

# Die Trocknung und Entwässerung von Kohle

nach dem heutigen Stand der Erkenntnis

Bericht E 1  
des Reichskohlenrats

Mit 17 Abbildungen in einem Anhang



Berlin  
Verlag von Julius Springer  
1936

ISBN-13:978-3-642-90157-7      e-ISBN-13:978-3-642-92014-1  
DOI: 10.1007/ 978-3-642-92014-1

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

Copyright 1936 by Julius Springer in Berlin.

## Vorwort.

Bei der Kohlenverarbeitung und Kohlenveredlung hat sich in den letzten Jahren ergeben, daß es meistens vorteilhaft ist, der Kohle vor der Verarbeitung und Veredelung das Wasser in gewissem Ausmaße zu entziehen. Damit erhält die Trocknung und Entwässerung der Kohle eine erhöhte Bedeutung. Dieser Bedeutung steht eine entsprechende wissenschaftliche Durchdringung des Trocknungs- und Entwässerungsvorganges nicht gegenüber. Man begnügt sich beim Bau von Trocknungsanlagen bisher fast ganz mit konstruktiven Erfahrungen. Dementsprechend ist auch das Schrifttum, das sich mit der Trocknung fester Brennstoffe befaßt, nicht ausreichend.

Daher regen die Sachverständigenausschüsse des Reichskohlenrates an, die Erforschung des Trocknungs- und Entwässerungsvorganges aufzunehmen und tun selbst mit dieser Arbeit den ersten Schritt hierzu.

Der Bericht ist das Ergebnis einer mehrjährigen Gemeinschaftsarbeit; er beruht im Kern auf einem Vortrage von Professor KEGEL in Freiberg und hat seine Erweiterung durch die Mitwirkung insbesondere folgender Sachverständiger auf dem Gebiete der Kohlentrocknungstechnik erfahren:

Direktor HILGENSTOCK, Bochum, Professor Dr.-Ing. KOENIGER, Berlin, Dr.-Ing. KRAMM, Neu-Welzow, Dr.-Ing. KÜHLWEIN, Bochum, Direktor Dr.-Ing. MÜLLER, Essen (Krupp), Priv.-Doz. Dr.-Ing. PROCKAT, Berlin, Dr.-Ing. RAMMLER, Dresden, Direktor Dr.-Ing. SCHULTES, Barmen-Elberfeld, Dr.-Ing. THAU, Berlin. Die Abbildungen sind von Herrn BREITLING, Dresden ausgeführt worden.

Wir hoffen, daß die Arbeit für die Entwicklung der Kohlentrocknungs- und Entwässerungstechnik aufklärend und anregend wirken möge.

**Geschäftsführung  
der Sachverständigenausschüsse  
des Reichskohlenrates.**

# Inhaltsverzeichnis.

	Seite
<b>A. Die Bedeutung der Kohlentrocknung und -entwässerung und ihre Anwendungsgebiete</b> . . . . .	1
<b>B. Die physikalisch-technischen Probleme der Kohlentrocknung und -entwässerung</b> . . . . .	3
I. Die rechnerischen Beziehungen zwischen Rohkohle und Trockenkohle . . . . .	3
II. Das Gefüge des zu trocknenden und zu entwässernden Kohlenhaufwerks . . . . .	8
1. Das Gefüge der Kohlen . . . . .	8
2. Das Gefüge des Kohlenhaufwerks . . . . .	10
III. Die Bindung der Feuchtigkeit an die Kohle . . . . .	13
IV. Die Entfernung des Wassers aus der Kohle . . . . .	16
1. Die Begriffe: Entwässerung und Trocknung . . . . .	16
2. Die Entwässerung der Kohle . . . . .	17
a) Der Vorgang der Entwässerung im allgemeinen . . . . .	17
b) Die technische Durchführung der Entwässerung . . . . .	18
3. Die Trocknung der feuchten Kohle . . . . .	20
a) Die Verdunstung und die Verdampfung . . . . .	21
b) Der Einfluß der Hygrokopizität der Kohle auf die Trocknung . . . . .	22
c) Der Vorgang der Trocknung im Kohlenkorn und im Kohlenhaufwerk . . . . .	26
V. Die Wärme bei der Trocknung . . . . .	29
VI. Die technische Durchführung der Trocknung . . . . .	31
1. Die Trocknung durch Verdunstung in ungesättigten Gasen . . . . .	31
a) Die Trocknung in unmittelbar beheizten Trockenanlagen . . . . .	31
b) Die Trocknung in mittelbar beheizten Trockenanlagen . . . . .	33
2. Die Trocknung durch Verdampfung im dampferfüllten Raum . . . . .	35
VII. Der verlustlose Trockner . . . . .	36
VIII. Die physikalisch-technischen Probleme der Kohlentrocknung und -entwässerung . . . . .	38
<b>C. Die betrieblich-wirtschaftlichen Probleme der Kohlentrocknung und -entwässerung</b> . . . . .	40
I. Der Zweck der Kohlentrocknung . . . . .	40
II. Die Aufbereitung . . . . .	42
III. Die Brikettierung . . . . .	43
IV. Die Kohlenstaubherstellung . . . . .	49
V. Die Schwelung . . . . .	50
VI. Die Verkokung . . . . .	56
VII. Die Hydrierung . . . . .	59
VIII. Die Vergasung . . . . .	60
<b>D. Zusammenfassung</b> . . . . .	61
<b>E. Verzeichnis des Schrifttums</b> . . . . .	63
<b>F. Abbildungsanhang.</b> . . . . .	69

## **A. Die Bedeutung der Kohlentrocknung und -entwässerung und ihre Anwendungsgebiete.**

Die Entwässerung und Trocknung der Brennstoffe bildet die wichtigste Vorstufe auf dem Wege ihrer physikalischen und chemischen Veredlung. In diesem Rahmen dient die Entwässerung als Hilfsmittel bei der Aufbereitung (d.h. der Entaschung) der Nußsorten und der Koksfeinkohle, sowie für die Klärung und Aufarbeitung der Schlämme.

Die thermische Trocknung bezweckt teils die Wärmeverdichtung, d.h. die Erhöhung des Heizwertes durch Entfernung des Wasserballastes, wie z.B. beim Trocknen stückiger Lignite unter Erhaltung der Kornform, teils bereitet sie die Kohle für eine mechanische Verformung vor, die ohne Trocknung gar nicht, mangelhaft oder unwirtschaftlich erreichbar ist; wie bei der Brikettierung der Steinkohle und der Zerkleinerung der Stein- und Braunkohlen zu Kohlenstaub. Schließlich kommen auch beide Ziele gemeinsam in Betracht, so bei der Verpressung der Braunkohle — dem wichtigsten Zweig physikalisch-thermischer Kohlenveredlung — und teilweise bei der Braunkohlenstaubherstellung. Triebfeder ist bei allen diesen Anwendungsgebieten der Trocknung, den Brennstoff geeigneter für seine Verfeuerung, Vergasung oder sonstige Verwendung zu machen und gleichzeitig an Fracht zu sparen.

Die wirtschaftspolitische Notwendigkeit einer wenigstens teilweisen Autarkie in der Treib- und Schmierstoffversorgung zwingt aber heute dazu, Kohlen nicht nur vom Standpunkt ihrer Verbrennungseigenschaften in fester Form, sondern unter dem Gesichtswinkel ihrer Wandlungsfähigkeit, ihrer chemischen Veredlungsfähigkeit zu betrachten. Erscheinen die eine mehr oder minder weitgehende Umwandlung oder Zersetzung der Kohlensubstanz bedingenden Veredelungsverfahren von außen gesehen lediglich als chemische Prozesse, so stellt doch ihre praktische betriebliche Durchführung in der Hauptsache physikalische und mechanische Probleme, so vor allem hinsichtlich der zweckmäßigsten Aufbereitung der Kohle vor dem Veredelungsvorgang. Im Rahmen dieser

Vorbereitung ist aber die Kohlentrocknung unentbehrlich und oft in wirtschaftlicher Beziehung von erheblichem Einfluß auf die Veredelungskosten.

Das wichtigste Gebiet der thermo-chemischen Kohlenverarbeitung ist die Kokerei; ist für sie auch z.Zt. die Entwässerung der aufbereiteten Kohle wichtiger als die thermische Trocknung, so wird die letzte doch zweifellos immer mehr an Platz gewinnen. Weitere wichtige Anwendungsgebiete der Kohlentrocknung sind Vergasung, Verschmelzung und Treibstoffsynthese.

Im Mißverhältnis hierzu steht, daß gerade das Entwässerungs- und Trocknungsgebiet der Brennstoffe, abgesehen von rein wirtschaftlichen Erwägungen, in wissenschaftlicher Beziehung bisher verhältnismäßig geringe Beachtung gefunden hat. Oberflächlich betrachtet erscheint ja auch die Entwässerung und Trocknung als eine zu einfache und klarliegende Sache, um einer tiefgreifenden wissenschaftlichen Forschung zu bedürfen. Bei der Entwässerung wird das Wasser der Kohle auf mechanischem Wege soweit wie möglich entzogen. Von der Trocknung wissen wir, daß rd. 600 kcal erforderlich sind, um 1 kg Wasser zu verdampfen, und von diesem Standpunkt aus betrachtet braucht ja nur der Wärmewirtschaftler in Tätigkeit zu treten, damit der theoretisch bekannte Wärmebedarf durch den wirklichen Wärmeaufwand möglichst wenig überschritten wird. So wurde und wird dieses Gebiet von vielen Seiten fast ausschließlich nach wärmewirtschaftlichen Gesichtspunkten betrachtet, und die für jeden Einzelfall gültigen Sonderbedingungen werden auf Grund örtlicher Erfahrungen statistisch und oft unvollkommen ermittelt, weil wissenschaftliche Grundlagen über den Trocknungsvorgang der Brennstoffe fast ganz fehlen.

Die Vorgänge bei der Entwässerung und Trocknung sind wesentlich physikalischer Natur. Daneben entweichen aber auch flüchtige Bestandteile und treten Oxydationserscheinungen und sonstige Veränderungen der Kohle in chemischer Hinsicht — insbesondere bei jüngeren Kohlen und scharfer Trocknung — auf. Hierdurch kann die Weiterverarbeitung der Kohle beeinflußt werden. Den physikalischen Veränderungen kommt aber gegenüber den chemischen weitaus die größte Bedeutung zu.

Die Ergebnisse einer vollständigen Untersuchung der Vorgänge bei der Entwässerung und Trocknung werden vielleicht berufen sein, auf den Bau der Anlagen und Einrichtungen einen weittragenden Einfluß auszuüben und den Konstrukteuren Unterlagen an die Hand zu geben, die es ihnen ermöglichen, die Abmessungen der Apparate, die sich bisher meist nur auf Betriebserfahrungen gründen, genauer rechnerisch zu bestimmen. Hierdurch kann die

Vorbelastung der Veredelungsprozesse durch die Entwässerungs- und Trocknungskosten verringert werden. Schließlich soll der Entwässerungs- und Trocknungsprozeß derart durchgebildet und geregelt werden können, daß der gewünschte Endfeuchtigkeitsgehalt in den Apparaten möglichst selbsttätig und ohne individuelle Bedienung bei größter Betriebssicherheit erreicht wird.

Die Grenzen der Wasserentziehung bei der Entwässerung und Trocknung der Brennstoffe sind im allgemeinen durch den für die Weiterverarbeitung und Veredlung erforderlichen Feuchtigkeitsgehalt gegeben. Als Anhalt mögen folgende Zahlen dienen:

a) Steinkohle:

1. Koks-kohle	am günstigsten . . .	8%
	nicht über . . .	12%
2. Brikettierkohle	möglichst . . .	2%
3. Kohlenstaub zur Feuerung	. . . bis	2%
4. Fließkohle	. . . . .	0%
5. Schwelkohle	möglichst . . . . .	0%
6. Hydrierkohle	. . . . .	0%

b) Braunkohle:

1. Brikettierkohle	. . . . .	12—18%
2. Vergasungskohle	. . . . .	5—15%
3. Schwelkohle	. . . . .	15%
4. Kohlenstaub zur Feuerung	. . .	12—15%
5. Hydrierkohle	. . . . .	0%

Die Notwendigkeit der Forschung auf dem Gebiet der Kohlenentwässerungs- und -trocknungstechnik ist offenkundig; diese Arbeit soll der Trocknungsforschung durch eine nachfolgende Schau über ihren Gegenwartsstand und die Zukunftsaufgaben, die ihrer im Rahmen der physikalisch-chemischen Kohlenveredelung harren, die Wege weisen.

## B. Die physikalisch-technischen Probleme der Kohlentrocknung und -entwässerung.

### I. Die rechnerischen Beziehungen zwischen Rohkohle und Trockenkohle.

Im Schrifttum über Trocknung besteht keinerlei Einheitlichkeit in der Ausdruckweise und der Bezeichnung (22<sup>1</sup>, 35, 36, 55, 65, 102, 124, 134); dadurch wird die Verständigungsmöglichkeit sehr erschwert; es muß daher die erste Aufgabe dieser Arbeit sein, die Ausgangsbegriffe und ihre Bezeichnung eindeutig festzulegen und ihre Benutzung in Wissenschaft und Praxis zu empfehlen.

<sup>1</sup> Die eingeklammerten Zahlen weisen auf das Schrifttum S. 63—68 hin.

Rohkohle ist die Kohle in dem Zustand vor der Wasserentziehung.

Trockenkohle ist die Kohle in dem Zustand, in dem sie ihrem weiteren Verwendungszweck — Brikettierung, Verschmelzung, Mahlung usw. — zugeführt wird.

Wassergehalt der Kohle ist das mechanisch, nicht chemisch gebundene Wasser, das nach irgendeiner anerkannten Methode bestimmt wird (98).

Trockensubstanz ist die Kohle, die nach dieser Untersuchungsmethode kein mechanisch gebundenes Wasser mehr enthält.

Die Festlegung von einheitlichen Formelzeichen hat nach dem Grundsatz zu erfolgen, daß Folgerichtigkeit und Eindeutigkeit bestehen, und daß Überschneidungen mit den Bezeichnungen benachbarter Gebiete — z. B. Aufbereitung und Wärmewirtschaft — möglichst vermieden werden.

Danach werden folgende Formelzeichen als Einheitsbezeichnungen vorgeschlagen:

	Menge kg, t, Waggon	Wassergehalt	
		bezogen auf die Ausgangs- menge an Kohle kg/kg	bezogen auf die Trocken- substanz kg/kg
Rohkohle . . . . .	$K_r$	—	—
Trockenkohle . . . . .	$K_t$	—	—
Wassermenge in der Rohkohle . . . . .	$W_r$	—	—
Wassergehalt der Rohkohle . . . . .	—	$w_r$	$x_r$
Wassermenge in der Trockenkohle . . . . .	$W_t$	—	—
Wassergehalt der Trockenkohle . . . . .	—	$w_t$	$x_t$
Trockensubstanz . . . . .	$K$	—	—
Zu verdampfendes Wasser. . . . .	$W_d$	—	—

Erläuterungen: Da es sich bei der Kohlentrocknung nur um 2 Stoffe handelt, nämlich Kohle und Wasser, werden auch nur zwei Hauptsymbole verwandt, und zwar  $K$  für Kohle und  $W$  für Wasser. Dabei gilt, daß große Buchstaben Mengen bezeichnen, also kg, t, Waggon, und kleine Buchstaben Anteile. Die Zeiger sind  $r$  für Rohkohle und  $t$  für Trockenkohle. Der auf die Trockensubstanz bezogene Wassergehalt in kg Wasser je kg Trockensubstanz wird mit  $x_r$  und  $x_t$  bezeichnet<sup>1</sup>. Das zu verdampfende Wasser ist  $W_d$ . Die Trockensubstanz wird als aschehaltige Kohle ohne Wasser mit  $K$  ohne Index bezeichnet.

<sup>1</sup> Als Vorbild hierfür diente die Bezeichnungsweise von HIRSCH (52) und MOLLIER (51). Aus drucktechnischen Gründen empfiehlt es sich, statt des deutschen  $\text{z}$  das lateinische  $x$  zu verwenden.

Die Angabe des Feuchtigkeitsgehaltes  $w_r$  (kg/kg Rohkohle) und  $w_t$  (kg/kg Trockenkohle) ist für Betriebsberechnungen allgemein üblich. Vielfach erhält man jedoch ein klareres Bild von der Trocknungsleistung, wenn man nicht die Feuchtigkeitsgehalte  $w_r$  und  $w_t$  auf feuchte Kohle (Trockensubstanz + Wasser), sondern auf die Trockensubstanz allein bezieht, also  $x_r$  und  $x_t$  zugrunde legt. In einigen Fällen, z. B. bei der Aufstellung einer Wärmebilanz, ist diese Umrechnung sogar erforderlich, da die den Trocknungsprozeß durchlaufende Trockensubstanz, abgesehen von den Staubverlusten und chemischen Veränderungen, konstant bleibt und daher als Grundlage der Rechnung dient.

Für die Umrechnungen gelten die Beziehungen:

$$x_r = \frac{w_r}{1 - w_r}; \quad x_t = \frac{w_t}{1 - w_t}$$

$$w_r = \frac{x_r}{1 + x_r}; \quad w_t = \frac{x_t}{1 + x_t}$$

Die graphische Auswertung in Abb. 1 veranschaulicht die starke Zunahme des Wassergehaltes, bezogen auf Trockensubstanz, bei höheren Feuchtigkeitsgehalten. Zu einer Herabsetzung des Feuchtigkeitsgehaltes um 1% ist daher bei hohem Anfangsfeuchtigkeitsgehalt die Entziehung einer bedeutend größeren Wassermenge erforderlich als bei niedrigem Anfangsfeuchtigkeitsgehalt.

Für die mengenmäßige Erfassung des Trockenvorganges gilt die umstehende Tafel.

Zur Erleichterung sollen dem Betriebsmann graphische Aufzeichnungen in die Hand gegeben werden, aus denen das Ergebnis ohne Rechnung abzulesen ist<sup>1</sup>. Diesem Zweck dient das Nogramm von SCHUSTER (Abb. 2), das dahin erweitert wurde, daß die Bruch-, Staub- und anderen -verluste berücksichtigt werden können.

Die am häufigsten auftretenden Fragen sind:

1. Wieviel Trockenkohle erhält man aus einer gegebenen Rohkohlenmenge bei bekannten Wassergehalten, und welche Wassermenge ist dabei zu verdampfen?

2. Umgekehrt, wieviel Rohkohle braucht man, um eine bestimmte Menge Trockenkohle bei bekannten Wassergehalten herzustellen und welche Wassermenge ist dabei zu verdampfen?

Man verbindet den Wassergehaltswert der bekannten Kohlenmenge auf der rechten Ordinate mit dem Wassergehalt der unbekannt Kohlenmenge

---

<sup>1</sup> Solche Kurventafeln sind im Schrifttum angegeben worden von DEIMLER (22), FRANKE (35), FRIEDRICH (36), HOFFMANN (55), KEGEL (65), SCHÖNE (122), ROSIN (102), SCHUSTER (124).

Gegeben	Gesucht	Formeln	
		(Wassergehalte bezogen auf feuchte Kohle)	(Wassergehalte bezogen auf Trockensubstanz)
1. Rohkohlenmenge $K_r$	Zusammensetzung	$K_r = K_r \cdot w_r + K = W_r + K$	$K_r = K_r \cdot \frac{x_r}{1 + x_r} + K$
	entstehende Trockenkohlenmenge	$K_t = K_r \cdot \frac{1 - w_r}{1 - w_t}$	$K_t = K_r \cdot \frac{1 + x_t}{1 + x_r}$
	zu verdampfende Wassermenge	$W_d = K_r - K_t = K_r \cdot \frac{w_r - w_t}{1 - w_t} = K_r \cdot \left(1 - \frac{1 - w_r}{1 - w_t}\right)$	$W_d = K_r \cdot \frac{x_r - x_t}{1 + x_r}$
2. Trockenkohlenmenge $K_t$	Zusammensetzung	$K_t = K_t \cdot w_t + K = W_t + K$	$K_t = K_t \cdot \frac{x_t}{1 + x_t} + K$
	erforderliche Rohkohlenmenge	$K_r = K_t \cdot \frac{1 - w_t}{1 - w_r}$	$K_r = K_t \cdot \frac{1 + x_r}{1 + x_t}$
	zu verdampfende Wassermenge	$W_d = K_r - K_t = K_t \cdot \frac{w_r - w_t}{1 - w_r} = K_t \cdot \left(\frac{1 - w_t}{1 - w_r} - 1\right)$	$W_d = K_t \cdot \frac{x_r - x_t}{1 + x_t}$
3. Wassermenge $W_d$	entsprechende Rohkohlenmenge	$K_r = W_d \cdot \frac{1 - w_t}{w_r - w_t}$	$K_r = W_d \cdot \frac{1 + x_r}{x_r - x_t}$
	erzeugte Trockenkohlenmenge	$K_t = W_d \cdot \frac{1 - w_r}{w_r - w_t}$	$K_t = W_d \cdot \frac{1 + x_t}{x_r - x_t}$

auf der linken Ordinate. Der Schnittpunkt dieser Verbindungslinie mit der Mittelordinate gibt die gesuchte Menge Kohle, bezogen auf die Ausgangsmenge (= 100%). Erhält man Werte über 100%, so ist die zu der bekannten Trockenkohlenmenge gehörige Rohkohlenmenge gesucht. Umgekehrt ergeben die Werte unter 100% die gesuchte Trockenkohlenmenge. Hat nun der betreffende Betrieb durch Abrieb, Staub, Bruch usw. einen Verlust von bekannter Größe, so geht man von dem Schnittpunkt auf der Mittelordinate dem Verlauf der Verlustkurven nach bis zum Schnitt mit der entsprechenden Ordinate. Von hier geht man horizontal hinüber zur Mittelordinate und liest die endgültige Menge ab.

Die Bestimmung der zu verdampfenden Wassermenge ist im Bereich der Trockenkohle (unter 100%) anders als im Bereich der Rohkohle (über 100%). Wenn man von Rohkohle auf Trockenkohlenmenge übergeht, so ist das zu verdampfende Wasser die Differenz zwischen 100% und der gefundenen Trockenkohlenmenge ohne Berücksichtigung der Staub- und Bruchverluste. — Beim Übergang von Trockenkohle auf Rohkohle läßt sich das zu verdampfende Wasser nur so bestimmen, daß man von der errechneten Rohkohle wieder auf Trockenkohle zurückrechnet und im Trockenkohlenbereich die zu verdampfende Wassermenge abliest.

Ähnlich ist die Berechnung der Menge der Verlustkohle. Während man bei der Bestimmung der Trockenkohle aus Rohkohle den Verlust direkt als Differenz auf der Mittelachse ablesen kann, muß man bei der Berechnung von Rohkohle aus Trockenkohle auch wieder von der abgelesenen Rohkohlenmenge auf die Trockenkohlenmenge zurückrechnen, um den Verlust an Trockenkohlenmenge zu bekommen.

Zwei Beispiele mögen dies erläutern:

1. Ein Werk fördert täglich 6000 t Rohkohle mit 51% Wasser und muß die Kohle auf 18% Wasser trocknen. Der Staub- und Bruchverlust betrage 8%, bezogen auf Trockenkohle. Wieviel Trockenkohle und Briketts werden täglich hergestellt, und wieviel Wasser ist zu verdampfen? Wieviel Kohle geht verloren?

Der Schnitt der Verbindungslinie 51% auf der rechten Ordinate und 18% auf der linken Ordinate mit der Mittelordinate ergibt 60% Trockenkohle; also  $6000 \text{ t} \times 0,6 = 3600 \text{ t}$  täglich. An Wasser ist zu verdampfen  $100 - 60 = 40\%$ , also  $6000 \times 0,4 = 2400 \text{ t}$  täglich. Verfolgt man die Verlustlinie bis zur 8%-Ordinate und geht horizontal wieder zur Mittelordinate zurück, so kommt man auf 55%. Also ist die Brikettmenge  $6000 \text{ t} \times 0,55 = 3300 \text{ t}$  täglich. Der Verlust ist Trockenkohle—Brikettmenge =  $3600 \text{ t} - 3300 \text{ t} = 300 \text{ t}$  täglich, oder auch  $60 - 55 = 5\%$  von  $6000 \text{ t} = 300 \text{ t}$  täglich.

2. Ein Werk will täglich 2000 t Briketts herstellen. Der Wassergehalt der Trockenkohle sei 12%, der der Rohkohle 56%. Der Verlust an Trockenkohle betrage 9%. Wieviel Rohkohle muß an jedem Tag gefördert werden? Wieviel Wasser ist zu verdampfen, und welche Menge Trockenkohle geht täglich für die Brikettierung verloren?

Der Schnitt für die Verbindungslinie 12% auf der rechten Ordinate und 56% auf der linken mit der Mittelordinate ergibt 200%. Verfolgt man die Verlustlinie bis zum Schnitt mit der 9%-Ordinate und geht wieder horizontal zur Mittelordinate zurück, so kommt man auf 220% der Trockenkohle. Das Werk benötigt also täglich  $2000 \text{ t} \times 2,2 = 4400 \text{ t}$  Rohkohle. Zur Bestimmung des zu verdampfenden Wassers rechnet man wieder auf Trockenkohle zurück. Der Schnitt 56% auf der rechten Ordinate und 12% auf der linken Ordinate ergibt 50% Trockenkohle =  $2200 \text{ t}$  täglich. Mithin sind  $100 - 50 = 50\%$  der Rohkohlenmenge als Wasser zu verdampfen, im

vorliegenden Falle also  $4400 \text{ t} \times 0,5 = 2200 \text{ t}$ . Die Berücksichtigung für 9% Verlust ergibt eine Brikettmenge von  $45,5\% = 2000 \text{ t}$  täglich. Der Verlust an Trockenkohle ist mithin  $2200 \text{ t} - 2000 \text{ t} = 200 \text{ t}$  täglich.

## II. Das Gefüge des zu trocknenden und zu entwässernden Kohlenhaufwerks.

### 1. Das Gefüge der Kohlen.

Die Art und Intensität der Wasserbindung durch die Kohle hängt von ihrem Gefüge ab. Die hierfür wesentlichen Zusammenhänge müssen deshalb hier gestreift werden (130). Bei der Inkohlung des Ausgangsmaterials, den pflanzlichen Bestandteilen, erfolgt zunächst eine Umbildung in die kolloidale Struktur der Humusbestandteile, die unter chemischem Abbau und gleichzeitiger Anreicherung an Kohlenstoff allmählich fester und dichter gelagert werden. Hierbei bilden sich zunächst die Zellulose- und Ligninbestandteile in die kolloidalen Huminsäuren um (14, 48, 143), die zuerst als Hydrosole oder Hydrogele vorliegen und nach und nach durch Abspaltung von Wasser in das wasserunlösliche Gel übergehen. Während die Braunkohle je nach der Entwicklungsstufe eine mehr oder weniger große Menge an kolloidalen Hydrogelen von hydrophiler (wasserfreundlicher) Beschaffenheit enthält, haben diese Bestandteile in der Steinkohle vollständig die feste, wasserunlösliche und hydrophobe (wasserfeindliche) Gelform angenommen.

Die festen Brennstoffe sind keineswegs von homogener Beschaffenheit. Sie stellen ein Gemenge von Bitumina, Huminsäure und Huminen dar und zeigen daneben auch makroskopisch eine Wechsellagerung von verschiedenen Bestandteilen. Die Kohlensubstanz wird außerdem von mehr oder weniger feinverteilten Beimengungen von mineralischen Bestandteilen — im wesentlichen Sande, Tone, Schwefelkies und andere Salze — durchsetzt. Neben den reinen Kohlenstücken enthält das Kohlenhaufwerk meistens noch grob mit Bergen durchwachsene Stücke und reine Bergeteilchen. Wegen der Erschwerung des Entwässerungs- und Trocknungsvorganges und der Schwierigkeit des Klärens von Trüben ist insbesondere der Ton von Bedeutung.

Die deutsche tertiäre Braunkohle zeigt fast durchweg einen erdigen Charakter und geht teilweise in eine festere knorpelige Beschaffenheit über. Im Innern ist die Kohle von groben und feinen Poren und Kapillaren durchsetzt, die nach neueren Untersuchungen bis zu einer Größenordnung von  $1 \mu\mu$  ermittelt worden sind (1, 2, 3, 4, 11, 39, 85, 97, 115, 146). Neben den erdigen Bestandteilen

treten Lignite auf, d. s. die Holzreste, die teilweise noch recht gut erhalten sind. Der Wassergehalt der deutschen Braunkohlen schwankt zwischen 63 und 50 % und sinkt bei den festeren Kohlen vereinzelt bis auf 40 %. Die nordböhmische Braunkohle, die österreichische Glanzkohle, die amerikanischen Lignite und die bayrische Pechkohle sind ebenfalls tertiäre Braunkohlen (5, 15, 24, 46, 109, 112, 125), die sich infolge der tektonischen Beanspruchung in einem fortgeschritteneren Grad der Inkohlung befinden und daher auch eine dichtere Struktur bei einem Wassergehalt von rd. 15—35 % aufweisen.

Bei der Steinkohle überwiegen in allen ihren Abarten, wie Gasflamm-, Gas-, Fett-, Eß- und Magerkohle, die Streifenkohlen mit ihrer Wechsellagerung von Glanzkohle (Vitrit), Mattkohle (Clarit + Durit) und Faserkohle (Fusit). Die unterschiedliche Eigenfestigkeit (49, 144) bedingt eine wechselnde Gefügelockerung der Streifenarten durch tektonischen und Abbaudruck; während Vitrit meist stark von Spalten durchzogen ist, setzen sich diese im Duritgefüge nicht fort, wodurch verschiedene Bedingungen zur Wasseraufnahme gegeben sind, die bei den Zellräumen des Fusits im Falle fehlender Infiltration durch Mineralsubstanz besonders günstig liegen. Dies wird aber nur durch die Struktur des Fusits verursacht, während die Kohlensubstanz selbst durchaus hydrophobe Eigenschaften aufweist, wie sich im Flotationsverhalten zeigt (12, 75), und es in diesem am weitesten vorgeschrittenen Inkohlungszustand naheliegt.

