufgegeben. Neuerdings hat de Vecchis diesen Gedanken wieder aufgegriffen und ein Verfahren entwickelt, bei dem durch Anwendung besonders niedriger Temperaturen Zuckerverluste vermieden werden sollen. Die Trocknung erfolgt durch eine Mischung von Feuergasen und Frischluft in drei Abschnitten, wobei jedesmal die Trockenluft durch Zusatz von heißen Gasen und Außenluft eine Auffrischung erfährt. Der Trockner ist als mehrlagiger Bandtrockner ausgebildet. Nach dem Bericht von Spengler² über eine Prüfung der bei Oxford aufgestellten Versuchsanlage dauert die Trocknung etwa eine Stunde. Die Temperatur der Schnitzel bewegt sich um 60 bis 70°. Die austretenden Schnitzel besitzen einen Wassergehalt von etwa 0,08, einen Zuckergehalt von 60 bis 70% und eignen sich zur unmittelbaren Herstellung von starken Rohsäften in Diffusionsbatterien. Der Gehalt an Invertzucker entspricht etwa dem der frischen Schnitzel. Der Nachteil des Verfahrens besteht vorläufig noch darin, daß die Rohsäfte eine besondere Reinigung fordern, um Weißzucker von befriedigender Beschaffenheit zu erhalten. Auch ist die Frage der Wirtschaftlichkeit noch ungelöst.

¹ Ruths: Künstliches Trocknen in der Landwirtschaft. Z. V. d. I. 1931.

² Spengler: Etwas über das Oxford-Verfahren. Z. angew. Chem. 1930.

Rübenschnitzel entfallen bei der Herstellung von Rübenzucker als ausgelagte Abfälle und werden nach mechanischer Vorpressung zu Trockenschnitzeln verarbeitet. Hierfür dienen Muldentrockner etwa nach Abb. 199 oder Trommeltrockner etwa nach Abb. 173 unter vorzugsweiser Anwendung von Abgasen als Heizmittel. Für die letzte Ausführung ergaben sich nach Mitteilung der Herstellerin folgende Leistungs- und Verbrauchsziffern:

Naßgutmenge	$\mathcal{G}_x(1 + \varkappa_r) = 5063$ kg/h
Feuchtigkeitsgehalt vor der Trocknung	$\varkappa_r = 5,25$
Trockengutmenge	$\mathcal{G}_x(1 + \varkappa_h) = 900$ kg/h
Feuchtigkeitsgehalt nach der Trocknung	$\varkappa_h = 0,11$
Trockenleistung	$\mathcal{G}_x(\varkappa_r - \varkappa_h) = 4163$ kg/h
Temperatur der eintretenden Abgase	$t_v = 390^\circ$
„ „ austretenden „	$t_h = 90^\circ$
„ des Naßguts	$t_r = 15^\circ$
„ „ Trockenguts	$t_h = 60^\circ$

Die Abgase entstammten einer Feuerung, in der 7500 kg/h Braunkohle mit einem Heizwert von 2700 kcal/kg verbrannt wurden; ihr Kohlensäuregehalt betrug 10 %.

1) **Tabak.** Beim Tabak erstreckt sich die Trocknung auf das frisch geerntete Blatt, den halbfertigen Wickel und das fertige Erzeugnis. Der Wassergehalt beträgt im Rohzustand $\varkappa_r \approx 4$, er soll auf einen Wert $\varkappa_h \approx 0,25$ bis 0,33 gebracht werden. Als zulässige Höchsttemperatur kann $t \approx 50^\circ$ gelten.

Das Trocknen des Rohtabaks erfolgt fast ausnahmslos im natürlichen Luftzug. Für die Zigarrenfabrik werden hochwertige künstliche Trockenvorrichtungen um so notwendiger, je mehr die Einführung von Fließarbeit alle Teilvorgänge zwangsläufig kuppelt. Die häufig zu findenden behelfsmäßigen Ofentrockner eignen sich hierfür nicht. Sie wirken hauptsächlich durch Strahlwärme mit ungeeignet hohen Temperaturen. Bei der Warmlufttrocknung ergibt zu rasches Trocknen grüne Flecken, zu langsames Trocknen eine ebensowenig erwünschte Dunkelfärbung. Meist läßt sich die für die Zigarrenfabrik unentbehrliche Befeuchtungsanlage nach Abb. 251 für die Trockenvorrichtung mitausnutzen. Die Befeuchtung erfolgt im dargestellten Falle nach dem Verfahren des Verfassers (D.R.P. 491034) durch Mischung zweier Luftströme im Raum. Einer besitzt eine möglichst niedrige, der andere eine höhere Temperatur, beide sind ganz oder nahezu gesättigt. Die Aufbereitung der Luftströme erfolgt in zwei Wetterfertigern, von denen der kalt arbeitende nach Abb. 252 die Frischluft für die Trockenkammer liefert.

m) **Kaffee.** Das Trocknen von Kaffee erstreckt sich in Südamerika auf die rote Kirsche sofort nach dem Pflücken, während in Java und Sumatra eine Vorbereitung durch Entfleischen, Waschen und Fermentieren der Trocknung vorausgeht.

Der Feuchtigkeitsgehalt beträgt nach den von Knaus¹ mitgeteilten Beobachtungen der Prüfstation Malang für die frische, rote Kaffee-

¹ Knaus: Enke gegevens, welke bij de Koffiebereiding van nut kunnen zijn. De Bergcultures 1929.

kirsche $\chi_x \approx 1,5$ bis $1,85$, für entfleischten und gewaschenen Kaffee $\chi_x \approx 1,2$. Durch Schleudern läßt sich der Feuchtigkeitsgehalt des gewaschenen Kaffees auf $\chi_x \approx 0,7$ bis 1 vermindern. In der Regel erfolgt statt dessen eine natürliche Vortrocknung auf Austropfböden, die der Kaffee mit einem Feuchtigkeitsgehalt von $\chi_x \approx 0,5$ bis 1 verläßt. Die getrocknete Kaffeebohne ist von dem dünnen Silbervlies umgeben und besitzt einen Endfeuchtigkeitsgehalt von $\chi_h \approx 0,06$. Nach Entfernung des Vlieses und Ausgleich mit der Umgebung besitzt der sogenannte „Marktkaffee“ einen Feuchtigkeitsgehalt von etwa $0,09$. Über das hygroskopische Verhalten, das bei Kaffeekirschen und fermentiertem

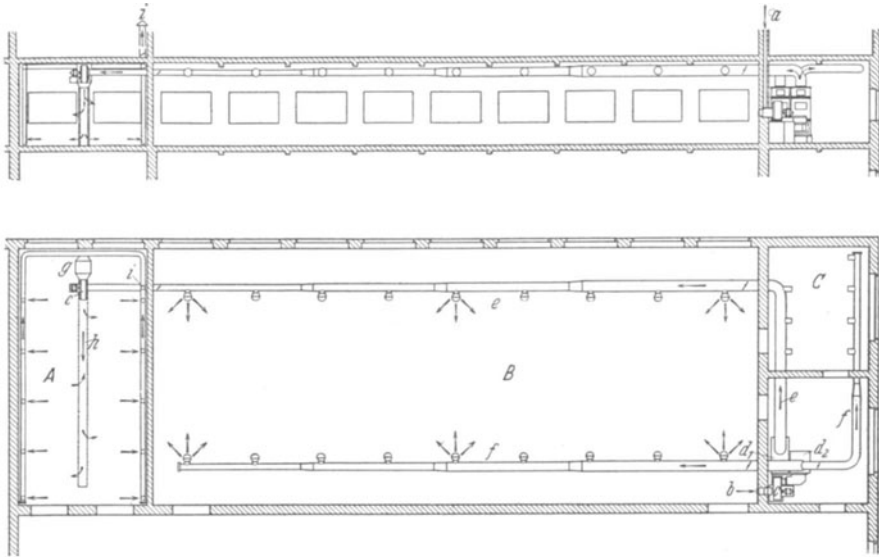


Abb. 251. Trocken- und Befeuchtungsanlage für Zigarrenfabrik.

A Trockenraum, B Arbeitsraum, C Befeuchtungsraum.

a Frischluft, b Umluft, c Lüfter, d Wetterfertiger (d_1 kalt, d_2 warm arbeitend), e kalte Luft, f warmfeuchte Luft, g Lüfterhitzer, h Warmluft, i Abluft.

Kaffee übereinstimmt, gibt die Abb. 3 näheren Aufschluß. Das Trocknen der Kaffeekirsche erfolgt in der Regel auf natürlichem Wege in der Sonne und dauert mehrere Tage.

Der entfleischte und gewaschene Kaffee wird in der Hauptsache noch in den Trockenhäusern bearbeitet, von denen Abb. 221 ein bewährtes Beispiel darstellt. Die Trocknung beginnt mit einer Lufttemperatur von 90 bis 100° . Das letzte Drittel der Feuchtigkeit wird bei einer gesenkten Temperatur von 50 bis 60° ausgetrieben. Um ein gleichmäßiges Erzeugnis von guter Farbe und einwandfreiem Geruch zu erzielen, ist außer der Erhaltung der richtigen Temperaturfolge ein ständiges Umarbeiten des Kaffees erforderlich. Wie früher erwähnt, arbeiten diese Trockenhäuser überraschend wirtschaftlich und verbrauchen für 1 kg Marktkaffee etwa 1 kg Scheitholz von etwa 3600 kcal/kg unterem Heizwert. Die Trockenzeit beträgt 22 Stunden.

Neben diesen Trockenhäusern gewinnen in letzter Zeit mechanische Vorrichtungen, wie Trommeltrockner, Rieseltrockner und Bandrockner Bedeutung. Die Trockenzeit nimmt hierbei auf 8 bis 12 Stunden ab. Ein abschließendes Urteil über die Wirksamkeit und Wirtschaftlichkeit derartiger Trockner läßt sich noch nicht fällen. Versuche, mit Feuergasen zu trocknen, sind vereinzelt durchgeführt worden, haben aber nicht zum Erfolg führen können, weil das Trocknen im Gegenstrom vorgenommen wurde, die Poren sich daher vorzeitig schlossen und die getrocknete Bohne nach einiger Zeit im Innern verschimmelte.

n) Flachs. Die Temperatur ist mit $t \approx 55^\circ$ begrenzt, da Flachs bei höheren Temperaturen infolge Zersetzung des Säuregehaltes stumpf und spröde wird. Der natürliche Feuchtigkeitsgehalt von $\chi \approx 2,5$ wird durch Vortrocknen in freier Luft auf etwa $\chi_r \approx 0,2$ bis $0,25$ vermindert und in der Trockenanlage auf $\chi_b \approx 0,1$ gebracht. In anderen Fällen erstreckt sich die künstliche Trocknung auf den nassen Röstflachs. Sie erfolgt in Gegenstromkanaltrocknern mit stufenweiser Nachwärmung bei einer Trockenzeit, die im mittel 3 Stunden beträgt.

o) Holz. Bei der Trocknung von Holz sind die natürlichen Eigenschaften insofern von Einfluß, als wertvolle Bestandteile, wie Holzöle, Harze und Terpene, erhalten bleiben sollen. Durch die Erwärmung wird Harz weniger löslich. Der im Saft enthaltene Albumin-, Stärke- und Zuckergehalt führt bei Wiederaufnahme von Feuchtigkeit nach der Trocknung zu Gärungserscheinungen und Zerfall, wird daher meist durch den Auslaugungsvorgang beim Dämpfen des Holzes vor der Trocknung entfernt. Bei der Behandlung von verleimten Furnierholz ist die Rücksicht auf die Verleimung meist weitergehend als die auf das verwandte Holz und daher maßgebend.

Die Mannigfaltigkeit der verschiedenen zur Trocknung gelangenden Hölzer hinsichtlich Form, Stärke, Größe und Art ist besonders groß. Um trotzdem gleichmäßige Ergebnisse bei der nicht einfachen künstlichen Trocknung zu erreichen, soll sie sich stets nur auf Gruppen mit Gut gleicher Art erstrecken. Die Unterscheidung hat hierbei von verschiedenen Gesichtspunkten auszugehen:

Frisch geschnittenes Holz wird im allgemeinen vor der Trocknung durch unmittelbare Berührung mit Dampf behandelt. (Bei besonders starken Hölzern wird die Dämpfung bisweilen in Dämpfkesseln vorgenommen, hierbei zunächst die Luft durch Luftpumpen aus den Poren gezogen, darnach unter Druck gedämpft.) Die Dämpfung soll vor allem ein Reißen und Verschalen durch zu rasch einsetzende Trocknung verhindern. Sie erfolgt bei einer Temperatur, die etwa 15° höher liegt als die Anfangstemperatur beim folgenden Trocknen. Bei Hartholz wird die Dämpfung während der Trocknung mehrfach wiederholt, um ein Übertrocknen der Oberfläche zu vermeiden. Die Dauer der Dämpfperioden nimmt allmählich ab. Die zwischen die Dämpfung eingeschalteten eigentlichen Trockenabschnitte verlaufen unter allmählicher Verringerung von Temperatur und Feuchtigkeitsgrad der Luft. Bei lufttrockenem Holz, dessen Oberfläche geworfen ist, würden die Oberflächenrisse durch Dämpfen noch erweitert, daher setzt hier im allge-

meinen die eigentliche Trocknung sofort ein. Sie beginnt zweckmäßig mit einem Luftfeuchtigkeitsgrad, wie er im Gleichgewichtszustand dem Feuchtigkeitsgehalt der Oberfläche entspricht, und mit einer niedrigen Lufttemperatur, die erst allmählich eine Steigerung erfährt. Während das Dämpfen grünen Holzes bei gesättigter Luft vor sich geht, genügt beim Nachdämpfen zwischen den einzelnen Trockenabschnitten ein Luftfeuchtigkeitsgrad, der merklich oberhalb des Gleichgewichtswertes liegt. Die Temperatur muß beim Dämpfen höher liegen als die Lufttemperatur beim anschließenden Trocknen. Eine besondere Art stellt Floßholz dar, das durch Wasser ausgelaugt ist. Es verhält sich bei der Trocknung günstig, verlangt jedoch ein besonders langsames Einsetzen der Erwärmung, um Rißbildung zu vermeiden.

Unterschieden nach ihrer Härte, stellen z. B.: Linde und Lärche weiche, Tanne, Fichte und Kiefer mittelharte, Ahorn, Esche, Ulme, Eiche und Buche harte Hölzer dar.

Wichtig ist auch das Schwindmaß des Holzes, besonders in Richtung des Halbmessers gerechnet, da mit ihm die Gefahr der Rißbildung und damit die zu fordernde Trockenzeit zunimmt. Es liegt z. B. unter 2% bei Mahagoni, über 5% bei Kastanie, Birne, Buche und Nuß, zwischen 2 und 5% und etwa in der angeführten Folge zunehmend bei Lärche, Fichte, Pappel, Tanne, Erle, Ulme, Kiefer, Eiche, Ahorn, Linde, Esche, Birke.

Eine unbegrenzte Möglichkeit liegt in den Stärkenabmessungen und der Formgebung des Holzes. Besitzen die Hölzer die Form von Brettern, Bohlen und Balken, so werden die einzelnen Lagen durch zwischengeschobene Latten getrennt. Diese bewirken eine örtliche Verzögerung der Trocknung. Anordnung der ersten Latten an den Stirnenden bedeutet daher eine Schutzmaßnahme, um das hier in besonderem Maße drohende Reißen zu vermeiden. Da die zwischengelegten Latten untereinander angeordnet sind, muß Vorsorge getroffen werden, daß der Luftdurchgang frei bleibt. Strömt daher die Trockenluft in einem Kanaltrockner längs, so sollen die Bretter quer, die Latten längs laufen, umgekehrt ist die Stapelung vorzunehmen, wenn die Luftbewegensenkrecht zur Fahrtrichtung erfolgt. Bei der Stapelung empfiehlt es sich, die stärkeren Hölzer unten, die schwächeren oben anzuordnen und die Innenseite nach unten zu richten. Bei Querstapelung von Brettern besitzt der Trockenraum in der Regel eine durch die Brettlänge bestimmte Breite; bei Längsstapelung verlaufen meist zwei Schienenstränge nebeneinander und erlauben zwei verschiedene Arten von Hölzern mit verschiedener Trockenzeit zu verarbeiten.

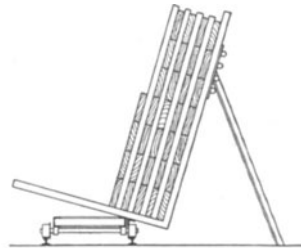


Abb. 252. Stapelwagen (Kiefer).

Durch Hochkantstapelung entfällt die Notwendigkeit, die Luft im Trockenraum in waagerechte Richtung umzulenken und der natürlichen Luftbewegung Zwang anzutun. Um hierbei die Stapelarbeit abzukürzen, wird nach Abb. 252 (Kiefer) das Wagengestell schräg gestellt, der Stapel

durch Schienen und Ketten zusammengezogen und schließlich das Wagengestell in die richtige Lage zurückgeführt.

Über die zulässige Temperatur schwanken die Angaben außerordentlich, offensichtlich deshalb, weil sie in der Regel auf die am trockenen Thermometer beobachtete Lufttemperatur bezogen werden, die nur beim Gegenstromtrockner die Höchsttemperatur des Holzes selbst bedingt. Wird diese bestimmt, so stellt für Weichholz $t \approx 70^\circ$, für Hartholz $t \approx 85^\circ$ die obere Grenze dar. Der mit Phosphorsäure und Ammoniumphosphat imprägnierte Holzdraht zur Zündholzherstellung wird bei Temperaturen über 60° braunfleckig. Bei verleimten Furnierhölzern liegt die Höchsttemperatur mit Rücksicht auf die Verleimung bei etwa 30° , also besonders niedrig.

Die Trockenzeit beträgt bei der natürlichen Trocknung mehrere Jahre. In der Möglichkeit, sie bei der künstlichen Trocknung erheblich herabzusetzen, liegt deren wirtschaftliche Bedeutung. Ganz allgemein ist auch hier die Trockendauer nach der Empfindlichkeit des Gutes abzustufen, die zahlenmäßig einmal durch das Schwindmaß, dann durch die Härte erfaßt wird. Für durchschnittliche Verhältnisse beträgt sie bei nachts unterbrochenem Betriebe etwa 5 bis 10 Tage für Hölzer, deren Stärke 2,5 cm nicht überschreitet, und nimmt bis auf 14 bis 30 Tage mit wachsender Stärke zu, wobei die längste Dauer für etwa 10 cm starke Bohlen gilt. Je dicker die Hölzer sind, um so mehr äußert sich der Unterschied zwischen Hart- und Weichholz in der Trockendauer. Während sie sich bei 1 cm dicken Hölzern kaum unterscheidet, sinkt sie z. B. für 5 cm Stärke bei Weichholz auf etwa die Hälfte der für Hartholz erforderlichen Zeit. Für Furniere mit dreifacher Verleimung kann eine Trockenzeit von 12 bis 17 Stunden angenommen werden, die bei siebenfacher Verleimung auf 20 bis 40 Stunden ansteigt. Durch besondere Verfahren scheint Abkürzung all dieser Zeiten auf die Hälfte möglich. Noch darunter zu gehen, gelingt meist nur auf Kosten der Güte.

Für das Trocknen von Holz im Friberg-Vakuumtrockner bei einem Feuchtigkeitsgehalt $x_t = 0,7$ zu Anfang, $x_b = 0,1$ am Ende gibt die Herstellerin die Trockendauer für Fichte und Kiefer von 2,5, 5 und 7,5 cm Stärke zu 25, 49 und 74 Stunden, für Eiche von 2,5, 5 und 7,5 cm Stärke zu 40, 66 und 102 Stunden an.

Der Feuchtigkeitsgehalt ist bei Floßholz mit $x_t \approx 1,5$ am höchsten. Er kann im Mittel für Nadelholz im frischgeschnittenen Zustande zu $x_t \approx 1,2$, im waldtrockenen Zustande zu $x_t \approx 0,55$ angenommen werden. Für Laubholz beträgt er im frischgeschnittenen Zustande $x_t \approx 0,7$, im waldtrockenen Zustande $x_t \approx 0,43$. Der Feuchtigkeitsgehalt ist verschieden verteilt, in Splintholz ein Mehrfaches desjenigen in Kernholz. Das hygroskopische Verhalten geht aus Abb. 10 hervor. Der Feuchtigkeitsgehalt im hygroskopischen Punkt kann zu $x_t \approx 0,26$ für mittlere Verhältnisse angesetzt werden. Beim Verleimen von Furnieren geht die hohe Feuchtigkeit des Leims in das Holz über. Der Durchschnittsfeuchtigkeitsgehalt hängt mit der Anzahl der Leimschichten zusammen und kann bei dreifacher Verleimung zu $x_t \approx 0,14$ bis

0,16, bei fünffacher Verleimung zu $\zeta_r \approx 0,16$ bis 0,22, bei siebenfacher Verleimung zu $\zeta_r \approx 0,22$ bis 0,25 angenommen werden. Der Endfeuchtigkeitsgehalt soll bei Holz, das bei seiner späteren Verwendung der äußeren Umgebung ausgesetzt ist, etwa dem Gleichgewichtszustand der Lufttrockenheit, bei Nadelholz $\zeta_h \approx 0,175$, bei Laubholz $\zeta_h \approx 0,22$, entsprechen. Für Hölzer, die zur Ausstattung trockener Räume (Bodenbelag beheizter Wohnungen, feine Möbel, Umbau von Trocknern) oder zur Benutzung in tropischer Gegend bestimmt sind, muß die Trocknung bis auf einen etwa halb so hohen Endfeuchtigkeitsgehalt fortgesetzt werden. Im letzten Falle besteht besonders an den Stirnholzflächen während der Zwischenlagerung die Gefahr der Feuchtigkeitsaufnahme und, hieraus folgend, des Werfens, Verziehens oder Reißens. Bei Furnierhölzern wird mit einem Endfeuchtigkeitsgehalt von $\zeta_h \approx 0,1$ stets unter das Maß der Lufttrockenheit gegangen und der Gefahr der nachträglichen Feuchtigkeitsaufnahme durch Aufbringung undurchlässiger Schichten, Lackierung u. dgl., vorgebeugt. Der Endfeuchtigkeitsgehalt ist insofern von Bedeutung, als nach Abb. 51 die Festigkeit mit zunehmender Trockenheit wächst. Soll das Holz als Wärmeschutzmittel verwandt werden, so spielt der Feuchtigkeitsgehalt eine große Rolle, weil mit ihm die Wärmeleitfähigkeit stark zunimmt.

Für die Durchführung des Trockenvorganges im einzelnen haben die Arbeiten des Landwirtschaftlichen Ministeriums der Vereinigten Staaten wertvolle Grundlagen geschaffen. Sie gipfeln in der Aufstellung von Trockentafeln. Übertragung in das $i-x$ -Bild gibt ihnen erst volle Anschaulichkeit. Bezüglich der Einzelheiten sei auf die Berichte des Verfassers¹ verwiesen, denen die Abb. 253 und 254 entnommen sind. Sie gelten für Hart- bzw. Weichholz. Die Trocknung verläuft in Richtung der Pfeile mit abnehmendem Feuchtigkeitsgrad der Luft. Zu den Knickpunkten jeder Kurve sind die ζ -Werte angegeben, bei deren Erreichung der Luftzustand entsprechend der Lage des Punktes im $i-x$ -Bild zu regeln ist. In Abb. 254 gilt jede der Kurven für mehrere verschiedene Arbeitsverfahren. Zusammengehörige Werte sind jeweils gleichartig (offen, Klammern verschiedener Form) gekennzeichnet. Die hieraus sich ergebenden Änderungen der Luftbeschaffenheit haben sich für die beigeschriebenen Holzarten bewährt.

Für die Holz Trocknung kommen Kammern und Kanäle in Betracht. Kammern eignen sich für die Behandlung von Brettern, Bohlen und Kanthölzern, außerdem für das empfindliche Tür- und Fensterholz, weil sie eine Berücksichtigung der Eigenart in besonderem Maße ermöglichen. Kanaltrockner kommen für die Verarbeitung von Hölzern in Betracht, die, wie Fußbodendielen, unter sich nach Art und Abmessung vollständig gleich sind. Sie dürfen nicht zu kurz sein, um an verschiedenen Stellen verschiedene Luftbeschaffenheit aufrechterhalten zu können.

Für Trockenkammern empfiehlt Daqua eine Länge, um zwei Bretter hintereinander zu stapeln, eine Breite von nicht über 4 m, und eine

¹ Die Holz Trockentafeln der Forstdienstabteilung des Landwirtschaftlichen Ministeriums der Vereinigten Staaten von Amerika. Ges.-Ing. 1927 u. 1930.

Höhe von etwa 2,5 m. Das Bild eines Kammertrockners für Holz, der mit natürlicher Luftbewegung arbeitet, gibt Abb. 218. Das Holz wird zunächst mit Dampf durchwärmt, darauf wirkt die Trockenluft in anfangs gesättigtem, allmählich trocknerem Zustand.

Der Kammertrockner nach Abb. 255 (Moore) setzt eine Stapelung voraus, die den Kern keilförmig freiläßt. Der Luftumlauf wird durch Dampfdufen beeinflusst. Das Verfahren ist daneben durch die Umkehrbarkeit des Umlaufes gekennzeichnet. Zu Beginn streicht die Luft seit-

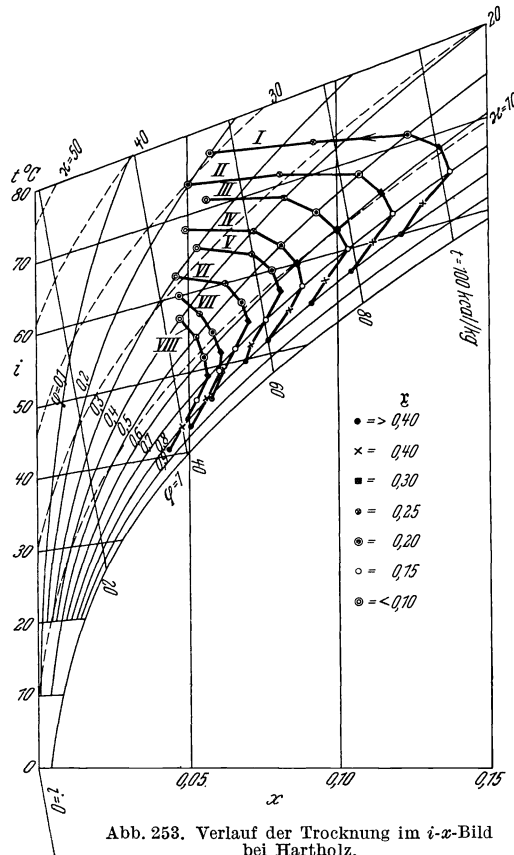


Abb. 253. Verlauf der Trocknung im i - x -Bild bei Hartholz.

Linienzug	Für Harthölzer bis 4 cm Stärke
I	Birke, Pappel
II	Esche, Kastanie, Ulme, Weide
III	Buche, Ahorn
IV	Mahagoni
V	Buchs, Kirsch, Nuß
VI	Eiche aus nordischem Hochwald
VII	Eiche aus nordischem Tiefwald oder südlichem Hochwald
VIII	Eiche aus südlichem Tiefwald

lich zur Verteilung auf, in der Mitte nieder. Sobald der Stapel vollständig durchwärmt ist, strömt die Luft im freien Stapelkern aufwärts und außen abwärts. Dementsprechend blasen von den außen sitzenden Dampf-
düsen zunächst die unteren nach oben, danach die oberen nach unten.

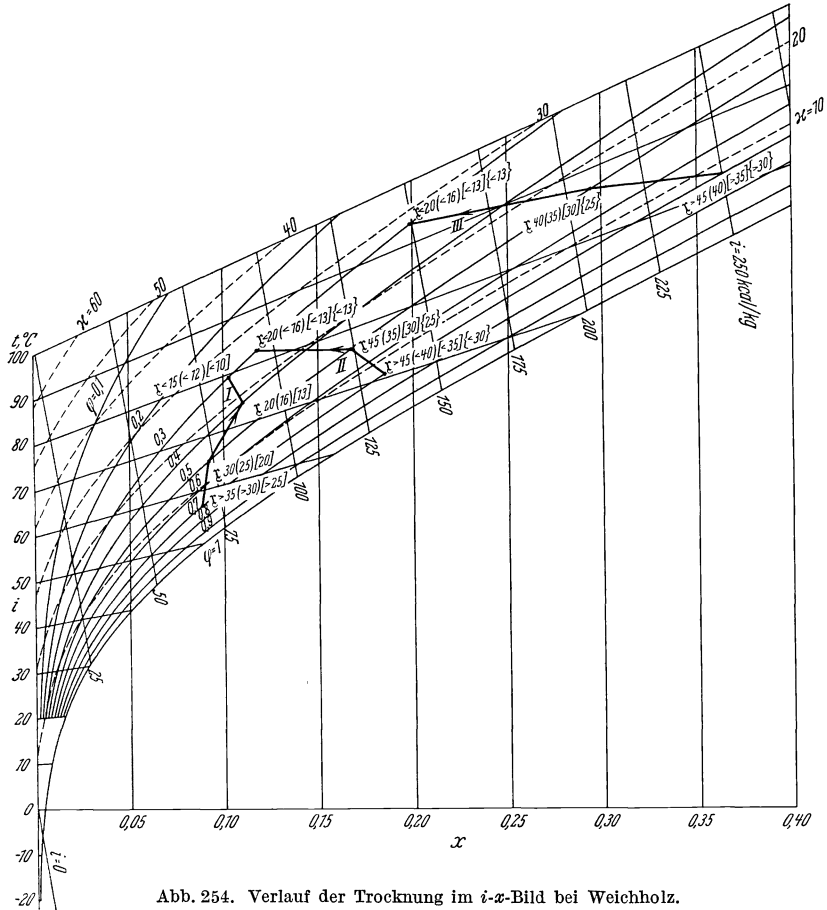


Abb. 254. Verlauf der Trocknung im *i-x*-Bild bei Weichholz.

Linienzug	Zahlen	Weichhölzer	Stärke
I	offen	Zypresse, Tanne	6,5 bis 7,5 cm
	()	Lärche, norwegische Fichte	„
	[]	Edeltanne	„
II	offen	Zypresse, Weißtanne	2,5 bis 4 cm
	()	Zypresse	4,5 bis 5,5 cm
	[]	Lärche	„
III	{ }	Douglas-Tanne	„
	offen	Tanne	2,5 bis 4 cm
	()	„	4,5 bis 5,5 cm
	[]	Edeltanne	2,5 bis 4 cm
	{ }	„	4,5 bis 5,5 cm

Bei dem Kammertrockner der Abb. 115 wird die Luft an tiefster Stelle des Trockenraumes weggeführt. Die Lufterwärmung erfolgt mittelbar durch Feuergase. Um mit mäßigen Lüftergrößen auszukommen, wird die Luft auf 160 bis 200° erwärmt, durch die Düsenrohre jedoch mit soviel Raumluft gemischt, daß die Temperatur im Trockenraum etwa 106 bis 108° beträgt. Hierbei trocknen nach Angabe der Herstellerin 2,5 cm starke Weichholz Bretter in 24 Stunden, 2,8 cm starke Hartholz Bretter in 50 bis 56 Stunden. Bei dem in Abb. 256 dargestellten Doppelkammertrockner (MAN) werden die Luftkanäle durch Doppelwände gebildet, die in der Längsrichtung der Kammer verlaufen. Die Wärme des in der Heizvorrichtung gebildeten Niederschlagwassers wird in Rippenrohren ausgenutzt, die unterhalb des rostartigen Kammerbodens liegen. Der Eigenart der Holz-trocknung Rechnung tragend, sind die Kammern mit Dämpfrohren ausgestattet. Das zur Trocknung bestimmte Holz wird entweder unmittelbar vom Kammerboden aus hochgestapelt oder auf Wagen fertig gestapelt eingeführt.

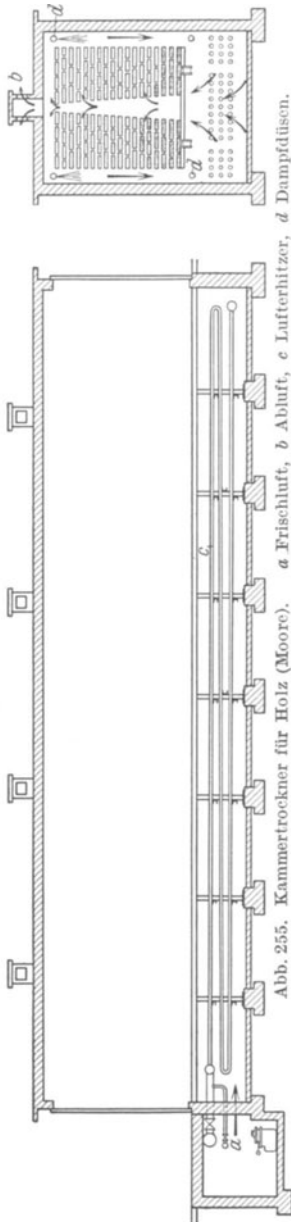


Abb. 255. Kammetrockner für Holz (Moore). a Frischluft, b Abluft, c Luftheizer, d Dämpfdüsen.

Über die zweite Hälfte des Trockenvorganges von 2,5 cm starken Fichtenholz Brettern gibt Abb. 257 (MAN) Aufschluß. Beachtenswert ist, daß trotz erheblicher Schwankungen der Heißlufttemperatur t_v der Feuchtigkeitsgrad φ_h der Abluft mit fortschreitender Trocknung ziemlich gleichmäßig sinkt. Die Führung des Trockenvorganges trägt damit der zunehmenden hygroskopischen Eigenschaft des Gutes Rechnung. Für einen zweiten Versuch gibt Abb. 258 (MAN) die Veränderung des Raumgewichtes von 3,3 cm starken Eichenbrettern, Abb. 259 (MAN) die Abnahme des Feuchtigkeitsgehalts von 8 cm starken Fichtenbohlen wieder. Die Trocknung der letzten erfolgte mit Unterbrechung. Durch Anwendung verhältnismäßig warmer und feuchter Trockenluft gelingt es, den Trockenvorgang zu beschleunigen. Der Kammetrockner Abb. 215 arbeitet mit reiner Außenheizung unter Anwendung großer Luftmengen mit hohem Feuchtigkeitsgehalt.

Bei dem in Abb. 260 (Schilde) wiedergegebenen Holztrockner liegen die auf gemeinsamer Achse angeordneten Umluftgebläse in der Kanalmitte oberhalb der Decke und bewirken ein Kreisen der Luft zwischen den beiden

Stapelreihen hoch, längs der Außenwände nieder und durch die Stapel waagrecht hindurch. Entsprechend dem Schildeschen Umluftverfahren erfährt hierbei die Trockenluft eine ständige Nachwärmung durch die neben den Lüftern sitzenden Heizelemente. Gestatten es die örtlichen Verhältnisse, so können nach Abb.261 (Moore) Lüfter

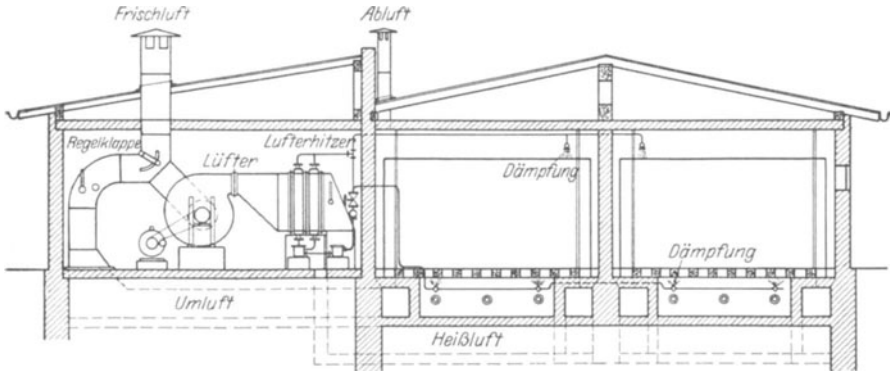


Abb. 256. Doppelkammertrockner für Holz (MAN).

und Heizkörper unterhalb der Kammer angeordnet werden, um die natürliche Luftbewegung im Sinne der künstlich verstärkten wirken zu lassen. Die Drehrichtung der Luft ist umkehrbar, die Luft durchströmt infolgedessen bald von der einen, bald von der anderen Seite her die Stapel, deren keilförmige Unterbrechung in der Mitte sich dadurch erübrigt.

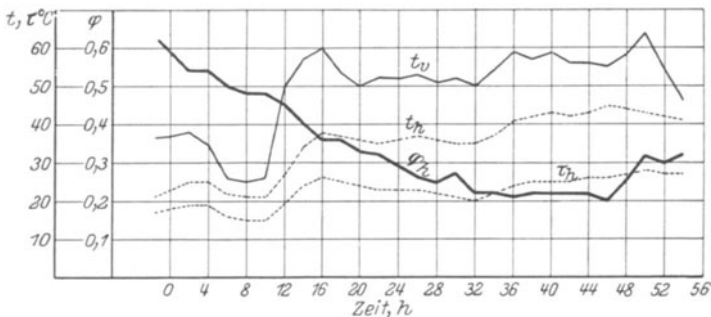


Abb. 257. Veränderung der Trockenluft im zweiten Teil der Trocknung von Fichtenbrettern (MAN).

Geschlossener Luftumlauf findet sich bei dem Kammertrockner der Abb.262¹ angewandt. Die Luft streicht durch die Heizschlangen nach dem durch entsprechende Stapelung geschaffenen freien Raum zwischen den Hölzern und durch diese waagrecht hindurch. An den Außenwänden sind Kühlrohre und Wasserdüsen angeordnet, durch die die Luft entfeuchtet wird.

¹ Nach Thelen: Kiln Drying Handbook. Washington 1929.

Der Friberg-Vakuumkammertrockner arbeitet mit wechselnder Aufspeicherung von Wärme und anschließender Verdampfung. Er besteht

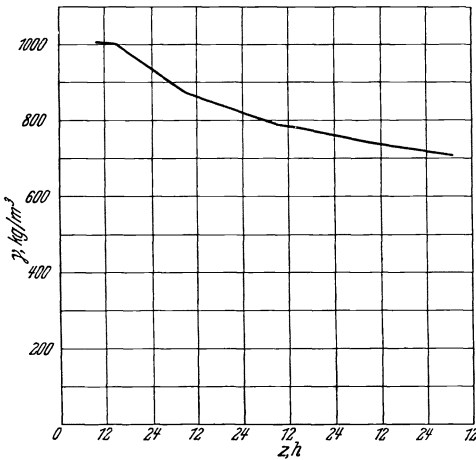


Abb. 258. Veränderung des Raumgewichts von Eichenbrettern, 3,3 cm stark (MAN).

aus einem Zylinder von 2,25 bis 2,75 m Durchmesser, 10 m Länge, der etwa 10 m³ Holz, auf Wagen verladen, faßt. Der Mantel des Zylinders ist innen mit Heizrohren besetzt, die zur erstmaligen Vorwärmung dienen und außerdem neben der Dämpfung angewandt werden, wenn ein besonders niedriger Grad von Endfeuchtigkeit angestrebt ist. Zunächst wird Dampf eingeblasen, bis das Holz eine Temperatur von 90 bis 95° erreicht. Für die Erwärmung von Fichte und Tanne ist etwa eine Stunde für je 1'' Stärke nötig. An das Dämpfen schließt sich eine

Ruhepause an, während der ein Teil des Dampfes niederschlägt. Darauf wird die Luftpumpe angesetzt und nach einer Stunde die höchste Luftleere erreicht. Sobald die Holztemperatur auf etwa 30° gesunken

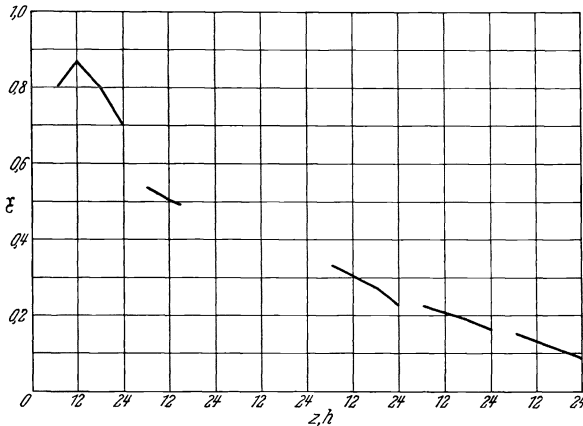


Abb. 259. Verlauf der Trocknung von Fichtenbohlen, 8 cm stark (MAN).

ist, wird die Luftpumpe abgestellt, neuerlich durch unmittelbare Dampffzufuhr eine Erwärmung auf 90 bis 95° vorgenommen, abermals entleert und so fort. Hierbei läßt sich beispielsweise 5 cm starkes Fichtenholz in 21 Stunden von einem anfänglichen Feuchtigkeitsgehalt von $\epsilon_r = 0,68$ auf $\epsilon_h = 0,29$ bei einem Dampfverbrauch von 1,25 bis 1,45 kg für 1 kg verdampftes Wasser trocknen. Das getrocknete Holz zeigt sich in besonderem Maße frei von Rissen, infolge des Austreibens der Harze

allerdings an der Oberfläche etwas gebräunt. Dies bedeutet wohl bei ungehobeltem Holz eine Minderung des Handelswertes, bei gehobeltem

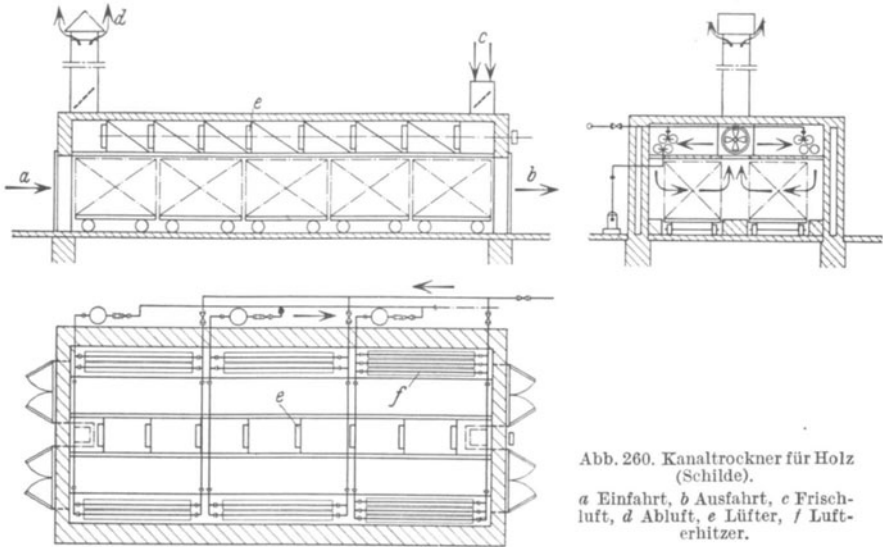


Abb. 260. Kanaltrockner für Holz (Schilde).

a Einfahrt, *b* Ausfahrt, *c* Frischluft, *d* Abluft, *e* Lüfter, *f* Lufterhitzer.

Holz, das gestrichen werden soll, jedoch keinen Nachteil, weil die Farbe besser haftet und das nachträgliche Austreten von Harzteilen weniger zu befürchten steht.

Heinrich¹ berichtet über Versuche an einem Holzdrahttrockner nach dem von Hausbrand empfohlenen geschlossenen Verfahren mit überhitztem Dampf, der den Erhitzer mit 140° verließ und mit 102° zurückkehrt. Trotz der hohen Temperatur war die Güte des imprägnierten Holzdrahtes einwandfrei.

Einen Kanaltrockner in einfachster Form stellt Abb. 140 dar. Er ist für die Trocknung von Furnierhölzern in warmen Gegenden bestimmt. Die vorgewärmte Luft strömt dem Gut entgegen, das, auf Wagen gelagert, allmählich dem Trocknerende zugeführt wird. In kälteren Gegenden wird das Naßende mit einem Abzugschacht versehen und durch eine Tür verschließbar gehalten. In der Kanaltrockenanlage Abb. 147 der Firma Faber, Nürnberg, werden täglich 780000 Bretter von einer Größe $0,185 \times 0,058$ m und 0,55 cm Stärke getrocknet. Acht Kanäle nehmen je zwölf Stapelwagen auf.

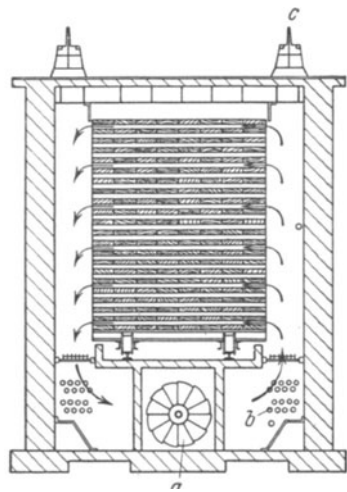


Abb. 261. Kammertrockner für Holz (Moore).

a Lüfter, *b* Lufterhitzer, *c* Abluft.

¹ Heinrich: Trocknung mittels überhitzten Dampfes. Wärme 1928.

Damit die Luft die Brettchen allseitig umspült, erfolgt die Stapelung nach Abb. 263 so, daß die Brettchen die Tangenten einer Hyperbel bilden. Die Luft wird auf 85° erwärmt und geht mit 40° und einem Feuchtigkeitsgrad 0,65 ab. Die Trockendauer beträgt 30 Stunden. Der Trocknung geht eine Dämpfung des Holzes voraus.

Bei dem Kanaltrockner der Abb. 146 soll die besondere Luftführung die Dämpfung ersetzen. Bei Hartholz wird die Abluft nahezu geschlossen,

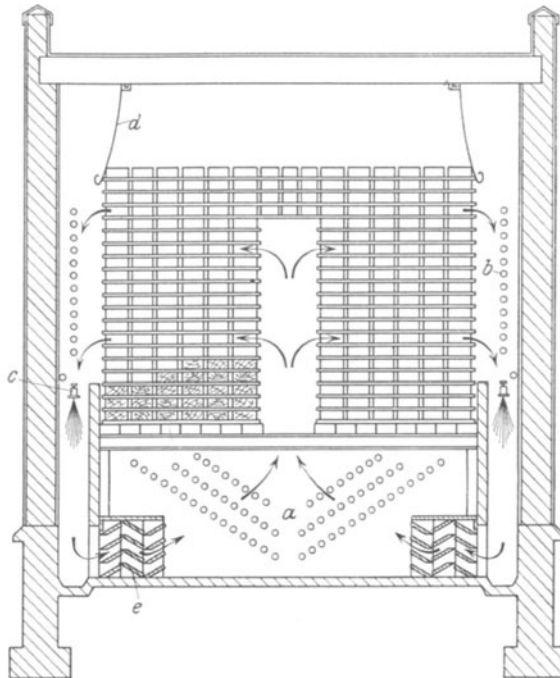


Abb. 262. Kammertrockner für Holz mit geschlossenem Luftkreislauf (Thelen).
a Lufterhitzer, *b* Luftentfeuchter, *c* Wasserdüse, *d* Vorhang, *e* Tropfenfang und Luftleitvorrichtung.

die Umluft fast ganz offen gehalten, bei nassem Weichholz die Einstellung umgekehrt vorgenommen.

Bei dem Kanaltrockner Abb. 159 wird auf künstliche Luftbewegung verzichtet und ein Dunstabzug auf der Einbringseite angeordnet. Die Holzstapel gelangen zunächst in eine Zone mit feuchter, kühler Luft und erst nach Durchlauf der halben Kanallänge in eine Zone mit vorgewärmter Trockenluft, die durch Roste von unten eintritt und über die unter den Stapeln liegenden Heizkörper geleitet wird. Der Abzug ist am äußersten Einbringende angeordnet, wenn es sich um Weichholz handelt, bei Hartholz etwas nach der Kanalmitte zu zurückversetzt, so daß im letzten Falle das eingebrachte Holz zunächst in einer toten Dunstzone eine Dämpfung erfährt.

Der in Abb. 158 dargestellte, für die Behandlung von Furnieren dienende Trockner besteht aus mehreren übereinander angeordneten,

endlosen Bändern, die durch nahe beieinander liegende Drahtschlingen gebildet werden. Die Furniere werden durch das tiefer liegende Band getragen und durch das darüber laufende so begrenzt, daß kein Werfen eintritt. Die Drahtschlingen sind seitlich und in der Längsrichtung beweglich, um das Schwinden des trocknenden Holzes ohne Reibung zu ermöglichen und Reißen zu verhüten. An den beiden Stirnenden treten die Furniere abwechselnd zwischen zwei benachbarten Bändern ein und aus. Auf die unterschiedliche Behandlung des feuchten und des trockenen Holzes kann hier verzichtet werden, weil die angewandte Verbindung von Gleich- und Gegenstrom eine von der Mitte aus nach beiden Enden zu abnehmende Trockenwirkung ergibt. Der dargestellte Trockner verarbeitet bei einer Länge von 24 m und einer Kanalweite von 3,6 m mit vier Bahnen etwa 1 m³ Furniere. Die Trockenzeit beträgt hierbei für 1 mm Eichenfurniere durchschnittlich 15 Minuten bei einem Anfangsfeuchtigkeitsgehalt von $\varrho_r \approx 0,8$ bis 1 und einem Endfeuchtigkeitsgehalt von $\varrho_t \approx 0,07$ bis 0,14. Die Höchsttemperatur der Luft schwankt zwischen 80 und 90° bei der empfindlichen Eiche und 110 bis 115° bei dem weniger empfindlichen Gaboen.

Während nach Abb. 158 die Heizkörper in seitlichen Kammern untergebracht sind, werden sie bei dem Furniertrockner der Abb. 264 (Proctor) zwischen den Bändern angeordnet, um vorzugsweise durch Strahlung zu wirken. Beiden Ausführungen ist gemeinsam, daß die Luft abwechselnd von der einen und anderen Seite her über die Furniere streicht. Nach Abb. 158 kehrt die Luft durch die Furniere hindurch zurück; dagegen werden nach Abb. 264 die über und unter den äußersten Bändern verbleibenden Räume für die Umkehrbewegung benutzt, um eine Schichtung ungleicher Luftzonen der Höhe nach zu vermeiden. Bei dem Rollentrockner von Siempelkamp, Krefeld, führen Förderwalzen die frisch geschälten Furniere abwechselnd durch eine mit Feuchtigkeit gesättigte Luftzone, dann gegen geheizte Platten, die sich einmal gegen die obere, einmal gegen die untere Holzfläche anlegen. Die Anfeuchtung nimmt allmählich ab und hört zum Schluß ganz auf. Der Auslauf liegt außerhalb der Trocknerummantelung, um die Temperatur der Furniere nahezu auf die Raumtemperatur zu senken. Eine Über-trocknung der äußeren Oberflächen wird durch das jeweilige Befeuchten verhindert, besonders auch deshalb, weil die Oberflächentrocknung

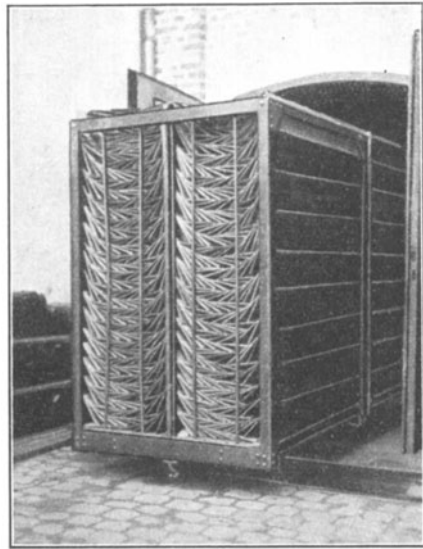


Abb. 263. Stapelwagen (Rietschel-Henneberg).

zwischen zwei Feuchtfeldern jedesmal nur einseitig erfolgt. Dieser Rollentrockner kommt zur Anwendung bei schwer zu trocknenden Holzarten, wie finnischer Birke und sehr dünnen Furnieren von 0,3 bis 1 mm Stärke, schließlich bei unhandlich langen Messerfurnieren.

p) **Zellstoff und Papier.** Die Temperaturempfindlichkeit von Zellstoff und Papier ist verhältnismäßig gering, so daß Temperaturen nahe an $t = 100^{\circ}$ angewandt werden dürfen. Bei geleimten Papieren ist sogar aus Festigkeitsgründen eine Mindesttemperatur von etwa 70°

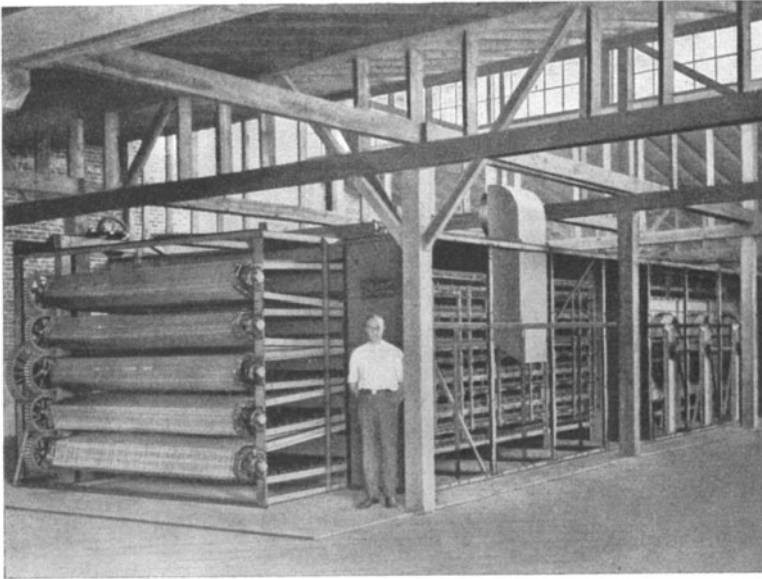


Abb. 264. Furniertrockner (Proctor).

nach der Vortrocknung erforderlich. Wird zur Verbesserung der Trockenleistung nach dem Vorschlag von Kaiser¹ überhitzter Dampf angewandt, so darf die Eigentemperatur des Papiers keinesfalls zu hoch steigen. Bei dünnen und empfindlichen Papieren ist die Benutzung von Heißdampf bedenklich, einmal wegen der Steigerung der Wandtemperatur des Trockenzylinders, dann und vor allem deshalb, weil die Wandtemperatur bei Heißdampf höheren Schwankungen unterworfen ist als bei Satttdampf.

Der Feuchtigkeitsgehalt nach der durch Pressen und Absaugen erfolgenden mechanischen Vorentwässerung beträgt bei Zellstoff $x_r \approx 1,2$ bis 1,5 und nimmt bis etwa 2,5 bei Papiermaschinen zu. Im einzelnen ergibt sich nach Mallickh²:

¹ Kaiser: Das Verhalten von Papiermaschinen beim Betrieb mit Satt- und Heißdampf. Z. Bayr. Rev. V. 1930.

² Mallickh: Der Dampfverbrauch der Zylindertrockner. W. f. Pap. 1920.

Selbstabnahmemaschinen mit 1 Presse: $\chi_r = 2,85$ für geleimte, schmierige Lumpen- und Zellstoffpapiere, abnehmend bis $\chi_r = 2,33$ für schwach geleimte, stark holzschliffhaltige Papiere.

Langsieb-Maschinen mit 2 bis 4 Pressen: $\chi_r = 1,94$ bis $2,33$ für Spinn-, Kraft-, Pergamin-, Seiden-, Zigaretten- und ähnliche Papiere von stark kolloidaler Eigenschaft; $\chi_r = 1,63$ bis $1,94$ für stark geleimte Papiere, ganz oder überwiegend aus Zellulose, wie Schreib-, Zeichen-, feine Druck- und Kunstdruckpapiere, Chromokartons; $\chi_r = 1,27$ bis $1,63$ für gewöhnliche Druckpapiere, Packpapiere, Schrenzpapiere und ähnliche starke holzschliffhaltige Papiere. Wassergehalt um so niedriger, je rösch der Stoff, je niedriger die Leimung und je mehr Pressen vorhanden; $\chi_r = 1$ bis $1,5$, je nach Stoffcharakter, für Maschinen mit Vorwärmzylinder vor letzter Presse.

Pappen-, Karton-, Zellstoffentwässerungsmaschinen; $\chi_r = 1,27$ bis $1,63$ für Zellstoff- und Holzschliffpappen und Kartons, die niedrigeren Zahlen für rösch den Stoff mit viel Holzschliffzusatz; $\chi_r = 1,5$ bis $1,63$ für Zellstoffbahnen.

Im letzten Falle wird der Feuchtigkeitsgehalt durch Vorschaltung eines Vorwärmzylinders und Vermehrung der Pressen bis auf $\chi_r \approx 1$ vermindert.

Der Endfeuchtigkeitsgehalt bewegt sich bei Zellstoff mit $\chi_h \approx 0,14$ bis $0,25$ nahe dem Zustand der Lufttrockenheit, bei Papiermaschinen sinkt er auf $\chi_h \approx 0,1$ bis $0,05$.

Als wichtige Stoffeigenschaft ist die spezifische Wärme des wasserfreien Holzschliffes bekannt und von Dietze mit $0,327$ angegeben.

Bei der Vorentwässerung von Zellstoff und Papier durch mechanische Mittel kommt der Temperatur besondere Bedeutung zu, insofern, als mit ihr der Durchflußwiderstand des Wassers abnimmt. Vorwärmzylinder vor dem eigentlichen Trockenteil wirken daher günstig.

Die Trockner selbst bestehen aus geheizten Trockenzylindern, die hintereinandergeschaltet werden. Anzahl und Durchmesser der Trockenzylinder werden durch die Eigenschaften des verarbeiteten Stoffes bedingt. Für Papiere treten zu den eigentlichen Papiertrocknern noch Filztrockner in einer mit der Feinheit des Papiers zunehmenden Anzahl von Trockenzylindern. Abb. 185 zeigt die Ausführung einer Vielzylinder-trockenmaschine in Verbindung mit Filztrocknern, wie sie für die Verarbeitung von Druckpapieren angewandt wird. Selbstabnahmemaschinen nach Abb. 265 (Füllnerwerk) besitzen einen einzigen großen Trockenzylinder, gegen den die Papierbahn durch Andrückwalzen gepreßt wird. Zwei Filzläufe nehmen das Papier eine Strecke weit zwischen sich auf und verlassen die Bahn, unmittelbar nachdem sie mit dem Trockenzylinder in Berührung getreten ist. Solche Maschinen gelangen meist für dünne einseitig glatte Papiere mit einem Gewicht von etwa 18 bis 40 g/m^2 zur Verwendung. Die Anpressung der Papierbahn ergibt günstige Wärmeübertragungsverhältnisse. Das freie Entweichen des Schwadens nach oben ist nicht behindert, so daß eine besonders gute Ausnutzung der Heizfläche zu erwarten steht.

Zur Herstellung von einseitig hochglatten stärkeren Papieren dient eine Zwischenart nach Abb. 266 (Füllnerwerk), bei der eine Mehrzahl

388 Ausführung der Trockenvorrichtungen in Anpassung an die Gutsarten.

von kleineren Zylindern die Trocknung auf $\gamma \approx 0,67$ übernimmt und anschließend ein großer Glättzylinder arbeitet, gegen den das Papier durch eine Gummiwalze angepreßt wird.

