

FRIEDRICH KNEULE

DAS TROCKNEN

GRUNDLAGEN DER CHEMISCHEN TECHNIK

FRIEDRICH KNEULE

DAS TROCKNEN

GRUNDLAGEN DER CHEMISCHEN TECHNIK

Verfahrenstechnik der chemischen und verwandter Industrien

Herausgegeben von Prof. Dr. Hermann Mohler, Zürich

Prof. Dr.-Ing. Otto Fuchs, Konstanz

Dr.-Ing. Hermann Kraussold, Ingelheim am Rhein

Prof. Dr. Kurt Dialer, München

Das Trocknen

von Dr.-Ing. Friedrich Kneule

em. o. Professor an der Technischen Universität München

Mit 535 Abbildungen

Verlag Sauerländer Aarau und Frankfurt am Main

Dritte, überarbeitete Auflage

ISBN 3-7941-0429-3
Buchbestellnummer 08 00429

Copyright © 1975 by Sauerländer AG, Aarau (Schweiz)

Printed in Switzerland. Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf in irgendeiner Form (durch Photokopie, Mikrofilm oder irgendein anderes Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlags reproduziert werden.

All rights reserved (including those of translations into foreign languages).

No part of this book may be reproduced in any form (by photostat, microfilm, or any other means) without written permission from the publishers.

Herstellung: Sauerländer AG, Aarau

Vorwort der Herausgeber

Fast zwanzig Jahre sind vergangen, seit die ersten Bände der Buchreihe «Grundlagen der chemischen Technik» erschienen sind. Dieser Zeitraum entspricht in der Fülle neuer naturwissenschaftlicher Erkenntnisse ganz allgemein und der Entwicklung der chemischen Technik im besonderen einem ganzen Menschenalter, verglichen mit früheren Dezennien. Kaum noch der Zeitschriftenaufsatz kann diesem Tempo folgen, und die wachsende Zeitschriftenflut ist auch in engeren Fachbereichen schwer mehr zu bewältigen. Man möchte also dem technisch-wissenschaftlichen Buch wenig Überlebenschancen geben. Um so erfreulicher ist es, daß mehrere der in den ersten Jahren erschienenen Bände neu herausgekommen sind, umgearbeitet und ergänzt, im ganzen aber doch unter Wahrung des ursprünglichen Aufbaus und Umfangs. Es ist also gelungen, Grundlagen und Teilgebiete der Verfahrenstechnik so darzustellen, daß sie Fundamente für Neuentwicklungen bilden und Vorstöße in Neuland anregen können.

Unsere Buchreihe «Grundlagen der chemischen Technik» sieht vor, wie wir das im Vorwort zum Erscheinen der ersten Bände herausgestellt hatten, die Grundlagen physikalischer und chemischer Art, die Meß- und Regelungstechnik, Werkstofftechnik und das große Gebiet der Betriebstechnik zu behandeln, das einerseits in physikalische Verfahrensstufen und andererseits in chemische Grundverfahren gegliedert werden kann. Die Herausgeber sind sich darüber klar, daß ein systematischer Ausbau der Reihe, wie ihn ein umfangreiches Gesamtkonzept vorsieht, nicht möglich ist. Es lassen sich immer nur einzelne Bausteine an den verschiedensten Stellen in das Mosaik einfügen, je nach der Aktualität des Themas und wie uns Autoren zur Verfügung stehen. Leider sind die meisten von denen, die einen solchen Beitrag liefern können, durch ihre Berufsarbeit, durch Forschung und Lehre so in Anspruch genommen, daß es ihnen schwer gelingt, die Zeit für eine Übersicht und Zusammenfassung eines größeren Gebiets und die Niederschrift eines Buches zu finden. Trotzdem werden wir an unserer Absicht festhalten, Bücher herauszubringen, die allen im weiten Bereich der Verfahrenstechnik und des Apparatebaus tätigen Ingenieuren, Chemikern und Physikern bereits während ihres Studiums und weiterhin in der industriellen Praxis helfen können. Wir sind dankbar für jede Unterstützung, aber auch für jede Kritik, die zur Verwirklichung unserer Pläne beitragen kann.

Die Buchreihe hat auch im Ausland Interesse gefunden; der Verlag URMO in Bilbao hat die Übersetzung aller Bände ins Spanische übernommen; mehrere Bände wurden ins Französische, Englische und Polnische übersetzt.

