

FREIBERGER FORSCHUNGSHEFTE

A 379 Ingenieurökonomie Bergbau

1965

Ernst-Egon Borngräber

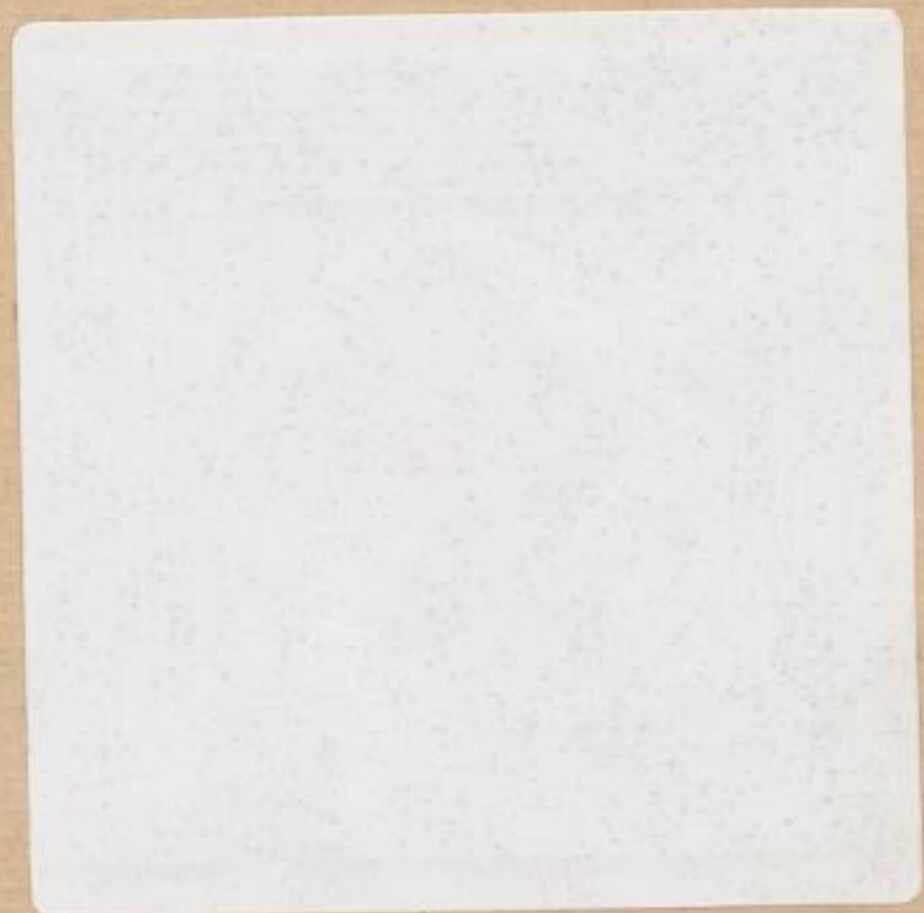
**Der optimale Trocknungsdampfdruck
in Dampfrohrentrocknern bei der Erzeugung
von Briketts und Elektroenergie in einem Betrieb**

FFH
A 379
d



VEB DEUTSCHER VERLAG FÜR GRUNDSTOFFINDUSTRIE

XVI 1142 d



FREIBERGER FORSCHUNGSHEFT

FREIBERGER FOR

Herausgegeben vom Rektor

TU BERGAKADEMIE FREIBERG



XV XVI 1142 . A379D

379

Ingenieurökonomie Bergbau

Der optimale Trocknungsdruck in
Dampföhrentrocknern bei der Erzeugung von
Wärme und Elektroenergie in einem Betrieb

Verlagsgesellschaft Bergbau, Leipzig, 1965



178

KRIBERGERN VORSCHEIDUNGSHILFE

FREIBERGER FORSCHUNGSHEFTE

Herausgegeben vom Rektor der Bergakademie Freiberg

A 379

Ingenieurökonomie Bergbau

Der optimale Trocknungsdampfdruck in Dampfröhrentrocknern bei der Erzeugung von Briketts und Elektroenergie in einem Betrieb

Von

Ernst-Egon Borngräber

Mit 19 Bildern und 3 Tabellen



VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie · Leipzig 1965

FREIBERGER FORSCHUNGSHEFTE

Herausgegeben vom Rektor der Bergakademie Freiberg

A 379

Montanwissenschaftliches Institut



XVI 1142

(A379)
d

Manuskriptannahme: Bergakademie Freiberg
Arbeitsgruppe Publikationen
92 Freiberg
August-Bebel-Straße 5

Eingang des Manuskripts beim Verlag am 20. Februar 1965

„Freiberger Forschungshefte“, Schriftenreihe für alle Gebiete der Montanwissenschaften. Herausgeber: Der Rektor der Bergakademie Freiberg, Prof. Dr.-Ing. habil. Joachim Wrana. — Verlag: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 7031 Leipzig, Karl-Heine-Straße 27 (Fernruf 44441). — Die Freiberger Forschungshefte erscheinen in zwangloser Folge in den Reihen A, B, C und D. Ausführliches Verzeichnis aller lieferbaren Hefte von der Bergakademie Freiberg oder vom VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie. — Vertrieb: In der Deutschen Demokratischen Republik durch den Buchhandel; in der Deutschen Bundesrepublik und in Westberlin durch den Buchhandel (Auslieferung KUNST UND WISSEN, Erich Bieber, Stuttgart 8, Wilhelmstraße 4—6); in Österreich durch den Globus-Buchvertrieb, Wien I, Salzgries 16; im übrigen Ausland durch eine Importbuchhandlung, den Deutschen Buch-Export und -Import, GmbH, 701 Leipzig, Postschließfach 160, oder den Verlag.

Gesamtherstellung: VLN 152-915 134,65 — Printed in Germany — Alle Rechte vorbehalten. — ES 20 F 6/
20 F 1 / 20 D 1 — EVP 12,90 MDN.

(66.210)

Inhalt

1. Einleitung	7
1.1. Aufgabenstellung	7
1.2. Kurzer historischer Abriß der bisher veröffentlichten Arbeiten zur Ermittlung des optimalen Trocknungsdampfdruckes	7
1.3. Schlußfolgerungen aus den bisherigen Arbeiten über die Ermittlung des optimalen Trocknungsdampfdruckes	8
2. Mathematische Herleitung der Funktionen, die die technologischen und ökonomischen Beziehungen widerspiegeln	9
2.1. Einführung	9
2.2. Die Gewinnfunktion	11
2.3. Herleitung der Funktion $A(p)$ der Abschreibungen	11
2.4. Herleitung der Funktion $L(p)$ der Lohnkosten	14
2.5. Herleitung der Funktion $R(p)$ der Reparaturkosten	14
2.6. Herleitung der Funktion $K(p)$ der Rohkohleeinsatzkosten	15
2.7. Die Selbstkosten S' der Brikettfabrik	15
2.8. Herleitung der Funktion $S(p)$ der Selbstkosten	17
2.9. Herleitung der Funktion $E(p)$ der Erlöse	17
2.10. Zusammenfassung	55
2.11. Schlußfolgerungen aus der hergeleiteten Gewinnfunktion für die Veränderung der Abgabepreise	18
3. Ermittlung der Abhängigkeit der Enthalpie vom Trocknungsdampfdruck	19
3.1. Die Enthalpie i_1 bei Turbineneintritt	19
3.2. Die Enthalpie i_{23} bei der 3. Anzapfung	19
3.3. Die Enthalpie i_3 des Trocknerkondensates	20
3.4. Die im Trockner ausgenutzte Enthalpiedifferenz	20
3.5. Die Enthalpien der 1. und 2. Anzapfung	21
3.6. Ermittlung des Dampfeigenverbrauches	21
4. Die spezifische Verdampfungsleistung	25
4.1. Die bisher veröffentlichten Formeln der spezifischen Verdampfungsleistung	25
4.2. Die Notwendigkeit einer neuen Herleitung einer Formel für die spezifische Verdampfungsleistung	27
4.3. Herleitung einer neuen Formel für die spezifische Verdampfungsleistung	28
4.4. Ermittlung des optimalen Füllungsgrades	33
4.5. Die Umformung der Formel (34) für die spezifische Verdampfungsleistung von <i>Baunack</i>	34
4.6. Der Vergleich der neuen Formel für die spezifische Verdampfungsleistung mit der Formel von <i>Baunack</i>	35
4.7. Zusammenfassung	40
5. Aufstellung der Gewinnfunktion	40
5.1. Die Gewinnfunktion basierend auf der neuen Formel für die spezifische Verdampfungsleistung	40
5.2. Die Gewinnfunktion basierend auf der Formel (48) von <i>Baunack</i>	41
5.3. Die Gewinnfunktion bei nicht konstanten Abgabepreisen für die Elektroenergie	42
6. Aufstellung der Gewinnfunktion bei der Verwendung von Trocknern mit engen Rohren	45
6.1. Die technologischen Grundlagen der Verwendung von Trocknern mit engen Rohren und die sich aus den experimentellen und theoretischen Untersuchungen ergebenden ökonomischen Resultate	45