Entwässerung und Trocknung kommt in der Hauptsache nur für die Feinkohle, d. h. für das Korn unter 10 mm in Frage. Ihr Anteil nimmt aber durch die maschinellen Gewinnungsmethoden naturgemäß trotz der Bemühungen zur Erhaltung der Grobstückigkeit vielfach zu. Besonders der Anteil an feinstem Korn oder Staub, zu dessen Bildung vor allem der Fusitgehalt beiträgt, wird durch die modernsten Abbaumethoden gefördert. Der Feinkohlenanteil der Förderung beträgt bis zu 60 %, vereinzelt sogar 70 % und darüber.

Im allgemeinen hat die Steinkohle im grubenfeuchten Zustand einen Wassergehalt von 1—6 %. Der hohe Bergegehalt von 10 bis 20 % erfordert für die Verwertung und Weiterverarbeitung eine sorgfältige Aufbereitung, die zumeist auf nassem Wege vorgenommen wird. Da die Kohle hierdurch stark angefeuchtet wird, muß das Wasser je nach dem Verwendungszweck wieder durch die Entwässerung bzw. Trocknung mehr oder weniger entfernt werden.

Die Aufbereitung liefert außer den bereits trocken von Hand ausgelesenen Stückkohlen die gewaschenen Grobkornsorten und

die gewaschenen Feinkohlen, die meist der Kokerei zugeführt werden, ferner Schlämme und trocken abgezogenen Staub.

## 2. Das Gefüge des Kohlenhaufwerks.

Wesentlich für die Beurteilung der Entwässerungs- und Trocknungsvorgänge ist neben der Kenntnis vom Aufbau und der Struktur des einzelnen Kornes die Art der Lagerung der einzelnen Kohlenstücke im Haufwerk. TERZAGHI (131 S. 10) unterscheidet für die gegenseitige Kornanordnung die Einzelkornstruktur und die Waben-, Flocken- und Krümelstruktur. Bei den letzteren sind Lückenräume vorhanden, die größer als die vorhandenen Körner sind. Einzelne Körner haften durch Reibungs- und Adhäsionskräfte aneinander und bilden gewissermaßen Körner zweiter Ordnung, durch deren Anhäufung das Haufwerk gebildet wird. Eine unmittelbare Messung des vorhandenen Lückenraumes ist naturgemäß nicht möglich. Bei der Einzelkornstruktur stützen sich die einzelnen Kornstücke gegenseitig ab. Unter der Annahme von Kugeln gleichen Durchmessers kann der Porenraum je nach der Lagerungsart der Haufwerkskugeln und unabhängig von deren Durchmesser zwischen 47,7% (kubische Anordnung) und 26,0% (pyramidale Anordnung) (79) schwanken. In Wirklichkeit weicht die Form der einzelnen Körner mehr oder weniger von der Kugelform ab. Außerdem haben die kleineren Körner die Möglichkeit, die Zwischenräume zwischen den größeren zum Teil auszufüllen. Je nach dem Feuchtigkeitsgehalt, der Kornform, dem Korngrößensbereich und der Kornverteilung der Kohle, der Art der Aufschüttung, ob trocken oder naß, der Schütthöhe, der Fallhöhe, der Lagerzeit usw. ist das Porenvolumen sehr verschieden und ändert sich auch häufig innerhalb des Haufwerks.

Über den Einfluß der einzelnen genannten Größen auf das Lückenvolumen innerhalb des Kohlenhaufwerks ist bisher wenig bekannt. Im allgemeinen weist die lose Aufschüttung feuchter feinkörniger Kohle ein Lückenvolumen auf, das höher als 47,7%, meist 50—60% ist. Untersuchungen (5, 108) über die Größe des Lückenvolumens trockener, lose geschütteter Kohle, die allerdings klassiert war, haben ergeben, daß das Lückenvolumen zwischen 46 und 50% schwankt. Innerhalb eines Haufwerks mit feinen und grobstückigen Korngrößen wird das Lückenvolumen bei trockener Aufschüttung zwischen 47,7 und 26,0% liegen. Bei langsamer Einschwemmung, z. B. Einschlammern von Steinkohlen in Entwässerungstürme, wird das Lückenvolumen kleine Werte annehmen und sich der Grenze von 26,0% nähern.

Da bei der Benetzung eines Kohlenhaufwerks mit Wasser ein Teil des Wassers an die Oberfläche der einzelnen Körner gebunden ist, übt die Oberflächengröße der Kohlenkörner einen wesentlichen Einfluß auf die Menge des gebundenen Wassers aus. Bekanntlich

nimmt die Kornoberfläche und damit die Menge des an ihr haftenden Wassers in einem Kohlenhaufwerk mit kleiner werdender Korngröße beträchtlich zu.

Man hat sich verschiedentlich die Mühe gemacht, die starke Vergrößerung der Oberflächen bei feinen Stauben und Schlämmen, wie sie in der Kohlenstaubpraxis oder bei der Schwimmaufbereitung vorkommen, zu errechnen und hat dabei festgestellt, daß allein bei Annahme von gleich großen Kugeln von etwa  $60\mu$  Durchmesser bei einem spezifischen Gewicht der Steinkohle von  $1,3\text{ g/cm}^3$  1 kg Staub aus Steinkohle eine Oberfläche von etwa  $75\text{ m}^2$  aufweist. Nach PROCKAT würde bei einem mittleren Korndurchmesser von  $60\mu$  und einem spez. Gewicht von  $1,3\text{ g/cm}^3$  eine Wasserhaut von nur  $5\mu$  Stärke bereits einen Feuchtigkeitsgehalt von 31% hervorrufen.

Schließlich ist die Anzahl der Berührungspunkte in einem Haufwerk von Bedeutung, da hier durch Kapillarkräfte erhebliche Wassermengen gebunden werden. Die Zahl der Punkte, an denen sich die einzelnen Kohlenkörner in einem Haufwerk berühren, nimmt mit abnehmender Korngröße zu.

Das Wasserhaltevermögen kleinerer Korngrößen steigt so bedeutend, daß man darauf bedacht sein muß, derartige Körnchen aus dem Aufbereitungsbetrieb möglichst noch im trockenen Zustand auszuscheiden. Die Zahl  $z$  der Berührungspunkte ist bei der Annahme einer würfelförmigen Anordnung von Kugeln  $z = 3n^2(n-1)$ , wobei  $n$  die Anzahl der Kugeln in Richtung einer Würfelkante ist. Das bedeutet, daß 1 g Kugeln mit einem mittleren Durchmesser von  $60\mu$  bei einem spez. Gewicht von  $1,3\text{ g/cm}^3$  20000000 Berührungspunkte haben würden.

Infolge des verschiedenen Verhaltens der großen und kleinen Korngrößen bei der Entwässerung und der Trocknung ist die Kenntnis der Zusammensetzung des Haufwerks nach Korngrößen von Wichtigkeit. Ein Bild hierüber gewinnt man, wenn man das Haufwerk durch genormte Siebe klassiert und die einzelnen Fraktionen gewichts- und anteilmäßig bestimmt (116). Durch Auftragen der Gesamtstückstände über den Maschenweiten der benutzten Siebe erhält man die Körnungskennlinie des untersuchten Haufwerks, die oft auf einfache Weise (99, 117) mathematisch ausgewertet werden kann.

Für die Vornahme der Siebung eines feuchten Kohlenhaufwerks macht sich das an der Kornoberfläche haftende Wasser störend bemerkbar, da die einzelnen Kohlenkörner durch Zwischenkapillarkräfte zusammenbacken und auf diese Weise Unterkorn in die nächsthöheren Siebfraktionen gelangt. Durch Abspritzen und reichliche Wasserzugabe kann diese scheinbare Kohäsion aufgehoben werden. Hiervon wird in der Steinkohlenwäsche häufig Gebrauch gemacht. Bei der Braunkohlenklassierung kann dagegen eine einwandfreie Trennung nach den einzelnen Kornklassierungen erst nach der Abtrocknung des Oberflächenwassers vorgenom-

men werden. Bei großen Kornklassen überwiegt die Schwerkraft der einzelnen Körner, so daß die Adhäsionskräfte verhältnismäßig wenig zur Geltung kommen. Mit zunehmender Kornfeinheit wird jedoch das Verhältnis zwischen den Adhäsionskräften und der Schwerkraft immer ungünstiger, wodurch die Siebschwierigkeiten wachsen (66, 83, 94, 142). Abb. 3 zeigt die Siebfähigkeit grubenfeuchter mitteldeutscher und rheinischer Braunkohle von 0—6 mm bei allmählich zunehmender Trocknung.

Für die Vorgänge der Ent- und Bewässerung eines Kohlenhaufwerks spielt die Benetzbarkeit des einzelnen Kohlenkornes eine wesentliche Rolle.

Nach FREUNDLICH (38 [S. 224]) ist die Benetzbarkeit abhängig von dem gegenseitigen Verhältnis

a) zwischen der Oberflächenspannung  $\sigma_1$  des Wassers oder einer anderen Flüssigkeit gegen das umgebende Gas;

b) zwischen der Oberflächenspannung  $\sigma_2$  des festen Körpers gegenüber der Gasphase, also in diesem Fall der Kohlenteilchen, deren Beschaffenheit je nach der Art der Teilchen in chemischer Hinsicht und den an der Oberfläche angelagerten Bestandteilen, wie z. B. öligteerige Substanzen, Wasser oder Gase, verschieden ist;

c) zwischen der Grenzflächenspannung  $\sigma_3$  der Kohlenteilchen gegen das Wasser oder die Flüssigkeit.

Die Differenz  $\sigma_2 - \sigma_3$  wird mit Haftspannung bezeichnet. Ist diese Haftspannung größer als die Oberflächenspannung  $\sigma_1$  der Flüssigkeit, so tritt völlige Benetzung ein. Wird der negative Wert der Haftspannung größer als die Oberflächenspannung  $\sigma_1$  der Flüssigkeit, so liegt völlige Unbenetzbarkeit vor. In den dazwischenliegenden Fällen ist die Haftspannung gleich dem durch den Cosinus des Randwinkels gegebenen Bruchteil der Oberflächenspannung der Flüssigkeit. Der Randwinkel kann gemessen werden und stellt sich ein, wenn man einen Tropfen der Flüssigkeit auf die glattpolierte Kohlenoberfläche bringt. Er liegt zwischen den Grenzwerten  $0^\circ$  und  $180^\circ$  und bildet ein Maß für die Größe der Benetzbarkeit.

Die Stärke der Benetzbarkeit der Kohlen für verschiedene Flüssigkeiten, wie z. B. Wasser, Benzol usw. ändert sich je nach den entsprechenden Werten von  $\sigma_1$  und  $\sigma_3$ . Einen wesentlichen Einfluß übt die chemische Beschaffenheit der Kohlensubstanz und der Salzgehalt des Wassers auf die Werte  $\sigma_2$  und  $\sigma_3$  und damit die Benetzbarkeit aus.

Jüngere Brennstoffe, wie z. B. Torf und grubenfeuchte jüngere und mittlere Braunkohle, deren kolloidale Struktur hydrophilen Charakter zeigt, besitzen eine große Benetzbarkeit. Mit zunehmender Inkohlung nimmt die Benetzbarkeit allmählich ab. Eine gleiche Wirkung wird durch die Trocknung der ursprünglich hydrophilen Braunkohle bei höherer Temperatur infolge eintretender kolloidaler und chemischer Änderungen hervorgerufen (11 [S. 182] 54, 115).

Auf Grund der Beobachtungen der Vorgänge beim Fleißnerverfahren kommt KLEIN (69) zu dem Ergebnis, daß das Vorhandensein bestimmter Atomgruppen, z. B. der Hydroxyl-, Amido-, Carboxyl- und anderer Grup-

pen organischen Körpern hydrophile Eigenschaften verleiht. Im Gegensatz dazu rufen andere Atomgruppen, wie z. B. aliphatische und zyklische Kohlenwasserstoffradikale, an der Oberfläche hydrophobe Eigenschaften hervor. Die Einwirkung von Ätzalkalien erhöht die Benetzbarkeit, während der Einfluß von höheren Temperaturen sie herabsetzt.

Diese inneren Zusammenhänge bedürfen näherer Untersuchung. Die genaue Kenntnis der Vorgänge bei der Benetzung kann z. B. die Entwässerung des Kohlenhaufwerks, insbesondere der feinen Schlämme und andererseits die Arbeitsweise der Naßentstaubungsanlagen in betrieblicher und wirtschaftlicher Hinsicht bestimmend beeinflussen.

### III. Die Bindung der Feuchtigkeit an die Kohle.

Vor der Behandlung der Entwässerungs- und Trocknungsverfahren müssen zunächst die Fragen berührt werden, wie die Feuchtigkeit an die Kohle gebunden ist und in welcher Form sie auftritt. Die Kenntnis dieser Fragen ist wesentlich für das Verständnis des Entwässerungs- und Trocknungsvorganges.

Nach der Art des Zusammenhanges zwischen der Flüssigkeit und der Trockensubstanz eines Kohlenkornes und eines ganzen Haufwerks unterscheidet man entsprechend der schematischen Abb. 4:

1. Oberflächenwasser = Haftwasser, Adsorptionswasser, Adhäsionswasser, Zwischenkapillarwasser, Grobkapillarwasser.

2. Inneres Wasser (Innenkapillarwasser).

Unter dem Begriff Oberflächenwasser ist das an die äußere Oberfläche des Kohlenkornes im Haufwerk gebundene Wasser zusammengefaßt.

Das Adsorptionswasser ist die im Bereich des Potentialfeldes der Molekularkräfte an die äußere Oberfläche der Kohlenstücke mehr oder weniger stark gebundene Wasserhülle. Dieser sog. Flüssigkeitsfilm bildet sich durch innige Berührung mit der Flüssigkeit bzw. durch Verdichtung eines Teiles der Gasphase eines gesättigten Gasraumes auf der Kornoberfläche. Die durch Adsorption gebundene Wassermenge umfaßt nur äußerst kleine Beträge und hat eine Stärke von molekularer Größenordnung, d. h. also eine Dicke von etwa  $0,1-1 \mu$ .

Die adsorptive Bindung beruht auf den ungesättigten Anziehungskräften der an der Kornoberfläche befindlichen Moleküle. Durch diese Bindung wird eine Beschränkung der Brownschen Bewegungen in der Wasserhülle bewirkt, die ein Freiwerden latenter Wärme, also eine Temperatursteigerung zur Folge hat, die „Benetzungswärme“ genannt wird. Zunker (13) bezeichnet mit Hygroskopizität oder Hygroskopizitätsziffer „diejenige Wassermenge in Gewichtsprozenten des trockenen Bodens, die der Boden

enthält, wenn bei seiner weiteren Benetzung keine Wärme mehr frei wird“. Sie ist etwa gleich der Wasseraufnahme eines trockenen Bodens über 10%iger Schwefelsäure. Hygroskopisch gesättigt ist ein Kohlenhaufwerk bzw. ein Erdboden usw. nur, wenn die Bodenluft (Luft im Haufwerk) mit Feuchtigkeit gesättigt ist, oder der spannungsfreie d. h. nicht unter Kapillarwirkung stehende Porenraum mit flüssigem Wasser erfüllt ist.

In der Bergtechnischen Abteilung des Braunkohlen-Forschungs-Instituts Freiberg i. Sa. wurden Versuche angestellt, Braunkohlenkoks, der bei einer Schmeltemperatur von  $\sim 400^{\circ}\text{C}$  gewonnen war, nach Zusatz von etwa 10—12% Wasser zu brikettieren. Auch hier zeigte sich stets eine starke Temperaturerhöhung des Kokes während der Beigabe und Einmischung des Wassers.

Mit der Herabsetzung der Brownschen Bewegungen ist eine entsprechende Erhöhung der Viskosität des adsorptiv gebundenen Wassers verbunden, durch die eine erhebliche Steifigkeit desselben herbeigeführt werden kann, die besonders bei niederen Temperaturen wirksam wird.

Auf der inneren Oberfläche, d. h. den Wandungen der Kapillaren im Korninnern befindet sich ebenfalls adsorptiv gebundenes Wasser. Zwischen dem Adsorptionswasser in der äußeren und inneren Oberfläche besteht in physikalischer Hinsicht keine Grenze. Eine Unterscheidung wird hier lediglich in bezug auf die äußere und innere Oberfläche vorgenommen.

Bei Vorhandensein eines höheren Feuchtigkeitsgehaltes wird das Einzelkorn von einer größeren Wassermenge eingeschlossen sein, die durch Adhäsionskräfte an das Korn gebunden ist. Diese Wasserschicht, die einen meßbaren Betrag haben kann und auch äußerlich an der Kornoberfläche sichtbar ist, wird als Adhäsionsflüssigkeit bezeichnet. Grubenfeuchte Kohle besitzt keine oder nur geringe Mengen von Adhäsionswasser. Durch Benetzen mit einer Flüssigkeit, z. B. durch Berieseln oder Waschen mit Wasser, können jedoch größere Wassermengen durch Adhäsionskräfte festgehalten werden. Zwischen Adsorptions- und Adhäsionswasser besteht nur ein gradueller Unterschied in der Intensität der Bindung, die in beiden Fällen auf das Molekularkraftfeld an der Oberfläche zurückzuführen ist.

In einem Haufwerk wird in den engen Zwischenräumen in der Nähe der Berührungsstellen der einzelnen Körner durch Kapillarwirkung, d. h. durch Verstärkung der Adhäsionskräfte bei dicht benachbarten Oberflächen eine gewisse Menge an Wasser festgehalten, die die Bezeichnung Zwischenkapillarwasser erhalten soll. Die Menge des Zwischenkapillarwassers hängt von der Zahl der Berührungspunkte der einzelnen Körner in dem Haufwerk ab. Sie wird naturgemäß um so größer, je kleiner der Einzelkorndurchmesser ist. HILGENSTOCK hat für Steinkohle gefunden, daß in einem Haufwerk zwischen 0,25—0,10 mm das ganze Lücken-

volumen bereits durch Adhäsions- und Zwischenkapillarwasser erfüllt ist.

Sind Spaltflächen und andere grobe, mit bloßem Auge sichtbare Hohlräume mit Flüssigkeit gefüllt, so spricht man wegen der Bindung der Flüssigkeit durch Kapillarkräfte von Grobkapillarflüssigkeit.

Unter dem inneren Wasser ist die in dem inneren Kohlenkorn vorhandene Flüssigkeit verstanden. Die Bindung dieser Flüssigkeit an die Kohle ist zum größten Teil physikalischer Natur. Bei der Beschreibung der Struktur der Kohle wurde bereits darauf eingegangen, daß die aus den Humusbestandteilen entstandene Kohle vollkommen von Kapillaren von erheblicher Größe bis zu den feinsten Ausmaßen von  $1-0,1 \mu$  durchsetzt ist (115). Bei der grubenfeuchten Kohle ist das Innere dieser Kapillaren je nach der inneren Benetzbarkeit ganz oder zum Teil mit Wasser gefüllt. Dieses steht unter dem Einfluß von Kapillarkräften und wird an den Kapillarwandungen durch Adsorptions- und Adhäsionskräfte festgehalten. Ein Teil dieses inneren Wassers kann unter den normalen Sättigungsverhältnissen der Atmosphäre ohne weiteres an der Luft abtrocknen. Nach Unterschreiten eines bestimmten Wassergehaltes zeigt die Kohle dann infolge der verstärkten Einwirkung der genannten Kräfte hygroskopische Eigenschaften.

Welche weiteren Kräfte auf die im Innern der Kohle gebundenen Flüssigkeiten noch einwirken, ist bisher noch wenig bekannt. Bei Vorhandensein von Hydrogelen (z. B. im Torf und in der Braunkohle) und löslichen Mineralien (z. B. NaCl) bestehen zwischen den gelösten Kolloidteilchen und Ionen und den Molekülen des Lösungsmittels irgendwelche Kräfte, deren Eigenschaften allerdings z. Zt. noch wenig erforscht sind. Bei der Bindung dieses Hydratwassers dürften nach EUCKEN (27 [S. 176]) in zahlreichen Fällen elektrische Kräfte (Nebenwertigkeiten) eine Rolle spielen.

Außer dem in der grubenfeuchten Kohle bereits vorhandenen Wasser entstehen während des Trocknungsvorganges durch Zerfall hochwertiger Kohlenwasserstoffe vor allem bei den jüngeren Kohlen mehr oder weniger geringe Wassermengen, die mit Konstitutionswasser bezeichnet werden.

Bei der deutschen erdigen Braunkohle ist der hohe Feuchtigkeitsgehalt von 60—40% im bergfeuchten Zustand im wesentlichen, d. h. etwa zu 90—95% durch das im Korninnern vorhandene Wasser bedingt. Die Steinkohle weist wegen der mit der weitgehenden Inkohlung verbundenen dichten Struktur und des durch die Alterung hervorgerufenen völligen Verlustes der kolloidalen Eigenschaften der Kohlensubstanz eine innere Feuchtigkeit von 1—7% und darüber, abnehmend mit dem geologischen Alter, auf.

## IV. Die Entfernung des Wassers aus der Kohle.

### 1. Die Begriffe: Entwässerung und Trocknung.

Die beiden Begriffe Entwässerung und Trocknung werden sehr häufig verwechselt. Im Interesse einer klaren Begriffsbestimmung und zur Vermeidung von Mißverständnissen bedarf es zunächst einmal einer Abgrenzung. In beiden Fällen handelt es sich darum, die Trockensubstanz der feuchten Kohle von dem mit ihr verbundenen Wasser teilweise oder vollständig zu trennen. Diese Bindungskräfte müssen durch andere von außen an das Korn oder das Haufwerk herantretende Kräfte aufgehoben werden. Die Wasserentziehung erfolgt:

1. durch die Einwirkung mechanischer Energie;
2. durch die Einwirkung von thermischer Energie.

Dementsprechend versteht man unter Entwässerung<sup>1</sup> die Trennung des Wassers aus dem feuchten oder nassen Kohlenhaufwerk auf mechanischem Wege. Hierbei wird das der Kohle entzogene Wasser nach der Trennung in flüssigem Aggregatzustand erhalten.

Unter Trocknung<sup>1</sup> dagegen bezeichnet man die Entziehung des an die Kohle gebundenen Wassers auf thermischem Wege. Die Wärme kann entweder allmählich der Umgebung entzogen (Verdunstung an der Luft) oder auf künstlichem Wege zugeführt werden. Das Wasser, das in der feuchten Kohle vor der Trocknung enthalten war, erscheint nach der Trocknung meist im dampfförmigen Zustand<sup>2</sup>.

Während das Anwendungsgebiet der Trocknung sich wegen der hohen Betriebs- und Anlagekosten auf diejenigen Fälle beschränkt, wo eine Entwässerung nicht möglich ist, also das Wasser in verhältnismäßig enger physikalischer Bindung an den Feststoff vorliegt, wird die Entwässerung stets da angewendet, wo das Wasser aus der Kohle auf mechanischem Wege leicht entfernt werden kann. Insbesondere umfaßt die Entwässerung auch alle diejenigen Fälle, bei denen es sich um die Trennung verhältnismäßig kleiner Feststoffmengen von großen Wassermengen handelt. Das Ziel der Entwässerung ist die Zerlegung des Zweistoff-Systems Feststoff—Wasser bei gewöhnlicher Temperatur in zwei Anteile, von denen der eine möglichst wasserarm, der andere möglichst feststoffarm ist. Im Gegensatz zur Trocknung legt man im allgemeinen auch

<sup>1</sup> Diese Begriffsbestimmungen decken sich weitgehend mit denen des englischen (21 [S. 356]) und amerikanischen (129 [S. 669—1019]) Schrifttums (Trocknung = drying; Entwässerung = dewatering).

<sup>2</sup> Beim Fleißnerverfahren tritt ein Teil des Wassers in flüssiger Form aus den Kapillaren aus.

Wert auf die Rückgewinnung des im Aufgabegut vorhandenen Wassers. (Wiederbenutzung als Betriebswasser in der Kohlenwäsche.) In besonderen Fällen, z. B. bei der Klärung von Abwässern aus Aufbereitungen und aus Naßentstaubungen, kann die Gewinnung eines möglichst klaren und feststofffreien Wassers sogar Hauptzweck werden.

## 2. Die Entwässerung der Kohle.

a) **Der Vorgang der Entwässerung im allgemeinen.** Der Grad der Wasserentziehung bei der Entwässerung hängt einerseits von der Art und Stärke der Wasserbindung ab, die ihrerseits wieder durch die Struktur und Körnung bedingt ist, andererseits von den technischen Mitteln, die zur Anwendung kommen, und schließlich von der Zeitdauer des Entwässerungsvorganges. Bei der Entwässerung wird der Wassergehalt des Kohlenhaufwerks durch Absinken, Absetzen, Pressen, Anwendung von Unterdruck, Schütteln, Filtern oder Schleudern herabgesetzt. Da die dabei wirksamen Kräfte verhältnismäßig gering sind, gelingt es ganz unabhängig von der Art und der Zusammensetzung des Haufwerks bei der Entwässerung nur, das lose an die Oberfläche der Kohle gebundene Wasser zu entfernen. Es wird also in erster Linie das Adhäsionswasser, sodann ein Teil des Zwischen- und Grobkapillarwassers durch den Entwässerungsvorgang abgetrennt werden können. Das Adsorptions- und Innenkapillarwasser kann dagegen auf mechanischem Wege nicht entfernt werden.

Die Stärke, mit der das Haftwasser an das Korn gebunden ist, richtet sich nach dem Grad der Benetzbarkeit der Kornoberfläche. Je schlechter die Benetzbarkeit ist, um so leichter gelingt die Entwässerung. An einer glatten Oberfläche kann das Adhäsionswasser außerdem leichter ablaufen, als an einer rauhen, erdigen Oberfläche, in deren Vertiefungen bereits kapillare Kräfte an der Wasserbindung teilzunehmen beginnen.

Das Zwischenkapillarwasser ist durch die Kapillarkräfte verhältnismäßig fest gebunden und kann durch die Entwässerung nur teilweise entfernt werden. Bei grobem Haufwerk wirkt es auf die Gesamtfeuchtigkeit nur sehr wenig ein. Mit zunehmender Kornfeinheit wird die Entwässerung immer schwieriger, besonders wenn kolloidale Beimengungen, wie z. B. Ton, vorhanden sind. Um die Schwierigkeiten der Entwässerung der feinen Schlämme in den Steinkohlenaufbereitungen einzuschränken, wird daher häufig das feinste Korn aus der Förderkohle vor Eintritt in die Aufbereitung durch Sicht- und Entstaubungsvorrichtungen abgetrennt.

Da die Entwässerungsverfahren je nach der physikalischen

Bindung des Wassers verschieden sind und mit zunehmender Kornfeinheit größere Aufwendungen erfordern, folgt daraus der Einfluß der Klassierung des zu entwässernden Haufwerks auf die wirtschaftliche und technische Gestaltung des Entwässerungsvorganges.

Wesentlich für den Wirkungsgrad der Entwässerung ist das Verhältnis des Anteiles des Oberflächenwassers zum Innenwasser. Dieses Verhältnis ist für die Steinkohle, die aus der Naßaufbereitung kommt, sehr groß. Bei der Braunkohle dagegen besteht die Feuchtigkeit fast ausschließlich aus Innenwasser. Das Oberflächenwasser tritt nur in geringem Maße bei schlechter Flözentwässerung, langen Regenzeiten und in den seltenen Fällen der nassen Aufbereitung in geringem Maße auf und tropft wegen der hohen Benetzbarkeit der Braunkohle im allgemeinen nur unvollkommen ab, so daß der Wassergehalt nur auf dem Wege der Trocknung herabgesetzt werden kann.

**b) Die technische Durchführung der Entwässerung.** Die in der Praxis eingeführten Verfahren können entsprechend der Art der wirkenden Kräfte wie folgt eingeteilt werden:

Einwirkung von Massenkräften auf das Wasser (Schwerkraftentwässerung, Fliehkraftentwässerung),

Einwirkung von Massenkräften auf die Kohle (Schwerkraftniederschlagung, Entwässerung durch Schütteln),

Einwirkung von Saug- und Druckkräften (Filterung, Absaugung).

Verfahren, die nach anderen Grundsätzen arbeiten, haben sich in der Praxis bisher im allgemeinen nicht bewährt.

*α) Die Einwirkung von Massenkräften auf das Wasser.* Die Einwirkung der Schwerkraft. Diese Verfahren beruhen darauf, daß dem Wasser in den Entwässerungsanlagen Gelegenheit zum Abtropfen gegeben wird.

Die Nußkohlen und die Kokskohlen werden nach dem Waschen in den zum Transport benutzten Entwässerungsbecherwerken vor-entwässert. Entwässerungsbänder werden nur noch in Ausnahmefällen angewandt. Die Hauptentwässerung, insbesondere der Kokskohle, erfolgt in den Entwässerungstürmen oder -bunkern, in denen die Kohle 24—36 Stunden verbleibt. Je nach dem Feinkorn- und dem Tongehalt erreicht man Endwassergehalte zwischen 18 und 10%. Zur Erhöhung des Entwässerungserfolges sind zahlreiche Versuche angestellt worden, wie Einbau von Filterblechen in die Seitenwände, den Boden und die Mitte der Bunker, Verwendung von beweglichen Ketten, die in den Bunker eingehängt sind, zum Aufreißen der sich häufig bildenden Lettenschichten usw. Als

vorteilhaft für den Gesamtentwässerungserfolg hinsichtlich der Standdauer und der erreichten Endfeuchtigkeit hat sich auch die getrennte Bunkerung und Entwässerung herausgestellt. Neuerdings wurde auch die Anwendung von Unterdruck im unteren Teil eines Feinkohlenturmes erfolgreich versucht (44). Die hauptsächlichsten Nachteile dieser an sich einfachen Entwässerungsart sind großer Platzbedarf und hohe Anlagekosten, jedoch sind die Betriebskosten sehr niedrig.