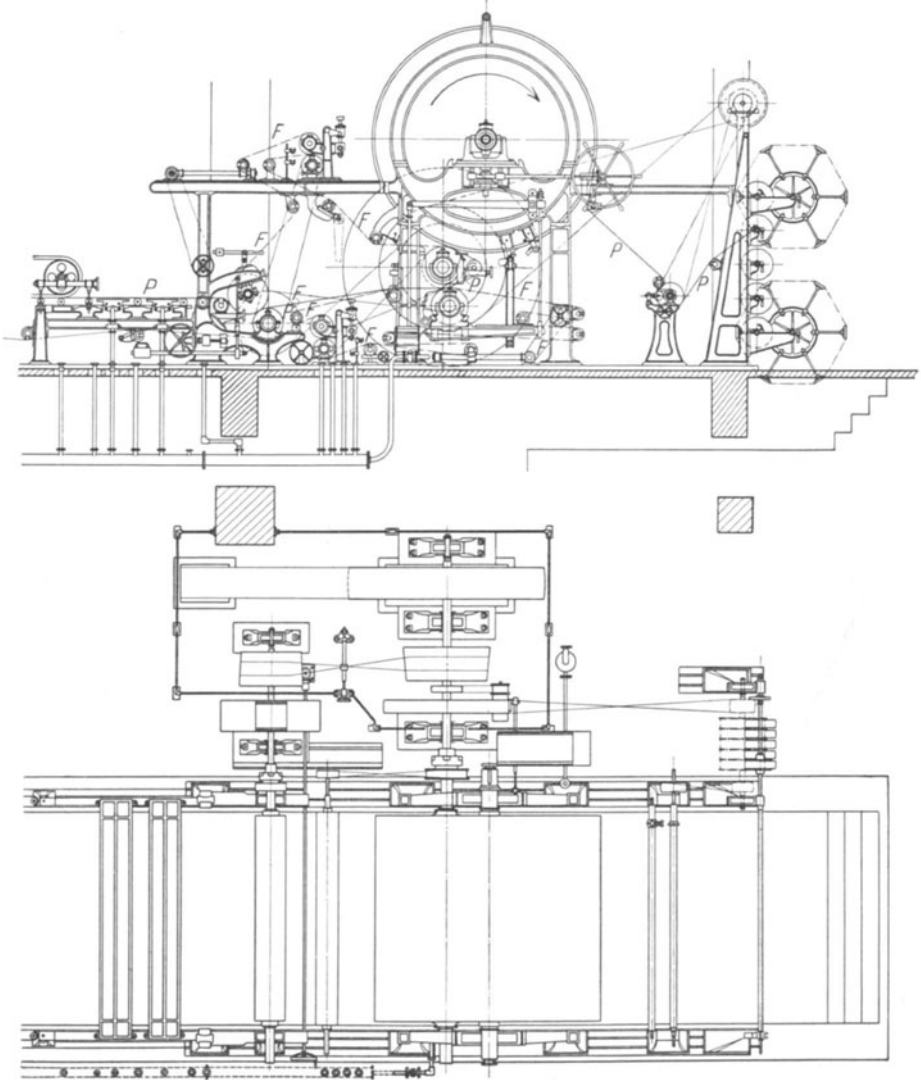


Abb. 265. Trockenteil einer Selbstabnahmemaschine (Füllnerwerk). P=Papierbahn, F=Filzläufe.

Kartons in Stärken bis 1000 g/m^2 werden meist in Maschinen getrocknet, bei denen der Filz ganz fehlt oder nur bei dem Glättzylinder zur Verbesserung der Aufführung und Erhöhung der Leistung angewandt wird.

Werden bei Papiertrocknern drei oder mehr Zylinder senkrecht übereinander angewandt, so ergibt sich durch Kaminwirkung günstige Luftführung.

Der von dem Filztrockner ablaufende Filz ist beim Zusammenreffen mit dem auflaufenden Papier wärmer als dieses und in der Regel auch stärker hygroskopisch. Infolgedessen bewirkt der Trockenfilz eine Beschleunigung der Anwärmung, außerdem leitet er die Trocknung

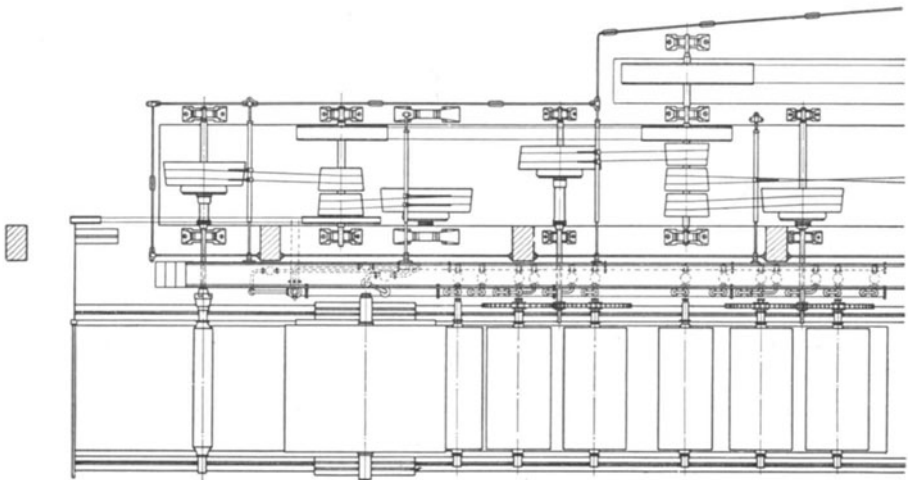
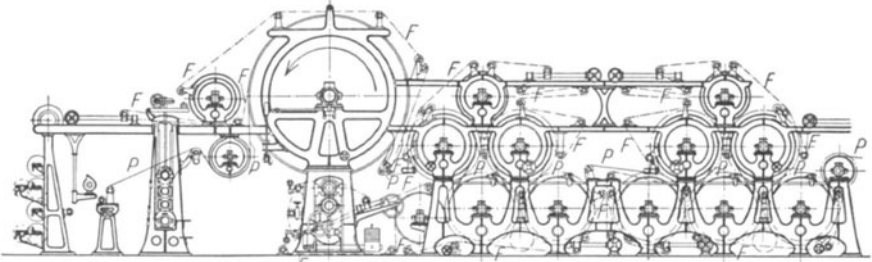


Abb. 266. Trockenteil einer Papiermaschine (Füllnerwerk). *P* = Papierbahn, *F* = Filzläufe.

des Papiers durch Absaugen von Feuchtigkeit aus diesem ein. In der Haupttrockenzone erschwert der Trockenfilz das Entweichen der Feuchtigkeit aus dem Papier; sobald seine Saugfähigkeit erschöpft ist. Die eigentliche Trocknung vollzieht sich an der äußeren Filzfläche. Die Temperatur des Papiers liegt höher, als sie sich ohne Filz einstellen würde. Hohe Porosität des Trockenfilzes ist daher um so wichtiger, je größer die durch die Flächeneinheit entweichenden Dampfmen gen sind, d. h. im allgemeinen je stärker das Papier ist. Sobald die Papierbahn den Trockenzylinder verläßt, wirkt sich die Übertemperatur durch eine beschleunigte Nachverdunstung in die umgebende Luft aus. An Stelle

von Haarfilzen kommen neuerdings für Papiermaschinen Asbestfilze mit einem Oberschichtgewebe aus Baumwolle, dem die Erzielung der mechanischen Festigkeit zufällt (v. Asten & Co. A. G., Stolberg), zur Anwendung. Im Gegensatz zu dem hygroskopisch wirkenden Haarfilz beruht die Saugfähigkeit des Asbestfilzes in der Hauptsache auf der kapillaren Wirkung der zwischen den mineralischen Kristallen verbleibenden Hohlräume. Der Asbestfilz kann daher bei der Austreibung der Feuchtigkeit auf dem Filztrockner über einen weiteren Bereich als „feucht“ gelten als der Haarfilz. Weitere Vorzüge bestehen in seiner Säurebeständigkeit und darin, daß Porosität und Festigkeit sich unabhängig voneinander abstufen lassen. Es ist daher möglich, für die ersten und letzten Teile der Trockenzone feste Filze mit mäßiger Porosität anzuwenden, um die Wärmeübertragung beim Anwärmen bzw. Austreiben der geringen Restfeuchtigkeit durch festes Anpressen zu verbessern, für den mittleren Teil dagegen einen besonders saugfähigen und porösen Filz zu wählen, der die Verdunstung der Hauptfeuchtmengen erleichtert.

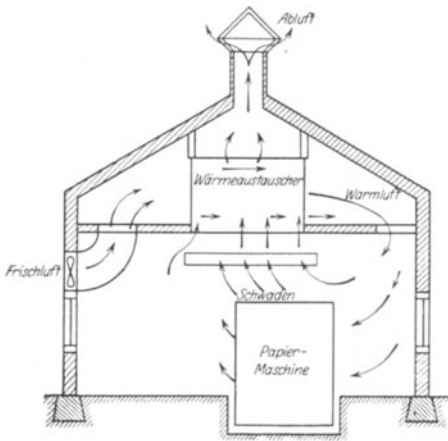


Abb. 267. Ausnutzung der Schwadenwärme zur Vorwärmung der Luft (Grewin).

wird nicht klar erkannt, daß es sich hierbei um zwei getrennt zu behandelnde Aufgaben dreht: einmal durch Wärmezufuhr an die Luft ihre Tragfähigkeit für Wasserdampf zu erhöhen — eigentliche Entnebelung —, dann, durch Veränderung der Kühlgrenze der Luft, die Temperatur der Papierbahn zu heben oder zu senken und damit die Trockenleistung zu beeinflussen. Die letzte Aufgabe hat mit der eigentlichen Entnebelung nur mittelbar zu tun und ist stets zu beachten, auch wenn die Forderung, den abziehenden Dampf durch die Luft binden zu lassen, teilweise oder ganz entfällt.

Die Vorwärmung der Luft kann unter Verwendung des den Trockenzyklindern entnommenen Niederschlagwassers erfolgen. Grewin schlägt vor, nach Abb. 267 die Luft vor ihrem Eintritt in den Trockenraum in Wärmeaustausch mit dem von der Papiermaschine hochsteigenden Schwaden treten zu lassen. Ein ähnlicher Gedanke liegt dem in Abb. 268 dargestellten Entwurf (Voith) zugrunde. Er geht insofern weiter, als das entweichende Dampf-Luftgemisch nicht nur als Heizmittel für die Vorwärmung der Trockenluft benutzt, sondern danach in entfeuchtetem Zustande neuerlich dem Trockner wieder zugeführt wird. Um die Entfeuchtung hierbei möglichst weit zu treiben, ist hinter die Wärmeaustauschvorrichtung eine Düsenkammer geschaltet. So verlockend

eine solche Verbindung erscheint, so bestehen für ihre praktische Bewährung doch Bedenken, einmal wegen der notwendigen großen Austauschfläche und hohen Beschaffungskosten, dann aber wegen der Unmöglichkeit, die Dampfwärme des abziehenden Schwadens in ihr einigermaßen vollkommen auszunutzen. Wird z. B. Abluft von $t_h = 40^\circ$ und einem Feuchtigkeitsgrad $\varphi_h = 0,8$, entsprechend einem Feuchtigkeitsgehalt von $x_h = 0,04$ und einem Taupunkt $t''_x \approx 36^\circ$, zurückgesaugt und in dem Wärmeaustauscher auf $t = 28^\circ$ abgekühlt, so nimmt der Feuchtigkeitsgehalt auf $x = 0,025$ ab. Der spezifische Wärmeinhalt, bezogen auf 1 kg Reinsluft, wird gleichzeitig von $i_h = 34,2$ auf $i = 21,9$, d. h. um 12,3 kcal/kg, erniedrigt. Im Düsenraum möge eine weitere Temperaturerniedrigung auf $t_0 = 12^\circ$, entsprechend einem Feuchtigkeitsgehalt $x_0 = 0,009$, erfolgen. Erhöht der Wärmeaustauscher die Temperatur der entfeuchteten Luft auf $t_v = 30^\circ$, so entspricht dem

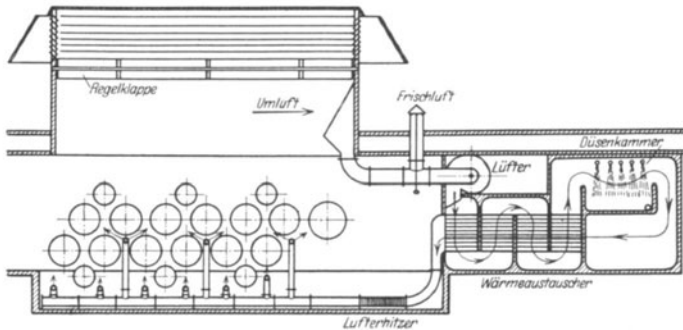


Abb. 268. Ausnutzung der Schwadenwärme zur Vorwärmung der Luft (Voith).

eine Wärmerückgewinnung von 4,4 kcal/kg, also nur etwa 36% der auf 1 kg Reinsluft entfallenden verfügbaren Abwärme.

Einen besonders wertvollen Aufschluß über die zahlenmäßigen Verhältnisse bei der Entnebelung liefern die Untersuchungen von Mallickh¹. Die nachstehenden Zahlen geben einen Auszug der Mallickh'schen Aufstellung.

Hierbei bezieht sich

- I auf eine neuzeitliche Druckpapiermaschine,
- II auf eine Karton- (Entwässerungs-) Maschine,
- III auf eine schwach belastete neuzeitliche Feinpapiermaschine für Herstellung von Pergamin- und Spinnpapieren,
- IV auf eine stark belastete Feinpapiermaschine älterer Bauart,
- V auf eine Einzylinder-Selbstabnahmemaschine.

Mallickh weist an Hand dieser Aufstellung darauf hin, daß die Maschinen I und II durch ihre freien Flächen im Sommer erheblich mehr Wärme verlieren, als für Deckung des Wärmeverbrauchs für Entnebelung und Gebäudeverluste erforderlich ist. Bei etwa 0° Außentemperatur ergeben diese schwach belasteten Maschinen noch Nebel-

¹ Mallickh: Über die Wirtschaftlichkeit der Papierzylindertrockner und ihre Entnebelungsanlagen. W. f. Pap. 1921.

392 Ausführung der Trockenvorrichtungen in Anpassung an die Gutsarten.

	I	II	III	IV	V
Arbeitsbreite m	3,3	3,3	2,2	2,2	2,2
Zylinderringlänge m	3,8	3,8	2,6	2,6	2,6
Anzahl und Durchmesser der Zylinder:					
a) Vortrockner	1×0,75	—	1×0,75	—	—
b) Papiertrockner	24×1,5	24×1,5	10×1,5	10×1,25	1×3,2
c) Filztrockner	16×1	—	10×0,75	4×1	—
Nutzfläche	1	1	1	1	1
Freie Heizfläche	2,22	1,16	2,39	1,7	1,39
Feuchtigkeitsgehalt am Ein- lauf %	1,38	1,38	1,64	1,63	2,33
Spezifische Leistung, ge- trocknetes Papier, kg/m ² /h	7,5	7,5	6	9	13
Spezifische Trockenleistung, verdampftes Wasser, kg/m ² /h	9,9	9,9	11,3	14,1	29,5
Trockenleistung insgesamt, verdampftes Wasser, kg/h	2430	2580	730	920	522
Dampfdruck at	2	2,5	2,5	3	3,5
Rechnerischer Wärmeeuf- wand für Entnebelung, kcal/h, bei 40° Abzugstemperatur und einer Außenlufttempe- ratur von . . . —20°	663 000	704 000	213 000	250 000	143 000
30°	119 000	127 000	38 500	45 500	26 000
Von den freien Flächen ab- gegebene Wärmemenge, kcal/h, bei einer Außenlufttempe- ratur von . . . —20°	537 000	283 000	164 000	116 000	22 000
30°	414 000	222 000	129 000	92 500	17 700
Wärmeverlust des Trockner- raums, kcal/h, bei einer Außenlufttempe- ratur von . . . —20°	779 000	779 000	39 300	37 400	22 200
30°	5 600	5 600	2 100	2 000	1 200
Überschuß der von den freien Flächen abgegebe- nen Wärmemenge gegen- über dem Wärmebedarf für Entnebelung und Dek- kung des Gebäudever- lustes, kcal/h, bei einer Außenlufttempe- ratur von . . . —20°	—203 900	—498 900	—88 800	—171 400	—143 200
30°	288 900	89 400	88 400	45 000	500
Errechneter Wärmeeaufwand für Verdampfen . kcal/h	1 568 000	1 667 000	449 000	590 000	332 000
Wärmewirkungsgrad . . . % bei einer Außenlufttempe- ratur von . . . —20°	68	68	66,4	67,3	93,9
30°	79,2	88,3	79,5	86,4	95,2

freiheit. Bei den Maschinen II, III und besonders IV ist die Wärmeabgabe durch die freien Flächen gering und genügt auch bei mäßigen Temperaturen nicht mehr zur Vermeidung von Nebel. Hierin liegt jedoch andererseits ein Grund für den günstigen Wärmewirkungsgrad bei hohen Temperaturen. Dieser ist von Mallickh verstanden als das Verhältnis des für die Verdampfung errechneten Wärmeverbrauches zu dem gesamten bis zur Nebelfreiheit erforderlichen tatsächlichen Wärmeverbrauch, wobei in den letzten auch der darüber hinaus von den freien Flächen bei hohen Außentemperaturen abgegebene Wärmeüberschuß eingeschlossen ist. Bei der Selbstabnahmemaschine V ist Wrasenabsaugung vorausgesetzt. Sie stellt hiernach die wirtschaftlichst arbeitende Papiermaschine dar. Die errechneten Wirkungsgrade setzen guten Wärmeschutz der Zylinderstirnflächen, dampfdichte Stopfbüchsen und einwandfrei arbeitende Kondensstöpfe voraus. Im praktischen Betrieb liegen sie meist 5% niedriger.

Einen Betriebsversuch mit besonderer Vertiefung in alle Einzelheiten, vorgenommen in einer Sulfat-Zellstoff-Trockenanlage der Aktiebolag Carlstadt, veröffentlicht Nilson¹. Die untersuchte Anlage benutzt das Niederschlagwasser der Trockenzylinder zur Vorwärmung der Luft, die unter die Maschine tritt. Der Wärmeverbrauch betrug in dem eigentlichen Trockenteil 1165 kcal für 1 kg verdampftes Wasser bei ungebleichtem Stoff, 1000 kcal/kg für gebleichten Stoff. Der Feuchtigkeitsgehalt war beim Einlauf $x_1 = 1,325$, beim Auslauf $x_2 = 0,18$. Die Trockenzylinder wurden zum Teil mit Abdampf, zum Teil mit trockenem Frischdampf gespeist. Für die der Trocknung vorausgehende Stoffanwärmung durch Aufspritzen von Warmwasser im Siebteil und Vortrocknung zwischen zwei Pressen ergibt sich ein Wärmeverbrauch von 286 bzw. 244 kcal, bezogen auf 1 kg Wasserverdampfung. Die Strahlungsverluste der Maschinenteile belaufen sich auf 10,1%, die des Stoffes auf der Maschine auf 2,8%. Die in dem auslaufenden Papier mitgeführte Überschuwärme beträgt 9,8%. Ein großer Teil des Verlustes entfällt auf das Niederschlagwasser. Der Versuchsbericht erwähnt, daß Anwärmung der Luft durch das Niederschlagwasser eine Leistungssteigerung von 15,2% ergab, ohne jedoch den spezifischen Wärmeverbrauch zu beeinflussen.

Neuerdings wird in Amerika der Zellstoff in Kanaltrocknern in Flockenform getrocknet (Fidalgo). Dies ergibt gegenüber dem bisher üblichen Trocknen auf Zylindern größere Schonung der Faser und leichtere Auflösung im Holländer der Papierfabrik.

Die Vorteile des Vakuumpapiertrockners Abb. 205 bestehen, neben der Vermeidung eines Vergilbens der Fasern, in der hohen spezifischen Trockenleistung, die nach Angabe des Erfinders das doppelte der üblichen erreicht. Hierdurch werden die erheblichen Anschaffungsmehrkosten und der für Aufrechterhaltung der Luftleere erforderliche Kraft- und Wasserverbrauch aufgehoben. Daneben besitzt das Verfahren die allgemeinen Vorzüge der Vakuumtrocknung. Bei einem Druck von

¹ Nilson: Svensk Pappers Tidning 1918.

0,07 at, wie er im Betrieb aufrecht erhalten wird, liegt bis zum Eintritt in das hygroskopische Gebiet die Temperatur der Papierbahn in der Nähe der diesem Druck zukommenden Siedetemperatur von etwa 38°, und zwar um so weniger über dieser, je weniger das Abdampfen durch den Trockenfilz gehemmt wird. Selbstverständlich treten auch hier höhere Temperaturen auf, sobald der hygroskopische Punkt unterschritten wird. Ein Vorzug verbleibt alsdann darin, daß die Beheizung durch niedriger gespannten Dampf erfolgen kann als bei offenem Verfahren. Die niedrige Temperatur wirkt sich auch in einer verlängerten Lebensdauer der Filze aus. Ihrer Beschaffenheit kommt wegen der großen spezifischen Verdampfleistung besondere Bedeutung zu. Sie bestehen aus hochporösem Asbestgewebe mit Baumwolloberschicht. Bei zu geringer Porosität der Filze wird die Papierbahn leicht durch den Überdruck des von der Heizfläche gebildeten Dampfes abgehoben. Das schwierige Entnebelungsproblem ist durch den Vakuumpapier-trockner ausgeschaltet, allerdings unter Inkaufnahme einer Erschwerung von Beobachtung und Bedienung. Ein ausgeführter Trockner mit 20 Trockenzyindern von 1,5 m Durchmesser, 3,85 m Mantellänge, verarbeitet Zeitungsdruckpapier mit 3,55 m/s Papiergeschwindigkeit; ein anderer liefert mit 40 Trockenzyindern von gleicher Größe täglich bis 200000 kg trockenen Zellstoff.

Eine besondere Behandlung fordern Papiere mit einseitigem Überzug, wie sie als gestrichene Papiere in der Offsetdruckerei für Herstellung von Spielkarten u. dgl., ferner als Pigmentpapiere zu photographischen Zwecken Verwendung finden. Ähnlich wie bei geleimten Furnieren, verlangt die Trocknung zweier verschiedener, in festem Zusammenhang miteinander stehender Stoffe eine langsame und gleichmäßige Trocknung, um Werfen und Lösen zu vermeiden. Die Feuchtigkeit dringt von dem Belag in die Papierunterlage ein und verteilt sich allmählich gleichmäßig über die ganze Stärke.

Gestrichene Papiere werden zur Trocknung häufig durch Drähte oder Bänder über Heizrohre getragen. Zweckmäßiger sind geschlossene Kästen, in die Warmluft eingeblasen wird und durch die die gestrichenen Papiere in waagerechter Lage hindurchwandern. Zuweilen wird auf eine Beheizung überhaupt verzichtet und eine besonders langsame Trocknung in Kauf genommen, wie sie die Raumluft ermöglicht. Überlegen ist selbstverständlich auch hier die Ausführung des Trockners in einer geschlossenen Verkleidung mit zusätzlicher Beheizung der Trockenluft.

Pigmentpapiere bestehen aus Rohpapier mit einem Überzug von etwa 0,1 kg/m Pigmentgelatine. Diese setzt sich aus Gelatine, Farbstoff, Zucker und Glyzerin zusammen. Bei dem üblichen Feuchtigkeitsgehalt von $\gamma \approx 0,15$ ist sie stets hygroskopisch. Bei höherem Feuchtigkeitsgehalt neigt sie zu Fäulnis und Zersetzung. Das Pigmentpapier wird in das Chrombad gebracht und hiernach getrocknet. Die Trocknung erfolgt im allgemeinen in belüfteten Trockenschränken. Da gleichmäßige Luftverteilung und gleiche Trockenzeit unabhängig von der äußeren Witterung die Vorbedingung für ein Papier darstellt, das sich hinsicht-

lich seiner Lichtempfindlichkeit stets gleich verhält, bietet kalte Trocknung in geschlossenem Kreislauf Vorteile.

Ein besonderes Verfahren besteht darin, daß das auf eine Glasscheibe gequetschte Pigmentpapier auf der Gegenseite durch einen hygroskopischen Trockenfilz bedeckt wird (Belcolor G. m. b. H., Berlin-Dahlem). Mehrere derartige Packungen werden aufeinander gebracht und trocknen in 1¼ Stunden gleichmäßig aus. Die als Trocknungsmittel angewandten Filze werden nachträglich in einem elektrisch beheizten Trockenschrank entfeuchtet.

Die Verarbeitung langer Bahnen gestrichener Papiere erfolgt in Trockenkammern, in denen das Papier entweder in Hängen ruht oder durch die die Hänge allmählich hindurchgeführt werden. Das Trockenverfahren ist etwa gleichbedeutend mit dem für die Filmtrocknung in Betracht kommenden. Nach der Streichmaschine wird kalte, möglichst gesättigte Luft auf die Papierbahn geblasen, um ein Diffundieren des Wassergehalts aus der Oberschicht in die Unterlage zu bewirken und dadurch die Temperaturempfindlichkeit des Belages zu vermindern. Daran schließt die eigentliche Trocknung an, bei der sich infolge des unvermeidlichen Voreilens der Papierränder, eine gewisse Ungleichmäßigkeit und Spannung ergibt. Zu ihrem Ausgleich dient ein Feuchtfeld, an das schließlich eine Belüftung mit möglichst kalter trockener Luft anschließt, um beim folgenden Aufrollen ein Kleben sicher zu vermeiden.

Beim Bedrucken von Zeitungspapier mit wasserlöslichen Farben erfolgt die Trocknung ohne besondere Maßnahmen durch die Saugfähigkeit des Papiers. Dagegen erfordern die für Tiefdruck heute fast ausschließlich angewandten, an flüchtige Lösungsmittel gebundenen Ölfarben besonders sorgfältige Ausbildung der Trockenvorrichtungen, die hier auf eine Vorrichtung zum Austreiben des Lösungsmittels hinauslaufen. Diesem Zwecke dienen beheizte Zylinder oder Platten, über die das bedruckte Papier hinweggeführt wird. Blausvorrichtungen, die mit kalter Luft arbeiten, sollen die Trocknung beschleunigen und gleichzeitig eine unzulässige Erwärmung des Papiers auf der bedruckten Seite vermeiden. Da die Lösungsmittel die Raumluft verschlechtern und die Bedienung erschweren, stellt reichliche Belüftung des Maschinenraums und Absaugung der mit Lösungsmittel geschwängerten Luft eine notwendige Ergänzung dar. Die Möglichkeit, die Lösungsmitteldämpfe durch Heranbringen der Absaugvorrichtungen unmittelbar dort abzufangen, wo sie entstehen, darf nicht überschätzt werden. Viel richtiger scheint es, den Frischluftstrom so zu leiten, daß seitlich der Maschine die Luft einwandfrei ist und innerhalb und außerhalb der Maschine reichlich bemessene Öffnungen im Boden vorzusehen, durch die die unreine Luft nach den Absaugekanälen fällt. In Bezug auf den organischen Zusammenbau der Maschine mit der Lüftungsvorrichtung für Maschine und Raum wird noch häufig gesündigt, so daß behelfsmäßige Anlagen die Regel bilden und eine vollkommen befriedigende Lösung häufig deshalb ausgeschlossen ist, weil Absaugekanäle unter Flur innerhalb der Maschine nachträglich nicht mehr angebracht werden können.

An sich besteht keine Schwierigkeit, die Tiefdruckmaschine vollständig einzukapseln und dadurch den Übertritt der Lösungsmittel in den umgebenden Raum zu verhindern. Hierdurch wird jedoch die Bedienung, vor allem das sofortige Eingreifen bei gelegentlich auftretenden Bränden, erschwert.

Für die Trocknung von Pappe kommen Kanäle zur Anwendung, die das Trockengut flach liegend oder in Klammern senkrecht hängend durchläuft. Eine Ausführung erster Art ist in Abb. 160 dargestellt. Daneben finden sich noch vielfach eigentliche Bandtrockner, bei denen die Pappe durch ein weitmaschiges Drahtnetz getragen wird und der Hilfskreislauf der Luft sich über die ganze Länge des Kanals erstreckt. Ein Vorzug dieser Bauweise besteht darin, daß die natürliche Schrumpfung hemmungslos erfolgt. Die Aufhängung der in senkrechter Lage wandernden Pappen wird neuerdings nach Abb. 269 (Schilde) so vor-

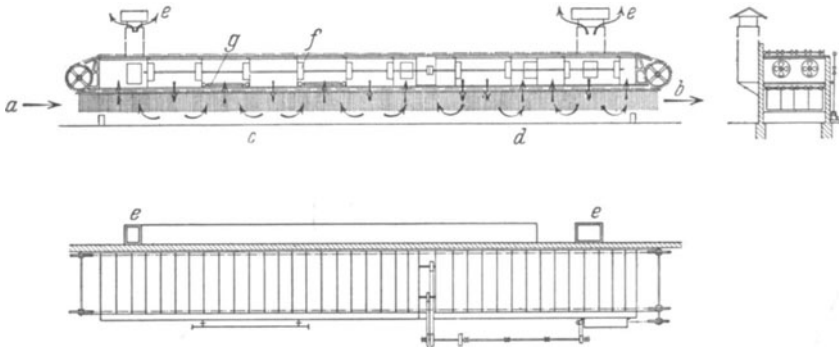


Abb. 269. Kanaltrockner für Pappe (Schilde).

a Einlauf, b Auslauf, c Trockenfeld, d Befeuchtungsfeld, e Abluft, f Lüfter, g Lufterhitzer.

genommen, daß die Ebene der Pappen quer zur Kanalachse und nicht, wie früher, mit dieser längs verläuft. Hierfür ist der Gesichtspunkt maßgebend, daß die im Mehrstufenumluftverfahren kreisende Luft durch die Pappen selbst zum vollständigen Bestreichen der ganzen Fläche gezwungen wird und dadurch eine gleichmäßigere Trocknung ergibt als bei Längsaufhängung, bei der die Pappe unten schwächer belüftet wird. Schwache Pappen können auch auf Trockenzylindern verarbeitet werden.

q) **Zucker.** Bei der Herstellung von Rohzucker wird der eingedickte Saft in Vakuumvorrichtungen bis zum Auskristallisieren eingedampft. Die ausgeschleuderten Kristalle wandern entweder unmittelbar in die Lagerräume oder über Trockentrommeln zu den Mühlen. Die Trockner arbeiten hierbei entweder mit Warmluft oder mit Dampfheizung. Der Trockner der Abb. 270 (Manlove-Alliott) besitzt den aus Abb. 202 hervorgehenden Querschnitt. Das Auslaufende ist durch einen Siebzylinder verlängert.

Bei der Trocknung der Zuckerbrote und Zuckerplatten soll die Temperatur $t \approx 70^\circ$ nicht überschreiten.

Die Trockendauer ist vor allem von der Stärkenabmessung abhängig. Die Trocknung muß, um ein Zerspringen zu vermeiden, so milde erfolgen, daß ein vorzeitiges Austrocknen der Oberfläche nicht eintritt. Aus diesem Grunde haben sich eigenartige Trockenverfahren herausgebildet.

Durch Abnutschen und Schleudern wird der Feuchtigkeitsgehalt auf $x_r \approx 0,03$ herabgesetzt, so daß nur noch wenig Wasser während der Trocknung zu entziehen bleibt.

Als Trockenvorrichtung dienen für Zuckerbrote Trockenstuben, deren Temperatur ganz allmählich auf etwa 50° gesteigert und ebenso langsam wieder auf die der Umgebung entsprechende Höhe gesenkt

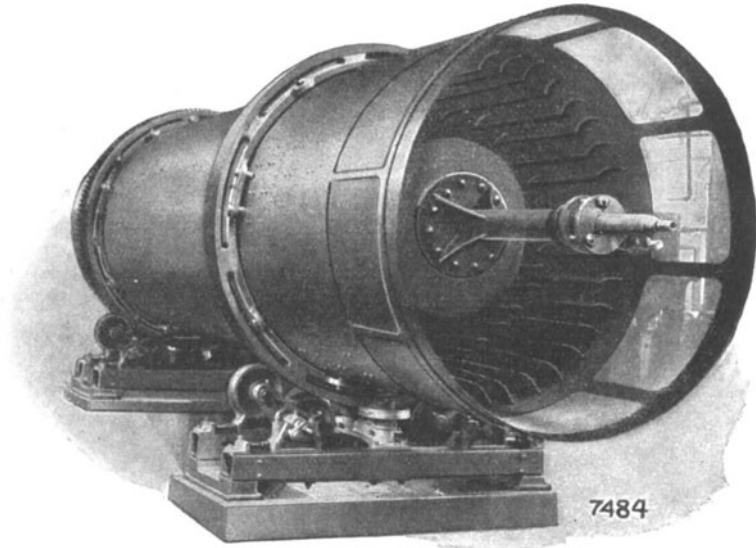


Abb. 270. Dampfheizter Trommeltrockner für Zucker (Manlove-Alliott).

wird. Das Verfahren Paßburg arbeitet mit großen Vakuumzylindern, in die Wagen mit Zuckerbroten hineingeschoben werden, nachdem die Luft zuvor auf etwa 70° erwärmt wurde. Die Eigentemperatur der Brote wird innerhalb 12 bis 14 Stunden auf 50 bis 65° gesteigert. Im Anschluß daran erfolgt die Trocknung ohne äußere Wärmezufuhr, unter Ausnutzung der Überschuwärme des Gutes selbst, dadurch, daß die Zylinder allmählich unter einen verminderten Druck von etwa $0,025$ at gebracht werden. Im weiteren Verlauf wird die Luftleere noch mehr, auf $0,015$ bis $0,007$ at, gesteigert. Die Eigentemperatur der Brote sinkt hierbei auf etwa 15 bis 20° . Dieser Vorgang wiederholt sich mehrfach, indem während weiterer 10 bis 12 Stunden durch vorgewärmte Luft von 55° die Eigentemperatur der Brote auf 40 bis 50° gebracht wird, worauf abermals die Luftleere einsetzt.

In ähnlicher Weise werden die Platten und Streifen in 4 bis 6 Stunden getrocknet.

Um den nach Bergius durch Holzverzuckerung gewonnenen Sirup von seinem Salzsäuregehalt zu trennen, wird der Zucker durch Zerstäubungstrocknung (*Nubilosa*) in Feststoff umgewandelt.

Zuckerhaltige Flüssigkeiten können in Vakuumtrockentrommeln mit Auftragwalzen bearbeitet werden. Die Schicht wird hierbei besonders dünn gehalten und die Umfangsgeschwindigkeit der Trommeln entsprechend gesteigert. Zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit gelangt in der Regel Dampf von höherer Spannung zur Anwendung.

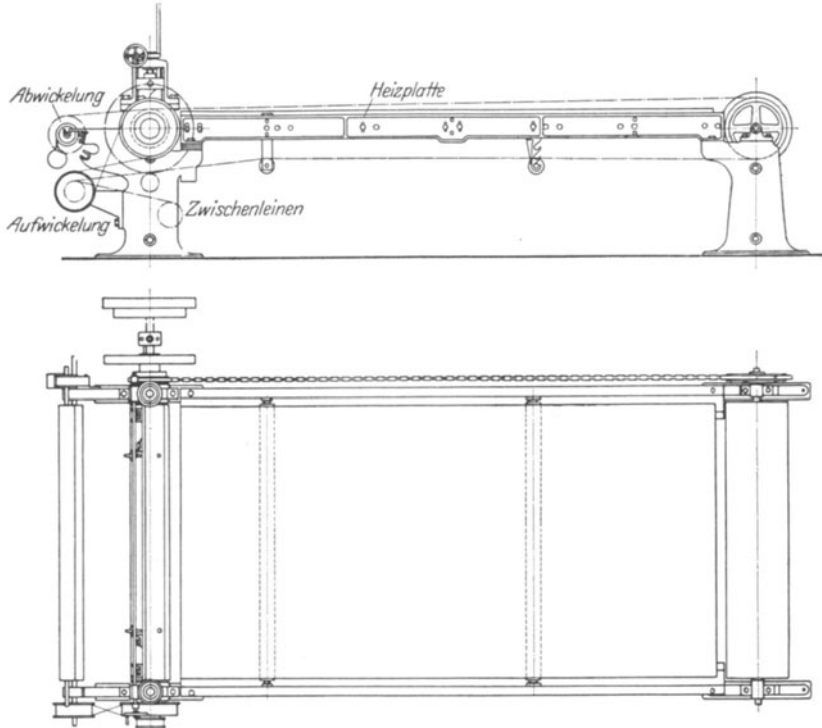


Abb. 271. Streichmaschine für Gummistoffe (Fries).

In gleicher Weise werden malzextrakthaltige Flüssigkeiten behandelt, nachdem sie zuvor auf einen Feuchtigkeitsgehalt von $\gamma_r \approx 0,35$ eingedampft sind.

r) **Gummi, Kautschuk.** Bei der Verarbeitung von Gummi wirken Temperatur und Luftsauerstoff insofern zusammen, als die Oxydationsgefahr mit höherer Temperatur wächst. Die üblichen Verfahren wenden daher Lufttemperaturen von möglichst $t \leq 25^\circ$ an und vermeiden vielfachen Luftwechsel. Zur Gewinnung von Gummi in Flockenform (Hopkinson) wird die Latex nach dem Vorbilde des Krause-Verfahrens durch eine sich drehende Scheibe zerstäubt. Der zu Fellen ausgezogene Kautschuk erträgt noch Temperaturen von 50 bis 70° , ohne daß Kautschukbestandteile verdampfen. Das Trocknen erfolgt, ab-

gesehen von dem mechanischen Auspressen während des Walzens, in Vakuumtrockenschränken, wobei die Felle auf Heizplatten zu liegen kommen, für große Leistungen in Trockenkammern. Häufig geht eine Vortrocknung auf unbeheizten Trockenböden voraus. Lichtabschluß während der Trocknung ist wichtig. Das langwierige Trockenverfahren (Trockenböden 8 bis 14 Tage, Trockenkammern weitere 1 bis 2 Tage) erscheint nur durch die große Empfindlichkeit des Trockengutes begründet, auf alle Fälle aber verbesserungsbedürftig. Dies kann z. B. durch Umwalzen zwischen zwei Trockenabschnitten erfolgen. Die Anwendung von Kanaltrocknern kommt für durchaus gleichmäßiges Trockengut in Betracht.

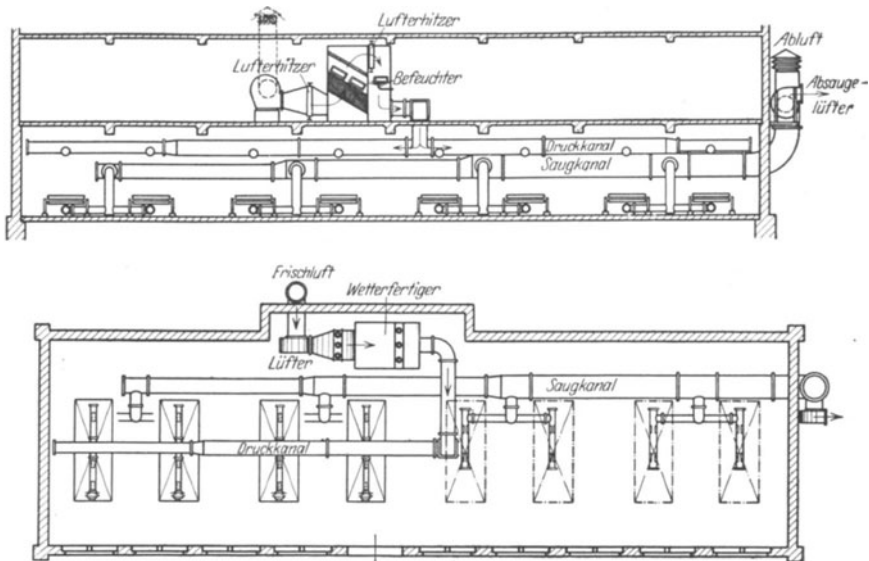


Abb. 272. Bewetterungsanlage eines Streichmaschinenlaals.

Ein wesentlicher Fortschritt kann dadurch erzielt werden, daß nach Abb. 217 an Stelle des mit Luftwechsel arbeitenden offenen ein geschlossener Kreislauf, unter Zwischenschaltung einer Luftentfeuchtungs- vorrichtung, tritt. Es ergibt sich hierbei ein von den äußeren Wetterverhältnissen unabhängiger Betrieb und Ausschaltung der Oxydationsgefahr.

Regenerierte Gummiabfälle werden in Vakuumschaufeltrocknern verarbeitet.

Bei der Herstellung von Gummistoffen laufen nach Abb. 271 (Fries) einseitig gummierte Bänder so über Heizplatten, daß die gummierte Oberseite der Heizvorrichtung abgewendet ist. Der Luft fällt hierbei die Ableitung der aus der Gummimasse entweichenden Lösungsmitteldämpfe zu. Wegen des schädlichen Einflusses des Luftsauerstoffes wird auf eine künstliche Verstärkung des Luftumlaufes im allgemeinen verzichtet. Zweckmäßige Luftzuführung ist gleichwohl wichtig, um eine

Belästigung der Bedienung durch die Gase des Lösungsmittels zu vermeiden. Eine hohen Ansprüchen gerecht werdende Lösung der hier sich ergebenden Aufgabe stellt Abb. 272 (Streichsaal der Kölnischen Gummifäden-Fabrik A. G., Köln) dar. Die nach Entwurf des Verfassers ausgeführte Belüftung des Arbeitsraumes wird mit der Be-

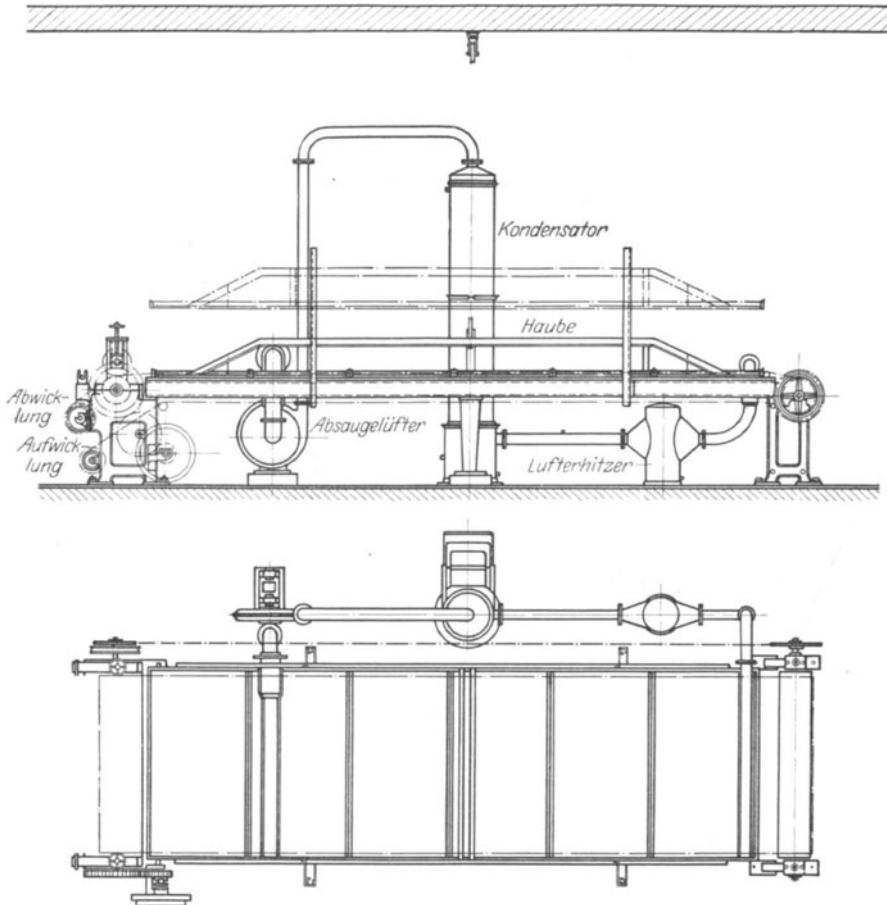


Abb. 273. Streichmaschine für Gummistoffe mit Rückgewinnung des Lösungsmittels (Fries).

schaffung geeigneter Trockenluft dadurch verbunden, daß in einem Wetterfertiger die Frischluft, unabhängig von der äußeren Witterung, auf gleichbleibend etwa 25° und einen Feuchtigkeitsgrad $\varphi \approx 0,6$ gebracht wird.

Gestatten es die Betriebsverhältnisse, so ist es bei allen Einrichtungen, die die Rückgewinnung des Lösungsmittels bezwecken, richtig, den Einfluß der umgebenden Luft durch möglichst dichte Ummantelung fern zu halten. Denn erfahrungsgemäß gelingt die Rückgewinnung um

so leichter, je weniger die Dämpfe durch Luft verdünnt sind. Abb. 273 (Fries) stellt eine so ausgebildete Streichmaschine für gummierte Stoffe dar. Die Rückgewinnungsanlage besteht aus der über der Maschine angeordneten abhebbaren Haube, die seitlich dicht aufliegt und an den Schmalseiten Schlitze für den Durchgang des Stoffes besitzt, dem Absaugelüfter, dem Kondensator und einer Anwärmevorrichtung. Die letzte dient dazu, die aus dem Kondensator austretenden, in der Hauptsache aus Luft bestehenden Gase auf hohe Temperatur zu bringen, um sie so am Austrittsende der Stoffbahn unter die Haube zu blasen. Versuche an derartigen Maschinen haben nach Angabe der Herstellerin folgendes Ergebnis gezeitigt:

Heizplattengröße m × m	zugeführte Benzin- menge kg/h	hiervon zurück- gewonnen %	Lüfterleistung m ³ /h
4 × 1,205	7	66	250
4,2 × 1,81	8,5	75	250
4 × 1,635	6,6	75,5	250
4,01 × 1,175	6,3	86	250

Soll Kautschukmilch mit Farb- und Füllstoffen innig durchmischt werden, so bietet die Krause-Zerstäubungstrocknung die Möglichkeit, den Arbeitsvorgang zu leiten und eine Entmischung zu verhüten.

3. Garne und Stoffe.

a) **Garne.** Die zulässige Höchsttemperatur liegt bei Garnen zwischen $t = 50$ und 70° . Die Trockendauer schwankt zwischen $\frac{3}{4}$ und 2 Stunden. Der Feuchtigkeitsgehalt nach dem Ausschleudern beträgt im allgemeinen $\epsilon_r \approx 1$, bei Kunstseide schwankt er außerordentlich, zwischen 1 und 4. Der Endfeuchtigkeitsgehalt soll nach den bestehenden Handelsvorschriften folgende Zahlen nicht überschreiten:

Streichgarne, Kunstwollgarne	$\epsilon_h = 0,17,$
Kammgarne	$\epsilon_h = 0,1825,$
Baumwollgarne.	$\epsilon_h = 0,085,$
Leinen-, Hanf- und Ramiegespinst.	$\epsilon_h = 0,12,$
Jutegarne	$\epsilon_h = 0,1375,$
Mischgarne aus Wolle und Baumwolle	$\epsilon_h = 0,1,$
Mischgarne aus Wolle und Seide.	$\epsilon_h = 0,16.$
Seiden- und Kunstseidengarne.	$\epsilon_h = 0,11.$

Die Trocknung erfolgt für kleinere Leistungen in Schränken und Kammern, für größere in Kanaltrocknern und meist unter stufenweiser Erwärmung der Trockenluft. Bei dem in Abb. 274 (Schilder) wiedergegebenen Trockenschrank für die Verarbeitung hängender Garnstränge ist die zwischen Heizvorrichtung und Gut eingeschaltete Leitwand beachtenswert, die neben der gleichmäßigen Luftverteilung den Schutz des Gutes gegen die strahlende Wärme der Heizvorrichtung bezweckt.

Für den in Abb. 154 dargestellten mehrstufigen Kanaltrockner gibt die Herstellerin einen Dampfverbrauch von 1,4 und 1,7 kg für 1 kg Wasserentziehung an, wobei die abgehende Luft eine Temperatur t_h

zwischen 70 und 50° und einen Feuchtigkeitsgrad φ_h zwischen 0,75 und 0,5 besitzt. Auch der in Abb. 156 dargestellte Stufenkanaltrockner wird für die Verarbeitung von Garnsträngen benutzt. Der Kanaltrockner von Proctor verwendet Strangträger, die einseitig an der Kette beweglich befestigt sind, auf der anderen Seite lose in Lagern ruhen. Die Entleerung erfolgt hierbei durch Abstreifen der Stränge von den Stäben, die leer durch den Trockenkanal zurückwandern. Bei der für Trocknung und Befeuchtung der Garne dienenden Vorrichtung nach Abb. 114 wandern die Garnstränge unter ständiger Wendung durch den Kanal, so daß ein Zurückbleiben der aufliegenden Strangteile in der Trocknung bzw. Befeuchtung vermieden wird. Die oberen Haspeln werden durch über den Ketten angebrachte Nocken gedreht. Eine untere Haspel hält die Garne stramm. Die zur Trocknung oder Befeuchtung dienenden Seitenkammern sind in Vielzahl über die ganze Länge des Trockners

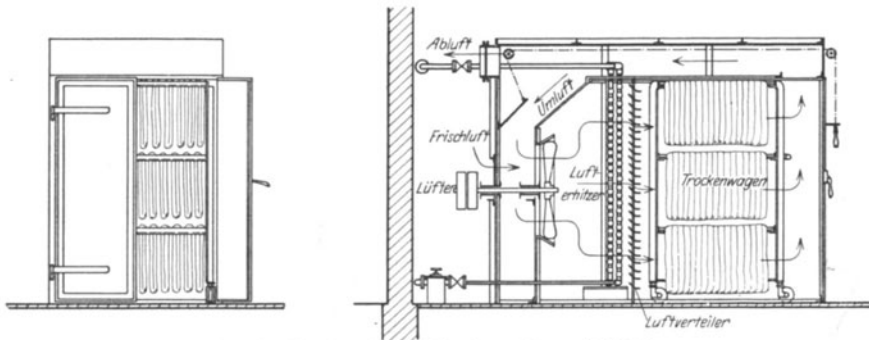


Abb. 274. Trockenschrank für Garnstränge (Schilde).

verteilt. Der für jede Zone angeordnete Lüfter saugt einen Teil der Luft aus dem Kanal zurück, den Rest als Frischluft von außen an, die Mischluft strömt durch die Heiz- bzw. Befeuchtungskammer in den Kanal und durch die Garnstränge von unten nach oben.

Der Garnrockner nach Abb. 275 (Philadelphia) arbeitet nach dem Gegenstrommehrstufenverfahren unter Anwendung besonders großer Lüfter für den Querumlauf der Luft. Am Ende schließt zunächst eine Kühlstufe, dahinter eine Befeuchtungsstufe an. Die Luft strömt zuerst durch den Kühlteil, danach durch die verschiedenen Stufen. Ehe sie den Befeuchtungsteil erreicht, wird sie über einer Kühlvorrichtung entfeuchtet. Die in Abb. 275 ersichtliche schräge Leitfläche dient zur Regelung der Luftverteilung. Der in Abb. 151 dargestellte doppelte Kanaltrockner dient zur Verarbeitung von Leinen-, Flachs- und Kunstseidengarnen nach einem besonderen Mischluftverfahren. Die zweigleisige Ausführung ergibt, neben Verkleinerung der nötigen Raumlänge die Möglichkeit, in beiden Kanälen mit verschiedenen Temperaturen und verschiedenem schnellen Wagenwechsel zu arbeiten und sich damit der Verschiedenart des Trockengutes anzupassen.

Bei den für die Entfeuchtung von Garnen dienenden Kanaltrocknern läuft neben dem eigentlichen, im Gegenstrom arbeitenden Trocken-

kanal häufig ein „kalter“ Kanal. In ihm treten die mit trockenen, stark erwärmten Garnen gefüllten Gestelle so ein, daß zwischen je zwei ein Gestell mit feuchtem Garn geschoben wird, an das die überschüssige Wärme übergeht, während gleichzeitig die getrockneten Garne eine teilweise Wiederbefeuchtung erfahren. Sie werden am Ende des kalten Kanals der weiteren Verarbeitung zugeführt, die feuchten, angewärmten Garne dagegen in den eigentlichen Trockenkanal übergeleitet.

Stufenweise schaltbare Mehrkammertrockner nach Abb. 112 werden gleichfalls für Garne verwandt. Die Herstellerin gibt den Dampfverbrauch zu 1,5 bis 2 kg für 1 kg verdunstetes Wasser an, wenn das Gut einen Feuchtigkeitsgehalt von $x_r \approx 0,75$ anfangs, $x_h \approx 0,175$ schließlich besitzt.

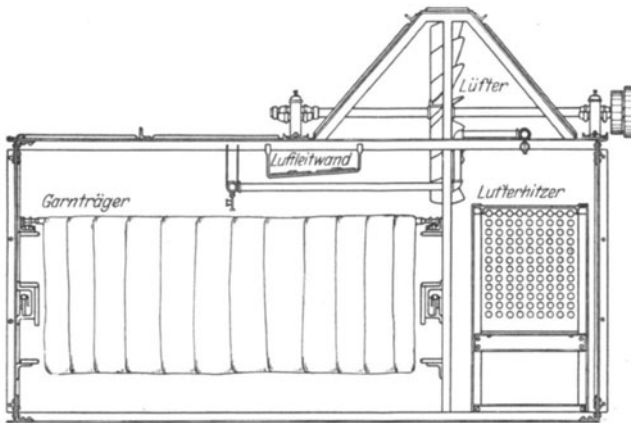


Abb. 275. Querschnitt durch Kanalstufentrockner für Garnstränge (Philadelphia).

Garne, die auf Hülsen gewickelt gefärbt werden, lassen sich in Kammertrocknern verarbeiten. Sie werden hierbei senkrecht auf Horden gestellt oder waagrecht auf Hülsenträger gesteckt und außen und durch das Hülseninnere von der Trockenluft gespült. Hierbei ist eine besonders milde Trocknung am Platze, um eine Übertrocknung der äußeren Teile zu vermeiden und damit Festigkeit und gleichmäßige Färbung zu erhalten.

Für die Trocknung von strangförmigen und gewickelten Kunstseidegarnen kommen wegen der großen Leistung Kanaltrockner nach Abb. 151 und 152 in Betracht. An die eigentliche Trocknung schließen Abkühlungs-, Befeuchtungs- und Ausgleichzone an. Die Garnstränge wandern auf Aluminiumstangen mit Ketten durch den Kanal, während die aufgespulten Garne waagrecht auf fahrbaren Gestellen aufgereiht sind.

b) Stoffe, Wäsche, Kunstleder. Die zulässige Höchsttemperatur hängt von der Art des Rohstoffes ab und dem Grade der Schonung, den der fertige Stoff aus Festigkeitsrücksichten verlangt. $t \approx 70^\circ$ sollen nicht überschritten werden. In gleichem Sinne ist die Trockengeschwindigkeit verschieden und z. B. bei Kunstseide besonders niedrig zu halten.

Geht die Geschwindigkeit der Trockenluft über die Fächerwirkung hinaus, so wird der „Strich“ der Ware gestört, wenn die Luft nicht in der Strichrichtung strömt. Eine Luftgeschwindigkeit von etwa 8 m/s stellt die obere Grenze dar. Der Anfangsfeuchtigkeitsgehalt liegt zwischen $\tau_r \approx 0,5$ bis 1. Er hängt ab von der vorausgehenden Entfeuchtung durch mechanische Mittel. Der Endfeuchtigkeitsgehalt liegt mit etwa $\tau_g \approx 0,15$ bis 0,2 in der Nähe des lufttrockenen Zustandes.

Beispiele für hierher gehörige Trockenvorrichtungen stellen die Abb. 113, 118, 153 dar. Für Heißlufttrockner mit senkrechtem Warenlauf nach Abb. 153 nennt die Herstellerin als Maß der Leistungsfähigkeit eine Warengeschwindigkeit von 1000 bis 2000 m/h, wenn die anfängliche Lufttemperatur 60 bis 80° beträgt. Sie sinkt im Verlauf der

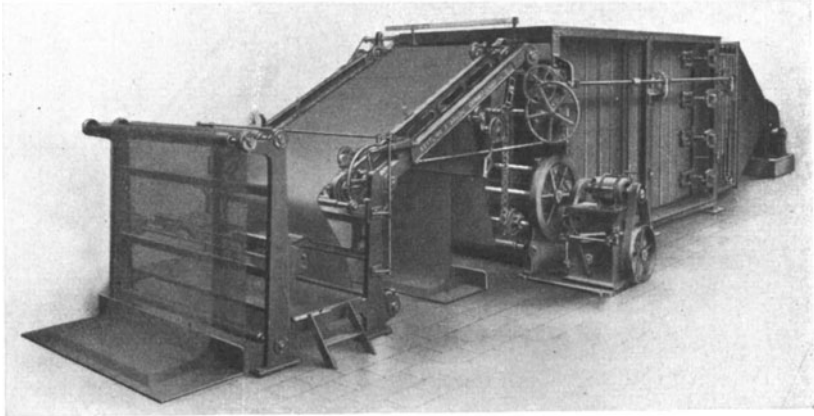


Abb. 276. Gewebetrockner (Kettling und Braun).

Trocknung auf etwa 35° und entspricht in der Kühlabteilung der Raumtemperatur. Der gleichzeitig auftretende Dampfverbrauch wird zu 1,3 bis 1,5 kg für 1 kg Wasserentziehung angegeben. Bei dem waagerechten Warenlauf der Abb. 113 sinkt die Leistungsfähigkeit. Die Anordnung mit senkrechtem Gewebelauflauf tritt daher neuerdings in den Vordergrund. Der in Abb. 153 angedeutete besondere Lüfter bläst von oben Frischluft in die Hängen alsbald nach ihrem Eintritt, wenn Naphthole und andre Farbwaren sofortiges beiderseitiges Antrocknen fordern. Wird die Vorrichtung Abb. 113 als Oxydationsmaschine benutzt und dementsprechend mit einer höchsten Lufttemperatur von 40 bis 45° betrieben, so nimmt die Leistung noch weiter auf eine Warengeschwindigkeit von 350 bis 500 m/h ab, während sich gleichzeitig der Dampfverbrauch auf 2 bis 2,3 kg für 1 kg Wasserentziehung erhöht. Der in Abb. 118 im Schnitt und in Abb. 276 (Kettling und Braun) in äußerer Ansicht dargestellte Bandtrockner für Verarbeitung von Woll- und Halbwoollstoffen besitzt eine Heizvorrichtung, bei der durch verschieden starke Berippung eine für die höheren Lagen zunehmende Lufttemperatur angestrebt wird. Die Leitflächen zwischen Heizvorrichtung und eigent-

lichem Trockenraum bezwecken, neben der Luftverteilung, das Aufprallen der Luft auf das Gewebe zu mildern. Umführungskästen leiten die Luft nach der inneren Wareseite, sie läuft schließlich im unteren, trockeneren Teil dem Hauptlüfter als Umluft, im oberen, feuchteren Teil dem Absauglüfter zu, der sie ins Freie wirft. Die Frischluft strömt der austretenden Warenbahn entgegen und dient gleichzeitig als Kühlluft.

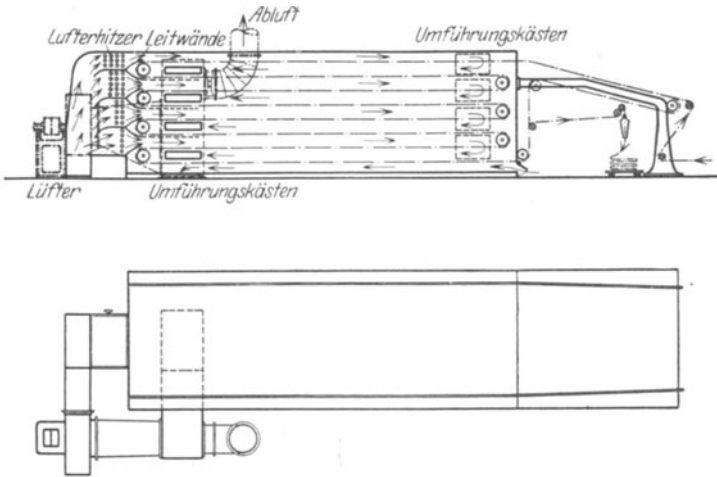


Abb. 277. Spann-, Rahm- und Trockenmaschine. Überblasmaschine (Rud. Jahr).