Zur Zeit umfaßt die Reihe folgende Titel:

- BRAUER HEINZ, *Grundlagen der Einphasen- und Mehrphasenströmungen*
BRAUER HEINZ (unter Mitarbeit von DIETER MEWES), *Stoffaustausch einschließlich chemischer Reaktionen*
FUCHS OTTO, *Physikalische Chemie als Einführung in die chemische Technik* (spanische Ausgabe im Verlag URMO, Bilbao, in Vorbereitung)
GRASSMANN PETER, *Physikalische Grundlagen der Verfahrenstechnik* (englisch: *Physical Principles of Chemical Engineering*, Pergamon Press, Oxford 1971; spanische Ausgabe im Verlag URMO, Bilbao, in Vorbereitung)
GREGORIC ROMANO, *Wärmeaustausch und Wärmeaustauscher* (französisch: *Echangeurs de Chaleur*, Librairie Polytechnique Béranger, Paris; spanisch: *Cambiadores de Caldor*, Verlag URMO, Bilbao)
HANSON CARL (Herausgeber), *Neuere Fortschritte der Flüssig-Flüssig-Extraktion* (aus dem Englischen)
KNEULE FRIEDRICH, *Das Trocknen* (französisch: *Le Séchage*, Editions Eyrolles, Paris 1964; spanisch: *El Secado*, Verlag URMO, Bilbao 1966; polnisch: *Suszenie*, Verlag Arkady, Warschau 1970)
LONCIN MARCEL, *Die Grundlagen der Verfahrenstechnik in der Lebensmittelindustrie* (französisch: *Les opérations unitaires du génie chimique*, Dunod, Editeur, Paris; spanisch: *Tecnica de la Ingenieria Alimentaria*, Editorial Dossat S. A., Madrid)
MACH ERICH, *Planung und Errichtung chemischer Fabriken*
PIATTI LUIGI, *Werkstoffe der chemischen Technik* (spanische Ausgabe im Verlag URMO, Bilbao, in Vorbereitung)

Weitere Bände, die wichtige Teilgebiete der Verfahrenstechnik behandeln, sind in Arbeit.

Vorwort zur dritten Auflage

Im Verlauf der 15 Jahre, die seit dem Erscheinen der ersten Auflage vergangen sind, haben sich in Theorie und Praxis des Trocknens wesentliche Fortschritte ergeben. Die wissenschaftlichen Arbeiten bezogen sich nicht nur auf die Erforschung des eigentlichen Feuchteentzuges, sondern auch auf nebenher laufende Vorgänge und deren Auswirkung auf die Qualität des Fertigproduktes. Durch besondere Maßnahmen konnte die Trocknungsgeschwindigkeit gesteigert und der spezifische Wärmearaufwand gesenkt werden. Beispiele hierfür sind die Düsen-trocknung und die auf kurzfristigem Kontakt beruhende Wärmezufuhr. Bekannte Trocknertypen wurden für die Behandlung spezieller Güter modifiziert, neue Trocknerbauarten entwickelt, wissenschaftliche Erkenntnisse für die Berechnung von Trocknern nutzbar gemacht. Angesichts dieser ungewöhnlichen Situation schien eine völlige Neubearbeitung der ersten Auflage geboten. Erhalten blieb die allgemeine Zielsetzung, den Verfahreningenieuren, Chemikern und Physikern die Grundlagen zur rechnerischen Erfassung der Trocknungsvorgänge in Kürze, aber doch in ausreichender Vollständigkeit zu vermitteln. Durch eine knappe Darstellung sollten dem Praktiker, dem es an Zeit zur Durchsicht des umfangreichen Schrifttums fehlt, die vorhandenen Quellen erschlossen werden. Wer sich mit Sonderfragen beschäftigen will, bedarf über den Inhalt dieser Monographie hinaus des Studiums von Spezialliteratur, wofür die erforderlichen Hinweise gegeben werden.

Für die Einteilung der Trocknungsverfahren und Trocknerbauarten wurde die von Kießkalt eingeführte Systematik beibehalten. Das in der ersten Auflage verwendete technische Maßsystem wurde durch das internationale Einheitensystem (SI-System) ersetzt.