Die Einwirkung der Fliehkraft. Die Wirkungsweise der Schleudern (92) beruht auf der Abschleudung des Haftwassers durch Fliehkräfte. Die umgeschleuderte Kohle wird durch einen Siebkäfig zurückgehalten, während das abgeschleuderte Wasser durch das Sieb treten soll. Die Anwendung von Schleudern zur Kohleentwässerung ist noch verhältnismäßig jungen Datums. In anderen Industrien, in denen kristalline Stoffe mit praktisch gleicher Korngröße (z. B. Ammonsulfat) zu schleudern sind, haben sich die Schleudern bewährt; bei den gänzlich anders gearteten Kohenschlämmen sind die Erfahrungen in Deutschland bislang unbefriedigend. Mit dem abfließenden Wasser treten beträchtliche Mengen von Feststoff aus. Der Verschleiß der Siebe ist erheblich, und der aus dem ausgeschleuderten Wasser sich noch absetzende Schlamm ist meist wegen der starken Pyritanreicherung unverwertbar.

β) *Die Einwirkung von Massenkräften auf die Kohle.* Die Einwirkung der Schwerkraft. In diesem Verfahren werden die Feststoffteilchen in einer Trübe durch die Einwirkungen der Schwerkraft zum Absinken gebracht.

Die Entwässerung von Schlammtrüben mit Hilfe der Einwirkung der Schwerkraft läuft in erster Linie darauf hinaus, die Trübe einzudicken, um die weiteren Entwässerungsverfahren wirtschaftlicher zu gestalten oder das Wasser von den Feststoffteilchen möglichst zu reinigen. Die bekanntesten Verfahren sind die Klärteiche, die Spitzkästen und die Eindicker. Eine noch ungelöste Frage bildet hierbei die Absinkgeschwindigkeit kleiner Mineralkörner verschiedenen spezifischen Gewichts und verschiedener Kornform und Oberflächenbeschaffenheit in der nach unten immer zäher und dichter werdenden Schlammtrübe.

Schüttleinrichtungen. Dicke Schlämme, die an sich sehr schwer zu entwässern sind, werden auf Schüttel-, Feder- oder Zittersiebe aufgegeben. Durch die Schüttel- und Zitterbewegung werden die Schlamnteilchen dichter aneinander gelagert. Auf diese Weise wird der Porenraum verringert. Das überschüssige Wasser tropft dabei aus der dünn aufgegebenen Schlammschicht durch den Siebboden ab. Versuche, den Entwässerungserfolg durch Anwendung

von Unterdruck unter dem Siebboden zu beschleunigen und zu vergrößern, haben nach GOLDMANN (44) keine wesentliche Verbesserung ergeben.

γ) *Die Einwirkung von Saug- und Druckkräften (äußere Kräfte).* Bei der Schlammentwässerung mittels Filtern ist ein Erfolg nur mit tonarmen oder enttonen Schlämmen erzielbar. Zur möglichst schnellen Entwässerung des Filterkuchens wird mit mehr oder weniger großen Druckunterschieden auf beiden Seiten des Filtermittels gearbeitet. Man kann hierzu sowohl Überdruck als auch Unterdruck anwenden. Die verschiedenen Filterbauarten sind mehrfach (89, 93) beschrieben worden. Die ohne Unterbrechung arbeitenden Unterdruckfilter haben sich gegenüber den mit Überdruck und den unterbrochen arbeitenden Filterpressen bei weitem die Vorhand verschafft.

Untersuchungen über die Bemessung der Porenweite des Filtermittels sowie über den zweckmäßig anzuwendenden Unterdruck dürften nicht nur wissenschaftlich, sondern auch für die Praxis von Wert sein. Von Interesse wären weiterhin Untersuchungen über die Anwendbarkeit des Unterdruckfilters zur Entwässerung von Feinkohle als Ersatz für die Trockentürme.

Daß in den Entwässerungsanlagen neben der Entwässerung in geringem Maße auch eine Verdunstung stattfindet, sei der Vollständigkeit halber erwähnt.

### 3. Die Trocknung der feuchten Kohle.

Bei der Trocknung erfolgt die Feuchtigkeitsverminderung dadurch, daß das Wasser aus der feuchten Kohle auf thermischem Wege verdunstet oder verdampft wird. Auf diese Weise gelingt es bei Anwendung höherer Temperaturen fast restlos, die Kohle von ihrem Wassergehalt zu befreien. Durch den Trockenprozeß wird also sowohl das restliche Oberflächenwasser als auch das Innenkapillarwasser unter gewissen, später zu erörternden Einschränkungen entfernt. Es ist also möglich, mit Hilfe des Trockenprozesses jeden gewünschten Trockenheitsgrad der Kohle zu erreichen.

In physikalischer Hinsicht besteht grundsätzlich kein Unterschied, ob die Trocknung ohne besondere Wärmezufuhr bei gewöhnlicher Temperatur an der Luft, oder ob sie bei künstlicher Wärmezufuhr erfolgt. Zur Überführung von Wasser in Dampf ist eine bestimmte Wärmemenge, die Verdampfungswärme, erforderlich, die für 1 kg Wasser von 0° C 595 kcal/kg, von 15° C 587 bzw. von 100° C 539 beträgt. Erfolgt die Trocknung ohne Wärmezufuhr, so wird die zur Überführung des Wassers in Wasserdampf not-

wendige Wärme der Umgebung entzogen. Das hier vorhandene sehr kleine Wärmegefälle, das dadurch entsteht, daß die Verdunstungsoberfläche sich auf eine Temperatur abkühlt (Kühlgrenze), die unterhalb der Temperatur der Umgebung liegt und von dem in der ungesättigten Luft vorhandenen Dampfdruck  $P_D$  abhängig ist, bewirkt nur eine sehr geringe Verdunstungsgeschwindigkeit. Die in der Trocknungsanlage künstlich zugeführte Wärme liefert einerseits die Verdampfungswärme und erhöht andererseits durch die höhere Temperatur die Wasserdampfaufnahmefähigkeit der Umgebung der zu trocknenden Kohle. Durch die künstlich zugeführte Wärme wird also die Verdunstung sehr wesentlich beschleunigt. Trotz der hohen Kosten, die die mit künstlicher Wärmezufuhr arbeitende Trockenanlage verursacht, ist die wirtschaftliche Durchführung der Trocknung von Massengütern, wie sie die Kohle darstellt, erst auf diese Weise möglich.

**a) Die Verdunstung und die Verdampfung.** Die Verdunstung beruht darauf, daß das als Trockenmittel benutzte ungesättigte Gas, z. B. Luft oder Feuerungsgas, imstande ist, Wasserdampf aufzunehmen. Nach dem Daltonschen Gesetz setzt sich der Gesamtdruck  $P$  eines feuchten Gases aus dem Teildruck des Gases  $P_L$  und dem Teildruck des Wasserdampfes  $P_D$  zusammen. Es ist also:  $P = P_L + P_D$ . Zu jeder Temperatur gehört ein bestimmter Sättigungsdruck für Wasserdampf, der mit  $P''$  bezeichnet wird, und aus Tabellen entnommen werden kann (61). Für  $0^\circ \text{C}$  beträgt dieser Sättigungsdruck z. B.  $6,4 \text{ kg/m}^2$  (mmWS). Er steigt parabelartig mit der Temperatur an und beträgt bei  $100^\circ \text{C}$   $10\,333 \text{ kg/m}^2$ .

Ist der in dem feuchten Gas vorhandene Wasserdampfdruck  $P_D$  geringer als der der betreffenden Temperatur zugeordnete Sättigungsdruck  $P''$ , so liegt ein ungesättigter Zustand vor und es besteht die Beziehung  $P_D = \varphi \cdot P''$ , wo  $\varphi$  den Feuchtigkeitsgrad bedeutet. ( $\varphi = P_D : P''$ .) Für den obigen Gesamtdruck eines feuchten Gases wird dann:

$$P = P_L + \varphi \cdot P''.$$

Wird der Teildruck des Wasserdampfes  $\varphi \cdot P''$  mit der Erhöhung der Temperatur oder mit der Erniedrigung des Gesamtdruckes im Trockner gleich dem Gesamtdruck ( $P = \varphi \cdot P''$ ), so bildet das Gas einen störenden Fremdkörper und wird verdrängt. Der Trockenvorgang unmittelbar über der Oberfläche der zu trocknenden Kohle spielt sich dann im reinen überhitzten Dampf ab. Die Verdunstung geht dabei in Verdampfung über.

Die Gewichtsmenge Wasserdampf, die 1 cbm ganz unabhängig davon, ob noch ein anderes Gas vorhanden ist oder nicht, auf-

nehmen kann, berechnet sich aus der in der Wärmelehre bekannten Formel unter der Annahme, daß der Wasserdampf der allgemeinen Zustandsgleichung der idealen Gase folgt:

$$\gamma_D = \frac{P_D}{R \cdot T} = \frac{\varphi \cdot P''}{R \cdot T}$$

wo  $\gamma_D$  in  $\text{kg/m}^3$  das spez. Gewicht des Wasserdampfes,

$P''$  in  $\text{kg/m}^2$  den Sättigungsdruck,

$R = 47,06$  die Gaskonstante für Wasserdampf,

$T = 273 + t$  die absolute Temperatur bedeutet.

Die graphische Darstellung in Abb. 5, in der die Abhängigkeit des Wasserdampfgehaltes in  $\text{g/cbm}$  für  $\varphi = 1$ ,  $\varphi = 0,75$ ,  $\varphi = 0,5$ ,  $\varphi = 0,25$  von der Temperatur gezeigt ist, veranschaulicht die sehr schnell steigende Wasserdampfaufnahmefähigkeit bei höherer Temperatur.

Die Verdunstung des Wassers aus der Kohle tritt dann ein, wenn der Dampfdruck über der Oberfläche der feuchten Kohle, der mit  $\beta$  bezeichnet wird, größer ist, als der Teildruck des Wasserdampfes  $\varphi \cdot P''$  der ungesättigten Luft. Dicht über der verdunstenden Oberfläche befindet sich eine annähernd gesättigte Gasschicht. Durch Diffusion in die ungesättigte Umgebung wird ein Teil des Wassergehaltes entfernt und der Verdunstungsprozeß kann weiter fortschreiten. Eine Beschleunigung der Abführung des gebildeten Wasserdampfes kann dadurch erreicht werden, daß die ungesättigte Luft, die den Wasserdampf aufnehmen soll, mit größerer Geschwindigkeit über die zu trocknende Kohle geleitet und damit eine größere Spülwirkung erzielt wird. Schließlich kann noch die Verdunstungsleistung vergrößert werden, wenn die während der Verdunstung wirksame Oberfläche des Kohlenaufwerkes auf irgendeine Weise vergrößert wird. Das geschieht dadurch, daß die Kohle die Trockenanlage in einer möglichst dünnen Schicht durchläuft, oder durch Wendeleisten eine dauernde Umwälzung erfolgt, oder daß man die Kohle durch das den Trockner durchströmende Gas rieseln läßt.

Die Verdunstungsgeschwindigkeit hängt also ganz allgemein einmal von der Temperatur und Größe des Sättigungsdefizites der die Kohle umgebenden Luft ab, andererseits aber auch von der Geschwindigkeit, mit der der gebildete Wasserdampf aus dem Bereich der verdunstenden Oberfläche entfernt wird. Auf die Einflüsse der wasserbindenden Kräfte und dem Gefüge der Kohle auf die Verdunstungsgeschwindigkeit wird noch eingegangen.

**b) Der Einfluß der Hygroskopizität der Kohle auf die Trocknung.**  
Sowohl die Steinkohle als auch die Braunkohle besitzen hygro-

skopische Eigenschaften, d. h. sie haben die Fähigkeit, nach einer völligen Abtrocknung bei der Lagerung an der Luft wieder Wasser aufzunehmen. Wird die grubenfeuchte Kohle der Luft ausgesetzt, so trocknet sie andererseits bis auf eine bestimmte Feuchtigkeit, die bei den durchschnittlichen Temperatur- und Sättigungsverhältnissen der Luft bei der Steinkohle 0,5—1,5% und bei der Braunkohle 12—17% beträgt. Eine weitere Trocknung unter diesen Grenzen ist nur durch starke Erwärmung bei einem gleichzeitig geringen Wassergehalt des Trockenmittels, z. B. Luft oder Rauchgas möglich.

Die Ursache der Hygroskopizität ist zum Teil in dem Feingefüge der Kohle zu suchen, auf die bereits unter dem Abschnitt Gefüge der Kohle eingegangen ist. Entsprechend dem mit dem zunehmenden Grade der Inkohlung allmählich dichter werdenden Gefüge und der hiermit im Zusammenhang stehenden Abnahme des inneren Porenvolumens sowie der gleichzeitig erfolgenden chemischen Umbildung der hydrophilen Gele der Kohlensubstanz in den hydrophoben Zustand nimmt die Hygroskopizität von den aus den pflanzlichen Bestandteilen entstandenen Humussubstanzen über den Torf bis zur Steinkohle ab. Unabhängig vom Inkohlungsgrad kann das hygroskopische Vermögen durch hohen Gehalt an porösen Bestandteilen wie Fusin oder durch starken Zermürbungsgrad gesteigert werden. Neben der Struktur der reinen Kohlensubstanz übt auch das Vorhandensein mehr oder weniger feinverteilter tonhaltiger Beimengungen mit quellenden Eigenschaften sowie mineralischer Begleitstoffe, die mit Wasser Lösungen bilden, einen Einfluß auf die Hygroskopizität aus.

Um den Verlauf des Trockenprozesses innerhalb des hygroskopischen Gebietes zu erfassen und einen Einblick in die inneren Zusammenhänge der verschiedenen Trockengeschwindigkeiten zu gewinnen, ist es erforderlich, die physikalische Ursache und Wirkung der Hygroskopizität klarzustellen.

In den feinsten Kapillaren wird das eingeschlossene Wasser durch die innerhalb der Kapillaren wirksamen Kapillarkräfte festgehalten. Diese Kräfte wirken um so stärker ein, je enger und feiner die Kapillaren sind. In den feinsten Kapillaren befinden sich die Wassermoleküle außerdem im Bereich molekularer Nahkräfte. Die Größe dieser Kräfte hängt einerseits von der Feinheit der Kapillaren, andererseits von der Benetzbarkeit der Kapillarwände ab. Auf der gesamten inneren Oberfläche bleibt außerdem zu nächst eine feine Schicht adsorptiv gebundenes Wasser zurück.

Auf die Wassermoleküle der inneren Kohlenfeuchtigkeit wirken also physikalische Kräfte ein, die die Verdunstung bzw. Ver-

dampfung behindern. Hiernach wird der Dampfdruck, der über der Oberfläche von reinem Wasser bei derselben Temperatur den für diese Temperatur feststehenden Wert  $P''$  haben würde, auf einen Wert  $\mathfrak{P}$  erniedrigt. Eine derartige Dampfdruckerniedrigung ist auch bei kristallisierenden und kolloidalen Lösungen<sup>1</sup> bekannt und hängt von dem Grade der Konzentration der Lösung ab. Nach Untersuchungen (85 [S. 62]) in der Kolloidchemie ist der Dampfdruckunterschied zwischen  $P''$  und  $\mathfrak{P}$  in ziemlich weiten Grenzen von der Konzentration des Kolloids nahezu unabhängig. Eine verhältnismäßig starke Zunahme erfolgt erst nach Unterschreiten eines gewissen Feuchtigkeitsgehaltes, der von der Art und dem Zustand des Kolloides abhängig ist. Bei der Kohle, für die diese Erscheinung ebenfalls zutrifft, kann man sich den Vorgang so vorstellen, daß das Wasser zunächst in den größeren Kapillaren, in denen die physikalische Bindung nur sehr schwach ist, verdunstet. Das hygroskopische Verhalten setzt erst dann ein, wenn die Verdunstungszone in die feineren Kapillaren von bestimmter Größenordnung, etwa  $100 - 50 \mu$  vordringt. Neben der Bindung des Wassers in den feineren Kapillaren bleibt aber auf der gesamten inneren und äußeren Oberfläche eine mehr oder weniger dünne Schicht adsorptiv gebundenen Wassers bestehen (2 [S. 880]). Da die Bindung dieser Schicht durch die Adsorptionskräfte sehr stark ist, ruft sie eine hohe Dampfdruckerniedrigung hervor, die um so höher wird, je feiner die Schicht ist, also je mehr die Wassermoleküle in das molekulare Potentialfeld der Kohlenteilchen kommen. Eine Entfernung dieser Schicht durch Trocknung erfolgt daher auch erst bei Anwendung höherer Temperaturen und geringer relativer Feuchtigkeit des Trockenmittels. Gleichzeitig verlangsamt sich die Verdunstungsgeschwindigkeit sehr stark (2 [S. 878 und 898]).

Die Verdunstung der Kohlenfeuchtigkeit findet solange statt, als der Dampfdruck über der Oberfläche der Kohle  $\mathfrak{P}$  größer als der Dampfdruck der umgebenden Luft  $\varphi P''$  ist. Tritt nun der Fall ein, daß  $\mathfrak{P}$  kleiner als  $\varphi P''$  wird, so nimmt die Kohle umgekehrt Wasser aus der Luft auf, die Kohle wird hygroskopisch. Ein Gleichgewichtszustand, in dem weder Wasser aus der Kohle verdunstet noch Wasser auf der Kohle niedergeschlagen wird, stellt sich von selbst ein, wenn  $\mathfrak{P}$  gleich  $\varphi P''$  geworden ist.

<sup>1</sup> Der Unterschied zwischen  $P''$  und  $\mathfrak{P}$  drückt sich u. a. darin aus, daß die Lösungen eine höhere Siedetemperatur als reines Wasser besitzen. Der Siedepunkt liegt um so höher, je größer die Konzentration der Lösung ist. Vgl. auch die Abb. 6, die die Dampfdruckerniedrigung für eine 30proz. NaCl-Lösung und eine 52-, 62- und 80proz.  $H_2SO_4$ -Lösungen zeigt; desgl. Abb. 6 auf S. 898 des Schrifttumverz. Nr. 2.

Das Kennzeichen der Hygroskopizität ist dadurch gegeben, daß der Dampfdruck über der Kohlenoberfläche  $\mathfrak{P}$  im hygroskopischen Bereich kleiner als der Dampfdruck über reinem Wasser  $P''$  unter den gleichen Bedingungen ist, also  $\mathfrak{P} : P'' < 1$ , während für den feuchten Zustand der Kohle naturgemäß beide Drücke stets gleich sind, also  $\mathfrak{P} : P'' = 1$ . Im hygroskopischen Bereich besteht nach eingetretenem Gleichgewichtszustand zwischen Verdunstung und Feuchtigkeitsniederschlagung eine eindeutig festliegende Beziehung zwischen dem Wert  $\mathfrak{P} : P''$ , dem Feuchtigkeitsgehalt der Kohle  $x$  und außerdem der Temperatur  $t$ . Diese 3 Größen können durch Versuche ermittelt und in einem  $\frac{\mathfrak{P}}{P''} - x$ -Bild dargestellt werden.

Hierbei entspricht der Wert von  $\mathfrak{P} : P''$  wegen des im letzten Absatz besprochenen Gleichgewichts zwischen  $\mathfrak{P}$  und  $\varphi P''$  dem Feuchtigkeitsgrad  $\varphi$  der Luft, die die Kohle umgibt<sup>1</sup>.

Für jeweils eine bestimmte Temperatur ergibt die Abhängigkeit zwischen  $\mathfrak{P} : P''$  und  $x$  eine Kurve im  $\frac{\mathfrak{P}}{P''} - x$ -Bild, die sog. Dampfdruckisotherme, die im allgemeinen im Nullpunkt beginnt, in irgendeiner für die untersuchte Kohle eigentümlichen Form ansteigt und sich schließlich asymptotisch mehr oder weniger schnell dem Wert  $\mathfrak{P} : P'' = 1$  nähert. Der Punkt, an dem die Kurve praktisch den Wert  $\mathfrak{P} : P'' = 1$  angenommen hat und der durch den Feuchtigkeitsgehalt der Kohle bestimmt ist, nennt man den „hygroskopischen Punkt“, obwohl man wegen des asymptotischen Verlaufs der Kurve nicht von einem exakten Punkt sprechen kann. Der „hygroskopische Punkt“ ist also für eine bestimmte Temperatur sozusagen der kritische Grenzpunkt, der den Feuchtigkeitsgehalt der Kohle angibt, über dem die Kohle keine hygroskopischen Eigenschaften aufweist. Die Abb. 7 und 8 zeigen derartige Dampfdruckisothermen für Kohle und Holz (52 [S. 12—21], 115).

Nimmt man die Kurven während der völligen Trocknung grubenfeuchter Kohle und während der Wasseraufnahme derselben Kohle auf, so zeigt sich, daß in der letztgenannten Kurve dem

<sup>1</sup> Das Verhältnis  $\mathfrak{P} : P''$  wird für das  $\frac{\mathfrak{P}}{P''} - x$ -Bild gewählt, um wegen der Beziehung  $\mathfrak{P} : P'' = \varphi$  einfache Meßbedingungen zu erhalten. Da der Wert  $\mathfrak{P} : P''$  nach Überschreitung des hygroskopischen Punktes den Wert 1 annimmt, wird die Darstellung der Dampfdruckisothermen für mehrere Temperaturen in einem  $\mathfrak{P} : P''$ -Bild sehr übersichtlich. Diese Darstellung ermöglicht auch eine vergleichsfähige Übersicht über das hygroskopische Verhalten verschiedener Kohlen. Andererseits läßt sich  $\mathfrak{P}$  in einfacher Weise durch Umrechnen mit dem aus Dampfdrucktabellen zu entnehmenden Wert von  $P''$  feststellen.

gleichen  $\frac{\beta}{P''} =$  Wert ein niedrigerer Kohlenfeuchtigkeitswert zugeordnet ist. Der Grund dieser Hysteresis dürfte in der besprochenen Alterung der Kapillarwände liegen.

Die Trocknungsgeschwindigkeit nimmt mit geringer werdendem Feuchtigkeitsgehalt der Kohle, insbesondere im hygroskopischen Bereich ab. Da dieser bei fast sämtlichen Trocknungsvorgängen berührt wird, ergibt sich die Wichtigkeit der genauen Kenntnis des Verhaltens der einzelnen Kohlsorten und -bestandteile im hygroskopischen Gebiet für die völlige Beherrschung des Trockenprozesses. ROSIN und RAMMLER haben die Dampfdruckisothermen mathematisch analysiert und aus diesen Ergebnissen Folgerungen über die innere Struktur, die Porengröße und -verteilung und die Wasserbindung innerhalb der Kohle gezogen (115). Nach einem anderen Verfahren wird das Kapillargefüge der Kohle durch die Zeit gekennzeichnet, die eine Kohlenprobe von bestimmten Gewicht und Normgröße zur Aufsaugung einer bestimmten Flüssigkeitsmenge benötigt. NASHAN (84) fand, daß dieser „Kapillarwert“ für einzelne Kohlenflöze und die verschiedenen Verkohlungsgrade charakteristisch ist. Mager- und Gasflammenkohlen sind starkkapillare, Fett- und Gaskohlen schwachkapillare Kohlen. Ein Minimum der Kapillarität tritt an der Grenze zwischen Gas- und Fettkohlen auf.

c) Der Vorgang der Trocknung im Kohlenkorn und im Kohlenhaufwerk. Wie bereits festgestellt worden ist, vollzieht sich die Verdunstung an der Grenze zwischen der äußeren und teilweise inneren Oberfläche und dem Trockenmittel, die mit freier wirksamer Oberfläche bezeichnet wird. Zunächst verdunstet also bei feuchter Kohle das Adhäsionswasser und das zwischen den einzelnen Kohlenkörnern gebundene Zwischenkapillarwasser. Die Verdunstung des letzteren erfolgt bereits langsamer, da die wirksame Oberfläche verhältnismäßig klein ist. Bei sehr kleinen Korngrößen kann sogar der gesamte Lückenraum zwischen den Kohlenkörnern von kapillargebundenem Wasser ausgefüllt werden, so daß die wirksame Oberfläche mit der Oberfläche des Haufwerks zusammenfallen würde. Durch mechanische Kräfte, z. B. Umwälzen und Wenden, kann eine Auflockerung und eine Trennung der einzelnen durch die Kapillarkräfte aneinander gebundenen Kohlenkörner und damit teilweise eine Aufhebung der zwischenkapillaren Bindung des Wassers herbeigeführt werden. Dadurch wird die freie Oberfläche vergrößert und die Verdunstung beschleunigt.

Die Verdunstungszone schreitet dann in das Innere des Kornes fort. Das in den groben Kapillaren und Spalträumen vorhandene

Wasser verdunstet am leichtesten, während das Innenkapillarswasser bedeutend langsamer verdunstet, da einerseits die freie wirksame Oberfläche sehr klein ist und andererseits der gebildete Wasserdampf in den engen Räumen infolge der Strömungswiderstände nur sehr langsam nach außen entweichen kann. Ebenfalls zur Verminderung der Verdunstungsgeschwindigkeit trägt die im vorigen Abschnitt beschriebene Dampfdruckerniedrigung des adsorptiv an die Oberfläche und in den feinsten Kapillaren gebundenen Wassers bei, die unter Umständen sogar den Verdunstungsvorgang zum Stillstand bringen kann.

Wird bei hohen Temperaturen getrocknet, so wird zunächst die äußerste Schicht der einzelnen Kohlenkörner erwärmt. Die Wärme dringt dann allmählich in das Innere des Kornes vor, wobei der Wärmefluß von dem Wärmeleitvermögen der Kohle, das wieder stark von ihrem Wassergehalt beeinflußt wird, abhängig ist. Infolge dieses Temperaturunterschiedes findet an der Oberfläche und in der Randschicht des Kornes bereits eine lebhaftere Verdunstung statt, während das Korninnere noch wenig erwärmt ist. Das Korninnere wird also während des Trockenvorganges eine größere Feuchtigkeit als die Kornoberfläche aufweisen. Dieser Unterschied wird um so größer, je größer das Korn oder je größer die Verdunstungsgeschwindigkeit ist. Um in einer Trockenanlage eine möglichst gleichmäßige Trocknung zu erzielen, wird man daher entweder ein möglichst gleichmäßiges Korn aufgeben, oder dafür Sorge tragen, daß das bereits fertig getrocknete feine Korn rechtzeitig aus dem Trocknungsprozeß ausgeschieden wird.

Um ein Bild über die Feuchtigkeitsverteilung in dem Korn während der Trocknung zu erhalten, wurde im Braunkohlenforschungsinstitut in Freiberg in einer luftdicht abgeschlossenen Versuchsanlage Trockenbraunkohle von gleicher Korngröße durch raspelartige Walzen abgeschält. Von der anfallenden abgeriebenen Kohlenmenge wurden in bestimmten Abständen Wassergehaltsuntersuchungen vorgenommen. Auf diese Weise wurde der Wassergehalt der einzelnen Kornschalen ermittelt. In der Abb. 9 ist der Verlauf des Wassergehaltes in einem bei 190° getrockneten Kohlenkorn von 8—10 mm dargestellt. Die Abb. 10 zeigt die Wassergehaltsspannen zwischen dem Korninnern und der Kornoberfläche für verschiedene Korngrößen und verschiedene Trocknungstemperaturen. Hieraus geht hervor, daß größere Körnungen höhere Wassergehaltsspannen besitzen.

Grobstückige Kohle neigt bei der Trocknung mehr oder weniger zu einem Zerfall der einzelnen Stücke, da der zuerst trocknende Kornmantel schrumpft, während das Volumen des Korninnern erhalten bleibt oder sich sogar durch die Ausdehnung des Wassers und anderen Vorgängen im Innern der Kapillaren bei der Erwärmung etwas vergrößert. Durch die entstehende Spannung platzt der Kornmantel auf und das Korn zerfällt in mehrere Stücke. Bei

der an sich fein aufbereiteten Brikettierkohle ist der Zerfall der Körner unschädlich, sofern nicht allzufeiner Staub entsteht. Eingeringer Zerfall ist für die größeren Knorpel im Interesse einer gleichmäßigen Durchtrocknung erwünscht. In einigen Fällen, z. B. Vortrocknung von Braunkohlen, die in Verschmelzungs-, Vergasungs- oder Feuerungsanlagen verarbeitet werden sollen, wird die Erhaltung der Grobstückigkeit und der Festigkeit jedoch ausschlaggebend für das ganze Verfahren. Für die Trocknung österreichischer Glanzkohlen, die einen lignitischen Charakter besitzen, und einen etwas stärkeren Inkohlungsgrad als unsere erdigen deutschen Braunkohlen aufweisen, hat FLEISSNER (29, 31, 32, 34, 69, 71, 103) ein Verfahren angegeben, bei dem er davon ausging, das Kohlenkorn zunächst durch Dämpfen mit Sattedampf von 15—20 at Druck vollkommen gleichmäßig zu durchwärmen, um erst dann durch Entspannung die Verdampfung gleichmäßig im ganzen Korninnern herbeizuführen, so daß keine schädlichen Schrumpfspannungen zwischen Schale und Kern entstehen können. Als günstige Zusatzercheinung ergab sich eine Abspaltung von Wasser in flüssiger Form (bis zu 40% und mehr des insgesamt entfernten Wassers) beim Dämpfen.