6.2. Aufstellung der Gewinnfunktion bei der Verwendung von Trocknern mit engen Röhren	47
7. Ergebnisse der Berechnung der Gewinnfunktion	48
7.1. Die Durchführung der Rechnungen	48
7.2. Ergebnisse beim Kesseltyp I	52
7.3. Ergebnisse beim Kesseltyp II	54
7.4. Ergebnisse beim Kesseltyp III	54
7.5. Zusammenfassung der Resultate	59
8. Zusammenfassung und Schlußfolgerung	60
9. Anhang: Verzeichnis der verwendeten Symbole und Indizes	63
Literatur	66

9	2.1. Einführung
11	2.2. Die Gewinnfunktion
11	2.3. Herleitung der Funktion $K(x)$ der Absatzfunktion
14	2.4. Herleitung der Funktion $K(x)$ der Lohnfunktion
14	2.5. Herleitung der Funktion $K(x)$ der Reparaturfunktion
15	2.6. Herleitung der Funktion $K(x)$ der Rohstofffunktion
16	2.7. Die Substanten β der Herleitung
17	2.8. Herleitung der Funktion $K(x)$ der Kostenfunktion
17	2.9. Herleitung der Funktion $K(x)$ der Erlösfunktion
18	2.10. Zusammenfassung
18	2.11. Behauptungen aus der hergeleiteten Gewinnfunktion für die Veränderung der Absatzmenge
19	3. Bestimmung der Abhängigkeit der Erlösfunktion von Trocknungseinstellungen
19	3.1. Die Erlösfunktion E bei Trocknungseinstellung
19	3.2. Die Erlösfunktion E bei der 2. Ansatzung
20	3.3. Die Erlösfunktion E bei der Trocknungseinstellung
20	3.4. Die Erlösfunktion E bei der Trocknungseinstellung
21	3.5. Die Erlösfunktion E bei der 1. und 2. Ansatzung
21	3.6. Herleitung der Erlösfunktion E bei der Trocknungseinstellung
22	4. Die spezifische Verdampfungseinstellung
22	4.1. Die bisher veröffentlichten Formeln der spezifischen Verdampfungseinstellung
22	4.2. Die Notwendigkeit einer neuen Herleitung einer Formel für die spezifische Verdampfungseinstellung
23	4.3. Herleitung einer neuen Formel für die spezifische Verdampfungseinstellung
23	4.4. Ermittlung des optimalen Formelwertes
24	4.5. Die Umformung der Formel (34) für die spezifische Verdampfungseinstellung von Formel (35)
24	4.6. Der Vergleich der neuen Formel für die spezifische Verdampfungseinstellung mit der Formel von Kramm
25	4.7. Zusammenfassung
26	5. Aufstellung der Gewinnfunktion
26	5.1. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
27	5.2. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
27	5.3. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
28	5.4. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
28	5.5. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
29	5.6. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
29	5.7. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
30	5.8. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
30	5.9. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
31	5.10. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
31	5.11. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
32	5.12. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
32	5.13. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
33	5.14. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
33	5.15. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
34	5.16. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
34	5.17. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
35	5.18. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
35	5.19. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
36	5.20. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
36	5.21. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
37	5.22. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
37	5.23. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
38	5.24. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
38	5.25. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
39	5.26. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
39	5.27. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
40	5.28. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
40	5.29. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
41	5.30. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
41	5.31. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
42	5.32. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
42	5.33. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
43	5.34. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
43	5.35. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
44	5.36. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
44	5.37. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
45	5.38. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
45	5.39. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
46	5.40. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
46	5.41. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
47	5.42. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
47	5.43. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
48	5.44. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
48	5.45. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
49	5.46. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
49	5.47. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
50	5.48. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
50	5.49. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
51	5.50. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
51	5.51. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
52	5.52. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
52	5.53. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
53	5.54. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
53	5.55. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
54	5.56. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
54	5.57. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
55	5.58. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
55	5.59. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
56	5.60. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
56	5.61. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
57	5.62. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
57	5.63. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
58	5.64. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
58	5.65. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
59	5.66. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
59	5.67. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
60	5.68. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
60	5.69. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
61	5.70. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
61	5.71. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
62	5.72. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
62	5.73. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
63	5.74. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
63	5.75. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
64	5.76. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
64	5.77. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
65	5.78. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
65	5.79. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
66	5.80. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
66	5.81. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
67	5.82. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
67	5.83. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
68	5.84. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
68	5.85. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
69	5.86. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
69	5.87. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
70	5.88. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
70	5.89. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
71	5.90. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
71	5.91. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
72	5.92. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
72	5.93. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
73	5.94. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
73	5.95. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
74	5.96. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
74	5.97. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
75	5.98. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
75	5.99. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung
76	5.100. Die Gewinnfunktion $K(x)$ bei der Trocknungseinstellung

Elektronen. Ein zu diesem Zweck notwendiges Hilfsmittel ist die elektrische Energie, die in einer Form, die für die Trocknung und den Transport geeignet ist, in die Trocknung überführt werden muß. Die elektrische Energie wird durch die Erzeugung von Dampf in einem Dampfkessel und die anschließende Erzeugung von Strom in einer Turbinenmaschine erzeugt. Die elektrische Energie wird durch die Erzeugung von Dampf in einem Dampfkessel und die anschließende Erzeugung von Strom in einer Turbinenmaschine erzeugt.

1. Einleitung

1.1. Aufgabenstellung

Es ist der optimale Trocknungsdampfdruck in Dampfrohrentrocknern bei der Erzeugung von Briketts und Elektroenergie in einem Betrieb zu ermitteln. Das Optimalitätskriterium ist hierbei der betriebliche Gewinn.