In die Druckleitung zwischen Lüfter und Lufterhitzer ist eine Filterkammer eingeschaltet, um eine Verstaubung des Lufterhitzers zu vermeiden. Die Seitenwandungen der Trockenvorrichtungen sind in der ganzen Länge quer fahrbar ausgebildet, um die Breite des Trockenraumes der jeweiligen Warenbreite anzupassen. Die in Abb. 277 (Rud. Jahr)

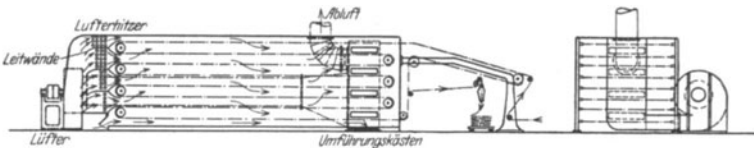


Abb. 278. Spann-, Rahm- und Trockenmaschine. Durchblasmaschine (Rud. Jahr).

dargestellte Spann-, Rahm- und Trockenmaschine arbeitet als sogenannte Überblasmaschine, wenn es sich um die Verarbeitung dichter und wenig luftdurchlässiger Gewebe handelt. Die Abstufung der Heizleistung für die einzelnen Höhenlagen wird durch allmähliche Vermehrung der Zahl der waagrecht liegenden Rohre erreicht. Leitbleche sichern die richtige Verteilung des Luftstromes auf die Heizrohrgruppen und verschiedenen Stofflagen. Um das Aufblasen des Striches zu verhindern, werden bei den Jahrschen Maschinen die unteren Strichbleche verlängert, wie punktiert angedeutet. Bei luftdurchlässigem Gewebe kommt nach Abb. 278 die Ausführung als sogenannte Durchblasmaschine in Betracht.

Die Umführungskästen sind hierbei nur am einen Ende angeordnet. Auskleidung der äußeren Blechwände mit Korksteinplatten sorgt für guten Wärmeschutz. Den Dampfverbrauch gibt die Herstellerin mit 1,8 bis 2 kg für 1 kg verdunstetes Wasser an, wenn der Feuchtigkeitsgehalt des nassen Gutes $\chi_r \approx 0,5$ beträgt und die Luft eine Temperatur

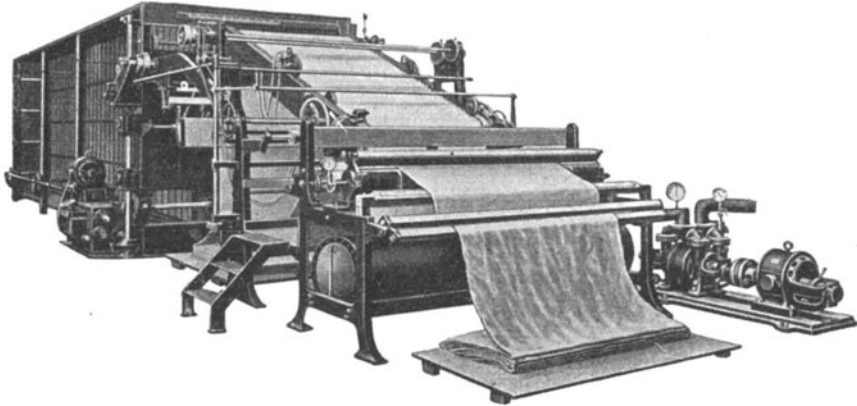


Abb. 279. Spann-, Rahm- und Trockenmaschine mit vorgebauter Abfangvorrichtung (Rud. Jahr).

von anfangs 100° , zum Schlusse 50° besitzt. Der Feuchtigkeitsgrad der Abluft beträgt hierbei 0,3 bis 0,5. Neuerdings wird nach Abb. 163 die Luft im Spannrahmen, statt längs, quer über das Gewebe geblasen. Der Dampfverbrauch wird hierfür mit 1,6 kg für 1 kg verdampftes Wasser angegeben. Abb. 279 zeigt den Spannrahmen in äußerer An-

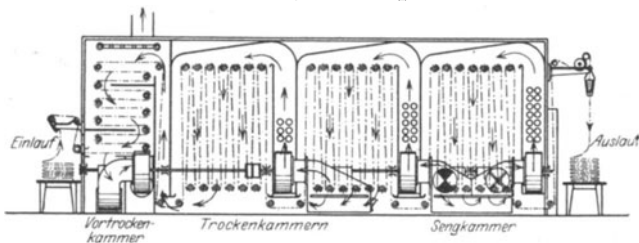


Abb. 280. Karbonisiermaschine (Rud. Jahr).

sicht, verbunden mit einer vorgebauten Absaugvorrichtung, bei der die Ware über den Schlitz eines Rohres geführt wird, das in Verbindung mit einem unter Luftleere gehaltenen Kessel steht. Die Entfeuchtung gelingt hierbei auf einen Wassergehalt $\chi \approx 0,4$ bis 0,5. Verglichen mit Auspressen und Schleudern ergibt sich der Vorteil einer höheren Leistung ohne Unterbrechung der Fließarbeit.

Bei den Karbonisiermaschinen nach Abb. 280 (Rud. Jahr) liegt Verbindung einer Trocken- mit einer Sengvorrichtung vor. Die Ware läuft in der Vortrockenkammer waagrecht, in den folgenden Trockenkammern und der letzten Brennkammer senkrecht hin und her. Die Luft strömt in der Vorkammer durch die Ware, in den drei Hauptkammern

längs, im ganzen entgegengesetzt der Hauptfortbewegung des Stoffes und erfährt eine stufenweise Nachheizung. Ihre Temperatur liegt in der mit angewärmter Frischluft beheizten Brennkammer am höchsten. Besondere Formgebung der Kammerdecken dient zur guten Luftverteilung unter Vermeidung toter Ecken, in denen eine örtliche Ab-

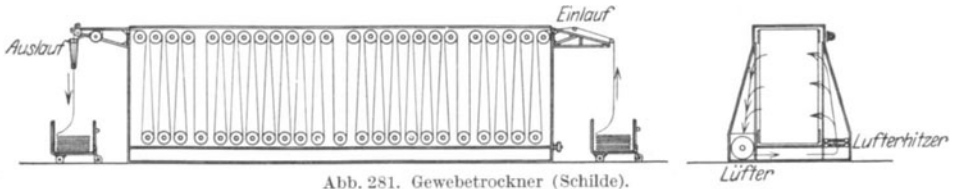


Abb. 281. Gewebetrockner (Schilde).

kühlung der Luft bis zur Tropfenbildung erfolgen könnte. Nach Angabe der Herstellerin liegt der Dampfverbrauch bei 2,5 kg für 1 kg verdunstetes Wasser, wenn die Temperatur in der Brennkammer 110° beträgt und allmählich auf 50° in der Vortrockenkammer abfällt. Ihr Endfeuchtigkeitsgrad φ_h wird zwischen 0,25 und 0,6 schwankend an-

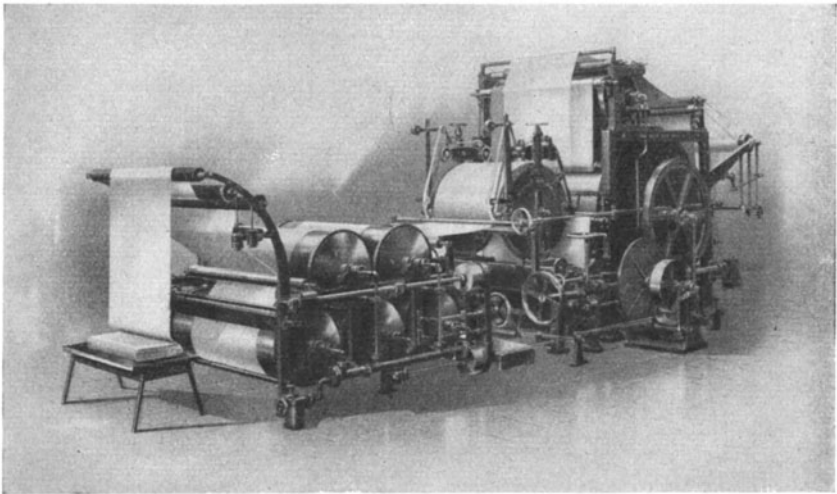


Abb. 282. Filzkalander (Rud. Jahr).

gegeben. Der in Abb. 281 (Schilde) dargestellte Trockner dient zur Verarbeitung von Segeltuchen und dgl. Die Luft stömt quer zum Kanal längs der Stoffflächen. In anderen Fällen werden die Gewebestoffe lose eingehängt, wie Trikotschläuche, Leinen- und Baumwollgewebe, steif appretierte Gewebe, Wachstuche, Filtertuche, oder in Kammern fest gespannt gehalten und ruhend getrocknet. Der Hängetrockner Abb. 155 besitzt nach Angabe der Herstellerin eine Leistung entsprechend 80 bis 100 kg/h Wasserverdampfung für eine 2 m lange, 3 m breite Zone. Ohne Zug werden empfindliche Gewebe flachliegend unter gleichzeitiger Belüftung von unten und oben rasch und schonend nach Abb. 177

getrocknet. Nach Angabe der Herstellerin beträgt die mittlere Trockenleistung 20 kg/h für eine Zone von 2,2 m Länge, 3,2 m Breite.

Für die Trocknung von Damenkleider- und Kammgarnstoffen, Seidengeweben, Trikots, Futter- und Schirmstoffen gelangen Filzkalander nach Abb. 282 (Rud. Jahr) zur Verwendung, die nach den Grundsätzen der Papiertrockenmaschinen arbeiten. Die Ware wird hierbei auf zwei bis fünf dampfbeheizten Zylindern vorgetrocknet — dies ist besonders nötig bei imprägnierten Stoffen —, danach durch den „Palmer“ breitgespannt und schließlich auf dem großen Zylinder fertig-

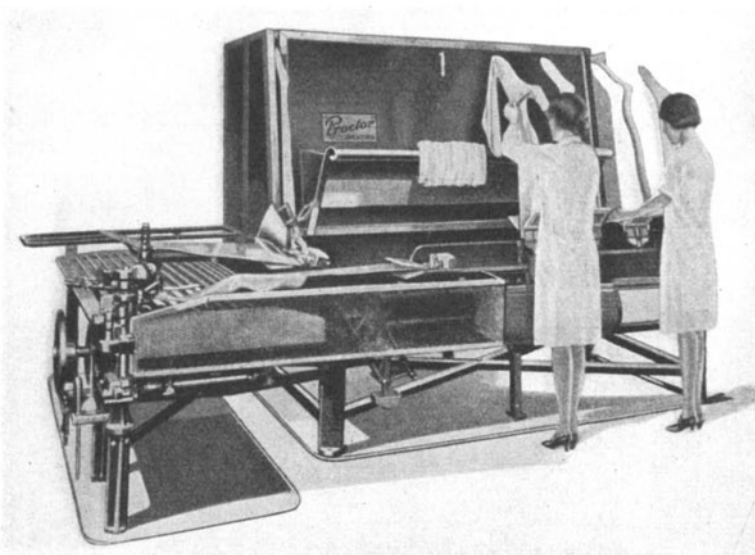


Abb. 283. Trockenvorrichtung für seidene Strümpfe (Proctor).

getrocknet. Ein endloser Filz preßt die breitgespannte Ware gegen den Zylinder und schafft guten Griff und gutes Aussehen.

Versuche, die Eberle¹ an Tuchtrockenvorrichtungen vornahm, ergaben bei 8 Bahnen übereinander einen Dampfverbrauch von 6,31 kg, bei 10 Bahnen übereinander von 2,09 und 3,52 kg für 1 kg Wasserverdampfung. Der erste Trockner arbeitete mit vorgewärmter Frischluft, der letzte mit Umluft. Der zehnbahnige Trockner ergab den niedrigen Dampfverbrauch von 2,09 kg bei Beschickung mit 364 kg nassem Tuch, dessen anfänglicher Feuchtigkeitsgehalt $\chi_r = 1,04$ zum Schluß nahezu restlos ausgetrieben wurde. Die höhere Zahl von 3,52 kg wurde bei Beschickung mit 297 kg nassem Tuch gefunden, das anfangs einen Feuchtigkeitsgehalt $\chi_r = 0,885$ besaß und gleichfalls nahezu vollständig entfeuchtet wurde. Die Luft ging im ersten Falle mit 54° und einem Feuchtigkeitsgrad 0,42, im zweiten Falle mit 61° und einem Feuchtigkeitsgrad 0,27 ab.

¹ Eberle: Wärmewirtschaft in der Textilindustrie. Z. V. d. I. 1923.

Für den Sonderzweck der Trocknung seidener Strümpfe zeigt Abb. 283 (Proctor) eine Ausführung, deren Eigenart mehr in dem Arbeitsvorgang als in dem Trockenverfahren liegt. Die

Aluminiumformen wandern stehend zu dem Arbeitsstand. Hier wird der feuchte Strumpf übergezogen und am Ende festgeklemmt, um beim Trocknen nicht zu schrumpfen. Durch einen Schlitz tritt er in den Trockenkanal ein, bewegt sich darin langsam zum anderen Ende und tritt hier durch einen zweiten Schlitz aus. Anschließend wird die Form gesenkt, der getrocknete Strumpf selbsttätig abgestreift und dutzendweise aufgelegt. Die leere Form klappt hoch und wandert neuerlich zum Arbeitsplatz. Der Trockenkanal enthält die Heizvorrichtung und einen Lüfter, der für gleichmäßige Luftbeschaffenheit sorgt.

Die einfachste Vorrichtung für künstliches Trocknen feuchter Wäsche stellt das Plätteisen dar. Seine Wirkung läuft auf eine Vorwärmung des Gutes hinaus, das damit selbst zum Wärmeträger wird und erst nach dem Vorbeigleiten des Heizkörpers in Wechselwirkung mit der Luft tritt. Ein Teil der Feuchtigkeit wird von der aus Filz oder anderen durchlässigen Stoffen bestehenden Unterlage in Form von Dampf aufgenommen, wenn die Temperatur der Wäsche 100° über-

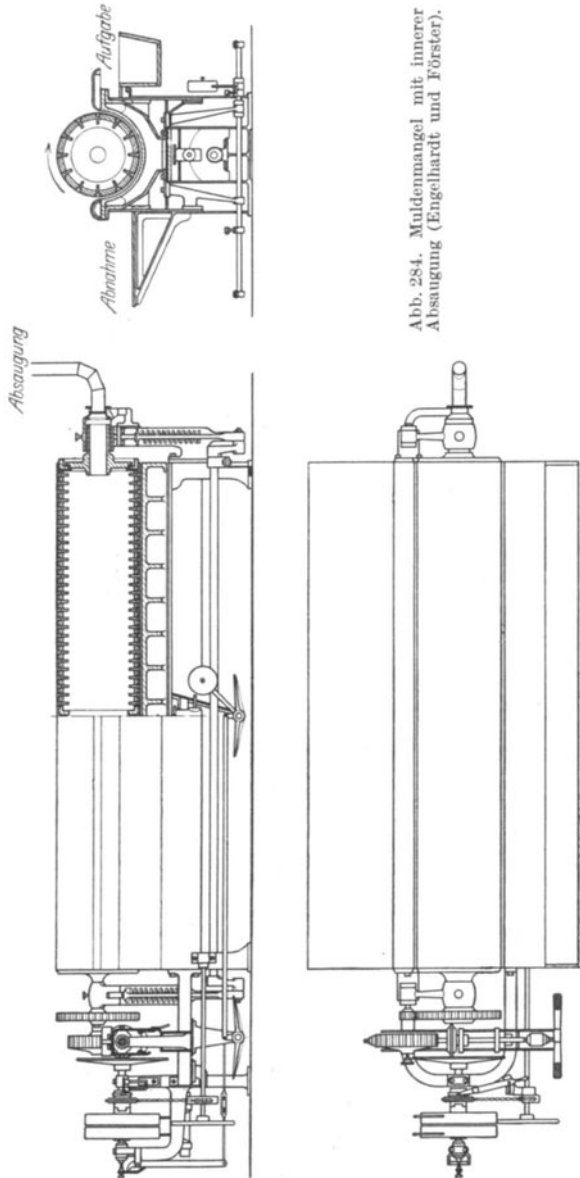


Abb. 284. Muldenmangel mit innerer Absaugung (Engelhardt und Förster).

schreitet. Sobald das Wäschestück fertig ist, entweicht die Feuchtigkeit aus der Unterlage in die Umgebung. Das Eindringen des Dampfes in die Unterlage wird vermieden, wenn die Temperatur unter 100° liegt, weil alsdann ein Verdampfen unmöglich ist und nur ein Verdunsten nach der luftberührten Seite zu in Betracht kommt.

Ein vervollkommnetes Plätteisen stellt die Muldenmangel dar. Auch hier ist während der eigentlichen Erwärmung zwischen der beheizten Mulde und der auf der Plättwalze befindlichen Unterlage aus Filz und Nessel die äußere Luft abgesperrt. Liegt die Temperatur der Wäsche über 100° , so findet ein Eindringen des entstehenden überhitzten

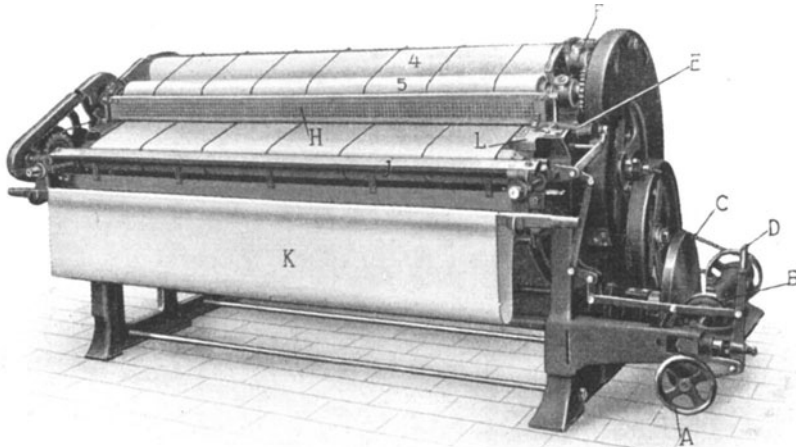


Abb. 285. Zylinder-Dampfmangel (Poensgen).

A Verstellvorrichtung, B Reibrad, C Reibscheibe, D Andrückhebel, E Walzenlager, H Sicherheitsklappe, K Wäschesack, L Führungsblech, 4, 5 Andrückwalzen.

Dampfes in die Unterlage statt. Sobald die Wäsche aus der Mulde herauskommt, bildet sie zusammen mit der Unterlage den Wärmeträger und ermöglicht dadurch erst die Verdunstung in die Umgebung.

Die in Abb. 284 (Engelhardt und Förster) dargestellte Muldenmangel mit innerer Absaugung der Dämpfe durch den aus gelochtem Blech bestehenden Walzenmantel hindurch ergibt demgegenüber eine nicht unwesentliche Veränderung der Arbeitsweise. Für die Wäscheteile, die gerade zwischen Mulde und Walze laufen und durch die beheizte Mulde erwärmt werden, ist eine Überhitzung nicht zu befürchten, wenn Trocknung über den hygroscopischen Punkt vermieden wird. Die Wäsche nimmt bei atmosphärischem Druck etwa 100° an. Ihre Feuchtigkeit verdampft und entweicht in die hohle Walze. Da bei richtiger Einstellung eine Nachtrocknung außerhalb der Mulde vermieden ist, ist der Arbeitsraum leicht schwadenfrei zu halten. Bei der Zylindermangel Abb. 285 (Poensgen) sind die Andrückwalzen federnd gelagert und im Durchmesser so abgestuft, daß an der Ausgabeseite die Andrückwalze mit größtem Durchmesser liegt, daher bei gleich starker Umwickelung

der Druck beim Fortschreiten zunimmt. Zur Erzielung des Glanzes eilt der Zylinder gegen die Walzen vor; dadurch bleibt die Zylinder-Umwickelung locker und weich. Beiderseits befinden sich Schutzvorrichtungen, bestehend aus Hängeklappen, durch die im Gefahrenfalle die Mangel sofort stillgesetzt wird. Die Verbindung einer Muldenmangel

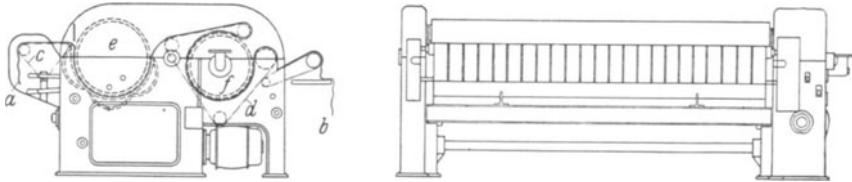


Abb. 286. Muldenmangel mit innerer Absaugung, verbunden mit Zylindermangel (Ellerbrock). *a* Einführung, *b* Ausgang, *c* Einlaßgurt, *d* Führungsgurt, *e* Muldenmangel, *f* Zylindermangel.

mit innerer Absaugung zur Vortrocknung und einer Zylindermangel mit Umföhrungswalzen zum Fertigtrocknen stellt Abb. 286 (Ellerbrock) dar. Die Einführung der Wäsche erfolgt durch Einlaßgurte. Führungsgurte leiten die Wäsche um den Zylinder. Die Wäsche berührt die Heizfläche nacheinander mit der einen und anderen Seite.

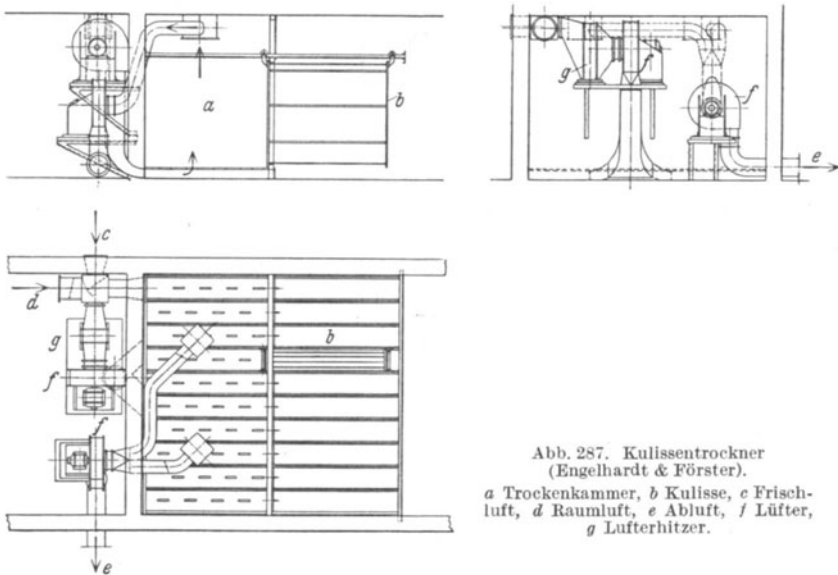


Abb. 287. Kulissentrockner (Engelhardt & Förster). *a* Trockenkammer, *b* Kulisse, *c* Frischluft, *d* Raumluft, *e* Abluft, *f* Lüfter, *g* Lufterhitzer.

Für das künstliche Trocknen aufgehängter unglatter Wäschestücke, die nicht durch die Mangel bearbeitet werden können, kommen Trockenkammern nach Abb. 210 zur Anwendung, außerdem sogenannte Kulissentrockner mit ausziehbaren Wäscheträgern. Bei den letzten ist die Heizvorrichtung am Boden, der Abzug an der Decke angeordnet, während die Luft von unten eintritt. Auf diese Weise kommt eine milde Trocknung mit 40 bis 50° zustande, allerdings auf Kosten langer Trocken-

zeit und hohen Wärmeverbrauches. Neuerdings erfolgt die Beheizung auch mittelbar nach Abb. 287 (Engelhardt und Förster) unter Anwendung eines äußeren Lufterhitzers und zweier Lüfter für Frischluft und Umluft bzw. Abluft. Gegenüber der stillen Kammertrocknung verbessert die künstliche Lüftung den Geruch der Wäsche.

Einen Ersatz der Kulissentrockner stellen Wäschetrockenmaschinen nach Abb. 288 (Poensgen) dar. Die Wäsche befindet sich in gelochten Trommeln, die sich drehen. Ein Lüfter saugt die außen angewärmte Luft hindurch. Nach Angabe der Herstellerin erreicht der Dampfverbrauch beim Trocknen geschleuderter Frottiertücher, einer Lufttemperatur von 65 bis 73° am Eintritt, 43 bis 59° am Austritt, die beträchtliche Höhe von 4 kg für 1 kg Wasserentziehung, die

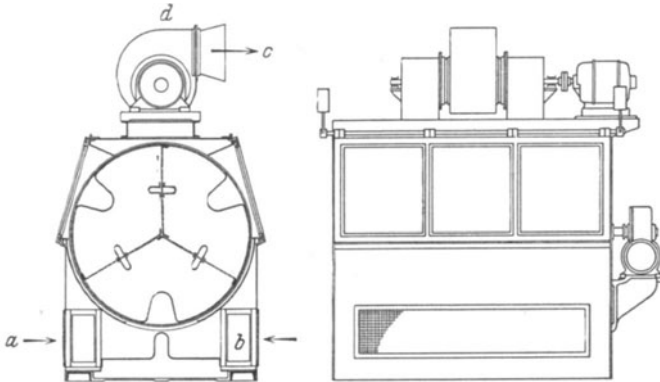


Abb. 288. Wäschetrockenmaschine (Poensgen).
a Frischluft, b Lufterhitzer, c Abluft, d Lüfter.

nur durch die Güte der getrockneten Wäsche einen Ausgleich findet. Durch Verbindung mit Umluft läßt sich das Verfahren wohl noch verbessern.

Für Großbetriebe gelangen Kanaltrockner zur Anwendung, durch die die an Stangen hängenden Wäschestücke mittels Ketten wandern.

Kunstleder besteht aus Gewebe mit mehrfach aufgelegter pastenartiger Masse, die das Gewebebild verdeckt. Künstliche Trocknung kommt bei seiner Herstellung zunächst in Form von Lufttrocknung bei dem vorgefärbten, gespannten Gewebe in Betracht, das möglichst vollkommen entfeuchtet sein muß, ehe die Deckmasse aufgebracht wird. Diese besteht nach Münzinger¹ aus Nitrozellulose mit durch Alkohol verdünntem Essigäther als Lösungsmittel, unter Zusatz von Erdfarben und Rizinusöl. Die bestrichene Stoffbahn wird in Kanaltrocknern bei etwa 70 bis 90° behandelt und der Vorgang mehrfach wiederholt. Das ausgetriebene Lösungsmittel wird wiedergewonnen. Dieser zweite Abschnitt besitzt alle Eigentümlichkeiten der Lacktrocknung.

¹ Münzinger: Die Kunstlederfabrikation. Das Technische Blatt 1926.

4. Lacke.

a) Lackierte Gegenstände. Lacke werden als Überzug auf Metall- und Holzteilen verwandt. Ihre Auftrocknung läuft bei flüchtigen Lacken auf ein Verdunsten des Lösungsmittels hinaus, bei Öllacken auf eine Erhärtung des Lösungsmittels unter dem Einfluß des Luftsauerstoffes.

Je nachdem es sich um lackierte Holz- oder Blechteile handelt, sind die zulässigen Temperaturen verschieden. Außerdem spielt die Zusammensetzung des Lackes selbst eine Rolle. Lackierte Holzteile sollen eine Temperatur von $t \approx 70^\circ$ nicht überschreiten. Bei Anwendung weißer Lacke liegt die Grenze wegen der Vergilbungsgefahr mit $t \approx 60^\circ$ noch niedriger. Viel höher steigen die Temperaturen, wenn Asphaltlacke auf Stanz- und Schmiedeteilen aufgebracht werden. Die genaue Zahl hängt hier von dem Lack selber ab und schwankt zwischen $t = 150$ bis 250° . Mehrmaliges Tauchen und Trocknen bildet hierbei die Regel.

Die Menge der aufzutrocknenden Lösungsmittel läßt sich zahlenmäßig nur in besonderen Fällen festlegen. Gleiches gilt für die Trockendauer. Im allgemeinen hört nach einer Trockenzeit von etwa 6 Stunden das Anhaften von Staub auf. Die gesamte Trockenzeit liegt durchschnittlich bei etwa 10 Stunden.

Den weitesten Raum nehmen lackierte Gegenstände bei dem Bau von Kraftfahrzeugen ein. Die Forderung wirtschaftlicher Arbeitsweise verlangt hier rasche Trocknung und geschickte Einfügung der Trocknung in den gesamten Arbeitsgang. Für die Herstellung im großen bedeutet daher der Kanaltrockner die geeignete Form. Abb. 143 stellt nach Lefèbre¹ einen für die Behandlung von lackierten Schutzblechen und kleinen Metallteilen bei der Chevrolet Motor Co., Detroit, verwandten hintereinandergeschalteten Doppelkanaltrockner dar. Für die Trocknung von lackierten Kraftfahrzeugaufbauten werden Doppelkanäle zur Umgehung übermäßiger Längenausdehnung nebeneinander angeordnet. Über die Wirkungsweise des Trockners Abb. 143 gibt das Temperaturbild der Abb. 289 Aufschluß. Der lackierte Körper wird danach allmählich erwärmt, durchläuft eine Zone gleichbleibender Temperatur und nimmt vor dem Auslauf langsam die Temperatur der Umgebung wieder an.

Der in Abb. 290 (Daqua) dargestellte mit Tauchvorrichtung verbundene Lacktrockner arbeitet wie der nach Abb. 143 im Gegenstrom, führt jedoch die durch Gas erwärmte und gefilterte Luft in gleich-

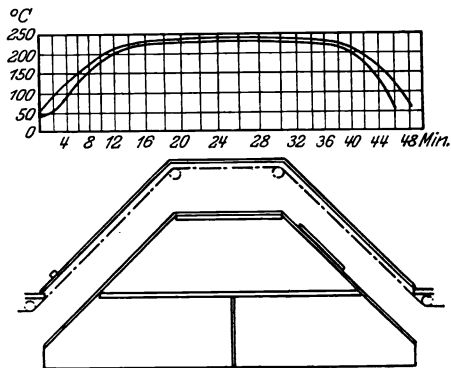


Abb. 289. Temperaturverlauf in einem Lacktrockner (Lefèbre).

¹ Lefèbre: Process of, and Equipment for, Fender and Body Enameling. Journ. of the Soc. of Aut. Eng. 1924.

mäßiger Verteilung der letzten Strecke des waagerechten Laufes zu und

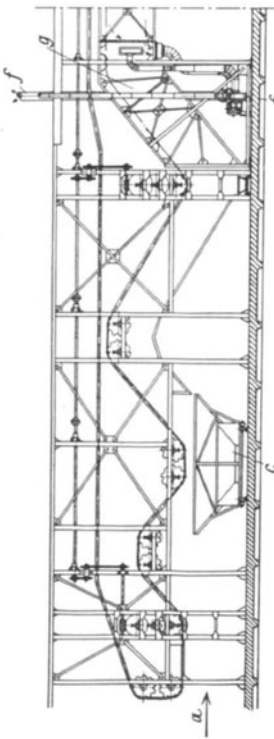
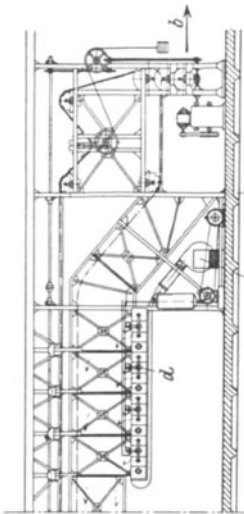


Abb. 290. Kanaltrockner für lackierte Blechteile (Daqua). a Aufnahme, b Abnahme, c Tauchvorrichtung, d Luffterhitzer, e Lüfter, f Abluft, g Abgase.

saugt die mit Lackdünsten geschwängerte Luft am entgegengesetzten Ende des hoch liegenden Trocknerteiles ab. Die auf- und absteigenden Strecken dienen infolgedessen in erhöhtem Maße der langsamen Anwärmung bzw. Abkühlung und verhüten dadurch ein Aufquellen des Lackes. Die Abgase des Gasluffterhitzers werden zur weitergehenden Ausnutzung ihres Wärmeinhalts über die Seitenwände des Kanals geführt, am entgegengesetzten Ende durch einen zweiten Absaugelüfter erfaßt und ins Freie geschafft.

Während diese Trockner mit Heißluft arbeiten, die außerhalb durch Feuerungen erwärmt wird, wendet der Doppelkanaltrockner Abb. 291 (Werner und Pfleiderer) innere Beheizung durch Heißwasser und innere Luftumwälzung im Gegenstrom an. Auf diese Weise läßt sich rasche Trocknung, gute Ausnutzung der Trockenluft und Verminderung des Frischluftbedarfs erreichen, die bei Lacktrocknern wegen des Staubgehaltes der äußeren Luft von besonderer Bedeutung ist. Anwendung findet diese Bauweise für die Verarbeitung von Fahrrad- und Kraftwagenteilen im Fließbetrieb. Gespritzte Kleinteile werden in Trockenöfen nach Abb. 164 behandelt. Gleichmäßige Trocknung wird auch hier durch zweckmäßige Verteilung der inneren Heizelemente erreicht. Wichtig ist in allen Fällen, daß die Frischluft nicht etwa abschreckend auf die Lackschicht wirkt. Sie tritt daher zur Vorwärmung zunächst unter die Heizgitter.

Bei Herstellung von Blechverpackungen erfolgt Grundieren, Bedrucken und Lackieren in der Regel bei der ungebogenen Blechplatte, die einer mehrmaligen Trocknung unterworfen wird. Neben Trockenkammern, die mehrere mit Blechtafeln gefüllte Wagen besitzen, kommen Trockenkanäle zur Verwendung. Eine Vervollkommnung stellen die Lehmannschen Kettenöfen (Werner und Pfleiderer) dar, in denen die Tafeln von einem mit senkrechten Zinken versehenen Kettenpaar getragen werden.

Bei allen Fördermitteln, die den hohen Temperaturen der Lacktrockner ausgesetzt sind, muß die erhebliche

Längenänderung durch selbsttätige Spannvorrichtungen o. dgl. berücksichtigt werden. Für die Schmierung kommt, wegen der Entzündungsgefahr, nur Öl von hohem Flammpunkt in Frage.

Kleinere lackierte Teile, wie Spulen, Knöpfe, Nadeln, können auf Horden getrocknet werden.

Eine Mehrfach-Trockenkammer für die Behandlung lackierter, aus verleimtem Holz bestehender Fahrzeugaufbauten zeigt Abb. 292 (Balcke). Die Schaltung des Luftweges kann hierbei so erfolgen, daß mit vorgewärmter Luft allein oder mit Mischluft oder nur mit Umluft gearbeitet wird. Außerdem ist eine Befeuchtung der Luft vorgesehen, um mit verhältnismäßig hohen Temperaturen trocknen zu können, ohne daß die Leimung reißt. Die Trocknung wird in sechs Arbeitsgängen vorgenommen, deren jeder nach einem mitgeteilten Versuch 33 bis 40 Min. dauert, wenn die Luft bei einer Temperatur von 50 bis 67° einen

Feuchtigkeitsgrad $\varphi \approx 0,3$ bzw. 0,52 besitzt.

Bei Lacktrockenanlagen ist der spezifische Wärmeverbrauch in der Regel deshalb verhältnismäßig hoch, weil die

in dem austretenden Gut enthaltene Wärmemenge in ungünstigem Ver-

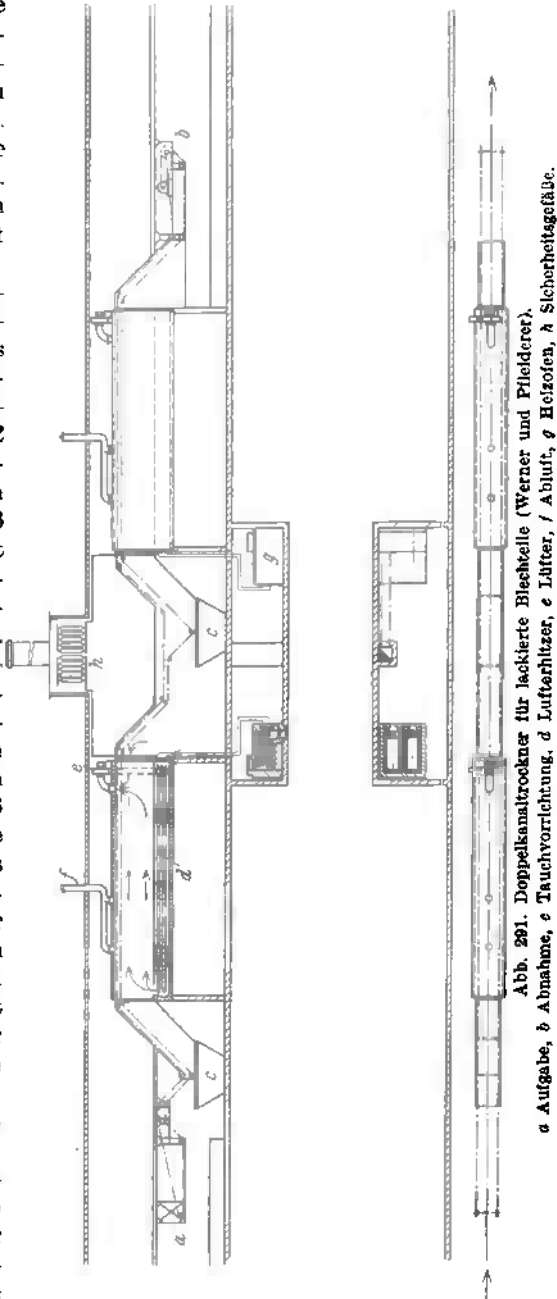


Abb. 291. Doppelskanaltrockner für lackierte Blechhülle (Werner und Pfleiderer).

a Aufgabe, b Abnahme, c Tauchvorrichtung, d Lufterhitzer, e Lüfter, f Abluft, g Heizofen, h Sicherheitsgefäße.

hältnis zu dem Wärmeverbrauch für die Nutztrocknung steht, einmal wegen der in der Regel hohen Zahl des Verhältnisses $\frac{\text{Trockenstoffgewicht}}{\text{Feuchtigkeitsmenge}}$, dann wegen der hohen Temperaturen. Die letzten bilden auch die Ursache, weshalb bei Dampf als Heizmittel mit dem Niederschlagwasser eine erhebliche Wärmemenge abgeht, deren Ausnutzung hier in besonderem Maße anzustreben bleibt. Aus dem gleichen Grunde ist sorgfältiger Wärmeschutz der Trockeneinrichtung zu fordern.

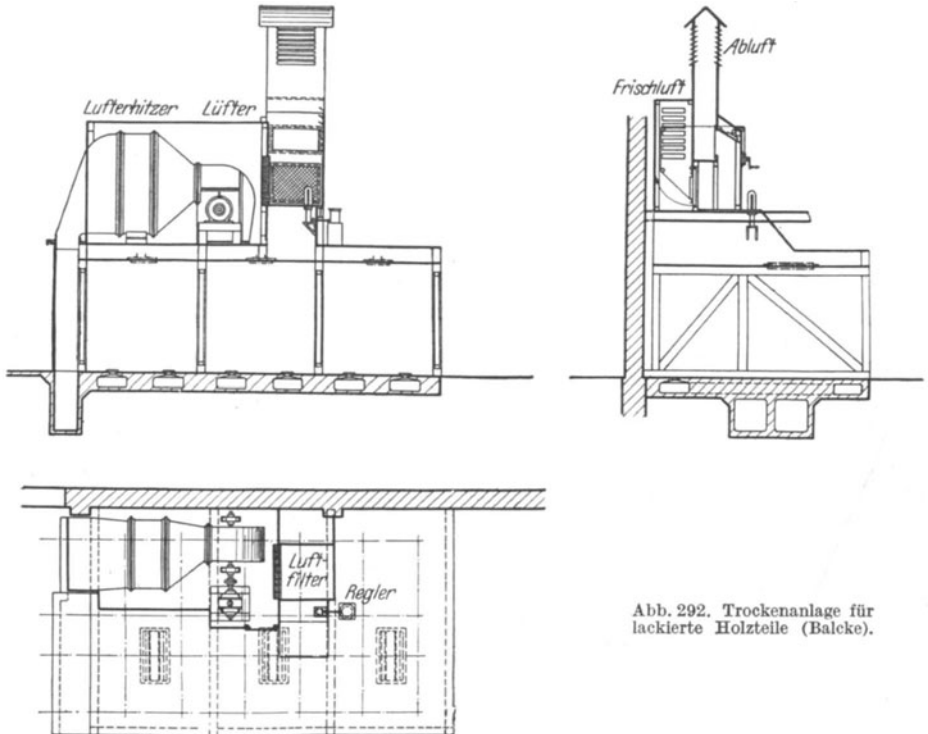


Abb. 292. Trockenanlage für lackierte Holzteile (Balcke).

b) Elektrische Kabel. Der Widerstand der Kabelisolierung nimmt mit dem Feuchtigkeitsgehalt ab. Dieser ergibt sich durch die Herstellung in der stark wechselnden Höhe $r_r \approx 0,08$ bis $0,4$ und soll möglichst restlos entfernt werden. Die Trocknung erfolgt daher unter Anwendung von Luftleere in viereckigen oder zylindrischen Trockenschränken. Die Heizvorrichtung besitzt mannigfaltige Form und paßt sich der Gestalt des zu trocknenden Gutes an. Abb. 228 stellt einen mit Gleis versehenen Vakuumtrockner für Spulen und Motoranker dar, bei dem das Mantelinnere durch Heizrohre belegt ist. Für Kabeltrommeln kommt ein weiterer Heizkörper im Innern hinzu, um den sich die Trommeln legen. Er besteht aus Heizschlangen oder aus einem Zylindereinsatz mit Doppelmantel.

Die Trockendauer hängt von den Abmessungen und der Beschaffenheit der Isolierung ab und schwankt zwischen 12 und 24 Stunden. An die Trocknung schließt sich die Durchtränkung der Wicklung an. Werden hierzu Lacke mit flüchtigen Lösungsmitteln verwandt und der Trockner selbst gleichzeitig zum Tränken benutzt, so bietet sich in einem Oberflächenkondensator die Möglichkeit zur Rückgewinnung der Lösungsmittel. Verbundlacke kommen in Betracht, wenn die Wicklungen im Betrieb starker Erwärmung ausgesetzt sind. Sie bedürfen zum Festtrocknen hoher Temperaturen, bis 200°, und — bei Anwendung von Dampf als Heizmittel — Spannungen bis 25 at. Da die Verbundlacke wasserfrei sind, handelt es sich hierbei nicht um eine eigentliche Trocknung. Tränkung mit Firnis verlangt Zutritt von Luft bei der anschließenden Nachrocknung, um die Erhärtung unter der Wirkung des Sauerstoffs zu erreichen.

Die fast wasserfreien Wicklungen wirken, soweit sie nicht luftdicht überzogen werden, stark hygroscopisch und bedürfen besonderer Vorsichtsmaßnahmen, um Wiederaufnahme von Feuchtigkeit aus der Luft zu verhindern. Die weitere Verarbeitung erfolgt daher zweckmäßig in Arbeitsräumen, die mit Luft von sehr niedrigem Feuchtigkeitsgrad versorgt werden.

5. Brennstoffe.

Die künstliche Trocknung hat bei der Verarbeitung von Rohbraunkohle zu Briketts besondere Bedeutung gewonnen. Daneben kommt sie für weitgehende Entfeuchtung von Steinkohle in Betracht, die als Staubkohle verfeuert werden soll. Die künstliche Trocknung von Torf und anderen minderwertigen Brennstoffen harrt noch der Lösung.

Die obere Temperaturgrenze bei der Trocknung ist durch die Bedingung gegeben, daß ein Abgasen unter Verlust wertvoller Bestandteile vermieden werden soll. Die beginnende Entgasung der Braunkohle liegt bei etwa 115°, so daß also ein Verdampfen unter atmosphärischem Druck bei 100° noch unbedenklich erscheint. Im allgemeinen wird bei den mit lufthaltigem Schwaden arbeitenden Trocknern eine niedrigere Temperatur von 80 bis 90° nicht überschritten.

Für die Anteile mit verschiedener Korngröße kann in erster Annäherung angenommen werden, daß die Abnahme des Feuchtigkeitsgehalts in gleichem Verhältnis steht wie die spezifische Oberfläche $\frac{F}{V}$ des Korns. Bei Kugelform wird $\frac{F}{V} = \frac{6}{D}$. Der Feuchtigkeitsgehalt nimmt daher im umgekehrten Verhältnis des Korndurchmessers ab. Hierbei ist vorausgesetzt, daß Körner verschiedener Größe sich wechselseitig nicht beeinflussen, was genügend genau so lange zutrifft, wie auch das feinste Korn noch feucht ist. Sobald jedoch Teile des Trockenguts in den hygroscopischen Zustand eintreten, setzt eine Wechselwirkung ein. Das Feinkorn nimmt eine Temperatur an, die höher liegt als die Kühlgrenze, und überträgt Wärme auf das Grobkorn. Infolgedessen wird die Trocknung des Grobkorns beschleunigt, die des Feinkorns noch unter das Maß verzögert, das sich aus seinem hygroscopischen Zustand an sich

ergäbe. Das aber bedeutet, daß ein zunehmender Ausgleich der Unterschiede stattfindet. Das Grobkorn schützt hierbei das Feinkorn gegen eine zu weitgehende Übertrocknung.

Diese Gesichtspunkte finden neuerdings dadurch Berücksichtigung, daß die Trocknung nur anfangs für Grob- und Feinkorn gemeinsam erfolgt, wobei das erste in der Trocknung erheblich nachhinkt. Zur Beschleunigung des Ausgleichs wird das Feinkorn nach der Vortrocknung abgesiebt und das Grobkorn gleichzeitig zerkleinert. Für das fertigtrocknende zerkleinerte Grobkorn äußert sich die Wechselwirkung zwischen den sofort ins hygroskopische Gebiet eintretenden feinen und den noch feucht bleibenden gröberen Bestandteilen in der Weise, daß die Feuchtigkeitsabnahme für alle Korngrößen zunächst etwa gleichmäßig erfolgt. Im letzten Verlauf der Nachtrocknung überwiegt die Feuchtigkeitsabnahme der groben Teile die der feinen Teile. Das Maß des schließlich verbleibenden Feuchtigkeitsunterschieds der einzelnen Korngrößen hängt, außer von dem Verhältnis von Feinkorn zu Grobkorn, von der Höhe des Endfeuchtigkeitsgehalts ab. Niedriger Grobkorngehalt und weitergehende Unterschreitung des hygroskopischen Punkts begünstigen den Ausgleich. Von den beiden Mitteln ist in der Regel nur das erste — Absieben und Zerkleinern des Grobkorns mit anschließender Nachtrocknung — anwendbar, während eine zu weitgehende Trocknung die Trocknerleistung stark vermindert, den Wärmeverbrauch unnötig erhöht, schließlich das Trockengut schädigt, sich daher aus wirtschaftlichen Gründen verbietet.

Nach den Untersuchungen von Seidenschnur¹ an lignitischer Rohbraunkohle mit einem anfänglichen Feuchtigkeitsgehalt $\chi_r = 1,12$ ergaben sich bei Trocknung durch sauerstoffreies Spülgas mit einer Höchsttemperatur von $t_p = 200$ bis 250^0 und einer Auslauftemperatur der getrockneten Kohle von $t_b = 60$ bis 80^0 folgende Zahlen des Endfeuchtigkeitsgehaltes χ_b :

durchschnittlich	0,475	0,277	0,240	0,087	0,065	0,067
des Anteils mit Korngröße unter 5 mm	0,224	0,160	0,130	0,069	0,056	0,073
Korngröße 5 bis 15 mm	0,285	0,177	0,105	0,067	0,059	0,047
Korngröße 15 bis 35 mm	0,730	0,416	0,365	0,101	0,081	0,085

Je weiter die Trocknung getrieben wird, um so mehr verringert sich mit abnehmendem Feuchtigkeitsgehalt die Trockengeschwindigkeit und um so mehr verwischt sich der Unterschied des Feuchtigkeitsgehaltes bei den verschiedenen Korngrößen. Dagegen gibt bei einem Feuchtigkeitsgehalt, der nicht in das hygroskopische Gebiet hineingreift, der Durchschnittswert kein Bild über die Trockenwirkung im einzelnen.

Noch weitergehende Unterschiede beobachtete Grunewald². Bei einer Grubenfeuchtigkeit von $\chi_r = 2,65$ und einem durchschnittlichen Wassergehalt der Briketts von $\chi_b = 0,227$ schwankte der Wassergehalt

¹ Seidenschnur: Braunkohle 1924.

² Grunewald: Die rheinische Braunkohle. Z. V. d. I. 1925.

im einzelnen zwischen 0,131 und 0,72. Mayer und Mittelsteiner¹ weisen darauf hin, daß die Wassergehaltsunterschiede der getrockneten Kohle bei hohem Bitumengehalt besonders hoch sind. Notgedrungen muß alsdann der durchschnittliche Endfeuchtigkeitsgehalt niedriger gehalten werden, um Mängel der Briketts infolge zu feuchter Knorpel zu vermeiden.

Die Untersuchungen von Hermisson² bestätigten neuerdings die Beobachtungen von Frerichs³, daß bei richtiger Abstufung der Siebe der Feuchtigkeitsgehalt in der kennzeichnenden Weise von der Korngröße abhängig ist, wie sie z. B. Abb. 293 für Röhrentrockner angibt. Die Messungen beziehen sich auf heiß abgesiebte Kohlenbrocken, bei denen der nachträgliche Ausgleich noch nicht zur Auswirkung gekommen ist. Die Kurve I gilt für eine Probe, bei der der Staubanteil sich auf 17,8%, der Anteil des Grobkorns von über 7 mm auf 14,4% belief, die Kurve II für eine Probe mit 33,8% Staubgehalt bzw. 5,8% Grobkorn. Der Unterschied zwischen den beiden Kurven erklärt sich einmal daraus, daß die feinere Kohle sich langsamer durch die Röhren bewegt, dann aber auch daraus, daß bei gleichem Durchsatz die feineren Kohleteilchen stärker trocknen als die größeren. Infolge des Ausgleichs zwischen den verschiedenen Korngrößen muß daher der mittlere Feuchtigkeitsgehalt um so niedriger liegen, je höher der Mengenanteil des Feinkorns ist. Sind die kennzeichnenden Kurven bekannt, so genügt es, bei gleichbleibendem Verhältnis der Kornanteile, den Wassergehalt einer einzigen Korngröße, des Leitkorns, festzustellen, um auf den mittleren Wassergehalt der Gesamtmenge zu schließen. Hermisson weist darauf hin, daß wegen der höheren spezifischen Wärme des feuchteren Grobkorns bei der an die Trocknung anschließenden Nachverdampfung unter Aufzehrung der Eigenwärme sich eine verhältnismäßig höhere Abnahme des Feuchtigkeitsgehalts für das gröbere Korn und damit ein Ausgleich des Feuchtigkeitsgehalts der verschiedenen Korngrößen ergibt.

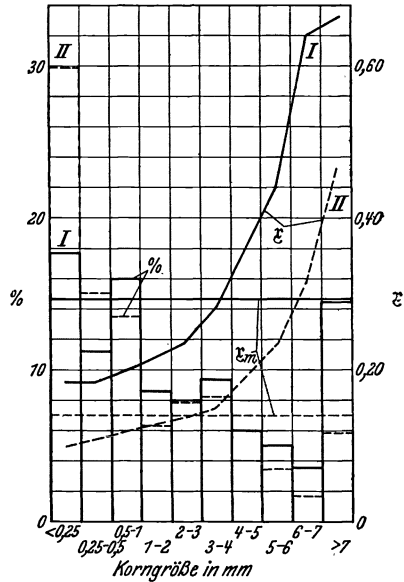


Abb. 293. Zusammenhang zwischen Feuchtigkeitsgehalt und Korngröße (Hermisson).

¹ Mayer-Mittelsteiner: Betriebserfahrungen im Trockendienst einer Brikettfabrik und Vorschläge zur Überwachung des Trockenprozesses. Braunkohle 1930.

² Hermisson: Die Arten der Siebanalyse und ihre zweckmäßige Anwendung zur Überwachung und Erforschung der Vorgänge im Naßdienst, Trockendienst und in der Kühlanlage von Braunkohlenbrikettfabriken. Diss. 1930.

³ Frerichs: Die Veredelung der Braunkohle zum Brikett und die dabei für die Trocknung zu beobachtenden Grundlagen und Einrichtungen. Braunkohle 1926.

Die Nachtrocknung größerer Grobkornmengen erfolgt nach der erstmaligen Trocknung, Absiebung und Zerkleinerung in besonderen Nachtrocknern. Es leuchtet ein, daß hierbei das Feinkorn weniger durch Übertrocknung geschädigt wird als beim Trocknen in einmaligem Durchgang.

Feuchtigkeit und Heizwert der Rohbraunkohle schwanken, je nach dem Fundort, und betragen nach Foos¹:

	Rheinland	Mittel- deutschland	Anhalt, Magdeburg, Helmstedt	Niederlausitz
Feuchtigkeitsgrad . . .	0,58 bis 0,62	0,52 bis 0,54	0,45 bis 0,52	0,55 bis 0,58
Feuchtigkeitsgehalt . .	1,38 bis 1,63	1,08 bis 1,17	0,82 bis 1,08	1,22 bis 1,38
unterer Heizwert kcal/h	1900 bis 1700	2500 bis 2300	3000 bis 2700	2100 bis 1900

Der Anteil, den das Haftwasser an dem gesamten Wassergehalt hochfeuchter Rohbraunkohle nimmt, bringt es mit sich, daß bei ihr der natürliche Feuchtigkeitsgehalt des Feinkorns mit größerer spezifischer Oberfläche höher liegt als der des Mittelkorns und erst recht höher als der des Grobkorns.

Der Endfeuchtigkeitsgehalt der zu Briketts bestimmten Rohbraunkohle soll etwa dem Zustande der Lufttrockenheit entsprechen. Er liegt im Durchschnitt bei $x_{\text{H}} = 0,175$. Wird dagegen die Braunkohle verschwelt, so sinkt der Endfeuchtigkeitsgehalt bis auf $x_{\text{H}} = 0,005$.

Über das hygroskopische Verhalten von Braunkohle hat Rammler² Untersuchungen durchgeführt, nach denen der dem hygroskopischen Punkte entsprechende Feuchtigkeitsgehalt x_e sich zwischen 0,186 und 0,237 bewegt. Döring³ beobachtete bei einem Luftfeuchtigkeitsgrad $\varphi = 0,61$ einen Feuchtigkeitsgehalt $x = 0,138$, was unter Annahme linearer Abhängigkeit zu einem Wert $x_e \approx 0,226$ führt. Obwohl die Herkunft der Rohbraunkohle einen Einfluß auf das hygroskopische Verhalten zu besitzen scheint und sich deshalb für jede Sorte verschiedene Werte ergeben, sei hier doch die vom Verfasser seit Jahren an maßgebender Stelle vorgetragene Anregung wiederholt, durch einwandfreie Versuche die Abhängigkeit zwischen Luftfeuchtigkeitsgrad und Kohlenfeuchtigkeitsgehalt für verschiedene Temperaturen festzustellen und damit eine Frage zu beantworten, die für den Trockenvorgang als Ausgangspunkt dient.

Bei der Trocknung von Rohbraunkohle wird der Raumschwund merklich. Nach Kegel⁴ nimmt z. B. Rohbraunkohle von $x_e = 1,22$ Anfangsfeuchtigkeitsgehalt bis zur Erreichung eines Feuchtigkeitsgehalts von $x_{\text{H}} = 0,667$ um 20%, bei Erniedrigung des Feuchtigkeitsgehalts auf $x_{\text{H}} = 0,111$ um weitere 20% an Rauminhalt ab.

¹ Foos: Die Wärmewirtschaft in der Brikettfabrik. Braunkohle 1923.

² Rammler: Kohlenstaubfeuerung und hygroskopische Eigenschaften der Braunkohle. Arch. Wärmewirtsch. 1926.

³ Döring: Hygrometrische und psychrometrische Untersuchungen und deren Ausnutzungsmöglichkeiten bei der Braunkohlentrocknung. Braunkohle 1930.

⁴ Kegel: Braunkohle 1921.

Bei Steinkohle schwankt der natürliche Feuchtigkeitsgehalt mit dem Alter, und beträgt im Durchschnitt für junge Sorten, z. B. Schlesische Stückkohle, $\chi_r = 0,065$, für ältere Sorten, z. B. Westfälische Magerkohle, $\chi_r = 0,005$ bis $0,01$. Der Endfeuchtigkeitsgehalt der Staubkohle soll bei $\chi_h \approx 0,01$ bis $0,03$ liegen. Damit wird der hygroskopische Punkt weit unterschritten und bei nicht unmittelbarer Verwendung der Staubkohle Schutz gegen Aufnahme der Luftfeuchtigkeit notwendig.

Das hygroskopische Verhalten der Steinkohle wurde von Moore¹ untersucht. Die von ihm beobachtete Abhängigkeit von der Körnung deutet darauf hin, daß der Gleichgewichtszustand nicht immer abgewartet wurde. Der hygroskopische Punkt läßt sich daher aus den Mooreschen Beobachtungen nur in roher Annäherung ableiten. Er scheint merkwürdigerweise für Steinkohle und Anthrazit mit einem Mittelwert $\chi_e \approx 0,045$ der Größenordnung nach gleich hoch zu liegen, also nicht in dem Maße abgestuft zu sein wie der natürliche Feuchtigkeitsgehalt.

Für die Verarbeitung von Braunkohle gelangen in der Hauptsache dampfbeheizte Röhrentrockner nach Abb. 192 und 193 und Tellertrockner nach Abb. 195 zur Verwendung. Das Ergebnis eines Trockenversuches mit einem Humboldt'schen Röhrentrockner nach Abb. 193 und 194 ist in Abb. 294 niedergelegt. Der Trockner besaß 7 m Länge, 1720 m² Heizfläche

und lieferte bei 3,7 at Dampfdruck 5,4 t/h Trockenkohle mit einem Endfeuchtigkeitsgehalt $\chi_h = 0,20$ aus Rohkohle mit einem anfänglichen Feuchtigkeitsgehalt $\chi_r = 1,63$. Für einen in ähnlicher Weise gebauten Nachrockner von 4 m Länge und 475 m² Heizfläche gelten die Beobachtungen der Abb. 295. Die Leistung betrug bei 3,6 at Dampfdruck 4,2 t/h Trockenkohle. Die spezifische Verdampfleistung errechnet sich für die Haupttrocknung nach Abb. 294 zu 3,75 kg/m²·h, für die Nachrocknung nach Abb. 295 zu 2,53 kg/m²·h. Sie liegt etwa in gleicher Höhe wie bei dem üblichen Rundrohrrockner.