FLEISSNER ging dabei von dem Gedanken aus, die Erkenntnisse aus den bekannten Vorgängen bei der Trocknung von Kolloiden auf die Braunkohle, deren Kolloidcharakter zweifellos feststeht, zu übertragen. Nach FREUNDLICH (38) sind die organischen wasserhaltigen Braunkohlen als ein nicht elastisches oder nicht quellbares Gel aufzufassen. Zwischen den feinsten Bestandteilen, den Mizellen nach der Mizellentheorie von NÄGELI, besteht ein Netz von vielfach verzweigten und fein verteilten Kapillarräumen, die bei der grubenfeuchten Kohle durch das Wasser ausgefüllt sind. In diese Kapillaren wird das Wasser durch die Wirkung der Oberflächenspannung hineingezogen und übt dabei auf die Kapillarwände einen Druck aus. Die Größe dieses Druckes wird durch die Steighöhe der Flüssigkeitssäule angegeben, die dem Kapillardruck das Gleichgewicht halten würde, und ist eine Auswirkung der Oberflächenspannung und des spezifischen Gewichtes des Wassers sowie des Kapillardurchmessers. Außerdem spielt die Benetzbarkeit der Kapillarwände eine wesentliche Rolle. Die Kapillarwände selbst, also die Gesamtheit der einzelnen Mizellen sowie der sonstigen festen Bestandteile haben aber das Bestreben, das Kapillarvolumen zu verkleinern und zusammenzuziehen. Beide Drücke halten sich das Gleichgewicht. Um nun eine Entfeuchtung des Kornes herbeizuführen, ohne das Korn von der Oberfläche beginnend zu trocknen, muß das Gleichgewicht im Innern der Kapillaren und zwar im ganzen Korn gleichzeitig gestört und dadurch der Wasseraustritt unter gleichmäßiger Schrumpfung bewirkt werden. Das wird in dem Verfahren nach FLEISSNER durch eine Erwärmung des Kornes auf etwa 200° mittels gesättigten Dampfes von etwa 15 at erreicht. Wie ROSIN (103) ausführt, wird die Viskosität des kolloidal gebundenen Wassers durch höhere Temperaturen beträchtlich vermindert. Daneben erfolgt nach den Ausführungen von KLEIN (69) durch die Einwirkung der hohen Temperaturen teilweise eine chemische Umbildung auf der inneren Oberfläche der Kapil-

laren — offenbar eine Umwandlung der Huminsäuren in die Humine —, wodurch die innere Benetzbarkeit der Kapillaren mit Wasser verringert und der hydrophile Zustand des Gels z. T. in den hydrophoben verändert wird. Beide Vorgänge bewirken den teilweisen Wasseraustritt aus den Kapillaren, während sich gleichzeitig die Kapillarwände zusammenziehen und das Korn schrumpft. Hierbei verfestigt sich das Gel immer mehr, bis nach Erreichen eines gewissen Entwässerungsgrades ein Erstarrungszustand eintritt, mit dem die Volumenverminderung und auch die Wasserauspressung beendet ist. Im Anschluß hieran kann dann ohne Gefahr des Kornzerfalls in der Entspannungsperiode die Trocknung in Form der Nachverdampfung bzw. eine weitere Verdunstung durch Lüftung bis auf den gewünschten Endfeuchtigkeitsgehalt vorgenommen werden. Wird das getrocknete Korn, dessen Kapillaren sich inzwischen mehr oder weniger mit Luft gefüllt haben, wieder mit Wasser in Berührung gebracht, so wird das Wasser wegen der geringeren Benetzbarkeit nur teilweise wieder in die Kapillaren eindringen. Eine Volumenzunahme ist jedoch nach KLEIN (69 [S. 9]) damit nicht wieder verbunden.

Bei dem Verfahren von FLEISSNER lassen sich also drei Stufen voneinander unterscheiden:

1. Die Flüssigkeitsabgabe durch Verminderung der Viskosität und der Benetzbarkeit und die damit bedingte Zunahme des kapillaren Überdruckes;
2. die Verdampfung durch allmähliche Entspannung des in dem Kessel herrschenden Druckes;
3. die Wasserverdunstung aus der heißen Kohle an Luft, nach Öffnung der Trockenapparat durch Spülluft.

Auf diese Weise ist es möglich, den Feuchtigkeitsgehalt um etwa 70% des Anfangswassers herabzusetzen. Außerdem wird während der Entwässerungsperiode ein Teil der wasserlöslichen alkalischen Beimengungen aus der Kohle entfernt und dadurch der Aschengehalt vermindert. Eine Abänderung des Fleißnerverfahrens, bei der überhitzter Dampf verwendet wird, ist von SKUTL (125) beschrieben worden.

Eine weitere noch nicht restlos geklärte Erscheinung ist das Zusammenbacken und die sog. Quellung, d. h. die vorübergehende Volumenzunahme der Braunkohle nach der Aufgabe in den Trockenapparat. Sie ist um so fühlbarer, je höher der Temperatur sprung zwischen der Temperatur der kalten Rohkohlen und der Heizflächen ist. Hierdurch können Anbackungen und Betriebsstörungen verursacht werden, die sich insbesondere bei den Röhrentrocknern bemerkbar gemacht haben.

## V. Die Wärme bei der Trocknung.

In wärmewirtschaftlicher Hinsicht ist die Arbeitsweise der meisten Trockenverfahren bekannt und häufig in der Literatur besprochen worden. Ganz allgemein wird bei derartigen Untersuchungen einerseits die der Trockenanlage unmittelbar zugeführte Wärme, sowie der Wärmeinhalt der aufgegebenen Rohkohle und der eingeführten Trockenluft, andererseits die mit den Brüden und der Trockenkohle abgeführte Wärme, die Verlustwärme und unter Umständen der Wärmeinhalt des Kondensats festgestellt. Aus der

bilanzmäßigen Gegenüberstellung folgt dann der Wirkungsgrad der Anlage, d. h. das Verhältnis zwischen der zum Verdampfen der Kohlenfeuchtigkeit benötigten Wärme und der insgesamt aufgewandten Wärme, oder der spez. Dampfverbrauch, d. h. die zur Verdampfung von 1 kg Wasser aus der Kohle benötigte Dampfmenge. Auf die Durchführung derartiger Berechnungen und Untersuchungen kann hier im einzelnen nicht eingegangen werden.

Teilweise noch ungeklärt sind die Vorgänge der Wärmeleitung und -übertragung. Die Wärmeleitfähigkeit ändert sich mit der Feuchtigkeit und der Temperatur der Kohle, sowie der veränderlichen und mehr oder weniger dichten Lagerung des Kohlenhaufwerks. Ferner sind für die Wärmeübertragsverhältnisse die Geschwindigkeit, der Feuchtigkeitsgrad und die Temperatur des Trockenmittels, der Zustand des benutzten Trockendampfes sowie das Material der Heizwände und Einbauten, deren Oberflächen Ausbildung (rauh oder glatt), ja sogar deren Farbtonung maßgebend. Wegen der Vielfältigkeit dieser Einflüsse ist die Forschung auf diesem Gebiet noch in den Anfängen.

Von Wichtigkeit ist weiterhin die Kenntnis der spezifischen Wärme der Kohle. Der Wert der spezifischen Wärme ist je nach der Temperatur, der Art der Kohle, dem Gasgehalt und dem Wassergehalt und Aschengehalt verschieden. Da von diesen Größen der Wassergehalt den größten Schwankungen unterliegt, wird allgemein die mittlere spezifische Wärme  $c_m$ , bezogen auf Trockensubstanz zwischen 10 und 100° angegeben. Die spezifische Wärme einer feuchten Kohle mit dem Feuchtigkeitsgehalt  $w$  berechnet sich dann nach

$$c = (1 - w) c_m + w \cdot 1,0,$$

wenn die spezifische Wärme des Wassers gleich 1 gesetzt wird. Untersuchungen über die spezifische Wärme von Kohlen sind verschiedentlich veröffentlicht worden (6, 19, 23, 57). Für Braunkohle liegt der Wert für  $c_m$  nach den Ausführungen von BURKHARDT und FRITZSCHE zwischen 0,322 und 0,468 (19). Für Steinkohle nimmt man den Wert für  $c_m$  mit 0,25 an (57).

Einen genauen Einblick in die Vorgänge innerhalb der Trockenanlagen, die mit ungesättigten Gasen als Trockenmittel arbeiten, erhält man erst bei Anwendung des Mollierschen  $i-x$ -Bildes, aus dem der Wärmehalt, der Feuchtigkeitsgrad, der Wassergehalt, die Lage des Taupunktes usw. des Trockenmittels im einzelnen verfolgt werden kann (52 [S. 29]).

## VI. Die technische Durchführung der Trocknung.

Da die Trocknung der Kohle durch Verdunstung an der Luft ohne Wärmezufuhr wegen der Unwirtschaftlichkeit und der geringen Leistung nicht durchführbar ist, wird sie in besonderen Trockenanlagen unter Zuführung von Wärme vorgenommen. Die Anlagen, die sich im Betriebe bewährt haben, sind folgendermaßen einzuteilen:

Die Trocknung kann erfolgen:  
durch Verdunstung in ungesättigten Gasen,  
in unmittelbar beheizten Trockenanlagen,  
in mittelbar beheizten Trockenanlagen und  
durch Verdampfen im dampferfüllten Raum.

### 1. Die Trocknung durch Verdunstung in ungesättigten Gasen.

a) Die Trocknung in unmittelbar beheizten Trockenanlagen. Die Beheizung der durch die Trockenanlagen geschickten Luft kann durch einen besonderen Vorrost mit Kohle oder mit Gas, Öl oder Kohlenstaub vorgenommen werden. Stehen Abhitzegase aus Kesselhäusern oder Kokereien in genügender Menge zur Verfügung, so wird man sie wegen der niedrigen Kosten zweckmäßig zum Trocknen der Kohle benutzen.

Bei den ersten Versuchen wurde die unmittelbare Beheizung im Gegenstrom vorgenommen. Die hohe Explosionsgefährlichkeit und die nachteiligen Folgen der Kondensation von Wasser bei der Berührung der gesättigten Gase mit der kalt in den Trockner gelangenden Rohkohle ließen diese Anlagen jedoch schnell wieder verschwinden.

In den meisten Fällen wird jetzt das Gleichstromverfahren angewandt, bei dem die heißen Gase zunächst die Rohkohle aufheizen und dann im gleichen Sinne wie die Kohle durch die Trockenanlage ziehen. Die Feuergasmenge läßt sich zur Kohlenmenge unter Berücksichtigung der Feuergastemperatur und Kohlenfeuchtigkeit so einstellen, daß die Feuergastemperatur am Austritt niedrig genug ist, um jede Entzündung der trockenen Kohle selbst bei leicht entzündlichen Braunkohlen mit Sicherheit zu vermeiden (18, 63, 73, 86, 87, 138, 139). Im allgemeinen wird die zu trocknende Kohlenmenge in möglichst viele Einzelströme aufgeteilt, um die Durchlüftung der Kohle zu begünstigen.

### Der Drehtrommeltrockner.

Unter Drehtrommeltrocknern werden die Trockenanlagen verstanden, bei denen die zu trocknende Kohle durch eine oder in einigen Fällen auch mehrere Zylindertrommeln geleitet wird, deren Hauptachse horizontal bzw.

schwach geneigt aufgestellt ist. Die Trommellänge wird im allgemeinen gleich dem Fünffachen des Durchmessers der Trommel ausgeführt. Die Drehzahl der Trommel beträgt etwa 4—6 Umdrehungen je Minute. Bei den älteren Anlagen rollt die am oberen Ende aufgegebenen Kohle an der Innenseite des Trommelmantels entsprechend der Trommeldrehung entlang und wird infolge der Neigung der Trommel allmählich dem unteren Austragende zugeführt. Die neueren Trommeltrockneranlagen besitzen über den Querschnitt der Trommel verteilt Rieseleinbauten, die eine ständige gleichmäßige Verteilung der zu trocknenden Kohle über den ganzen Trommelquerschnitt und damit eine völlige Umspülung des einzelnen Kohlenkornes durch das die Trommel durchziehende Feuergas bewirken. Das leichte, bereits genügend getrocknete Korn wird durch die Strömung der Feuergase schneller durch die Trockenanlage befördert, als das gröbere und feuchtere Korn. Hierdurch wird im allgemeinen eine größere Gleichmäßigkeit des Wassergehalts in den verschiedenen Kornklassen erzielt, jedoch hängt die Größe der Wasserspanne ausschlaggebend vom Verhältnis der mechanischen (durch die Art des Einbaus bedingten) Förderkomponente zur pneumatischen (durch die Rauchgasgeschwindigkeit bedingten) ab.

Das Feuergas, das auf einem Vorrost erzeugt wird, oder aus einer Kesselanlage unter Zwischenschaltung einer Kohlenstaub- oder Gaszusatzfeuerung stammt, tritt am oberen Ende des Trockners mit 500—1200° C ein und wird bis zum Austragende auf 80—130° C abgekühlt, während die Kohle den Trockner mit einer Temperatur von 65—75° C verläßt. In seltenen Fällen wird auch der Außenmantel der Trommel beheizt.

Drehtrommeltrockner sind mit gutem Erfolge zur Trocknung von Braunkohle aufgestellt worden. Die Verdampfungsleistung beträgt je nach der Eintrittstemperatur der Heizgase und dem Wassergehalt der Kohle 70—120 kg je m<sup>3</sup> Trockerraum und Stunde. Der Nachteil der Drehtrommel ist der große Platzbedarf, der Vorteil: einfache Beheizung, gute Durchmischung der Kohle, geringe Instandhaltungskosten, große Leistungen und guter Wirkungsgrad.

#### Schachttrockner.

In den letzten Jahren sind Schachttrockner auf den Markt gebracht worden, bei denen die Kohle über Zellenwalzen oder Wendeschalen allmählich nach unten befördert wird, während die Heißluft oder das heiße Gas im Gegenstrom von unten nach oben durch die herabrieselnde Kohle strömt. Als Vorteil wird der Wegfall der Bewegung großer toter Massen und der geringe Grundflächenbedarf genannt. Die Leistung eines derartigen, auf der Kokerei Barrow Haematite Steel Co. Ltd., Barnsley, Yorkshire aufgestellten Trockners beträgt nach den Untersuchungen von Mott 40—50 t/h. Zur Trocknung von 1 t Kohle von 14,6 auf 9,6% Wassergehalt werden etwa 14,5 cm<sup>3</sup> Gas von 4500 kcal/m<sup>3</sup> benötigt (45).

#### Die Mahltrockner.

Bei der Kohlenstaubherstellung hat sich besonders für Steinkohle ganz überwiegend die Mahltrocknung durchgesetzt, bei der auf gesonderte Vortrocknung verzichtet und die Trocknung in der mit Heißluft beschickten Mühle selbst vorgenommen wird (86, 112). Für die Mahltrocknung von sehr feuchter Kohle, z. B. Braunkohle, kommen die üblichen Mühlen nicht in Frage. Hierzu dienen der Umlaufrockner (111) und die Mühlenfeuerung (114).

Bei dem Umlaufrockner wird die vorzerkleinerte Kohle von einem Rauchgasstrom mit hoher Geschwindigkeit durch ein Rohrsystem bewegt,

an dessen Ende sich ein Windsichter oder eine andere Art von Klassierer befindet. Die ungenügend getrockneten größeren Körner werden ausgeschieden und einer Zerkleinerungsvorrichtung zugeführt, um frische feuchte Oberflächen freizulegen; das aufgespaltene Gut gelangt wieder in die Trockenstrecke zurück. Aus dem durch Trockenstrecke-Trennvorrichtung-Mühle gebildeten Umlauf kann nur das fertig getrocknete und hinreichend zerkleinerte Korn austreten, das in einem Zyklon und einer nachgeschalteten Feinentstaubung ausgeschieden wird. Das Verfahren ist sowohl für die Herstellung von Braunkohlenstaub als auch von Brikettierfeinkohle in Gebrauch und ist neuerdings auch für die Zwecke der Braunkohlenbrikettierung weitergebildet worden.

**b) Die Trocknung in mittelbar beheizten Trockenanlagen.** Zu den mittelbar beheizten Trockenanlagen gehören die Tellerrockner und die Röhrentrockner. Der Aufbau und die Wirkungsweise der beiden Trocknerarten sind allgemein bekannt, so daß hier auf besondere Ausführungen verzichtet werden kann.

Die Beheizung erfolgt im allgemeinen durch Dampf. Einige Tellertrockneranlagen sind mit einer Kohlenfeuerung ausgestattet worden (138 [S. 44 und 79]). Wegen Brand- und Explosionsgefahr sind für den Betrieb solcher Anlagen besondere Sicherheitsmaßnahmen erforderlich.

Sehr wichtig ist der Vorgang des Wärmeüberganges zwischen Wasserdampf über die Heizfläche an die Kohle bzw. die Luft. Abgesehen davon, daß z.B. Verschmutzung der Heizfläche durch Öl usw. den Wärmeübergang beeinträchtigen kann, ist die Frage von besonderer Bedeutung, ob Sattedampf oder überhitzter Dampf für den Wärmeübergang günstiger ist. Während man früher allgemein annahm, daß Sattedampf oder doch wenig überhitzter Dampf den Vorzug verdiene<sup>1</sup>, wird heute oft die gegenteilige Ansicht vertreten. Wie nun die Verhältnisse liegen, ob überhitzter Dampf in bezug auf die Wärmeabgabe ungünstiger arbeitet und ob und inwieweit eine Steigerung der Trockenleistung zu erreichen ist, bedarf noch weiterer Untersuchungen. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die Frage der Dampfüberhitzung von verschiedenen Gesichtspunkten aus zu beurteilen ist, und zwar kann die Frage rein wärmetechnisch aufgefaßt werden, oder aber man betont die trockentechnische Seite, indem man die Trocknung in Abhängigkeit von dem Dampfzustand verfolgt. In manchen Fällen schließlich dürfte die Frage der Betriebssicherheit den Ausschlag geben, denn in jedem Falle steigt bei der Anwendung höherer Dampftemperaturen das Gefahrenmoment im besonderen bei zu Selbstentzündung neigender Kohle.

Im Ofen wird die Verdampfungswärme zum Heizen benutzt,

---

<sup>1</sup> Foos (33) gibt an, daß je Grad Überhitzung die Leistung um 0,3% herabgesetzt wird.

während das abgeschiedene Kondensat aus dem Ofen abgeführt und nach Entölung wieder zum Kesselspeisewasser gegeben wird. Zur Erhöhung des Wärmeüberganges in den Apparaten wird eine möglichst hohe Dampfströmung und Dampfdurchwirbelung innerhalb derselben bei gleichzeitig möglichst schneller Kondensatabführung angestrebt. Beim Röhrentrockner ist das Mittelrohr mit ejektorartigem Dampfeintritt versehen, der zugleich den Dampf aus dem Trockner ansaugt und mit dem neu hinzukommenden Dampf zusammen am unteren Ende des Mittelrohres wieder in den Trockner strömen läßt. In Tellerrocknern werden mehrere Teller zu einer Gruppe zusammengefaßt, die nacheinander von oben nach unten mit Dampf beschickt werden. Außerdem sind in die einzelnen Teller Leitbleche eingebaut, um den Weg des Dampfes möglichst groß zu gestalten.

Beim Tellerrockner sind 50% der Heizfläche von Kohle bedeckt, während beim Röhrentrockner nur etwa 30—40% kohleberührt sind. Dafür ist beim Röhrentrockner eine bessere Durchmischung mit der erwärmten Luft durch die Wendeleisten möglich, also auch eine bessere Abführung der sich um das Korn bildenden wasserdampfgesättigten Lufthülle. Zur Regulierung der Stärke der auf der Heizfläche liegenden Kohleschicht, die infolge Volumenabnahme der getrockneten Kohle mit fortschreitender Trocknung immer geringer werden würde, dient die Stauung des Kohlegutes durch entsprechende Schaufelstellung auf den unteren Tellern oder Verflachung der Wendeleisten im unteren Rohrteil.

Die Wärmeübertragung an die Kohle erfolgt nach ECKARDT (26) bei Röhrentrocknern etwa zu 75% durch Berührung der Kohle mit der Heizfläche, zu 5% durch Strahlung der nicht von Kohle bedeckten Heizfläche an die Kohle und zu 20% durch Berührung der Luft mit der kohlefreien Heizfläche. Ein Teil dieser Wärme wird dann wieder von der Luft an die Kohle abgegeben und kehrt schließlich in Form der Verdampfungswärme wieder in die Luft zurück.

Die Untersuchungen an Röhrentrocknern durch ECKARDT (26), SCHMITT (118), SCHÖNE (122) lassen erkennen, daß die Verdunstung im Röhrentrockner stetig verläuft. Die Sättigung der Trocknungsluft nimmt im Verlaufe der Trocknung ab, also steigt die freie Spannung. Verlauf und Größe der Verdunstung sind u. a. abhängig von der Korngröße und der Kornzusammensetzung der Kohle, von ihrer chemischen und physikalischen Beschaffenheit, von der Größe der mit Kohle belegten Heizfläche, von dem Zustand des Heißdampfes, von den Wendeleisten, der Stärke und der Intensität der Belüftung, dem Anfangs- und Endwassergehalt der Kohle.

Alle Einflüsse, die für die Trocknung von Bedeutung sind, zu erfassen, ist bisher noch nicht gelungen, vor allem stellen sich der Aussonderung der Einzeleinflüsse recht große Hindernisse in den Weg, so daß bisher nur mehr oder weniger große Gruppen von Einflußgrößen der Beobachtung unterzogen werden konnten. Nur durch planmäßige Untersuchungen, die unter ganz bestimmten von Fall zu Fall festzulegenden Versuchsbedingungen vorgenommen werden, wird es möglich sein, die Erkenntnisse über die Trocknungsvorgänge auf eine breitere Grundlage zu stellen.

Bei Röhrentrocknern ist es nur schwer möglich, einen annähernd gleichen Trocknungsgrad von feinem und gröberem Korn zu erhalten. Man versucht eine gleichmäßige Abtrocknung aller Kornklassen durch entsprechende Ausbildung der Wendeleisten und durch Herabsetzung der Korngrößen zu erreichen, wobei jedoch die Entstehung von sehr feinem Korn vermieden werden muß. Beim Tellerrockner ist dieser Übelstand durch die Mannsche Staubabsiebung weitgehend zu beheben und durch neuere Verbesserungen durch MAYER (78) u. a., die bewegte Siebe verwenden, ist es möglich, die Wassergehaltsspannen in der Brikettierkohle auf einige wenige Prozent herabzusetzen.

Da der freie Querschnitt für den Durchtritt der Luft im Verhältnis zur Kohlschichtstärke bei dem Tellerrockner größer ist als beim Röhrentrockner, wird beim ersteren eine größere Luftmenge durchgesaugt. Die Brüden der Röhrentrockner weisen daher einen höheren Feuchtigkeitsgehalt auf, als die der Tellerrockner. Die zur Verdampfung von 1 kg Wasser aus der Kohle aufzubringende Wärme ist deshalb beim Tellerrockner größer und beträgt etwa 950 kcal/kg gegenüber 900 kcal/kg beim Röhrentrockner.

Um den Trocknungsbetrieb wirtschaftlich zu gestalten, wird der in die Trockenanlage geschickte Dampf vorher zur Krafterzeugung, sei es in den Dampfpresen oder in Kraftmaschinen zur Erzeugung von elektrischem Strom u. dgl. ausgenutzt. Die Höhe des Trocknerdampfdruckes ist durch die Größe und Leistungsfähigkeit der Trockenanlage gegeben. Damit man ein großes Wärmegefälle zwischen Kessel- und Trocknungsdampf und dadurch eine große ausnutzbare potentielle Energie erhält, wird man den Druck und die Temperatur des erzeugten Dampfes möglichst hoch wählen. Selbstverständlich müssen die Verhältnisse im Einzelfall eingehend geprüft werden.

## 2. Die Trocknung durch Verdampfung im dampferfüllten Raum.

Zur Vermeidung des Zerfalls grobstückiger Kohle wird die Wasserabspaltung und Trocknung der Kohle, wie bereits auf S. 28 aus-

geführt ist, nach dem Fleißnerverfahren im dampferfüllten Raum vorgenommen. Die Kohle wird in einen Kessel gefüllt und zunächst durch den abgelassenen Dampf eines zweiten bereits im Betriebe befindlichen Kessels vorgewärmt. Dann erfolgt das Dämpfen der Kohle mit Satttdampf von 15 at. Während dieser Zeit wird ein großer Teil des Wassers aus der Kohle abgespalten. Das anfallende Kondensat sammelt sich in einem Entwässerungskessel. Nachdem der Dampf genügend auf die Kohle eingewirkt hat, wird eine Druckentspannung vorgenommen und mit dem abströmenden Dampf zugleich der zweite inzwischen frischgefüllte Kessel vorgewärmt. Während der Entspannung setzt bereits eine Nachverdampfung der Kohle im ersten Kessel ein. Der gewünschte Endfeuchtigkeitsgehalt wird schließlich durch weitere Nachverdampfung während des Durchspülens des ersten Kessels mit Luft erreicht. Man unterscheidet also folgende Betriebsvorgänge:

1. Einfüllen . . . . .	10 Minuten
2. Vorwärmen . . . . .	25 „
3. Dämpfen . . . . .	75 „
4. Entspannen des Wasserdampfes . . . . .	25 „
5. Lüften . . . . .	55 „
6. Entleeren . . . . .	10 „
	<hr/>
	200 Minuten

Eine derartige Anlage wurde zuerst in Köflach in Österreich zur Trocknung von grobstückiger Kohle und zwar Grobkohle mit mehr als 120 mm, Stückkohle mit 75—120 mm und Mittelkohle von 40—75 mm mit recht gutem Erfolge aufgestellt. Bei einer Trocknung von 35% auf 13—15% H<sub>2</sub>O wird infolge sehr günstiger Wärmeausnutzung und dadurch, daß ein Teil der Kohlenfeuchtigkeit nicht auf dem Wege über die Verdampfung, sondern unmittelbar in flüssigem Zustand austritt, nur etwa 470 kcal je kg entzogenes Wasser benötigt. Die genannte Anlage leistete zunächst bei einem Betrieb mit 12 Dämpfern 780 t Trockenkohle bzw. 1100 t Rohkohle in 24 Stunden. Bei Erweiterung der Anlage auf 16 Dämpfer würde die Leistungsfähigkeit auf 1000 t Trockenkohle bzw. 1350 t Rohkohle in 24 Stunden erhöht.

## VII. Der verlustlose Trockner.

Die Betrachtung des Arbeitsprozesses des verlustlosen Trockners ist nicht nur von theoretischer, sondern auch von praktischer Bedeutung; denn sie gibt ein Bild von dem im günstigsten Falle zu erwartenden Brennstoffverbrauch. Wenn auch ein solcher Prozeß nicht verwirklicht werden kann, so bietet der verlustlose Trockner

einen Maßstab, mit dem man einen wirklichen Trockner vergleichen kann (72).

Zu den Brennstoffkosten des verlustlosen Trockners kommen noch für den wirklichen Trockner folgende weitere Kosten:

1. Brennstoffkosten zur Deckung der Wärmeverluste,
2. Kosten für Antrieb und die Heißluftförderung,
3. Arbeitslöhne,
4. Verzinsung der Anlagekosten und Abschreibung.

Diese Kosten sind von Fall zu Fall verschieden; sie sind selbstverständlich möglichst niedrig zu halten, während die Betriebskosten des verlustlosen Trockners für ein bestimmtes Trockengut bei einem feststehenden Zustand der Trockenluft und einem bestimmten Brennstoff die gleichen bleiben.

Die Feststellung des für einen verlustlosen Trockner erforderlichen Wärme- bzw. Brennstoffaufwandes zur Verdampfung von 1 kg Wasser ermöglicht bei gegebenem Anfangsfeuchtigkeitsgehalt eine Bestimmung der im günstigsten Falle nötigen Brennstoffkosten und einen ersten Anhalt für die Wirtschaftlichkeit der Trocknung. Diese Feststellung ist für den Praktiker von Bedeutung.

Für einen verlustlosen Trockner sollen die Verluste in der Feuerung und in dem eigentlichen Trockner gleich Null gesetzt werden. Die Heißluft wird in den Trocknern meist durch Mischen reiner Verbrennungsgase mit Frischluft hergestellt. Durch Einregelung der Frischluftmenge ist dann jede beliebige Heißlufttemperatur zu erreichen. Für einen verlustlosen Trockner wird angenommen, daß während des Trockenvorganges keine Falschlufft in den Trockner eintritt, was bei den wirklich ausgeführten Trockenapparaten in mehr oder minder großem Umfange der Fall sein kann.

Maßgebend für die Beurteilung eines Trockenvorganges ist der Wert: Wärmeverbrauch je kg verdampftes Wasser. Dieser Wärmeverbrauch ist verschieden je nach der Eintrittstemperatur der zur Trocknung verwendeten Heißgase in den Trockner und ist weiterhin abhängig vom Feuchtigkeitsgehalt des verbrannten Brennstoffes und der Verbrennungs- bzw. Zusatzluft, die den Verbrennungsgasen beigemischt werden muß, um die verschiedenen Eintrittstemperaturen in den Trockner zu erreichen. Man muß also bei der Berechnung des verlustlosen Trockners einen Brennstoff bestimmter Zusammensetzung und eine Luft bestimmten Zustandes, d. h. bestimmter Temperatur, bestimmter Feuchtigkeit, somit bestimmten Wärmehaltes voraussetzen. Für den Wärmeverbrauch je kg Wasser, das aus dem zu trocknenden Erzeugnis zu verdampfen ist, ist der untere Heizwert des verfeuerten Brennstoffes zugrunde zu legen.

Der Wärmeverbrauch ist in Abb. 16 für verschiedene Heißluft-Eintrittstemperaturen in den Trockner für 100% Sättigung der Heißluft beim Austritt aus diesem dargestellt. Weiterhin sind zum Vergleich auch noch andere Kurven für niedrigere Sättigungsgrade der Austrittsgase angegeben. Der Darstellung dieser Kurven lagen folgende Werte für den verfeuerten Brennstoff und für den Zustand der Luft zugrunde:

1. Brennstoff:

Kokszusammensetzung . . . .	C	78%
	H <sub>2</sub>	0,5%
	O <sub>2</sub>	0,5%
	S	0,7%
	H <sub>2</sub> O	11,0%
	Asche	9,3%
Unterer Heizwert $H_u$ kcal/kg .	6284	
Luftüberschußzahl $v$ . . . . .	1,4	

2. Außenluftzustand:

Temperatur . . . . .	15° C
Relative Feuchtigkeit $\varphi$ . . . . .	80%
Wassergehalt . . . . .	0,008 kg/kg Reinform
Wärmeinhalt . . . . .	8,4 kcal/kg Reinform.