Die Festlegung des betrieblichen Gewinns als Optimalitätskriterium findet seine Begründung durch die Bedeutung, die dem Gewinn in der sozialistischen Wirtschaft zukommt. Auf der Wirtschaftskonferenz des Zentralkomitees der Sozialistischen Einheitspartei Deutschlands und des Ministerrates der Deutschen Demokratischen Republik am 24. und 25. Juni 1963 führte der Erste Sekretär des ZK der SED und Vorsitzende des Staatsrates der DDR, Walter Ulbricht, hierzu aus [16]:

„Auf der Grundlage des gesellschaftlichen Eigentums an den Produktionsmitteln und der planmäßigen Tätigkeit der Betriebe widerspiegelt der Gewinn die gemeinsamen Anstrengungen und den Erfolg der wirtschaftlichen Tätigkeit sozialistischer Produzenten. In diesem Sinne kommt es darauf an, die prinzipielle Bedeutung des Gewinns im Sozialismus voll zur Geltung zu bringen.

Bei dem hohen Entwicklungsstand der Produktivkräfte in der Deutschen Demokratischen Republik und den damit verbundenen vielfältigen ökonomischen Beziehungen der sozialistischen Warenproduktion kann der gesellschaftliche Nutzen in der Planung und Leitung der Volkswirtschaft gar nicht anders als durch den Gewinn erfaßt werden. Dabei ist der Gewinn nicht nur eine Rechengröße im Zahlenwerk der Buchhaltung. Auf der Grundlage der sozialistischen Produktionsverhältnisse hat der Gewinn als objektiver Maßstab des Nutzeffektes der gesellschaftlichen Arbeit seine Bedeutung.“

Die Verwendung des betrieblichen Gewinns als Optimalitätskriterium führt im allgemeinen nicht zu den gleichen Ergebnissen wie eine Optimierung nach dem volkswirtschaftlichen Nutzen. Der volkswirtschaftliche Nutzen als Optimalitätskriterium kann streng genommen nur bei einem Modell der gesamten Volkswirtschaft angewendet werden. Die Ermittlung des optimalen Gewinns kann als eine erste Näherung für den maximalen volkswirtschaftlichen Nutzen angesehen werden.

1.2. Kurzer historischer Abriss der bisher veröffentlichten Arbeiten zur Ermittlung des optimalen Trocknungsdampfdruckes

Das Problem der Ermittlung des optimalen Trocknungsdampfdruckes trat im dritten Jahrzehnt dieses Jahrhunderts zum ersten Male auf. Die Entwicklung von Dampfkesseln mit hohen Dampfdrücken und größerer Leistung und die Herstellung von Turbinen mit günstigerem Wirkungsgrad führt zur Erzeugung eines Überschusses an

Elektroenergie. Bis zu dieser Zeit waren die Brikettfabriken nur mit kleinen Kraftwerken gekoppelt, die in erster Linie Dampf für den Pressenantrieb und für die Dampftrocknung und nur eine geringe Menge Elektroenergie erzeugten. Die Elektroenergie deckte gerade den Bedarf der Brikettfabrik und eventuell noch den eines Tagebaues. Mit der Entwicklung von Dampfkesseln größerer Leistung ergab sich die Frage: soll man bei der gleichen Brikettproduktion die Elektroenergieerzeugung durch Herabsetzung des Trocknungsdampfdruckes und Vergrößerung der Trocknerheizfläche erhöhen oder soll man bei der gleichen Trocknerheizfläche durch Erhöhung des Trocknungsdampfdruckes und Vergrößerung der Leistung des Preß- und Naßdienstes die Brikettproduktion erhöhen und die Elektroenergieerzeugung verringern? Zwischen diesen beiden Extremen gibt es natürlich sehr viele – mathematisch betrachtet sogar unendlich viele – Zwischenlösungen. Hierbei wird entsprechend der Aufgabenstellung die Variation des Trocknungsdruckes bei konstanter Elektroenergieerzeugung, d. h. bei einer variablen zusätzlichen Elektroenergieerzeugung im Kondensationskraftwerk nicht betrachtet.

In den Arbeiten, die in der Zeit von 1925 bis 1930 zu dem Thema „Optimaler Trocknungsdampfdruck“ erschienen sind, ist bereits jeweils eine Normierung vorgenommen worden. *Vigener* [17] und [18] legte für seine Untersuchungen 10 t Rohbraunkohle als Normierung zugrunde. *Schöne* [14] führte seine Betrachtungen für 1 t Briketts durch, die in einer Brikettfabrik mit der Tagesleistung von 1500 t erzeugt wird. In diesen Arbeiten wurde der betriebliche Gewinn als Optimalitätskriterium zugrunde gelegt. Durch die Darlegung in dem Buche von *Schöne* erreicht die Diskussion in der Vorkriegszeit ihren Abschluß.

Nach dem zweiten Weltkrieg wird das Thema „Optimaler Trocknungsdampfdruck“ zuerst von *Hofmann* [4] und [5] behandelt. *Hofmann* führt auf Grund volkswirtschaftlicher Überlegungen die maximale Brikettproduktion in den vorhandenen Anlagen als Optimalitätskriterium ein. Die Vorträge von *Schäper* [13] und *Brüche* [2] auf dem 6. Brikettiertechnischen Kolloquium am 3. und 4. November 1960 in Freiberg waren bisher die letzten Beiträge zu diesem Thema. *Schäper* und *Brüche* legen ihren Berechnungen eine Normierung von 300 t Trockenkohleerzeugung und 306 t Wasserverdampfung/h zugrunde.

1.3. **Schlußfolgerungen aus den bisherigen Arbeiten über die Ermittlung des optimalen Trocknungsdampfdruckes**

Bei allen Arbeiten wurde der optimale Trocknungsdampfdruck durch Rechnungen ermittelt. Da die Größe des betrieblichen Gewinns von einer großen Zahl von Einflußgrößen und ein beträchtlicher Teil davon vom Trocknungsdampfdruck abhängt, muß für jede Einflußgröße eine Annahme als Voraussetzung für die Rechnungen gemacht werden. Unterstellt man, daß die Annahmen zur Zeit der Berechnungen richtig sind, so kann doch aus keiner der o. g. Arbeiten erkannt werden, ob die Schlußfolgerungen aus den Rechnungen noch zutreffen, wenn sich eine oder mehrere Einflußgrößen verändern. In der gegenwärtigen Zeit muß aber infolge des technischen Fortschritts und der gesellschaftlichen Entwicklung ständig mit einer Veränderung der Einflußgrößen gerechnet werden. Daher kann in der vorliegenden Untersuchung nicht der gleiche

Weg wie in den angeführten Arbeiten beschritten werden. Aus dem gleichen Grunde wird auch auf jede Diskussion der in diesen Arbeiten benutzten Zahlenwerte verzichtet. Für die vorliegende Untersuchung wird in Übereinstimmung mit dem größten Teil der o. a. Veröffentlichungen der betriebliche Gewinn als Optimalitätskriterium voraussetzungsgemäß zugrunde gelegt.

Der betriebliche Gewinn wird als Funktion des Trocknungsdampfdruckes und der anderen ihn beeinflussenden Größen in Form einer Funktion dargestellt. Da diese Funktion für einen Rechenautomaten programmiert werden kann, ist es möglich, bei jeder Änderung einer Einflußgröße den neuen optimalen Trocknungsdampfdruck durch entsprechende Tabellierung zu ermitteln. Diese Darstellung des Problems kann als mathematische Modellierung und die Gewinnfunktion selbst als Modell angesehen werden. In dem Modell wird in abstrakter Form der reale, in der Brikettfabrik ablaufende Prozeß mit seinen ökonomischen Verknüpfungen dargestellt.