Im theoretischen Teil ließen sich die mit der Erweiterung verknüpften Änderungen ohne große Umstellungen in die entsprechenden Kapitel der ersten Auflage einarbeiten. Der praktische Teil, der sich mit den Trocknerbauarten befaßt, wurde unter Ausmerzung überholter Apparate dem derzeitigen Stand angepaßt. Einige, aus historischer Sicht interessante Ausführungen wurden beibehalten oder neu gebracht.

Eine wesentliche Erweiterung erfuhr das Kapitel «Gefriertrocknung». Neu aufgenommen wurden:

- Trocknen von Gasen und Flüssigkeiten
- Erhöhung der Trocknungsgeschwindigkeit durch Beschallung
- Probleme der Gutsschädigung
- Instanzeigenschaften des Gutes

- Optimierung und Regelung von Trocknern
- Geschlossene Systeme
- Fragen des Umweltschutzes und der Sicherheit

Zahlreiche Firmen haben mich mit Unterlagen versorgt und wertvolle Erfahrungen mitgeteilt. Anregende Diskussionen ergaben sich mit den Herren Professoren Dr.-Ing. A. Mersmann und Dr.-Ing. R. Heiss, München, sowie mit Herrn Dr.-Ing. D. Stockburger, Obmann des GVC - Ausschusses* für «Trocknungstechnik». Frau Johanna Bauch war bei der Anfertigung von Zeichnungen behilflich. Allen diesen Helfern sage ich meinen herzlichen Dank. Ebenso gilt mein Dank den Herausgebern, insbesondere Herrn Dr.-Ing. H. Kraussold, für mannigfache Ratschläge und Hinweise, wie auch dem Verlag Sauerländer für die erfreuliche Zusammenarbeit.

München, im August 1974

F. Kneule

* GVC = VDI-Gesellschaft für Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen

Inhaltsverzeichnis

Teil I: Grundlagen des Trocknens

1	Eigenschaften des Trocknungsgutes	27
1.1	Bindung und Art der Feuchtigkeit	27
1.2	Gleichgewicht, Sorptionsisothermen	27
1.3	Desorption und Hysterese	36
1.4	Sorptionsisothermen im Temperaturbereich über 100°C	37
1.5	Gleichgewichtszustand zwischen zwei und mehr Substanzen	38
1.6	Experimentelle Ermittlung von Sorptionsisothermen	39
1.7	Sorptionsisobaren	44
1.8	Sorptionsenthalpie	45
1.9	Adsorptionskinetik	48
	Schrifttum	50
2	Feuchtigkeitsbewegung im Gut	52
2.1	Bewegung in flüssiger Phase	52
2.2	Bewegung in dampfförmiger Phase	56
2.21	Molekulare Bewegung	58
2.22	Dampfdiffusion	58
2.23	Laminare Strömung	61
2.3	Diffusion in kondensierter Phase	62
2.4	Migration	63
2.5	Permeation	66
	Schrifttum	68
3	Arten der Wärmeübertragung	70
3.1	<i>Durch Konvektion</i>	70
3.11	Das Enthalpie-Konzentration-Diagramm nach MOLLIER	70
3.12	Der Verdunstungsvorgang	77
3.13	Wärme- und Stoffaustausch beim Verdunsten	77
3.14	Beharrungstemperatur	85
3.15	Kühlgrenztemperatur	87
3.16	Das h,x -Diagramm für verschiedene Stoffpaare	90
3.17	Das Mollier-Kirschbaum-Diagramm	91
3.18	Das Temperatur-Konzentration-Diagramm	93
3.19	Das $\vartheta, 1/x$ -Diagramm von VITS	95
3.20	Das Enthalpie-Gutsfeuchte-Diagramm	96
3.21	Einfluß der Eintrittstemperatur des Gutes	96
3.2	<i>Wärmeübertragung durch Leitung</i>	102
3.21	Wärmeleitfähigkeit trockener poriger Stoffe	102
3.22	Die Druckabhängigkeit der effektiven Wärmeleitfähigkeit	105
3.23	Einfluß der Strahlung	106
3.24	Wärmeleitfähigkeit feuchter poriger Stoffe	108