Die Kurven lassen erkennen, daß der Wärmeverbrauch je kg verdampftes Wasser mit zunehmender Heißlufttemperatur beim Eintritt in den Trockner und zunehmender Sättigung der Heißluft beim Austritt aus dem Trockner geringer wird. Die Unterschiede zwischen dem Wärmeverbrauch bei den verschiedenen Sättigungsgraden der austretenden Abgase werden geringer mit steigender Eintrittstemperatur in den Trockner. Die Kurven lassen auch erkennen, daß eine wesentliche Steigerung über 500° C von nur geringem Einfluß auf den Wärmeverbrauch je kg verdampften Wassers ist, so daß es, abgesehen von den Grenzen, die an sich schon nach früheren Ausführungen der Eintrittstemperatur wegen der Empfindlichkeit des Trockengutes gesetzt sind, schon aus diesem Grunde ohne Nutzen ist, die Eintrittstemperaturen über 500° C zu steigern.

**VIII. Die physikalisch-technischen Probleme der Kohlentrocknung und -entwässerung.**

Die bisher teilweise oder noch völlig ungelösten Probleme bei der Entwässerung und Trocknung der Kohle sind zum großen Teil im Laufe der vorstehenden Abhandlung aufgezeichnet worden. Im folgenden wird noch einmal eine kurze Zusammenfassung vorgenommen.

Die innere Struktur der Kohle bedarf nach der physikalischen und chemischen Seite einer weiteren Klärung. Insbesondere die Wasserbindung innerhalb der Kohle ist noch nicht restlos klar gestellt. Die Größe und das innere Wesen der Adsorptionskräfte und der Adhäsionskräfte, die an der Wasserbindung beteiligt sind, sowie die bei der Bindung und Trennung des Wassers in Erscheinung tretende Sorptionswärme und die mit Quellungsvorgängen verbundene Quellungswärme bilden den Gegenstand weiterer Forschungen. Über das Wesen der äußeren und inneren Benetzbarkeit für die verschiedenen Kohlenarten, vor allem die Veränderung der Benetzbarkeit der Kohlen bei der Trocknung, deren Kenntnis z. B. für die Entwässerungsvorgänge, die Naßentstaubung usw. wesentlich ist, ist noch wenig bekannt.

Zum großen Teil unbekannt sind weiterhin die Anordnungen der Körner und Korngrößen und deren Lückenvolumen innerhalb eines Haufwerks. Der Einfluß der Schütthöhe und der Fallhöhe, des Feuchtigkeitsgehaltes des Schüttgutes, der Kornform und der Korngrößenunterschiede, die Art der Aufschüttung, ob trocken oder naß, die Lagerzeit u. a. spielt eine wesentliche Rolle. Wichtig sind auch die Vorgänge der Entmischung nach Kornklassen und Unterschieden im spezifischen Gewicht bei der Schüttung.

Eine weitere Klärung der Vorgänge bei der Entwässerung dürfte zu einer Verbesserung der Entwässerungsverfahren beitragen. Das Abtropfen und Entfernen des Wassers aus einem feuchten Kohlenhaufwerk unter den verschiedensten Bedingungen, das Klären von Trüben, das Absinken und Verdichten der einzelnen Teilchen in nach unten hin zäher werdenden Schlammtrüben usw. bedarf noch weiterer Erforschung. Die Abmessungen der einzelnen Entwässerungs- und Klärapparate, Größe, Durchmesser, Umlaufzahl, Kraftbedarf, Leistung usw. derselben können nach weiterer wissenschaftlicher Durchforschung verbessert werden.

Im Bereich der Trocknung gibt es ebenfalls noch viele ungelöste Probleme. Unsere Kenntnisse über den Trocknungsvorgang und die Trocknungsgeschwindigkeit bei den einzelnen Temperaturen und Feuchtigkeitsgraden, die günstigsten Trocknungsbedingungen, unter denen die Trocknung schnell und wirtschaftlich ohne nachteilige Beeinflussung der zu trocknenden Kohle und unter Einhaltung der erforderlichen Sicherheit erfolgt, das hygroskopische Verhalten der einzelnen Kohlen und Kohlenbestandteile usw. bedürfen noch einer weitgehenden Ergänzung und Erweiterung.

Neben der konstruktiven Durchbildung der vorhandenen Trockneranlagen und Entwicklung neuer Verfahren sind für die heute im Betriebe befindlichen Anlagen auf Grund eingehender

Untersuchungen Charakteristiken aufzustellen, die die Arbeitsweise bei Veränderung einzelner Faktoren, wie z. B. Anfangs- und Endfeuchtigkeitsgehalt, Dampfdruck und -temperatur (Überhitzung), Feuergastemperatur und -menge, Umlaufzahl, verschiedene Körnungen, Belastungsgrad usw. darstellen. Wegen der großen Zahl der veränderlichen Faktoren wird man zunächst die Arbeitsweise durch Veränderung einzelner Faktoren in Teilcharakteristiken ermitteln. Daneben ist der Temperaturverlauf im Trockner, der Temperaturabfall der Heizgase und die Wärmeaufnahme der Luft, der Verlauf der Kondensation des Heißdampfes, die Feuchtigkeitsabnahme der Kohle im Trockner usw. festzustellen. Auf diese Weise wird es möglich sein, die günstigsten Arbeitsbedingungen für die verschiedenen Trockneranlagen aufzufinden. Die hierbei gewonnenen Meßerfahrungen werden zu einer Aufstellung von „Richtlinien für Untersuchungen an Kohlentrocknern“ auszuwerten sein.

## C. Die betrieblich-wirtschaftlichen Probleme der Kohlentrocknung und -entwässerung.

### I. Der Zweck der Kohlentrocknung.

Die Kohlentrocknung und -entwässerung hat auf allen Gebieten der Kohlenveredelung Aufgaben zu erfüllen. Allein für die Aufbereitung, worunter hier nur im engeren Sinne die Maßnahmen verstanden seien, die eine Minderung des Aschengehaltes bezwecken, hat sie bislang nur geringe Bedeutung. Sie dient noch nicht dazu, die Aufbereitungsvorgänge zu erleichtern, sondern lediglich ihre Begleiterscheinungen wieder rückgängig zu machen, nämlich in der Wäsche aufgenommenes Wasser wieder zu entfernen.

Anders liegen die Verhältnisse schon bei der mechanischen Veredelung, bei der eine in feiner Körnung begründete Minderwertigkeit durch künstliche Formgebung ausgeglichen wird, wie bei der Steinkohlenbrikettierung. Die Trocknung dient hier in der Hauptsache nur dazu, die Verpressung einwandfrei zu ermöglichen, und die mit der Trocknung gleichzeitig verbundene Heizwertsteigerung ist in der Regel nur Nebenerscheinung. Dasselbe ist der Fall bei der Trocknung der Steinkohle für die Kohlenstaubfeuerung; im allgemeinen trocknet man auch hier nur, um die Formänderung, d. h. in diesem Falle die Vermahlung zu erleichtern.

Das bedeutsamste Beispiel einer thermisch-mechanischen Veredelung, bei der beide Zwecke gleichwertig nebeneinander

stehen, ist die Braunkohlen-Brikettierung. Bei ihr dient die Trocknung nicht nur der Formgebung, sondern in ausgesprochener Weise auch der Heizwertsteigerung und der Erweiterung des Aktionsradius, also der Erhöhung der Transportfähigkeit.

Bei der Braunkohlenstaubfeuerung ist jedoch wiederum die Trocknung nur in untergeordnetem Maße Selbstzweck und hat hauptsächlich die Aufgabe, die Formänderungsarbeit zu verringern bzw. sogar die Vermahlung auf die gewünschte Feinheit überhaupt erst zu ermöglichen. Das gilt, wenn der Kohlenstaub in dem Betriebe, der ihn erzeugt, auch verfeuert wird. Wird er im Fremdsatz versandt, so tritt wie bei der Brikettierung die transporttechnische Bedeutung der Trocknung gleichwertig hervor. Wird der Kohlenstaub für Industrieofenbeheizung verwendet, so steht die durch die Trocknung erzielte Heizwertsteigerung nämlich in ihrer Auswirkung auf die Verbrennungstemperatur im Vordergrund.

Die ausschließliche thermische Veredelung ohne mechanischen Neben- oder Hauptzweck, d. h. die Trocknung von Stückkohle unter Wahrung ihrer Stückigkeit, lediglich zur Erhöhung von Heizwert und Aktionsradius, hat für deutsche Verhältnisse geringe Bedeutung. Die ebenfalls hierunter fallende Herstellung von Trockenbraunkohle und das Trocknen naß gelöschten Schwelkokses für den Versand sind Anwendungsgebiete bescheidenen Umfangs.

Den thermomechanischen Veredelungsverfahren stehen die thermochemischen gegenüber; es sind dies die Verschmelzung, Verkokung, Hydrierung und Vergasung.

Bei diesen Verfahren tritt im Verlaufe des Prozesses unter allen Umständen die völlige Trocknung des Ausgangsgutes ein, da die Temperaturen, bei denen sich die gewünschten Umsetzungen vollziehen, oberhalb der Grenze liegen, bei der Wasser in der Kohle festgehalten werden kann. In der Mehrzahl der Fälle ist es an sich technisch möglich, diese Trocknung in den Reaktionsräumen, also z. B. im Koksofen, Schmelofen oder Generator vor sich gehen zu lassen, und manchmal ist das noch überwiegend üblich, wie bei der Kokerei, dem ältesten und wichtigsten thermo-chemischen Verfahren, und der Steinkohlschmelzung. Aus der Erkenntnis heraus, daß oft die ausschließliche Trocknung im Reaktionsraum unwirtschaftlicher ist als im Sontertrockner, teilt man häufig die auszutreibende Feuchtigkeit in einen im Trockner und einen im Veredelungsprozeß selbst zu beseitigenden Anteil. Das ist der Fall bei der Braunkohlenschmelzung und wird in der Steinkohlenkokerei angestrebt. Es ist allein eine Wirtschaftlichkeitsfrage, wo die Grenze zwischen beiden Stufen zu ziehen ist. In selteneren Fällen

strebt man unter allen Umständen möglichst weitgehende Vortrocknung an, wie bei der Hydrierung.

Der folgende Überblick über betrieblich-wirtschaftliche Fragen der Kohlentrocknung macht keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern will nur die Sonderverhältnisse und Sonderprobleme, denen die Trocknungstechnik bei den einzelnen Veredelungszweigen gegenübersteht, im Zusammenhang skizzieren.

## II. Die Aufbereitung.

Die Aufbereitung ist das Herrschgebiet der Entwässerung, während die thermische Trocknung bislang für sie keine Bedeutung hat. Der Entwässerung werden unterworfen: Nußsorten, Koksfeinkohle unter 10 mm Korngröße und Kohlenschlamm. Nach Abb. 12, die auf Untersuchungen von HILGENSTOCK beruht, stellen sich die Entwässerungskosten bei Türmen im Durchschnitt auf 11,1 Pf/t Durchsatz, bei Kohlenschleudern auf 15,4 Pf/t und bei Vakuumfiltern auf 11,3 Pf/t.<sup>1</sup>

Durch die mechanische Entwässerung kann lediglich in der Wäsche aufgenommenes Wasser — und auch das nicht vollständig — beseitigt werden. Beim Absieben der Feinkohle, beim Abscheiden des Kohlenstaubs durch Windsichten kann aber schon die Bergfeuchtigkeit Schwierigkeiten bereiten, wenn sie das Ausmaß von 5—7% erreicht, wie in manchen Revieren. Denn die Feuchtigkeit ist der ärgste Feind des Siebens (25, 94, 142) und Windsichtens (113), veranlaßt doch ihre Klebekraft das Entstehen von Ball- und Haftkorn, das sich der Ausscheidung entzieht. Schlechte Sieb- und Windsichtergütegrade sind die Folge, ganz abgesehen von den betrieblichen Schwierigkeiten, wie Verstopfen der Feinsiebe und Krustenbildung im Windsichter.

Leider liegen die wirtschaftlichen Bedingungen für die Anwendung der thermischen Trocknung in der Aufbereitung ungünstig, und außerdem sieht die Mehrzahl der Aufbereitungstechniker die Wärme immer noch als ein Mittel an, dessen Hilfe man möglichst entbehren, und das man mit ihren Gefahrenquellen tunlichst aus dem Aufbereitungsbetrieb fernhalten sollte. Es wird indessen in Zukunft zweifellos Fälle geben, bei denen eine billige thermische Trocknung von Vorteil sein kann.

Mit Hilfe der Luftaufbereitung ist es möglich, die Koks-kohle trocken zu erhalten. Leider sind aber die Waschergebnisse der

<sup>1</sup> Allen Berechnungen liegen die folgenden Werte zugrunde:

Kapitaldienst	20%	Kokereigas Ho	4700 kcal	1,36 Pf/m <sup>3</sup>
Kohle Fettuß IV	13,16 RM/t	Strom		2,40 Pf/kWh
Dampf	12 atü	Löhne		7,77 RM/Schicht.

pneumatischen Herde gegenüber der Naßsetzmaschine, verglichen mit der theoretischen Waschkurve, oft nicht ausreichend, d.h. der Aschengehalt fällt zu hoch aus. Mit zunehmender Feuchtigkeit werden Leistung und Wascheffekt der pneumatischen Feinkornwäscher immer schlechter, zumal dann auch die Vorentstaubung ebenfalls infolge des Feuchtigkeitseinflusses unzureichend wird.

Man erblickt daher das Anwendungsgebiet der Luftaufbereitung vielfach darin, daß man nur einen Teil der Kokskohle trocken behandelt und ihn dann dem auf nassem Wege scharf gewaschenen anderen Teil zusetzt, derart daß der Durchschnittswassergehalt im gewünschten Ausmaß, z.B. auf 9—10% heruntergedrückt wird. Der Einfluß des etwas höheren Aschengehaltes der trocken aufbereiteten Kohle wird dann genügend verdünnt oder ausgeglichen. Man könnte nun zweifellos sowohl die Leistung und den Trennungsgrad der Herde wie auch die feuchtigkeitsmindernde Wirkung der trocken aufbereiteten Kohle auf die Gesamtkohle steigern, wenn man bei feuchtem Feinkorn die Oberflächenfeuchtigkeit durch leichtes Antrocknen vor dem Durchsetzen oder während des Durchsetzens durch den Herd teilweise beseitigen würde. Am einfachsten würde eine solche Vortrocknung wohl bei der Windsichtung vorgenommen werden, wodurch gleichzeitig der Sichtgütegrad erhöht und ein besser verwertbarer Staub gewonnen würde. Man würde also die Trocknung der Kokskohle (vgl. den späteren Abschnitt) auf einen Teil der Kohle beschränken und in die Aufbereitung verlegen. Die hier vorliegenden Möglichkeiten können genau nur beurteilt werden, wenn die Feuchtigkeitscharakteristik der Luftwäscher, d.h. die Abhängigkeit der Durchsatzleistung und des Trennungsgrades von der Kohlenfeuchtigkeit für die verschiedenen Typen erforscht wird.

### III. Die Brikettierung.

Die Brikettierung der Braunkohle ist das wichtigste thermisch-mechanische Kohlenveredelungsverfahren. Der wirtschaftliche Angelpunkt dieses Industriezweiges ist aber die Trocknung. Es ist daher nicht erstaunlich, daß die Braunkohlenbrikettfabrikation der Trockentechnik starke Impulse gegeben hat. Sie entwickelte die Dampftrocknung auf den in Deutschland erreichten hohen Stand sowohl in technischer wie in wärmewirtschaftlicher Beziehung. Sie gab Anlaß zur Entstehung jener beiden Trocknertypen, die in stetem Wettbewerb immer vollkommener durchgebildet und für immer größere Leistungen gebaut wurden: des Tellertrockners und des Röhrentrockners. Die wärmewirtschaftlichen Grundlagen dieser Trocknungsverfahren sind heute weitgehend geklärt (122).

#### 44 Die betrieblich-wirtschaftlichen Probleme der Kohlentrocknung.

Nachdem die technische Entwicklung einen gewissen Abschluß erreicht hatte, wurden in den Brikettfabriken erstmalig die Beziehungen zwischen dem Trocknungsvorgang, der Beschaffenheit des Trockengutes und den Anforderungen des Verwendungszweckes, d.h. den Eigenschaften der Briketts untersucht. Man fand, daß es nicht nur darauf ankam, einen Durchschnittswassergehalt in engen Grenzen einzuhalten, sondern daß die Feuchtigkeitscharakteristik, d.h. die Kurve des Wassergehaltes abhängig von der Korngröße von entscheidendem Einfluß ist (37, 64). Durch Absieben, Nachzerkleinern und Nachtrocknen der Knorpel, durch Ausbildung von besonderen, den Knorpeln eine längere Trockendauer gewährenden Wendeleisten (82, 141) zog man aus dieser Erkenntnis die praktische Folgerung. Man entwickelte Methoden der Trocknerüberwachung (51, 88); Schnellverfahren zur Bestimmung des Wassergehalts entstanden (53); die Wichtigkeit gleichmäßiger Beschickung des Trockners mit unentmischtem Korn wurde erkannt.

Für die Brikettherstellung ist vor allen Dingen die Tatsache von Bedeutung, daß die Briketts bei der Lagerung einen Wassergehalt annehmen, der durch den Feuchtigkeitsgehalt der umgebenden Luft des Lagerungsortes bedingt wird. Da die Kohlen durch die hiermit eventuell verbundene Aufnahme oder Abgabe von Wasser durch Quellung oder Schwindung Kohäsionsspannungen erleiden, welche die Dauerfestigkeit der Briketts im Lager mehr oder weniger stark herabsetzen können, so ergibt sich, daß man zweckmäßig die Kohle auf denjenigen Wassergehalt trocknet, welcher dem normalen lufttrockenen Gleichgewichtszustand entspricht. Nur bei sofortigem Gebrauch kann der Wassergehalt weiter herabgesetzt werden, was für Generatoren usw. wichtig ist. Hieraus ergibt sich die erste Schwierigkeit bzw. Ungenauigkeit in der Bestimmung des zweckmäßigen Trocknungsgrades, weil die Luftfeuchtigkeit je nach dem Lagerungsort und je nach der Möglichkeit klimatischer Einwirkung daselbst sehr verschieden sein kann und außerdem mehr oder weniger großen Schwankungen unterliegt.

Die bei dem lufttrockenen Gleichgewichtszustand erreichbare maximale Festigkeit entspricht nicht der überhaupt erreichbaren Höchst-Festigkeit eines Braunkohlenbriketts, diese liegt bei niedrigem Wassergehalt und höherem Preßdruck. Da dann aber das Brikett beim Lagern aus der Luft Feuchtigkeit aufnimmt, nimmt der Festwert vom Hochwert wieder ab. Hingegen weist ein aus lufttrockener Kohle gepreßtes Brikett von vornherein die endgültige Festigkeit auf.

Alle Kornklassen vom größten Korn bis zum feinsten Staub sollen den gleichen, d.h. den lufttrockenen Gleichgewichtszustand

haben. Andernfalls nehmen im fertigen Brikett die zu stark getrockneten Teilchen Wasser unter Quellung auf, während die zu feuchten unter Schwindung Wasser abgeben. Hierdurch entstehen Kohäsions-Spannungen, die gegebenenfalls den Zerfall der Briketts herbeiführen können.

Der Wahl des richtigen Wassergehaltes stehen jedoch Schwierigkeiten entgegen. Solche liegen in

a) der verschiedenartigen Struktur der Kohlen an verschiedenen Stellen eines Grubenbetriebes, bzw. eines Kohlenvorkommens, die infolgedessen verschiedene Hygroskopizität haben. Es muß infolgedessen der Trocknungsgrad dieser verschiedenen Kohlenarten entsprechend verschieden sein. Ebenso ist die bei bestimmtem Pressendruck und bestimmtem Wassergehalt erreichbare Brikettfestigkeit bei verschiedener Struktur der Kohle verschieden;

b) der Einhaltung bzw. Erzielung des richtigen Wassergehaltes für sämtliche Kornklassen, welche durch den verschiedenen Zeitbedarf der verschiedenen Korngrößen für die Trocknung hervorgerufen werden. Man kann dem durch Anwendung der Staubabsiebung bei den Telleröfen (Mannsche Siebteller usw.) und der Siebwendeleisten bei den Röhren-Trocknern begegnen. Diese Schwierigkeiten werden erhöht, wenn die erwähnte Struktur starken Schwankungen unterliegt;

c) der Täuschung, die durch eine nachträgliche Zerkleinerung des feuchten und am Trockner ausgetragenen Grobkornes hervorgerufen werden. Wird dieses feucht zerkleinerte Grobkorn dem mitunter stark getrockneten Feinkorn zugesetzt, so erhält man oft ein Feinkornmisch, das scheinbar nur den richtigen Wassergehalt hat. Da der Wassergehaltsausgleich während der Verarbeitung bis zum Brikett jedoch nicht genügend erfolgt, so können im Brikett Kohäsionsspannungen entstehen durch Quellen der übertrockneten Feinkornanteile bei gleichzeitiger Schwindung der feuchten, aus gemahlten Knorpeln erzeugten Feinkornanteile;

d) durch Täuschung infolge unrichtiger Probenahme. Da die einzelnen Trockner oft sehr verschiedenartig arbeiten, müssen die Proben am Austrag jedes einzelnen Trockners genommen werden. Die Probenahme in der Sammelschnecke, in der das Trockengut aller Trockner vorhanden ist, ergibt nur Durchschnittswerte, die für die Beurteilung der brikett-technischen Eignung der Trockenkohle völlig wertlos sind. Es kann der Fall eintreten, daß ein Trockner zu feuchte Kohle, ein anderer zu trockene Kohle ergibt, im Gemisch scheinbar der richtige Wassergehalt vorhanden ist und doch dann im Brikett Kohäsionsspannungen eintreten, aus den Gründen, wie sie im Falle b und c bereits angeführt wurden.

Der Schlotstaub fällt in den Brikettfabriken je nach der Beschaffenheit der Kohle und Arbeitsweise der Fabrik in mehr oder weniger großen anteiligen Mengen an. Er wird vielfach der Brikettierkohle zugesetzt. Bei etwaiger Verwendung des Schlotstaubes zur Brikettierung muß der Feuchtigkeitsgehalt dauernd und sorgfältig überwacht werden, da dieser je nach dem Ablagerungsort, den Betriebsschwankungen und den Witterungseinflüssen erfahrungsgemäß starken und schnell eintretenden Schwankungen unterliegen kann. Sehr oft empfiehlt es sich auch, den Staubzusatz ganz zu vermeiden und den Schlotstaub für Staubfeuerungs-zwecke zu verwenden.

Auch für die Braunkohlenbrikettierung ist die Korncharakteristik von erheblicher Bedeutung. Um die Verdichtungsarbeit möglichst günstig zu gestalten, muß die Kornzusammensetzung so sein, daß die Zwischenräume zwischen den einzelnen Kohlekörnern durch feineres Korn ausgefüllt werden. Jedoch muß das Feinstkorn unter  $\frac{1}{4}$  mm möglichst entfernt werden. Mindestens darf es mengenmäßig nicht zu stark hervortreten, weil sich die Übertrocknung des Feinstkornes in der Regel nicht vermeiden läßt und bei zu starkem Hervortreten des Kornes die unter b bzw. c genannten schädigenden Wirkungen nicht vermieden werden können. Wichtig ist auch hier die schonende Zerkleinerung.

Infolge der durch diese Erkenntnisse erzielten Verbesserungen konnten Briketts von höherer mechanischer Festigkeit und gleichmäßiger Beschaffenheit erzielt werden. Die Probleme, die heute im Vordergrund stehen, betreffen die Steigerung der Wasserbeständigkeit und der Feuerstehkraft der Preßsteine — Eigenschaften, die teilweise ebenfalls mit der Trocknung zusammenhängen, wenn auch dieser Zusammenhang kein unmittelbarer ist. Die Stehkraft spielt nicht nur für die Verfeuerung, sondern auch für die Vergasung und Verschmelzung eine Rolle.

In der Braunkohlenbrikettierung herrscht die Dampftrocknung bislang ausschließlich. Eine Verbesserung der Wärmewirtschaft wäre noch möglich durch das Ausnützen der Abgase der Brikettfabrik-Kesselhäuser, deren Temperatur oft 350—400° beträgt, zur Kohlentrocknung in Feuergastrocknern (74, 76). Zwei Möglichkeiten bieten sich: die Vortrocknung der gesamten oder des größten Teiles der Brikettierkohle durch Rauchgase und die Fertigtrocknung in den Dampftrocknern oder die Trocknung eines Teiles der Brikettkohle in Dampftrocknern und des anderen Teiles in Feuergastrocknern jeweils sofort auf den Endwassergehalt. Da neue Brikettfabriken wegen des schlechten Ausnutzungsfaktors der vorhandenen zurzeit nur in Ausnahmefällen errichtet werden, so werden diese Möglichkeiten vorerst noch weiter brachliegen.

Es ist bekannt, daß die Brikettfabriken ihren Bedarf an elektrischer Energie dadurch gewinnen, daß sie den für die Trocknung benötigten Dampf vorher in Kraftmaschinen ausnutzen. Es könnte meist wesentlich mehr an Energie erzeugt werden, als dem Eigenbedarf entspricht, aber leider sind die Absatzmöglichkeiten für die Überschußenergie sehr beschränkt. Nur in einer verhältnismäßig kleinen Anzahl von Anlagen hat man daher das zur Krafterzeugung ausnutzbare Wärmegefälle durch Übergang zu hohen Kesseldrücken und hohen Dampftemperaturen steigern können (121). In der Tat stellen die Brikettfabriken eine der Erschließung harrende und bereitstehende Quelle größten Ausmaßes für die Gewinnung billiger elektrischer Überschußenergie bei dezentralisierter Erzeugung dar, was wehrpolitisch nicht belanglos ist. Diese Erzeugungsmöglichkeit ist theoretisch wie praktisch schon eingehend durchgearbeitet (119, 123, 135, 136, 137). Sie hat nur einen Nachteil: die Überschußenergie der Brikettfabriken fällt stetig Tag und Nacht gleichmäßig an. Nachdem Speicherkraftwerke schon mehrfach errichtet worden sind, dürfte dieser Hinderungsgrund nicht mehr ausschlaggebend sein (77). Bekanntlich leidet auch der Steinkohlenbergbau vielfach unter der mangelnden Möglichkeit ausreichenden Energieabsatzes, da er andernfalls die Abfallprodukte der Aufbereitung besser verwerten könnte (67).

Auch die bereits in einem Fall in Anlehnung an ein Großkraftwerk durchgeführte Verbesserung der Wärmewirtschaft der Trocknung durch die Brüdenwärme (43, 62, 145), d.h. die Gewinnung von Wärme aus den Trocknerbrüden, ist wirtschaftlich nur vertret- und durchführbar, wenn der Zentrale der Brikettfabrik ein Energieabsatz in ausreichendem Umfang gesichert ist.

Die Brikettierung von Steinkohle ist ein lange Zeit von der technischen Entwicklung verhältnismäßig wenig berührtes Gebiet gewesen; die Forschung ist erst in der letzten Zeit wieder lebhaft in Fluß gekommen. Man erkannte, daß schärfere und gleichmäßigere Trocknung und richtig gewählte Körnung den Pechverbrauch herabsetzen oder bei gleichem Pechverbrauch bessere Briketts nach Festigkeit und Feuerverhalten geben. Wie sich bei der Braunkohlenbrikettierung die Auffassung durchgesetzt hat, daß ein einwandfreies Brikett in der Hauptsache das Ergebnis richtiger Aufbereitung der Kohle im Naßdienst und zweckmäßig geleiteter Trocknung ist, so wird auch in den Steinkohlenbrikettfabriken immer mehr erkannt, daß die Beschaffenheit der Preßlinge nicht nur von der Arbeitsweise der Pressen, sondern vor allen Dingen von der richtigen Aufbereitung und damit auch der Trocknung der Brikettkohle abhängig ist.

Systematische Untersuchungen liegen bislang nur über den Einfluß der Körnung, im besonderen des Kohlenstaubanteiles vor (17, 96, 126, 128). Die allgemeine Abhängigkeit des Pechverbrauches vom Restfeuchtigkeitsgehalt der Brikettkohle ist zwar bekannt (127) (s. Abb. 14), aber es fehlt noch an zahlenmäßigen Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen dem Trocknungsgrad einerseits, dem Pechverbrauch und der Festigkeit andererseits. Ferner bedarf es der Aufnahme von Charakteristiken der in den Brikettfabriken benutzten mannigfaltigen Trocknerarten (Trommel-, Kontakt-, Dampf-, pneumatische Trockner) bei wechselndem Endwassergehalt und verschiedener Trockenkohlentemperatur. Solche Trocknercharakteristiken müssen den Durchsatz, den Wärme- und Energiebedarf, sowie die sonstigen Unkosten des Trocknerbetriebes als Funktion des Trocknungsgrades und der Trockenkohlentemperatur zeigen. Denn Pechersparnis und Güteerhöhung des Briketts sind gegen die mit schärferer Trocknung wachsenden Trocknungskosten abzuwägen. So läßt sich noch nicht einwandfrei feststellen, wo der optimale Trocknungsgrad liegt. Bei der Steinkohlenbrikettierung kommt es nicht allein auf die Endfeuchtigkeit, sondern im Hinblick auf den Pechverbrauch vor allem auch auf die Temperatur der Trockenkohle an. In diesem Zusammenhang verdienen die sog. Weichöfen besondere Erwähnung. In diesen mit Feuergas beheizten Telleröfen wird die Trocknung der Kohle gleichzeitig mit dem Zweck verbunden, das gemahlene Teerpech bildsam zu machen. Der Wärmearaufwand im Trockner wird also bei diesem Verfahren einem doppelten Zweck dienstbar gemacht, nämlich der Trocknung des aus Pech und Kohle bestehenden Gemisches und der Überführung des Peches in einen bildsamen Zustand zwecks Auslösung seines Bindevormögens.