Die aufzustellende Gewinnfunktion verliert erst dann ihre Aussagekraft, wenn in der Brikettfabrik ein grundsätzlich anderer technologischer Prozeß (etwa die Trocknung ohne Röhrentrockner) eingeführt wird. Da bisher keine Anzeichen für eine solche Änderung vorhanden sind, kann angenommen werden, daß die Funktion auch den künftigen Bedürfnissen entspricht. Die zukünftige eventuelle Bestückung von Röhrentrocknern mit engen Rohren wird in der Arbeit bereits berücksichtigt.

2. Mathematische Herleitung der Funktionen, die die technologischen und ökonomischen Beziehungen widerspiegeln

2.1. Einführung

Die Ermittlung des Optimums eines realen Prozesses kann prinzipiell auf zwei verschiedenen Wegen erfolgen. Der erste Weg besteht darin, alle denkbaren oder vernünftig erscheinenden Zustände des Prozesses eintreten zu lassen und diese Zustände miteinander zu vergleichen. Dieser Weg wird bei fast allen Optimierungen nicht möglich sein. Bereits ein Prozeß, der 6 Veränderliche enthält, die einzeln je 10 verschiedene Zustände annehmen können, hätte $6^{10} = 60466176$ Zustände. Es wird im allgemeinen schon aus Zeitgründen nicht möglich sein, alle diese Zustände real einzustellen. Zum anderen würde die Ermittlung des Optimums mit einem großen Aufwand erfolgen und nicht durch den Nutzen, den die Kenntnis des Optimums erbringt, aufgewogen werden können.

Bei solchen Prozessen, die nicht hinreichend erforscht sind, wird es allerdings unumgänglich sein, eine Reihe von realen Zuständen einzustellen und die bei diesen Zuständen in Form von Meßwerten erhaltene Information mit Methoden der mathematischen Statistik auszuwerten. Hierbei ist es mit dem vor einigen Jahren in Amerika entwickelten sog. Box-Wilson-Verfahren [7] und [15] möglich, den Bereich anzugeben, in dem das Optimum liegt.

Der zweite Weg besteht darin, den realen Prozeß mit Hilfe eines mathematischen Formalismus in abstrakter Form widerzuspiegeln und im Rahmen einer solchen Darstellung das Optimum zu suchen. Der erste Teil dieses Weges, der die Widerspiegelung

in abstrakter Form beinhaltet, wird in der experimentellen Kybernetik als Modellierung bezeichnet. Die Modellierung ist hierbei eine notwendige Voraussetzung für die Ermittlung des Optimums. Das Aufsuchen des Optimums selbst kann dann durch schon bekannte Methoden (in einfachen Fällen z. B. durch die Methoden der Differentialrechnung) erfolgen oder zu einem neuen Weg führen, der eventuell durch Fixierung eines Algorithmus eine ganze Klasse ähnlicher Probleme löst.

Die Optimierung muß immer nach einem Merkmal erfolgen. Erfolgt die Optimierung eines Prozesses gleichzeitig nach mehreren Merkmalen, so muß für die einzelnen Merkmale eine Bewertung gegeben sein. Ein realer Prozeß kann nach mehreren Merkmalen einzeln optimiert werden. Dabei kann das Optimum nach dem einen Merkmal von dem Optimum nach dem anderen Merkmal wesentlich verschieden sein. So kann bei der vorliegenden Optimierungsaufgabe das eine Merkmal der minimale Arbeitskräftebedarf und das andere die minimalen Investitionskosten (bei Errichtung einer neuen Anlage) usw. sein. Je nach Wahl des zu optimierenden Merkmals wird die Lage des Optimums möglicherweise verschieden sein. Während das Optimum bzw. der Extremwert bei nichtmonotonen, differenzierbaren Funktionen einer unabhängigen Veränderlichen ohne Beschränkung des Definitionsbereiches mit den Methoden der Differentialrechnung ermittelt wird, kann man das Optimum bei monotonen Funktionen nicht auf diesem Wege bestimmen. Für die Klasse der monotonen Funktionen gilt der Satz von *Weierstraß*, wonach eine monotone Funktion ihre Extremwerte stets auf dem Rande des Bereiches annimmt. Wird der Lösungsbereich bei einer nichtmonotonen, differenzierbaren Funktion durch Zusatzbedingungen begrenzt – das ist bei einem realen Prozeß immer der Fall – so kann man keine Voraussage treffen, ob das Optimum im Inneren oder auf dem Rande des Bereiches liegt. Die Figuren 1 und 2 im Bild 1 mögen diesen Sachverhalt veranschaulichen. Die in der Figur 1 dargestellte Funktion heißt konkav von unten und die in Figur 2 dargestellte konvex von unten. Soll z. B. das Maximum ermittelt werden, so liegt das Maximum im ersten Fall (Figur 1)

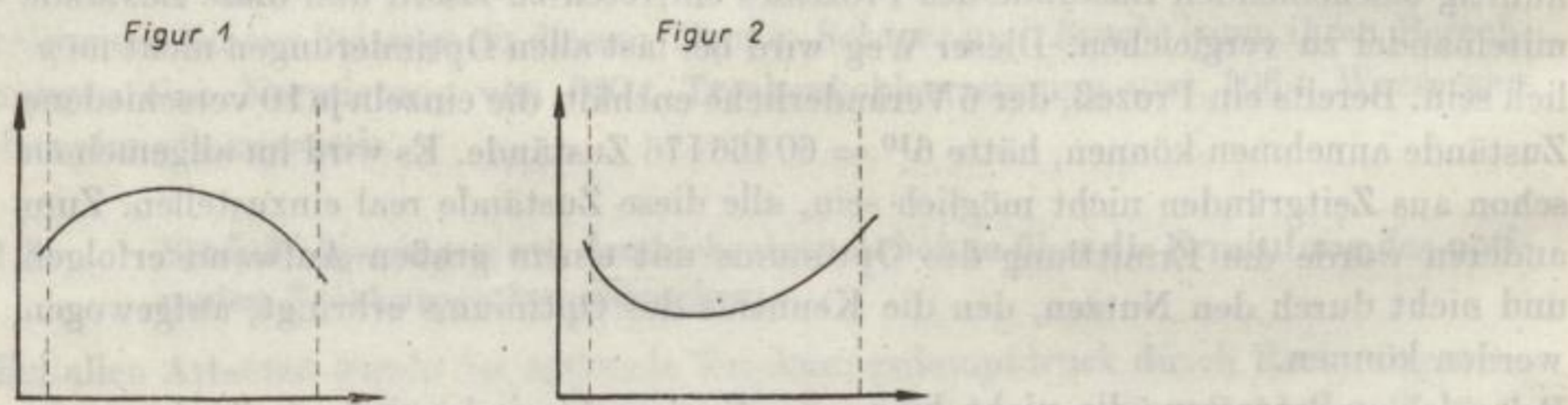


Bild 1

im Inneren des Bereiches und im zweiten Fall (Figur 2) auf dem Rand des Bereiches. Es ist daher sehr vorteilhaft zu wissen, ob eine Funktion in dem betrachteten Bereich konkav oder konvex von unten ist. Leider ist die Feststellung der Konkavität oder Konvexität selten einfacher als das Aufsuchen des Optimums.

Es muß hier noch bemerkt werden, daß die mathematische Modellierung auch in Form von Matrizen oder in anderen Formen erfolgen kann.