3.25	Wärmerohr	110
3.26	Wärmeleitfähigkeit eishaltiger poriger Stoffe	111
3.27	Kontaktttrocknung	111
3.28	Kombinierte Konvektions- und Kontaktttrocknung	113
3.29	Wärmeübertragung bei kurzfristigem Kontakt	115
3.30	Anwendbarkeit der Gleichungen für kurzfristigen Kontakt	119
3.3	Wärmeübertragung durch Strahlung – Strahlungstrocknung	120
3.31	Physikalische Grundlagen	120
3.32	Der Wärmeaustausch durch Strahlung	123
3.33	Selektivstrahler	124
3.4	Wärmeübertragung durch Konvektion, Leitung und Strahlung	126
3.5	Wärmeübertragung durch innere Wärmeentwicklung – dielektrische Trocknung	128
3.51	Physikalische Grundlagen	128
3.52	Trocknungsverlauf und Feuchtigkeitsverteilung	133
3.6	Arten der Beheizung von Trocknern	134
3.7	Bilanzierung der Feuerung	137
3.71	Energiebilanz	138
3.72	Darstellung der Verbrennung im h, x -Diagramm	139
3.73	Luftbedarf und Rauchgasmenge	141
3.74	Säuretaupunkt	143
3.75	Umrechnungsformeln für die Gutsfeuchtigkeit	143
3.76	Zusammenhang zwischen dem Feuchtigkeitsgehalt eines Brennstoffes und seinem Heizwert	146
3.8	Sonderfragen der Energiezufuhr	147
3.81	Heißtrocknung	147
3.82	Trocknen mit reinem Heißdampf	148
3.83	Trocknen unter erhöhtem Druck	149
3.84	Trocknen in organischen flüssigen oder dampfförmigen Medien	151
3.85	Trocknen in anorganischen Lösungen	153
3.86	Trocknen mit festen Wärmeträgern (<i>pebbles</i>)	154
3.87	Trocknen mit Ultraschall	155
3.88	Trocknen mittels Osmose und Elektroosmose	155
3.89	Trocknen mittels Reibungswärme	156
	Schrifttum	157
4	Der Trocknungsvorgang bei konstanten Bedingungen	163
4.1	bei überströmtem ruhendem Gut	163
4.11	Erster Trocknungsabschnitt (Oberflächenverdunstung)	164
4.12	Maßnahmen zur Erhöhung des Wärme- und Stoffüberganges	166
4.13	Düsentrocknung	170
4.14	Knickpunkt der Trocknungskurve	174
4.15	Zweiter Trocknungsabschnitt	176
4.151	Nichthyroskopische Stoffe	176
4.152	Hygroskopische Stoffe	179
4.2	Berechnung der Trocknungszeit	180
4.21	Erster Trocknungsabschnitt (Oberflächenverdunstung)	180
4.211	Einfluß der Schwindung	181
4.22	Zweiter Trocknungsabschnitt	182
4.23	Näherungsformeln für die Trocknungszeit	183
4.24	Einfluß der Form des Trocknungsgutes	188
4.25	Experimentelle Bestimmung von Trocknungsverlaufskurven	189
	Schrifttum	192

5 Der Trocknungsvorgang bei veränderlichen Bedingungen (technischer Trocknungsvorgang) 195

5.1 *Druckabfall in Schüttungen* 195

5.2 *Wärme- und Stoffaustausch in gasdurchströmten Schüttungen* 200

 5.21 Wärme- und Stoffaustausch zwischen Gasstrom und Schüttung 200

 5.211 Spezifische Oberfläche der Schüttung 200

 5.212 Die Austauschgrößen j_q und j_m 201

 5.213 Übergangseinheiten 203

 5.214 Gemeinsame Darstellung der Austauschvorgänge an überströmten Einzelkörpern sowie in durchströmten Rohren und Haufwerken 206

5.3 *Die effektive Wärmeleitfähigkeit gasdurchströmter Schüttungen* 210

5.4 *Trocknen über- oder durchströmter ruhender Güter* 211

 5.41 Erster Trocknungsabschnitt (Oberflächenverdunstung) 211

 5.42 Zweiter Trocknungsabschnitt 213

5.5 *Trocknen über- oder durchströmter bewegter Güter (Gleich- und Gegenstromtrocknung)* 218