In den Brikettfabriken finden sich zahlreiche Röhrentrockner gruppenweise zusammengeschlossen. Um hierbei ein Anstauen des

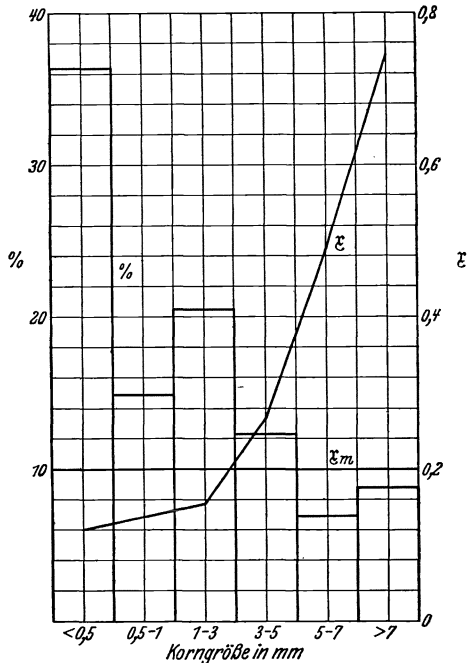


Abb. 294. Zusammenhang zwischen Feuchtigkeitsgehalt und Korngröße (Humboldt).

¹ Moore: The absorption of moisture by coal and other fuels. J. of the Soc. of Chem. Ind.

Niederschlagwassers und die daraus sich ergebende ungenügende Entlüftung des Heizraumes zu vermeiden, empfiehlt Lapp¹, einen gemeinsamen Sammelbehälter für das Niederschlagwasser mit einer gemeinsamen Ausgleichleitung zu verbinden und die Luft am höchsten Punkt des Behälters abzuführen. Diese Anordnung kann ganz allgemein für die Entwässerung und Entlüftung mehrerer parallel geschalteter dampfheizter Trockner empfohlen werden. Lapp berichtet, daß es ihm damit gelang, die spezifische Trockenleistung bei einem Dampfdruck von 2 bis 2,4 at auf die ungewöhnliche Höhe von 4,16 kg/m²·h zu bringen.

Die Ausnutzung der Abwärme ist bei der Briкетterzeugung in doppelter Richtung in Angriff genommen worden. Der überschüssige, in der getrockneten Kohle enthaltene Wärmeinhalt wird auf dem Weg zu den Briкетtpressen zur Nachtrocknung benutzt. Die Kohle wandert in besonderen Kühlhäusern durch Schnecken. Ihre Temperatur nimmt hierbei von etwa 90 auf 50° ab. Nebenher ergibt sich ein Feuchtigkeitsausgleich zwischen Knorpeln und Feinkohle. Grunewald² weist auf den Mangel hin, daß hierbei Staub entsteht, der zusammen mit den an den Deckeln der Schneckengehäuse entwickelten Wassertropfen Schlamm bildet und Verluste bringt. Durch Zuführung von Luft längs der Schneckenwege läßt sich diesem Mangel begegnen. Die in den Brü-

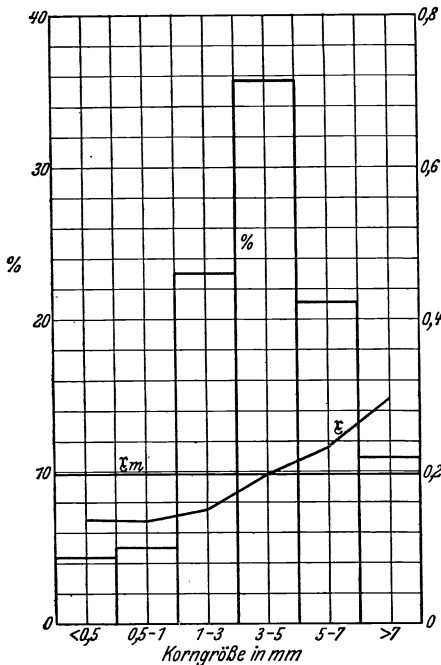


Abb. 295. Zusammenhang zwischen Feuchtigkeitsgehalt und Korngröße (Humboldt).

den entweichende Abwärme wirksam zu fassen, ist bisher in wirtschaftlicher Weise noch nicht gelungen. Durch Überwindung der hierbei auftretenden, nicht zu unterschätzenden Schwierigkeiten würde erst die Überlegenheit der Briкетts gegenüber Rohbraunkohle über weite Entfernungen entschieden. Bei dieser Gelegenheit sei darauf hingewiesen, daß als Vergleichswert der Kohle unter den hier betrachteten Gesichtspunkten der untere Heizwert angenommen werden muß, solange es unmöglich erscheint, die Ausnutzung der Abgase von Feuerungen bis unter ihren Taupunkt vorzunehmen.

Über die bei der Briкетtherstellung maßgebenden Verbrauchszahlen liegen zahlreiche Ermittlungen vor. Der Verbrauch an Feuer-

¹ Lapp: Luft und Restwasser in Dampftrocknern. Arch. f. Wärmewirtsch. 1930.

² Grunewald: Die rheinische Braunkohle. Z. V. d. I. 1925.

kohlen beträgt nach Berner¹, bei einem Feuchtigkeitsgehalt der Rohkohle von $\chi_r = 0,817$ bis 1,5, 0,275 bis 0,892 kg für 1 kg Brikett mit $\chi_b = 0,175$ und entspricht einschließlich Staubverlust in Höhe von 3%, 17,2 bis 31% der Rohkohlenmenge. Zu etwas höheren Zahlen gelangt Foos². Er gibt für einen Feuchtigkeitsgehalt

der Rohbraunkohle von	$\chi_r = 0,817$	1,082	1,63
den Verbrauch an Feuerkohle zuzüglich			
2% Verlust mit	0,31	0,51	1,2 kg
für 1 kg Brikett, entsprechend	16	21,5	33,8 %

des Rohkohlenverbrauchs an.

In weiten Grenzen schwanken die Angaben über das Maß der bei der Brikettherstellung zu schaffenden Abfallkraft. Berner berücksichtigt sie in der Weise, daß er den Feuerkohlenverbrauch bei einem Feuchtigkeitsgehalt von $\chi_r = 0,817$ bis 1,5 von 17,2 bis 31% auf 16,2 bis 23% des Rohkohlenverbrauches ermäßigt. Nach Foos ergibt sich bei einer mittleren Dampfspannung von 2,5 at für eine Leistung von 1000 t Briketts ($\chi_b = 0,1765$) in 24 Stunden eine Fehlmenge an Trockendampf nach Ausnutzung des Abdampfes von Brikettpresse und Kesselspeisevorrichtung, die bei einem Feuchtigkeitsgehalt der Rohkohle

$\chi_r =$	0,817	1,082	1,63
	17500	31460	60360 kg/h
oder	50	64	76 %

des verfügbaren Dampfes beträgt. Die hieraus gewinnbare Abfallkraft kommt nicht ausschließlich für Versorgung fremden Bezugs in Frage, sondern dient vorweg zur Deckung des Nebenkraftverbrauches des Brikettwerkes.

Beim Vergleich zwischen Rohbraunkohle und Brikett rechnet Berner bei einem Feuchtigkeitsgehalt der Rohkohle von $\chi_r = 0,817$ bis 1,5 zugunsten des Briketts, außer den erwähnten Ersparnissen

für Kraftabgabe in Höhe von	1	bis	8 %
noch bei Beförderung über 200 km	1,4	„	2,7 %
bei der Verfeuerung	6,9	„	12 %
	insgesamt 9,3 bis 22,7 %		
und kommt damit zu einem ungedeckten			
Feuerkohlenverbrauch in Höhe von	7,9	bis	8,3 %

des Rohkohlenaufwandes. Die für die Verfeuerung angesetzte Ersparnis beruht vor allem auf der Verbesserung des Feuerungswirkungsgrades. Die mit 1 m² Heizfläche des Trockners erzielbare stündliche Leistung an verdampftem Wasser beträgt nach Foos:

bei einer Trockendampfspannung von	1,5	2	2,5	3	3,5 at
für Röhrentrockner	2,7	2,95	3,2	3,45	3,65 kg/m ² ·h*
für Tellertrockner	3	5	6,5	7,5	8 kg/m ² ·h

Ausführliche Angaben hierüber enthalten die von dem Mitteldeutschen Braunkohlen-Syndikat G. m. b. H., Leipzig, heraus-

¹ Berner: Der Brennstoffverlust durch die Brikettierung der Braunkohle. Leipzig 1921.

² Foos: Die Wärmewirtschaft in der Brikettfabrik. Braunkohle 1923.

* Nach Foos (pers. Mitt.) liegt neuerdings die Grenzleistung bis 30% höher.

gegebenen „Richtlinien“. Sie bringen die benötigte Heizfläche für 10000 kg getrocknete Kohle in Tafeln, deren Zahlen in Abb. 296 wiedergegeben sind und gehen hierbei von folgenden Grundlagen aus:

Dampfdruck für Röhrentrockner	3,5 at
Dampfdruck für Tellerrockner	3 at
Feuchtigkeitsgehalt der Rohkohle	$\chi_r = 0,817$ bis 1,5
Feuchtigkeitsgehalt der Briketts	$\chi_b = 0,1765$
Röhrentrockner: Rohre.	94 oder 102 mm l.W.
Rohrlänge.	6,4; 7; 8 m
Leistung an aufgetrocknetem Wasser. . .	3,845 kg/h
für 1 m ² innere Rohrfläche für Trockner mit Wendeleisten und Nachfüllvorrich- tung. Ohne Wendeleisten 10% weniger, ohne Nachfüllvorrichtung 5% weniger.	
Tellerrockner: Durchmesser	5 m
obere Heizfläche	16,5 m ²
oder: Durchmesser	3,8 m
obere Heizfläche	10 m ²
Leistung an aufzutrocknendem Wasser .	6,8 kg/h
für 1 m ² obere Tellerheizfläche für Trock- ner mit geschlossenem Mantel, Schlep- pleisten, Staubabsiebung und mehrfacher Dampfführung. Ohne geschlossenen Mantel 5% weniger, ohne Schlep- pleisten 8% weniger, ohne Staubabsiebung 5% weniger, mit einfacher Dampfführung 3% weniger.	

An gleicher Stelle finden sich auch Angaben über die Leistung der Kühlanlagen. Die hierbei erzielbare Nachverdampfung wird mit 2 bis 2,5% angegeben. Als benötigte Kühlflächengröße geben die Richtlinien 0,15 m² für 1 m² Trocknerfläche an, und zwar sowohl für Jalousiekühlanlagen als auch für Tellerkühlanlagen. Die Trocknerfläche ist hierbei als Gesamtheizfläche, für Tellerrockner also als obere und untere Fläche zusammen betrachtet.

Trommeltrockner mit unmittelbarer Beheizung durch Feuergase dienen zur Verarbeitung von Braunkohlenschlamm, der bei der Entstaubung der Brüden durch Naßfilter entfällt. Über das Ergebnis einer Büttnerschen Anlage berichtet Kaspers¹. Die einer Staubfeuerung entstammenden Gase traten mit 600 bis 700° ein, mit 80° und $\varphi = 0,5$ aus. Der Feuchtigkeitsgehalt betrug anfangs $\chi = 1$ bis 1,5, schließlich 0,08 bis 0,14. Der Staubverbrauch belief sich hierbei auf 15% der Erzeugung. An gleicher Stelle finden sich die Ergebnisse mit einer Büttnerschen Trommeltrockneranlage, die aufbereitete Rohkohle mit 0 bis 13 mm Körnung durch Abgase der Kesselfeuerung verarbeitet. Hierbei treten die Gase mit 375° ein, mit 90 bis 100° und $\varphi = 0,25$ aus. Der Feuchtigkeitsgehalt der Rohkohle entspricht den obigen Werten. Der Temperaturverlauf in Rauchgasen und Gut nach Abb. 297 zeigt, daß die Gastemperatur rasch sinkt und die Guttemperatur so niedrig bleibt,

¹ Kaspers: Herstellung und Verwendung von rheinischem Braunkohlenschlamm. Sechste Tagung des Deutschen Braunkohlen-Industrie-Vereins. Halle 1924.

daß trotz der hohen Anfangstemperatur der Heizgase ein Verschwelen oder Entzünden der Kohle im geordneten Betrieb nicht zu erwarten ist.

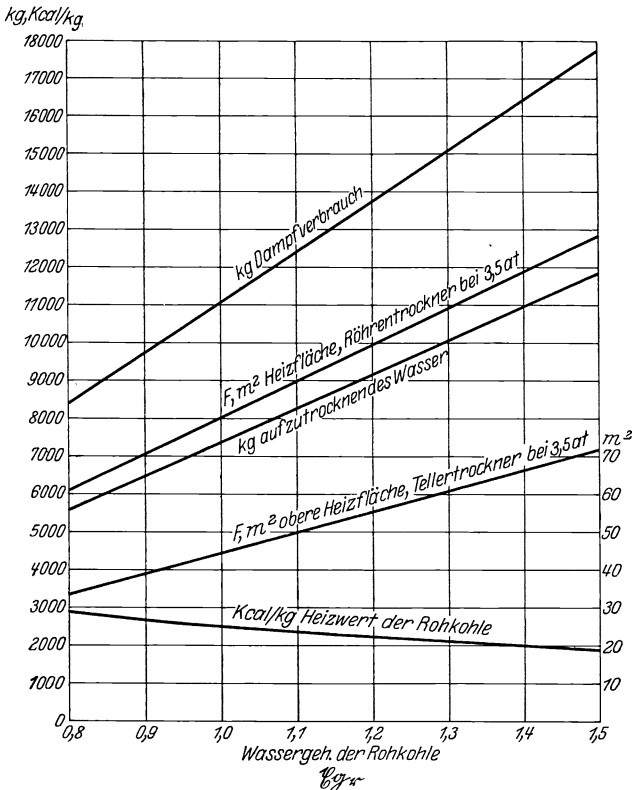


Abb. 296. Heizfläche, Dampfverbrauch, Trockenleistung bei der Brikettrocknung, Heizwert der Rohbraunkohle (Mitteldeutsches Braunkohlensyndikat).

Nach dem von Fleißner¹ entwickelten Verfahren zur Trocknung wasserreicher Braunkohle wird das Naßgut zunächst durch Erwärmung mit Frischdampf aufgeschlossen. Hierbei verliert die Kohle ihre kolloidalen Eigenschaften, so daß das kolloidal gebundene Wasser in flüssiger Form abgeht. Die Fertigtrocknung erfolgt mittels Heißluft. Bei der Trocknung von Köflacher Kohle, die einen anfänglichen Feuchtigkeitsgehalt $x_z = 0,56$ besitzt, wird während 20 bis 30 Minuten Frischdampf von etwa 9 at zugeführt. Dieser schlägt zunächst nieder.

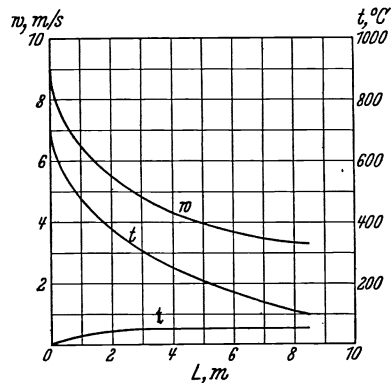


Abb. 297. Temperaturverlauf im Trommeltrockner (Büttner).

¹ Fleißner: Veredelung und Trocknung der Braunkohle. Z. öst. Ing.-V. 1927.

Das Dampfwater entweicht nach außen. Nach vollständiger Vorwärmung tritt kein Wasser mehr durch den Ablauf. Er wird abgesperrt und der Dampfdruck während $1\frac{1}{2}$ bis 2 Stunden auf voller Höhe gehalten. Hierbei scheidet sich ein erheblicher Teil des Wassergehaltes in flüssiger Form ab. Er wird anschließend während 20 bis 30 Minuten in einen zweiten mit Rohkohle gefüllten Behälter übergeleitet und hierbei gespannt. Die durch die Druckerniedrigung freiwerdende Überschußwärme der gedämpften Kohle löst sich in teilweiser Verdampfung ihres Wassergehaltes aus. Durch Heißluft wird schließlich während weiterer 1 bis $1\frac{1}{2}$ Stunden das Restwasser bis auf einen Betrag $\gamma_5 = 0,19$ ausgetrieben. Der Anteil des Wassers, der in flüssiger Form abgeht, beträgt etwa $\frac{3}{7}$ der gesamten Verdampfleistung. Hieraus erklärt es sich, daß der Dampfverbrauch für 1 kg Wasserentziehung nur 0,6 kg beträgt. Das Fleißnersche Verfahren stellt eine sehr beachtliche Verbesserung dar; seine Anwendung bei anderem kolloidalem Trockengut ist dann zu erwägen, wenn dessen Eigenart eine Entfeuchtung unter Zerstörung der Kolloide zuläßt. Neben der Wärmeersparnis besitzt die Braunkohlentrocknung nach Fleißner den Vorteil, daß die Kohle stark schrumpft, jedoch die Form behält, für Beförderung, Lagerung und Verbrennung daher ähnliche Vorzüge bietet wie Briketts. Die Fähigkeit, Wasser und Sauerstoff aus der Luft aufzunehmen, ist, durch Veränderung der hygroskopischen Eigenschaften und Verringerung der Porosität, in günstigem Sinne herabgemindert.

Neben der Trocknung der Rohbraunkohle als Vorstufe zur Briketherstellung wird neuerdings in zunehmendem Maße die Trocknung als Voraussetzung für die Verarbeitung zu Braunkohlenstaub ins Auge gefaßt. Die Anwendung des Brennstoffs in dieser Form auf der Grube selbst verspricht eine Verbesserung, solange der Feuerungswirkungsgrad im Staubkessel wesentlich höher liegt als bei Verfeuerung der Rohkohle. Erschwerend wirkt die Höhe der Aufbereitungskosten. Sie lassen sich bei der Mahltrocknung nach Abb. 180 verringern, insbesondere, wenn hiermit die früher beschriebene, von Rosin und Rammler empfohlene Umlauf-trocknung angewandt wird. Bei der Mahltrocknung ergibt sich ein zwangläufiger Zusammenhang zwischen den Mengen des Trockengutes und der durch Förderleistung und Verbrennungsvorgang bedingten Trockengasmenge. Sie kommt daher in erster Linie als Einzelanlage in unmittelbarer Verbindung mit der Feuerung zur Anwendung, für deren Versorgung der Brennstoffstaub dient. Rosin und Rammler¹ haben an einer von Büttner hergestellten kleinen Mahltrockenanlage mit Umlauf beachtliche Ergebnisse festgestellt. Verarbeitet wurde Bitterfelder Rohkohle mit einem Feuchtigkeitsgehalt von $\gamma_t = 1,08$, die sich nach grober Absiebung aus 25% Grobkorn von über 7 mm, 50% mittlerem Korn von über 3 mm und 25% Feinkorn unter 3 mm zusammensetzte. Die Gastemperatur sank von anfangs etwa 800° bei der Vortrocknung infolge der lebhaften Oberflächenverdampfung rasch ab und entsprach bei Eintritt in den Um-

¹ Rosin-Rammler: Herstellung von Braunkohlenstaub mit der pneumatischen Umlauf-trocknung. Braunkohle 1930.

lauftrockner nur noch etwa 300° . Die Temperatur der Trockenkohle betrug bei einem Endfeuchtigkeitsgehalt $x_h = 0,15$ nur 50° und stieg selbst bei besonders scharfer Trocknung auf $x_h = 0,06$ nur auf 90° . Der Wärmeverbrauch bewegte sich zwischen etwa 850 und 1100 kcal für 1 kg verdampftes Wasser, wobei die untere Grenze für einen Endfeuchtigkeitsgehalt $x_h \approx 0,15$, die obere für $x_h \approx 0,16$ gilt. Bei der angewandten hohen Gasgeschwindigkeit von 20 bis 30 m/s ist eine hohe spezifische Verdampfung zu erwarten. Sie wurde mit 280 bis 325 kg/m^3 Trocknerinhalt beobachtet, lag daher trotz der ungewöhnlich weitgehenden Trocknung rund dreimal so hoch wie bei feuergasbeheizten Trommeltrocknern.

Für die Versorgung von weiter entfernten Kraftwerken mit Braunkohlenstaub kommt die Mahltrocknung deshalb nicht in Frage, weil die

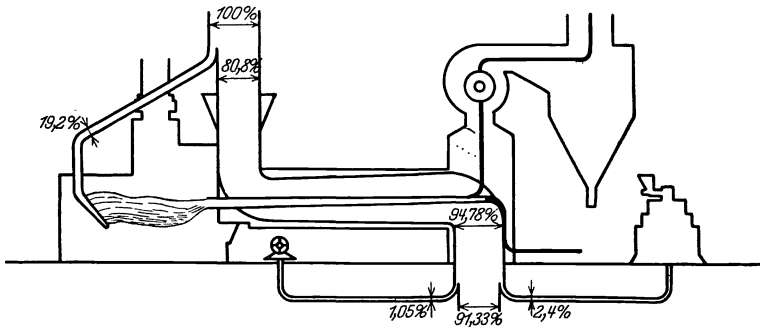


Abb. 298. Wärmebild der Kohlentrocknung (Grunewald).

Beförderung der Rohkohle über größere Entfernungen sich verbietet. Die wirtschaftliche Lösung für die in solchen Fällen nötige Sammelanlage zur Braunkohlenstauberzeugung ist noch nicht gefunden.

Abb. 298 gibt nach Grunewald¹ den Wärmestrom in einem Büttnerschen Trommeltrockner für die Erzeugung von Brennstaub wieder. Von der zu trocknenden Kohle dienen 19,2% zur Beheizung der Trommel. Hiervon kommen jedoch 13,98% der getrockneten Kohle zuge. 3,45% dienen zur Deckung des Kraftbedarfs von Mahlanlage und Trommel. Der Gesamtverlust beträgt danach 8,67%. Zahlenmäßige Angaben über die Aufbereitung rheinischer Braunkohle zu Staub vermittelt eines Büttnerschen Trommeltrockners machen Weiß und Haering². Bei einem anfänglichen Feuchtigkeitsgehalt $x_i = 1,02$ und Entfeuchtung bis $x_h = 0,22$ betrug der Wärmeverbrauch 1114 kcal für 1 kg entzogenes Wasser. Die Trommel arbeitete hierbei ohne Wärmeschutz. Die Temperatur der Kohle wurde während des ersten Drittels zu 50 bis 52° , am Austritt zu 60 bis 64° , die Temperatur der Abgase zu 90 bis 100° gemessen.

¹ Grunewald: Die Wärmewirtschaft auf der I. Rheinischen Braunkohlenmesse. Arch. f. Wärmewirtsch. 1924.

² Weiß u. Haering: Braunkohle 1922.

Die für die Aufbereitung von Brennstaub aus Braunkohle in Sammelanlagen zur Zeit vorliegende Form der Abb. 299 (Buckau) stimmt mit der Anordnung überein, die für die Erzeugung von Steinkohlenstaub Eingang gefunden hat. Die Naßkohle wird durch Förderbänder über Bunker verteilt und durch Beschickungsvorrichtungen den Trockentrommeln zugeführt.

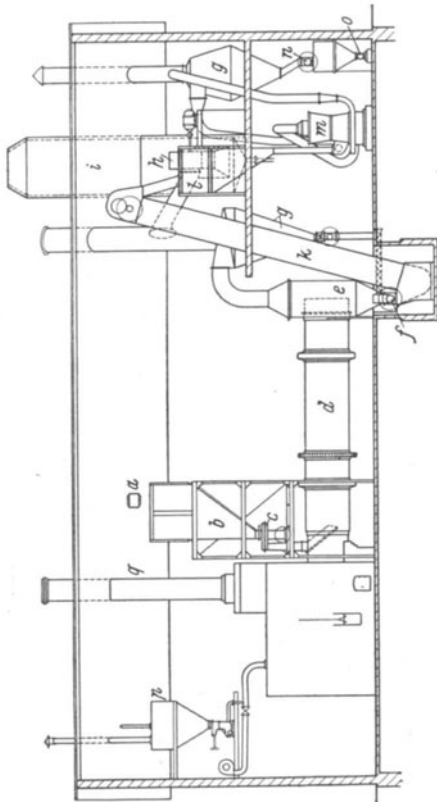
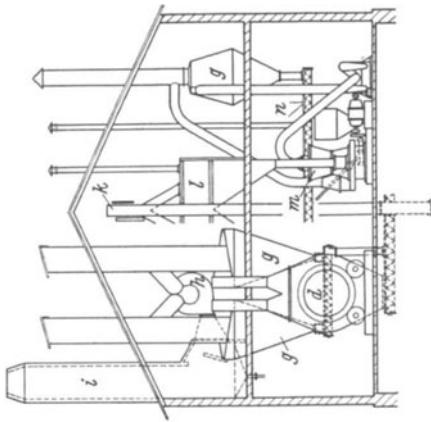


Abb. 299. Trocknungsanlage für Kohle (Buckau).
a Förderband für Naßkohle, *b* Bunker für Naßkohle, *c* Tellerspeisevorrichtung, *d* Trockentrommel, *e* Ausfallchäuse, *f* Förderschnecke, *g* Zyklon, *h* Lüfter, *i* Naßfilter, *k* Mühlenbunker, *l* Mühlenwerk, *m* Mühle, *n* Kühlschnecke, *o* Staubpumpe, *p* Staubbunker, *q* Hilsschornstein.

Die aus Staubfeuerungen gewonnenen Heizgase laufen im Gleichstrom mit der Kohle, so daß hohe Temperaturen ohne Entzündungsgefahr anwendbar werden. Die ausfallende Trockenkohle wird durch Förderschnecken und Becherwerke nach Mühlenbunkern gehoben und gelangt von hier aus nacheinander in die Mahlanlage, die Staubabscheider und über Kühlschnecken zu den Staubpumpen. Die Abgase werden in Trockenabscheidern vorgereinigt, aus diesen durch Lüfter in Schächte gefördert und hier auf nassem Wege vom Reststaub befreit. Das Schlammwasser fließt nach Gruben, in denen der Schlamm sich absetzt, ausgestochen, an der Luft vortrocknet und neuerlich zum Trommeltrockner geführt wird.

Eine weitergehende Verringerung der Entzündungsgefahr, unter Anwendung gleich hoher Anfangstemperaturen der Feuergase, ergibt sich, wenn die Feuergase in der zu Abb. 203 beschriebenen Weise zunächst um, dann durch die Trockentrommel geleitet werden.

Während die Mahltrocknung von Braunkohle noch

nicht als gelöst zu betrachten ist, findet sie für Steinkohle mit Erfolg und in immer mehr zunehmendem Umfang Verwendung. Da die Herstellung des Steinkohlenbrennstaubes fast stets an der Verwendungsstelle erfolgt, verliert die Sammelanlage gegenüber der einfacheren Einzelmahlanlage an Bedeutung. Der Wärmehaufwand für 1 kg verdampftes Wasser liegt bei der Steinkohlentrocknung mit 1200 bis 2000 kcal/kg wesentlich höher als bei der Braunkohlentrocknung, einmal wegen des verhältnismäßig größeren Abwärmeverlustes in der Trockenkohle, dann wegen der im allgemeinen wesentlich niedrigeren Anfangstemperatur der Feuegase.

Für die Trocknung von Steinkohle finden außer den erwähnten Ausführungen Rieseltrockner, vorzugsweise in den Vereinigten Staaten, Anwendung. Dem in Abb. 174 dargestellten wird das Heizgas mit etwa 600° zugeführt, die Trockenkohle tritt mit 100 bis 150° aus. Der Woodtrockner nach Abb. 300 verwendet die Abgase einer Feuerung. Die Kohle läuft zwischen jalousieartigen Wänden nieder und wird quer von den Trockengasen durchdrungen. Diese strömen etwas unter dem Einlauf zu und werden in mittlerer Höhe abgesaugt. Um entstehende Brände zu ersticken, sind diese Trockner mit einem Dampfanschluß versehen.

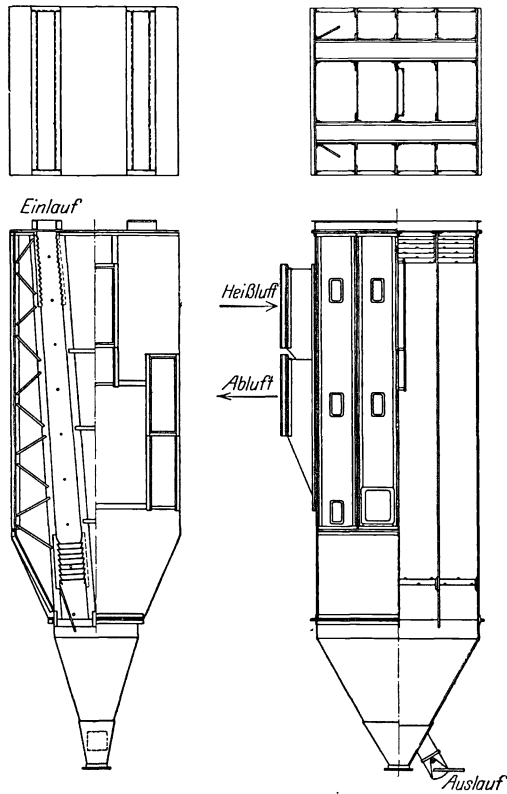


Abb. 300. Rieseltrockner für Kohlenstaub (Wood)

In ähnlicher Weise verwendet die Lurgi G. f. Wärmetechnik m. b. H., Frankfurt a. M. nach Oetken-Hubmann¹ Feuegase in Jalousietrocknern. Zur Erniedrigung ihrer Temperatur auf etwa 250° werden die Abgase teilweise mit den Brenngasen gemischt. Die Zuführung der Trockengase erfolgt zum Teil an unterster Stelle, zum Teil in mittlerer Höhe. Die Abgase werden nicht an der gleichen Stelle zurückgesaugt, wo der Schwaden entweicht, sondern tiefer. Diese Teilung des Gasstromes bewirkt, daß in der unteren Hälfte eine geringere Menge

¹ Oetken-Hubmann: Schwelung mit Innenheizung nach dem Lurgiverfahren. Z. V. d. I. 1925.

des Trockenmittels mit abnehmender Trockenkraft arbeitet. Im oberen Teil der Trockenschicht wirkt die gesamte Gasmenge mit einer Trockenkraft, die hier in engeren Grenzen abnimmt. Die niedrige Gasgeschwindigkeit im unteren Teil vermindert, ebenso wie die Absaugung des größeren Teiles der Abgase an einer Stelle unterhalb des Schwadenabzugs, die Menge mitgerissenen Trockenstaubs.

Bei dem Schwelverfahren nach Limberg¹ wird gleichfalls ein Jalousietrockner angewandt. Als Trockenmittel dient hier überhitzter Wasserdampf, der mit 220 bis 240° durch die Rieselsäulen hindurchgeführt wird.

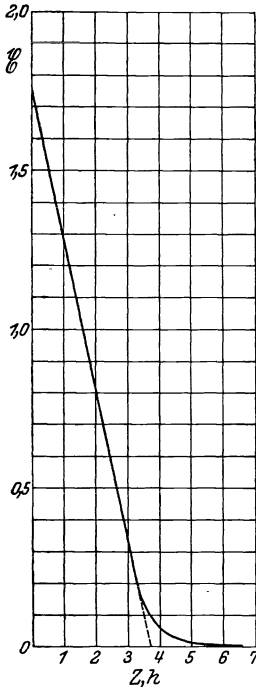


Abb. 301. Zeitliche Änderung des Feuchtigkeitsgehaltes bei der Trocknung von Preußisch-Blau (Alliott).

abnehmendem Feuchtigkeitsgehalt verändern sich die Verhältnisse nach Alliott² gemäß Abb. 301, die in der ausgezogenen Kurve die wirkliche Veränderung des Feuchtigkeitsgehaltes und punktiert den theoretischen Verlauf bei gleichbleibender Trockengeschwindigkeit angibt. Beide Linien fallen bis zu einem bei etwa $\chi_e \approx 0,143$ liegenden Feuchtigkeitsgehalt zusammen. Danach tritt eine zunehmende Verzögerung des Trockenvorganges ein, eine restlose Entfeuchtung erfolgt überhaupt

6. Farbstoffe, Gerbstoffe, Harnstoff.

Es fällt außerhalb des Rahmens dieser Arbeit, die mannigfaltigen Eigenschaften der hierunter zählenden Stoffe festzulegen. Allgemein kann gesagt werden, daß Farb- und Gerbstoffe, ebenso wie Harnstoff, temperaturempfindlich sind und eine rasche Trocknung verlangen.

Für das Trocknen von Alizarin, Bleiweiß und Zyankali werden Vakuumtrockenschränke verwandt. Im Großbetrieb finden sich Vakuumschaufeltrockner, etwa nach Abb. 230, für die Verarbeitung von Bleiweiß, Anilin- und Erdfarben, ferner Vakuumwalzentrockner, etwa nach Abb. 206, bei den weniger empfindlichen Erdfarben genügen Schaufel- und Walzentrockner, die unter atmosphärischem Druck arbeiten. In anderen Fällen, z. B. bei der Verarbeitung von Preußisch-Blau, kommen Vakuummellertrockner nach Abb. 229 zur Anwendung. Als Leistung gibt die Herstellerin für einen Kessel von 1,8 m Durchmesser 350 bis 500 kg Preußisch-Blau an, die einschließlich Be- und Entladung in 4½ Stunden ihren Feuchtigkeitsgehalt von $\chi_r = 1,7$ auf $\chi_b = 0,05$ ermäßigen. Der Dampfverbrauch beträgt etwa 1½ kg für 1 kg entzogene Feuchtigkeit. Mit

¹ Limberg: Die Praxis des wirtschaftlichen Schwelens und Vergasens. Halle 1925.

² Alliott: Drying by heat in conjunction with mechanical agitation and spreading. J. of the Soc. of Chem. Ind. 1919.

nicht. Beachtenswert ist auch die gleichfalls von Alliott ermittelte Versuchskurve der Abb. 302, die den Dampfverbrauch für 1 kg entzogene Feuchtigkeit, abhängig von dem anfänglichen Feuchtigkeitsgrad φ_{tr} , darstellt. Der spezifische Dampfverbrauch verändert sich wenig, wenn der anfängliche Feuchtigkeitsgrad zwischen 0,6 und 0,3 schwankt und der Endfeuchtigkeitsgrad $\varphi_{\text{th}} = 0,025$ beträgt. Er wächst jedoch stark in dem Maße, in dem der Anfangsfeuchtigkeitsgrad sich dem Endfeuchtigkeitsgrade nähert. Bei der besonders weitgehenden Trocknung bis zu einem Endfeuchtigkeitsgrad $\varphi_{\text{th}} = 0,001$ ist die Zunahme des spezifischen Dampfverbrauches auch bei höherem Anfangsfeuchtigkeitsgrad φ_{tr} deutlich zu erkennen. Sie führt zu besonders ungünstigen Verhältnissen bei einem anfänglichen Feuchtigkeitsgrad, der unter $\varphi_{\text{tr}} = 0,1$ liegt. Handelt es sich daher darum, einer Ware den Feuchtigkeitsgehalt innerhalb solcher Grenzen zu entziehen, die zu Anfang und Ende tief im hygroscopischen Gebiete liegen, so ist mit einem besonders hohen Wärmeaufwand zu rechnen.

Venuleth gibt für die Trocknung von Farben folgende Versuchszahlen:

Vakuumschaufeltrockner, Heizfläche $8,4 \text{ m}^2$, Füllung 1588 kg Naßgut mit einem Anfangsfeuchtigkeitsgehalt $\varphi_{\text{tr}} = 4,2$, Trocknung auf einen Endfeuchtigkeitsgehalt $\varphi_{\text{th}} = 0,02$, Dampfdruck $5,2 \text{ at}$, Verdampfungsdruck $0,54 \text{ at}$, Trockendauer $7\frac{1}{2} \text{ h}$, Dampfverbrauch $1,55 \text{ kg}$ für 1 kg Wasserverdampfung;

Vakuumwalzentrockner mit einer Heizfläche von 12 m^2 , zusammenarbeitend mit einem Vakuumschaufeltrockner mit einer Heizfläche von $7,3 \text{ m}^2$, Leistung 700 kg/h Naßgut mit einem Anfangsfeuchtigkeitsgehalt $\varphi_{\text{tr}} = 1$, Trocknung auf einen Endfeuchtigkeitsgehalt $\varphi_{\text{th}} = 0,02$, Dampfdruck 5 bis 6 at , Verdampfungsdruck $0,15 \text{ at}$, Dampfverbrauch $1,5 \text{ kg}$ für 1 kg Wasserverdampfung;

offener Walzentrockner mit einer Heizfläche von $26,3 \text{ m}^2$, Leistung 925 kg/h Naßgut mit einem Anfangsfeuchtigkeitsgehalt $\varphi_{\text{tr}} = 1,85$, Trocknung auf einen Endfeuchtigkeitsgehalt $\varphi_{\text{th}} = 0,04$, Dampfdruck 6 bis 7 at , Dampfverbrauch $1,5 \text{ kg}$ für 1 kg Wasserverdampfung.

Der Vakuumbandrockner der Firma Volckmar Hänig & Co., Heidenau, dient u. a. zur Verarbeitung von Eichenholz-Gerbstoffextrakt, das in Schuppenform gewonnen wird. Als das Ergebnis eines Versuches mit Extrakt von 40° Bé gibt die Herstellerin an, daß bei einem Druck von $0,055 \text{ at}$ und einer Heizdampfspannung von 2 at stündlich $8,2 \text{ kg}$ getrocknetes Gut mit einem Feuchtigkeitsgehalt von

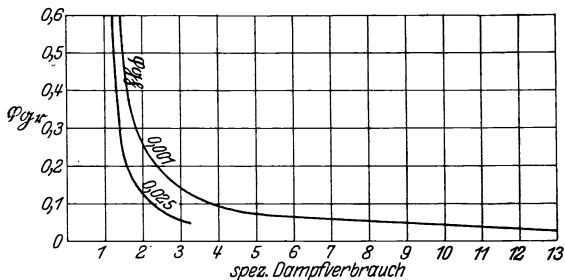


Abb. 302. Abhängigkeit des spezifischen Dampfverbrauches von dem Feuchtigkeitsgrad φ_{tr} bei der Trocknung von Preußisch-Blau (Alliott).

$\chi_h = 0,08$ auf 1 m^2 nutzbare Heizfläche aus feuchtem Gut von $\chi_r = 0,54$ Feuchtigkeitsgehalt gewonnen wurde, entsprechend einer Wasserverdampfung von rund $13,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$. Gerbstoffpulver aus Valonea-, Kastanien- und Fichtenrindenextrakten kann, wegen der verhältnismäßig hohen Beständigkeit starker Brühen, auf Walzentrocknern verarbeitet werden. Für Trocknung von $\chi_r = 1,22$ auf $\chi_h = 0,04$ mittels Zweiwalzentrockners mit zusammenliegenden Walzen gibt TAG die spezifische Leistung zu $10 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ Trockengut, den spezifischen Dampfverbrauch bei 8 at zu $1,25 \text{ kg/kg}$ Wasserverdampfung an. Zur Verarbeitung von Harnstoff und empfindlichen Farbstoffen dienen Zerstäubungstrockner.

Künstliche Trocknung wird im Druckereibetrieb angewandt, um bei rasch laufenden Maschinen das Trocknen der Farben zu beschleunigen. Es handelt sich hierbei in der Regel um Austreiben der leicht flüchtigen Lösungsmittel. Das Papierband wird zu diesem Zwecke über beheizte Flächen geführt und gleichzeitig einem Warmluftstrom ausgesetzt.

7. Sprengstoffe.

Bei der Trocknung rauchlosen Pulvers handelt es sich in der Hauptsache um Austreibung von Lösungsmitteln. Die Verarbeitung erfolgt unter Anwendung der Vakuumtrocknung.

Das gleiche Verfahren dient bei Knallquecksilber und Zündsatz dazu, um eine, mit Rücksicht auf die Gefahrenminderung, wichtige Abkürzung der Trockenzeit auf 30 bis 45 Min. zu erreichen. Die Trockenvorrichtungen erhalten in der Ausführung nach Paßburg besondere Sicherheitsdeckel, die lose aufliegen und sich bei Explosionen nach außen öffnen. Die Stoßkraft der Entzündung ist hierbei durch den niedrigen Druck im Trockenraum verringert.

B. Anorganische Stoffe.

1. Salze.

Die in großem Maßstabe technisch verarbeiteten Salze Chlornatrium, Chlorkalzium, Chlormagnesium, Chlorbarium, besitzen keinen einheitlichen Charakter hinsichtlich ihres Verhaltens bei der Trocknung. Im allgemeinen weist große Unempfindlichkeit gegen höhere Temperaturen neben stark hygroskopischer Eigenschaft auf Anwendung hoher Temperaturen hin, wenn ein niedriger Endfeuchtigkeitsgehalt angestrebt wird. Der eigentlichen Trocknung geht meist ein Eindampfen der Lauge voraus. Als Trockenvorrichtung kommen unmittelbar beheizte Trommeln, z. B. für Chlorkalzium, Chlorkalium, oder dampfbeheizte Tauchtrommeln in Betracht. Hierbei wird bei der Trocknung von Chlorbarium, Chlornatrium, Cyankalium, und Ätzkalilauge unter Luftleere gearbeitet, wenn die Neigung zum Auskristallisieren umgangen werden soll. Während der Anfangsfeuchtigkeitsgehalt in weitesten Grenzen schwankt, liegt der Endfeuchtigkeitsgehalt mit $\chi_r \approx 0,005$ nahe bei dem Zustand der vollkommenen Trocknung und tief im hygroskopischen Gebiet. Die getrockneten Salze sind daher weit unter das Maß der Luft-

trockenheit entfeuchtet und müssen gegen nachträgliche Wiederaufnahme von Feuchtigkeit geschützt werden.

Bei der Salztrocknung ist Angliederung eines Staubabscheiders zum Niederschlagen mitgerissener feinsten Teilchen deshalb besonders wichtig, weil die Pflanzenwelt durch sie stark geschädigt werden kann. Hierfür wenden die Maschinen- und Fahrzeugfabriken Alfeld-Delligsen A. G., Alfeld a. d. L., anschließend an einen Schleuderkraftabscheider, Elektroentstaubung an. Für einen feuergasbeheizten Gleichstromtrommel-trockner von 2 m Durchmesser, 10 m Länge, beträgt nach deren Angabe die stündliche Leistung 25000 kg getrocknetes Salz bei einem Feuchtigkeitsgehalt von $x_r \approx 0,11$ zu Anfang, $x_g \approx 0,005$ zum Schluß, entsprechend einer Verdampfleistung von etwa 2600 kg/h. Der Verbrauch an Braunkohlenbriketts von 4800 kcal/kg unterem Heizwert ergibt sich hierbei mit 2,9 kg für 100 kg getrocknetes Salz, entsprechend einer etwa 3,6fachen Verdampfung.

Die Leistungsfähigkeit einer Vakuumtauchtrommel von 1,3 m Durchmesser, 3,2 m Länge, beim Eindampfen alkalischer Lauge mit einem anfänglichen Feuchtigkeitsgehalt von $x_r = 1$ und Verarbeitung zu fast wasserfreiem Trockenpulver beträgt nach Paßburg 500 kg/h Lauge, entsprechend etwa 250 kg/h Wasserverdampfung.

Für einen Trommelrockner, der zum Trocknen von Chlorkalzium dient, gibt Büttner den Wärmeverbrauch zu 1060 kcal für 1 kg verdampftes Wasser an, wobei Mischkohle von 2870 kcal/kg unterem Heizwert verwendet wird und der Feuchtigkeitsgehalt anfangs $x_r = 0,165$, zum Schluß $x_g = 0,011$ beträgt.

Ammonsalze besitzen teilweise eine hohe Temperaturempfindlichkeit und verlangen daher besonders schonende Behandlung. Für ihre Verarbeitung kommen Zerstäubungstrockner und Vakuumtrockentrommeln in Betracht. Auch mit Heißluft arbeitende Gegenstromtrommelrockner finden Anwendung. Nach Angabe der Herstellerin Manlove-Alliott beträgt die Leistung bei 1,2 m Durchmesser, 6,7 m Länge, etwa 1000 kg/h, wenn der Feuchtigkeitsgehalt anfangs $x_r = 0,036$, zum Schluß $x_g = 0,004$ beträgt und die Luft mit 82° ein-, mit 30° austritt. Der gleichzeitig auftretende Dampfverbrauch beläuft sich auf etwa 4 kg für 1 kg Wasserentziehung. Er erklärt sich daraus, daß in dem mit etwa 60° austretenden Gut ein erheblicher Teil der aufgewandten Wärme verloren geht, der bei dem geringen Feuchtigkeitsgehalt besonders ins Gewicht fällt. Für Ammoniumnitrat, Ammonsulfat und verschiedene Mischdünger, wie Kalkammonsalpeter, Chlorammonium, gelangen in zunehmendem Maße Trommelrockner zur Anwendung, wobei Rieseleinbauten mit geringer Fallhöhe eine Zerkleinerung der groben Kristalle verhüten. Diese sind erwünscht, weil feines Salz sich nicht gleichmäßig streuen läßt. Nach Versuch von Büttner verläuft die Trocknung im Gleichstrom nach Abb. 303. Trotz hoher Anfangstemperatur der Luft wird die mit 55° vorgeschriebene Höchsttemperatur des Gutes nicht überschritten. Ammonsulfat läßt sich mit Erfolg in Muldentrocknern verarbeiten. Für Kalichlorat haben sich Vakuum-schaufeltrockner bewährt. Um die Bildung explosibler Gemische durch

die Einwirkung des Pulverstaubes auf das Lageröl zu vermeiden, werden nach Paßburg-Block die Lager außerhalb angeordnet und die Wellenstopfbüchsen mit anorganischer Flüssigkeit geschmiert.

Vor der Behandlung von Salzkristallen in Trommel- und Schaufeltrocknern muß die anhaftende Mutterlauge durch Schleudern soweit entfernt werden, daß kein Zusammenballen beim Trocknen eintritt.

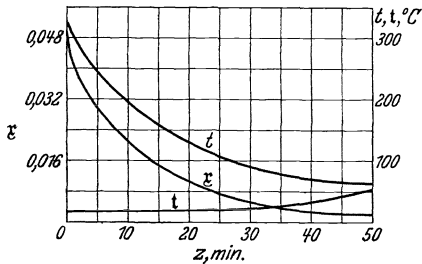


Abb. 303. Verlauf der Trocknung im Trommeltrockner (Büttner).

Kristallisierte Oxalsäure wird in Bandtrocknern nach Abb. 161 verarbeitet. Sie tritt mit einem Feuchtigkeitsgehalt von 0,05 bis 0,06 ein, der bei einer Höchsttemperatur von etwa 40° möglichst restlos auszutreiben ist.

Der Stromtrockner nach Abb. 179 verarbeitet temperaturempfindliche Salze, z. B. Sulfite, Thiosulfate, Kalisalpeter, Natriumperborat und Ammonperchlorat. Dabei handelt es sich

um die Entfernung der geringen hygroskopischen Feuchtigkeitsmengen, die unter Anwendung des Gleichstromes besonders schonend erfolgt. Mit Rücksicht hierauf und wegen der Einfachheit des Verfahrens läßt sich der naturgemäß hohe Wärmeverbrauch in Kauf nehmen.

2. Mineralien und keramische Erzeugnisse.

Bei der Trocknung von Mineralien und keramischen Erzeugnissen liegt die zulässige Temperatur so hoch, daß das Trockenverfahren hierauf an und für sich keine Rücksicht zu nehmen hätte. Sie wird gleichwohl bei den geformten Erzeugnissen dadurch begrenzt, daß sie die Trockengeschwindigkeit mitbestimmt, die gerade hier wegen der geringen Elastizität des verarbeiteten Stoffes niedrig sein muß, um ein Reißen zu vermeiden. Anfangs 60°, zum Schluß 250° stellen vielfach übliche Temperaturen dar.

Für die Trockenzeit der nach Stärke und Form stark schwankenden keramischen Erzeugnisse lassen sich keine allgemein gültigen Zahlen nennen. Dies gilt vor allem für Porzellan- und Tonwaren und Gießereiformen. Bei Dachziegeln verändert sich die Trockendauer, je nach Empfindlichkeit des bearbeiteten Tons, zwischen 2 und 8 Tagen. Ziegelsteine üblicher Abmessung können in etwa 4 Tagen fertig getrocknet werden, soweit dies von der Empfindlichkeit der Ware selbst abhängt. Die wirkliche Trockenzeit schwankt zwischen 4 und 9 Tagen. Die erhebliche Überschreitung dieser Zeiten bei der natürlichen Lufttrocknung ist daher kaum mit Rücksicht auf Schonung der Ware zu begründen, stellt vielmehr gegenüber einer zweckmäßig gebauten künstlichen Trockenanlage einen wirtschaftlichen Nachteil dar. Bei der Trocknung von Porzellan wird mit der Ausdehnung der Trockendauer besonders weit gegangen, um Spannungen und Ausschuß bei dem nachfolgenden Brennen

zu vermeiden. Zu diesem Zwecke wird mit Luft von dem ungewöhnlichen Feuchtigkeitsgrad $\varphi \approx 0,9$ bis $0,95$ gearbeitet.

Der für die Trocknung maßgebende Feuchtigkeitsgehalt kann für Kalkstein zu $\varepsilon_t \approx 0,1$ bis $0,18$, für vorgewalzten Ton zu $\varepsilon_t \approx 0,25$ bis $0,45$, für Dach- und Mauerziegel zu $\varepsilon_t \approx 0,18$ bis $0,25$ angenommen werden. In fertig getrocknetem Zustande soll der freie Wassergehalt möglichst restlos verschwunden sein. Je nach dem angewandten Verfahren kommt der getrocknete Formling mit einem Feuchtigkeitsgehalt $\varepsilon_b \approx 0,03$ bis $0,08$ in den Brennofen, dessen nächste Aufgabe darin besteht, das teilweise gebundene Restwasser bei Temperaturen über 100° auszutreiben.

Den breitesten Raum auf dem hier behandelten Gebiet nimmt die Trocknung von Ziegelsteinen und Dachziegeln ein. Bei Beurteilung des Trockenverfahrens ist von der Wirkungsweise des gleichzeitig betriebenen Brennofens auszugehen. Sein Wirkungsgrad liegt im allgemeinen niedrig. Mehr als die Hälfte der vom Brennstoff erzeugten Wärme strahlt durch die Ofenwandungen in die Umgebung aus oder wird beim Ringofenbetrieb zur Vorwärmung der Verbrennungsluft und der frischen Formlinge herangezogen. Hierbei verbleibt ein Überschuß, dessen Ausnutzung zu Trockenzwecken naheliegt. Das einfachste Verfahren besteht darin, die Außenluft über die fertig getrockneten heißen Ziegel zu leiten und zu den Trockenräumen weiterzuführen. Damit die gebrannten Formlinge nicht durch Kühlrisse gefährdet werden, darf die Einwirkung der Außenluft im allgemeinen nicht unmittelbar hinter der Feuerzone einsetzen. Ein Teil der Ofenabwärme geht daher verloren. Die erhebliche Wärmemenge, die in die Umgebung ausstrahlt, wird in der Regel dadurch für die Trocknerei aufgefangen, daß diese oberhalb des Ofens angeordnet ist. An sich besteht hierzu keine Notwendigkeit, denn es ist möglich, die Trockenluft über den Ofen streichen zu lassen und nach einer seitlich liegenden Trocknerei zu führen. Der naheliegende Weg, diesen Teil des Ofenverlustes niedrig zu halten und zu diesem Zwecke Wärmeschutzstoffe auf die Ofenwände aufzubringen, läßt sich nicht gehen, ohne, wegen der alsdann fehlenden Kühlwirkung, eine verminderte Lebensdauer der Ofenbaustoffe in Kauf zu nehmen. Ein dritter Teil der Ofenwärme geht mit den Abgasen der Feuerung verloren. Die unmittelbare Ausnutzung durch zeitweise Trocknung mit diesen Abgasen kommt in Frage, sobald die Ziegel genügend weit vortrocknet sind und der weiße Gipsanflug, der sich bei hohem Feuchtigkeitsgehalt der Steine aus der Einwirkung der in den Feuergasen enthaltenen schwefligen Säure auf den Kalkgehalt der Steine bildet, nicht mehr zu befürchten ist. In der Regel verbleibt jedoch stets eine Schädigung der Farbe, so daß für hochwertige Erzeugnisse der mittelbare Weg gewählt und die Abgaswärme zur Beheizung von Lufterhitzern verwandt wird, die die Trockenanlage versorgen. Gegen das Trocknen mit Abgasen spricht auch die Gefährdung der Arbeiter beim Betreten ungenügend durchlüfteter Kammern und die unvermeidliche Verschmutzung des Trockengutes durch Flugasche und Ofenstaub. Das gleiche gilt für die Abgase der im allgemeinen vorhandenen Dampf-

kesselfeuerung, die jedoch zahlenmäßig eine untergeordnete Rolle spielen und nicht mehr als etwa 2% der für die Trocknung benötigten Wärme zu decken gestatten. Dient eine Dampfmaschine zur Kraft-erzeugung, so kommt auch deren Abdampf als Heizmittel für die Trock-nerie in Frage. Es führt im allgemeinen zu unwillkürlicher Energiever-geudung, wenn aus diesem Grunde auf die wirtschaftliche Arbeitsweise der Kraftanlage wenig Wert gelegt wird. Jedenfalls läßt sich die für die Pressen und Hilfsmaschinen benötigte Kraft mit einer Dampfmenge erzeugen, die, je nach dem Druck, 5 bis 10% der benötigten Trocken-wärme im Abdampf liefert. Wird die vom Brennofen verfügbare Wärme zu 50% der benötigten Trockenwärme angesetzt, so läßt sich zusammen-fassend sagen, daß bei einer richtig arbeitenden Anlage sich insgesamt nicht mehr als zwei Drittel durch Abwärme decken lassen und ein zu-sätzliches Heizmittel aufgewandt werden muß. Wo dies nicht geschieht und der Trockenbetrieb allein durch Abwärme versorgt wird, liegt die

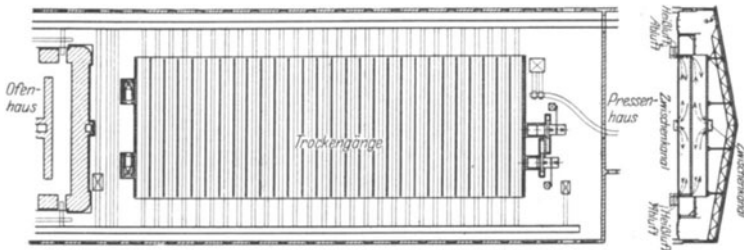


Abb. 304. Ziegel trockenanlage (Bührer).

Vermutung nahe, daß Ofen, Kessel oder Kraftmaschine weniger wirt-schaftlich arbeiten, als dies möglich wäre. Damit wird die Ziegelei mit künstlicher Trocknung zu einem Betriebe, der Abfallkraft zu liefern ge-stattet, wie dies in größerem Ausmaß bei der Braunkohlentrocknung geschieht. Die hierbei angenommene Zahl für die erforderliche Trocken-wärme rechnet nicht mit Wiedergewinnung der in dem abziehenden Schwaden enthaltenen Dampfwärme. Ihre Ausnutzung wird bei dem unten erwähnten Kanaltrockner der Firma Möller & Pfeifer ver-wirklicht und damit die Möglichkeit gewonnen, mit Abwärme allein auszukommen. Die Gelegenheit zur Lieferung von Abfallkraft ent-fällt alsdann.

Die Ausführung der Trockenvorrichtung für Ziegel und Ziegelsteine erfolgt entweder in Form von Gängen, die in ihrer Wirkungsweise auf Trockenkammern hinauslaufen, oder von ausgesprochenen Trocken-kanälen mit ständiger Bewegung des Gutes. Im letzten Falle wird die Luft quer zu dem Gute oder auch längs im Gleich- oder Gegenstrom geleitet.

Für die Ausführung von Trockengängen mit umschaltbarem Luft-weg ist der Vorschlag von Jakob Bührer vorbildlich geworden. Er ordnet an den Stirnseiten der Trockengänge je zwei Kanäle an. Durch den einen wird Heißluft in die Gänge geleitet. Die Feuchtluft wird vom

entgegengesetzten Ende nach Umleitung anderen, in der Antrocknung befindlichen Gängen zugeführt, die Abluft aus diesen schließlich weggesaugt. Abb. 304 gibt eine Bühlersche Trockenanlage in der Sonderausführung für lange Trockengänge und in der Anordnung neben dem

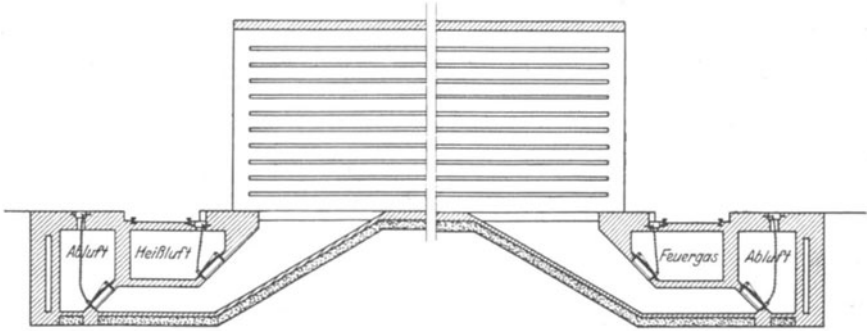


Abb. 305. Wechselstrom-Ziegelrockner (Zehner).

Brennofen wieder. Sie arbeitet unter Hintereinanderschaltung je zweier Trockengänge. Die Luft nimmt ihren Weg im einen Gang aus dem Heißluftkanal von den beiden Enden nach der Mitte zum Zwischenkanal, im anderen Gang aus dem Zwischenkanal von der Mitte nach den beiden Enden zum Abluftkanal.

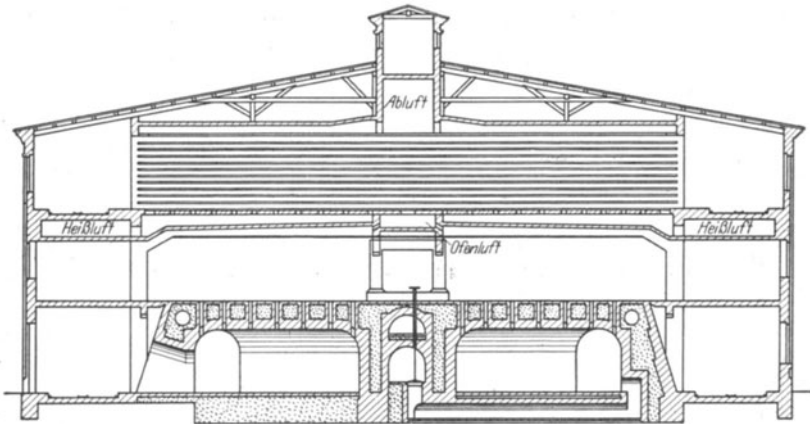


Abb. 306. Wechselstrom-Ziegelrockner über Brennofen (Zehner).

Der Zehnersche Wechselstromrockner nach Abb. 305 besitzt gleichfalls an den beiden Stirnenden Kanäle. Bei Beginn der Trocknung wird Heißluft zugeführt, die am entgegengesetzten Ende entweicht. Nach dem Antrocknen des Gutes erfolgt Umschaltung so, daß nunmehr Feuergase eintreten und in entgegengesetztem Sinne abgehen.