2.2. Die Gewinnfunktion

Es ist der Trocknungsdampfdruck p zu ermitteln, bei dem der Gewinn ein Maximum wird. Es liegt hier die Optimierung eines Prozesses mit einer unabhängigen Veränderlichen und einer Anzahl von Parametern vor. In diesem und den nachfolgenden Kapiteln soll die den Prozeß widerspiegelnde Funktion abgeleitet und danach das Optimum bestimmt werden. Wir bezeichnen die vom Trocknungsdampfdruck abhängige Gewinnfunktion mit $G(p)$. Die Gewinnfunktion setzt sich additiv aus der Erlösfunktion $E(p)$ und der Selbstkostenfunktion $S(p)$ zusammen:

$$G(p) = E(p) - S(p) \quad (1)$$

Die Erlösfunktion und die Funktion der Selbstkosten setzen sich ihrerseits aus einer Reihe von Summanden zusammen. Für die Erlösfunktion gilt

$$E(p) = E_S(p) + E_{Br} \quad (2)$$

wobei mit $E_S(p)$ der Erlös durch den Verkauf der Elektroenergie und mit E_{Br} der Erlös durch den Verkauf der Briketts bezeichnet wird.

Die Funktion der Selbstkosten genügt der Beziehung

$$S(p) = A(p) + L(p) + R(p) + K(p) + S' \quad (3)$$

In der Gleichung (3) werden mit $A(p)$ die Abschreibungen, mit $L(p)$ die Lohnkosten, mit $R(p)$ die Reparaturkosten und mit $K(p)$ die Rohkohleeinsatzkosten bezeichnet. S' sind konstante, nicht vom Trocknungsdampfdruck abhängige Kosten. Die Gewinnfunktion und damit alle ihre Summanden werden auf 1 t Briketts/h bezogen. Man spricht hierbei von einer Normierung.

In den folgenden Kapiteln werden die einzelnen hier angegebenen Funktionen hergeleitet.

2.3. Herleitung der Funktion $A(p)$ der Abschreibungen

Um 1 t Brikett zu erhalten, müssen

$$W_{dBr} = \frac{w_r - w_t}{100 - w_r} \left[\frac{t \text{ Wasser}}{t \text{ Brikett}} \right] \quad (4)$$

t Wasser verdampft werden.

Die Wärmemenge, die notwendig ist, um eine t Wasser zu verdampfen, ist durch folgende Beziehungen gegeben:

$$Q = q \cdot 10^3 \left[\frac{\text{kcal}}{t \text{ Wasser}} \right] \quad (5)$$

Hierbei ist q der Wärmehaufwand in kcal, der notwendig ist, um 1 kg Wasser im Röhrentrockner unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades des Trockners einschließlich der Dampfzuleitung zu verdampfen. Die Nachverdampfung wird hierbei dem Trockner zugerechnet.

Die Wärmemenge, die benötigt wird, um 1 t Briketts im Trocknungsprozeß zu erhalten, ist nach den Beziehungen (4) und (5) durch die Gleichung

$$Q'_{Br} = q \cdot W_{dBr} \cdot 10^3 \left[\frac{\text{kcal}}{t \text{ Brikett}} \right] \quad (6)$$

gegeben. Berücksichtigt man den Verlustfaktor v (Staubverluste), so gibt die nachfolgende Beziehung die Wärmemenge an, die für 1 t Briketts im Trocknungsprozeß benötigt wird.

$$Q_{\text{Br}} = q W_{d\text{Br}} \frac{1}{1-v} \left[\frac{\text{kcal}}{\text{t Brikett}} \right] \quad (7)$$

Es wird angenommen, daß 1 t Dampf ein ausnutzbares Wärmegefälle von $(i_1 - i_3) \cdot 10^3$ kcal hat. i_1 sei hierbei die Enthalpie des Dampfes bei Turbineneintritt und i_3 die des Trocknerkondensates. Die ausgenutzte Wärmemenge des Dampfes erfährt im allgemeinen im Gegendruckkraftwerk folgende Aufteilung:

$$(i_1 - i_{21}) \quad (1 - e_{D1})$$

$$(i_{21} - i_{22}) \quad (1 - e_{D1} - e_{D21})$$

$$(i_{22} - i_{23}) \quad (1 - e_{D1} - e_{D21} - e_{D22})$$

$$(i_{23} - i_3) \quad (1 - e_{D1} - e_{D21} - e_{D22} - e_{D23})$$

$$(i_1 - i_3') \quad e_{D1}$$

$$(i_{21} - i_3') \quad e_{D21}$$

$$(i_{22} - i_3') \quad e_{D22}$$

$$(i_{23} - i_3') \quad e_{D23}$$

Mit i_{21} , i_{22} und i_{23} wird die Enthalpie des Dampfes bei der 1., 2. und 3. Anzapfung bezeichnet. e_D gibt den Eigenverbrauch in Teilen von 1, bezogen auf die Dampfmenge, an, d. h. e_{D1} ist der Anteil des Eigenbedarfes an Frischdampf und e_{D21} , e_{D22} , e_{D23} sind die Anteile des Eigenbedarfes nach der ersten, zweiten und dritten Anzapfung.

Die ersten drei Glieder geben, bezogen auf eine Einheit – bei uns 1 t Dampf – die Wärmemenge an, die in Elektroenergie umgewandelt wird, der vierte Summand gibt die Wärmemenge an, die im Trockner ausgenutzt wird. Die restlichen vier Summanden stellen den Eigenverbrauch dar. i_3 ist die Enthalpie des Trocknerkondensates bei Trocknungsdampfdruck. i_3' ist die Enthalpie des Speisewassers.

Die Größen i_{21} , i_{22} , e_{D21} , e_{D22} und e_{D23} kann man als Konstanten oder als Funktionen vom Trocknungsdampfdruck ansehen. Bei einer bestehenden Anlage wird man vielleicht eher zur ersten Auffassung und bei einer neu zu errichtenden Anlage zur zweiten Auffassung neigen. Bei einer neu zu errichtenden Anlage kann man die oben angegebenen Größen in bezug auf den Trocknungsdampfdruck wählen. Betrachtet man die Größen als Konstanten, so kann durch Veränderung dieser Größen in den interessierenden Bereichen eine mögliche Einflußnahme auf den optimalen Trocknungsdampfdruck angegeben oder zumindestens abgeschätzt werden. Da die zweite Auffassung die allgemeinere ist, wird sie bei der weiteren Ableitung zugrunde gelegt.

Die Ermittlung der oben angegebenen Größen als Funktionen des Trocknungsdampfdruckes p wird im Abschnitt 4. erfolgen.

Bei modernen Anlagen wird ein Teil des Dampfes in Kondensationsturbinen bzw. Kondensationsentnahmeturbinen in Elektroenergie umgewandelt. Dieser Teil ist bei den derzeitig projektierten und gebauten Kraftwerken größer, als das für die Steuerung

des Gesamtbetriebes notwendig ist. Man könnte daher diesen Teil des Kraftwerkes aus den Betrachtungen ausschließen. Das aber würde gegen das Prinzip verstoßen, die Gesamtanlage als eine Einheit zu betrachten. Die oben angegebene Aufteilung kann sehr leicht auf den Fall eines Kondensationsteiles erweitert werden. Bei Kondensationsentnahmemaschinen würde das vierte Glied folgende Aufteilung erfahren:

$$(i_{23} - i_3^*) (1 - e_{D1} - e_{D21} - e_{D22} - e_{D23}) \beta$$

$$(i_{23} - i_3) (1 - e_{D1} - e_{D21} - e_{D22} - e_{D23}) (1 - \beta)$$

β ist der auf die Dampfmenge bezogene Anteil, der in den Kondensationsentnahmemaschinen von der letzten Anzapfung bis zur Kondensation zur Umwandlung in Elektroenergie ausgenutzt wird. Das zweite Glied gibt den im Trockner ausgenutzten Anteil der Wärmemenge an.