Die wärmewirtschaftliche Beurteilung erfährt insofern noch eine Überlagerung, als in den Rahmen wirtschaftlicher Betrachtungen über den aufzubringenden Wärmearaufwand nicht nur die Trocknung der in einen brikettierbaren Zustand zu bringenden Kohle, sondern auch der Wärmeinhalt der den Trockner verlassenden Kohle einzubeziehen ist. Dieser Wärmeinhalt der Kohle, der bei der Trocknung gewissermaßen eine ungewollte Verlustwärme ist, ist für den Gesamtvorgang von nicht zu unterschätzender Bedeutung. Denn er leitet nicht nur die Bildsamkeit des Peches ein, sondern macht auch in den Knetwerken eine wenn auch zunächst noch unbekannte, so doch nicht unbedeutende Menge des zur Erhitzung des Pechgemisches notwendigen Dampfes überflüssig. Die der Kohle während des Trocknungsvorganges zugeführte Wärme ist daher als Vorstufe zu der in den Knetwerken

durch den eingeführten, überhitzten Dampf gewissermaßen gewaltsam herbeigeführten und von einer — oberhalb einer gewissen Grenze — unerwünschten Steigerung der Feuchtigkeit des Brikkettiergutes begleiteten Erhitzung des Gemisches aufzufassen.

Daß systematische wärmewirtschaftliche Untersuchungen von Steinkohlenbrikkettfabriken noch kaum vorliegen, mag sich daraus erklären, daß Wärme- und Energieaufwand bei der Steinkohlenverpressung wesentlich geringere Bedeutung haben als bei der Braunkohlenbrikkettherstellung.

So schwach die Anfänge auch sein mögen, so wird die bindemittellose Brikkettierung der Steinkohle in Zukunft eine gewisse Bedeutung erhalten (56, 68, 101). Sie stellt besondere Anforderungen nicht nur an die Körnung, sondern an den Trocknungsgrad und die Temperatur; diese Anforderungen sind bei den verschiedenen, um die Einführung ringenden Verfahren nicht gleichartig.

Von der Zukunftsentwicklung der Steinkohlenbrikkettierung ist ein bedeutungsvoller Beitrag zur Erleichterung des Sortenproblems zu erwarten (67). Daher verdient auch die Anwendung der Trocknung in diesem Zweige der mechanischen Veredelung der Kohle eine vertieftere Behandlung durch die Forschung als bislang.

#### IV. Die Kohlenstaubherstellung.

Nasse Kohle läßt sich nicht auf hohe Feinheit vermahlen; die Trocknung ist also zur Durchführung der Formänderung erforderlich. Die Notwendigkeit der Vortrocknung hat die Entwicklung der Kohlenstaubfeuerung lange gehemmt, bis es gelang, die Trocknung in die Mühle zu verlegen, und so die teuren Sonder-trockner zu ersparen. Diese mit Heißluft, Kesselabgasen oder einem Gemisch von beiden durchgeführte Mahltrocknung hat sich für Steinkohle mit Feuchtigkeit bis zu 15% heute allgemein eingebürgert.

Die Feuchtigkeit beeinflußt den Durchsatz und Arbeitsbedarf der Mühlen. Genaue Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen Temperatur und Menge der Rauchgase einerseits, dem Durchsatz und Arbeitsbedarf der Mühlen andererseits liegen noch nicht vor. Bei der Mahltrocknung müssen die heißen Gase die Kohle nicht nur trocknen, sondern meist auch tragen, fördern und sichten. Hierbei tritt die Frage der Abhängigkeit der Schwebe-geschwindigkeit von Kohlenkörnern verschiedener Korngröße von der Temperatur als maßgebend für die Bemessung der Querschnitte von Mühle, Rohrleitungen und Windsichtern als wichtig hervor und bedarf der weiteren Erforschung. Für Kohlenschlämme ist die Mahltrocknung in ihrer einfachen Form noch nicht ge-

eignet; man verwendet zu ihrer Vortrocknung Feuergastrommel-trockner oder pneumatische Trockner.

Im besonderen hat sich bei der Braunkohlenstaubfeuerung die Trocknung als Angelpunkt der Wirtschaftlichkeit erwiesen. Hierdurch wurde die Entwicklung dieser Feuerungsart für kleinere und mittlere Anlagen Jahre lang brach gelegt. Die mannigfaltigen Bestrebungen, die Mahltrocknung auch für Braunkohle geeignet zu machen, führten zur pneumatischen Umlufttrocknung und zur Mühlenfeuerung, denen es gelang, die Trocknung zu verbilligen, ohne die Mahlung zu verteuern. Auch für die Trocknung von Braunkohle durch diese Trocknungsverfahren liegen ähnliche Probleme vor, wie sie oben für die Mahltrocknung von Steinkohle gekennzeichnet wurden.

### V. Die Schwelung.

Die Steigerung der Treibstoff- und Ölerzeugung, soweit ihr die Braunkohle als Basis dient, geht vorerst in der Hauptsache auf dem Wege der Hydrierung von Teer vor sich. Daher ist die Frage der wirtschaftlichsten Schwelung von besonders großer Gegenwartsbedeutung. Im Rahmen des Gesamtprozesses der Braunkohlenverschwelung ist aber die Trocknung von größter Wichtigkeit, dürften doch von dem Gesamtwärmebedarf überschläglich 75% auf das Trocknen und nur 25% auf das eigentliche Schwelen entfallen.

Der Teerentbindung geht die restlose Entfernung der Feuchtigkeit des Schwelgutes voraus. Drei Möglichkeiten bieten sich für die Vornahme der Trocknung:

- a) Ausschließliches Trocknen im Schwelofen;
- b) Vortrocknen der Kohle in besonderen Trocknern auf 12—15% und Fertigtrocknen in den Schwelaggregaten;
- c) Möglichst restlose Vortrocknung vor dem Schwelen.

Wie so oft in der Technik, ist auch hier ein Kreislauf der Entwicklung zu beobachten. In den ersten Jahrzehnten der deutschen Mineralölindustrie kam man bald zur Erkenntnis, daß der fast ausschließlich benutzte Rollofen weit mehr als Trockner denn als Schweler arbeitete, und vereinzelt zog man daraus die praktische Schlußfolgerung, die Schwelkohle in feuergas-beheizten Tellerapparaten vorzutrocknen (132). Man kam indessen wieder davon ab, und 50 Jahre lang beschiedte man die Schwelöfen ausschließlich mit Rohkohle.

Erst mit der in und nach dem Krieg einsetzenden neuen Schwelera setzte sich die Vortrocknung der Kohle vor dem Schwelofen wieder durch. Man entwickelte Schwelgeneratoren und Spülgasschweler für die Entteerung von Briketts, und dabei ergab sich das Vortrocknen in dem bei der Briketherstellung üblichen Ausmaß von selbst. Man erkannte aber gleichzeitig, daß der Schwelofen eine ungeeignete Trockenvorrichtung ist, die ein wesentlich höheres Anlagekapital je Stundentonne Wasserverdampfung als ein Trock-

ner fordert, gleichwohl aber in wärmewirtschaftlicher Hinsicht schlechter arbeitet, da der ausgetriebene Wasserdampf auf 500° überhitzt werden muß, während er die üblichen Trockner mit 90—120° verläßt. In allen seither errichteten, mit Geissen-Öfen ausgerüsteten Großschwelereien wird daher die Schwelkohle auf die für die Brikettierung übliche Restfeuchtigkeit von ~15%, gelegentlich auch etwas schärfer vorgetrocknet. Auch die daneben noch entstandenen Versuchsschwelanlagen, die mit Kanalöfen oder einfachen Schachtswelern arbeiten, sind mit besonderen Kohlentrocknern versehen.

Der Kreislauf wurde in den letzten Jahren geschlossen, indem auch die Rolleofenschwelereien mehr und mehr zur Vortrocknung übergingen, um die Wärmewirtschaft zu verbessern und die Durchsätze zu steigern. Oft griff man dabei über die Trockenkohle hinaus zum Brikett, um einen stückigeren Schwelkoks zu erhalten. Begünstigt wurde diese Entwicklung dadurch, daß die Brikettfabriken während der Wirtschaftskrise nur mit einem Teil ihrer Leistungsfähigkeit ausgenutzt waren.

Zum Vortrocknen der Schwelkohle dienen entweder Dampf- oder Feuergastrockner. Die jeweiligen örtlichen und wirtschaftlichen Verhältnisse sind für die Wahl entscheidend. Dampftrocknung kommt in Betracht, wenn ungenügend belastete Brikettfabriken vorhanden, wenn die Briketterzeugung zugunsten der Schwelung eingeschränkt wird oder aber Briketts verschwelt werden, wenn selbständige Schwelereien errichtet werden, die erheblichen Energiebedarf über die Schwelerei hinaus, z. B. für Grube und Teerverarbeitung haben und endlich vor allem, wenn Absatz für die aus dem Dampf über den eigenen Bedarf hinaus erzielbare Überschußenergie vorliegt. Letzteres gilt für den Typus des Schwelkraftwerks, wie ihn erstmalig die Anlage in Wölfersheim verwirklichte (104, 105) und wie ihn die im Anschluß an vorhandene Großkraftwerke neu zu errichtenden Schwelereien aufweisen müssen. Bei derartigen Großschwelereien kann man den an sich günstigen Wärmebedarf der Dampftrocknung dadurch weiter vermindern, daß man das Zusatzspeisewasser der Kesselanlage, dessen Bedarf sich infolge der Betriebsdampfverluste der Schwelerei und des Dampfverbrauches etwa angeschlossener Hydrieranlagen erhöht, als chemisch-reines Kondensat durch Niederschlagung der Trockenbrüden gewinnt und gleichzeitig das Maschinenkondensat durch ihre fühlbare Wärme vorwärmt (43, 145). Angesichts des erheblichen Kapitalaufwandes muß natürlich sorgfältig erwogen werden, ob die Wärmeersparnis und Zusatzspeisewassergewinnung wirklich eine Erhöhung der Gesamtwirtschaftlichkeit verbürgen.

Sowohl Dampf- wie Feuergastrocknung wurden in einer Schwelerei angewendet, bei der der Energiebedarf nicht so groß war, daß der Turbinenabdampf für die Trocknung der gesamten Schwelkohle ausgereicht hätte (16). Die Vereinigung beider Trocknungsarten war hier insofern glücklich, als zur Beheizung des Feuergastrockners Abfallbrennstoffe, wie Braunkohlenstaub aus den Wind-

sicht- und Entstaubungsanlagen, überschüssiges Schwelgas und Feinkoks untergebracht werden konnten.

Für Schwelereien, deren Energiebedarf aus Überschußenergie einer angeschlossenen Brikettfabrik bestritten werden kann oder die keinen Fremdadatz für elektrische Energie erwarten können, ist die ausschließliche Feuergastrocknung vorzuziehen. Bei Anlagen dieser Art ist zu überlegen, ob die selbständige Feuergastrocknung mit Rauchgasen von  $700\text{--}750^\circ$  oder die Trocknung mit Abgasen des Brikettfabrik-Kesselhauses, die oft noch eine Temperatur von  $350\text{--}400^\circ$  haben, über alles genommen wirtschaftlicher ist. Als dritte Möglichkeit besteht die Aufheizung der Abgase durch eine Zusatzfeuerung, also eine Zwischenlösung zwischen selbständiger Trocknung und Abgastrocknung; sie kann vorteilhaft sein, wenn sich Schwierigkeiten der Kupplung daraus ergeben, daß die Brikettfabrik infolge schlechter Ausnutzung nur an einem Teil der Woche arbeitet, während die Schwelerei die ganze Woche und auch die Sonntage durchlaufen muß. Es kann dann vom betriebswirtschaftlichen Standpunkt ausrichtiger sein, auf die wärmewirtschaftliche Kupplung der beiden Anlageteile überhaupt zu verzichten.

Die Feuergastrocknung kann infolge ihrer niedrigeren Anlagekosten gegenüber der Dampftrocknung auch für den Fall des Schwelkraftwerks von Vorteil sein; im Einzelfall kann nur genaue Kalkulation die Wahl zwischen Dampf- und Feuergastrocknung entscheiden.

Ein erster Versuch, die bei verschiedenen Trocknungsarten auftretenden gesamten Trocknungskosten zu errechnen, liegt vor (76). Es fehlt aber an wirklichen Betriebsziffern. Eine weitgehend aufgespaltene Analyse der Trocknungskosten der vorhandenen Schwelereien wäre aufschlußreich und würde im Einzelfall die Wahl des Trockenverfahrens erleichtern.

Indessen ist die Trocknung der Schwelkohle nicht allein vom wärmewirtschaftlichen und finanziellen, sondern auch vom schweltechnischen Gesichtswinkel zu betrachten. Bei den Schwelöfen, die nicht Preßlinge, sondern körnige Kohle verarbeiten, ist man in der Regel bemüht, die Vorzerkleinerung so zu betreiben, daß der Staubanfall beim Trocknen möglichst eingeschränkt wird. Dieser Staub muß meist der Trockenkohle durch Entstaubungs-, Windsichter- oder Siebanlagen entzogen werden, da andernfalls der Teer zu hohen Staubgehalt aufweisen würde. Der abgeschiedene Braunkohlenstaub war bislang für die Schwelung verloren und mußte in der Kessel- oder Trocknungsanlage verfeuert werden; neuerdings bemüht man sich, ihn nach Verarbeitung zu kleinen Briketts der Schwelkohle wieder zuzusetzen.

Daher erhalten die Trockner der Schwelanlagen im allgemeinen ein wesentlich größeres Aufgabegut als die der Brikettfabriken. Es ist zweifellos von Belang, festzustellen, wie sich die Heizflächenleistung beim Dampftrockner, die Raumleistung beim Feuergastrockner mit der Körnung des Aufgabegutes ändern. Es ist bekannt, daß die Feuchtigkeitsverteilungscharakteristik (d. h. die Kurve des Feuchtigkeitsgehaltes abhängig von der Korngröße) beim Feuergastrockner viel flacher verläuft als beim Dampftrockner. Es scheint auch, daß die Verschlechterung des Gleichförmigkeitsgrades der Trocknung wie auch der Abfall der Verdampfungsleistung mit größer werdender Körnung der Kohle sich bei der Dampftrocknung viel schroffer vollzieht als bei der Feuergastrocknung. Man hat daher in einer Schwelanlage das Feinkorn  $< 10$  mm den Dampftrocknern, das Grobkorn von  $10$ — $25$  mm den Feuergastrocknern aufgegeben. Vergleichende Untersuchungen über das Verhalten der beiden Trocknungsarten bei verschiedenen Kohlenkörnungen hinsichtlich der Leistung, des Wärmebedarfes und der Feuchtigkeitsverteilungscharakteristik sind erwünscht. Natürlich hat aber die Feuchtigkeitsverteilung im Trockengut bei der Schwelung ganz im Gegensatz zur Brikettierung nur geringe Bedeutung. Im Rahmen solcher Untersuchungen ist auch zu klären, ob der durch Schrumpfen und mechanische Beanspruchung im Trockner eintretende — übrigens auch von der Vorzerkleinerungsart abhängende — „Körnungsschwund“, der den Staubanfall erhöht, bei Dampf- und Feuergastrocknern nennenswert verschieden ist. Die Erhöhung der Dampftrocknerleistung bei größerem Korn, z. B. unter Ausnutzung der neueren Erfahrungen über die Wendeleisten, bleibt jedenfalls eine Aufgabe.

In diesem Zusammenhang sei ein aus der Praxis gegriffener Fall angeführt, der zeigt, daß die bei der Trocknung sich einstellende Feuchtigkeitsspanne zwischen Fein- und Grobkorn auch im Schwelereibetrieb unangenehm sein kann. In der betreffenden Anlage liefern die Dampftrockner sowohl die Brikettier- als auch die Schwelkohle. Das Feinkorn unter  $2$ — $3$  mm wird abgeseibt und der Brikettierung zugeführt, das Grobkorn den Schwelöfen zugeleitet. Die Öfen erhalten also zwar gut gekörnte Kohle, aber mit hohem, ihre Leistung drückenden Feuchtigkeitsgehalt. Die Brikettpressen dagegen bekommen übertrocknetes Feinkorn mit hohem Staubanteil, müssen daher mit sehr niedriger Drehzahl betrieben werden und leisten entsprechend wenig. Man erkennt hier den Widerstreit der Anforderungen an Körnung und Feuchtigkeit.

Obwohl diese trockentechnischen Gesichtspunkte bei der Wahl des Trocknungsverfahrens nicht ausschlaggebend sind, so sind sie doch infolge ihrer betrieblichen Auswirkung zu berücksichtigen. Aber die Trocknung greift in den Schwelereibetrieb noch viel tiefer ein. Von ihrem Ausmaß hängt der Anfall an Schwelwasser und damit der Aufwand für dessen Reinigung und Beseitigung ab. Im Zusammenhang mit dem Schwelwasserproblem warfen ROSIN und JUST (107) vor einigen Jahren die Frage auf, ob man die Vortrocknung der Schwelkohle nicht noch weiter treiben solle, unter Umständen bis zur praktisch vollständigen Entziehung der Feuchtigkeit. Würde die Kohle restlos getrocknet, so würde der Schwelwasseranfall von  $\sim 25\%$ , bezogen auf wasserfreie Substanz, auf  $\sim 7$ — $10\%$ , d. h. auf den Anteil des sog. Zersetzungswassers,

das erst während der Teerentbindung frei wird, zurückgehen. Die Konzentration der Inhaltsstoffe im Schwelwasser würde dadurch auf einen Betrag steigen, der ihre Beseitigung erleichtert und, soweit sie Wert besitzen, vielleicht ihre wirtschaftliche Gewinnung gestattet. Das in einigen Schwelereien übliche Eindampfen des Schwelwassers würde durch schärfere Trocknung erleichtert werden. Es wurde nachgewiesen, daß unter Laboratoriumsbedingungen ein ins Gewicht fallender Teerverlust mit der scharfen Trocknung nicht verbunden ist. ROSIN (106) kennzeichnete auch bereits die technischen Probleme, die eine schärfere Trocknung der Schwelkohle aufwirft.

Das systematische Studium der Trocknung auf verschiedene Restfeuchtigkeiten bis herab zum vollständigen Feuchtigkeitsentzug wird zweifellos über die Trocknung der Schwelkohle hinaus Zukunftsbedeutung haben. Dabei muß festgestellt werden, wie sich in Abhängigkeit von der Endfeuchtigkeit die Verdampfungsleistung, der Wärme- und Kraftbedarf der Dampf- und Feuer-gastrockner, die Temperatur der Trockenkohle, ihre Neigung zur Selbstentzündung und Feuchtigkeitsaufnahme beim Fördern und Bunkern ändern. Weiterhin muß festgestellt werden, ob im praktischen Trocknerbetrieb mit schärferer Trocknung steigende Teerverluste auftreten, und wie sich die Leistung der Schwelöfen abhängig vom Feuchtigkeitsgrad der Einsatzkohle verhält.

Die möglichst restlose Trocknung der Kohle durch inerte Rauchgase wurde von Anfang an bei einem Spülgasverfahren erstrebt, das über dem eigentlichen Schweler einen davon getrennten schachtartigen Trockenaufsatz besitzt, den die Kohle ausfüllt. Man trocknet hierin die Braunkohle bis auf 3% herunter (58, 59). Das Verfahren ist deshalb besonders erwähnenswert, weil man daraus erkennt, daß das fundamentale aerodynamische Problem der Hochschicht — die gleichmäßige Durchdringung einer hohen Säule körnigen Gutes durch Gase — nicht nur für den Generator und den Hochofen wichtig ist, sondern sogar für die Trockentechnik Bedeutung hat.

Unter dem Zeichen des Strebens nach Treibstoffautarkie setzte im Jahre 1935 eine neue Schwelära ein, die bislang ausschließlich vom Brikett als Schwelgut ausgeht und dabei das soeben erwähnte Spülgasverfahren der Lurgi benutzt. Die schlechte Ausnutzung der Kapazität der Brikettfabriken und der Wunsch, stückigen Koks herzustellen, sind dabei die Triebfedern. Bei der Brikettschmelzung ist die Standfestigkeit der Preßlinge wichtig, und sie hängt, wie wir schon weiter oben hervorhoben, zweifellos

auch von der richtigen Trocknung ab. Werden auf der Strangpresse im normalen Fabrikationsgang der Brikettfabriken hergestellte Briketts verschwelt, so ist die Vortrocknung vor dem Verpressen auf 12—15% begrenzt. Man sieht dann meist eine zweite Trocknungsstufe vor dem Schwelen vor, in der die Feuchtigkeit der Preßlinge auf etwa 3% vermindert wird. Im Bestreben, besonders stückigen Koks zu erzielen, werden neuerdings Pressen für besonders hohe Drücke (Ringwalzenpressen) eingeführt. Untersuchungen (39) haben gezeigt, daß man unter Laboratoriumsverhältnissen bei hohen Drücken auch aus übertrockneter Braunkohle mit nur 5% Wasser ein festes Brikett herstellen kann. Tatsächlich strebt man bei der Ringwalzenpresse eine Vortrocknung der Braunkohle auf 4—8% an.

Abgesehen von der Schwelkohle wird in einigen Schwelereien auch naßgelöschter Haldenkoks von 20—35% Feuchtigkeitsgehalt auf 15—6% in dampfbeheizten Röhrentrocknern für Verkaufszwecke getrocknet. Zahlenunterlagen über dieses verhältnismäßig unbedeutende Anwendungsgebiet der Trocknung in der Braunkohlenschwelung liegen noch nicht vor.

Im Rahmen dieser Übersicht war es notwendig, die Trocknung der Braunkohle für die Schwelung ausführlicher zu behandeln, da sie von einschneidendem Einfluß auf die Wirtschaftlichkeit des gesamten Schwelereibetriebes ist.

In erster Linie kommen gegenwärtig für die eigentliche Schwelung von Steinkohle Verfahren in Frage, bei denen das Schwelgut in Ruhe und in dünnen Schichten (50—120 mm) thermisch behandelt wird. Stärkere Kohlenschichten würden bei der verhältnismäßig niedrigen Destillationstemperatur zu lange Garungszeiten und damit zu geringe Durchsatzleistungen ergeben. Infolge der niedrigen Arbeitstemperatur verlängert die in der Kohle enthaltene Feuchtigkeit die Garungszeit bei der Schwelung stärker als bei der Verkokung. Es ist daher von Fall zu Fall zu prüfen, ob eine Vortrocknung der Kohle auf 3—5% zweckmäßig ist. Eine einfache Vorwärmung der Schwelkohle auf Temperaturen oberhalb 100° hat praktisch weniger Bedeutung, sofern es sich um sehr feuchte Schwelkohle handelt. Bei Durchsatz von ungewaschener oder trocken aufbereiteter Kohle ist eine Trocknung selbstverständlich überflüssig, da Rohsteinkohle im Gegensatz zur Braunkohle nur einen geringen Wassergehalt als Grubenfeuchtigkeit aufweist.

Die Mitteltemperaturverkokung der Kohle bei über 700° wird in Koksöfen von 200—350 mm Kammerbreite durchgeführt. Außer einer Feinmahlung der durchzusetzenden Kohle ist unter allen Umständen eine Trocknung der Kohle erforderlich, wenn

nicht von trocken aufbereiteten Brennstoffen ausgegangen wird. Die Trocknung erfolgt in Trockentrommeln. Der Wärmearaufwand hierfür soll dem Verkokungsprozeß wieder zugute kommen, so daß durch die Trocknung praktisch kein erhöhter Wärmearaufwand erforderlich ist. Als besonderen Vorteil der Verarbeitung getrockneter Kohle bezeichnet man die Vermeidung von Wärmestauungen. Bei Verwendung sehr gasreicher, blähender Kohle muß noch ein sog. „Füller“ aus der Ausgangskohle durch geeignete thermische Vorbehandlung hergestellt werden. Diese Vorbehandlung kann nach Fritz (28) oxydierender oder schwelender Art sein, je nach der Art der Ausgangskohle. Der Anteil der Kohle, der einer solchen Vorbehandlung unterworfen wird, schwankt je nach der Beschaffenheit der durchzusetzenden Kohle.

Wie bei der Braunkohlenschwelung sind auch bei der Steinkohlenschwelung Verfahren vorgeschlagen, die Kohle zuerst zu brikettieren und dann zu schwelen. Bei diesen Verfahren spielt die Trocknung eine wesentliche Rolle, denn zur Herstellung der zu schwelenden Preßlinge muß die Kohle auf 1—2% Feuchtigkeitsgehalt getrocknet und im Anschluß daran oder gleichzeitig hinreichend zerkleinert werden. Die Vorschläge für diese Art Schwelung sehen eine Brikettierung unter Verwendung von Bindemitteln vor. Ob und inwieweit solche Verfahren zur Einführung kommen können, steht ganz offen, da es bei den meisten Steinkohlenvorkommen gelingt, durch Schwelung der Kohle in dünnen Schichten ebenfalls einen stückigen Koks von hoher Abriebfestigkeit in einem einzigen Arbeitsgang zu gewinnen.

## VI. Die Verkokung.

Die Kokerei ist noch immer der wichtigste Zweig der chemischen Veredelung der Steinkohle und wird es zweifellos auch bleiben. Die der Verkokung dienende Feinkohle wird fast stets auf nassem Wege von einem Teil der Asche befreit und hat beim Eintritt in die Koksöfen Wassergehalte bis zu 14%. Im letzten Jahrzehnt ist in zunehmendem Maße die Frage erörtert worden, ob es wirtschaftlich sei, die Verdampfung des Kohlenwassers ganz oder teilweise aus den Öfen heraus in vorgeschaltete Sondertrockner zu verlegen (7, 8, 9). In der Tat sind einige Anlagen zur thermischen Trocknung der Kokskohle errichtet worden. Heute darf nicht mehr gefragt werden, ob die Kokskohlentrocknung überhaupt wirtschaftlich sei, sondern es ist nur zu entscheiden, ob sie es unter den im Einzelfall vorliegenden Bedingungen ist und welches die optimale Restfeuchtigkeit ist, auf die herabgetrocknet werden soll.

Die Vor- und Nachteile der Kokskohlentrocknung für den

Kokereibetrieb sind mehrfach erörtert worden. In der Hauptsache erwartet man folgende Vorteile:

1. Die Kammerwände werden bei vorgetrockneter Kohle weniger abgeschreckt als bei nasser Kohle. Besonders bei Silikaöfen werden also die Steine mehr geschont.

2. Die aufzubringende Kühlleistung in der Nebenerzeugnisanlage für die Kondensation des Wasserdampfes wird geringer.

3. Die Saugerleistung nimmt infolge der Verringerung des Gasvolumens ab.

4. In der Ammoniakfabrik wird weniger Wasser durchgesetzt. Das anfallende Ammoniakwasser ist also stärker konzentriert und der Dampfbedarf beim Abtreiben wird kleiner.

5. Der Anfall an Kokereiabwässern verringert sich und damit der Aufwand an Reinigungskosten.

6. Der Ofendurchsatz steigt infolge der geringeren Garungszeit.

Bisweilen führt man auch noch an, daß die Trocknung Schwankungen des Feuchtigkeitsgehaltes der Kokskohle ausgleichen und damit Pendelungen der Garungsdauer verhindern könne. Auch wird bei zu hohem Wassergehalt die Güte des Koksbes beschränkt.

Hingegen trifft die Auffassung, daß der Wärmeverbrauch für die Verdampfung bei der Trocknung geringer sei, als im Ofen, wo der Wasserballast auf 600—700° überhitzt werden muß, nicht zu. Nach Berechnungen von HILGENSTOCK erfordert für einen gegebenen Fall die Verdampfung von 1 kg Wasser im Ofen 1190 kcal, im Trommeltrockner 1340 kcal. Allerdings ist zu berücksichtigen, daß für die Kokskohlentrocknung Abhitze aus Kokereigasen herangezogen werden kann.

Die Nachteile der Kokskohlentrocknung bestehen in den nicht unerheblichen Anlagekosten der Trocknungsanlage und dem für sie erforderlichen Aufwand an Bedienungs-, Energie-, Unterhaltungskosten.

Man kann als Bestwert der Kokskohlenfeuchtigkeit heute 8% ansetzen. HILGENSTOCK hat für die Trocknung der Kokskohle von 14 auf 8% die bei verschiedenen Trocknerarten entstehenden Trocknungskosten untersucht (s. Abb. 11). Um vergleichsfähige Ziffern zu erhalten, wurden alle Werte auf einen Durchsatz von 1000 t/Tag bezogen. Von 6 untersuchten Drehtrommelanlagen sind 3 mit Fettnuß IV, eine mit Heizgas und eine mit Abhitze und Heizgas befeuert. Die Durchschnittskosten stellen sich auf 37 Pfg./t Naßkohle. Bei vier Röhrentrocknern betragen die Trocknungskosten im Durchschnitt 41,7 Pfg./t Durchsatz. Von den untersuchten Teller-trocknern erfolgt die Beheizung zweier Anlagen mit Fein-

kohle und die der dritten mit Dampf. Die Durchschnittskosten belaufen sich auf 38,5 Pfg./t.

Allen Berechnungen liegen die folgenden Werte zugrunde:

Kapitaldienst	20%	Kokereigas Ho 4700 kcal	1,36 Pf./m <sup>3</sup>
Kohle Fettfuß IV	13,16 RM/t	Strom	2,40 Pf./kWh.
Dampf 12 atü	1,80 RM/t	Löhne	7,77 RM/Schicht.