Den Querschnitt einer über dem Ofen angeordneten Trockenanlage nach Ausführung Zehner zeigt Abb. 306. Die äußere Verlustwärme des Ofens wird dem Trockengang durch Luft zugeführt, die nach dem Be-

streichen der Ofenoberfläche durch den Mittelkanal eintritt. Die beiden seitlichen Kanäle dienen zur Zuführung von Heißluft, die aus der Abwärme von Ofen, Kessel und Maschinenanlage gewonnen wird. Die Abführung des Schwadens erfolgt durch den in der Mitte über den Trockengängen liegenden Kanal, an den ein Lüfter anschließt. Auch

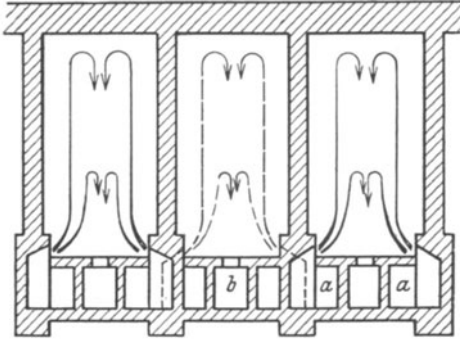


Abb. 307. Kammertrockner (Bühler).
a Feuchtluft, Heißluft, *b* Naßluft, Feuchtluft.

hier findet ein Wechsel in der Richtung der Trockengase statt. Die Vortrocknung geschieht von der Mitte nach den beiden Enden zu. Danach erst werden die beiden äußeren Kanäle in Tätigkeit gesetzt. Bei hochwertigem Trockengut kommt das Fertigtrocknen durch Rauchgase in Wegfall. Statt dessen wird die Abluft der fertigtrocknenden Kammern zur milden Anwärmung der frischen Formlinge in den neu besetzten Kammern verwandt.

Reine Innenheizung wenden Keller und die Baugesellschaft für künstliche Trocknereien m. b. H., Duderstadt, bei eben-erdigen Trocknereien an, indem sie längs der Trockenräume Rohre laufen lassen, die mit Dampf, bei besonders empfindlichem Gut während der Vortrocknung mit Warmwasser, gespeist werden.

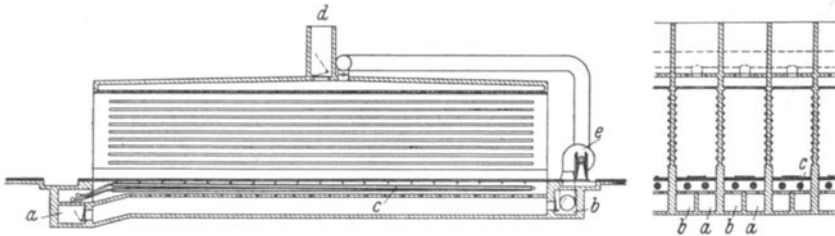


Abb. 308. Kammertrockner (Duderstadt).
a Heißluft, *b* Feuchtluft, *c* Heizrohre, *d* Abluft, *e* Lüfter.

Bei den verhältnismäßig langen Trockengängen läßt sich eine ungleichmäßige Wirkung auf die Ware selbst dann nicht vermeiden, wenn durch besondere Kunstmittel, wie Umkehr der Trockenluft und stufenweises Trocknen, zunächst mit halbfeuchter, danach mit heißer Luft, dagegen gearbeitet wird. Für besonders empfindliche Tonwaren bildet daher Bühler die Trockengänge nach Abb. 307 als eigentliche Trockenkammern dadurch aus, daß er die Trockenluft statt den weiten, in der Ganglänge verlaufenden, den kurzen Weg quer nehmen läßt. Die Luftverteilung erfolgt durch am Boden angeordnete Kanäle, an den Stirnseiten schließen diese Kanäle an die Hauptluftverteilkäle an, und zwar die Belüftungskanäle abwechselnd an einen Feuchtluft- und Heiß-

luftkanal, die Entlüftungskanäle abwechselnd an einen Naßluft- und Feuchtluftkanal. Die Anordnung ist so getroffen, daß auch eine Mischung von Feucht- und Heißluft zugeführt werden kann. Bei besonders empfindlichen Waren wird die Möglichkeit des Umluftbetriebes dadurch geschaffen, daß der Lüfter Naßluft anzusaugen und in den Frischluftkanal zurückzuführen vermag. Diese Kennzeichen kommen auch dem Kammertrockner der Abb. 308 (Duderstadt) zu, in dem noch zusätzlich Innenbeheizung durch Heißwasser angewandt wird, das durch Pumpe unter Druck in Umlauf gehalten wird. Seine Temperatur steigt bis 160°. Betätigung der Innenheizung allein unter Abstellung von Lufteintritt und Abzug ergibt Anwärmung des Gutes ohne Trocknung, also den für empfindliche Ware besonders günstigen Anfangszustand. Der weitere Verlauf der Trocknung läßt sich durch Regelung von Heißwassertemperatur, Zufuhr warmfeuchter oder heißtrockener Luft in beliebiger Weise leiten.

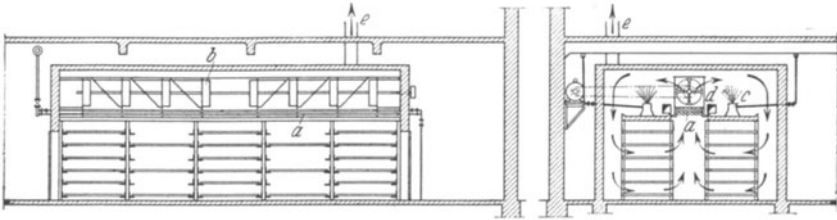


Abb. 309. Kammertrockner für keramische Erzeugnisse (Schilde).
a Luftheizter, *b* Lüfter, *c* Luftbefeuchter, *d* Frischluft, *e* Abluft.

Seltener ist die Ausführung als Großraumtrocknerei, bei der die Warmluft durch im einzelnen regelbare Leitungen unterhalb des Trockenraumbodens verteilt wird.

Ausgesprochene Kanaltrockner nach Abb. 150 verwendet die Firma Möller & Pfeifer, Berlin. Die Heizvorrichtungen werden am Austrittsende des Gutes mit Warmluft aus den Kühlkammern des Ofens, in Ausnahmefällen mit Feuergasen oder Frischdampf, in der Mitte mit Abdampf gespeist. Für das Eintrittsende dient der von der Gegenseite her abgesaugte Schwaden als Heizmittel. Das austretende Gut trifft mit hoch erwärmter Luft von 120 bis 140° zusammen. Das feuchte Gut findet beim Eintritt feuchte und kühle Luft von 20 bis 30° vor. Das Ergebnis ist milder Einsatz der Trockenwirkung, am Austrittsende hohe Trockenkraft und daher Vermeidung von gefährlichen Spannungen.

Bei den Trockenvorrichtungen für keramische Erzeugnisse hängt die Entscheidung, ob Kammer- oder Kanaltrockner, von der Ausführung und Betriebsweise des Ofens ab. Die Kammer kommt in Verbindung mit dem Einzelofen, der Kanal in Verbindung mit dem Tunnelofen zur Anwendung. Das Trockenverfahren wird vor allem durch die Scherbendicke der Formlinge bestimmt. Hohe Trockengeschwindigkeit ist um so mehr zu vermeiden, je stärker der Formling und je größer infolgedessen die Gefahr von Spannung zwischen Oberfläche und Kern ist. Der Kammertrockner der Abb. 309 (Schilde) ist gekennzeichnet

durch die Anordnung mehrerer Umluftgebläse auf gemeinsamer Achse und Verbindung der Heizmöglichkeit mit einer Befeuchtungseinrichtung. Das Trockenverfahren verläuft in der aus Abb. 310 ersichtlichen Weise. An die Durchwärmung in nahezu gesättigter Luft von allmählich ansteigender Temperatur schließt sich die Haupttrocknung bei verringertem, aber immer noch hohem Luftfeuchtigkeitsgrad an. Die Fertig-

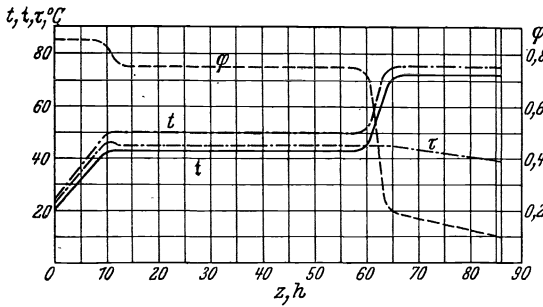


Abb. 310. Verlauf der Trocknung im Kammertrockner (Schilde).

trocknung erfolgt bei erhöhter Temperatur und entsprechend erniedrigtem Luftfeuchtigkeitsgrad.

Nach Angabe der Herstellerin gelingt es auf diese Weise, die Trockendauer bei

Elektroporzellan, Feuertonwaren und Schmirgelscheiben	auf 2 bis 4	Tage
Steinzeug und Steingut	„ 2	„ 2 1/2 „
Brennkapseln aus Schamotte und Steatit	„ 1	„ 1 1/2 „
Glasschmelzhäfen	„ 6	„ 8 „
Muffeln für die Hüttenindustrie	„ 8	„ 10 „

zu ermäßigen.

Während nach Abb. 310 die Schlußtrocknung unter rascher Steigerung der Lufttemperatur eingeleitet wird, erfolgt bei der Trocknung von Terrakotta nach Steger¹ in der zweiten Hälfte eine schnelle Senkung der Kühlgrenze. Im ersten Falle steigt die Temperatur des Trockengutes rasch an, im letzten Falle nimmt sie zunächst ab, dann langsam wieder zu.

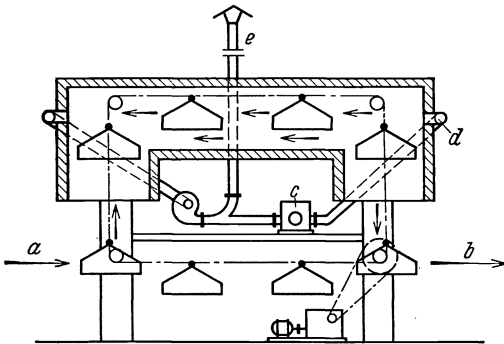


Abb. 311. Kanaltrockner für Formen und Kerne (Schilde).
a Einlauf, b Auslauf, c Luftherhitzer, d Zuluft, e Abluft.

Der in Abb. 311 (Schilde) dargestellte Kanaltrockner für die Behandlung von Gießereiformen und Kernen benutzt als Heizmittel Leuchtgas, das die geforderten hohen Temperaturen von 250 bis 350° leicht erreichen läßt. Die dop-

pelt geknickte Trocknerform und die Art der Luftführung gestatten, die beiden nach abwärts gerichteten Kanalenden offen zu halten. Abb. 144 gibt ein kennzeichnendes Beispiel für Tellertrocknung im Fließverfahren.

In Portlandzementfabriken, die nach dem trockenen Verfahren arbeiten, werden die Rohstoffe (Kalkstein und Ton) in Trommeltrock-

¹ Steger: Wärmewirtschaft in der keramischen Industrie 1927.

nern vorbereitet, die mit Feuergasen im Gegenstrom arbeiten. Für die Reinigung der Abgase dient in zunehmendem Maße elektrische Entstaubung. Beim Eisen-Portlandzement werden in ähnlicher Weise Schlackensand und Kalkstein durch Gichtgase in Gegenstromtrommel-trocknern vorbehandelt.

IV. Ausführung der Heizvorrichtung.

Die Vorrichtungen zur Erwärmung von Luft oder anderen als Trockenmittel dienenden Gasen laufen auf Heizvorrichtungen allgemeiner Art heraus und fallen damit aus dem engeren Rahmen des eigentlichen Trockenvorganges. Kurz erwähnt bestehen sie aus;

1. Heizvorrichtungen zur Temperaturerhöhung von Luft oder anderen Gasen, wobei als Heizmittel Feuergase oder meist Dampf dienen.

Öl- und gasbeheizte Lufterwärmer haben sich für Lacktrockenanlagen bewährt, weil hierbei die geforderten Temperaturen mit der nötigen genauen Regelbarkeit dauernd festgehalten werden können.

2. Feuerungen zur Erzeugung von Feuergasen als Wärmeträger.

Da die günstigste Verbrennungstemperatur fast ausnahmslos höher liegt als die für das Gut zulässige Höchsttemperatur, erfolgt eine Mischung der Feuergase mit Frischluft vor Eintritt in die Trockenvorrichtung. Das Arbeiten mit hohem Luftüberschuß ist demgegenüber weniger günstig, weil hierdurch der Wirkungsgrad der Feuerung erheblich herabgezogen wird.

3. Heizvorrichtungen zur Erzeugung von Heißdampf als Wärmeträger, wobei als Heizmittel Feuergase oder hochgespannter Dampf dienen.

4. Daneben kommt die Möglichkeit der Anwendung einer Heizmaschine in Frage, bei der, unter Aufwendung von Arbeit, Wärme erzeugt wird.

Hierunter fallen die Brüdenkompressoren, bei denen die Verdichtung entweder durch mechanische Arbeitsleistung in Turbokompressoren oder durch Ausnutzung der Spannungsenergie von Arbeitsdampf in Dampfstrahlkompressoren erfolgt. Der Weg, durch Verbindung eines Kompressors mit einer arbeitgewinnenden Expansionsmaschine der vollkommenen Trocknung näherzukommen, ist bisher noch nicht beschritten worden.

In Ausnahmefällen kann auf eine besondere Heizvorrichtung für das Trockenmittel verzichtet werden, wenn das Gut außerhalb der Trockenvorrichtung eine Vorwärmung erfährt, die zur Deckung des Wärmebedarfes bei der nachfolgenden Lufttrocknung ausreicht. Dies ist in der Regel nur dann der Fall, wenn die spezifische Trockenleistung $\xi_r - \xi_b$ klein ist und die eigentliche Trocknung sich bei niedrigen Temperaturen, also vor allem unter Luftleere, vollzieht. Beispiele hierfür bieten das Fertigrocknen von Getreide unter gleichzeitiger Abkühlung in Vakuumtrocknern und die Trocknung von Holz und Zuckerbroten im Vakuum.

Die Bauweise der Heizvorrichtungen ist vor allem abhängig von der Art des angewandten Heizmittels. Bei freier Wahl ist davon auszu-

gehen, daß die Wärmeübertragung einen nicht umkehrbaren Vorgang darstellt, der in um so höherem Maße auf Energieentwertung hinausläuft, je weiter die Temperatur des Heizmittels über der für das Trockenmittel geforderten Höchsttemperatur liegt. Bei niedrigen Trockentemperaturen sind daher in erster Linie Dampf und erwärmte Flüssigkeiten heranzuziehen, und zwar möglichst in Form von Abwärmträgern, d. h. der Dampf nach vorheriger Arbeitsleistung, die erwärmte Flüssigkeit mit der Temperatur, mit der sie bei einem anderen Arbeitsvorgang entfällt. Für höhere Trockentemperaturen kommen Dampf von höherer Spannung oder Flüssigkeiten mit entsprechendem Siedepunkt in Frage. Bei dem heutigen Stand des Dampfkesselbaues, für den Spannungen von 20 at und mehr bei Neuanlagen als Regel gelten, wird die Anwendung von Frischdampf für die Heizvorrichtung ausnahmslos auszuschließen und dessen vorherige Ausnutzung zur Arbeitsleistung selbst dann zu verlangen sein, wenn durch die Trockentemperatur Dampf von mittlerer Spannung, z. B. 6 bis 8 at, benötigt wird. Für besonders hohe Trockentemperaturen steigt bei Verwendung von Dampf als Heizmittel dessen Druck schließlich so hoch, daß für die Dampferzeugung Kessel üblicher Bauart ausscheiden. Wird von der Anwendung überhitzten Dampfes abgesehen, so stellt bei dem heutigen Stande der Technik eine Dampftemperatur von 300° die obere Grenze dar. Auf ähnliche Temperaturen führt die Anwendung schwer siedender Flüssigkeiten, wie Öl mit hohem Siedepunkt. Neue Aussichten in dieser Beziehung eröffnen die in letzter Zeit auch für Kraftanlagen angewandten Quecksilberdämpfe. Für noch höhere Temperaturen kommen Feuergase, elektrische Energie und unmittelbare Flammenwirkung in Betracht. Der rein energetische Gesichtspunkt, daß ihre Anwendung bei tieferen Trockentemperaturen eine Verschwendung darstellt, ist für elektrische Energie ganz allgemein gültig, da sie zur Krafterzeugung unmittelbar verwendet werden kann. Ähnliches gilt für die aus flüssigen oder gasförmigen Brennstoffen erzeugten Verbrennungsgase, die z. B. in einer Verbrennungskraftmaschine ausgenutzt werden können. Bei Brennstoffen ist die unmittelbare Anwendung der aus ihnen gewonnenen Feuergase so lange der mittelbaren Verwendung des aus ihnen erzeugten Dampfes ebenbürtig, wie in beiden Fällen gleiche Abwärmeverluste auftreten und die Ausnutzung der festen Brennstoffe zur Krafterzeugung über den Umweg der Dampferzeugung noch das übliche Verfahren bleibt. Bei Heizmitteln, die sich ohne weiteres zur Krafterzeugung eignen, ist der Umweg über die Heizmaschine der gegebene. Sie stellt das Mittel dar, um in umkehrbarer, d. h. verlustloser Form die verfügbare Wärme von der höheren auf eine tiefere Temperatur sinken zu lassen und eine der Entwertung entsprechende Vermehrung der Wärmemenge zu erzielen¹.

Bei Anwendung von Dampf als Heizmittel entsteht eine Verlustquelle dadurch, daß das Niederschlagwasser im allgemeinen mit der

¹ Hirsch: Grundsätze der Wärmeumwandlung. Z. f. d. ges. Turbinenwesen 1920.

Sättigungstemperatur des Dampfes entweicht. Dieser Verlust ist um so geringer, je niedriger der angewandte Dampfdruck liegt. Erfolgt die Abführung des Niederschlagwassers unter Entspannung auf den Druck der Umgebung, so wird der Überschuß der Flüssigkeitswärme in Dampfform frei und geht auch dann verloren, wenn das heiße Dampfwasser Verwendung findet. Zuführung kalten Wassers hinter den Ableitern schafft hier Abhilfe. Richtiger ist es jedoch, in solchen Fällen eine Unterkühlung des Niederschlagwassers vor der Entspannung in der Weise anzustreben, daß seine Wärme innerhalb der Trockenvorrichtung, z. B. zur Vorwärmung der Trockenluft, benutzt wird.

Steht ausnahmsweise elektrischer Strom zu billigem Preise zur Verfügung, weil seine Ausnutzung zu Kraftzwecken zeitweise in dem verfügbaren Überschuß nicht möglich ist, so ergibt sich in der Form elektrischer Heizwiderstände eine besonders einfache Ausführungsweise. In manchen Fällen, wo ihre Anwendung wegen der geforderten hohen Temperaturen gegeben scheint, wie bei der Trocknung lackierter Eisenteile, tritt sie, mit Rücksicht auf die Entzündungsgefahr, gegenüber anderen Heizmitteln zurück. Andererseits gewinnt sie zunehmende Bedeutung für solche Trockner, bei denen der Wärmeverbrauch gering ist, wie kleinen Trockenschränken.

Bei Innenheizvorrichtungen liegt die Versuchung nahe, neben der Wärmeübertragung durch die sich darüber bewegende Luft die Wärmestrahlung auszunutzen. Die Verwirklichung scheitert im allgemeinen daran, daß dies nur unter ungleichmäßiger Verteilung der Trocknungswirkung möglich ist. Die Ablendung der Innenheizvorrichtung bildet daher die Regel. Die innere Heizvorrichtung besteht meist aus glatten oder mit Rippen versehenen dampfgespeisten Rohren, die gleichmäßig verteilt und so angeordnet sein sollen, daß sich ein geregelter Luftkreislauf ergibt. Für höhere Temperaturen wird die bei Backöfen übliche Einzelrohrheizung angewandt, bei der teilweise mit Wasser gefüllte Rohre einerseits in den Trockenraum, andererseits in eine von diesem getrennte Feuerung reichen. Die zur Verwendung kommenden, beiderseits zugeschweißten Rohre sind mit Neigung nach der Feuerung zu verlegt und bei einer Temperatur von 300° einem Betriebsdruck von etwa 100 at unterworfen. Daneben kommt Umlaufheißwasserheizung in Betracht, der höheren Beanspruchung entsprechend unter Berücksichtigung besonderer Sicherheitsmaßnahmen. Bei der Schmidtschen Heizung von Werner & Pfeleiderer werden nach Abb. 291 die Ausdehnungsgefäße in kaltem Zustande mit Preßluft oder verdichtetem Stickstoff gefüllt, um bei nicht zu großem Inhalt den erforderlichen Sicherheitsraum zu schaffen.

Für alle Heizvorrichtungen ist eine Unterteilung in abschaltbare Gruppen vorteilhaft, wenn das angewandte Trockenverfahren die Abhängigkeit von den wechselnden Witterungsverhältnissen in Kauf nimmt.

V. Vorrichtungen zur Ausnutzung der Abwärme. Wetterfertiger.

Die Rückgewinnung der in dem getrockneten Gute enthaltenen Überschußwärme gelingt, soweit es sich lohnt, meist innerhalb des eigentlichen Trockenverfahrens durch Übertragung auf das eintretende kalte Naßgut, und zwar in der Regel mittelbar durch Vorwärmung der Frischluft. Diese bestreicht im Gegenstrom das austretende Gut. In ähnlicher Weise wird ein Teil der in der Abluft enthaltenen Überschußwärme zur Vorwärmung des Naßgutes benutzt, wenn die feuchte Luft das eintretende Gut im Gegenstrom bestreicht. Im letzten Falle geht mit der Übertragung der Überschußwärme ein Niederschlag auf das Gut Hand in Hand, sobald seine Temperatur niedriger liegt als der Taupunkt der austretenden Luft. Die hierbei erfolgende Übertragung der Dampfwärme aus der Luft auf das Gut kommt als Rückgewinnung der Abwärme nicht in Betracht, weil ihr im weiteren Verlaufe der Trocknung ein mindestens ebenso hoher Wärmeverbrauch für die vermehrte Trockenleistung entspricht.

Anders liegen die Verhältnisse bei schaufelfähigem und insbesondere flüssigem Trockengut. Hier kann die Abluft zur Beheizung einer metallenen Wand dienen, auf deren Gegenseite das Trockengut sich befindet. Es erfährt eine Anwärmung und Vortrocknung, während die Abluft sich im Grenzfall bis zur Eintrittstemperatur des Trockengutes abkühlt, ihre Feuchtigkeit nach Unterschreitung des Taupunktes teilweise ausfällt und nach außen geleitet werden kann. Hierbei ergibt sich eine Annäherung an das vollkommene Trockenverfahren. Der Energieverbrauch sinkt auf das Maß, das durch die unvermeidlichen Streuverluste und das bei endlicher Heizflächengröße nötige Temperaturgefälle bedingt ist. Diese Möglichkeit einer Verwertung der gesamten Abwärme innerhalb des Trockenvorganges scheidet in Wirklichkeit daran, daß der Wärmeübergangswiderstand von Luft an metallene Flächen niedrig ist. Es müssen daher erhebliche Temperaturgefälle eingehalten werden, wie sie bei Feuergasen vorliegen, um wirtschaftliche Lösungen zu erhalten. Infolgedessen gewinnen mittelbare Maßnahmen für die Abwärmeausnutzung an Bedeutung, vor allem die Zusammenführung der Abluft mit Wasser in Mischvorrichtungen. Das erwärmte Wasser dient meist allgemeinen Zwecken, seine wirtschaftliche Ausnutzung in Oberflächenaustauschvorrichtungen zur Vorwärmung der Trockenluft scheidet an der Größe und Kostspieligkeit der hierbei nötigen Flächen. Mit einer Verunreinigung des Warmwassers muß stets gerechnet werden, da in der Abluft kleinste Staubteilchen oder schädliche Gase entweichen.

Über die Verbindung eines für die Brüdenentstaubung von Braunkohlentrocknern dienenden Naßfilters mit einer Abwärmeverwertungsanlage in Form eines Verdampfers nach dem Verfahren von Lurgi be-

richtet Josse¹. Die durch einen Zyklon vom größten Teil ihres Staubgehalts befreiten Brüden übertragen ihre Wärme in einem Naßfilter auf Wasser, das zwischen dem Naßfilter und einem Entspannungsverdampfer umläuft. Der im Naßfilter niedergeschlagene Staub wird in einem dem Verdampfer vorgeschalteten Behälter ausgeschieden und abgelassen. Die sekundären Brüden des Verdampfers mischen sich in einem Einspritzkondensator mit dem Kondensat der Kraftanlage und wärmen dieses vor. Nach den Beobachtungen von Josse werden hierbei die mit 97,7° bei einem Feuchtigkeitsgrad $\varphi = 0,59$ eintretenden Brüden auf 72,5° abgekühlt, wenn das Umlaufwasser mit 69,9° ein- und 77,1° austritt. Die sekundären Brüden des Verdampfers besitzen eine Spannung von 0,32 at (entsprechend 70° Sättigungstemperatur) und erwärmen das mit 31,4° eintretende Kondensat auf 69,5°, also bis nahezu auf die der Brüdenspannung entsprechende Grenztemperatur. Die Möglichkeit dieser Verbindung ist an die Bedingung geknüpft, daß eine Braunkohlenbrikettfabrik mit einem Großkraftwerk verbunden ist, wie sie bei dem

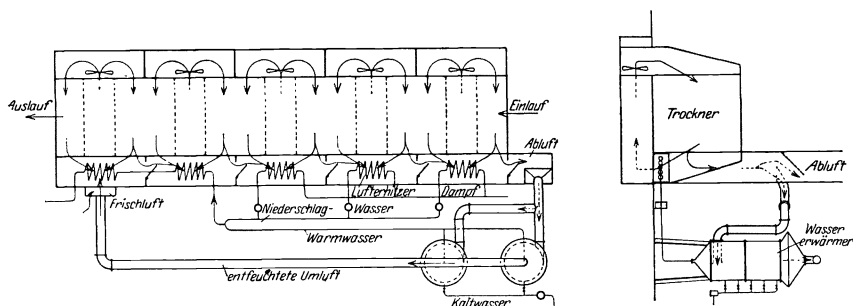


Abb. 312. Rückgewinnungsanlage für Schwadenwärme (Wießner).

Großkraftwerk Böhlen, für das die Ausführung erfolgt ist, zutrifft. Für andere Fälle lassen sich, worauf Josse bereits hinweist, die sekundären Brüden des Verdampfers in einer mit hoher Luftleere arbeitenden Kondensationsturbine ausnutzen. Das Kennzeichnende des Lurgi-Verfahrens besteht darin, daß bei der Umformung der primären in die sekundäre Brüdenwärme der Gehalt der Brüden an Luft und Staub zurückbleibt und damit ein hauptsächliches Hindernis für die Verwertung der primären Brüden entfällt.

Dient Heißdampf als Trockenmittel, so besteht der entweichende Schwaden aus fast luftfreiem Dampf. Die Rückgewinnung der Abwärme gestaltet sich alsdann besonders einfach, da der Schwaden unmittelbar als Heizmittel verwendet werden kann und wegen der günstigen Wärmeübergangszahl mäßige Heizflächen fordert. Seine Ausnutzung ist auch zur Krafterzeugung, z. B. in Kondensationsturbinen, denkbar, wobei allerdings vorherige Entfernung der Verunreinigungen Vorbedingung ist. Die Verdichtung des Schwadens durch Dampfstrahl- oder Turbokompressoren stellt keine eigentliche Verwertung der Ab-

¹ Josse: Entstaubung von Brüden oder Kesselabgasen mit Destillatgewinnung. Ergebnisse eines Großbetriebes. Z. V. d. I. 1930.

wärme dar, sondern bildet einen Teil des ganzen Trockenverfahrens, das dadurch umgestaltet und dem umkehrbaren Vorgang näher gebracht wird.

Ein Beispiel für die Ausbildung einer Vorrichtung zur Rückgewinnung der Abluftüberschußwärme stellt Abb. 312 (Wießner) dar. Sie besteht aus einem Düsenturm, in dem fein zerstäubtes Wasser der von unten nach oben strömenden Abluft entgegenfließt. Bei der angedeuteten Schaltung wird das erwärmte Wasser mit dem Niederschlag-

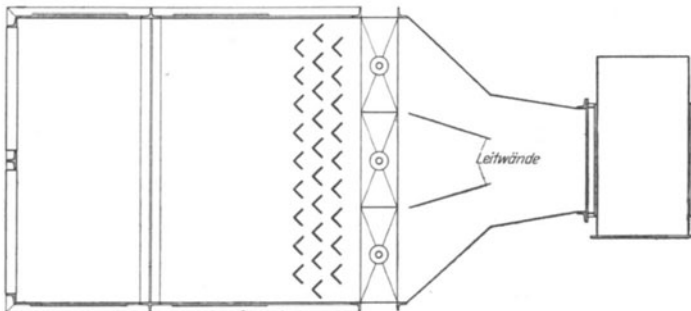
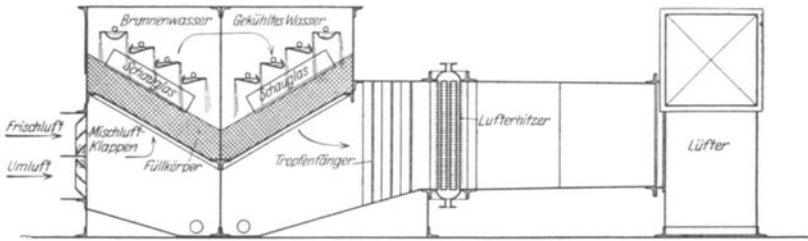


Abb. 313. Wetterfertiger.

wasser der dampfbeheizten Luftvorwärmer vereinigt und zur Beheizung der letzten Kammern einer Stufentrockenvorrichtung benutzt. Da die Abluft gleichzeitig mit der Kühlung eine Entfeuchtung erfährt, wird sie für Wiederverwendung im geschlossenen Kreislauf tauglich.

An Stelle des Düsenraumes kann auch ein Kühlturm mit Füllkörpern Verwendung finden. Beide unterscheiden sich in der Bauweise grundsätzlich nicht von „Wetterfertigern“, die zur Entfeuchtung der Frischluft dienen. Abb. 313 stellt einen Wetterfertiger dar, bei dem die Entfeuchtung zunächst durch Brunnenwasser, danach durch künstlich gekühltes Wasser besonders weitgehend erfolgt. Mit Rücksicht auf Wassersparnis ist für die erste Stufe Gegenstrom angewendet. Die Nachkühlung und weitere Entfeuchtung kann im Gleichstrom erfolgen, weil das hier verwendete Wasser ständig kreist. Derartige Wetterfertiger bewirken neben der Kühlung und Entfeuchtung gleichzeitig ein Waschen

der Luft und machen sie für Verwendung bei Trockenanlagen, die vollkommene Staubfreiheit verlangen, wie Film-, Trockenplatten- und Lacktrockenvorrichtungen, besonders geeignet. Zwischen Füllkörperraum und Heizvorrichtung müssen mitgerissene schwebende Wassertropfen sicher entfernt werden. Die Tragfähigkeit bewegter Luft für fein zerteiltes Wasser ist um so größer, je höher die Luftgeschwindigkeit und je kleiner die Tropfenabmessung ist. Einbau von Prallflächen in den Luftweg bewirkt Vereinigung der kleinen Tropfen zu großen, bei erheblichen Wassermengen zu geschlossenen Wasserflächen, deren dauernde Abscheidung aus dem Luftstrom keine Schwierigkeiten bietet. Demgegenüber erfüllen filterartige Schichten ihren Zweck weniger vollkommen, weil sie die Erhaltung der Tropfenform begünstigen. In Abb. 313 ist am Eintritt der Luft eine Klappenregelung vorgesehen, um Mischluft in wechselnder Zusammensetzung, jedoch gleichbleibender Gesamtmenge, einzuführen.

Die Möglichkeit, die Trocknung in geschlossenem Kreislauf unter Einschaltung eines Wetterfertigers durchzuführen, wird bisher nur in Ausnahmefällen ausgenutzt, obwohl in zahlreichen Betrieben, wie Lederfabriken, eine Verbindung mit der allgemeinen Wasserversorgungsanlage nahe liegt. Hierbei wird nach D.R.P. 490 924 der Wetterfertiger mit einem großen Wassersammelraum ausgebildet, der zur Versorgung des Betriebes dient. Das Wasser erfährt beim Durchgang der Luft eine leichte Anwärmung, die in vielen Fällen erwünscht ist, z. B. bei Lederfabriken, wo die Notwendigkeit, das Wasser in den Äschergruben anzuwärmen, alsdann entfällt. Die zur Trocknung aufgewandte Wärme findet sich zum größten Teile im Wasser wieder.

VI. Reinigung der Brüden.

Die aus der Trockenvorrichtung austretenden Brüden enthalten fremde Bestandteile in Gas- oder Staubform. Die Reinigung der Brüden wird deshalb häufig erforderlich, um die Belästigung der Umgebung zu vermeiden, die fremden Stoffe wiederzugewinnen, wenn sie wertvoll sind, bei vollständiger oder teilweiser Rücksaugung des Trockenmittels die Wärmeaustauschvorrichtungen und das Gut gegen Verunreinigung zu schützen.

Die gasförmigen Bestandteile entstehen in der Hauptsache durch Zersetzung des Trockengutes. Mit ihrer Entstehung ist daher um so mehr zu rechnen, je höher die bei der Trocknung auftretenden Temperaturen sind. Belästigung durch die Abgase des Trockners tritt für Menschen vor allem dann auf, wenn die Gase, wie beim Trocknen von Fisch- und Fleischabfällen, unangenehmen Geruch besitzen. Auch die Vegetation kann durch die Abgase ungünstig beeinflusst werden, ferner Bauteile, insbesondere aus Metall, der vorzeitigen Zerstörung durch sie verfallen.

Als Mittel, um die Brüden von gasförmigen Fremdstoffen zu reinigen, kommt in erster Linie die Kondensation in Frage. Hierbei werden die

Brüden durch einen gleichzeitig als Wäscher ausgebildeten Naßabscheider getrieben, Feuchtigkeits- und Gasgehalt zum großen Teil niedergeschlagen und mit dem Wasser fortgeleitet. Unwirksam wird dieses Verfahren, wenn sich die Gase nicht in Wasser lösen. Alsdann kommen verfeinerte Verfahren in Betracht, wie Adsorption durch aktive Kohle, Silika-Gel, Auswaschen mit besonders geeigneten Lösungsmitteln u. dgl. Sie finden vorzugsweise Anwendung, wenn es sich um die Wiedergewinnung des Gasgehalts in den Brüden handelt, z. B. um die bei der Trocknung von Gummi, Kunstleder, Lacken in die Brüden übergetretenen Dämpfe wertvoller Lösungsmittel. Die mit den Lösungsmitteldämpfen gemischte feuchte Luft tritt hierbei als unerwünschter Fremdkörper auf. An sich wäre es daher grundsätzlich erwünscht, die Konzentration der Schwaden an Lösungsmittel möglichst hoch zu halten. Hiergegen spricht jedoch der Umstand, daß bei vielen Trockenverfahren die Luft als Träger der ausgetriebenen Lösungsmitteldämpfe nötig ist, hohe Konzentration des Gemisches an Lösungsmitteldämpfen daher eine Verzögerung des Trockenvorganges, häufig auch eine Verschlechterung des Erzeugnisses mit sich bringt. Bei den Rückgewinnungsanlagen wird gleichzeitig mit dem Lösungsmittel der Wasserdampfgehalt der Luft niedergeschlagen. In all den Fällen, wo das Lösungsmittel sich in Wasser löst, ist eine Zusatzanlage für die Trennung beider durch Destillation erforderlich. Die aus der Rückgewinnungsanlage austretenden Dämpfe enthalten stets noch Teile des Lösungsmittels. Der Grad der Rückgewinnung ist, abgesehen von der Konzentration, abhängig von der Art des Lösungsmittels und um so günstiger, je höher das spezifische Gewicht des Lösungsmittels bei einem bestimmten Druck und einer bestimmten Temperatur ist. Der Gehalt der Trockenluft an unerwünschten gasförmigen Beimengungen bildet zuweilen ein Hindernis für das Arbeiten im geschlossenen Kreislauf, z. B. bei der Trocknung photographischer Papiere, bei denen der Gehalt an Formaldehyd die Luft des gleichzeitig für die Bedienung benutzten Trockenraumes zur Atmung untauglich macht, daher reichlich Ersatzluft verlangt.

Die Verunreinigung der Brüden durch Staub ist zuweilen verhältnismäßig gering, in anderen Fällen stellt die Staubmenge einen erheblichen Teil der Nutzleistung dar. Zu dem ersten Falle gehören die Trockner für fertige Gewebe und deren Rohstoffe. Da diese fast ausnahmslos mit Umluft arbeiten, empfiehlt sich die Einschaltung einer Entstaubungsvorrichtung, um die Heizkörper rein und voll wirksam zu halten. Bei den Fällen zweiter Art ist die Rücksicht auf die Wiedergewinnung ausschlaggebend; daneben tritt die zwingende Forderung, die bei fehlender oder mangelhafter Entstaubung der Brüden auftretende Verschmutzung der Umgebung, die sich meist zu einer gesundheitlichen Gefährdung der Umwohner steigert, zu vermeiden.

In Fällen, wo das Trockengut in Staubform, z. B. als Staubkohle Verwendung findet, kann die Entstaubungsvorrichtung nebenher als Sichter dienen. Da alsdann hoher Staubanfall gewünscht ist, wird die Brüden-geschwindigkeit hoch gehalten.

Nach Heinrich¹ beträgt z. B. der Staubgehalt beim

	g/m ³	% des Fertiggutes
Rohstofftrockner der Zementfabriken . . .	20 bis 80	8 bis 25
Tonerdetrockner	30 „ 100	10 „ 25
Kalialztrockner	5 „ 20	3 „ 8
Kalk-, Gips-, Sandtrockner	5 „ 50	4 „ 20
Braunkohlen-Röhrentrockner	15 „ 25	6 „ 12
Braunkohlen-Tellerrockner	—	1 „ 2
Steinkohlentrockner	10 „ 20	3 „ 5

Von den verschiedenen, für die Zurückhaltung des Staubes aus den Brüden in Betracht kommenden Vorrichtungen besitzt jede ihre Vor- und Nachteile.

Staubkammern wirken durch Verzögerung der Brüden, unterstützt durch Richtungswechsel. Der auftretende unerwünschte Druckverlust steht in gewissem Zusammenhang mit der Wirksamkeit insofern, als Einführung mit hoher Geschwindigkeit und vielfacher scharfer Richtungswechsel die Abscheidung begünstigt, gleichzeitig aber den Druckverlust erhöht. Die Entfernung des niedergeschlagenen Staubes aus Staubkammern von Hand führt zu bedenklicher Belästigung des Arbeiters. Bei geeigneter Formgebung des Kammerbodens läßt sich eine laufende Entleerung durch Schnecken u. dgl. herbeiführen. Auch das Absaugen des Staubes bietet keine Schwierigkeiten. In diesem Falle verbleibt allerdings ein Rest an den Umfassungswänden, der gelegentlich von Hand beseitigt werden muß. Die Entfernung des Staubes durch Abwaschen und Wegspülen ist in solchen Fällen zulässig, wo ein Zusammenballen und Verstopfen der Abflußwege nicht zu befürchten steht. Unter dieser Voraussetzung ist jedoch die Staubkammer kaum die gegebene Form, da sich der Erfolg mit dem Naßabscheider in einfacherer und besserer Weise erzielen läßt. Die Ansammlung großer Staubmengen in der Staubkammer vergrößert die Brandgefahr und deren Einleitung durch Explosion. Einen Vorzug der Staubkammer bildet ihre Anspruchslosigkeit hinsichtlich Unterbringung, die unterirdisch unter Höfen u. dgl. erfolgen kann. Die Anschaffungskosten sind nicht gering, wenn die Kammerabteile in genügender Zahl ausgeführt werden.

Schleuderabscheider (Zyklone) laufen in der Wirkungsweise auf Staubkammern hinaus, unterscheiden sich von diesen jedoch dadurch, daß die Brüden spiralförmig abwärts kreisen, der Staub daher ausgeschleudert und nach unten gefördert wird. Während die gereinigten Brüden in plötzlichem Richtungswechsel nach oben entweichen, tritt der Staub durch die untere Öffnung laufend in den Staubbehälter aus. Infolgedessen entfällt die bei der Staubkammer lästige Reinigung. Der Energieverbrauch ist etwa gleich hoch wie bei einer wirksamen Staubkammer, die Explosions- und Entzündungsgefahr wesentlich geringer, weil eine Ansammlung des Staubes im Zyklon verhindert wird. Nachteilig wirkt

¹ Heinrich: Reinigung von Gasen mittels Elektrofilter. Z. V. d. I. 1930.

wegen der großen Ausmaße die durch die Arbeitsweise gebotene Aufstellung in solcher Höhe, daß die den Staub aufnehmenden Behälter noch daruntergebracht werden können.

Bei Vakuumtrocknern bietet die Anwendung von Schleuderabscheidern üblicher Bauweise Schwierigkeiten, weil die Widerstandsfähigkeit gegen den äußeren Überdruck mit Rücksicht auf die großen Abmessungen hohe Kosten bedingt, meist auch eine äußere Beheizung nötig wird, um Niederschlag der Brüden an den Wandungen und daraus folgende störende Verstopfungen zu verhüten. In solchen Fällen wird von der Vacuumtrockner G. m. b. H. mit Erfolg ein stark erweitertes und beheiztes Rohr als Staubfänger in die Brüdenleitung eingebaut und mit einer steilgängigen umlaufenden Schnecke versehen, die den ausgeschleuderten Staub dem Brüdenstrom entgegen in den Trockner zurückführt, Abb. 206.

Vollkommene Entstaubung gelingt weder mit der Staubkammer noch mit dem Zyklon. Feinste Staubteilchen gelangen dabei nach wie vor in die Umgebung. Ist dies nicht statthaft, so können Stoff- und Schlauchfilter oder auch befeuchtete Stoßflächenfilter zur Anwendung kommen, wenn sich die Staubart hierfür eignet. Die Empfindlichkeit gegen hohe Temperaturen schränkt ihre Anwendungsmöglichkeit ein. Der Druckverlust im Schlauchfilter ist erheblich, wenn die Abmessungen die durch wirtschaftliche Rücksichten gebotene Grenze nicht überschreiten.

Eine besondere Wirksamkeit kommt dem Naßabscheider zu, in dem fein verteiltes Wasser den Staub auffängt und wegführt. Der entstehende Dünnschlamm kann nach Absatzbehältern geführt und der Bodensatz der Trockenvorrichtung neuerlich zugeleitet werden. Bei großem Staubgehalt wird die Forderung möglichst vollkommener Reinigung meist dadurch erfüllt, daß Zyklon und Naßabscheider hintereinandergeschaltet und der Absauglüfter zwischen beiden angeordnet wird, wie dies in Abb. 314 (Buckau) bei einer Röhrentrockneranlage für Braunkohle durchgeführt ist.

Zuweilen wird bei Naßabscheidern, statt Wasser, die nach vorheriger Eindickung zu trocknende Dünnlösung als Waschmittel eingeführt. Dies ergibt nur scheinbar eine Vereinfachung und Verbilligung, weil die Lösungsmenge in der Regel nicht ausreicht, um mit einfachen Mitteln den Abscheider mit einem genügend dichten Flüssigkeitsnebel zu erfüllen. Daher werden Zerstäubungsvorrichtungen nötig, deren Energieverbrauch den Gewinn ausgleicht. Eine unerwünschte Nebenerscheinung tritt bei Naßabscheidern durch die hohe Korrosion seiner Metallteile auf. Daher empfiehlt sich Herstellung aus Baustoffen, die gegen den Einfluß von Feuchtigkeit bei gleichzeitiger Anwesenheit von Luft unempfindlich sind. Bei geschlossenem Luftkreislauf und Entfeuchtung im Wetterfertiger wirkt dieser nebenher als Naßabscheider.

Im Elektrofilter strömen die Brüden zwischen der Sprühelektrode — Draht, Band, Gitter — und der geerdeten Niederschlagelektrode — Rohr, Platte, Gitter — hindurch. Hochgespannter pulsierender Gleichstrom lädt die Sprühelektrode, diese die Brüden mitsamt ihrem Staub-

gehalt auf. Der Staub wandert zur Niederschlagelektrode und gibt seine Ladung an deren Wand ab. Die Brüden strömen aufwärts, der

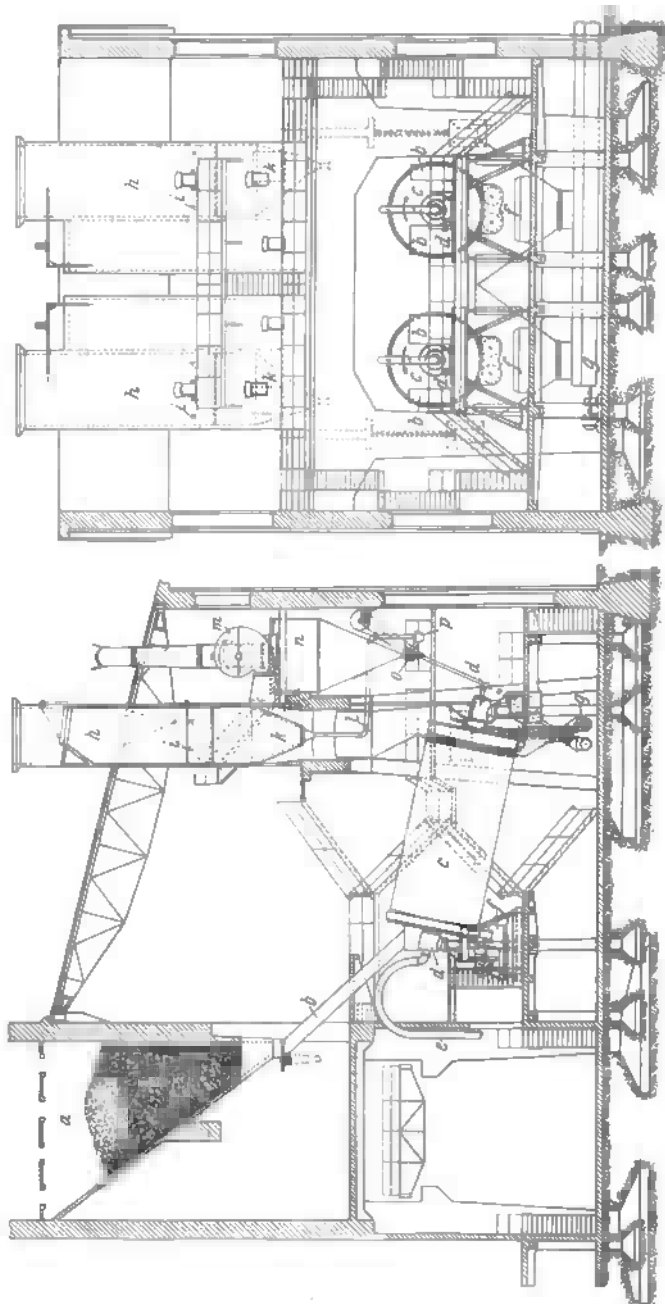


Abb. 314. Braunkohlen-Trockenanlage (Birkm.).
 a Reihenkohlenbunker, b Zulauf, c Röhrentrockner, d Lager, e Heizlampe, f Antrieb, g Fördermaschine, h Nauffüller, i Streuflur, k, l Kohlenwagelamm, m Läufer, n Zyklon, o Staubschnecke, p Schlammpumpe.

Staub fällt selbsttätig, gegebenenfalls unterstützt durch mechanische Erschütterungen, nieder. Gute und sichere Arbeitsweise ist nur dann gewährleistet, wenn die Brüden einen genügend hohen Taupunkt besitzen, Brüdenkondensation im Filter daher sicher vermieden ist. Der Druckverlust im Elektrofilter ist geringer als bei irgendeiner anderen Ausführung. Der daneben auftretende Energieverbrauch für Erzeugung des hochgespannten Gleichstroms ist mit 0,05 bis 0,5 kW für 1000 m³ Brüden außerordentlich niedrig, ebenso sind die Bedienungskosten gering. Der Staub wird unverändert wiedergewonnen, bedarf also im Gegensatz zu dem Naßabscheider keiner Nachbehandlung. Gegen die bei besonders niedrigem Feuchtigkeitsgehalt der Brüden eintretende Explosionsgefahr läßt sich durch vorbeugende Maßnahmen genügende Sicherheit schaffen. Sie bestehen in einer selbsttätigen Voranzeige für den Fall, daß die Zufuhr des Trockengutes gestört ist, daneben in der Anbringung von Explosionsklappen. Beim Feuergastrockner kommt der Einbau von Wasserdüsen zur Brüdenbefeuchtung in Frage. Um auftretende Brände sofort zu ersticken, erhalten Elektrofilter Dampfanschlüsse. Diese empfehlen sich bei Staubabscheidern jeder Art.

Die Entstaubung der Frischluft kommt in besonderen Fällen in Betracht, z. B. bei der Trocknung von Filmen und lackierten Teilen. Hierfür sind nur besonders hochwertige Filter brauchbar, weil es sich um das Zurückhalten der feinsten Teilchen handelt. Eine ähnliche Aufgabe tritt auf, wenn die Trocknung durch Feuergase erfolgt, das Trockengut jedoch unbedingt frei von Flugaschenteilchen gehalten werden muß. In diesem Falle muß zwischen Feuerung und Trockner eine Abscheidervorrichtung aus unverbrennlichen Baustoffen geschaltet werden. Die Reinigung gelingt besser und fordert eine Kammer oder einen Filter von geringerem Ausmaß, wenn sie sich nur auf die Feuergase beschränkt, die Zumischung der Zusatzluft also dahinter erfolgt. Allerdings wachsen hierbei die Ansprüche an Widerstandsfähigkeit gegen hohe Temperaturen.

VII. Einfügung der Trocknung in den allgemeinen Arbeitsgang.

In der Regel stellt die Trocknung eine Hilfsarbeit dar, deren Einreihung in den gesamten Arbeitsgang so zu erfolgen hat, daß unnötige Wege vermieden werden. Wird das Gut durch Kanäle geleitet, so ist es meist ohne Schwierigkeit möglich, diese Bedingung zu erfüllen. Der Kanaleingang liegt dann an der Stelle, der die vorbereitenden Arbeiten zufallen, sein Ausgang dort, wo die weitere Behandlung anschließt. Bei Trockenkammern ist Anpassung in ähnlichem Sinne schwieriger, vor allem deshalb, weil die Trocknung mit Unterbrechungen erfolgt. Der fortlaufende Arbeitsgang läßt sich jedoch auch hier einhalten, wenn mit mehreren Kammern und verschobenen Füll- und Leerzeiten gearbeitet wird. Zweckmäßig ist es, die Kammergruppen quer zu dem Arbeitsweg nebeneinander zu reihen und Füll- und Entleerungstüren auf entgegengesetzten Seiten anzubringen. Ein Arbeitsplan nach dem

Beispiel der Abb. 315 tut hierbei gute Dienste. Die durch ihn festgelegte Arbeitseinteilung stellt ein ähnliches Mittel wirtschaftlicher Leistung dar, wie das Band, das in der Werkstätte zwangsläufig die Arbeitsstücke durch die verschiedenen Arbeitsgänge führt.

Zuweilen wird es nötig, Trockenkammern zeitweise als Arbeitsräume zu benutzen. Alsdann ist besonderes Gewicht darauf zu legen, den Wärmeinhalt der Umfassungswände, baulichen Innenteile, Trockengestelle u. dgl. möglichst niedrig zu halten, da er meist verloren geht, wenn vor Aufnahme der Arbeit die erforderliche Auskühlung vorgenommen wird. Durch geeignete Schaltung kann allerdings bei mehreren Kammern dieser Wärmeinhalt zur Vorwärmung der Frischluft ausgenutzt werden. In dieser Weise

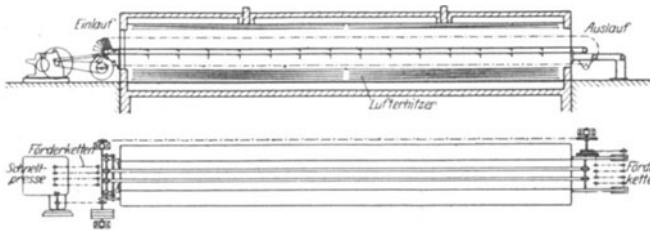


Abb. 316. Blechtrockner (Werner & Pfeleiderer).

werden Lackierräume nachts als Trockenräume benutzt, um die Bewegung des Trockengutes zu vermeiden. Bei der Ledererzeugung kann es wünschenswert sein, die auf die erste scharfe Trocknung folgende Befeuchtung und anschließende milde Trocknung im gleichen Raume vorzunehmen.

Zweckmäßig ist es, wenn die Begehung unterbrochen arbeitender Trockenräume dadurch vermieden wird, daß das Gut vor Einführung auf Wagen oder anderen Fördervorrichtungen verladen und so ein- und ausgeschoben wird. Zum gleichen Zwecke kommen bei unterbrochen arbeitenden Darren selbsttätige Belade- und Abräumevorrichtungen zur Verwendung.

Ein Vorbild für Einreihung mehrerer Trockenabschnitte in den allgemeinen Arbeitsgang bieten Abb. 143 und 290. Die zu lackierenden Körper hängen an einer Kreisfördervorrichtung, werden selbsttätig getaucht, getrocknet, abermals getaucht und nochmals getrocknet. Abb. 316 (Werner & Pfeleiderer) gibt eine Trockenanlage für bedruckte Bleche wieder. Hierbei reichen Förderketten bis unmittelbar an die Schnellpresse, nehmen die Blechtafeln selbsttätig auf und bewegen sie durch den Trockenkanal hindurch

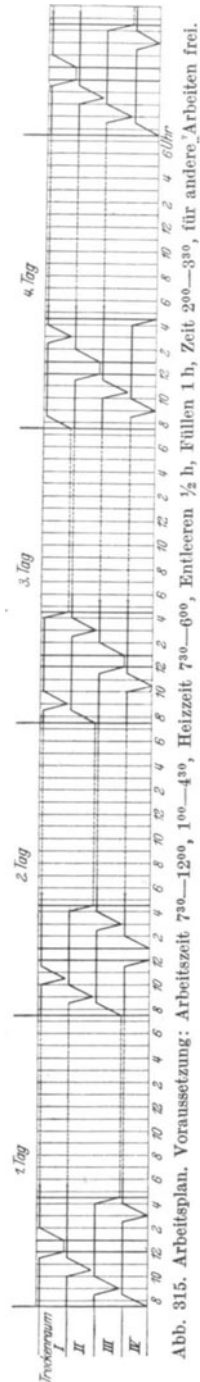


Abb. 315. Arbeitsplan. Voraussetzung: Arbeitszeit 730—1200, 100—430, 1 h, Füllen 1 h, Füllen 1/2 h, Entleeren 1/2 h, Zeit 200—390, für andere Arbeiten frei.

dem jenseits liegenden Ende zur weiteren Behandlung zu. Bei der Lacktrockenanlage für landwirtschaftliche Maschinenteile, Abb. 317 (Drying Systems), werden die gefüllten Wagen getaucht, durch die Kanäle geführt, nach der Trocknung entladen und leer den Füllstellen zugeführt, die in unmittelbarer Nähe der Tauchbecken liegen.

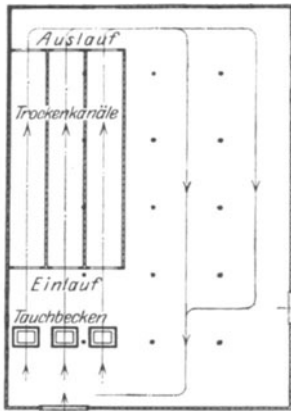


Abb. 317. Lacktrockenanlage (Drying Systems).

Bei der Trocknung von Massengut, wie Ziegelsteinen, ist es besonders wichtig, unnötige Wege zu vermeiden, Handarbeit einzuschränken und Verluste zu verhüten. Hieraus ergibt sich die Forderung, die Trockenanlage möglichst zwischen Presse und Ringofen einzuschalten. Die Absetzwagen laufen nach Abb. 318 (Keller) auf Schiebebühnen, die zur Querbewegung längs der Stirnseiten der Trockengänge dienen. Durch Niederdrücken eines Hebels erfolgt die Beladung, ebenso nach dem Einfahren in die Trockengänge das Senken der die Formlinge tragenden Rahmen auf die seitlich angebrachten Tragleisten. Die trockenen Formlinge werden durch die gleichen Absetzwagen ausgebracht, auf

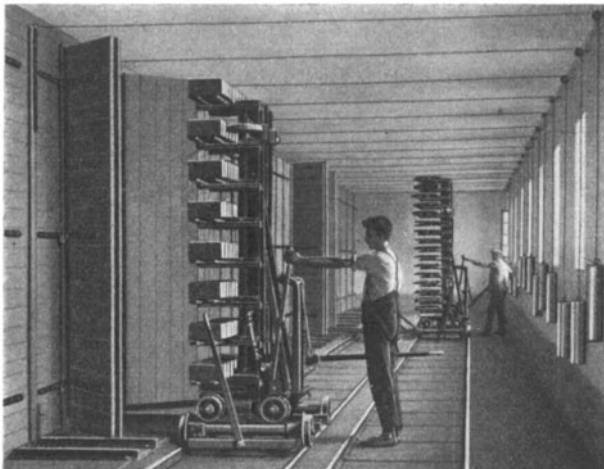


Abb. 318. Absetzwagen für Ziegelsteine (Keller).

einen Umlader niedergelassen und von diesem auf den niedrigen Ofenwagen übertragen. Der hier durchgeführte Grundsatz, das Bewegungsmittel außerhalb der Trockenvorrichtung zu halten, ergibt Ersparnis an Anschaffungskosten und Wärmeverbrauch. Er kehrt bei dem in Abb. 227 dargestellten Schranktrockner wieder, bei dem am Wagen und im Schrank gleich hohe Auflagen angeordnet sind.

Für Holztrockenanlagen zeigt Abb. 319 (National) zweckmäßige Einordnung in den Lagerraum. Bei der linken Darstellung sind die Hölzer quer, bei der rechten längs gestapelt. In beiden Fällen ist die Verwendung von langen Kanaltrocknern neben kürzeren Kammer- trocknern angenommen. Das grüne Holz lagert vor der Einbringseite, das getrocknete vor der Ausbringseite der Trockner. Das ganze Lager wird von einem Schienennetz durchzogen, das durch die Trockner hindurchgeführt und darüber hinaus verlängert ist, während Geleise

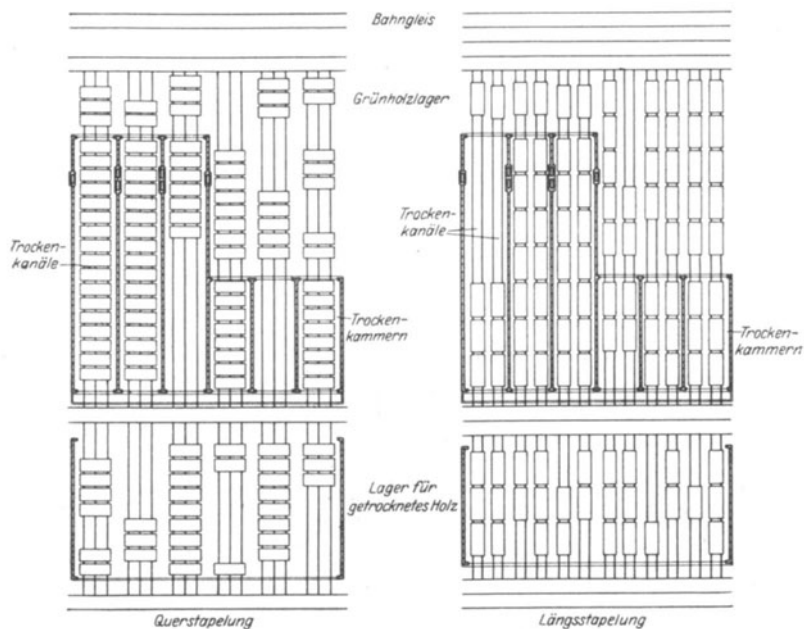


Abb. 319. Holzlager mit Trocknern (National).

an der Ausbringseite der Trockner und an den äußeren Enden des Lagers die Querverförderung ermöglichen.