Wir legen der weiteren Ableitung den allgemeineren Fall zugrunde. Die einzelnen Formeln gelten bei $\beta = 0$ für den speziellen Fall.

Um die für 1 t Briketts notwendige Rohfeinkohlenmenge zu trocknen, werden

$$a_D(p) = \frac{1}{1-v} q W_{dBr} \frac{1}{(i_{23} - i_3) (1 - e_{D1} - e_{D21} - e_{D22} - e_{D23}) (1 - \beta)} \left[\frac{\text{t Dampf}}{\text{t Brik.}} \right] \quad (8)$$

t Dampf benötigt.

1 t Dampf liefert

$$b_S(p) = \left\{ [(i_1 - i_{21}) (1 - e_{D1}) + (i_{21} - i_{22}) (1 - e_{D1} - e_{D21}) + (i_{22} - i_{23}) (1 - e_{D1} - e_{D21} - e_{D22})] \eta_{Ag} + (i_{23} - i_3^*) (1 - e_{D1} - e_{D21} - e_{D22} - e_{D23}) \beta \eta'_{Ag} \right\} g \cdot 10^3 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{t Dampf}} \right] \quad (9)$$

kWh Elektroenergie. $g = 0,001\,162\,79$ ist der Umrechnungsfaktor von kcal auf kWh und η_{Ag} das Produkt des mechanischen η_m und des Generatorwirkungsgrades $\eta_G \cdot \eta'_{Ag}$ bezeichnet den Wirkungsgrad in der Kondensations- bzw. Kondensationsentnahmeturbine. η_m ist nach Mitteilung vom VEB „Bergmann-Borsig“ in dem in dieser Arbeit betrachteten Bereich unabhängig von p .

$a_D(p)$ t Dampf liefern

$$a_S(p) = b_S(p) a_D(p) \left[\frac{\text{kWh}}{\text{t Brik.}} \right] \quad (10)$$

kWh Elektroenergie.

Wird mit m_H die spezifische Verdampfungsleistung bezeichnet, so benötigt man für die Trocknung der für 1 t Briketts benötigten Kohle in 1 h

$$a_T(p) = \frac{W_{dBr}}{m_H (1-v)} \cdot 10^3 \left[\frac{\text{m}^2}{\text{t Brik.}} \right] \quad (11)$$

Trocknerheizfläche.

Die Anlagekosten zur Erzeugung von 1 t Dampf/h sollen mit A_D , die zur Erzeugung von einer kWh/h mit A_S und die für 1 m² Heizfläche (einschließlich Bau- und Montagekosten) mit A_T bezeichnet werden.

Dann ergeben sich die Gesamtanlagekosten des Kraftwerkes und des Trockendienstes für die Erzeugung von 1 t Briketts/h und von $a_S(p)$ kWh zu

$$J = a_D(p) A_D + a_S(p) A_S + a_T(p) A_T \left[\frac{\text{MDN}}{\text{t Brik./h}} \right] \quad (12)$$

Die Abschreibungssätze werden mit α'_D für Kesselanlagen, mit α'_S für Turbinenanlagen und mit α'_T für den Trockendienst bezeichnet. Die Abschreibungen sollen in Teilen von 1 angegeben werden. Ist h_D die Benutzungsstundenanzahl der installierten Leistung der Kesselanlage, h_S die der Turbinen und h_T die des Trockendienstes, so sind die stündlichen Abschreibungssätze durch die Gleichungen

$$\alpha_D = \frac{\alpha'_D}{h_D}; \quad \alpha_S = \frac{\alpha'_S}{h_S}; \quad \alpha_T = \frac{\alpha'_T}{h_T}$$

gegeben.

Mit diesen Beziehungen ergeben sich die Abschreibungen zu

$$A(p) = a_D(p) A_D \alpha_D + a_S(p) A_S \alpha_S + a_T(p) A_T \alpha_T \left[\frac{\text{MDN}}{\text{t Brik./h}} \right] \quad (13)$$

Damit ist die Funktion der Abschreibungen als Summand der Selbstkosten hergeleitet

2.4. Herleitung der Funktion L(p) der Lohnkosten

Es sollen mit B_{Kr} der Arbeitskräftebedarf im Kraftwerk, bezogen auf 1 t Dampf/h, und mit B_T der Arbeitskräftebedarf pro m² Trocknerheizfläche bezeichnet werden.

Es sollen ferner mit l_{Kr} die stündlichen durchschnittlichen Lohnkosten im Kraftwerk und mit l_T die im Trockendienst bezeichnet werden. Dann ergeben sich die Lohnkosten für die Erzeugung von 1 t Briketts und einer zugeordneten, vom Trocknungsdampfdruck p abhängigen Menge an Elektroenergie zu

$$L(p) = a_D(p) B_{Kr} l_{Kr} + a_T(p) B_T l_T \left[\frac{\text{MDN}}{\text{t Brik./h}} \right] \quad (14)$$

Bei der vorstehend dargelegten Betrachtungsweise können die von p abhängigen Terme, die im vorangegangenen Kapitel abgeleitet wurden, wieder verwendet werden.

2.5. Herleitung der Funktion R(p) der Reparaturkosten

Die Reparaturkosten sollen sich additiv gemäß der Beziehung

$$R(p) = R_D + R_S + R_T \quad (15)$$

zusammensetzen. Die Reparaturkosten R_T im Trockendienst werden als unabhängig vom Trocknungsdampfdruck p angenommen. Es sollen mit r_D die Reparaturkosten bezogen auf 1 t Dampf/h und mit r_S die Reparaturkosten bezogen auf 1 kWh/h bezeichnet werden. Die Gesamt-Reparaturkosten $R(p)$ ergeben sich mit diesen Bezeichnungen

$$R(p) = a_D(p) r_D + a_S(p) r_S + R_T \left[\frac{\text{MDN}}{\text{t Brik./h}} \right] \quad (16)$$

2.6. Herleitung der Funktion $K(p)$ der Rohkohleeinsatzkosten

Mit k_1 sollen die Kosten für 1 t Brikettierkohle und mit k_2 die Kosten für 1 t Kesselkohle bezeichnet werden. Bei den bis zum 31. 3. 1964 gültigen Preisen ist $k_1 = k_2$. Die Rohkohlekosten in der Brikettfabrik betragen für 1 t Briketts

$$K_T = (1 + W_{dBr}) \frac{1}{1-v} k_1 \left[\frac{\text{MDN}}{\text{t Brik.}} \right] \quad (17)$$

1 t Kesselkohle möge $Q_K \cdot 10^3$ kcal enthalten. Zur Erzeugung von 1 t Dampf sind

$$\frac{1}{\eta_K} (i_1 - i_4) \cdot 10^3 \quad [\text{kcal}]$$

notwendig. i_4 ist hierbei die Enthalpie des Speisewassers bei der Einspeisung in den Kessel und η_K der Kesselwirkungsgrad. Es wird hierbei von der Annahme ausgegangen, daß das Kondensat vorgewärmt wird. Diese Vorwärmung erfolgt mit dem als Eigenverbrauch bezeichneten Dampf. Die Einspeisung soll mit Elektrospeisepumpen erfolgen.

Man benötigt zur Erzeugung von 1 t Dampf

$$b_R(p) = \frac{i_1 - i_4}{Q_K \eta_K} \left[\frac{\text{t Kesselk.}}{\text{t Dampf}} \right] \quad (18)$$

t Kesselkohle.