Aus der Kostenaufteilung ergibt sich, daß die Beheizung den größten Anteil der Gesamtkosten beansprucht. Kann man Abgase verwenden, die durch Frischgas aufgeheizt werden, so kann man beim Trommeltrockner auf Trocknungskosten von 19,5 Pfg./t herunterkommen. Natürlich gelten diese Ziffern nur unter gewissen Voraussetzungen; im Einzelfall sind bekanntlich die örtlichen Verhältnisse bei Wirtschaftlichkeitsberechnungen von ausschlaggebender Bedeutung.

Aus dem Vergleich der Kostensäulen in Abb. 13 geht hervor, daß die Kosten für die Entwässerung gegenüber denen der Trocknung wesentlich niedriger sind und daß man daher, so lange es möglich ist, Entwässerungsverfahren verwenden und die thermische Trocknung erst als Ergänzung in dem Feuchtigkeitsbereich ansehen wird, wo die Entwässerung versagt. Daher wird sich die Trocknung zuerst für die der Kokskohle zugesetzten Flotations-schlämme einbürgern.

Nach einer Berechnung von HILGENSTOCK betragen die Mehrkosten für die Verkokung bei 14% Wassergehalt gegenüber 8% fast 46 Pfg./t Naßkohle bei einem Durchsatz von 1000 t/Tag. Daraus ergibt sich, daß für diesen Fall die thermische Trocknung wirtschaftlicher ist als die Verdampfung im Koksofen. Da die Brennstoffkosten den Hauptteil der Trocknungskosten ausmachen, muß man natürlich möglichst billigen Brennstoff verwenden.

Es muß noch eine andere Seite des Problemkomplexes der Kokskohlentrocknung berührt werden, die bislang unbeachtet geblieben ist. In größerem Umfange als die Kokskohlentrocknung hat sich bislang bekanntlich die Kokskohlenmahlung durchgesetzt. Eine Zerkleinerung auf 90% < 2mm wird heute schon vielfach gefordert. Zerkleinern ist aber um so schwieriger, d.h. der Durchsatz der Mühlen ist um so kleiner und der Arbeitsbedarf um so höher, je größer der Feuchtigkeitsgehalt der Kohle ist. Daher muß die Frage der Kokskohlentrocknung auch vom Standpunkt der Kokskohlenmahlung beleuchtet werden.

Bei höheren Feuchtigkeitsgehalten als 8—10% ist heute die Schleudermühle der Hammelmühle noch überlegen, und man benutzt daher vielfach die Hammelmühlen nur zum Vorbrechen, während die Schleudermühlen die Feinmahlung besorgen. Die

Hammermühle hat an sich gegenüber der Schleudermühle die Vorteile, daß ihre Leistungsfähigkeit größer ist, daß sie nur eines Antriebes bedarf, und daß im allgemeinen die Verschleißteile billiger sind und leichter ausgewechselt werden können, wenn auch mit wachsendem Verschleiß die Feinheit bei der Hammermühle sich rascher und stärker verschlechtert als bei der Schleudermühle. Zwar arbeitet man dauernd daran, die Hammermühle auch für höhere Feuchtigkeit brauchbar zu machen, doch sind die erzielbaren Erfolge begrenzt. Aus Abb. 15, die eine Versuchsfolge mit Koks-kohle verschiedener Feuchtigkeit an einer Hammermühle veranschaulicht, entnimmt man, daß zwischen 5,5 und 12% Wassergehalt der Durchsatz auf die Hälfte abfällt und der Arbeitsbedarf auf das Doppelte steigt. Wenn die Kohle 12—13% Feuchtigkeit hat, können selbst bei den unempfindlicheren Schleudermühlen Schwierigkeiten dadurch auftreten, daß sich die Kohle am Mühlenmantel festsetzt und den Mahlkorb abbremst. Auch die Ableitung der zerkleinerten feuchten Kohle aus der Mühle kann zu Anständen Anlaß geben.

Die Koks-kohlentrocknung ist also auch für die Koks-kohlenmahlung vorteilhaft und wird es immer mehr, je höhere Anforderungen an die Feinheit gestellt werden. Selbstverständlich entscheiden nicht Rücksichten auf die Mahlung über die Einführung der Trocknung. Es kann aber hierin ein zusätzliches Motiv liegen. Es scheint überhaupt nicht ausgeschlossen, daß der Zukunftsweg der Koks-kohlenaufbereitung in der Übertragung der bei der Kohlenstaubfeuerung so bewährten Mahltrocknung, d.h. der Vereinigung von Trocknung und Mahlung liegen wird.

Auf die Bedeutung der Luftaufbereitung für die Koks-kohlenfeuchtigkeit wurde schon im Abschnitt „Aufbereitung“ eingegangen, und es sei hier nochmals darauf verwiesen.

## VII. Die Hydrierung.

Für die Hydrierung muß die Braunkohle möglichst restlos getrocknet und anschließend oder gleichzeitig gemahlen werden. Die einzige Anlage, die dieses Verfahren bislang durchführt, hat Feuergastrommeltrockner größten Ausmaßes mit Verdampfungsleistungen von mehr als 20 t/h, die den größten Dampftrockner weit hinter sich lassen, gewählt. Es ist zu hoffen, daß die in dieser Trockenanlage gemachten Erfahrungen über die restlose Trocknung — also das Problem, das oben auch für die Braunkohlen-schmelzung als wichtig gekennzeichnet wurde — im Interesse der Trocknungsforschung einmal bekannt gegeben werden; zumal man in jener Anlage dem Vernehmen nach die Eintrittstemperatur der

Rauchgase von den bislang üblichen Werten von 600—750° auf über 1000° erhöht hat. Abgesehen von der Leistungssteigerung und der nur noch geringfügigen Besserung des Wärmebedarfs dürfte der Hauptwert einer solchen Maßnahme in der Erzielung hoher Kohlensäuregehalte und damit eines einwandfreien Rauchgasschutzes für die scharf getrocknete Kohle liegen (64a).

Die unmittelbare Hydrierung der Steinkohle verlangt wie die der Braunkohle eine möglichst restlose Trocknung und ziemlich feine Mahlung. Daher dürften kombinierte Mahl- und Trocknungsverfahren sich hierfür besonders eignen.

Bei der Herstellung von Treibstoffen aus Synthesegasen ist Koks der Ausgangsstoff, und die Trocknung hat daher im Rahmen dieses Verfahrens dieselbe Bedeutung wie in der Kokerei.

### VIII. Die Vergasung.

Die Ent- und Vergasung von Braunkohle zur Herstellung von Generatorgas, Stadtgas, Wassergas bzw. Synthesegas kann ausgehen von Rohkohle, Trockenkohle, Briketts oder Kohlenstaub. Die Bedeutung der Vergasung mulmiger Braunkohle ist gering; ein wirklich leistungsfähiges und wirtschaftliches Verfahren in großem Maßstabe gibt es noch nicht. Damit tritt auch hier die Wichtigkeit der Trocknung hervor.

Von Trockenkohle mit 15% Wasser geht das mit Sauerstoff und Dampf unter höherem Druck arbeitende Lurgi-Verfahren zur Stadtgasgewinnung aus. Es ergibt sich hier wie bei der Schwelung die Notwendigkeit, das Feinkorn anderweitig zu verwenden, sei es zur Brikettierung oder Kohlenstaubfeuerung. Ob Untersuchungen über die günstigste Vortrocknung bereits vorliegen, ist nicht bekannt.

Im größten Maßstabe wird Trockenbraunkohle in den Winklergeneratoren des Leunawerkes vergast. Die Braunkohle wird durch Feuergastrommeltrockner auf etwa 6% vorgetrocknet — eins der wenigen Beispiele für eine betriebsmäßige scharfe Trocknung von Braunkohle.

Die Mehrzahl der Verfahren zur Stadtgas- und Wassergasherstellung nimmt das Brikett als Ausgangsstoff, womit die Vortrocknung als solche, aber auch ihre Grenzen festgelegt sind. Für alle Ver- und Entgasungsverfahren ist die Forderung eines gut zusammenhaltenden, nicht Grus bildenden Briketts wichtig. Diese Stehkraft hängt, wie schon bei Besprechung der Brikettschwelung erwähnt, zum großen Teil auch von der richtigen Trocknung ab. Alle Untersuchungen über den Trocknungsverlauf von Einzelkorn und Korngemenge und seine Abhängigkeit von den verschiedenen

Trockenverfahren haben daher nicht nur für das Brikett als Brennstoff, sondern auch für das Brikett als Rohstoff der Schwelerei und Gaserei Bedeutung und müssen auch hierauf ausgerichtet sein.

Die Vergasung von Staub setzt natürlich ebenfalls die Trocknung der Kohle zumindestens auf das gleiche Maß wie bei der Kohlenstaubherstellung voraus. Für die Staubvergasungsverfahren ist daher kombinierte Mahlung und Trocknung am wirtschaftlichsten. Falls Synthesegase hergestellt werden sollen, wird man wie bei der Hydrierung möglichst restlose Trocknung anstreben.

### D. Zusammenfassung.

In einer einleitenden Bemerkung wird darauf hingewiesen, daß viele ungeklärte Vorgänge bei der Kohlenentwässerung und -trocknung noch einer wissenschaftlichen Bearbeitung bedürfen, deren Förderung sich der Reichskohlenrat angelegen sein läßt. Im ersten Abschnitt sind die vorgeschlagenen Einheitsbezeichnungen für die Roh- und Trockenkohlenmenge, deren Aufstellung nach folgerichtigen Gesichtspunkten vorgenommen ist, wiedergegeben und ein einfaches Schaubild zur Bestimmung der Beziehungen zwischen den Roh- und Trockenkohlenmengen und dem verdampften Wasser mit Berücksichtigung der Staubverluste vorgeschlagen. Nach einem Eingehen auf die Struktur der verschiedenen Kohlen wird das Kohlenhaufwerk in bezug auf die Kornlagerung, Korngrößenverhältnisse, Siebfähigkeit und Benetzbarkeit betrachtet. Im nächsten Abschnitt ist die Bindung des Wassers an die Kohle besprochen. Dann sind die Begriffe Entwässerung und Trocknung abgegrenzt. Unter Entwässerung versteht man die Entziehung des Wassers aus der Kohle auf mechanischem Wege, wobei man das mit der Kohle verbundene Wasser nach der Trennung in flüssigem Zustand erhält, während bei der Trocknung die Kohlenfeuchtigkeit auf thermischem Wege getrennt wird und nach der Entfernung im dampfförmigen Zustand erscheint. Hierauf aufbauend wird zunächst auf die Vorgänge bei der Entwässerung eingegangen und eine Besprechung der einzelnen Entwässerungsverfahren vorgenommen. Im folgenden Abschnitt über die Trocknung wird eine Darstellung der Vorgänge bei der Verdunstung und Verdampfung, des hygroskopischen Verhaltens der Kohle und der Vorgänge der Trocknung innerhalb des Kohlenkornes und des Kohlenhaufwerks unter besonderer Berücksichtigung des Fleißnerverfahrens gegeben und nach einer kurzen Besprechung der wärmewirtschaftlichen und wärmetechnischen Verhältnisse bei der Trocknung auf die einzelnen Trocknungsverfahren eingegangen. Schließlich werden die im

Laufe der Abhandlung besprochenen ungeklärten Probleme, deren Bearbeitung im einzelnen weiterverfolgt werden soll, zusammenfassend dargestellt.

Mannigfaltig und abwechslungsreich sind die Aufgaben der Trocknungstechnik auf dem Gebiet der Kohlenveredlung. Dennoch zeichnen sich gemeinsame Probleme ab, die alle Einzelgebiete angehen. Ihre Klärung wird die Trocknungsforschung zuerst in Angriff nehmen müssen. Sie wird und kann aber andererseits nicht vorübergehen an den Sonderfragen der einzelnen Anwendungsgebiete. Hierbei ist es stets wichtig, sich vor Augen zu halten, daß die Trocknung selten Selbstzweck, sondern Diener eines Prozesses, sei es nun Formgebung, Verfeuerung, Ent- oder Vergasung usw., ist. Daher muß man sich bei der Behandlung von Trocknungsproblemen stets erst Klarheit verschaffen, welche Anforderungen der Verwendungszweck an die Eigenschaften des Trockengutes stellt. Denn erst hieraus ergibt sich die Frage, in welchem Umfange sich die Trocknung an der Erzeugung dieser Eigenschaften beteiligen kann und wie diese Beteiligung am einfachsten und wirtschaftlichsten zu gestalten ist.

## E. Verzeichnis des Schrifttums.

1. AGDE und HUBERTUS: Untersuchungen über unterschiedliche Schwelproduktausbeuten von Rohbraunkohlen. Braunkohle 31 (1932), S. 675.
2. — Untersuchung über die der Schwelung von Braunkohlen vorausgehenden Entwässerungsvorgänge. Braunkohle 31 (1932), S. 877 u. 897.
3. — Kapillarstrukturuntersuchungen von Schwelkohlen. Braunkohle 32 (1933), S. 65 u. 87.
4. — Zusammenhänge des Schwelvorganges mit der Kapillarstruktur der Braunkohle und des Schwelkokes. Braunkohle 32 (1933), S. 129.
5. AREND: Untersuchungen über das aerodynamische Verhalten von Schüttungen nichtbackender Kohle auf Wanderrosten. Bericht D 53 des Reichskohlenrates. Berlin: VDI-Verlag.
6. BAUDENBACHER: Bestimmung der spezifischen Wärme für getrocknete Braunkohle und Braunkohlenbriketts. Braunkohle 20 (1921/22), S. 433.
7. BAUM: Die neuen Wege der Kohlenaufbereitung. Glückauf 67 (1931), S. 281.
8. — Die neuen Wege der Koks Kohlenaufbereitung. Glückauf 67 (1931) S. 281 u. 326.
9. — Der Einfluß des Wassergehaltes der Kohle auf den Wärmeverbrauch für ihre Verkokung. Arch. Eisenhüttenwes. 6 (1933), S. 263.
11. BERL und IMMEL: Über die Verdrängung der Braunkohlengrubenfeuchte durch Öle. Kolloidchemie (1927), Beihefte 24, S. 181.
12. BIERBRAUER-PÖPPERLE: Selektive Kohlenflotation auf kohlenchemischer Grundlage. Glückauf 70 (1934) S. 993.
13. BLANK: Handbuch der Bodenlehre. 1930. Berlin: Verlag Julius Springer.
14. BLUM: Die Rolle der Huminsäuren bei der Brikettierung brikettierfähiger Braunkohlen. Braunkohle 30 (1931), S. 837 u. 853.
15. BODE: Zur Unterscheidung von Steinkohle und Braunkohle. Braunkohle 29 (1930), S. 982.
16. BÖHM, G.: Betriebserfahrungen mit einem Feuergas-Gleichstrom-Trommeltrockner zum Trocknen von Braunkohle. Braunkohle 30 (1931), S. 247.
17. BROCHE, H. und H. NEDELMANN: Einfluß der Beschaffenheit der Steinkohle auf die Güte des Briketts. Glückauf 70 (1934), S. 979.
18. BUBE: Beiträge zur Verschmelzung und Vergasung von Braunkohle. Braunkohle 27 (1928), S. 717.
19. BURCKHARDT und FRITZSCHE: Die spezifische Wärme der Braunkohle. Braunkohlenarchiv (1927), Heft 17.
21. CHAPMAN und MOTT: The Cleaning of Coal XVII. The Dewatering of Coal. Fuel 6 (1927), S. 340.
22. DEIMLER: Zeichnerische Hilfsmittel für den praktischen Betrieb zur überschlägigen Beantwortung der Hauptfragen in der Brikettfabrik. Braunkohle 24 (1925/26), S. 978.

23. DEIMLER: Änderung der spezifischen Wärme eines feuchten Körpers bei verschiedenem Wassergehalt unter besonderer Berücksichtigung der Braunkohle. Braunkohle 25 (1926/27), S. 1125.
24. DONATH und LISSNER: Zur Abgrenzung der Begriffe Braunkohle und Torf. Braunkohle 27 (1928), S. 257.
25. DRESNER, KAYSER, RAMMLER und WESEMANN: Untersuchungen zum Feinkohlenproblem, Teil I; Klassierung von Feinkohle durch Vibrationssiebung. Bericht D57 des Reichskohlenrates. Berlin: VDI-Verlag.
26. ECKARDT: Das Trocknen der Braunkohle und seine Wirtschaftlichkeit. 1913. Halle: Verlag W. Knapp.
27. EUCKEN, A.: Grundriß der physikalischen Chemie. Leipzig 1924.
28. FITZ, W.: Das Carbolux-Verfahren zur Verschmelzung von Steinkohlen. Brennstoff-Chem. 16 (1935), S. 345.
29. FLEISSNER: Die Trocknung stückiger Braunkohle. Berg- u. hüttenm. Jb. 74 (1926), S. 104.
31. — Veredlung und Trocknung der Braunkohle. Montan. Rdsch. 1927, H. 10/14.
32. — Die Trocknung der Brennstoffe und die österreichische Kohlenwirtschaft. Sparwirtsch. 1929, H. 10/11.
33. FOOS: Die Wärmewirtschaft in der Brikettfabrik. Braunkohle 22 (1923/24), S. 327.
34. FORMANEK: Beitrag zur Wärmetechnik der Braunkohlentrocknung nach dem Fleißner-Verfahren. Braunkohle 30 (1931), S. 874 u. 893.
35. FRANKE, G.: Handbuch der Brikettbereitung, Stuttgart 1931.
36. FRIEDRICH: Beziehungen des Kohlenverbrauchs und der Leistung einer Braunkohlenbrikettfabrik zu dem Wassergehalt der Rohkohle und dem Restwassergehalt des Briketts, in Zahlentafeln und Schaulinien dargestellt. Braunkohle 23 (1924/25), S. 32.
37. —, E.: Die Veredlung der Braunkohle zum Brikett und die dabei für die Trocknung zu beachtenden Grundlagen und Einrichtungen. Braunkohle 26 (1929), S. 421.
38. FREUNDLICH: Kapillarchemie Bd. 1. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft.
39. FELTZSCHE, A.: Untersuchung über die Brikettierung von Braunkohlen unter besonderer Berücksichtigung der Wasserbeständigkeit von Braunkohlenbriketts. Braunkohlenarchiv (1928), H. 22.
42. GEBHARDT: Die Aufbereitung und Trocknung der Brikettierkohle. Braunkohle 28 (1929), S. 281.
43. GENSECKE, F.: Über die Verwendung der Abwärme in Brikettfabriken. Braunkohle 22 (1923/24), S. 601 u. 616.
44. GOLDMANN: Feinkohlenentwässerung unter Berücksichtigung der Kapillaritätserscheinungen. Glückauf 68 (1932), S. 749.
45. GOLLMER: Universal Trockner. Glückauf 68 (1932), S. 238.
46. GOTHAN, PIETZSCH und PETRASCHKE: Die Begrenzung der Kohlenarten und die Nomenklatur der Braunkohlen. Braunkohle 26 (1927), S. 669.
47. GÖTTE: Die jüngste Entwicklung der Steinkohlenaufbereitung Glückauf 65 (1929), S. 1581 u. 1617.
48. HENTZE: Beiträge zur Klärung der Frage nach der verschiedenen Brikettierfähigkeit von Braunkohle. Braunkohle 26 (1927), S. 749.
49. HERBST-KÜHLWEIN: Notwendigkeit und Zielsetzung der Steinkohlenaufbereitungsforschung. Glückauf 70 (1934) S. 995/6.

51. HERMISSON, H. J.: Laufende Betriebsüberwachung in den Braunkohlenbrikettfabriken. Braunkohle 29 (1930), S. 304.
52. HIRSCH: Trockentechnik. 1927, Berlin: Julius Springer.
53. HIRZ, H.: Schnellbestimmung des Wassergehaltes von Braunkohle. Braunkohle 28 (1929) S. 101.
54. HOCK und FISCHER: Fragen der Brikettforschung. Braunkohle 33 (1934) S. 245.
55. HOFFMANN: Umrechnung von Kohlenmengen auf verschiedene Wassergehalte. Glückauf 66 (1930), S. 1304.
56. HOLIK: Die bindemittelfreie Brikettierung nach Apfelbeck. Glückauf 70 (1934) S. 385.
57. d'HUART: Die spezifische Wärme von Braunkohle und Grudekoks. Braunkohle 26 (1927), S. 341.
58. HUBMANN, O.: Braunkohlentrocknung und -schwelung durch Innenheizung. Braunkohle 23 (1924/25), S. 527, 542.
59. — Betriebsergebnisse des Spülgas-Schwelverfahrens Lurgi. Braunkohle 25 (1926/27), S. 802.
61. Hütte I, 24. Auflage, S. 496 und Abb. 8.
62. JOSSE, E.: Entstaubung von Brüden oder Kesselabgasen mit Destillatgewinnung. Ergebnisse eines Großbetriebes. Z. VDI 74 (1930), S. 1505.
63. KASPERS: Herstellung und Verwendung von rheinischem Braunkohlenstaub. Braunkohle 26 (1927), S. 397.
64. KEGEL: Die Entstehung des Braunkohlenbriketts. Glückauf 38 (1902), S. 645.
- 64a. — Rechnerische Ermittlung der Mischtemperaturen, sowie des Feuchtigkeits- und Sauerstoffgehalts der Heizgase bei der direkten Trocknung von Rohbraunkohlen in Gleichstromtrocknern. Braunkohlenarchiv 11 (1926), S. 10 u. 40.
65. — Vorlesungsblätter. Bergakademie Freiberg.
66. KAISER, M.: Untersuchungen über das Arbeiten eines Ellipsenscheibenrostes. Dissertation 1934, Würzburg: Verlag K. Tritsch.
67. KIEKEBUSCH, W.: Neue Gesichtspunkte bei der Lösung des Sortenproblems. Bericht A42 des Reichskohlenrats. Berlin: VDI-Verlag.
68. — Deutsche Bergwerkszeitung vom 18. und 19. Oktober 1934.
69. KLEIN: Die Vorgänge beim Fleissner-Kohlentrocknungsverfahren für Lignite und ihre chemischen und physikalischen Grundlagen. Braunkohle 29 (1930), S. 1 u. 21.
71. — Beitrag zur Wärmetechnik der Braunkohlentrocknung nach dem Fleissner-Verfahren. Braunkohle 31 (1932), S. 138.
72. KOENIGER und HAMMER: Die künstliche Grünfuttertrocknung. 1931, Berlin: Beuth-Verlag.
73. KRISCH: Die Herstellung von Braunkohlenstaub auf der Beisselsgrube. Braunkohle 26 (1927), S. 777.
74. KRISCH und RUMBERG: Verbesserung der Wärmewirtschaft in Braunkohlenbrikettfabriken. Braunkohle 27 (1928), S. 965.
75. KÜHLWEIN: Fusitabscheidung durch selektive Kohlenflotation. Glückauf 70 (1934), S. 245 u. 275.
76. KÜHN, H.: Die mittelbare und unmittelbare Wärmetrocknung der Braunkohle; ein Vergleich beider Verfahren hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Güte. Braunkohle 33 (1934), S. 7 u. 21.
77. MARGUERRE, F.: Thermodynamische Speicherung als Lösung der Brikettstromfrage. Arch. Wärmewirtsch. 15 (1934), S. 227.

78. MAYER, M. und MITTELSTEINER: Betriebserfahrungen im Trocken-dienst einer Brikettfabrik und Vorschläge zur Überwachung des Trockenprozesses. Braunkohle 29 (1930), S. 577 u. 601.
79. MELDAU: Der Industriestaub, S. 126. 1926, Berlin: VDI-Verlag.
81. MOLLER, R.: Ein neues Diagramm für Dampfpluftgemische. Z. VDI 67 (1923), S. 869.
82. MÜLLER, E.: Vergleichende Versuche mit Wendeleisten in Braunkohlen-Röhrentrocknern. Braunkohle 32 (1933), S. 805 und 826.
83. —, H.: Vergleichende Untersuchungen über die Siebfähigkeit Bitterfelder Kohle auf verschiedenen Klassierungsaggregaten. Dissertation 1933, Würzburg: Verlag K. Triltsch.
84. NASHAN, P.: Kohle und Kapillarität. Glückauf 41 (1935), S. 805.
85. OSTWALD und MASS: Über Viskositätsanomalien sich entmischender Systeme. Kolloid-Z. 63 (1933), S. 61 ff.
86. PALKOWSKY und d'HUART: Wärmewirtschaftlicher Vergleich zwischen der Dampftrocknung und der Feuergastrocknung in der Braunkohlenindustrie. Braunkohle 25 (1926/27), S. 837.
87. — Der Feuergas-Gleichstrom-Trommeltrockner in der Braunkohlenindustrie. Braunkohle 25 (1926/27), S. 349 u. 373.
88. PAPPENBERG, A.: Laufende Betriebsüberwachung in den Braunkohlenbrikettfabriken. Braunkohle 29 (1930), S. 289.
89. PAUL, H.: Entwässerungen von Steinkohlenschlämmen auf Saugfiltergeräten. Beihefte Nr. 16, Berlin: Verlag Chemie.
91. PETERSEN und GREGOR: Klärung des Schlamwassers aus Kohlenwäschen. Glückauf 68 (1932), S. 621.
92. PROCKAT: Kohlenentwässerung und Wasserklärung durch Schleudern. Z. VDI 74 (1930), S. 1729.
93. — Die Entwässerung feinkörniger Aufbereitungserzeugnisse und Klärung von Aufbereitungstrüben durch Eindicken und Filtern. Z. ober-schles. berg- u. hüttenm. Ver. Kattowitz 1931, S. 461.
94. PROCKAT und RAMMLER: Über die Arbeitsweise von Zittersieben. Bericht C58 des Reichskohlenrats. Berlin: VDI-Verlag.
96. PROCKAT und STÄDTER: Untersuchungen zur Frage der Steinkohlenbrikettierung. Glückauf 68 (1932), S. 63.
97. RAITHEL: Grundlagen der Braunkohlenentteerung mit Spülgasen. Braunkohlenarchiv (1927), Heft 15/16.
98. RAMMLER, E.: Verfahren der Feuchtigkeitsbestimmung und ihre Eignung für Trockneruntersuchungen. Bericht E2 des Reichskohlenrats. Berlin: VDI-Verlag.
99. — Korngrößenprobleme bei der Siebung und Zerkleinerung. Bericht A40 des Reichskohlenrats. Berlin: VDI-Verlag.
101. ROMBERG, H.: Bindemittellose Steinkohlenbrikettierung. Braunkohle 34 (1935) S. 617.
102. ROSIN: Wirtschaftlichkeit der Braunkohlenstaubfeuerung. Braunkohle 26 (1927), S. 364.
103. — Die Fleissner-Trocknung lignitischer Braunkohle. Braunkohle 28 (1929), S. 649.
104. — Kupplungsmöglichkeiten zwischen Kohlenveredlung und Elektrizitätserzeugung. Bericht der Weltkraftkonferenz 1928, Nr. Q1.
105. —, P.: Low temperature carbonisation and the production of electricity in Germany; Joint Meeting of the Members of the Institution of Electrical Engineers and of the Institute of Fuel, London, November 21st, 1929.

106. ROSIN: Probleme der Braunkohlenschwelung. Brennstoff-Chem. 9 (1928), S. 182.
107. ROSIN, P. und H. JUST: Über die Schwelung völlig getrockneter Braunkohle unter Berücksichtigung der Teerausbeute und des Schwelwassers. Braunkohle 28 (1929), S. 893 u. 915.
108. ROSIN und KAYSER: Feuerungstechnische Kenngrößen der Kohlen und ihre Bestimmung: I. Schüttungskenngrößen. Bericht D48 des Reichskohlenrates. Berlin: VDI-Verlag.
109. ROSIN und RAMMLER: Mahltrocknung; 10. Berichtsfolge des Kohlenstaubausschusses des Reichskohlenrats. Berlin: VDI-Verlag und Braunkohle 26 (1927), S. 261 und 286.
111. — Herstellung von Braunkohlenstaub mit dem pneumatischen Umlaufrockner. Braunkohle 29 (1930), S. 557 u. 586.
112. — Mahlversuche an Windsichter-Rohrmühlen. Bericht C50 des Reichskohlenrates. Berlin: VDI-Verlag.
113. — Windsichter und ihre Untersuchung. Glückauf 68 (1932), S. 529.
114. ROSIN, RAMMLER und KAUFFMANN: Die Mühlenfeuerung. Bericht D58 des Reichskohlenrates. Berlin: VDI-Verlag.
115. ROSIN, RAMMLER und KAYSER: Über Dampfdruckisothermen und Porositätkennlinien von Kohlen. Braunkohle 33 (1934), S. 289 u. 305.
116. — Richtlinien für Körnungsanalysen für Feuerungskohle. Bericht D66 des Reichskohlenrates. Berlin: VDI-Verlag.
117. ROSIN, RAMMLER und SPERLING: Korngrößenprobleme des Kohlenstaubs und ihre Bedeutung für die Vermahlung. Bericht C52 des Reichskohlenrates. Berlin: VDI-Verlag.
118. SCHMITT: Die Trocknung der Braunkohle im Röhrentrockner. Braunkohle 27 (1928), S. 1005 u. 1030.
119. SCHNEIDER, R.: Die Verwertung der beim Trockenprozeß der Braunkohle gewinnbaren Überschußenergie in der Energiewirtschaft. Braunkohle 29 (1930), S. 717.
121. SCHÖNE, O.: Das Großkraftwerk für 120 at Kesseldruck der Ilse-Bergbau-AG. Wärme 52 (1929), S. 328.
122. — Grundlagen für den Entwurf von Braunkohlenbrikettfabriken und Möglichkeiten zur Verbesserung ihrer Energieerzeugung: Wärmewirtschaft und Leistungsfähigkeit. 1930, Berlin: Julius Springer.
123. — Erzeugung von Überschußenergie in Braunkohlenbrikettfabriken bei Anwendung von Hochdruckdampf. Braunkohle 29 (1930), S. 697.
124. SCHUSTER: Umrechnung von Kohlenmengen auf verschiedene Wassergehalte. Glückauf 67 (1931), S. 1388.
125. SKUTL: Ein neues Kohlentrocknungsverfahren. Braunkohle 31 (1932), S. 932.
126. SPILKER und BORN: Steinkohlenteerpech als Bindemittel für Steinkohlenbrikettierung. Brennstoff-Chem. 11 (1930) S. 307.
127. STUCHTHEY: Die Oberflächenkennzahl feinkörniger Stoffe als Ausdruck für ihren Feinheitsgrad. Glückauf 70 (1934) S. 41.
128. — Technische Mitteilungen von Krupp 1934, S. 70.
129. TAGGART, A. F.: Handbook of Ore Dressing. New York 1927.
130. TERRES, E., A. KRÜGER, E. LEIBNITZ, M. MUSS, J. SCHERMAN, K. SCHMIDT, K. SCHULTZE, W. STECK und L. SÜMBGI: Beiträge zur Frage der Entstehung der Kohlen. Beihefte Nr. 13, Berlin: Verlag Chemie.
131. TERZAGHI, K.: Erdbaumechanik, 1925, Leipzig und Wien: Franz Deuticke.