Den bei der Kupplung der Trockenanlage mit dem übrigen Betrieb maßgebenden wärmewirtschaftlichen Fragen kommt eine Bedeutung zu, die nicht genug betont werden kann. Hauptgesichtspunkt bleibt, daß der Trockner Energie fast ausschließlich in Form von Wärme verlangt. Andererseits bedingt Vorbereitung und Nachbehandlung des Gutes, ebenso wie die meisten Trockner selbst, Aufwand mechanischer Arbeit. Es erwächst daher die Aufgabe, nach Möglichkeit die Kraft so zu erzeugen, daß dabei die benötigte Wärme als Abfallenergie entfällt. Dies ist dann möglich, wenn entwertete Wärme zur Durchführung des Trockenvorganges genügt und gleichzeitig der Arbeitsbedarf zahlenmäßig so hoch ist, daß er die Abfallwärme in ausreichender Menge zu liefern vermag.

Die Abstimmung der Verhältnisse bei Dampfanlagen ist Aufgabe des besonderen Falles. Entfällt Abwärme in ungenügendem Maße, so muß Verwendung für gesteigerte Kraftleistung gesucht werden, die alsdann

Abfallkraft darstellt. Ein großzügiges Beispiel hierfür bietet die Braunkohlentrocknung in Brikettwerken, die gleichzeitig als elektrische Lieferwerke ausgebildet sind. Ergibt sich Abfallwärme im Überschuß, so bietet Steigerung des Kesseldruckes ein Mittel, um den Dampfverbrauch der Kraftanlage herabzusetzen. Weitere Möglichkeiten für die Abstimmung der Wärme-Kraftverhältnisse ergeben sich durch Verwendung von Anzapfdampf aus der Kraftanlage und Veränderung ihres Gegendruckes.

Es ist selbstverständlich ein Fehler, wenn der „engste Querschnitt“ des Trockenbetriebes bei dem Trockenmittel liegt und die von dem Betriebe in jedem Augenblick geforderte höchste Trockenleistung deshalb nicht erzielt werden kann, weil alsdann z. B. Dampfmenge eintritt oder die Leistung der Lüfter nicht ausreicht. Aufspeicherung der angewandten Heizmittel, also vor allem Dampfspeicher, sind daher ein notwendiges Mittel, um Ausgleich in Betrieben zu schaffen, bei denen starke Schwankungen, sei es in der geforderten Trockenleistung, sei es in der verfügbaren Heizmittelmenge, auftreten. Fehlen sie, so muß notgedrungen die Zuführung des Gutes bei einem Heizmittelbedarf, der die verfügbare Menge überschreitet, sich so anpassen, daß der Trockenvorgang mit verringerter Geschwindigkeit weiterläuft. Die Schwierigkeiten, die sich hierbei für einen gleichmäßigen Güteerfolg beim getrockneten Gut ergeben, dürfen nicht unterschätzt werden.

Steigerung der Temperatur des Trockenmittels führt zu einer Verkleinerung der Trockenvorrichtung, bei Lufttrockenanlagen außerdem zu einer Verminderung der Luftmenge und in den meisten Fällen zu einer Erhöhung der den Trockenbetrieb allein angehenden Wirtschaftlichkeit. Bei verhältnismäßig großem Arbeitsverbrauch des Werkes können jedoch die Verhältnisse umgekehrt darauf hinweisen, möglichst niedrige Trockentemperaturen anzuwenden, um die Dampfenergie zu vor weitestgehend für Krafterzeugung auszunutzen.

Bei Trocknereien muß, wenn die Kraftversorgung durch Verbrennungskraftmaschinen erfolgt, in der Regel mit einem Mangel an Abfallwärme gerechnet werden. Bei Wasserkraftanlagen fehlt die Abwärme überhaupt. In solchen Fällen kommt, neben den üblichen Trockenverfahren mit möglichst hohen Trockentemperaturen, die Möglichkeit in Frage, durch Anwendung der kalten Trocknung einen Ausweg zu suchen. Sie ist dann am Platze, wenn die benötigte Kraft hierfür sich billiger stellt als die bei üblicher Arbeitsweise geforderte Wärme.

Die Verfolgung der Wege, auf denen Erfüllung der energiewirtschaftlichen Forderung zu suchen ist, muß dem bestimmten Falle überlassen bleiben. Sie ist für einzelne Gebiete in Sonderarbeiten, z. B. für die Papiertrocknung durch v. Laßberg¹ durchgeführt, außerdem für verschiedene Anwendungsgebiete bei Schneider² und Gerbel-Reutlinger³ zu finden.

¹ v. Laßberg: Die Wärmewirtschaft in der Zellstoff- und Papierindustrie. Berlin: Julius Springer 1926.

² Schneider: Die Abwärmeverwertung im Kraftmaschinenbetrieb. Berlin: Julius Springer 1923.

³ Gerbel-Reutlinger: Kraft- und Wärmewirtschaft in der Industrie. Berlin: Julius Springer 1930.

VIII. Betriebsregelung bei Trockenanlagen.

Zweckmäßige Führung des Trockenvorganges bedingt laufende Beobachtung des veränderlichen Zustandes von Trockenmittel und Gut. Als Beobachtungsmittel kommen in Frage:

1. Thermometer zur Feststellung der Temperaturen von Trockenmittel und Gut.

Bezüglich der maßgebenden Gesichtspunkte darf auf einschlägige Werke, u. a. Knoblauch-Hencky¹, verwiesen werden. Bei Luftthermometern ist Strahlungsschutz durch glänzenden Edelmetallbelag auf der Quecksilberkugel empfehlenswert. Für die Beobachtung der Guttemperatur ist die Thermometerkugel bei schaufelfähigem Gute in dieses einzubetten, bei flächenartigem Gute satt aufzulegen und an der freien Seite durch Wärmeschutzmittel abzudecken.

Für die Messung von Oberflächentemperaturen, die z. B. bei den dampfbeheizten Walzentrocknern von Bedeutung ist, werden neuerdings Thermolemente als Meßgeräte ausgebildet, bei denen ein aus Kupfer und Konstantan bestehender wirksamer Streifen beiderseits der Schweißstellen die Walzenfläche berührt. Ein nach Temperaturen geeichter Spannungsanzeiger ist mit dem Gerät unmittelbar verbunden.

2. Luftfeuchtmessers.

Haarfeuchtmessers stellen ein zuverlässiges Beobachtungsmittel dar, solange sie nicht hohen Temperaturen ausgesetzt sind. Auch bei Temperaturen unter 0° zeigen sie richtig. Häufige Prüfung des Sättigungspunktes ist allerdings erforderlich und die Einstellmöglichkeit stets vorzusehen.

Bei Temperaturen über etwa 180° sind Haarfeuchtmessers nicht mehr brauchbar. In solchen Fällen läßt sich die Luftfeuchtigkeit auf Umwegen durch Abkühlung der Luft und Umrechnung des alsdann in ihr gemessenen Luftfeuchtigkeitsgrades ermitteln. Das Verfahren ist nur anwendbar, wenn der Taupunkt der Luft bei der Abkühlung nicht unterschritten wird. Die Zeitdauer, die nötig ist, um den Gleichgewichtszustand zwischen Luft und Haarfeuchtmessers zu erreichen, wird häufig unterschätzt. Staubgehalt der Luft führt zu fehlerhafter Anzeige. Wie bei jedem hygroskopischen Körper ist auch bei dem Haar des Feuchtmessers die für die Anzeige maßgebende Feuchtigkeitsaufnahme in schwachem Grade von der Temperatur abhängig. Bei genauen Messungen ist dies zu beachten.

Ermittlung des Feuchtigkeitsgrades der Luft aus dem Unterschiede der Temperaturanzeige eines trockenen und feuchten Thermometers ist nur dann statthaft, wenn die Luftgeschwindigkeit gleich ist mit der, für die die herangezogenen Tafeln berechnet sind. (Die vom Staatl. Preuß. Meteorologischen Institut ausgearbeiteten Psychrometertafeln gelten z. B. für Messung des Temperaturunterschiedes mittels des Assmannschen Aspirationspsychrometers.) Wegen der Berichtigung

¹ Knoblauch-Hencky: Anleitung zu genauen technischen Temperaturmessungen. München-Berlin 1926.

bei verschiedenen Luftgeschwindigkeiten vgl. Abb. 20. Es ist auffallend, wie wenige der eingebauten Psychrometer in Wirklichkeit gebrauchsfähig bleiben. Die Ursache des Versagens liegt meist darin, daß kein destilliertes Wasser verwendet wird, die Hülle verstaubt und zu selten erneuert wird.

Feuchtigkeitsmessungen bei Temperaturen in der Nähe des Eispunktes können bei Anwendung der kalten Trocknung in Betracht kommen. Alsdann ist zu berücksichtigen, daß, sobald die Sättigungsspannung der Luft den über Eis gemessenen Wert erreicht, die Feuchtigkeitsabgabe des als gefroren anzunehmenden Gutes aufhört. Für Beurteilung des Trockenvermögens sind daher bei Lufttemperaturen unter dem Eispunkte die über Eis gemessenen Werte der Sättigungsspannung nach Abb. 320 zugrunde zu legen und nicht, wie dies bei den Psychrometertafeln geschieht, die über Wasser gemessenen Zahlen zu verwenden. Während diese z. B. bei einer für trockenes und feuchtes Thermometer gleichen Temperatur von -10° einen Feuchtigkeitsgrad 0,91 angeben (und hierbei von der Erwägung ausgehen, daß auf -10° unterkühltes

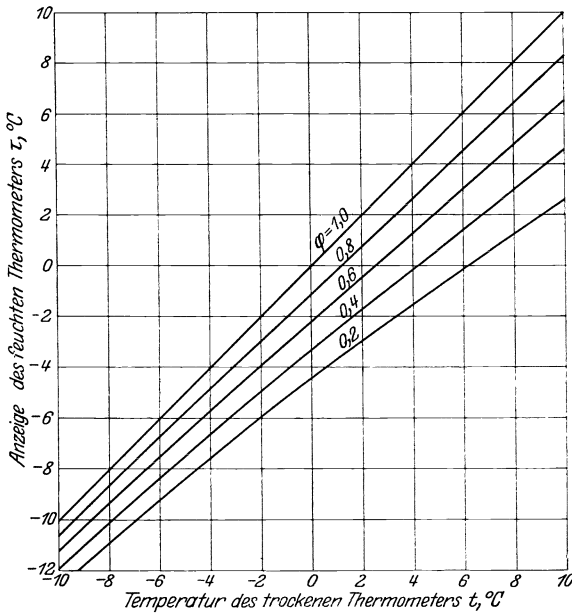


Abb. 320. Ermittlung des Luftfeuchtigkeitsgrades φ aus der Anzeige des trockenen und feuchten Thermometers in der Nähe des Eispunktes.

Wasser noch eine Feuchtigkeitsabgabe ermöglicht), liefert Abb. 320 für gleiche Anzeige von trockenem und feuchtem Thermometer den Feuchtigkeitsgrad 1. Mit der Annahme, daß von der Wirkung unterkühlter Wasserflächen abgesehen werden darf, erscheint es richtig, Abb. 320 auch für die Beurteilung des Feuchtigkeitsgrades der Außenluft zugrunde zu legen.

Die Ermittlung der Kühlgrenze und damit des Feuchtigkeitsgrades der Luft wird unter Verwendung eines Wasserthermometers möglich, wenn nach Abb. 321 (D.R.P. 502589) ein fein verteilter Wasserstrom so innig und so oft mit der zu messenden Luft in Berührung gebracht wird, daß die Temperatur des Wassers der Kühlgrenze entspricht. Bei der dargestellten Ausführung dient eine kleine Wasserpumpe zum ständigen Umlauf. Die Verteilung erfolgt durch eine Düse. Der kegel-

teilung des Trockenvermögens sind daher bei Lufttemperaturen unter dem Eispunkte die über Eis gemessenen Werte der Sättigungsspannung nach Abb. 320 zugrunde zu legen und nicht, wie dies bei den Psychrometertafeln geschieht, die über Wasser gemessenen Zahlen zu verwenden. Während diese z. B. bei einer für trockenes und feuchtes Thermometer gleichen Temperatur von -10° einen Feuchtigkeitsgrad 0,91 angeben (und hierbei von der Erwägung ausgehen, daß auf -10° unterkühltes

förmige Wasserstrahl saugt gleichzeitig die Luft an. Hierbei entfallen die beim üblichen feuchten Thermometer angewandten Stoffhüllen und damit die durch allmähliche Abnahme ihrer Saugfähigkeit entstehenden Störungen.

Nach dem Verfahren von Felten & Guilleaume¹ wird eine bestimmte Menge des Luft-Dampfgemisches in ein abschließendes Gefäß gesaugt, durch einen hygroskopischen Stoff, z. B. Phosphor-Pentoxyd, getrocknet und aus der Druckabnahme der Luftfeuchtigkeitsgehalt bestimmt. Auch die Ermittlung des Taupunktes der Luft vermittelt Taupunktspiegel bietet die Möglichkeit, ihren Feuchtigkeitsgehalt festzustellen. Hierbei ist es nötig, die Metallfläche langsam abzukühlen, damit der Niederschlag deutlich erkennbar wird, ehe die Temperatur unter die dem Taupunkt entsprechende Lage sinkt. Das gleiche gilt für das umgekehrte Verfahren, bei dem das Verschwinden des Niederschlags beobachtet wird. Erfolgt die Erwärmung rasch, so hängt es ganz von der Menge der niedergeschlagenen Flüssigkeit und der Luftbewegung ab, um wieviel verspätet der Niederschlag vollständig verschwindet.

Eine zusammenfassende Darstellung der gebräuchlichen Verfahren zur Messung der Luftfeuchtigkeit findet sich bei Bongards².

3. Luftmengenmesser.

Diese kommen vor allem in Frage, wenn Mischluft in wechselndem Verhältnis aus Frischluft und rückgesaugter Luft gebildet werden soll. Ändern sich die Durchgangsquerschnitte in den Kanälen nicht, so genügen Differenzzugmesser, die ein Ablesen der Luftgeschwindigkeit ermöglichen und sich daher bei festliegenden Querschnitten für Ablesen der Luftmengen eignen lassen. Wird die gesamte Luftmenge von einem Lüfter verarbeitet, so kann dessen Leistung für wechselnde Widerstandshöhen durch Versuch ein- für allemal festgestellt und im Betriebe aus der Beobachtung der Widerstandsdrücke allein auf die Gesamtluftmenge geschlossen werden.

4. Trockenkraftmesser.

Wird das feuchte Thermometer in den Luftstrom der Trockenvorrichtung gebracht, so stellt es sich auf die Kühlgrenztemperatur des feuchten Gutes ein. Seine Anzeige, verglichen mit der am trockenen Thermometer abgelesenen Temperatur, gibt einen Anhaltspunkt für die Trockenkraft der Luft. Eine Berichtigung im Sinne der Abb. 20 darf hierbei nicht vorgenommen werden, da ja mit erhöhter Luftgeschwindigkeit die Trockenkraft zunimmt, genau wie der Temperaturunterschied zwischen feuchtem und trockenem Thermometer.

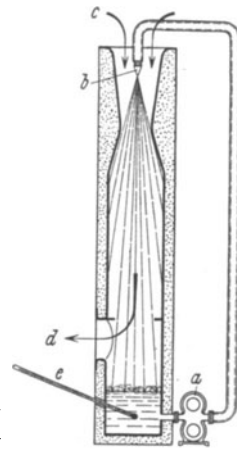


Abb. 321.
Kühlgrenzmeßvorrichtung.
a Umlaufpumpe, b Streudüse, c Luftereintritt, d Luftaustritt, e Wasserthermometer.

¹ Vogel: Prüfverfahren für Trockenprozesse. Z. f. techn. Phys. 1925.

² Bongards: Feuchtigkeitsmessung. München-Berlin 1926.

Dem Bedürfnis nach einem Beobachtungsmittel, um die Trockenkraft unmittelbar festzustellen, könnte durch die in Abb. 322 wieder-gegebene Einrichtung entsprochen werden, wenn als absolute Trockenkraft das Maß verstanden wird, das gegenüber Wasser von der Temperatur der Kühlgrenze verbleibt. Ein über einen Glasstab gezogener Docht saugt sich aus einem doppelmanteligen Glasgefäß feucht. Dieses ist mit

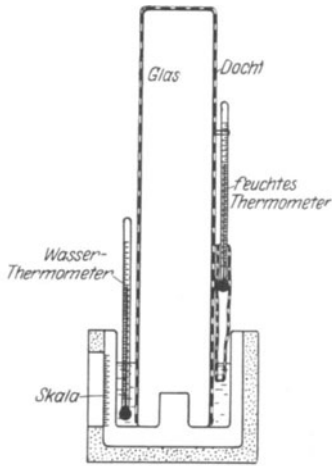


Abb. 322. Trockenkraftmesser.

einer Skala versehen. Wird der Docht mit bestimmtem Flächenmaß gewählt, so ergibt die Zeit, innerhalb der bei Einbringen in den Luftstrom der Wasserspiegel zwischen zwei Punkten der Skala sinkt, ein Maß der absoluten Trockenkraft. Ein in dem Wasserbecken befindliches Thermometer ermöglicht die Feststellung, daß das Wasser die der Kühlgrenze entsprechende Temperatur besitzt, die durch das zweite feuchte Thermometer angezeigt wird. Unter relativer Trockenkraft kann das Maß verstanden werden, das gegenüber Gut von einem bestimmten Zustand verbleibt. Hierfür läßt sich eine Vorrichtung bauen, bestehend aus einer Feinwaage, die auf der einen Seite Gut von dem zu untersuchenden Zustande in bestimmtem Ausmaß, z. B. Würfel von bestimmter Kanten-

Gegenseite ein bestimmtes Untergewicht besteht, auf der anderen Seite ein bestimmtes Untergewicht. Wird auf der Gegenseite ein bestimmtes Untergewicht angebracht, so gibt die Zeit bis zum Ausschlag der in den Luftstrom gebrachten Waage ein Maß der relativen Trockenkraft.

5. Luftriichtungsmesser.

Je kleiner die Luftgeschwindigkeit in dem Trockenraum ist, um so wichtiger erscheint es, die Gleichmäßigkeit der Luftverteilung zu

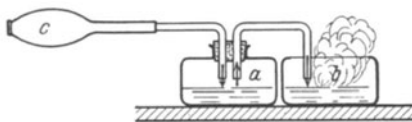


Abb. 323. Raucherzeuger.
a Salzsäure, b Ammoniaklösung, c Luftpumpe.

prüfen, tote Ecken und störende Nebenströmungen festzustellen. Hierzu dienen einfache Richtungsanzeiger aus einseitig befestigten Fäden, Papier-, Stoffstreifen u. dgl., bei den geringen Geschwindigkeiten des natürlichen Luftumlaufes jedoch besser Raucherzeuger. Sie bestehen nach Abb. 323 aus je einem Gefäß mit Salzsäure und wässriger Ammoniaklösung und einer Blasvorrichtung, durch die Salzsäure- und Ammoniakdämpfe gemischt und der entstehende weiße Rauch in den Trockenraum geführt wird.

Über der Beobachtung des Trockenmittels darf selbstverständlich die ständige Prüfung des Gutes nicht vergessen werden. Sie ist bei Kammern, Schränken und offenen Walzentrocknern leicht möglich, schwieriger jedoch bei Trommel- und Kanaltrocknern und ganz besonders bei Vakuumtrocknern. Als Maßnahmen, die in den letzten Fällen die Be-

trachtung des natürlichen Luftumlaufes jedoch besser Raucherzeuger. Sie bestehen nach Abb. 323 aus je einem Gefäß mit Salzsäure und wässriger Ammoniaklösung und einer Blasvorrichtung, durch die Salzsäure- und Ammoniakdämpfe gemischt und der entstehende weiße Rauch in den Trockenraum geführt wird.

obachtung ermöglichen, kommen Türen, Klappen, Fenster, bei Vakuumtrocknern Probenehmer mit Luftschleusen, in Frage.

6. Vorrichtungen zur Messung des Feuchtigkeitsgehalts des Trockengutes.

Jede Bestimmung des im Trockengut enthaltenen Feuchtigkeitsgehalts ist nur relativ richtig, da je nach dem Verfahren die in verschiedener Bindungsform auftretenden Feuchtigkeitsanteile mehr oder

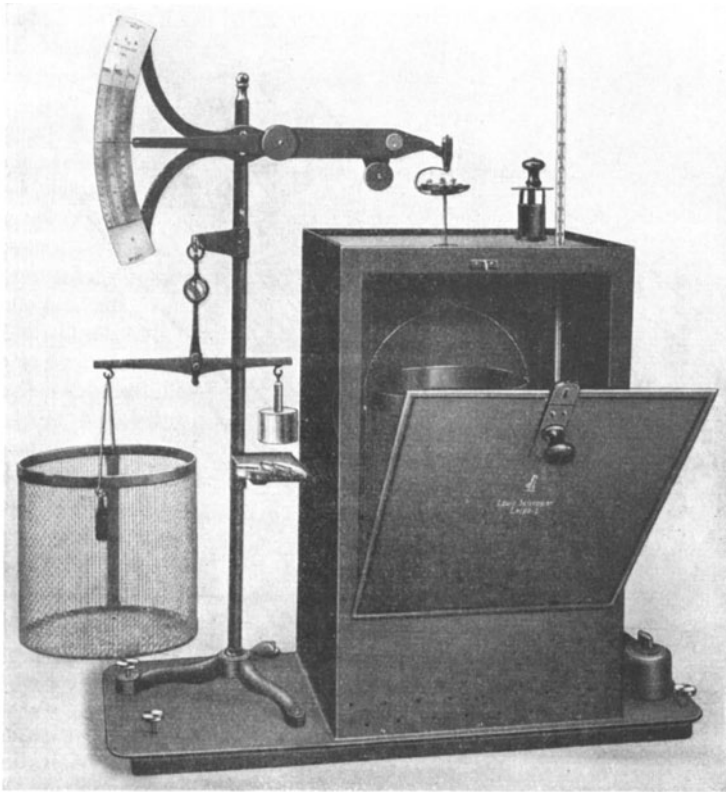


Abb. 324. Trockenstoffmeßvorrichtung Schopper).

weniger gemessen werden. Grundsätzlich bestehen zwei Möglichkeiten:

a) Unmittelbare Messung des Trockenstoffs oder des Feuchtigkeitsanteils nach Trennung beider.

b) Ableitung des Feuchtigkeitsgehalts aus dem bekannten Zusammenhang zwischen diesem und einer anderen, leicht feststellbaren physikalischen Eigenschaft. Der Feuchtigkeitsgehalt des Gutes erfährt hierbei keine Veränderung. Diese mittelbaren Verfahren setzen eine Eichkurve voraus, in der γ die eine, die wechselnde physikalische Größe die andere Veränderliche darstellen. Um sie anzuwenden, bedarf es daher stets einer Ermittlung des Feuchtigkeitsgehalts auf dem un-

mittelbaren Wege nach a. Hieraus ergibt sich, daß mittelbare Verfahren nie genauer sein können als die unmittelbare Beobachtung, auf der sie aufgebaut sind. Ihre Bedeutung liegt vorzugsweise in der Vereinfachung und Abkürzung der Messung.

Zu a) Trockenofen. Zur Feststellung des Feuchtigkeitsgehalts ist es nötig, Temperaturen über 100° anzuwenden, um restloses Abdampfen des Wassergehaltes zu sichern. Das Verfahren ist in der einfachen Ausführungsform einer durch Gas, Dampf, Benzin oder elektrisch beheizten, gegen Eindringen von falscher Luft geschützten Kammer

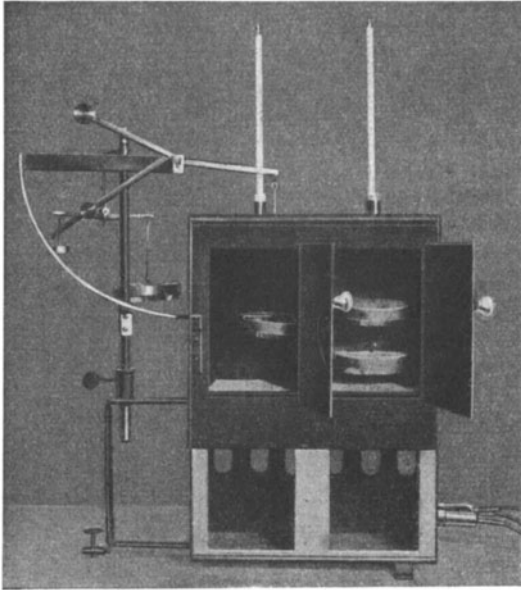


Abb. 325. Trockenstoffmeßvorrichtung mit Vortrockenkammer (Korant).

nur dann brauchbar, wenn nicht zu befürchten steht, daß neben dem Wasser flüchtige Bestandteile entweichen. Entspricht die angewandte Temperatur der bei der wirklichen Trocknung im großen herrschenden, so ermöglicht die Aufhängung an einem Wiegebalken nach Abbildung 324 (Schopper) Bestimmung des Trockenstoffgehaltes z. B. von Seide, Wolle, Baumwolle, Webstoffen, Papier und Zellstoff unter laufender Beobachtung der Wasserverdampfung und damit einen gewissen Rückschluß auf den Verlauf des wirklichen

Trockenvorganges. Bei der Korantschen Waage befindet sich die für eine größere Probe geeignete Waagschale im Trockenraum selbst. Skala und Zeiger liegen außerhalb und ermöglichen unmittelbare Ablesung der Gewichtsänderung. Bei einer anderen Ausführungsform steht die ganze Waage innerhalb, die Beobachtung erfolgt durch ein in der Trocknerwand befindliches Fenster.

Bei empfindlichem Gut, z. B. Getreide, Mehl, empfiehlt es sich, die Einwirkung der hohen Temperaturen abzukürzen. Zu diesem Zwecke wird nach Abb. 325 (Korant) die Prüfvorrichtung geteilt, in eine Vortrockenkammer, in der der größte Teil des Wassergehaltes bei niedriger Temperatur aufgetrocknet wird und eine Fertigtrockenkammer, in der die restliche Feuchtigkeit entzogen wird. Hierbei hängt die Probe an der einen Seite einer Waage, deren Ausschlag die fortschreitende Trocknung und, nach dem schließlichen Stand des Zeigers, den ursprüng-

lichen Feuchtigkeitsgehalt unmittelbar abzulesen gestattet. Die Vortrocknung kann durch Luft erfolgen.

Bei Anwendung einer Temperatur von etwa 105° im Trockenschrank kommt die nicht chemisch gebundene Feuchtigkeit zu restloser Verdampfung, soweit sie reines Wasser darstellt. Sind in dem Wasser Feststoffe gelöst, so hängt der über 100° liegende Siedepunkt der Lösung von der Art des gelösten Stoffes und Stärke der Lösung ab. In solchen Fällen ist daher eine Steigerung der Temperatur im Trockenschrank über den Siedepunkt der Lösung hinaus zu fordern, damit die Feststellung den wirklichen Wassergehalt ergibt.

Bei bestimmten Untersuchungen, z. B. Feststellung des Wassergehaltes in Quark, wird dem zu prüfenden Stoff nach Teuchert¹ eine bestimmte Menge wasserfreien Fettes beigegeben und die Mischung solange erhitzt, bis der sich bildende Schaum einfällt, Knistern des ausgetriebenen Wassers aufhört und der Bodensatz sich zu bräunen beginnt. Die Beimischung des Fettes ermöglicht Anwendung höherer Temperaturen. Eine derartige Vorrichtung, wie sie in Abb. 326 (Funke) für elektrische Heizung dargestellt ist, kann sich auch für eine weitergehende allgemeine Anwendung empfehlen, da bei ihr Temperaturen weit über 100° zulässig sind, ohne daß ein falsches Ergebnis durch teilweises Verkohlen von Feststoffen zu befürchten wäre.

Vakuumtrockenschrank. Unter Umgehung hoher Temperaturen ist vollständige Trocknung im Prüfschrank zu erreichen, wenn er als Vakuumtrockner ausgebildet wird. Die Wärmeübertragung an die Probe erfolgt hierbei zweckmäßig nach Abb. 327 (Heraeus) durch die als Heizplatte ausgebildete Einlage unter Sicherung gegen Temperaturüberschreitung durch elektrische Regelung. Zur Entlüftung des Schrankes dient eine Wasserstrahlluftpumpe. Einen Schritt weiter geht das Gaede-Straub²sche Verfahren. Das in der Regel flüssige

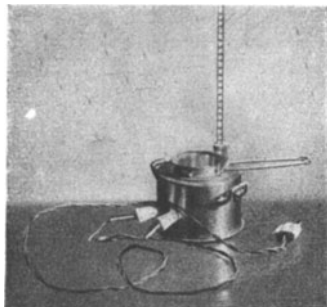


Abb. 326. Trockenstoffmeßvorrichtung (Funke).

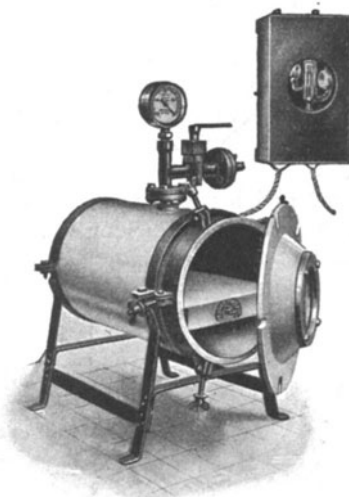


Abb. 327. Vakuumtrockenschrank (Heraeus).

¹ Teuchert: Methoden zur Untersuchung von Milch und Molkereiprodukten.

² Gaede-Straub: Ein Laboratoriumsapparat zur schonenden Schnelltrocknung leicht zersetzlicher Lösungen. Biochem. Zeitschr. 1925.

Gut wird durch eine Flüssigkeit erwärmt und der entstehende Dampf durch Schwefelsäure in einem Kühlgefäß absorbiert. Die ganze Vorrichtung steht unter Luftleere. Die Flüssigkeit trifft in Form kleiner Tropfen gegen die erwärmten Wände des Trockners, wobei der Gehalt an Wasser und flüchtigen Stoffen rasch und bei niedriger Temperatur verdampft. (Durch die hiermit verbundene Schonung des Gutes wird die Vorrichtung geeignet zur Trocknung kleiner Mengen besonders empfindlicher Stoffe. Beispielsweise läßt sich Pyrogallolalkali unzersetzt trocknen, Hefepreßsaft erhält seine Zymase wirksam, Milch ist nach Monaten noch gerinnungsfähig und gibt die Schardinger-Reaktion wie Frischmilch, das zur Wassermann-Reaktion nötige Komplement des Meerschweinchen-Serums bleibt bis zu einem Jahr haltbar.)

Destillation. In anderen Fällen, in denen damit zu rechnen ist, daß neben den Wasserdämpfen flüchtige Bestandteile entweichen, können die Mischbrüden in einen Oberflächenkondensator geleitet und der Niederschlag auf seinen Gehalt an reinem Wasser untersucht werden. Die Feststellung des Wassergehalts von Braunkohle bei 105° im Luftstrom liefert unbrauchbare Zahlen. Genaue Ermittlung ist durch Destillation mit Xylol möglich, die sich auch für Steinkohle besser eignet als der Trockenofen. Nach Kingman¹ kann der Wassergehalt flüssigen Leims durch Destillation mit Tetrachloräthan festgestellt werden. Für die Messung des Feuchtigkeitsgehalts von Leder bewährt sich nach den Untersuchungen von Clarke² Überdestillieren mit Toluol.

Mischverfahren. Nach Dolch-Pöchmüller-David³ läßt sich bei Stoffen, die in Alkohol unlöslich sind, der Feuchtigkeitsgehalt durch Übergießen mit Alkohol ermitteln. Nach Erreichung des Gleichgewichtszustandes wird eine Probe des gebildeten Alkohol-Wassergemisches zu einer gleichen Menge Petroleum gefügt und der Wassergehalt des Alkohols aus der Höhe der Entmischungstemperatur festgestellt. Hieraus errechnet sich der Feuchtigkeitsgehalt des untersuchten Stoffes.

Chemisches Verfahren. Wird das feuchte Gut mit Kalziumkarbid zusammengebracht, so entwickelt sich unter Bindung des Wassers Azetylen, dessen Menge einen Rückschluß auf den Feuchtigkeitsgehalt der Probe liefert.

Zu b) Raumgewicht. Nimmt das Gut beim Eintauchen kein Wasser auf, so läßt sich aus dem Auftrieb einer bestimmten Gewichtsmenge das Raumgewicht festlegen, das für gleichartige Stoffe in einem bestimmten Zusammenhang mit dem Feuchtigkeitsgehalt steht: In dieser Weise wird z. B. der Stärkegehalt von Kartoffeln durch eine Tauch- und Wiegevorrichtung ermittelt. Anhaftende Schmutzteile sind selbstverständlich zuvor durch Waschung zu entfernen.

¹ Kingman: Determination of water content of liquid glue. J. Ind. Engg. Chem. 1926.

² Clarke: The determination of moisture in tannery materials. J. Am. Leather C. A. 1926.

³ Dolch-Pöchmüller-David: Genaue Schnellbestimmung von Feuchtigkeitswasser in technischen Erzeugnissen. Chem. Apparatur 1929.

Hygroskopisches Verhalten. Für ein bestimmtes hygroskopisches Gut besteht im Gleichgewichtszustand mit der umgebenden Luft zwischen dem Feuchtigkeitsgehalt χ und dem Feuchtigkeitsgrad $\varphi = \frac{p}{P''}$ ein bestimmter Zusammenhang, wie ihn das $\frac{p}{P''}$ - χ -Bild wiedergibt. Ist dieses bekannt, so läuft die Feststellung von χ auf die Messung von φ hinaus. Das für das hygroskopische Verhalten kennzeichnende $\frac{p}{P''}$ - χ -Bild kann vermittels der in Abb. 328 dargestellten Vorrichtung gefunden werden. Ein luftdichter Behälter nimmt eine möglichst lose ausgebreitete Probe des zu untersuchenden Guts und einen Haarfeuchtigkeitsmesser auf, dessen Beobachtung von außen möglich ist. Die Temperatur innerhalb des Behälters muß mit der der Umgebung übereinstimmen. Um dies zu prüfen, sind innerhalb und außerhalb des Behälters Thermometer angebracht. Die Zeit, nach der sich der Gleichgewichtszustand einstellt, ist verschieden, je nachdem der Zustand der Luft über dem Gut im Augenblick des Ver-

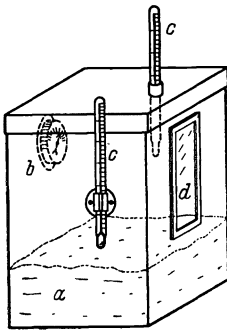


Abb. 328. Vorrichtung zur Ermittlung der hygroskopischen Eigenschaft. a Trockengut, b Feuchtigkeitsmesser, c Thermometer, d Beobachtungsfenster.

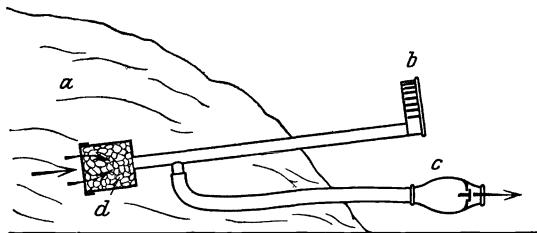


Abb. 329. Vorrichtung zur Ermittlung der hygroskopischen Eigenschaft. a Trockengut, b Feuchtigkeitsmesser, c Luftpumpe, d Luftfilter.

schließens des Behälters dem Gleichgewichtszustand mehr oder weniger entspricht. In der Regel genügt es, die Beobachtung für einen besonders niedrigen, einen mittleren und einen hohen Wert von χ durchzuführen, der nahe dem hygroskopischen Punkt liegt, jedoch diesen nicht überschreitet. Hierbei ergibt sich gleichzeitig die Lage des hygroskopischen Punktes selbst. Für die Anwendung dieses Verfahrens zur Feststellung des Feuchtigkeitsgehalts im Gut in den einzelnen Abschnitten des Trockenvorganges erhält der Feuchtigkeitsmesser eine Schaftverlängerung, dessen Ende den Fühlkörper trägt und bei schaufelförmigem Gut unmittelbar in dieses eingeführt wird. Das unerwünschte Verstauben des Fühlkörpers, das zu fehlerhaften Anzeigen führt, läßt sich nach Abb. 329 dadurch vermeiden, daß die Öffnung, durch die die Luft aus dem Gut zu dem Fühlkörper dringt, durch einen Filter verschlossen und zur Beschleunigung des Gleichgewichtszustandes die Luft vermittels eines mit Rückschlagventil versehenen Gummiballs über den Fühlkörper weggesaugt wird. Bei anders gestaltetem, z. B. flächenförmigem Gut kann gleichfalls ein Schaftfeuchtigkeitsmesser Verwendung finden, bei dem alsdann der Einfluß der Umgebung durch eine luftdichte Hülle, die sich

über das Fühlkörperende legt, auszuschalten ist. Die Anzeige des Feuchtigkeitsmessers gibt, neben der Feststellung des χ -Wertes, die Möglichkeit, durch Vergleich mit einem im Trockenraum an der Entnahmestelle der Probe sitzenden zweiten Feuchtigkeitsmesser den wechselnden Wert der Trockenkraft zu beurteilen und gegebenenfalls die Führung des Trockenvorgangs rechtzeitig zu verändern. Wenn auch hierbei in der Regel der erst nach einigen Stunden eintretende Gleichgewichtszustand nicht abgewartet werden kann, so besitzt das Verfahren gleichwohl praktischen Wert, der bisher kaum erkannt und nur selten ausgenutzt wurde. Daß der ermittelte Feuchtigkeitsgehalt χ bei der notwendigen Ablesung vor Erreichung des Gleichgewichtszustandes nicht dem mittleren Wert, sondern eher dem Zustand der Oberfläche entspricht, stellt in vielen Fällen einen Vorteil dar, weil eine unzulässige Übertrocknung sich rechtzeitig erkennen und vermeiden läßt.

Lichtbrechung. Die Bestimmung des Feuchtigkeitsgehalts von Lösungen ist durch Beobachtung der Lichtbrechung mittels Refraktometers möglich. Es findet bisher Anwendung bei Zuckerlösungen und ist besonders wertvoll in der Ausführung als Betriebsrefraktometer (Zeiß), wobei es unmittelbar an dem die Lösung enthaltenden Gefäß angebracht und zur ständigen Beobachtung des Feuchtigkeitsgehalts ohne Probeentnahme benutzt werden kann.

Dielektrizitätskonstante. Berliner und Rüter vom Frankfurter Forschungsinstitut für Getreidechemie haben für Bestimmung des Feuchtigkeitsgehalts von Getreide und ähnlichen Stoffen ein Verfahren entwickelt, das auf Messung der dielektrischen Eigenschaften beruht. Die Dielektrizitätskonstante von Wasser ist um ein Vielfaches größer als die der hauptsächlichlichen Feststoffteile, so daß mit Veränderung des Wassergehalts eine starke und leicht meßbare Veränderung der Dielektrizitätskonstante einhergeht. Die von Berliner und Rüter entworfene Vorrichtung besteht aus einem Meßkondensator, der mit dem zu untersuchenden Stoff in bestimmter Weise gefüllt wird, und einer Vorrichtung zur Messung der Kapazitätsveränderung. Aus einer für den bestimmten Stoff gültigen Eichkurve kann zu dem gefundenen Wert der Dielektrizitätskonstante der Wassergehalt abgelesen werden. Das Verfahren ist vor allem für Feststellung der χ -Werte innerhalb der hyroskopischen Grenzen brauchbar.

Wärmeleitvermögen. Mit zunehmendem Feuchtigkeitsgehalt nimmt das Wärmeleitvermögen in der Regel zu. Auf dieser Eigenschaft beruht die z. B. bei der Braunkohlentrocknung noch übliche Beurteilung des Trockengutes nach dem Tastgefühl.

Spezifische Wärme. Je mehr sich die spezifische Wärme des Trockenstoffgehalts von der des Wassers unterscheidet, um so genauer läßt sich durch Messung der spezifischen Wärme des Gutes sein Feuchtigkeitsgehalt ermitteln.

Wärmetönung. Wird das feuchte Gut mit wasserfreier Schwefelsäure gemischt, so entsteht Wärme, deren Betrag einen Rückschluß auf den Feuchtigkeitsgehalt ermöglicht.

Wird der Feuchtigkeitsgehalt des Gutes im Anfangs- und End-

zustande gemessen, um bei einem Versuch die verdampfte Wassermenge zu ermitteln, so müssen die Proben nicht nur dem gesamten Durchschnitt entsprechen, sondern auch am Ende des Trockners um die Durchlaufzeit später entnommen werden, als am Eingange. Der Feuchtigkeitsgehalt des getrockneten Gutes ist in seinen einzelnen Teilen im allgemeinen verschiedener als der des Naßgutes, weil bei diesem durch die vorausgehende Lagerung die Möglichkeit zum Feuchtigkeitsausgleich gegeben war, während sie beim getrockneten Gute sich erst bei der nachfolgenden Lagerung ergibt.

7. Trockenversuche am verkleinerten Modell.

Die zur unmittelbaren Messung des Feuchtigkeitsgehalts bestimmten Trockenvorrichtungen können als Versuchstrockner benutzt werden, um ein bestimmtes Trockenverfahren zu entwickeln und zu prüfen. Hierbei ist es nötig, Menge, Temperatur und Geschwindigkeit der als Trockenmittel auftretenden Luft zu regeln.

Die Prüfung eines Trockenverfahrens am verkleinerten Modell ist mit äußerster Vorsicht zu bewerten. Geometrische Ähnlichkeit zwischen Versuchstrockner und tatsächlicher Ausführung ergibt bei der letzten günstigere Verhältnisse, als sie bei dem Modellversuch im kleinen vorliegen. Ein Kammertrockner von $3 \times 3 \times 3$ m faßt z. B. das 27fache eines Modellrockners von $1 \times 1 \times 1$ m, verlangt daher bei gleichen Anfangs- und Endverhältnissen die 27fache Luftmenge. Der für die Luft in Betracht kommende Durchgangsquerschnitt beträgt das $3 \times 3 = 9$ fache des beim Modellrockner auftretenden, die Geschwindigkeit ist also bei der tatsächlichen Ausführung $27 : 9 = 3$ mal so groß, die Trockenzeit daher kürzer als bei dem Versuch im kleinen. Das Ergebnis stimmt in beiden Fällen nur dann überein, wenn der Versuchstrockner mit $1 \times 1 \times 3$ m bemessen wird, wobei die mit der wirklichen Ausführung übereinstimmende Abmessung von 3 m in Richtung der Luftbewegung gemessen ist. In diesem Falle sind für die tatsächliche Ausführung Inhalt, Luftmenge und Luftquerschnitt alle 9mal so groß wie bei dem Versuchstrockner, die Geschwindigkeit daher in beiden Fällen gleich. Ähnlich liegen die Verhältnisse bei einem längsdurchströmten Kanaltrockner. Besitzt dieser in der wirklichen Ausführung $3 \times 3 \times 30$ m, im Modell $1 \times 1 \times 10$ m, so wird für die tatsächliche Ausführung der Inhalt 27mal, der Querschnitt 9mal, bei 27facher Luftmenge daher die Geschwindigkeit 3mal so groß wie bei dem Versuchstrockner. Übertragbarkeit wird auch hier nur dann möglich, wenn der Versuchstrockner, der tatsächlichen Ausführung entsprechend, mit 30 m Länge bemessen wird. Nur in seltenen Fällen wird es möglich sein, dem Versuchstrockner das hiernach gebotene Ausmaß in Richtung der Luftbewegung zu geben. Die Beobachtungen am Versuchstrockner lassen sich daher für die tatsächliche Ausführung in der Regel nur unter Berechnung oder Schätzung der durch höhere Geschwindigkeit bedingten Änderung übertragen. Gegen diesen Gesichtspunkt wird in der Praxis häufig gefehlt. Ein ähnlicher Irrtum liegt darin, daß die erforderliche Länge eines Kanaltrockners zuweilen aus dem Abstand vom Eintritt ermittelt wird, bis zu dem im Versuchstrockner der gewünschte Endfeuchtigkeitsgehalt des Trocken-

gutes erreicht ist. Dies ist bei Gleichstromtrocknung nur dann zulässig, wenn der an dieser Stelle beobachtete Endzustand der Luft den wirtschaftlichen Forderungen entspricht. Bei Gegenstromtrocknung werden die Verhältnisse noch verwickelter, weil die Abkürzung des so ausgeführten Trockners gegenüber dem Versuchstrockner den Zustand der Luft im ganzen Verlauf verändert.

8. Betriebsanweisung.

Häufig muß die Bedienung auch dafür sorgen, daß die Trocknung sich gleichmäßig auf alle Teile des Gutes erstreckt. Dies ist um so mehr der Fall, je verschiedener die einzelnen Teile des Gutes nach Art und Größe sind und je weniger sie sich zu einheitlicher Verarbeitung eignen. Hierbei sind Eingriffe nötig, um rascher trocknendes Gut zu entfernen und vor Übertrocknung zu schützen, während langsamer trocknende Ware noch weiter im Trockenraum verbleibt. Der wirtschaftlich arbeitende Großbetrieb wird solche Fälle, bei denen der Erfolg in hohem Maße von der Aufmerksamkeit der Bedienung abhängig ist, ausschließen und durch Sortierung des Gutes vor der Trocknung und getrennte Behandlung von Gut verschiedener Beschaffenheit die Anwendung ununterbrochener Arbeitsweise erzwingen. Aber auch dann erwächst für die Bedienung noch die wichtige Aufgabe, den Trockenvorgang, der, abgesehen von Verdampfanlagen und Arbeiten in geschlossenem Kreislauf, stets von der wechselnden Witterung abhängig bleibt, richtig zu leiten. Hierzu ist es nötig, daß ihr für jeden möglichen Zustand der Außenluft eine Anweisung zur Verfügung gestellt wird, in der alle für den Trockenerfolg maßgebenden Grundlagen enthalten sind. Als solche kommen in Betracht: Temperatur des Heizmittels, wie Vorwärmtemperatur der Luft bei reinen Lufttrockenanlagen, Dampfspannung bei Anwendung beheizter Flächen, Menge der zugeführten Frischluft und der kreisenden Umluft. Es ist kaum zweckmäßig, die Angaben hierfür nur von der Beschaffenheit der Außenluft abhängen zu lassen und richtiger, bei Trocknern mit Beharrungszustand die Beobachtung der Abluft, bei Vorrichtungen mit wechselndem Trockenbild den Feuchtigkeitsgehalt des Gutes hierfür maßgebend zu machen.

9. Selbsttätige Regelung.

Es liegt nahe, die Regelung der Trocknung selbsttätigen Vorrichtungen zu übertragen. Für ihre Beeinflussung kann das Trockenmittel vor seinem Auftreffen auf das Gut benützt werden. Die Regelvorschriften laufen alsdann darauf hinaus, bei Lufterhitzern die Vorwärmtemperatur, bei beheizten Flächen Menge und Temperatur (bei Dampf Spannung) des Heizmittels auf gleicher Höhe zu halten. Eine solche Regelung ist selbstverständlich recht unvollkommen. Sie bedarf daher einer Ergänzung, wobei in vielen Fällen der Feuchtigkeitsgrad der Abluft sich als zweckmäßiges Beeinflussungsmittel bietet. Ist er zu niedrig, so kann er durch Verminderung der zugeführten Luftmenge gehoben werden und umgekehrt. Eine andere Möglichkeit besteht darin, daß mit abnehmendem Feuchtigkeitsgrad der Abluft ein zunehmender Teil, mit erwärmter Frischluft gemischt, dem Trockenraume neuerlich zugeführt, also das Verhältnis Frischluft- zu Umluftmenge beeinflußt

wird. Im letzten Falle bleibt die Geschwindigkeit der Luftbewegung im Trockenraum selbst und damit die von ihr abhängige Trockenleistung ungeändert.

Es arbeiten daher zweckmäßig stets zwei Regler zusammen. Die Beeinflussung der Trockenmitteltemperatur läuft meist auf die Be-

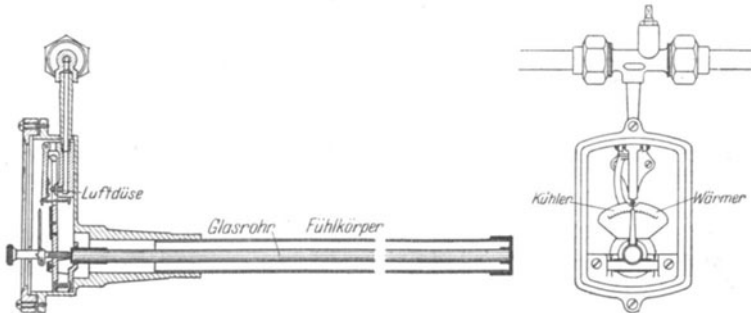


Abb. 330. Temperaturregler (Ges. für selbstt. Temperaturregelung).

tätigung des Heizmittelventils durch einen Temperaturregler hinaus, dessen Aufnahmekörper hinter der Heizvorrichtung angeordnet ist. Soll das Heizmittel von einer in größerer Entfernung gemessenen Temperatur beeinflusst werden, so kommt für Übertragung der Steuerkraft Druckwasser oder Preßluft in Frage. Nach Abb. 330 (Ges. für selbsttätige Temperaturregelung) enthält der Regler einen Fühlkörper aus Metall und eine in ihm angeordnete Glasröhre. Durch die verschiedene Ausdehnung beider wird eine Luftdüse gesteuert. Ist sie geschlossen, so wirkt die Preßluft auf die Membrane eines Steuerventils und verändert dessen Stellung. Bei offener Luftdüse ist die Membrane entlastet und das Steuerventil geht zurück. Eine ähnliche Vorrichtung der gleichen Herstellerin, bei der an Stelle der Metallhülse ein Holzrohr als Fühlkörper tritt, dient als Aufnahmekörper, wenn der Feuchtigkeitsgrad der Luft die Regelung beeinflussen soll. Bei der Ausführung nach Abb. 331 (Arca) arbeiten zwei temperaturempfindliche

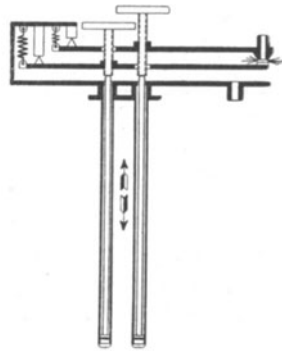


Abb. 331. Regler für gleichbleibenden Temperaturunterschied (Arca).

Fühlkörper gegeneinander, so daß nur der Unterschied der auf beide wirkenden Temperaturen zur Geltung kommt. Wird der eine Fühlkörper trocken, der andere feucht gehalten, so läßt sich mit diesem Regler der Feuchtigkeitsgrad der Luft im Trockenraum beeinflussen.

Statt des Steuerventils können auch Drossel- oder Wechselklappen im Luftlauf betätigt werden. Abb. 332 (Drayton) zeigt einen Feuchtigkeits- und Temperaturregler in Anwendung auf einen Schuhtrockner. Von zwei Fühlkörpern ist der eine feucht, der andere trocken. Nimmt der Feuchtigkeitsgrad der austretenden Luft zu, so steuern beide über ein Membranventil die Luftklappe so, daß weniger Umluft und mehr

Frischluff zu dem Lüfter strömt. Der trockene Fühlkörper beeinflusst gleichzeitig das den Lufterhitzer speisende Dampfeinlaßventil. Die Vorrichtung nach Abb. 321 läßt sich benutzen, um den Aufnahmekörper eines Temperaturreglers zu beeinflussen, der alsdann auf Erhaltung einer gleichbleibenden Kühlgrenzhöhe wirkt. Es erscheint richtiger, diese Anzeige für die Beeinflussung des Heizmittels zu benutzen, als die Anzeige des trockenen Thermometers, da von der Kühlgrenze die Temperatur des Gutes abhängt. Wird statt einer Wechselklappe eine einfache Drosselvorrichtung für die Luft gesteuert, so ist diese zweckmäßig unmittelbar hinter dem Lüfter anzubringen. Dadurch wird vermieden, daß in der Trockenvorrichtung eine Erhöhung

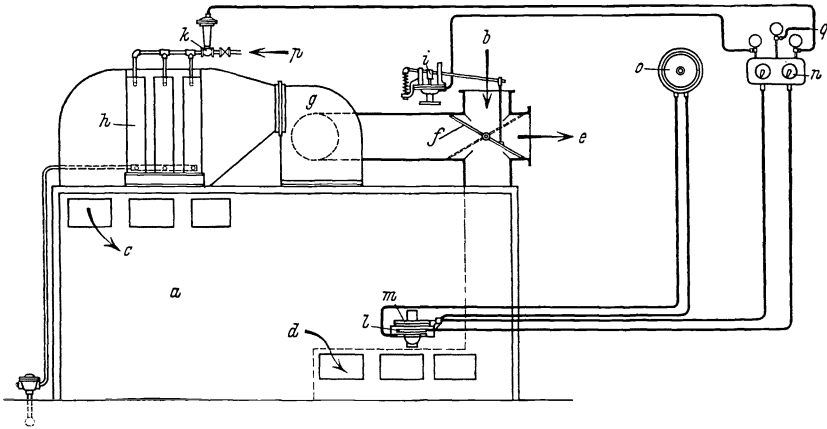


Abb. 332. Kammertrockner mit selbsttätiger Regelung (Drayton).

a Trockenkammer, *b* Frischluft, *c* Zuluft, *d* Luftaustritt, *e* Abluft, *f* Wechselklappe, *g* Lüfter, *h* Lufterhitzer, *i* Membranregler für Wechselklappe, *k* Membran-Dampfventil, *l* trockener Fühlkörper, *m* feuchter Fühlkörper, *n* Doppel-Temperaturregler, *o* Doppel-Temperaturschreiber, *p* Dampf, *q* Preßluft.

des Über- oder Unterdruckes entsteht, wenn der maßgebende Lüfter an der Luft Eintrittsstelle bzw., wie dies bei Mehrstufentrocknern die Regel bildet, an der Luftaustrittsstelle angeordnet ist.

Alle diese Regelvorrichtungen eignen sich zunächst nur für Trockner mit Beharrungszustand. Bei Kammern und allgemein bei Vorrichtungen mit wechselndem Trockenbild muß eine weitergehende Beeinflussung stattfinden, insofern, als alle Einstellungen sich ständig oder ruckweise verändern. Die Möglichkeit, diese Verstellung Uhrwerken zu übertragen, wird nur ausnahmsweise zu benutzen sein. Denn die Anwendung der Kammtrocknung bleibt schließlich für solches Gut vorbehalten, das eine besonders aufmerksame Überwachung verlangt, daher vernünftiges Eingreifen der Bedienung voraussetzt.

Der Regler nach Abb. 333 (National) dient zur Durchführung eines besonderen Verfahrens für die Trocknung von Holz. Der in der Trockenkammer befindliche Fühlkörper überträgt die Temperatur des feuchten Thermometers durch ein Kapillarrohr auf zwei elektrische Grenzkontakte. Diese setzen einen Motor im einen oder anderen Sinne

in Bewegung, der ein Dampfventil betätigt. Dieses läßt die im Trockenraum verteilten Dampfdüsen in Wirkung treten, sobald die Anzeige des feuchten Thermometers unter ein bestimmtes einstellbares Maß sinkt. Nach Erreichung des oberen Grenzwertes der Temperatur des feuchten Thermometers schließt das Dampfventil. Abb. 334 (National) zeigt die pulsierenden Veränderungen des Zustandes von Trockenraumluft und Trockengut. Die Temperatur des trockenen Thermometers steigt beim Dämpfen rasch um einige Grad an, um danach allmählich wieder zu sinken. Der Luftfeuchtigkeitsgrad wird während der Dämpfung bis auf etwa 0,85 getrieben, sinkt nach Abstellen der Dämpfung zuerst rasch, dann immer langsamer, bis auf einen unteren Grenzwert von etwa 0,3. Die Außentemperatur des Holzes ist erheblichen Schwankungen unterworfen. Sie sind mit denen des Luftfeuchtig-

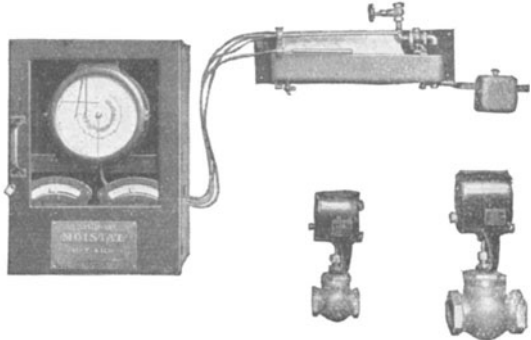
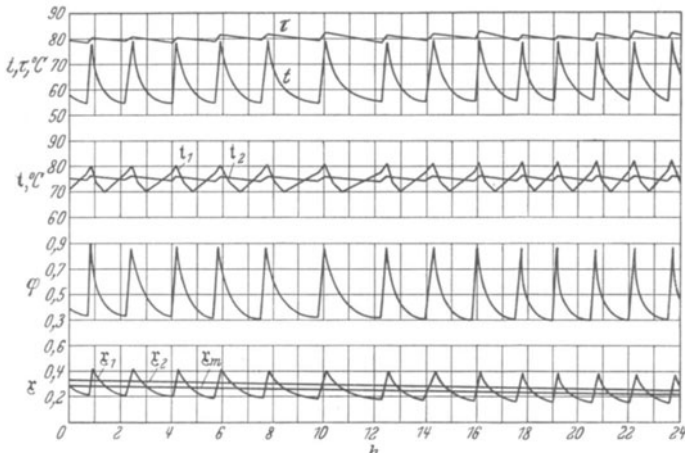


Abb. 333. Grenztemperaturen-Regler (National).

keitsgrades nicht phasengleich. Die höchste Temperatur wird am Ende des Dämpfabschnittes erreicht und entspricht etwa der Anzeige des feuchten Thermometers. Während der folgenden Trocknung sinkt die Temperatur rasch, steigt jedoch alsbald wieder an, weil die Oberfläche hygroskopische Eigenschaften annimmt. Im Gegensatz hierzu verläuft die Kerntemperatur des Holzes ziemlich gleichbleibend in einer mittleren Lage. Infolgedessen ergibt sich unmittelbar nach

Abb. 334. Verlauf der Holztrocknung (National). Index ₁ für Oberfläche, Index ₂ für Kern.

keitsgrades nicht phasengleich. Die höchste Temperatur wird am Ende des Dämpfabschnittes erreicht und entspricht etwa der Anzeige des feuchten Thermometers. Während der folgenden Trocknung sinkt die Temperatur rasch, steigt jedoch alsbald wieder an, weil die Oberfläche hygroskopische Eigenschaften annimmt. Im Gegensatz hierzu verläuft die Kerntemperatur des Holzes ziemlich gleichbleibend in einer mittleren Lage. Infolgedessen ergibt sich unmittelbar nach

Einsetzen des Trockenabschnittes eine Übertemperatur des Kerns gegenüber der Oberfläche, die das Trocknen von innen heraus begünstigt. In Übereinstimmung hiermit steht die Veränderung des Feuchtigkeitsgehalts von Oberfläche und Kern des Holzes. Der Feuchtigkeitsgehalt der Außenhaut ist am Ende der Dämpfung höher als der des Kerns, am Ende des Trockenabschnittes niedriger. Der durchschnittliche Feuchtigkeitsgehalt liegt während des ganzen Trockenvorganges nahe dem Wert, der dem Kern zukommt, und um ein geringes Maß tiefer als dieser, während bei der üblichen Trocknung in Luft ohne Unterbrechung durch Dämpfung der durchschnittliche Feuchtigkeitsgehalt stets niedriger liegt als der des Kerns.