Der Gesamtbedarf an Rohbraunkohle im Kesselhaus ist bezogen auf 1 t Brikettproduktion

$$a_D(p) b_R(p) = a_D(p) \frac{i_1 - i_4}{Q_K \eta_K} \left[\frac{\text{t Kesselk.}}{\text{t Brik./h}} \right] \quad (19)$$

Damit ergeben sich die Rohkohleeinsatzkosten K_D im Kesselhaus zu

$$K_D(p) = a_D(p) b_R(p) k_2 \left[\frac{\text{MDN}}{\text{t Brik./h}} \right] \quad (20)$$

Die gesamten Rohkohleeinsatzkosten für die Produktion von 1 t Briketts sind:

$$K(p) = K_D(p) + K_T = a_D(p) b_R(p) k_2 + (1 + W_{dBr}) \frac{1}{1-v} k_1 \left[\frac{\text{MDN}}{\text{t Brik./h}} \right] \quad (21)$$

2.7. Die Selbstkosten S' der Brikettfabrik

Durch die Normierung auf 1 t Briketts sind die Selbstkosten S' in der Brikettfabrik ohne Trockendienst konstant in bezug auf p . Diese Selbstkosten haben – wie groß sie immer sein mögen – keinen Einfluß auf die Lage des Optimums. Hier zeigt sich deutlich der Vorteil der Normierung auf 1 t Brikettproduktion/h. Es wäre auch eine andere Normierung denkbar, z. B. die auf 1 t Dampferzeugung/h oder auf 1 kWh. Diese Normierungen würden aber nicht den Vorteil erbringen, der durch die vorgenommene erzielt wird.

In S' sind nicht die Dampf- oder Elektroenergiekosten enthalten, da diese bereits an anderer Stelle erfaßt sind.

2.8. Herleitung der Funktion $S(p)$ der Selbstkosten

Die Funktion $S(p)$ der Selbstkosten setzt sich additiv aus den Funktionen $A(p)$ der Abschreibungen, $L(p)$ der Lohnkosten, $R(p)$ der Reparaturkosten, $K(p)$ der Rohkohleinsatzkosten und einem konstanten Glied, durch das die Selbstkosten der Brikettfabrik mit Ausnahme des Trockendienstes ausgedrückt werden, zusammen. Setzt man die in den vorangegangenen Kapiteln hergeleiteten Formeln in die Funktion (3) der Selbstkosten ein, so ergibt sich:

$$\begin{aligned}
 S(p) = & a_L(p) A_D \alpha_D + a_S(p) A_S \alpha_S + a_T(p) A_T \alpha_T \\
 & + a_L(p) B_{Kr} l_{Kr} + a_T(p) B_T l_T + a_D(p) r_D + a_S(p) r_S \\
 & + R_T + a_D(p) b_A(p) k_2 + (1 + W_{dBr}) \frac{1}{1-v} k_1 + S' \left[\frac{\text{MDN}}{\text{t Brik./h}} \right] \quad (22)
 \end{aligned}$$

Formt man diese Gleichung um, so erhält man:

$$\begin{aligned}
 S(p) = & a_L(p) [A_D \alpha_D + B_{Kr} l_{Kr} + r_D] \\
 & + a_S(p) [A_S \alpha_S + r_S] + a_T(p) [A_T \alpha_T + B_T l_T] \\
 & + a_L(p) b_A(p) k_2 + (1 + W_{dBr}) \frac{1}{1-v} k_1 + R_T + S' \left[\frac{\text{MDN}}{\text{t Brik./h}} \right] \quad (22a)
 \end{aligned}$$

Die ersten drei Summanden der rechten Seite der Gleichung (22a) bestehen jeweils aus einem Produkt von zwei Faktoren. Der erste Faktor ist von p unabhängig. Der vierte Summand ist ein Produkt, das aus drei Faktoren besteht, von denen die ersten beiden Faktoren von p abhängig sind und der dritte Faktor von p unabhängig ist. Die letzten drei Summanden sind unabhängig von p .

Es ist an dieser Stelle notwendig, einige Bemerkungen zur Dimension zu machen. Die Beziehungen (22) und (22a) geben die Selbstkosten für die Erzeugung von 1 t Briketts/h und von $a_S(p)$ kWh in der gleichen Zeiteinheit an. Es wurde sowohl bei den Selbstkosten als auch bei den Summanden der Selbstkosten als Dimension jeweils

$$\left[\frac{\text{MDN}}{\text{t Brik./h}} \right]$$

angegeben. Das geschah aus Gründen einer einfachen Darstellung. Da in der gesamten Arbeit die Erzeugung von Briketts und Elektroenergie in einem Produktionsprozeß betrachtet wird, dürften hierdurch keine Irrtümer entstehen. Die ausführliche Darstellung der Dimension ist:

$$\left[\frac{\text{MDN}}{\text{t Brik./h} + a_S(p) \text{ kWh/h}} \right]$$

Die einfachere Darstellung der Dimension wird in der gesamten Arbeit beibehalten. Die gleiche Dimension wird auch beim Erlös angegeben, obgleich der Erlös unabhängig von der Zeiteinheit ist, in der die Erzeugnisse hergestellt werden. Wir betrachten aber den Erlös, der den Selbstkosten bei der Erzeugung von 1 t Briketts und $a_S(p)$ kWh/h zugeordnet ist. Insofern ist die Dimension beim Erlös gerechtfertigt.

2.9. Herleitung der Funktion $E(p)$ der Erlöse

Nach Gleichung (2) setzt sich der Erlös zusammen aus dem Erlös, der sich durch den Absatz von 1 t Briketts und dem Absatz an Elektroenergie ergibt. Bezeichnet man mit P_{Br} den Betriebsabgabepreis für 1 t Briketts und mit P_S den Betriebsabgabepreis für 1 kWh, so gilt für den ersten Summanden von $E(p)$:

$$E_{Br} = P_{Br} \quad (23)$$

Dieser Summand ist auf Grund der Normierung auf 1 t Briketts eine Konstante und damit unabhängig vom Trocknungsdampfdruck p .

Die Beziehung (10) gibt an, wieviel Elektroenergie, bezogen auf 1 t Briketts, erzeugt wird. Die im Kraftwerk und in der Brikettfabrik mit Trockendienst als Eigenverbrauch benötigte Menge Elektroenergie, bezogen auf 1 t Briketts, sei e_S . Zum Absatz steht dann die Elektroenergiemenge

$$a_S(p) - e_S$$

zur Verfügung. Es wird hierbei angenommen, daß der Eigenverbrauch an Elektroenergie unabhängig vom Trocknungsdampfdruck p ist. Eine solche Annahme scheint gerechtfertigt zu sein, wengleich eine gewisse Abhängigkeit des Eigenverbrauches e_S an Elektroenergie durch die Trocknerantriebe und die Kesselspeisepumpen denkbar wäre.