 5.51 Erster Trocknungsabschnitt 218

 5.52 Zweiter Trocknungsabschnitt 219

Schrifttum 220

Teil II: Die Trockner

6 Allgemeine Berechnungsgrundlagen 223

6.1 Allgemeine Gesichtspunkte für die Dimensionierung von Trocknern 223

6.2 Der Wärmebedarf eines Trockners 226

6.3 Gasführung in Trocknern 231

6.4 Abnahmeversuche 240

Schrifttum 240

7 Konvektionstrocknung bei Normaldruck 242

7.1 Gut ruht auf feststehender Unterlage 242

 7.11 Darren 242

 7.12 Schrank- und Kammertrockner 248

 7.121 Horizontalbelüftung 248

 7.122 Durchbelüftung 251

7.2 Gut ruht auf bewegter Unterlage 256

 7.21 Kanaltrockner 256

 7.211 Ausführungsformen 258

 7.212 Berechnungsgrundlagen 261

 7.22 Schaukel- und Turmtrockner 262

 7.23 Bandtrockner 264

 7.231 Einbandtrockner 265

 7.232 Mehrbandtrockner 268

 7.233 Vertikalbandtrockner 272

 7.234 Hänge- oder Laufbandtrockner 275

 7.235 Kurzschleifentrockner 276

 7.236 Leitrollentrockner mit Düsenbelüftung (*hotflue*) 279

 7.237 Wärmeübertragung mittels fester Wärmeträger (*pebbles*) 279

7.238	Siebtrommeltrockner	280
7.239	Schwebetrockner	281
7.240	Spannrahmentrockner	282
7.3	Ständige Eigenbewegung des Gutes	284
7.31	durch Rührelemente	284
7.311	Rührbehälter	284
7.312	Tellertrockner	284
7.313	Ringtagetrockner	285
7.314	Ringteller-Turbinetrockner	286
7.315	Druckluft-Siebtrockner	288
7.316	Zweischnecken-Durchlüftungstrockner	288
7.32	Bewegung des Gutes durch Schwerkraft	289
7.321	Trommeltrockner	289
7.3211	Einbauten	289
7.3212	Führung von Gas und Gut	291
7.3213	Spezielle Ausführungsformen	292
7.3214	Bauliche Einzelheiten von Trommeltrocknern	297
7.3215	Berechnungsgrundlagen	300
7.3216	Wäschetrockner (Tumbler)	303
7.322	Rieselrockner	305
7.33	Bewegung des Gutes durch Trägheitskräfte	310
7.331	Vibrationstrockner	310
7.3311	Schwingungssysteme	310
7.3312	Antriebsarten	311
7.3313	Ausführungsformen	312
7.4	Bewegung des Gutes durch kinetische Energie des Trocknungsmittels oder durch eigene potentielle Energie	316
7.41	Wirbelschichtrockner	316
7.411	Berechnungsgrundlagen	316
7.4111	Druckverlustfunktion der Wirbelschicht	316
7.4112	Zustandsdiagramm der Wirbelschicht	318
7.4113	Gesamtdruckverlust	321
7.4114	Wärme- und Stoffübertragung	323
7.412	Modifikation der Wirbelschicht (Wirbelstoßverfahren)	327
7.413	Ausführungsformen	328
7.4131	Schwebetrockner	328
7.4132	Wirbelschichtrockner (Fließbett-Trockner)	331
7.42	Flugrockner	336
7.421	Stromtrockner	336
7.4211	Berechnungsgrundlagen	338
	Widerstandsgesetze	338
	Instationäre Partikelbewegung im vertikalen Strömungsrohr	343
	Partikelschwarm	346
	Bewegungsvorgänge im konischen Steigrohr	347
	Druckverlust	347
	Wärme- und Stoffübergang	350
7.4212	Ausführungsformen	355
7.422	Schleudertrockner	370
7.423	Mahlrockner	372
7.43	Zerstäubungstrocknung	377
7.431	Zerstäubung	377