132. THAU, A.: Die Schwelung von Braun- und Steinkohle. 1927, Halle: Verlag W. Knapp.
133. — Die neue Entwicklung der Steinkohlenschwelerei. Glückauf 65 (1929), S. 1442.
134. Treptow: Grundzüge der Bergbaukunde. 1925, Wien: Julius Springer.
135. VIGENER, K.: Braunkohlenbriketterzeugung Mittelddeutschlands und die öffentliche Elektrizitätswirtschaft. Braunkohle 23 (1924/25), S. 905.
136. — Betrachtungen über die wirtschaftlichen Grenzen des Dampfdrucks für die deutsche Braunkohlenbrikettindustrie. Braunkohle 25 (1926), S. 471.
137. — Die Bedeutung der Braunkohle für die deutsche Wirtschaft, ein Weg zur weiteren Steigerung ihres Einflusses. Wärme 49 (1926), S. 783 u. 802.
138. WEISS: Die Trocknung der Kohle. Halle: Verlag W. Knapp.
139. WEISS und HÄRRING: Die Aufbereitung rheinischer Braunkohle zu Staub (nach dem Verfahren der Büttner-Werke A.-G. in Uerdingen a. Rh.) und die Verwendung des Staubes zur Beheizung eines Blockwärmeofens. Braunkohle 20 (1921/22) S. 625.
141. WINKLER, G.: Vergleichende Versuche mit einer Schraubenwendeleiste und einer Siebwendeleiste. Braunkohlenarch. (1932), Heft 37, S. 37.
142. WINKLER-TIETZE: Untersuchungen über die Absiebung von Rohbraunkohlen. Braunkohlenarch. (1932), Heft 36, S. 56.
143. WINTER: Die mikroskopische Untersuchung der Kohle im auffallenden Licht. Braunkohle 23 (1924/25), S. 605.
144. WOERMANN: Grubenbetriebliche Maßnahmen und Absatzplanung für Ruhrfettkohle auf kohlenpetrographischer Grundlage. Glückauf 41 (1935), S. 682 u. 686.
145. ZEUNER, H.: Allgemeine Beschreibung des Braunkohlen- und Großkraftwerkes Böhlen und Mitteilungen über Verwertung von Brüden zu Kesselspeisezwecken. Elektrizitätswirtsch. 27 (1929), S. 523.
146. ZSIGMONDI: Über die Struktur des Gels der Kieselsäure. Theorie der Entwässerung. Z. angew. Chem. 71 (1911), S. 356.

## **F. Abbildungsanhang**

**Trocknung und Entwässerung von Kohle.**

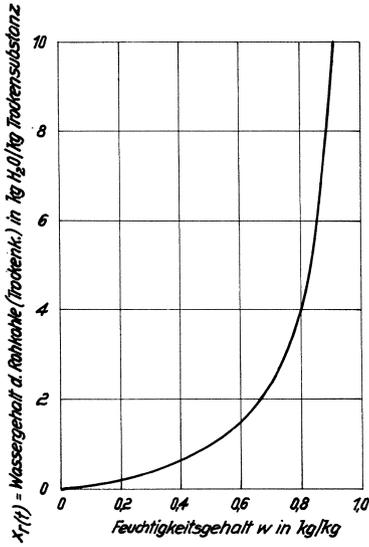


Abb. 1. Wassergehalt der Kohle (kg H<sub>2</sub>O/kg Trockensubstanz) abhängig vom Feuchtigkeitsgehalt w.

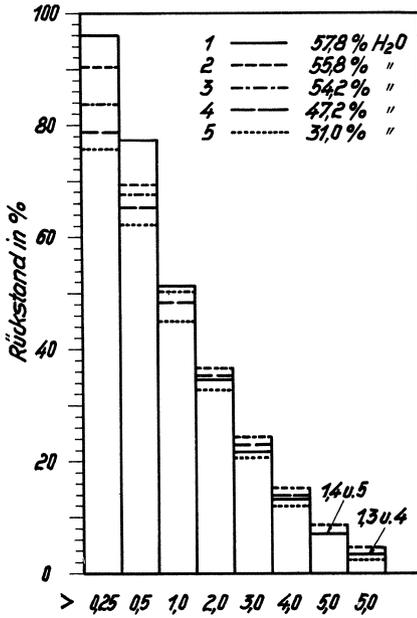


Abb. 3. Einfluß der Feuchtigkeit auf die Vollständigkeit der Ausbiegung.

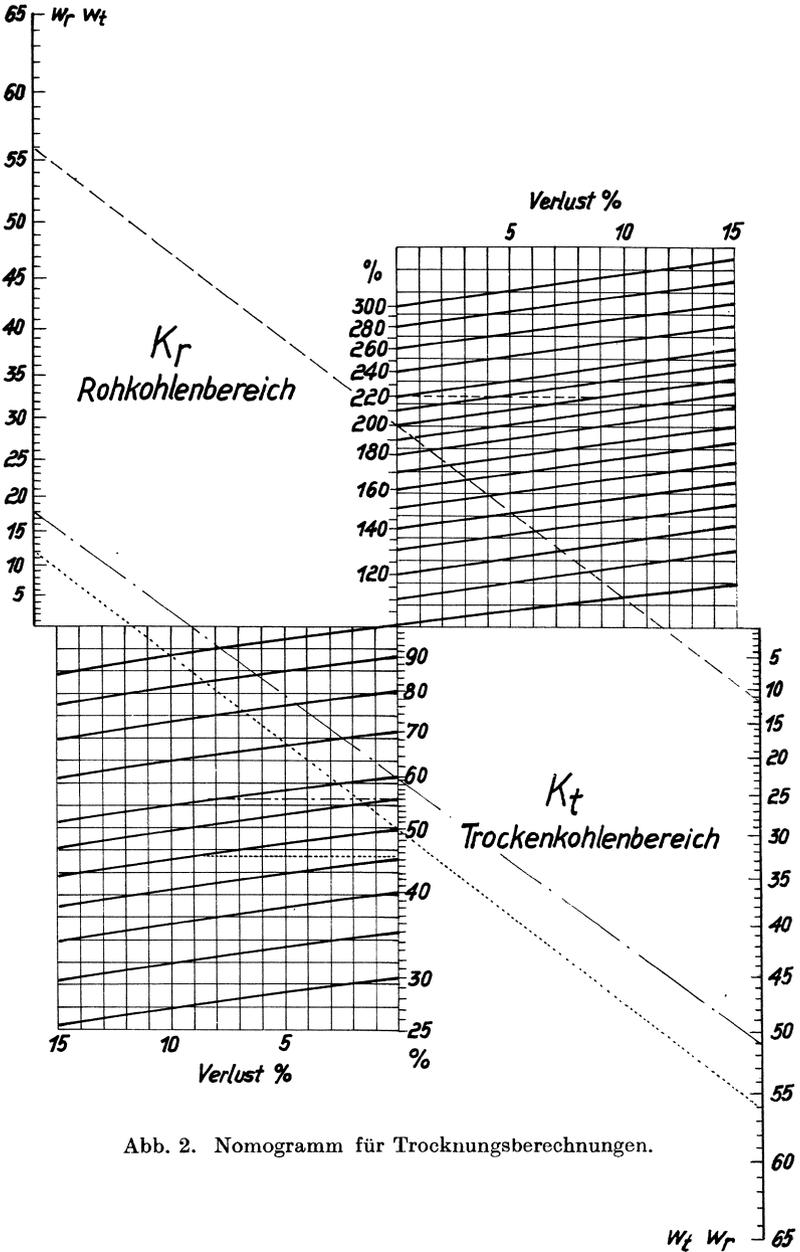


Abb. 2. Nomogramm für Trocknungsberechnungen.

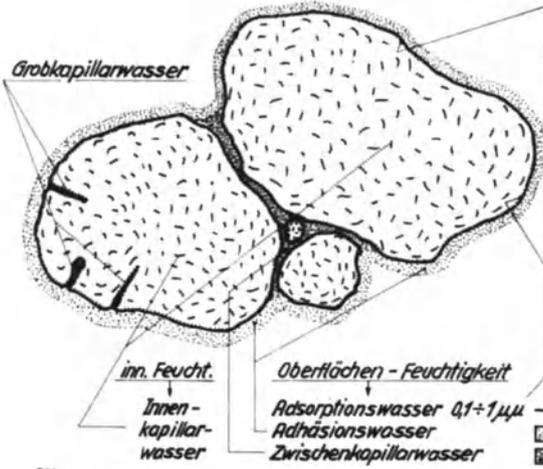


Abb. 4. Wasserbindung im und am Kohlenkorn.

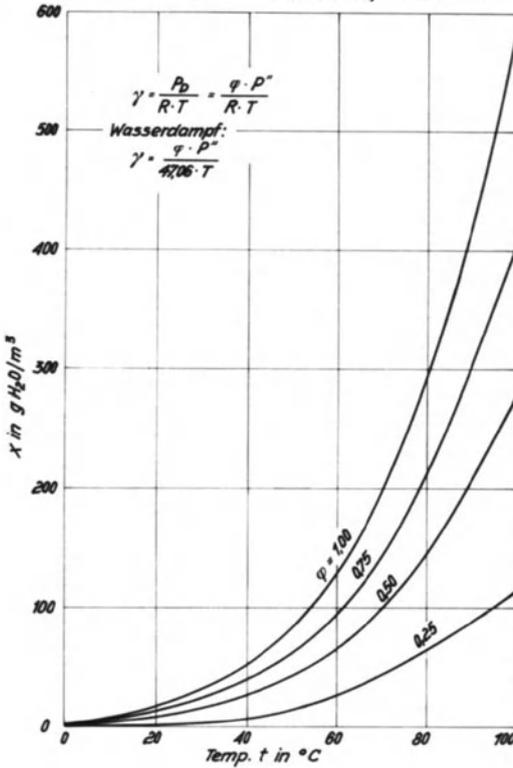


Abb. 5. Abhängigkeit des Wassergehaltes der feuchten Luft von der Temperatur bei  $\varphi = 0,25; 0,5; 0,75; 1,00$ .

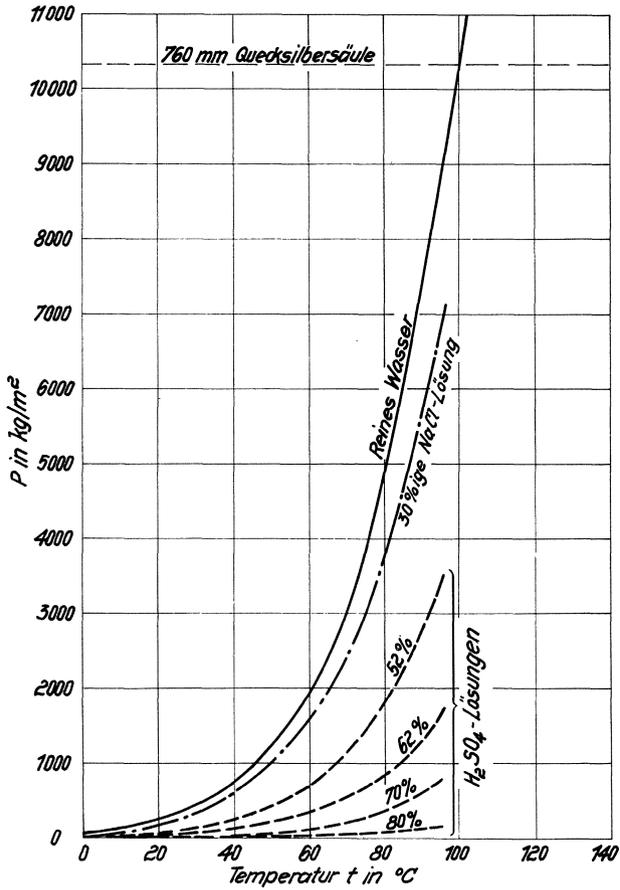


Abb. 6. Dampfdrücke bei verschiedenen Temperaturen für reines Wasser und für Lösungen.

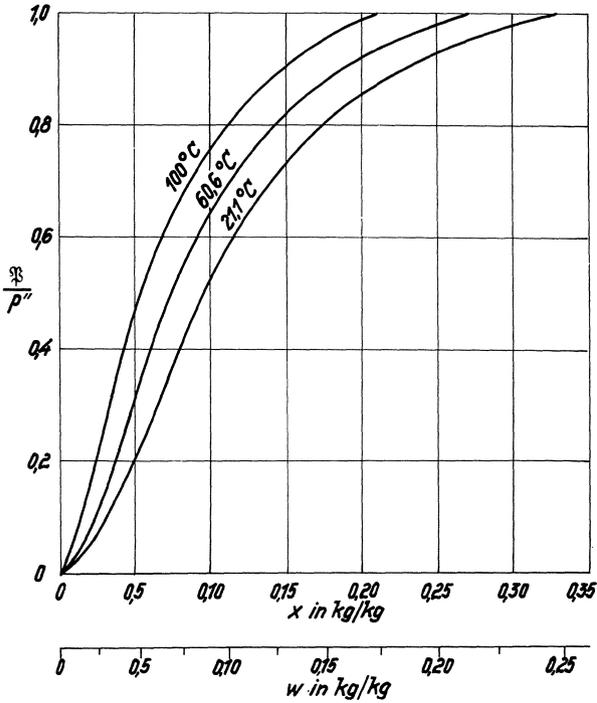


Abb. 7. Dampfdruckisothermen für Holz. (Entnommen aus Hirsch: II. Auflage; Trockentechnik, S. 18.)

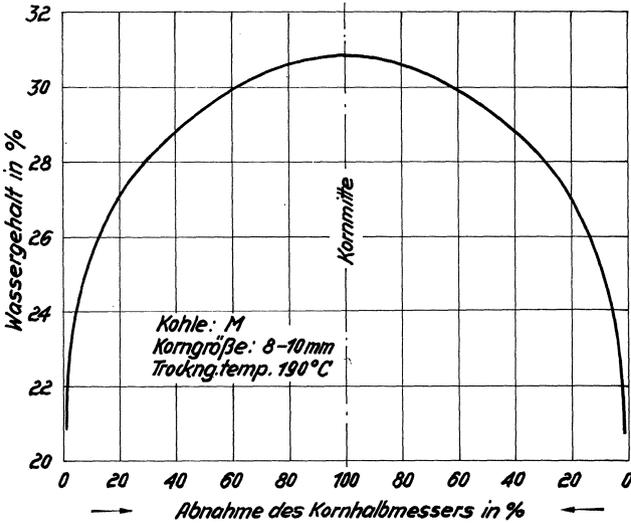


Abb. 9. Feuchtigkeitsverteilung im getrockneten Kohlenkorn.

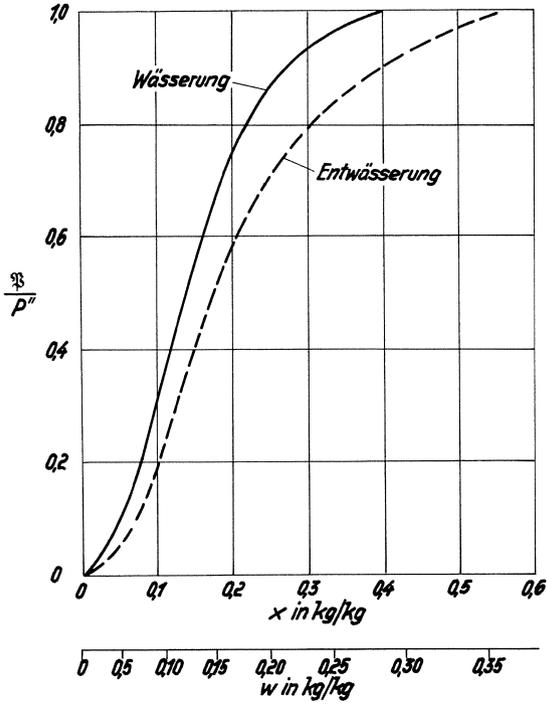


Abb. 8. Dampfdruckisotherme eines Lignits.

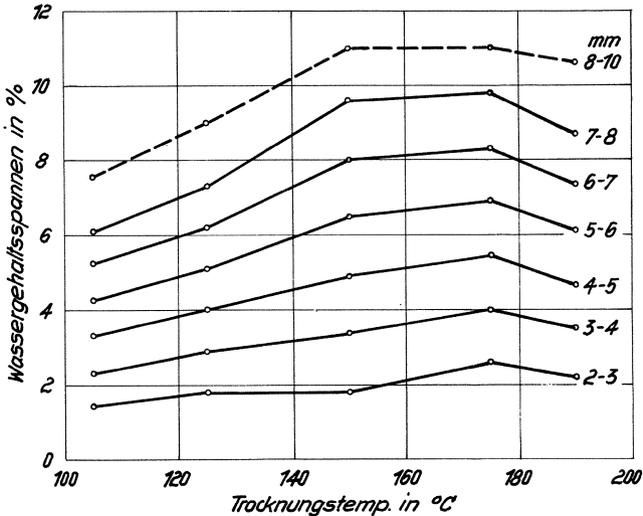


Abb. 10. Wassergehaltsspannen im getrockneten Kohlenkorn bei verschiedenen Trocknungstemperaturen für verschiedene Korngrößen.

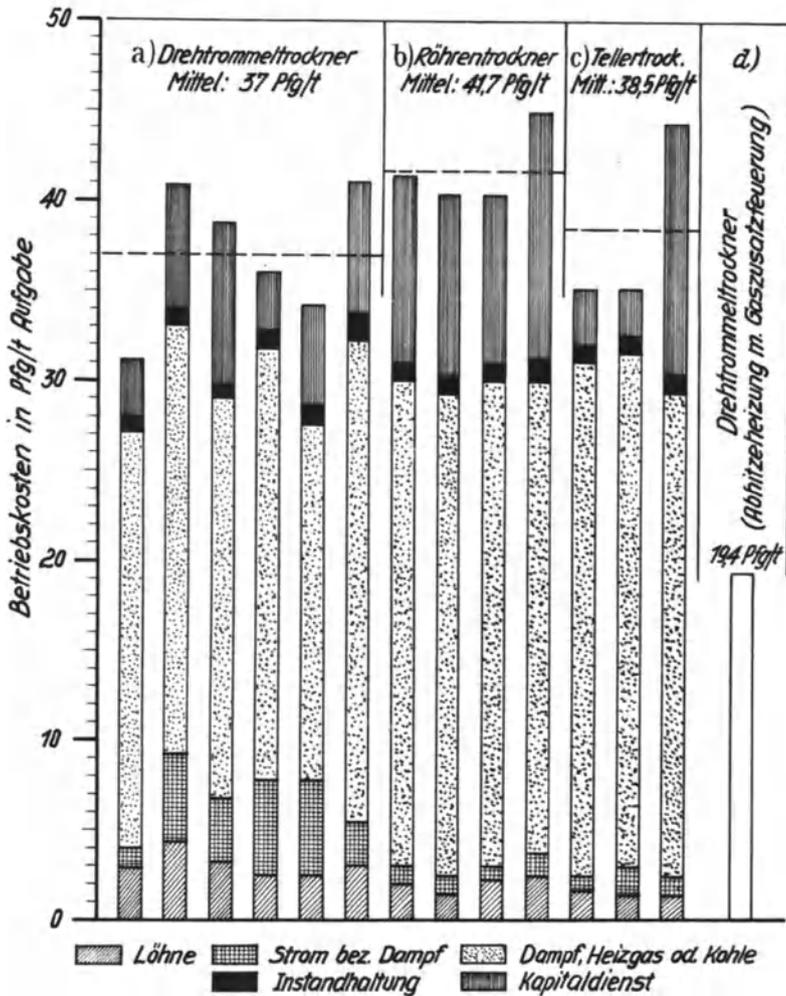


Abb. 11. Kostenermittlung für Trockneranlagen bei einem Feinkohlen-durchsatz von 1000 t/Tag, einem Trockenbereich von 14 auf 8% und einer täglichen Wasserverdampfung von 65,2 t je Apparat.

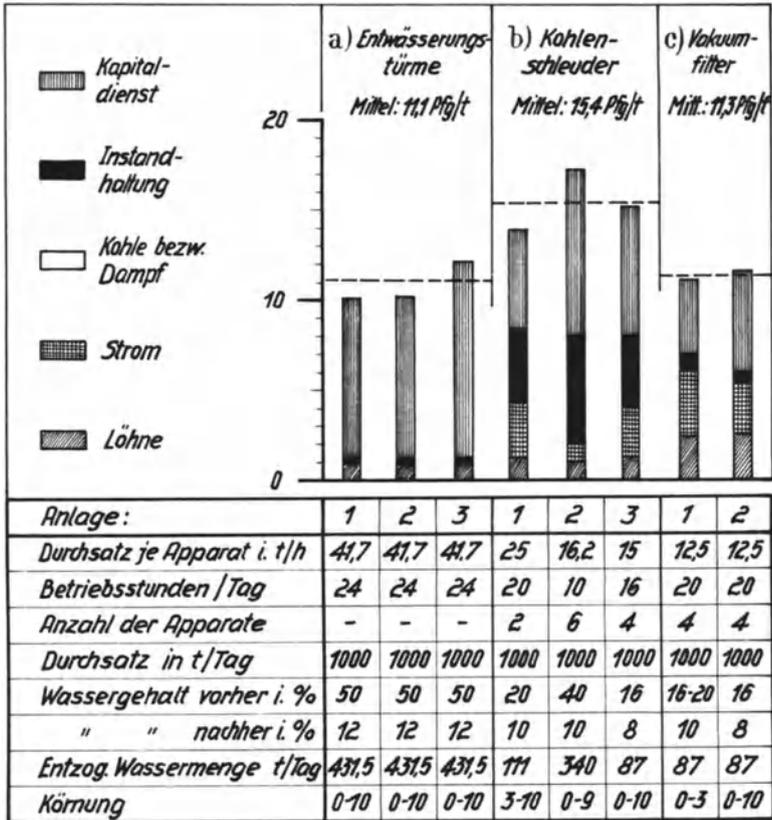
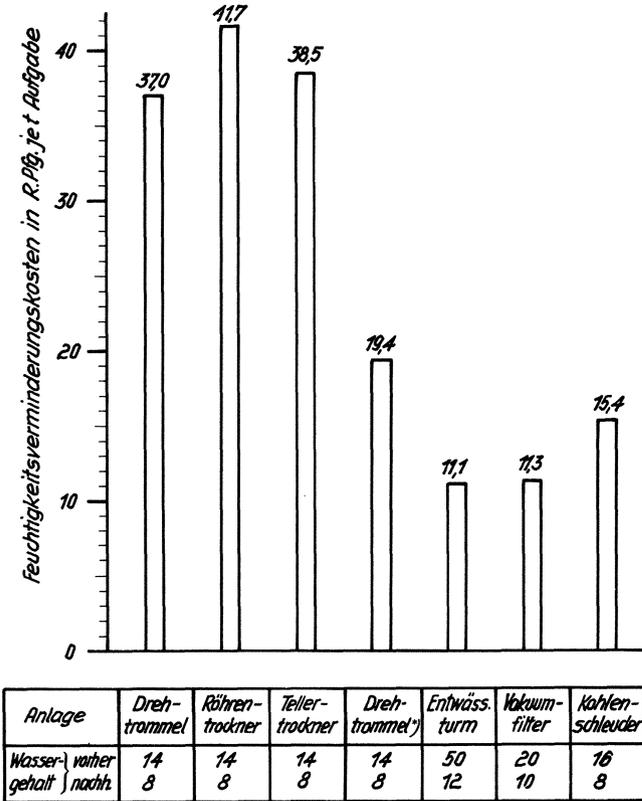


Abb. 12. Kostenermittlung für Entwässerungsanlagen.



\*) mit Abhitzebeheizung und Gaszusatzfeuerung

Abb. 13. Durchschnittliche Kosten für die Entwässerung und Trocknung der Steinkohle.

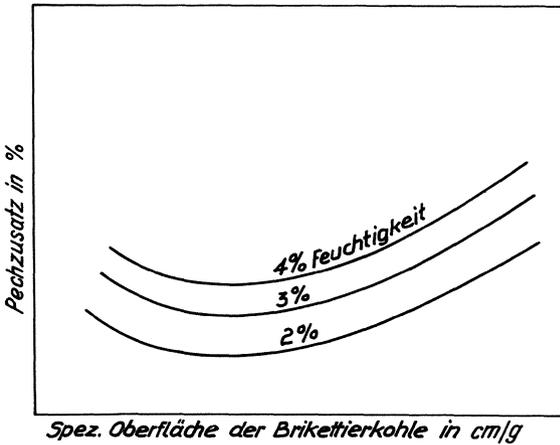


Abb. 14. Charakteristik des Pechzusatzes bei der Steinkohlenbrikettierung, abhängig von Feinheit und Feuchtigkeit der Kohle.

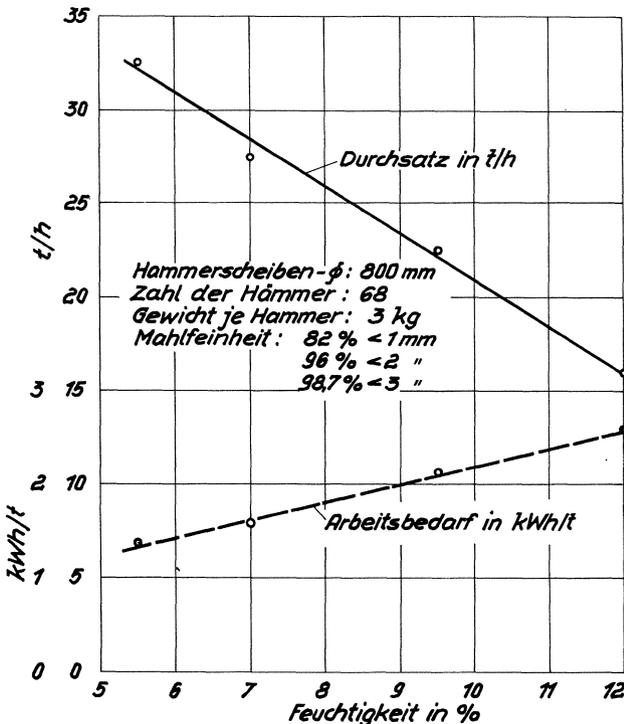


Abb. 15. Feuchtigkeitscharakteristik einer Arbed-Hammer-Mühle für Koks-kohle.

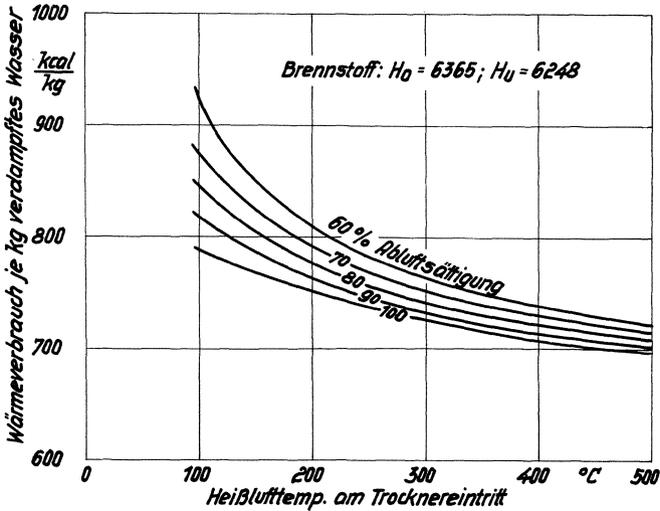


Abb. 16. Wärmeverbrauch des verlustlosen Trockners je kg verdampftes Wasser bezogen auf  $H_0$ .

Aufgabegut 1000 t	Verfahren der Feuchtigkeits- verminderung	Feuchtigkeits- vermindg. von % bis %	entzogene Wasser- menge t/Tag	Kosten je t Durchsatz RM/t Durchsatz	Kosten je t ausgeschied. Wassers RM/t Wasser
Steinkohle	Drehtrommeltr.	14 8	65,2	0,370	5,68
	Röhrentrockner	14 8	65,2	0,417	6,30
	Teiltrockner	14 8	65,2	0,385	5,91
	Drehtrommel mit Abhilfeheizg. u. Gaszusatzfeueg.	14 8	65,2	0,194	2,98
	Entwässerungsturm	50 12	431,5	0,111	0,26
Kartoffeln	Kohlenschleuder	20 10	111	0,154	1,39
	Vakuumdrehtrommel	16 8	87	0,113	1,30
	Walzentrockner	75 12	—	—	13,40
	dt. m. Vorentwässg.	75 12	—	—	6,70
	Stromtrockner	75 12	—	—	11,00
Rübenblätter	Trommeltrockner	75 12	—	—	~9,00
	" "	80 15	—	—	8,00
Difusionschnitzel	" "	80 15	—	—	8,00
Gras u. Luzerne	Bandtrockn. mit Koksfeuerung	78 12	—	—	7,60
Gras u. Luzerne	4 Felder-Darre	75 12	—	—	13,00

Abb. 17. Gesamtkosten in RM/t Durchsatz und in RM/t ausgeschiedenen Wassers für Trocknungs- und Entwässerungsanlagen.