Regler in höchster Vollendung werden (nach Tagliabue) angewandt, um nicht nur Grenzzustände einzuhalten, sondern den ganzen Vorgang nach einem bestimmten Verlauf von Temperatur und Feuchtigkeitsgrad der Luft abzuwickeln. Durch zwei mit Uhrwerk getriebene Kurvenscheiben werden hierbei die wechselnden Solltemperaturen des trockenen und feuchten Thermometers eingestellt und danach Heizung und Dämpfung, nicht für gleichbleibende oder innerhalb zweier Grenzwerte pulsierende Verhältnisse, sondern für beliebig festgelegte Folge von Luftzuständen betätigt. Die bei einfachen Reglern meist vorgeordnete Handeinstellung erfolgt hierbei selbsttätig.

Bedenklich weit geht die selbsttätige Regelung, wenn sie von dem Gewicht eines Probestückes allein beeinflusst wird, wie dies in den Vereinigten Staaten bei der Holz-trocknung versucht wird. Das Probestück befindet sich innerhalb des Trockenraumes auf einer Waagschale. Die Anzeige des Feuchtigkeitsgehalts wird nach außen übertragen und beeinflusst eine Steuervorrichtung derart, daß sie Temperatur und Feuchtigkeitsgrad der Luft so regelt, wie dies dem wechselnden Feuchtigkeitsgehalt des Holzes gerade zuträglich ist.

Zu den selbsttätigen Regelungen sind auch Maßnahmen zu rechnen, die das Umschalten von Klappen nach dem Füllen und Entleeren von Kammern durch das Öffnen und Schließen der Türen bewirken (Haas). Hierher gehört auch die bei den Schildeschen Kanaltrocknern angewandte mechanische Kupplung, um das Schließen der Türen und Verschieben der Wagen durch einen Handgriff, in besonderen Fällen sogar durch Uhrwerk, zu bewirken.

IX. Gesundheitliche Erfordernisse bei Trockenanlagen.

Belästigung der Bedienung entsteht bei geschlossenen Trockenvorrichtungen durch die nach außen abgegebene Wärme. Ihr kann im allgemeinen durch Anbringen eines Wärmeschutzes in genügendem Maße begegnet werden. Außerdem ergibt sich eine Wirkung des Trockenraumes auf die Umgebung durch Luftaustausch, der bei Unterdruck in der Trockenvorrichtung auf eine Unterstützung der Raumbelüftung, bei Überdruck auf eine im allgemeinen nicht gewünschte Beheizung

hinausläuft. Die Querschnitte, von denen, neben der Höhe des Druck- und Temperaturunterschiedes, die Stärke der Wechselwirkung abhängt, werden bei ununterbrochenem Betriebe vor allem durch die Öffnungen für Ein- und Ausbringung des Gutes dargestellt. Außerdem kommt, wenn die Nebenwirkung der Raumbelüftung erwünscht ist, bei Überdruckanlagen die Ansaugwirkung des Lüfters, bei Unterdruckanlagen die Öffnung für Einlaß der Außenluft in den Trockner in Betracht. Hierbei entsteht allerdings die Frage, ob die Luft des Umgebungsraumes gegenüber der verfügbaren, über Dach entnommenen Frischluft hinsichtlich der Trockenwirkung nicht Nachteile bietet, durch die die Verbesserung der Raumbelüftung aufgehoben wird.

Entwickeln sich bei der Trocknung schädliche Gase oder lästige Gerüche, so muß eine Arbeitsweise möglich sein, bei der kein Betreten der Trockenvorrichtung im Betrieb nötig ist, z. B. durch Wagenbetrieb bei Kammertrocknern. Unterdruck in der Trockenvorrichtung bildet alsdann die Regel. In solchen Fällen, die z. B. bei der Trocknung von Fischen, Fleischabfällen, Dünger und lackierten Teilen vorliegen, soll außerdem für eine solche Abführung der Abluft in die äußere Umgebung gesorgt werden, daß auch die weitere Nachbarschaft nicht belästigt wird. Im allgemeinen kann angenommen werden, daß die Unannehmlichkeiten um so geringer bleiben, je niedriger die bei der Trocknung angewandten Temperaturen sind, weil dann flüchtige Bestandteile in vermindertem Maße ausgetrieben werden. Besonders vorteilhaft ist es, wenn die Trocknung unter Luftleere vor sich geht und die Abgase mit den niederschlagenden Wasserdämpfen den löslichen Teil ihrer Dämpfe in flüssiger Form abzuführen gestatten. Nach dem Vorbild von Anlagen zur Rückgewinnung flüchtiger Bestandteile empfiehlt es sich, die Abgase durch einen Düsenraum oder Füllkörperturm zu leiten, um die Niederschlagwirkung zu verbessern. Ob der Abzugschacht besonders hoch und verhältnismäßig eng auszuführen ist, um die Abdämpfe mit großer Geschwindigkeit in größere Höhe zu stoßen, hängt von den Verhältnissen ab. Ein hoher Kamin wird auf alle Fälle eine größere Verdünnung der verunreinigten Luft herbeiführen, diese aber über weitere Räume ausbreiten.

Ähnliche Schwierigkeiten bietet die Abscheidung der von der Abluft mitgerissenen Staubeilchen, die in Staubabscheidern zu bewirken ist, u. a. auch deshalb, weil es sich hierbei meist um Gutsteilchen handelt, deren Rückgewinnung sich lohnt. Bei der Vakuumtrocknung mit Einspritzkondensation ergibt sich eine Entstaubung durch die Waschwirkung des Einspritzwassers, in anderen Fällen ist die Anbringung eines besonderen Luftwäschers hinter dem mechanischen Abscheider zu erwägen.

Trockenräume gleichzeitig als Arbeitsräume auszunutzen, wird stets möglichst zu vermeiden sein. Denn beide verlangen verschiedene Luftbeschaffenheit. In den Fällen, in denen in den Trockenräumen gearbeitet werden muß oder eine dauernde Beaufsichtigung eines beheizten Trockners nötig bleibt, können die Luftverhältnisse nicht allein durch wirtschaftliche Gesichtspunkte und Rücksicht auf das Gut bestimmt werden, vielmehr ist die gesundheitliche Forderung zuträglicher Luft-

verhältnisse voranzustellen. Was hierunter zahlenmäßig zu verstehen ist, ergibt sich aus Abb. 335, in der eine für verschiedene Luftgeschwindigkeiten geltende Schar von „Behaglichkeitslinien“ den Zusammenhang zwischen Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit für den Fall festlegen, daß das menschliche Wohlbefinden gesichert sein soll. Die dargestellten Linien entsprechen den Versuchsermittlungen der American Society

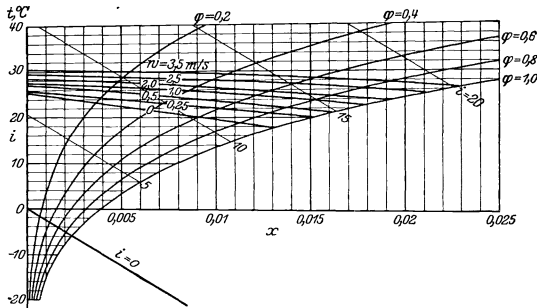


Abb. 335. Behaglichkeitslinien im i - x -Bild.

of Heating and Ventilating Engineers und verstehen sich für den ruhenden normal bekleideten Körper. Sie gelten auch für den Fall, daß mit entblößtem Oberkörper leichte Arbeit geleistet wird und bestätigen die bekannte Tatsache, daß mit zunehmender Luftgeschwindigkeit bei gleicher Tem-

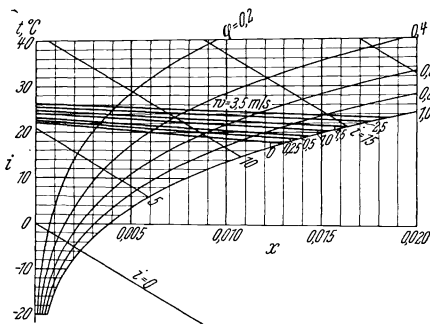


Abb. 336. Behaglichkeitslinien im i - x -Bild.

peratur ein höherer Feuchtigkeitsgehalt, bei gleichem Feuchtigkeitsgehalt eine höhere Temperatur dem Behaglichkeitsgefühl entspricht. Für den in gewöhnlicher Kleidung arbeitenden Menschen, um den es sich in den hier betrachteten Fällen handelt, verschieben sich die Linien gemäß Abb. 336 nach unten. Hiernach sind für Trockenräume, die gleichzeitig als Arbeitsräume dienen, verhältnismäßig niedrige Temperaturen anzustreben. Selbstverständlich kann an diesen Bedingungen nicht sklavisch festgehalten werden. Ein Beispiel dafür, wie den verschiedenen Anforderungen entsprochen werden kann, bietet die Bewetterung der Arbeitsräume der Western Electric Co., in denen mit Rücksicht auf die verarbeitete Ware die

hohe Temperatur von 45° mit dem niedrigen Feuchtigkeitsgrad $\phi = 0,05$ eingehalten wird, ohne daß die Bedienung darunter leidet.

Bei reinen Lufttrockenanlagen verändert sich der Zustand der Trockenluft, wenn Nachheizung fehlt, etwa nach den i -Linien des i - x -Bildes. Von diesen weichen die Behaglichkeitslinien wesentlich ab. Infolgedessen soll in den Lufttrockenanlagen, mit Rücksicht auf die gleichzeitig notwendige Bedienung, die Luft sich nur innerhalb enger Grenzen verändern, um nicht allzusehr von der Behaglichkeitslinie abzuweichen. Das ergibt große Luftmengen und hohe Luftgeschwindigkeiten, die wünschenswert sind, weil nach der Behaglichkeitslinie ihr eine höhere Lufttemperatur entspricht. Eine solche Trockenanlage muß

aus wirtschaftlichen Gründen mit reichlicher Umluftbeimengung und hohem durchschnittlichen Feuchtigkeitsgrad der Luft arbeiten und verhältnismäßig lange Trockenzeit in Kauf nehmen. Für alle während des Jahres eintretenden Wettermöglichkeiten kann den gesundheitlichen Bedingungen nur dann voll entsprochen werden, wenn künstliche Entfeuchtung in einer Bewetterungsanlage vorgesehen wird. Die Menge der zugesetzten Frischluft ist hierbei nicht nur durch die Rücksicht auf niedrigen Wärmeverbrauch bestimmt, sie muß vielmehr vor allem groß genug sein, um einwandfreie Luftbeschaffenheit zu erhalten. Anders liegen die Verhältnisse, wenn bei Lufttrockenanlagen Nachheizung innerhalb des Trockenraumes erfolgt. Der Bereich, innerhalb dessen der Luftzustand sich verändern kann, wird hierbei dadurch weit ausgedehnt, daß seine Veränderung bei entsprechender Verteilung der Innenheizvorrichtung genügend genau längs der Behaglichkeitslinien erfolgen kann. Besitzt z. B. die Außenluft eine Temperatur $t_r = 8^\circ$ und einen Feuchtigkeitsgrad $\varphi_r \approx 0,7$ und wird die Luft mit 3,5 m/s umgetrieben, so kann nach Abb. 335 die Anheizung auf $t_o = 30^\circ$ erfolgen und Nachheizung sich in einem Maße anschließen, daß bei einem Endfeuchtigkeitsgrad $\varphi_h \approx 0,7$ die Lufttemperatur auf $t_h = 28^\circ$ sinkt, also sich kaum verändert. Dem entspricht, bezogen auf 1 kg Reinluft, eine Wärmeaufnahme von etwa 12,7 kcal/kg, eine Feuchtigkeitsaufnahme von etwa 0,013 und ein spezifischer Wärmeverbrauch von 980 kcal/kg, der durchaus innerhalb wirtschaftlicher Grenzen liegt. Der Einwand, daß in solchen Fällen Beachtung gesundheitlicher Vorschriften wegen Gefährdung der Wirtschaftlichkeit unmöglich sei, beruht häufig auf mangelhafter Erfassung der maßgebenden Gesichtspunkte und Unkenntnis der zu ihrer Verwirklichung verfügbaren Mittel. Wenn angenommen werden darf, daß die aus subjektivem Massenurteil gewonnenen Abb. 335 und 336 auch objektiv den Bedingungen der Behaglichkeit gerecht werden, so lassen sich daraus für die Anzeigeweise eines „Behaglichkeitsmessers“ gewisse Rückschlüsse ziehen. Würden die Behaglichkeitslinien mit den Linien gleicher Temperatur zusammenfallen, so würde das trockene Thermometer das gegebene Beobachtungsmittel sein. Würden sie, was noch weniger der Fall ist, mit den Kühlgrenzl原因en übereinstimmen, so träfe dies für das feuchte Thermometer zu. Beide bleiben daher ungeeignet, um die richtige Lösung zu finden.

Bei offenen, im Bedienungsraum stehenden Trocknern, wie sie die Papiermaschinen darstellen, ist anzustreben, daß die auf die Behaglichkeitsbedingung gebrachte Luft vor weiterer Erwärmung den Bedienungsraum durchströmt. Die Aufrechterhaltung verschiedener Luftbeschaffenheit in dem von der Trockenvorrichtung selbst eingenommenen Raum und dem daran angrenzenden Bedienungsraum wird dadurch teilweise möglich.

Firmenverzeichnis.

- Alfeld-Delligsen A.-G., Maschinen- und Fahrzeugfabriken, Alfeld 433
 American Blower Company, Detroit 264, 268, 269
 Arca-Regler, A.-G., Berlin-Schöneberg 469
 v. Asten & Co., A.-G., Stolberg, Rhld. 302, 390
- Balcke, Maschinenbau-A.-G., Bochum 268, 269, 415, 416
 Baugesellschaft für künstliche Trocknereien m. b. H., Duderstadt 438, 439
 Belcolor G. m. b. H., Berlin-Dahlem 395
 Beth A.-G., Maschinenfabrik, Lübeck 275, 276
 Buckau, Maschinenfabrik, R. Wolf A.-G., Magdeburg 307, 310, 311, 428, 450, 451
 Bühler, Jakob, Kommanditgesellschaft, Konstanz 436, 438
 Büttnerwerke A.-G., Uerdingen 284 bis 286, 303, 304, 424—427, 433, 434
- Danneberg & Quandt, Berlin 240, 241, 278, 322, 377, 413, 414
 The Drayton Regulator and Instrument Company Ltd., West Drayton 469, 470
 Drying Systems Inc., Chicago 322, 454
 Driessen-Holman, N. V. Malangsche Machinehandel, Malang 326
- Ellerbrock, Otto, Maschinenfabrik und Kupferschmiede, Hamburg-Barmbeck 411
 Engelhardt & Förster, G. m. b. H., Bremen 409—412
- Fellner & Ziegler A.-G., Frankfurt a. M. 286, 287, 312
 Felten & Guilleaume, Carlswerk, A.-G., Köln-Mülheim 459
 Försterwerke, Imperial-, Maschinenfabrik, G. m. b. H., Magdeburg 352, 353
 Freund - Starke - Hoffmann - Maschinen A.-G., Hirschberg 329, 330, 360
 Fries Sohn, J. S., Frankfurt a. M. 398 bis 401
 Füllerwerk (Linke-Hofmann-Lauchhammer A.-G.), Bad Warmbrunn 387 bis 389
- Funke & Co., Paul, G. m. b. H., Berlin 463
- Gesellschaft für selbsttätige Temperaturregelung m. b. H., Berlin 469
 Gruschwitz, C. A., A.-G., Olbersdorf 271
- Haas, Friedrich, Maschinenfabrik, Gesellschaft Neuwark, Lennep 242, 243, 275—278, 472
 Hampe & Hartwig A.-G., Berlin 241, 242, 324, 325
 Hänig & Co., Volkmar, Heidenau 318, 431
 Heraeus, W. C., G. m. b. H., Hanau a. M. 463
 Humboldt-Deutzmotoren A.-G., Werk Kalk, Köln-Kalk 285, 308, 309, 421, 422
- Imperial, Maschinenfabrik, G. m. b. H. Meißen i. Sa. 288, 289
- Jaeger, Wilhelm, Maschinenfabrik für Speicherbau, Halle 359
 Jahr, M. Rudolf, Maschinenfabrik, Gera 233, 283, 405—408
- Keller & Co., C., G. m. b. H., Laggenbeck 438, 454
 Kettling & Braun, Crimmitschau 243, 404
 Kiefer, Gg., Maschinenfabrik, Feuerbach-Stuttgart 375
 Korant, Richard, Berlin 462
- Lehmann, J. M., Maschinenfabrik, Dresden-A. 348
 Louisville Drying Machinery Company, Inc., Louisville 311, 313
 Lurgi, Apparatebau-Gesellschaft m. b. H., Frankfurt a. M. 297, 429, 444, 445
- Manlove Alliott & Co., Ltd., Nottingham 311, 312, 333, 334, 396, 397, 433
 Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg A.-G., Nürnberg 264, 380—382
 Mayfarth & Co., Ph., Frankfurt a. M. 368
 Miag, Mühlenbau und Industrie A.-G., Braunschweig 290, 291, 362, 363
 Minton, Vacuum Dryer Corp., Greenwich, Conn. 314

- Möller & Pfeifer, Berlin 272, 273, 436, 439
- The Moore Dry Kiln Company, Jacksonville 378, 380, 381, 383
- Mozer, C. G., A.-G., Maschinenfabrik und Eisengießerei, Göppingen 286, 288
- The National Dry Kiln Company, Indianapolis 266, 279, 455, 470, 471
- Neubäcker, Paul, Apparatebauanstalt, Danzig 316
- Nublosa G. m. b. H., Meißen i. Sa. 295, 296, 398
- Oschatz, Max, Dresden 305—307
- Passburg-Block G. m. b. H., Berlin-Charlottenburg 354, 434
- Petry & Hecking G. m. v. H., Maschinenfabrik, Dortmund 309, 310, 330, 331
- The Philadelphia Drying Machinery Company, Philadelphia 402, 403
- Pintsch, Julius, A.-G., Berlin 332, 333
- Poensgen, Gebr., A.-G., Düsseldorf-Rath 410, 412
- Proctor & Schwartz, Inc. Philadelphia 338, 339, 347, 348, 385, 386, 402, 408, 409
- Rema, Rheinische Maschinenfabrik A.-G., Neuß 293, 295
- Rietschel & Henneberg G. m. b. H., Berlin 268—270, 385
- Rost, C. E., & Co., Freital-Potschappel 348
- Salge, Willy, & Co., Berlin 293, 294
- Schilde, Benno, Maschinenbau-A.-G., Hersfeld 231, 252, 253, 273, 274, 279, 280, 286, 349, 351, 380, 381, 383, 396, 401, 402, 407, 439, 440, 472
- Schlatter, Etablissements, Zürich 327
- Schopper, Louis, Leipzig 461, 462
- Siempelkamp, Krefeld 385
- Simon, Aktiengesellschaft, Nossen i. Sa. 349, 350
- Soest & Co., Louis, G. m. b. H., Reisholz 309, 310
- Stollberg, H. F., Maschinenfabrik G. m. b. H., Offenbach a. M. 281—283
- The Sturtevant, B. F., Co., Boston 287, 288, 323
- Tagliabue, C. J., MFC. Co., Brooklyn 472
- Topf & Söhne, J. A., Erfurt 142, 291, 292, 327, 328, 362
- Trocknungs-Anlagen-Gesellschaft m. b. H., Berlin 267, 325, 326, 349, 358, 432
- Uhland, W., & Co., G. m. b. H., Leipzig 355
- The Universal Dryers Company Ltd., Barnsley 290
- Vacuumtrockner G. m. b. H., Erfurt 315—317, 331, 332, 344—347, 450
- Venuleth & Ellenberger, A.-G., Darmstadt 169, 302—304, 355, 431
- Voith, J. M., Maschinenfabrik, Heidenheim 299—302, 390, 391
- Werner & Pfeleiderer, Cannstatt 283, 284, 414, 415, 443, 453
- Wiessner, Carl, Kommanditgesellschaft, Maschinenfabrik, Görlitz 445, 446
- Winde & Kleist, Berlin 359
- Zahn & Co., G. m. b. H., Berlin 297, 298
- Zehner, Georg, Wiesbaden 437
- Zeiss, Carl, Jena 466
- Zeitzer Eisengießerei & Maschinenbau A.-G., Zeitz 309
- Zerstäubungs-Trocknungs-Gesellschaft m. b. H., Berlin 337
- Zimmermann & Co., Ludwigshafen 324, 325
- Zittauer Maschinenfabrik A.-G., Zittau 240, 242, 274, 275

Namenverzeichnis.

- | | | |
|--|---|--|
| <p>Adams 63
Alliott 170, 360, 430, 431
American Society of Heating and Ventilating Engineers 474
Assmann 457</p> <p>van Bemmelen 19, 20
Bergius 398
Berliner 466
Berner 423
Blasius 191
Block 335
Bongards 459
ten Bosch 160
Boyle 3
Bronn 249
Brownell 287, 288, 359, 360
Brüne 362
Bühler 293, 294
Burbach 160</p> <p>Caldwell 18
Carrier 34, 35
Chapmann 364
Clarke 464
Cloake 92, 99
Culpepper 18</p> <p>Dalton 4, 29
Daub 16—18, 62
David 464
Deutsche Landwirtschaftliche Gesellschaft 142, 361
Dietze 387
Dolch 464
Döring 420</p> <p>Eberle 350, 408
Eck 164
Eisener 347, 352
Ellis 291, 292
Erk 164
Esser 189</p> <p>Fidalgo 393
Fischer 133, 134, 359
Fleissner 425, 426
Foos 420, 423</p> | <p>Foth 352
Frerichs 419
Friberg 382
Fromm 53
Frost 159, 161</p> <p>Gaede 463
Gensecke 28
Gerbel 456
Gillroth 96
Gray 296, 298, 344
Grewin 302, 342, 390
Gröber 52—54, 63, 64, 159, 160
Grubenmann 34
Grunewald 418, 422, 427</p> <p>Haering 427
Hartshorne 19
Hausbrand 2, 7, 334, 383
Heinrich 383, 449
Hencky 187, 457
Hermisson 419
Hoffmann 14, 92, 95, 354—356
Höhn 29
Honigmann 171, 172
Hopkinson 398
Hubert 96
Hubmann 429
Hugo 364</p> <p>Jakob 164
Jensen 296, 298, 344
Josse 28, 445
Jürges 51, 52</p> <p>Kaiser 164, 171, 239, 386
Kaspers 424
Keats 56, 58, 59
Kegel 420
Kern 16—18, 62
Kingmann 464
Klemm 90
Knaus 372
Knoblauch 457
König 336
Körner 337
Krause 297, 299, 398, 401
Krischer 189
Kropff 362
Knosch 95, 344</p> | <p>Lapp 422
von Lassberg 456
Lefèbre 267, 413
Lehmann 414
Lewis 70
Limberg 430
Lindsay 34, 35
Lintner 362
Lohrisch 54, 55
Lurié 58, 101, 356—358</p> <p>Mache 38
Mc Adams 159, 161
Mallickh 187, 257, 386, 391—393
Mariotte 3
Mayer 419
Merkel 78
Mezger 19
Miller 16
Minton 89, 314
Mittelsteiner 419
Mollier 29—31, 33, 45, 48, 223
Moore 421
Morrison 16
Müller 229
Münzinger 412</p> <p>Nilson 393
Nusselt 51—56, 159—163</p> <p>Oetken 429</p> <p>Parow 352
Passburg 168, 169, 191, 192, 316—318, 346, 358, 359, 397, 432, 433
Pelzer 172
Pöchmüller 464</p> <p>Rammler 420, 426
Reiher 54
Reutlinger 456
Reynolds 49
Rosin 294, 426
Rüter 466
Ruths 371</p> <p>Schack 160, 162
Schiller 160
Schlenk 15, 62, 363, 364</p> |
|--|---|--|

- | | | |
|--------------------------|--------------------------|--------------------|
| Schloesing 19 | Stokes 168 | Wagner 133, 134 |
| Schmidt 60, 71, 189, 443 | Straub 463 | Warlimont 323 |
| Schneider 456 | | Weiss 29, 427 |
| Schüle 29 | Teschner 100 | Whitman 56, 58, 59 |
| Schwalbe 100 | Teuchert 463 | Williamson 63 |
| Seidenschnur 61, 418 | Thelen 18, 323, 381, 384 | Wilson 16—18, 62 |
| Smidth 171 | Thoma 54, 55, 57 | Winkel 336 |
| Smith 1 | | Winkelmann 38 |
| Soenecken 159, 161 | United States Department | Winkler 275, 276 |
| Spengler 371 | of Agriculture 368 | Wollny 14 |
| Sprockhoff 169 | | Wood 429 |
| Steeger 440 | de Vecchis 371 | |
| Stender 159, 161, 164 | Vogel 459 | Zimmermann 52 |

Sachverzeichnis.

- Abfallwärme s. Rückgewinnung der
Abfallwärme, Energiewirtschaft
Abgabe 447, 448, 473.
Abkühlen s. Kühlen
Absorption 7
Adsorption 448
Albumin 345, 346
Alkohol s. Lösungsmittel
Altern 92, 99
Ameisensäure 232
Anheizzeit 189
Arbeitsverbrauch (s. a. Energiewirtschaft) 27, 28, 57, 112, 190—192, 226, 337
Ausbreitung (des Gutes) s. Teilung
Ausgleichszustand 35, 36, 47, 179
- Bakterien** 95, 96, 262
Bandrockner 153, 242, 243, 347, 350, 354, 358, 370, 371, 374, 384, 385, 394, 396, 431, 434
Barometerstand s. Gesamtdruck
Baumwolle 19, 233
Baustoffe 94, 188, 189, 238, 300, 355, 368, 450
Befeuchten des Gutes (s. a. Quellfähigkeit) 16, 47, 92, 221, 231, 261, 372, 373, 395, 440
Behaglichkeitszustand 474, 475
Beharrungszustand 40, 112
Benzin s. Lösungsmittel
Bewegung (des Gutes) 6, 11, 57, 190, 192, 196, 204, 205, 234—236, 263, 264, 266, 271, 272—319, 328—334, 452—454
Bewegung (des Trockenmittels, der Luft) 6, 34—36, 49—55, 58, 105, 179, 190, 191, 196, 197, 204, 205, 236—253, 259, 263, 266, 273—331, 460
Bewitterung 57, 74—76, 88, 220, 221, 261, 271, 272, 446, 474, 475
Bleiweiß s. Farbstoff
Blut 94, 193, 336, 337
Brennstoff s. Kohle
Brüchigwerden 91
- Dachziegel s. Ziegel
Dämpfen (Holz, Kartoffel, Obst) 65, 91, 193, 374, 375
Dampfspannung (über Gut) 7, 8, 10—14, 38, 43
- Dampfspeicher 456
Darre s. Hordentrockner
Dicke (des Gutes) 6, 11, 49, 50, 60, 61, 64, 65, 90, 91, 165, 234, 237, 238, 260
Dielektrizitätskonstante 466
Diffusion 6, 9—12, 49, 61, 62, 248
Durchlöchern 91
- Ei 94, 95, 193, 345, 346
Eindampfen (s. a. Verdampfen) 7, 10, 11, 166, 168, 194, 197
Eingeweide 95, 97
Eiweiß 93, 94
Elektrofilter 450—452
Emulsion 89
Energiewirtschaft (s. a. Abfallwärme) 163, 226, 423, 436, 442, 443, 445, 455, 456
Entfeuchten (des Trockenmittels, der Luft) 218—221, 226, 444—447
Entgasen 91
Entnebeln s. Nebel
Entstauben 97, 284, 296, 346, 347, 349, 354, 405, 428, 433, 441, 445, 448 bis 452, 473
Enzyme 96
Erwärmen (allgemein) 27, 36, 163, 226
Erwärmen (des Gutes) 2, 6, 24, 26, 27, 40, 41, 45, 61, 65, 94, 122—125, 129, 130, 136, 146, 147, 193—196, 229, 230
Erwärmen (des Trockenmittels, der Luft) 2, 24, 26, 45, 103—105, 110, 139, 206, 216, 229
Extrakt 317
- Farbstoff (als Gut) 58, 101, 102, 168, 430—432
Färbung (als Veränderung) 91, 93, 94, 96
Fassungsvermögen (des Trockners) 66, 76, 79, 82, 217, 238
Faulen 96
Fell s. Gummi, Leder
Ferment 95, 96, 336
Festigkeit 89, 90, 102, 137
Feuchtigkeitsaufnahme des Gutes siehe Befeuchtung
Feuchtigkeitsgehalt (des Gutes) allgemein 7—21, 97—102, 198—200, 203, 204, 209

- Feuchtigkeitsgehalt zahlenmäßig (siehe a. Lufttrocknen) 336—338, 341, 342, 344—347, 349—351, 354, 356, 362, 364—367, 370—374, 376, 377, 386, 387, 394, 397, 401, 404, 416, 418—421, 430, 432, 435
 Feuchtigkeitsgehalt (des Trockenmittels, der Luft) 4, 5, 31, 104, 113, 115 bis 118, 375, 380, 381, 435, 440
 Feuchtigkeitsgrad (des Gutes) 13, 97
 Feuchtigkeitsgrad (des Trockenmittels, der Luft) 4, 40, 41
 Feuchtigkeitsmessung 41, 99, 457—459, 461—467
 Film 92, 93, 186, 342, 343, 447, 452
 Filter 450—452
 Filz 16, 91, 301, 387—390, 394, 395, 408
 Fisch 92, 95, 99, 100, 168, 193, 232, 346, 347, 447, 473
 Flachs 16, 93, 236, 374
 Fleisch 335, 336, 447, 473
 Form (des Gutes) 50—54, 56, 58, 63, 99, 193, 234—237
 Frucht (s. a. Obst) 93, 94, 96
 Furnier s. Holz

 Gallerte 96
 Garn 233, 236, 241, 261, 271, 401—403
 Gegenstrom—Gleichstrom 95, 107, 111, 113—121, 123—144, 182, 185, 188, 194, 195, 197—202, 206—210, 229 bis 233, 235, 237, 259, 263, 264, 268, 270, 271, 273—281, 283, 284, 286 bis 291, 293—297, 313, 324, 328—330, 356, 368, 385, 436, 472—475
 Gelatine 93, 193, 342
 Gemüse 90, 93, 95, 193, 326, 370—372
 Gerbstoff 430—432
 Gerinnen 93, 344
 Gerste 92
 Gesamtdruck 31—33, 88
 Geschlossener Kreislauf (s. a. Kalte Trocknung) 88, 94, 224—226, 271, 272, 324, 337—342, 399, 446—448, 450
 Geschmacksveränderung 93, 94
 Gesundheitliche Forderungen 435, 447 bis 449, 472—475
 Getreide 92, 95, 96, 142—144, 236, 355 bis 361, 466
 Gewebe s. Stoff
 Gießereiform 91, 434, 440
 Gleichstrom s. Gegenstrom—Gleichstrom
 Gleichwertige Wärmedurchgangszahl 173
 Gleichwertiger Durchmesser 51, 53, 54
 Glykoside 96
 Gummi 94, 186, 193, 236, 324, 398—401, 448

 Hirsch, Trockentechnik. 2. Aufl.

 Haar 349—351
 Haftflüssigkeit, Haftwasser 7, 8, 10, 11
 Harnstoff 430, 432
 Hauptabschnitt des Trockenvorganges 36, 60, 114, 115, 134—136, 148
 Haut s. Leder
 Hefe 95, 99, 364, 365
 Heizen s. Erwärmen
 Heizfläche 164—181, 183
 Heizmaschine 226, 441, 442
 Heizmittel (s. a. Trockenmittel) 161, 171, 181, 188, 238, 321, 332, 334, 414, 417, 441, 442
 Heizvorrichtung 141, 158, 275, 278, 441—443
 Holz 16, 65, 90, 91, 96, 102, 194, 241, 264, 268—270, 278, 279, 323, 334, 374—386, 455, 470—472
 Hopfen 364
 Hordetrockner 205, 232, 238, 281, 324—330, 337, 345, 349, 352, 362, 363, 364, 367—369, 371, 373, 415
 Hülsenfrüchte 95
 Humus 14
 Hygrometer s. Feuchtigkeitsmesser
 Hygroskopischer Punkt 13—21, 40, 65, 66, 96, 99, 101, 102, 126, 420, 421
 Hygroskopischer Zustand 7, 12—21, 26, 38—41, 43, 47, 49, 61, 131, 135, 136, 148, 149, 152, 185, 260, 465, 466

 Innenheizung 206, 210—212, 217, 218, 279, 283, 319
 Insekten 261, 262

 Kabel 333, 416, 417
 Kaffee 15, 166, 326, 359, 372—374
 Kalkstein 435
 Kalte Trocknung 224—226, 342, 395, 456, 458
 Kammertrockner 144—153, 205, 232 bis 234, 241, 243, 244, 260, 319, 320, 323, 324, 338—340, 342, 343, 346, 349, 354, 366, 368, 370, 377—381, 395, 397, 399, 401, 403, 407, 411, 414—416, 436—439, 452, 455, 460, 470, 472, 473
 Kanaltrockner 197, 243, 263—283, 338, 339, 341—343, 345, 346, 348, 349, 352, 354, 366, 367, 369—371, 374, 377, 383, 384, 396, 399, 401—407, 412—415, 436, 439, 440, 452, 454, 455, 460, 472
 Kaolin 14
 Kapillarflüssigkeit, Kapillarwasser 8, 9, 11
 Kapillarität 90
 Karamellbildung 93

- Kartoffel 95, 169, 176, 193, 236, 237, 299, 302, 303, 351, 353
 Kasein 93, 344, 345
 Kautschuk s. Gummi
 Keramik (s. a. Ziegel, Gießereiform) 91, 267, 434, 435, 439, 440
 Kieselsäure s. Silica-Gel
 Kleinlebewesen 95, 96, 99, 100, 341, 356
 Knallquecksilber 94
 Kohle 61, 62, 90, 171, 172, 293, 294, 307—309, 417—430, 445, 448—451, 456, 464, 466
 Kondensieren 6, 318, 319, 447, 452
 Kopra 359
 Korngröße (s. a. Dicke, Teilen) 61, 62, 172, 417—420
 Körpereigenschaft des Gutes (s. a. Dicke, Form) 52, 60—66, 90, 91, 137, 164, 166, 234, 260
 Kristallisieren 7, 11
 Kritische Geschwindigkeit 49—51, 239
 Kühlen (s. a. Kalte Trocknung) 220 bis 224, 226, 231, 259—261
 Kühlgrenze 34—37, 47, 51, 115, 117
 Kulissentrockner 411
 Kunstseide s. Seide
 Kunststoff 93, 412, 448

 Lack (s. a. Leder) 92, 94, 186, 220, 237, 262, 266, 267, 283, 284, 413—417, 447, 448, 452—454, 473
 Leder 16—18, 62, 63, 91, 93, 149—153, 237, 271, 277, 278, 320, 321, 447, 453, 464, 469, 470
 Leim 89, 91, 93, 193, 237, 341, 342, 415, 464
 Lichtbrechung 466
 Löslichkeit 10, 12, 94
 Lösungsmittel 2, 7, 8, 10—12, 33, 34, 220, 344, 395, 399—401, 412, 413, 417, 432, 448
 Luftbewegung s. Bewegung des Trockenmittels, der Luft
 Lüfter 251—253, 275
 Luftherhitzer s. Heizvorrichtung
 Luftleitung 191
 Luftmenge 86, 88, 104—106, 108, 110, 113, 117, 138, 140, 141, 150, 153, 195, 198—201, 203, 204, 206, 209 bis 212, 217, 226—234, 270, 271, 276, 459
 Luftschaft 248—251
 Lufttrockenheit 99, 259, 260

 Mahltrockner 293—295, 426, 428, 429
 Mais (s. a. Getreide) 92
 Malz 15, 62, 93, 94, 96, 133, 134, 220, 232, 327, 361—364
 Mechanisches Trocknen 1, 2
 Milch 93—96, 193, 261, 317, 343—345

 Mineral (s. a. Kaolin) 449
 Mischluft 94, 111, 213—218, 224, 227, 228, 231, 234, 268—271
 Mittelwert des Feuchtigkeitsgefälles 81
 Mittelwert des Spannungsgefälles 133
 Mittelwert des Temperaturgefälles 80
 Mittelwert des Unterschiedes (allgemein) 86, 87
 Mittelwert des Wärmeinhaltsgefälles 80
 Modell s. Trockenversuch
 Muldentrockner 169, 192, 197, 204, 205, 232, 299, 309—311, 318, 331, 333, 336, 337, 347, 354, 358, 365, 371, 372, 399, 410, 411, 430, 433, 434

 Natürliche Trocknung 6, 25, 40, 106, 180, 225, 338
 Nebel 41, 170, 187, 213, 223, 253—259, 390—394
 Niederschlag (s. a. Kondensation) 28, 117, 125, 126, 187, 188, 200, 208, 260

 Obst 18, 95, 155, 193, 261, 262, 264, 265, 326, 366—370
 Osmose 11, 12
 Oxalsäure 281
 Oxydieren 94, 344

 Papier 16, 41, 90, 91, 163, 164, 171, 176, 183, 187, 236, 239, 257, 258, 299—301, 314, 386—396, 448
 Pappe 231, 232, 237, 261, 279, 280
 Photographische Papiere s. Papier
 Photographische Platte 237, 342, 343, 447
 Physikalisch-Chemisches Trocknen 7
 Pigment 394, 395
 Pilze 96, 99, 262
 Porzellan 434, 440
 Psychrometer s. Feuchtigkeitsmesser

 Quellfähigkeit 92, 99—102, 336, 337, 346, 426
 Quellflüssigkeit, Quellwasser 9—12
 Querstrom 107, 111, 153—158, 202 bis 204, 235—237, 266—268, 270, 281, 288—290, 297

 Randmaßstab 43—45
 Raumgewicht (des Gutes) 13
 Regelung 110, 214, 216, 219, 466, 468 bis 472
 Reis 359
 Reißen 91, 237
 Relative Feuchtigkeit s. Feuchtigkeitsgrad
 Rieseltrockner 142, 236, 288—293, 359, 374, 429
 Röhrentrockner 235, 299, 307—309, 355, 421, 423, 450, 451

- Rohrfaser 16
 Rübe 95, 371, 372
 Rückgewinnung der Abfallwärme 26, 27, 176, 187, 232, 252, 259, 260, 275, 390—393, 416, 422, 423, 433, 435 bis 438, 441—447, 453

 Salz 7, 20, 432, 433, 449
 Sand 8
 Säuern 94
 Schaufeltrockner s. Muldentrockner
 Scheibenofen 171, 172
 Schichtstärke (des Gutes) s. Dicke
 Schimmel s. Pilze
 Schlempe 365
 Schranktrockner 205, 206, 319, 321, 322, 331—333, 345, 366, 394, 399, 401, 402, 416, 430, 460
 Schrumpfen 41, 62, 63, 66, 338, 420, 426
 Schuhe s. Leder
 Schwaden s. Nebel
 Schwefelsäure 7
 Seide 19, 100, 101, 233, 274
 Seife 193, 282, 283, 347—349
 Serum 322, 337, 345
 Silica-Gel 7, 19, 20
 Spezifische Wärme (des Gutes) 21, 22, 41, 387, 466
 Spezifische Wärme (des Trockenmittels, der Luft) 21, 22, 29, 33
 Spezifisches Gewicht (des Gutes) siehe Raumgewicht
 Spezifisches Gewicht (des Trockenmittels) 3—5, 244—251
 Sprengstoff 94, 432
 Stärke (des Gutes) s. Dicke
 Stärke 14, 91, 93, 169, 192, 275, 285, 287, 353—355
 Staub 92, 200, 294, 342, 413, 414, 419, 422, 433, 444—449, 457
 Staubkammer 449
 Staubkohle s. Kohle
 Steinzeug s. Keramik
 Stoffe (s. a. Seide) 93, 233, 236, 240, 242, 243, 274—276, 283, 403—412, 448
 Strahlung s. Wärmeübertragung
 Streuverlust s. Wärmeverlust
 Stromtrockner 292—294, 434
 Strumpf s. Stoff
 Stufentrocknung 27, 206—210, 216, 226, 231—233, 239, 272—279, 282, 283

 Tabak 372, 373
 Tauchtrommel 97, 299, 306, 307, 316, 317, 341, 342, 344, 346, 365, 432, 433
 Taupunkt 6, 47
 Tauwasser s. Niederschlag
 Teigwaren 193, 236, 365, 366

 Teilen (des Gutes) 6, 57, 61, 63, 97, 171, 172, 193, 235, 236, 293—299
 Teilen (des Trockenmittels, der Luft) 235—244, 299, 300, 396, 405
 Tellertrockner 299, 309, 318, 330, 331, 333, 421, 423, 430
 Temperatur (des Gutes) 35, 36, 89, 90, 93, 95, 96, 107, 123, 126, 129, 137, 140, 164, 166, 172, 174, 176, 178, —181, 184, 185, 194, 198—200, 203—209, 211, 212, 214, 217, 225, 229, 230, 232, 252, 294, 295, 317, 335—337, 341, 342, 344, 346, 347, 349, 351, 354, 355, 362, 364—366, 370—374, 376, 386, 387, 394, 396—398, 401, 403, 412, 413, 417, 422, 424, 425, 427, 430, 432, 434, 440
 Temperatur (des Trockenmittels, des Heizmittels, der Luft) 36, 103—112, 114, 116, 118, 203, 206; 207, 225, 226, 229, 238, 317, 456
 Thermometer 34, 78, 457
 Tiefdruck 395, 396
 Tomate 95
 Tonwaren s. Keramik
 Treber 365
 Trockengeschwindigkeit (s. a. Trockenzeit) 10, 12, 38, 52, 63, 65, 85, 90—94, 96, 97, 137, 196
 Trockenkraft 47—49, 59, 73, 103, 116, 125, 126, 140, 150, 152, 197, 199, 202—205, 207—212, 215—217, 220, 221, 225, 228, 229, 231, 357, 459, 460
 Trockenleistung 43, 48, 81, 85, 132, 133, 147—149, 155, 183, 209, 217, 228, 230, 352, 353, 359, 362, 365, 372, 385, 392, 394, 404, 407, 421—425, 427, 431—433, 456
 Trockenmittel (s. a. Heizmittel) 1—7, 92, 94, 97, 180, 229, 233, 284, 287, 288, 293
 Trockenofen 462, 463
 Trockenplatte s. photographische Platte
 Trockenpotential (s. a. Trockenkraft) 48, 65, 234—239, 243, 244, 246, 247
 Trockensäule s. Rieseltrockner
 Trockenturm 280
 Trockenverfahren 196, 197
 Trockenversuch 467, 468
 Trockenzeit (s. a. Trockengeschwindigkeit) 52, 65, 80, 84, 86, 104, 105, 108, 137, 153, 186, 200, 202, 204, 206, 209—211, 215, 217, 228, 337, 341, 342, 344, 346, 347, 354—358, 360, 362—367, 370, 373, 374, 376, 380, 382, 384, 385, 397, 401, 403, 413, 417, 431, 432, 434, 440
 Trockenzylinder s. Walzentrockner
 Trommeldarre s. Hordentrockner

- Trommeltrockner (s. a. Walzentrockner) 284—288, 299, 311—313, 329, 337, 347, 352, 355, 358—360, 364, 365, 371, 372, 374, 396—398, 412, 424, 427, 432—434, 440, 460
- Überdruck-Unterdruck 92, 117, 141, 189, 192, 251, 252, 266, 275, 314, 315, 472, 473
- Umhüllen (des Gutes) 261
- Umkehrbare Trocknung 25—29, 442
- Umluft s. Mischluft
- Unterdruck s. Überdruck (s. a. Vakuumtrockner)
- Vakuumtrockner 96, 97, 111, 112, 166, 168—170, 190—192, 313—319, 331, bis 337, 342, 344—347, 354, 355, 358, 382, 393, 394, 396—399, 416, 430 bis 433, 441, 450, 460, 461, 473
- Verdampfen (s. a. Eindampfen) 2, 5, 7—12, 24, 25, 165, 166, 168, 172, 180, 197, 314, 315, 331, 334
- Verdunsten 2—6, 8—12, 21—29, 33, 173
- Verdunstungszahl 70
- Verformen 91
- Verkrusten 11, 90, 99, 205, 206
- Verlust (s. a. Wärmeverlust) 251, 252
- Verschalen 91
- Vitamin 95—97
- vollkommen s. umkehrbar
- Walzentrockner 93, 96, 163, 164, 168 bis 171, 174, 197, 204, 232, 235—239, 299—306, 314, 316, 337, 344—348, 352, 353, 365, 387—389, 395, 396, 408, 410, 411, 430, 432, 457, 461
- Wärmebedarf 21—29
- Wärmeinhalt (des Gutes) 22
- Wärmeinhalt (des Trockenmittels, der Luft) 22, 77
- Wärmeschutz 170, 186—189, 225, 249, 256, 330, 435, 472
- Wärmespeicherung 171, 172, 186, 188, 189, 194
- Wärmetönung 466
- Wärmeübertragung 2, 6, 36, 45—88, 158—181, 184, 186, 216, 238, 239, 243, 300, 332, 333, 443, 466
- Wärmeverbrauch 6, 43—45, 88, 104 bis 111, 138, 141, 142, 149, 170, 183 bis 185, 194, 195, 198—201, 203, 204, 206, 209, 210, 212, 214, 217, 220, 224 bis 226, 230, 231, 257, 258, 337, 341, 344, 349, 350, 353, 355, 359, 360, 362, 363, 365, 372, 373, 382, 392, 393, 401, 403, 404, 406—408, 412, 415, 423 bis 427, 429—433, 435
- Wärmeverlust 21, 23—29, 44, 138—144, 185—189, 211, 453
- Wäsche 320, 409—412
- Wasserverhältnisse 88, 89
- Wetterfertiger s. Bewetterung
- Wetterverhältnisse 88, 89, 103, 104, 107, 108, 138, 170, 187, 213, 220, 225, 250, 258, 261, 272, 443
- Winkelmesser 44, 45
- Wirkungsgrad 29
- Wirkwaren s. Stoff
- Wolle 19, 93, 193, 233, 349—351
- Zähigkeit 90
- Zellstoff (s. a. Papier) 7, 16, 89, 100, 101, 386, 387, 393
- Zement 440, 441, 449
- Zersetzen 93, 94, 99, 342, 447
- Zerstäubungstrockner 94, 96, 153, 197, 235, 236, 294—299, 334, 337, 342, 344—346, 349, 350, 398, 401, 432, 433
- Ziegel 91, 94, 233, 237, 252, 272, 323, 434—439, 454
- Zucker 91, 194, 237, 396—398
- Zuckerrübe s. Rübe
- Zug 248—251
- Zustandspunkt (des Gutes) 37—40
- Zustandspunkt (der Luft) 30, 33, 36, 37
- Zyklon 449, 450
- Zylindertrockner s. Walzentrockner

Das Trocknen mit Luft und Dampf. Erklärungen, Formeln und Tabellen für den praktischen Gebrauch. Von Baurat E. Hausbrand †. Fünfte, stark vermehrte Auflage. Mit 6 Textfiguren, 9 lithographischen Tafeln und 35 Tabellen. VIII, 185 Seiten. 1920. Unveränderter Neudruck 1924. Gebunden RM 10.—

Der als hervorragender Spezialist auf dem Trocknungsgebiet bekannte Verfasser bietet eine Ableitung der für technische Trocknungsvorgänge maßgebenden Gesetzmäßigkeiten und grundlegenden praktischen Regeln. An ausführlichen Beispielen wird der Stoff anschaulich gemacht. Behandelt wird sowohl das Trocknen mit Luft als auch mit Dampf allein, sowie das Trocknen mit Feuergasen. Der Text wird durch eine große Anzahl von Tabellen und graphischen Darstellungen, die speziell für den praktischen Gebrauch zugeschnitten sind, ergänzt. Wertvolle Einzelerfahrungen aus der industriellen Praxis werden mitgeteilt. Das Hausbrandsche Buch wird seine Aufgabe, dem Trocknungstechniker Aufschluß über die Dimensionierung der Trockenanlagen, erforderlichen Wärmeaufwand und anzuwendende Luftvolumina zu geben, in bester Weise erfüllen. „Zeitschrift der deutschen Oel- und Fettindustrie.“

Verdampfen, Kondensieren und Kühlen. Von E. Hausbrand †. Siebente Auflage, unter besonderer Berücksichtigung der Verdampfungsanlagen vollständig neu bearbeitet von Dipl.-Ing. M. Hirsch, Beratender Ingenieur VBI. Mit 218 Textabbildungen. XVI, 359 Seiten. 1931. Gebunden RM 29.—

Die den drei Vorgängen: Verdampfen, Kondensieren und Kühlen gemeinsamen Grundbegriffe und die Gesetze der Strömung und Wärmeübertragung sind in den ersten Abschnitten behandelt; der theoretische und rechnerische Teil der Verdampfung bildet den Inhalt der folgenden Kapitel; im zweiten Buchteil geht der Verfasser ausführlich auf die praktische Ausführung und Anwendung von Verdampferanlagen ein. Daneben wird auch die Kondensation behandelt. Der Verfasser hat die Aufgabe, das Werk von Hausbrand in Einklang mit der modernen Forschung zu bringen, in bester Weise gelöst. Es ist ein für den Wärme- und Kälteingenieur gleich wertvolles Buch.

„Die Kälte-Industrie.“

Die Kältemaschine. Grundlagen, Berechnung, Ausführung, Betrieb und Untersuchung von Kälteanlagen. Von Dipl.-Ing. M. Hirsch, Beratender Ingenieur VBI. Zweite, verbesserte Auflage. Erscheint im Frühjahr 1932.

Zusammenfassende Darstellung aller die Kälteerzeugung und die Kälteanwendung betreffenden wissenschaftlichen Forschungsergebnisse und Anwendungen für die Berechnung und Untersuchung von Kälteanlagen bilden neben der Darstellung der Kältemaschine in ihren mannigfaltigen Anwendungs- und Ausführungsformen den Gegenstand dieses Werkes.

Die Lehre vom Trocknen in graphischer Darstellung. Von Karl Reyscher, Ingenieur. Zweite, verbesserte Auflage. Mit 34 Textabbildungen. IV, 74 Seiten. 1927. RM 4.50

Theorie der Heißlufttrockner. Ein Lehr- und Handbuch für Trocknungstechniker, Besitzer und Leiter von gewerblichen Anlagen mit Trockenvorrichtungen. Für den Selbstunterricht bearbeitet von W. Schule. Mit 34 Textfiguren und 9 Tabellen. IV, 174 Seiten. 1920. Unveränderter Neudruck 1921. RM 5.50

Neue Tabellen und Diagramme für Wasserdampf. Von Professor Dr. R. Mollier, Dresden. Sechste, durchgesehene Auflage. Mit 2 Diagrammtafeln. 28 Seiten. 1929. Unveränderter Neudruck 1930. RM 2.70

IS-Diagramm für Wasserdampf. Von Professor Dr. R. Mollier, Dresden. (Aus: „Mollier, Neue Tabellen und Diagramme für Wasserdampf“, 6. Auflage.) Neudruck 1931. Zweifarbig RM —.75; Einfarbig RM —.75

IS-Tafel für Wasserdampf, berechnet und aufgezeichnet von Professor A. Bantlin, Stuttgart. Vierte, unveränderte Auflage. 1928. RM 1.50

IS-Tafel für Wasserdampf. (Sonderausgabe von „Stodola, Dampf- und Gasturbinen“, sechste Auflage.) In doppelter Größe der Buchbeilage. 1924. Unveränderter Neudruck 1926. RM 1.20

Ix-Tafeln feuchter Luft und ihr Gebrauch bei der Erwärmung, Abkühlung, Befeuchtung, Entfeuchtung von Luft, bei Wasserrückkühlung und beim Trocknen. Von Dr.-Ing. M. Grubenmann, Zürich. Mit 45 Textabbildungen und 3 Diagrammen auf zwei Tafeln. IV, 46 Seiten. 1926. RM 10.50

Die Entropietafel für Luft und ihre Verwendung zur Berechnung der Kolben- und Turbo-Kompressoren. Von Dipl.-Ing. P. Ostertag, Direktor des kant. Technikums Winterthur. Dritte, verbesserte Auflage. Mit 21 Textabbildungen und 2 Diagrammtafeln. IV, 48 Seiten. 1930. RM 6.—

Hilfsbuch für den Apparatebau. Von Baurat E. Hausbrand †. Dritte, stark vermehrte Auflage. Mit 56 Tabellen und 161 Textfiguren. V, 132 Seiten. 1919. Unveränderter Neudruck 1924. Gebunden RM 4.50

Handbuch zum Dampfpaß- und Apparatebau. Von Ing. G. Hönnicke. Mit 213 Textabbildungen und 114 Zahlentafeln. VII, 209 Seiten. 1924. Mit Nachtrag gebunden RM 16.—
Nachtrag. 24 Seiten. 1927. Einzeln RM 1.—

Die Wirkungsweise der Rektifizier- und Destillier-Apparate. Mit Hilfe einfacher mathematischer Betrachtungen dargestellt. Von Baurat E. Hausbrand †. Vierte, völlig neubearbeitete und sehr vermehrte Auflage. Mit 14 Textfiguren, 16 lithographischen Tafeln und 68 Tabellen. X, 270 Seiten. 1921. Gebunden RM 14.—

Diagramme und Tabellen zur Berechnung der Absorptions-Kältemaschinen. Von Dr.-Ing. Fr. Merkel, a. o. Professor an der Technischen Hochschule Dresden, und Dr.-Ing. Fr. Bošnjaković, Dresden. Mit 30 Textabbildungen und 4 Diagrammen auf Tafeln. V, 43 Seiten. 1929. RM 12.—

Kälteprozesse. Dargestellt mit Hilfe der Entropie-Tafel. Von Professor Dipl.-Ing. P. Ostertag, Winterthur. Mit 58 Textabbildungen und 3 Tafeln. II, 118 Seiten. 1924. Gebunden RM 6.80

Haushalt-Kältemaschinen. Von Professor Dr.-Ing. R. Plank, Direktor des Kältetechnischen Instituts an der Technischen Hochschule Karlsruhe. Mit 68 Textabbildungen. V, 96 Seiten. 1928. RM 7.50

Die Wärmeübertragung. Ein Lehr- und Nachschlagebuch für den praktischen Gebrauch. Von Professor Dipl.-Ing. M. ten Bosch, Zürich. Zweite, stark erweiterte Auflage. Mit 169 Textabbildungen, 69 Zahlentafeln und 53 Anwendungsbeispielen. VIII, 304 Seiten. 1927. Gebunden RM 22.50

Einführung in die Lehre von der Wärmeübertragung. Ein Leitfaden für die Praxis. Von Dr.-Ing. Heinrich Gröber. Mit 60 Textabbildungen und 40 Zahlentafeln. X, 200 Seiten. 1926. Gebunden RM 12.—

Über Wärmeleitung und andere ausgleichende Vorgänge. Von Professor Dr. Emil Warburg, Berlin. Mit 18 Abbildungen. X, 106 Seiten. 1924. RM 5.70

Lehrbuch der Thermochemie und Thermodynamik. Von Otto Sackur †. Zweite Auflage von Cl. von Simson, Berlin. Mit 58 Abbildungen. XVI, 347 Seiten. 1928. RM 18.—

Anwendung der Thermodynamik. Redigiert von F. Henning. (Handbuch der Physik, Bd. XI.) Mit 198 Abbildungen. VII, 454 Seiten. 1926. RM 34.50; gebunden RM 37.20

Thermodynamik der Erzeugung des elektrischen Stromes. Von Professor Dr. W. Jaeger, Charlottenburg. — Wärmeleitung. Von Professor Dr. M. Jakob, Charlottenburg. — Thermodynamik der Atmosphäre. Von Professor Dr. A. Wegener, Graz. — Hygrometrie. Von Dr. M. Robitzsch, Lindenbergl. — Erzeugung tiefer Temperaturen und Gasverflüssigung. Von Dr. W. Meißner, Berlin. — Erzeugung hoher Temperaturen. Von Dr. C. Müller, Charlottenburg. — Wärmeumsatz bei Maschinen. Von Professor Dr. K. Neumann, Hannover.

Berl-Lunge, Taschenbuch für die anorganisch-chemische Großindustrie.

Herausgegeben von Prof. Ing. Chem. Dr. phil. E. Berl, Darmstadt. Siebente, umgearbeitete Auflage. 1930.

Erster Teil: Text. Mit 19 Textabbildungen. XIX, 402 Seiten. Gebunden.

Zweiter Teil: Nomogramme. Mit einem Lineal. 4 Seiten Text und 31 Tafeln. In Mappe. Text und Nomogramme zusammen RM 37.50

Die siebente Auflage des „Taschenbuches“ weist eine ganz wesentliche Erweiterung auf: es wurde ein zweiter Teil hinzugefügt, der auf 31 Tafeln Nomogramme für die verschiedensten Hilfsrechnungen enthält. Für viele, oft notwendige Berechnungen, wie Umwandlung von Grad Celsius in Fahrenheit, Zurückführung von Gasvolumen auf Normalbedingungen, Berichtigung der Dichte von Schwefelsäuren nach der Temperatur u. a., sind Darstellungen mit Doppelleitern benutzt, die ohne weiteres geläufig sind. Außerdem sind Dreileiternomogramme und Berechnungen mit Hilfe des Gibbs'schen Dreiecks aufgenommen. Auch der Textteil des Taschenbuches ist erheblich erweitert worden. Die Angaben im Sonderteil, z. B. Schwefelsäureherstellung, Sodaherstellung, Salpeterherstellung u. a., sind vermehrt und praktischer gestaltet worden. Diese Erweiterungen machen das Buch außerordentlich wertvoll für den Gebrauch im Fabrikbetrieb und in den Laboratorien.

„Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure.“

Waeser-Dierbach, Der Betriebs-Chemiker.

Ein Hilfsbuch für die Praxis des chemischen Fabrikbetriebes. Von Chemiker Dr.-Ing. Bruno Waeser, Magdeburg. Vierte, ergänzte Auflage. Mit 119 Textabbildungen und zahlreichen Tabellen. XI, 340 Seiten. 1929. Gebunden RM 19.50

Luftbehandlung in Industrie- und Gewerbebetrieben.

Be- und Entfeuchten, Heizen und Kühlen. Von Dipl.-Ing. L. Silberberg. Mit 96 Textabbildungen und einer Mollierschen *Ix*-Tafel für feuchte Luft. Etwa 170 Seiten. Erscheint im Dezember 1931.

Schädliche Gase.

Dämpfe, Nebel, Rauch- und Staubarten. Von Ferdinand Flury und Franz Zernik, Würzburg. Mit autorisierter Benutzung des Werkes: Noxious Gases von Henderson und Haggard. Mit 80 Abbildungen. XII, 637 Seiten. 1931. RM 66.—; gebunden RM 69.—

Einführung in die technische Behandlung gasförmiger

Stoffe. Von Dipl.-Ing. Dr. phil. W. Bertelsmann und Dr.-Ing. F. Schuster. Mit 288 Abbildungen im Text. X, 411 Seiten. 1930.