7.432	Berechnungsgrundlagen	390
7.4321	Instationäre Tropfenbewegung	390
7.4322	Wärme- und Stoffübergang	392
	Trocknungszeit bei Oberflächenverdunstung	393
	Trocknungsverhalten von Tropfen aus Suspensionen und Lösungen	397
7.433	Bemessung des Trocknungsraumes	398
7.434	Luft- und Gutführung	401
7.435	Ausführungsformen	405
Schrifttum	414
8	Kontakt-trocknung bei Normaldruck	419
8.1	Gut ruht auf bewegter Unterlage	419
8.11	Walzentrockner	419
8.111	Bauarten von Walzentrocknern	420
8.112	Arten der Gutsaufgabe	422
8.113	Ausführungsformen von Walzentrocknern	423
8.12	Zylindertrockner	427
8.13	Muldenmangel	429
8.14	Probleme der Wärmeübertragung	431
8.141	Beheizung von Walzen und Zylindern	433
8.2	Gut wird ständig bewegt	434
8.21	durch Rührelemente	434
8.211	Tellertrockner	434
8.212	Muldentrockner	435
8.213	Schnecken-trockner	435
8.214	Schaufeltrockner	437
8.215	Röhrenbündel-trockner	439
8.22	Gut wird ständig bewegt durch Schwerkraft	440
8.221	Röhrentrockner	440
8.2211	mit außenbeheizten Röhren	440
8.2212	mit innenbeheizten Röhren	441
8.2213	Drehrohr-Kontakt-trockner	441
8.2214	Trockner mit festen Wärmeträgern	442
Schrifttum	444
9	Vakuum-trocknung	445
9.1	Allgemeines über Vakuumtechnik	445
9.2	Gut ruht auf feststehender Unterlage	448
9.21	Vakuumkammertrockner	448
9.22	Trocknung von Apparaten der Elektrotechnik	451
9.3	Gut ruht auf bewegter Unterlage	453
9.31	Vakuumwalzentrockner	453
9.4	Gut wird ständig bewegt	457
9.41	durch Rührwerkzeuge	457
9.411	Vakuumtellertrockner	457
9.412	Vakuumschaufeltrockner	459
9.42	Gut wird ständig bewegt durch Schwerkraft	462
9.421	Taumeltrockner	462
9.422	Doppelkonustrockner	464
9.423	Vakuumrieseltrockner	464
9.424	Dünnschicht-trockner	467

9.43 Gut wird ständig bewegt durch eigene potentielle Energie	469
9.431 Vakuumzerstäubungstrockner	469
9.44 Diskontinuierliche Vakuumtrocknung	471
9.5 Gefriertrocknung	472
9.51 Allgemeines	472
9.52 Einfriertemperatur	475
9.53 Verlauf der Gefriertrocknung	480
9.531 Stofftransport	480
9.532 Wärmetransport	486
9.54 Kennzeichnende Daten des Trocknungsverlaufes	493
9.541 Zulässige Temperaturen	493
9.542 Ende der Haupttrocknung	493
9.543 Nachtrocknung	494
9.544 Restfeuchte im Fertigprodukt	494
9.55 Berechnung der Trocknungszeit bei reiner Kontaktheizung	495
9.551 Plattenförmiges kapillarporöses Gut, das in gefrorenem Zustand für Dampf undurchlässig ist	495
9.552 Plattenförmiges kapillarporöses Gut, das in gefrorenem Zustand für Dampf durchlässig ist	498
9.553 Kugelförmiger Körper	499
9.554 Praktische Anwendung	500
9.56 Vorrichtungen zum Entfernen des Wasserdampfes	502
9.57 Ausgeführte Anlagen	504
9.571 Apparate für Laboratorium und Technikum	504
9.572 Anlagen für die industrielle Produktion	507
9.5721 Chargenbetrieb	508
9.5722 Kontinuierlicher Betrieb	508
Tunnel Trockner	508
Teller Trockner	512
9.58 Anwendungsmöglichkeiten der Gefriertrocknung	513
Schrifttum	515
10 Trocknen von Gasen und Flüssigkeiten	518
10.1 Gastrocknung	518
10.11 Kondensation	518
10.111 Kühlen	518
10.112 Verdichten	518
10.113 Apparative Durchführung	519
10.1131 Indirekte Wärmeübertragung	519
10.1132 Direkte Wärmeübertragung	520
10.12 Adsorption	520
10.121 Häufig verwendete Adsorbentien	521
10.122 Apparative Durchführung	523
10.13 Absorption	525
10.131 Absorptionsmittel	525
10.132 Apparative Durchführung	527
10.2 Trocknen von Flüssigkeiten	529
10.21 Apparative Durchführung	530
10.211 Herabsetzung der Wasserlöslichkeit durch Druckerniedrigung und Temperaturerhöhung	530
10.212 Bindung der Feuchtigkeit an Adsorptionsmittel	533
Schrifttum	534

Teil III: Sonderprobleme

11 Energiezufuhr und Eigenschaften des Fertiggutes	535
11.1 Sonderverfahren der Energiezufuhr	535
11.11 Strahlungstrocknung	535
11.12 Dielektrische Trocknung	541
11.13 Erhöhung der Trocknerleistung durch Beschallung	544
11.2 Probleme der Gutsbeschaffenheit	547
11.21 Temperaturempfindlichkeit	547
11.22 Schwindungsverhalten	548
11.23 Verkrustung der Gutoberfläche	560
11.24 Instanzeigenschaften	562
Schrifttum	567
12 Fragen der Wirtschaftlichkeit	571
12.1 Optimieren von Trocknern	571
12.2 Regelung von Trocknern	574
12.3 Geschlossene Systeme, Rückgewinnung von Lösungsmitteln	585
12.31 Kondensation und Adsorption	585
12.32 Adsorption	589
12.4 Kombinationen verschiedener Trocknertypen	590
12.5 Wärmerückgewinnung	593
12.51 durch Wärmeaustausch	593
12.52 durch Wärmepumpe	596
Schrifttum	602
13 Fragen zum Umweltschutz und zur Sicherheit	603
13.1 Umweltschutz	603
13.11 Staubhaltige Gase	604
13.111 Emissions- und Immissionswerte	604
13.112 Arten von Entstaubern	605
13.113 Wirkungsweise von Entstaubern	606
13.12 Gas- oder dampfförmige und flüssige Verunreinigungen	608
13.121 Reinigung von Abgasen aus Trocknern	608
13.1211 Adsorption	608
13.1212 Thermische Behandlung	608
13.2 Sicherheit	610
13.21 Staubhaltige Gasgemische	611
13.22 Brennbare und leicht entzündliche Gasgemische	614
13.23 Mikrowellen	615
Schrifttum	617
14 Aufgaben im Laboratorium und Technikum	618
14.1 Messung der Feuchte	618
14.11 Gase	618
14.111 Verfahren, die den Vorgang der Oberflächenverdunstung zur Messung verwenden	618
14.1111 Das Aspirations-Psychrometer nach ASSMANN	618
14.112 Taupunktshygrometer (Taupunktsspiegel)	623

14.113	Unmittelbare Anzeige der Feuchte mittels hyroskopischer Feuchtebindung	626
14.1131	Gravimetrisches Hygrometer	626
14.1132	Haarhygrometer	627
14.1133	Lithiumchlorid-Feuchtemesser	628
14.1134	Elektrolyse-Hygrometer	629
14.1135	Kapazitives Hygrometer	629
14.1136	Elektrolytisches Hygrometer	630
14.1137	Farbhygrometer	631
11.114	Druckmessung	631
14.115	Infrarot-Hygrometer	632
14.12	Feste Körper	632
14.121	Gravimetrische Verfahren	632
14.1211	Feuchteentzug durch Verdunsten oder Verdampfen ..	632
14.1212	Feuchteentzug durch Destillation oder Extraktion ..	635
14.1213	Feuchteentzug durch chemische Methoden	635
14.122	Hygrometrische Verfahren	637
14.123	Elektrische Verfahren	638
14.1231	Widerstandsmeßgeräte	638
14.1232	Kapazitäts- und Verlustwinkelgeräte	639
14.124	Strahlungsmessung	642
14.125	Kernphysikalische Verfahren	642
14.2	Trocknen im Laboratorium	643
14.21	Trocknen von Feststoffen	643
14.211	Exsikkatoren	643
14.212	Trocknungsmittel	646
14.213	Trocknungsröhren	647
14.214	Trockenschränke	649
14.215	Gefriertrockner	651
14.22	Trocknen von Flüssigkeiten	652
14.3	Trocknen im Technikum	653
14.31	Vakuum-Walzentrockner	653
14.32	Vakuum-Schaufeltrockner	654
14.33	Wirbelschichttrockner	655
14.34	Zerstäubungstrockner	655
	Schrifttum	656
15	Auswahl von Trocknern und Entwicklungstendenzen	659
15.1	Auswahl von Trocknern	659
15.2	Tendenzen im Bau von Trocknern	665
	Schrifttum	666
16	Aufgaben mit Lösungen	667
17	Stoffwerte	697
	Namenverzeichnis	705
	Sachverzeichnis	711