RM 38.—; gebunden RM 40.—

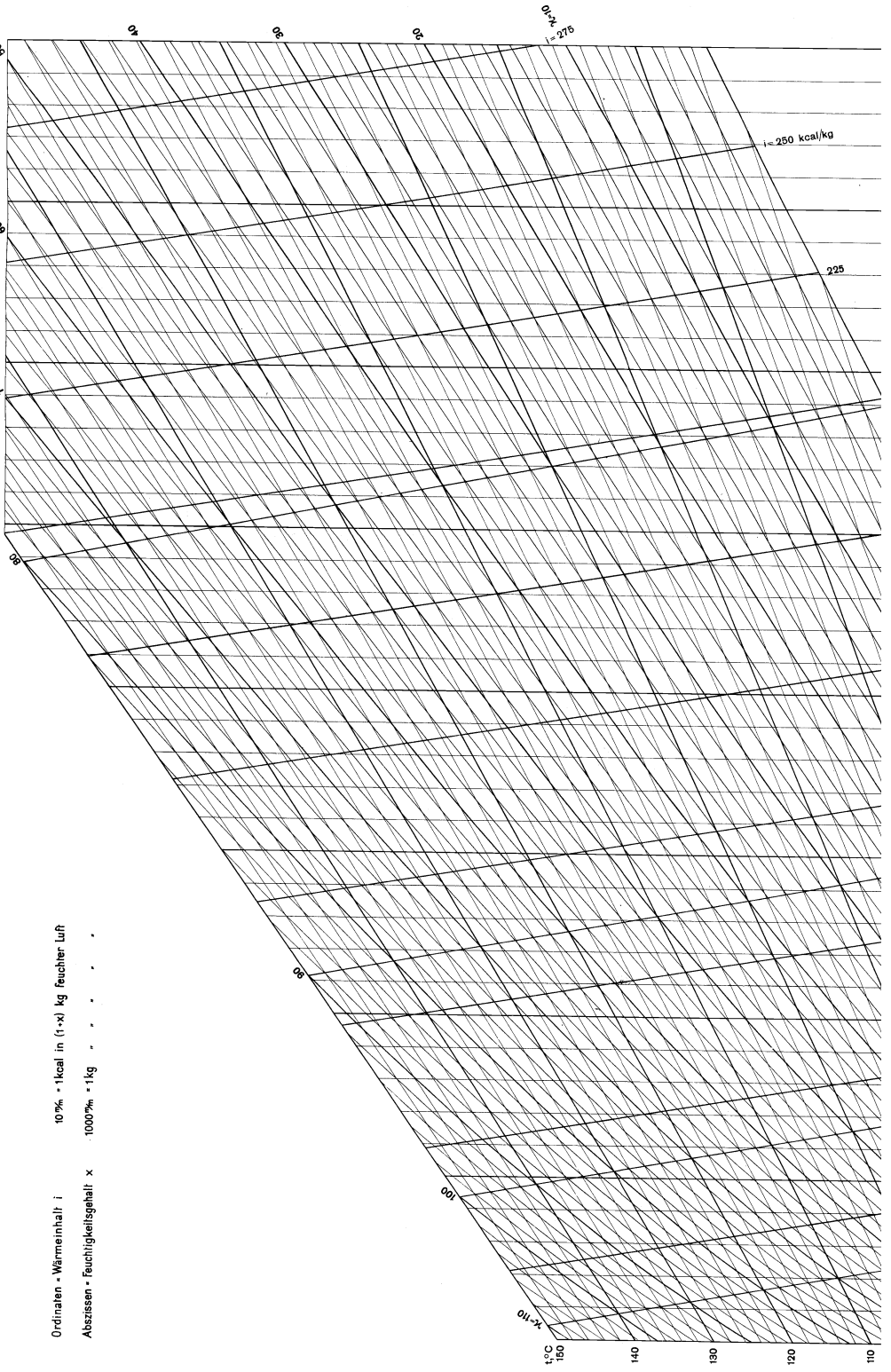
Technische Wärmelehre der Gase und Dämpfe.

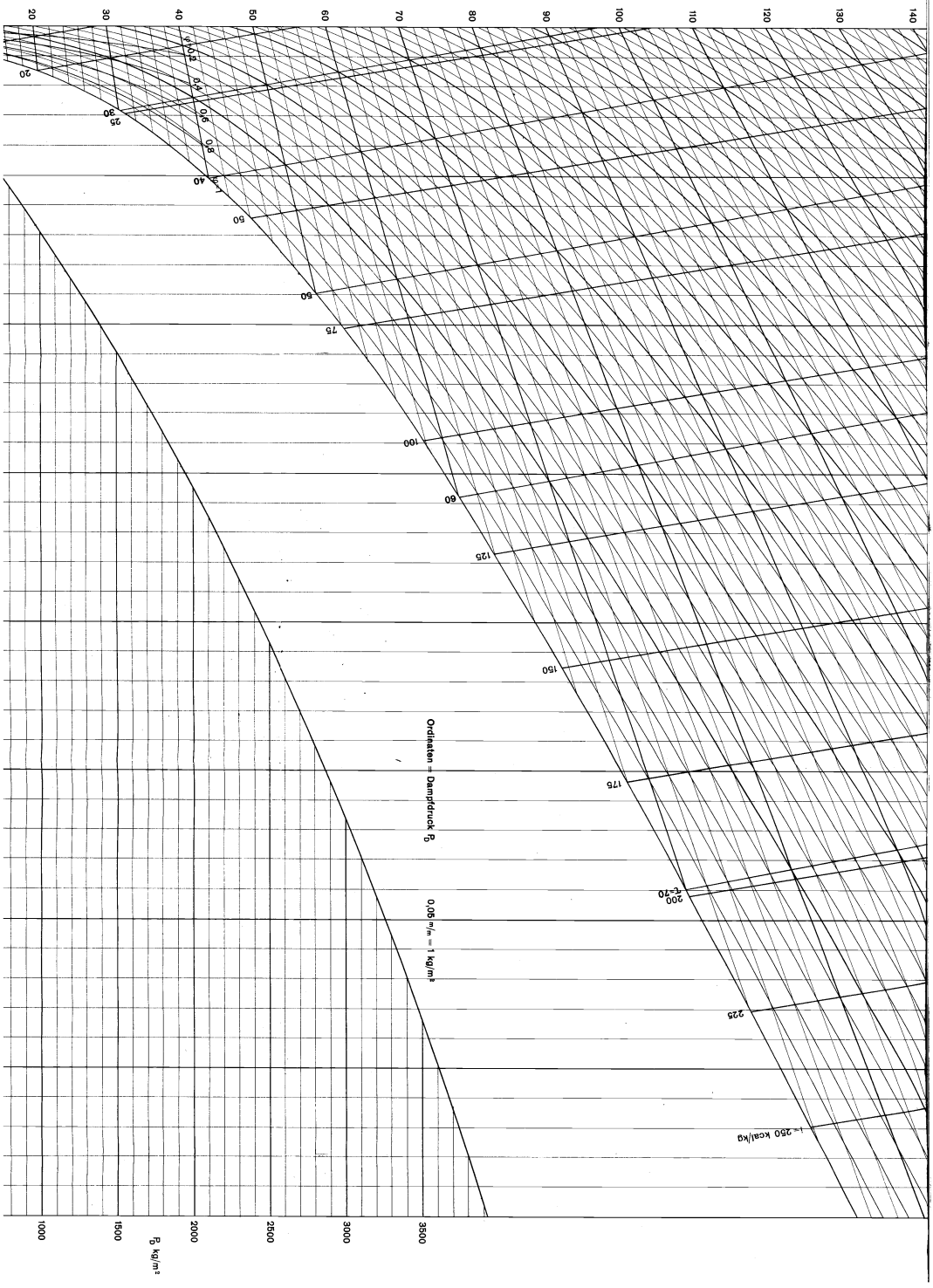
Eine Einführung für Ingenieure und Studierende. Von Dipl.-Ing. Franz Seufert, Oberingenieur für Wärmewirtschaft. Vierte, verbesserte Auflage. Mit 27 Textabbildungen und 5 Zahlentafeln. IV, 86 Seiten. 1931. RM 3.—

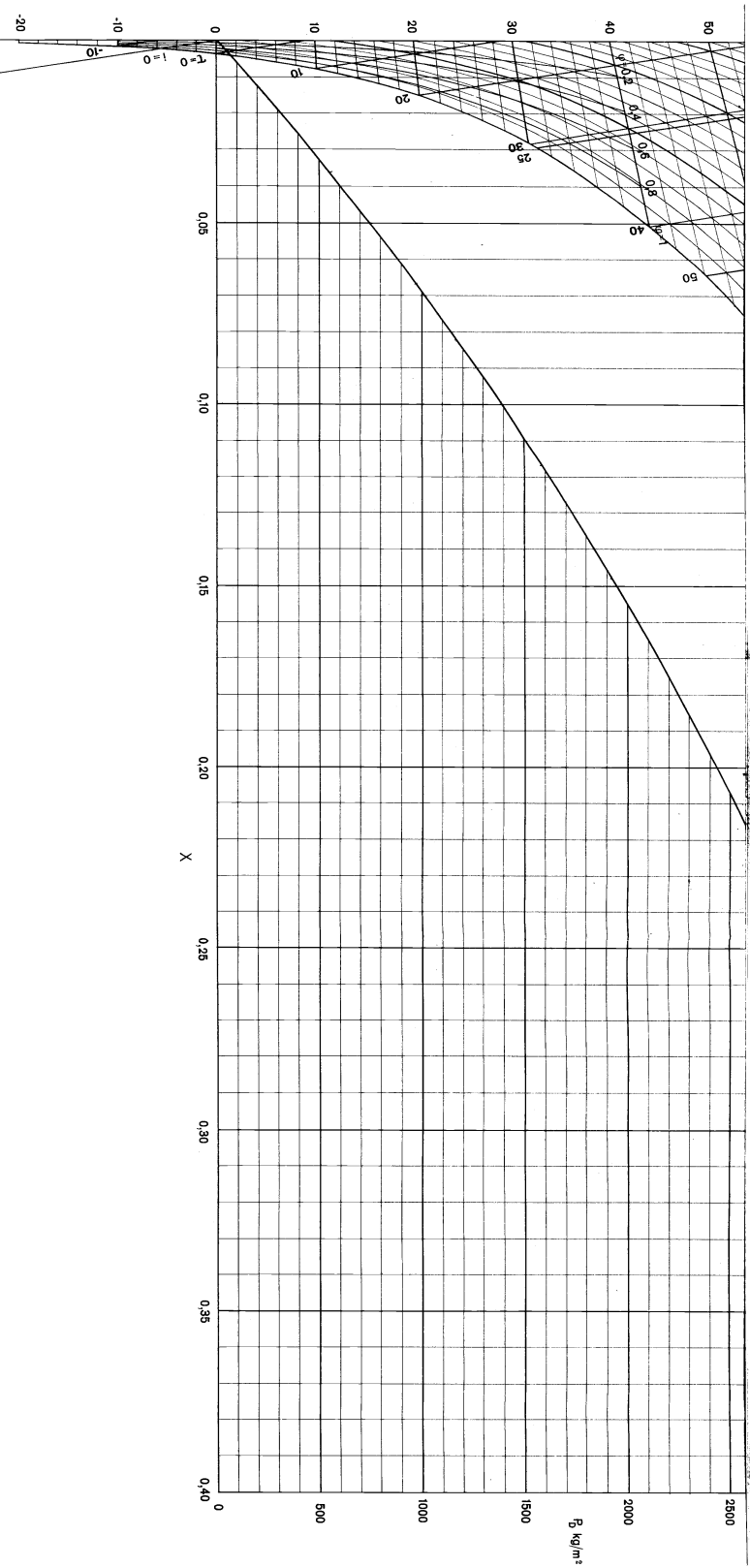
i-x-Bild für feuchte Luft

Tafel III

Ordinaten = Wärmehalt i 10% = 1kcal in (1+x) kg feuchter Luft
 Abszissen = Feuchtigkeitsgehalt x 1000% = 1kg



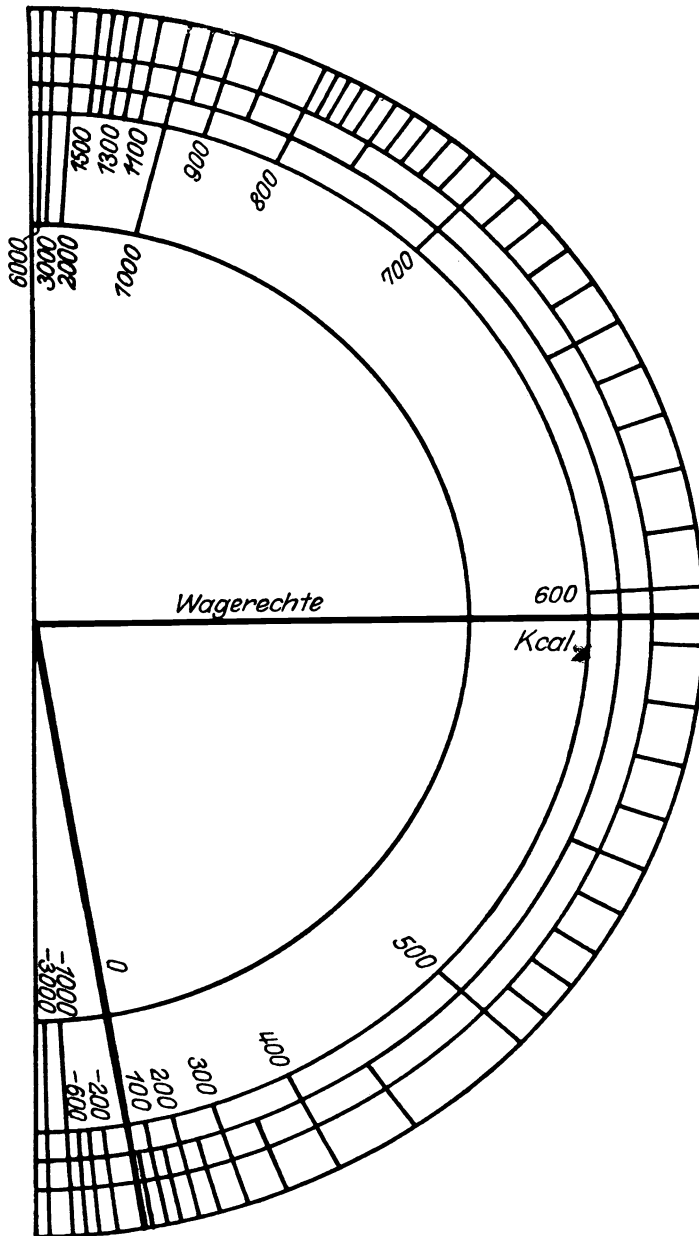




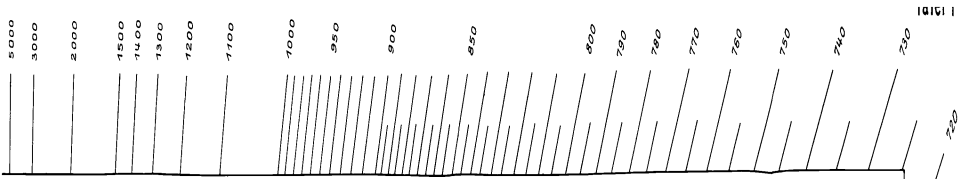
Hirsch, Trockentechnik, 2. Aufl.

Verlag von Julius Springer in Berlin

F. Ullmann G. m. b. H. Zehden I. See.



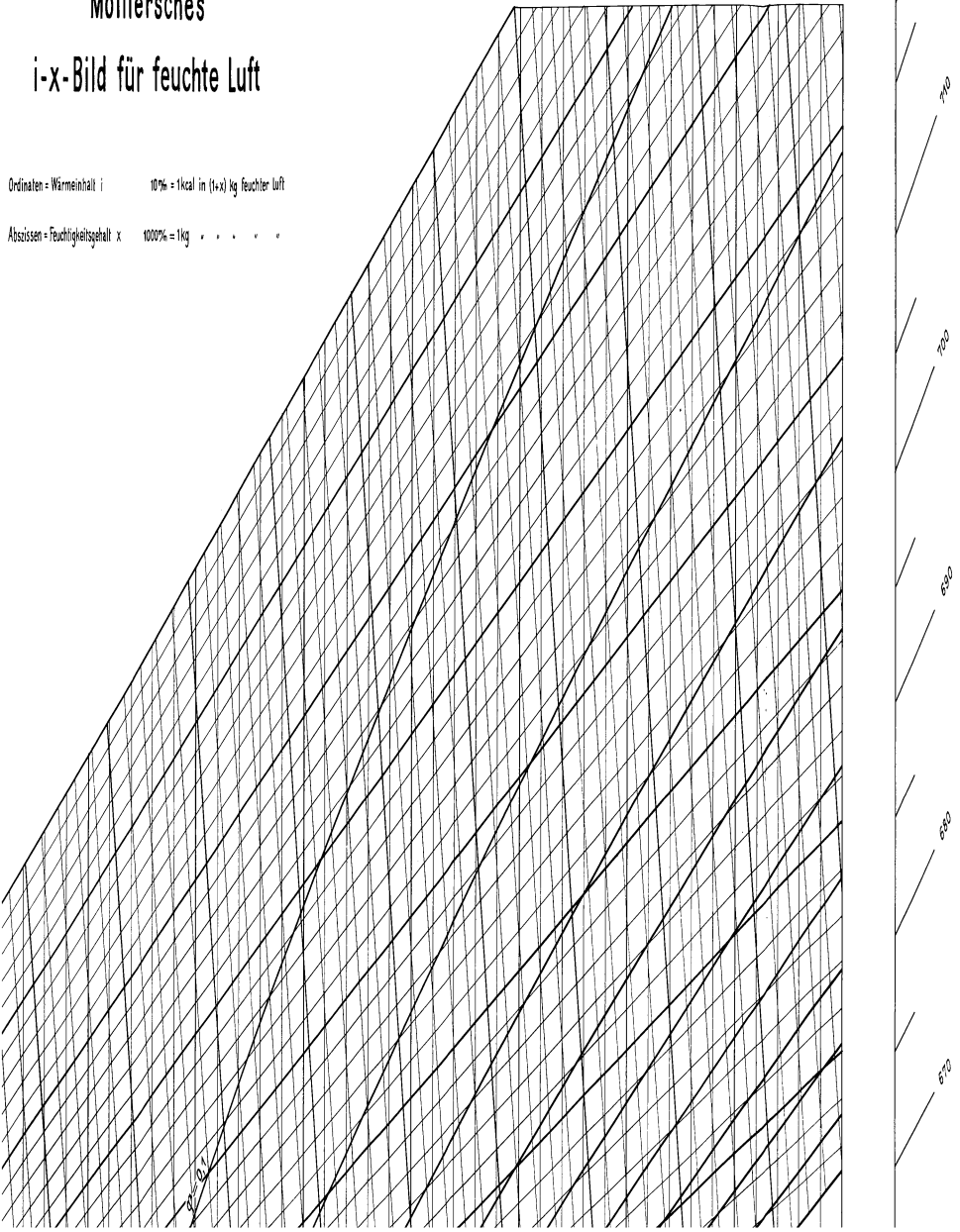
Winkelmesser für Tafeln I und III zur Ermittlung des spezifischen Wärmeverbrauchs ($\text{tg } \alpha = 5,95$).

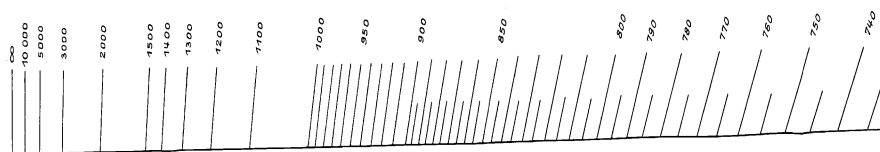


Molliersches i-x-Bild für feuchte Luft

Ordinalen = Wärmehalt i $10\% = 1 \text{ kcal in } (1+x) \text{ kg feuchter Luft}$

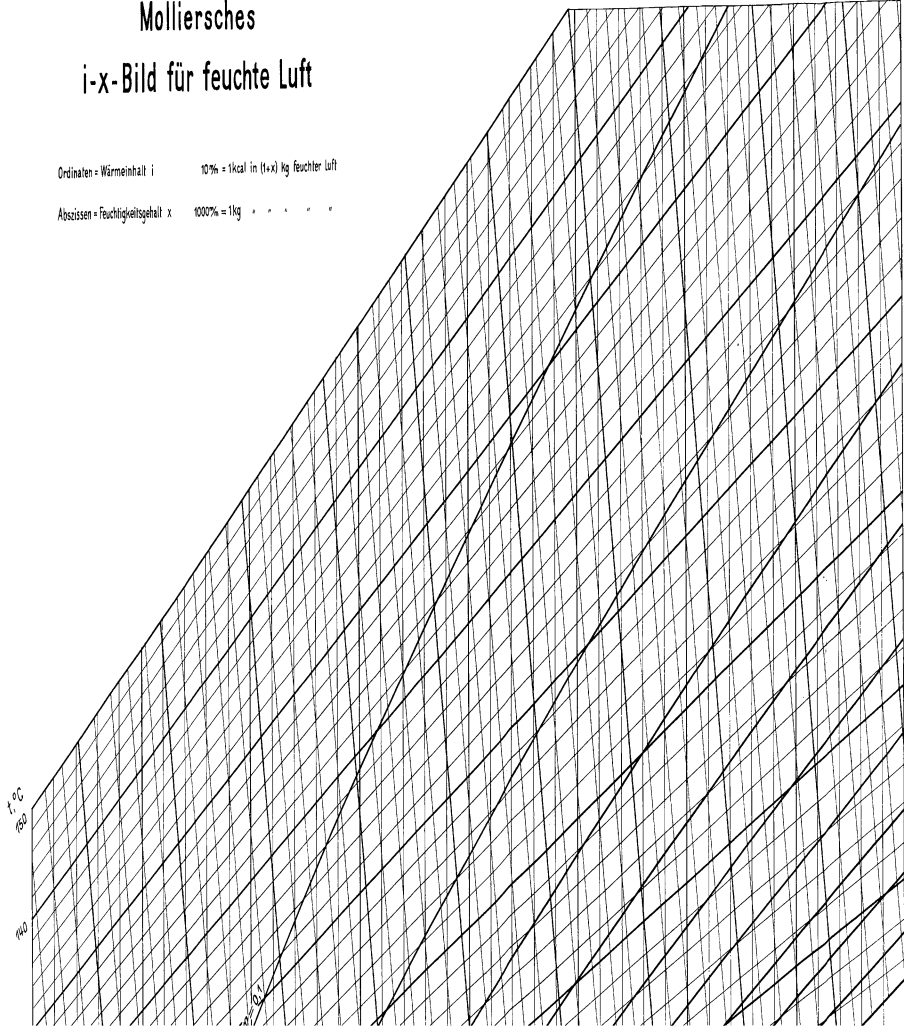
Abszissen = Feuchtigkeitsgehalt x $1000\% = 1 \text{ kg} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot$

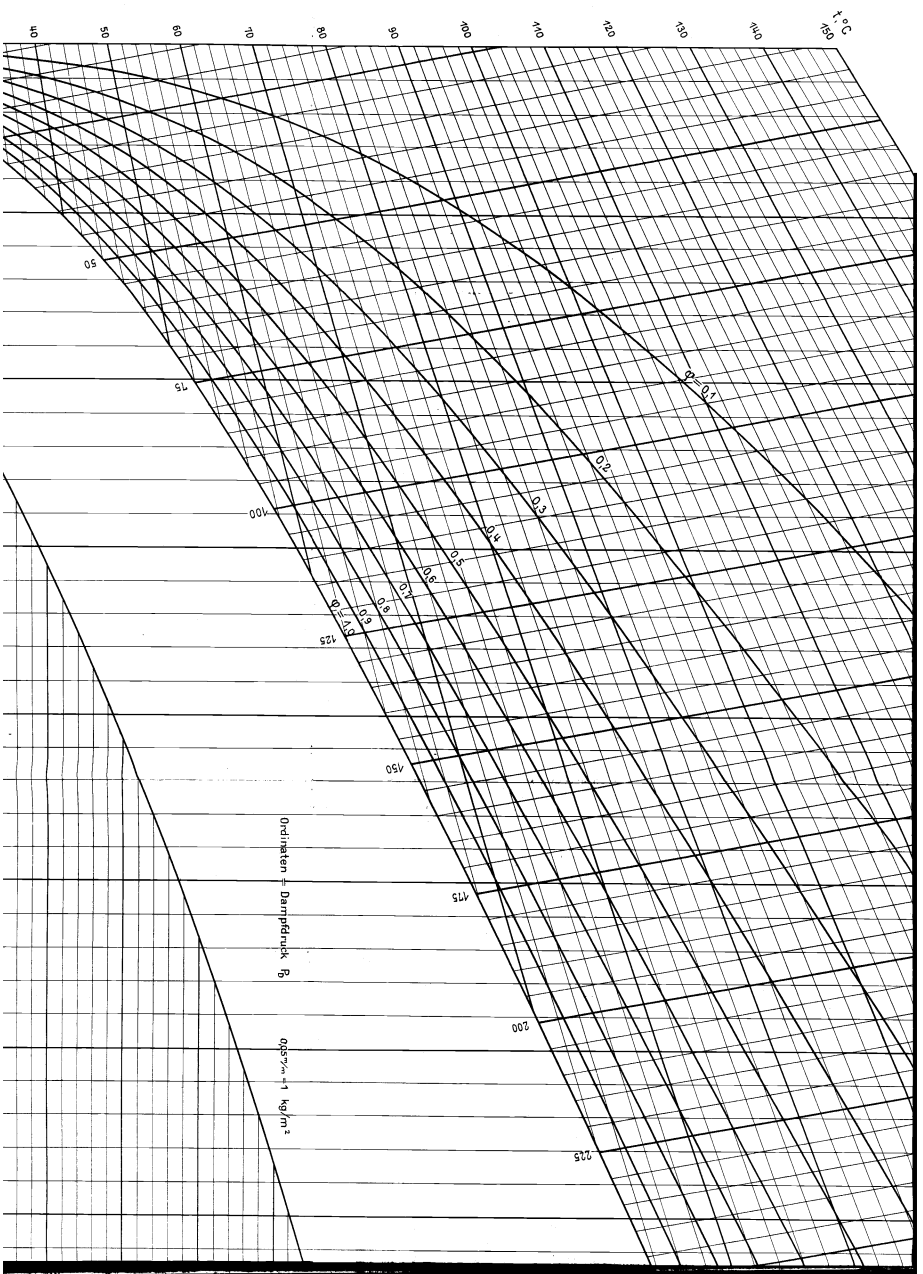


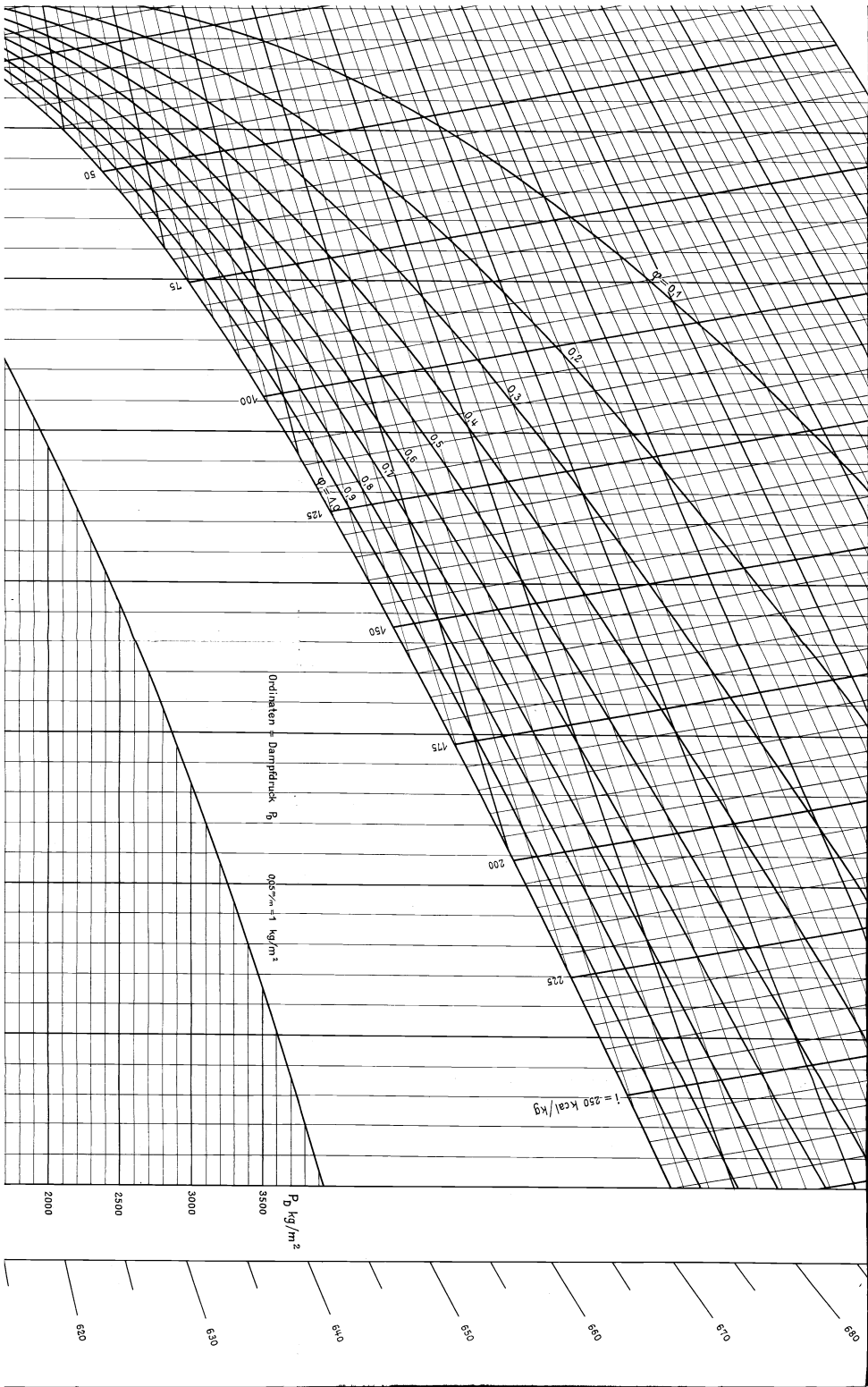


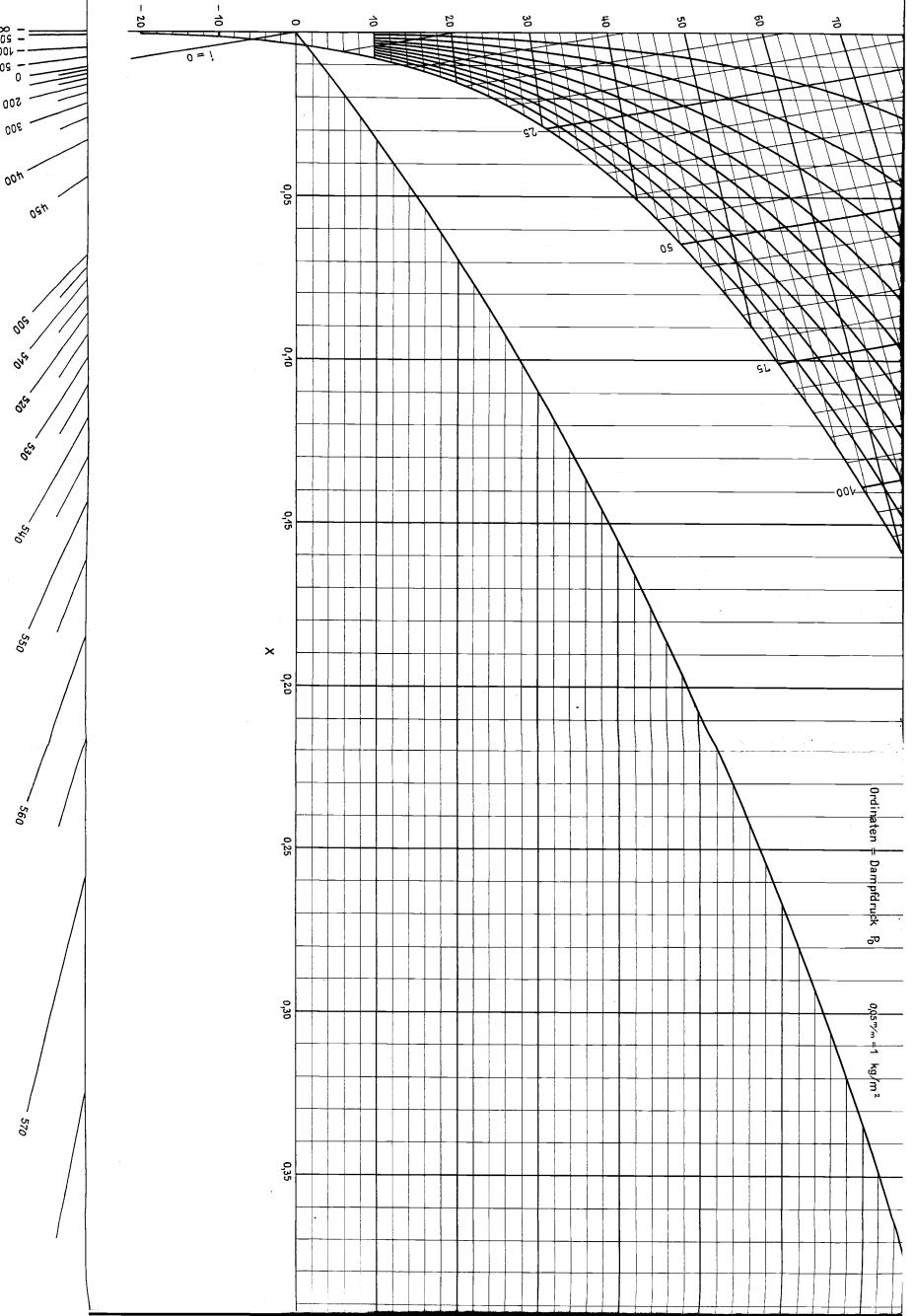
Mollersches i-x-Bild für feuchte Luft

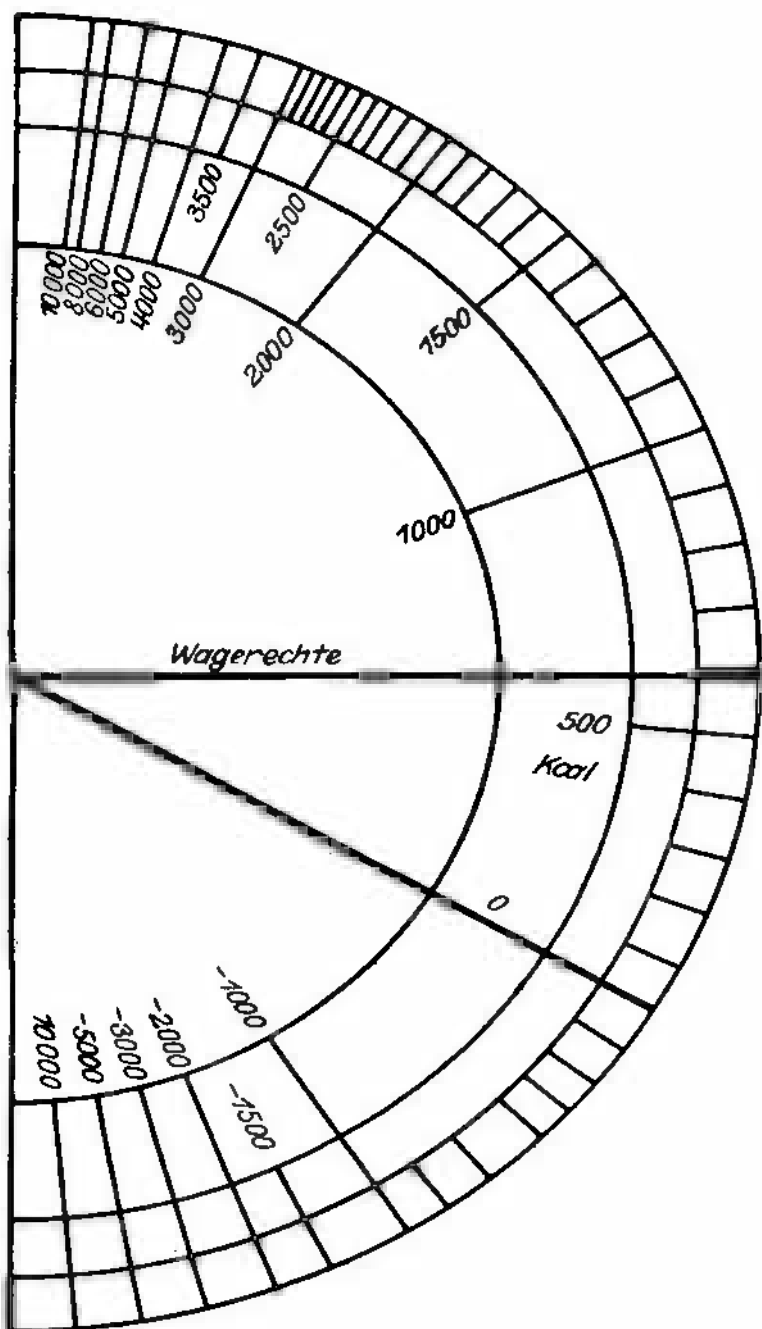
Ordinaten = Wärmehalt i 10% = 1kcal in (1+x) kg feuchter Luft
 Abszissen = Feuchtigkeitsgehalt x 1000% = 1kg







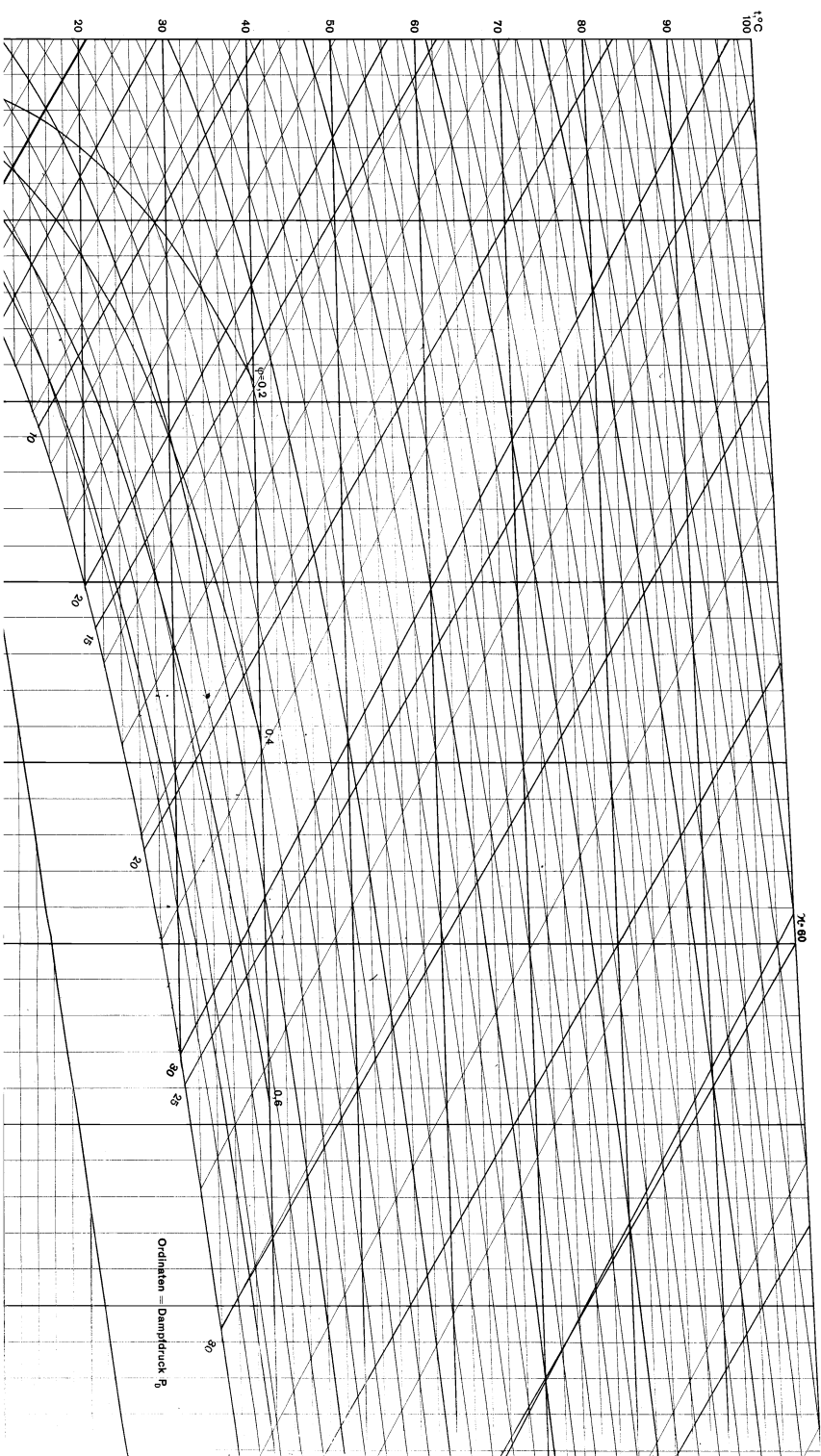




Winkelmesser für Tafel II zur Ermittlung des spezifischen Wärmeverbrauchs
($\text{tg } \alpha = 0,596$).

i-x-Bild für feuchte Luft

Ordinaten = Wärmehalt i 10% = 1 kcal in (1-x) kg feuchter Luft
Abszissen = Feuchtigkeitsgehalt x 10000% = 1 kg

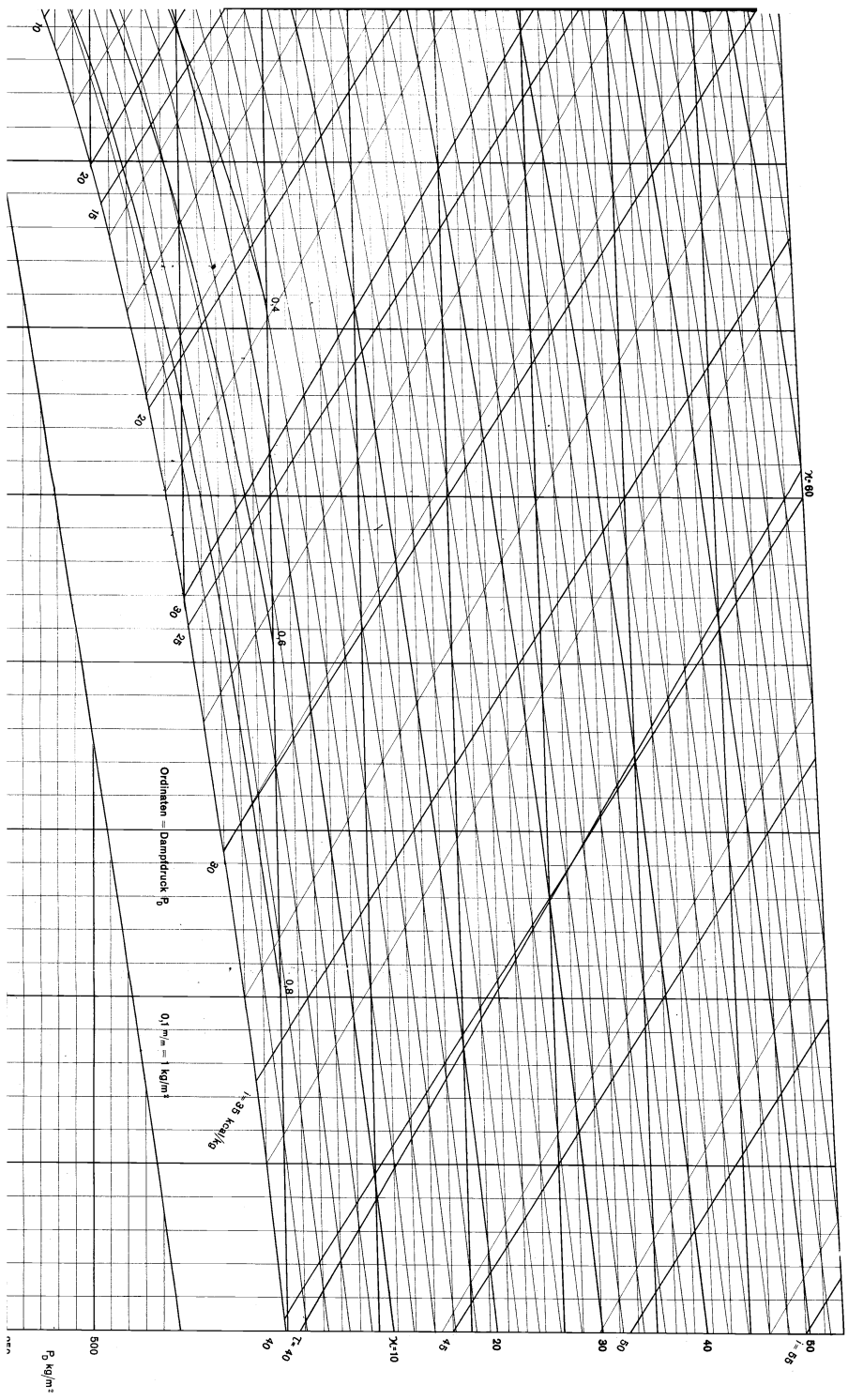


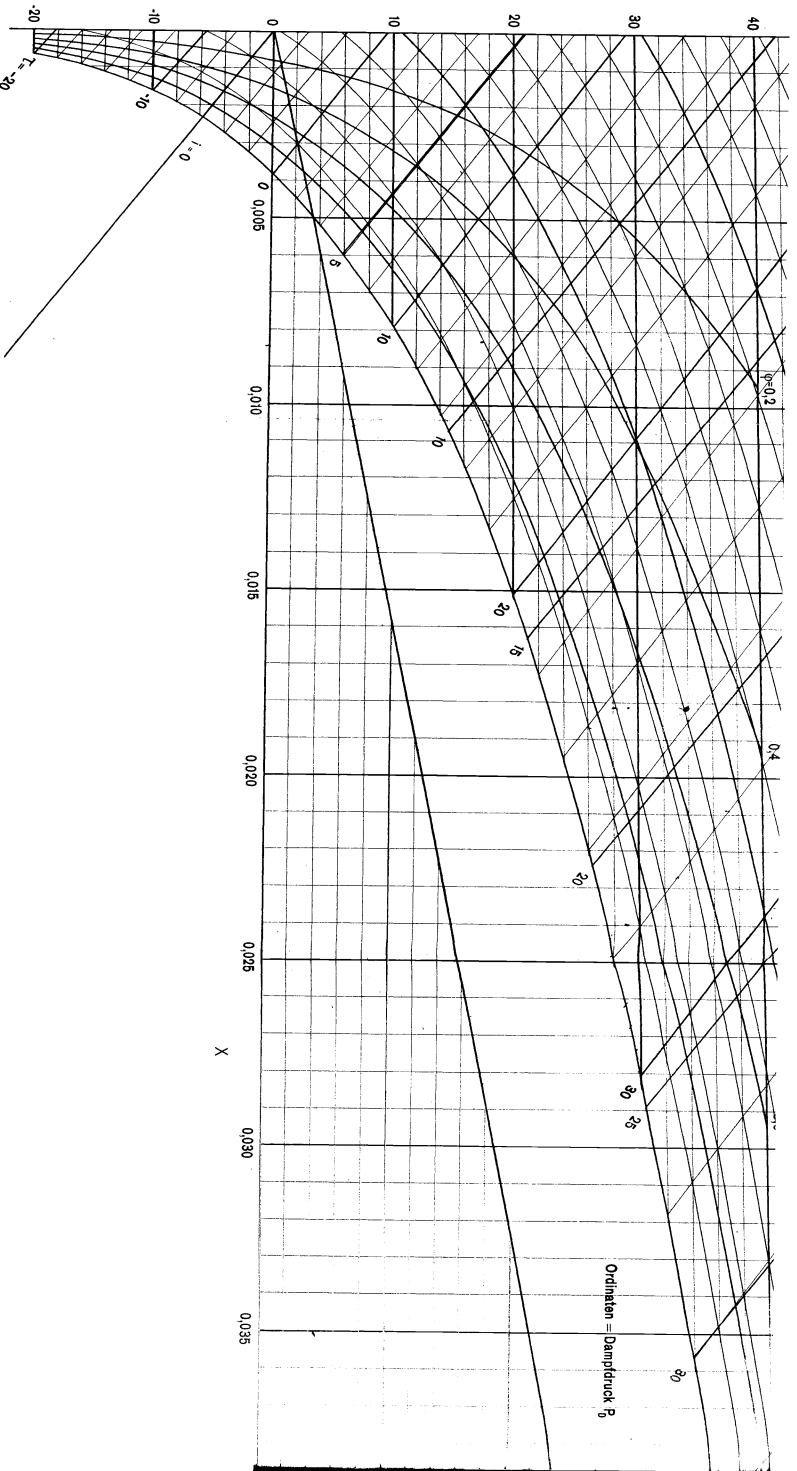
für feuchte Luft

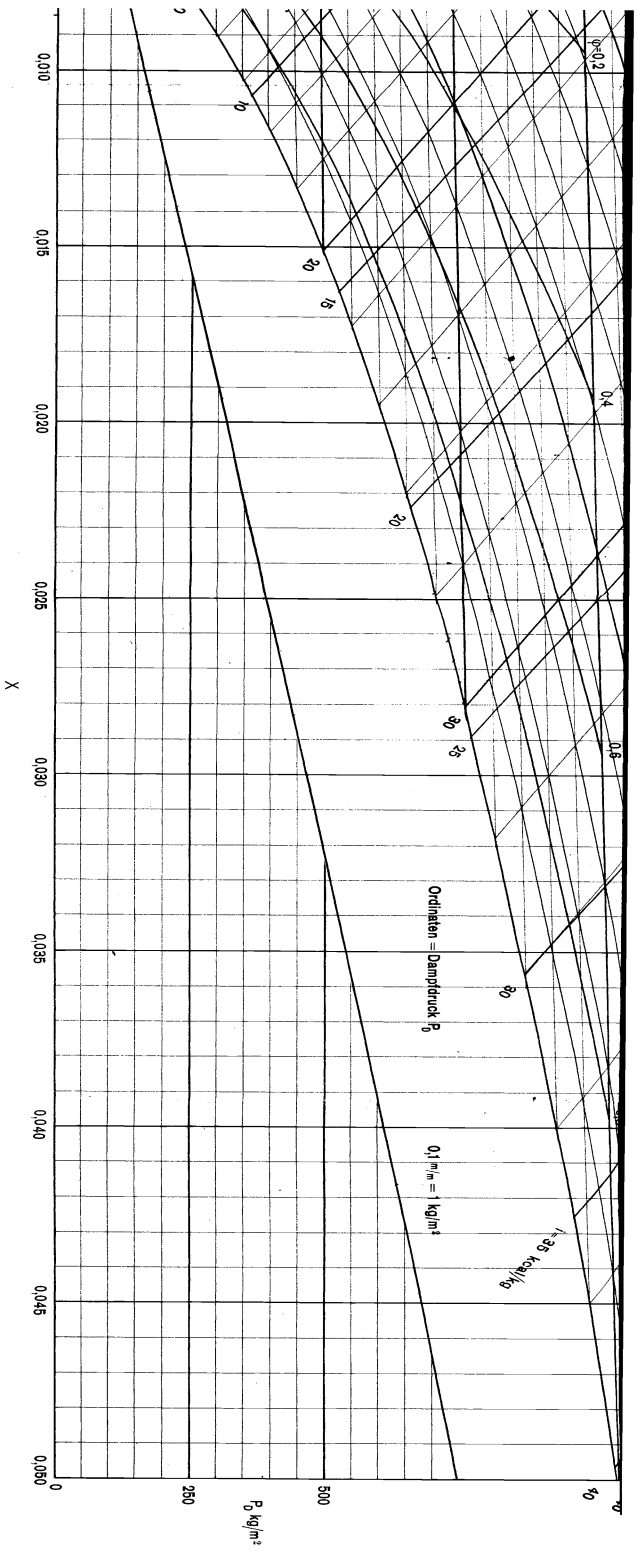
Tafel II

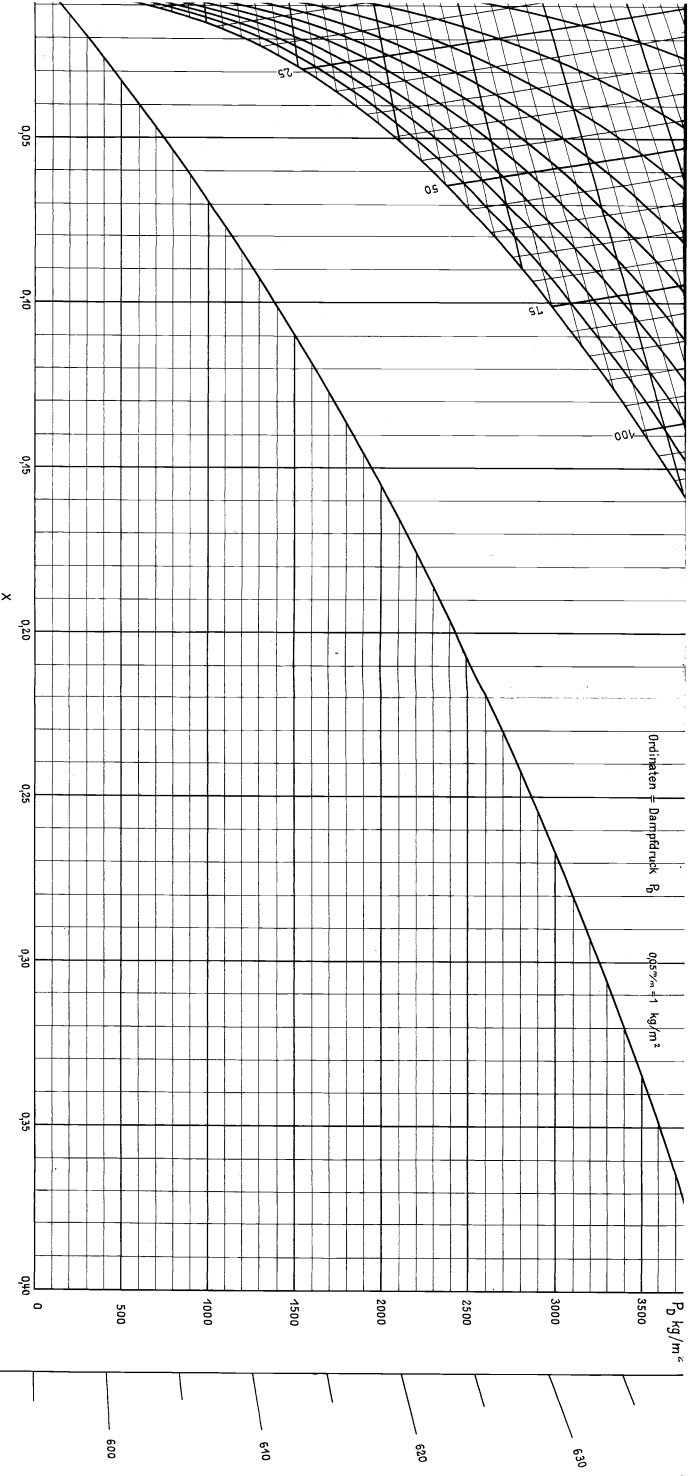
10% • Kcal in (1-x) kg feuchter Luft

x 10000% = 1kg



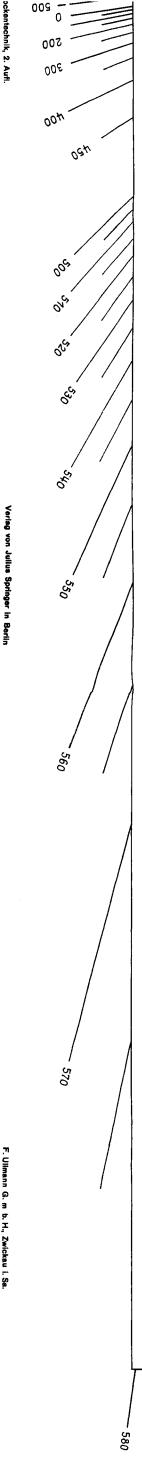






Ordnungen = Dampfdruck p_p

$0.025 \cdot \rho_m + 1 \text{ kg/m}^3$



Verteilung von Luftdichte in Berlin

F. Ullmann G. m. b. H., Zweibrück I. Str.

Abkürzung der Quellenangaben.

Am. Soc. Mech. Eng.	Journal of the American Society of Mechanical Engineers.
Ann. d. Physik	Annalen der Physik.
Arch. Wärmewirtsch.	Archiv für Wärmewirtschaft und Dampfkesselwesen.
Chem. Apparatur	Chemische Apparatur.
Ges.-Ing.	Gesundheits-Ingenieur.
Heat. Pip. and Air Conditg.	Heating Piping and Air Conditioning.
J. Agr. Research	Journal of Agricultural Research.
J. Am. Leather C. A.	Journal of the American Leather Chemists Association.
J. Ind. Engg. Chem.	Journal of Industrial and Engineering Chemistry.
J. Inst. Brewing	Journal of the Institute of Brewing.
J. Soc. Aut. Eng.	Journal of the Society of Automotive Engineers.
J. Soc. Chem. Ind.	Journal of the Society of Chemical Industry.
Mech. Engg.	Mechanical Engineering.
Mitt. d. D. L. G.	Mitteilungen der Deutschen Landwirtschaftsgesellschaft.
Phys. Rev.	Physical Review
Refr. Engg.	Refrigerating Engineering.
Svensk Pappers Tidning	Svensk Pappers Tidning
Techn. Mech. Therm.	Zeitschrift für Technische Mechanik und Thermodynamik.
U. S. A. Dept. Agr. Bull.	United States Departement of Agriculture Bulletin.
W. f. Pap.	Wochenblatt für Papierfabrikation.
Wschr. Brauerei.	Wochenschrift für Brauereien.
Z. ang. Chem.	Zeitschrift für angewandte Chemie.
Z. ang. Math. Mech.	Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik.
Z. Bayer. Rev. Ver.	Zeitschrift des Bayerischen Revisionsvereins.
Z. ges. Kälteind.	Zeitschrift für die gesamte Kälteindustrie.
Z. ges. Turbinenwesen	Zeitschrift für das gesamte Turbinenwesen.
Z. öst. Ing. V.	Zeitschrift des österreichischen Ingenieur- u. Architektenvereins.
Z. techn. Phys.	Zeitschrift für technische Physik.
Z. V. d. I.	Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure.

Berichtigungen.

- S. 47, Z. 12 v. o.: „positiv“ statt „negativ“.
- S. 52, Fußnote 1: „Kreuzstromwärmeaustauscher“ statt „Gleichstromwärmeaustauscher“.
- S. 70, Z. 15 v. o.: C_p statt c_p .
- S. 81, Z. 4 v. u.: k' statt k .
- S. 130, Z. 12 v. u.: \mathcal{C}_r statt c_r .
- S. 149, Z. 5 v. o.: „Ermittelung“ statt „Trmittlung“.
- S. 160, Z. 13 v. o.: „umgeformt“ statt „ungeformt“.
- S. 161, Z. 15 v. o.: $\frac{d^3 \cdot \gamma_m^2 \cdot \beta_m (t_i - \vartheta)}{g \cdot \mu_m^2}$ statt $\frac{d^3 \cdot \gamma_m^2 \cdot \beta_m (t_i - \vartheta)}{g_m^2}$.
- S. 183, letzte Z. v. u.: k' statt k .
- S. 318, Z. 2 v. u.: „Vakuumentrocknern“ statt „Vakkumentrocknern“.
- S. 385, Z. 16 v. o.: m^3/h statt m^3 .
- S. 394, Z. 8 v. u.: kg/m^2 statt kg/m .