Der Erlös durch den Absatz von Elektroenergie ist

$$E_S(p) = (a_S(p) - e_S) P_S \left[\frac{\text{MDN}}{\text{t Brik./h}} \right] \quad (24)$$

Der Gesamterlös ist damit

$$E(p) = E_S(p) + E_{Br} = (a_S(p) - e_S) P_S + P_{Br} \left[\frac{\text{MDN}}{\text{t Brik./h}} \right] \quad (25)$$

2.10. Zusammenfassung

Nach der Herleitung der einzelnen Summanden der Funktion der Selbstkosten und des Erlöses kann die Gewinnfunktion angegeben werden. Setzt man die Gleichung (22) und (25) in die Gleichung (1) ein, so erhält man:

$$\begin{aligned} G(p) &= E(p) - S(p) \\ &= (a_S(p) - e_S) P_S + P_{Br} - a_D(p) [A_D \alpha_D + B_{Kr} l_{Kr} + r_D] \\ &\quad - a_S(p) [A_S \alpha_S + r_S] - a_T(p) [A_T \alpha_T + B_T l_T] \\ &\quad - a_D(p) b_R(p) k_2 - (1 + W_{dBr}) \frac{1}{1-v} k_1 - R_T - S' \left[\frac{\text{MDN}}{\text{t Brik./h}} \right] \end{aligned} \quad (26)$$

oder nach entsprechender Umformung:

$$\begin{aligned} G(p) &= -a_D(p) [A_D \alpha_D + B_{Kr} l_{Kr} + r_D] \\ &\quad + a_S(p) [P_S - A_S \alpha_S - r_S] - a_T(p) [A_T \alpha_T + B_T l_T] \\ &\quad - a_D(p) b_R(p) k_2 + P_{Br} - (1 + W_{dBr}) \frac{1}{1-v} k_1 - R_T - S' - e_S P_S \\ &\quad \left[\frac{\text{MDN}}{\text{t Brik./h}} \right] \end{aligned} \quad (26a)$$

In der Funktion (26a) sind nur die ersten vier Summanden von p abhängig. Für die Ermittlung des maximalen Gewinns in Abhängigkeit vom Trocknungsdampfdruck p sind nur diese Summanden ausschlaggebend. Die anderen Summanden können die Höhe der Gewinne beeinflussen, nicht aber die Lage des Optimums.

2.11. **Schlußfolgerungen aus der hergeleiteten Gewinnfunktion für die Veränderung der Abgabepreise**

Da sich die Auffassung durchsetzt, daß die Preise den Aufwendungen entsprechen sollen, um so als ökonomische Hebel wirken zu können, ist es bereits an dieser Stelle interessant und möglich, die Konsequenzen bei Veränderungen von Preisen zu untersuchen.

Aus den Gleichungen (26) ersieht man, daß eine beliebige Veränderung des Betriebsabgabepreises P_{Br} nicht zu einer Veränderung der Lage des Optimums führt. Das gleiche gilt für die Rohkohleeinsatzkosten k_1 . Die Festlegung des Einflusses der Rohkohleeinsatzkosten k_2 läuft auf die Ermittlung des Charakters des bei k_2 stehenden Faktors $a_D(p) b_R(p)$ hinaus. Allgemein kann man sagen: ist die Funktion $a_D(p) b_R(p)$ monoton steigend, so wird das Optimum bei Vergrößerung von k_2 unter der Voraussetzung, daß P_S konstant bleibt, in Richtung kleinerer p -Werte verschoben. Ist die gleiche Funktion monoton fallend, so wird das Optimum bei Vergrößerung von k_2 in Richtung größerer p -Werte verschoben. Verringert sich k_2 , so tritt eine Umkehrung der vorstehenden Aussage ein. Man kann diesen Sachverhalt in Form einer Tabelle darstellen.

	$k_2 + \varepsilon$	$k_2 - \varepsilon$
$\frac{d}{dp} a_D(p) b_R(p) > 0$	$p_0 - \delta_1$	$p_0 + \delta_2$
$\frac{d}{dp} a_D(p) b_R(p) < 0$	$p_0 + \delta_3$	$p_0 - \delta_4$

Unter ε und δ seien hierbei kleine positive Größen zu verstehen. Mit p_0 wird der Wert von p bezeichnet, bei dem $G(p)$ für k_2 ein Maximum annimmt.

Gehört $a_D(p) b_R(p)$ nicht der Klasse der monotonen Funktionen an, so kann man allgemein keine Aussage machen.

Der Betriebsabgabepreis P_S der Elektroenergie ist multiplikativ mit der Funktion $a_S(p)$ verknüpft. Ändert sich P_S , so kann das zu einer Veränderung der Lage des Optimums führen. Für die Funktion $a_S(p)$ gilt das oben Gesagte. Ist $a_S(p)$ eine monotone Funktion in bezug auf p , so kann man wie oben eine Tabelle angeben, aus der die Richtung der Verschiebung der Lage des Optimums zu erkennen ist.

	$P_S + \varepsilon$	$P_S - \varepsilon$
$\frac{d}{dp} a_S(p) > 0$	$p_0 + \delta_1$	$p_0 - \delta_2$
$\frac{d}{dp} a_S(p) < 0$	$p_0 - \delta_3$	$p_0 + \delta_4$

Aus der Gewinnfunktion (26) kann eine weitere Schlußfolgerung gezogen werden. In den Größen $a_S(p)$, $a_D(p)$ und $a_T(p)$ ist W_{dBr} multiplikativ enthalten. In den anderen Funktionen von p ist W_{dBr} nicht enthalten. Diese Funktionen sind immer mit einer der Funktionen $a_S(p)$, $a_D(p)$ oder $a_T(p)$ multiplikativ verknüpft. Daher kann bei allen von p abhängigen Summanden W_{dBr} ausgeklammert werden. Das bedeutet, daß der Rohkohle- und Trockenkohlewassergehalt keinen Einfluß auf die Lage des Optimums hat. Er beeinflußt nur die Höhe des Gewinns. Das gleiche gilt für den Verlustfaktor v bzw. für den Quotienten $\frac{1}{1-v}$.

3. Ermittlung der Abhängigkeit der Enthalpie vom Trocknungsdampfdruck

3.1. Die Enthalpie i_1 bei Turbineneintritt

Es wird mit i_1 die Enthalpie bei Turbineneintritt bezeichnet. Diese Enthalpie hängt nur vom verwendeten Kesseltyp, nicht aber vom Trocknungsdampfdruck p ab. Es werden bei dieser Arbeit die drei standardisierten Kesseltypen mit den folgenden genormten Dampfparametern bei Turbineneintritt betrachtet:

$$127 \text{ at } 535 \text{ }^\circ\text{C} \quad i_1 = 821,72 \text{ kcal/kg}$$

$$89 \text{ at } 520 \text{ }^\circ\text{C} \quad i_1 = 821,75 \text{ kcal/kg}$$

$$43 \text{ at } 455 \text{ }^\circ\text{C} \quad i_1 = 797,55 \text{ kcal/kg}$$

In dieser Reihenfolge sollen die Kessel als Typ I, II und III bezeichnet werden.

3.2. Die Enthalpie i_{23} bei der 3. Anzapfung

Mit i_{23} wird die Enthalpie des Dampfes bei der 3. Anzapfung bezeichnet. Sie ist gleich der Enthalpie des Trocknungsdampfes, d. h., die in der Leitung zum Trockner auftretenden Verluste werden dem Trockner zugeordnet. Die Enthalpie i_{23} wird aus der Gleichung

$$i_1 - i_{23} = (i_1 - i_0) \eta_i \quad (27)$$

bestimmt. Die Differenz $i_1 - i_0$ stellt in dieser Gleichung das adiabatische Gefälle und η_i den inneren Wirkungsgrad dar. Der Wirkungsgrad η_i ist, in den Grenzen von 0,82 bis 0,85 einem Trocknungsdampfdruck von 11–2 at entsprechend, variiert worden, wobei die Abhängigkeit als linear angenommen wurde. Durch diese Art der Ermittlung von i_{23} ergibt sich eine Abhängigkeit von der Enthalpie i_1 des Frischdampfes, d. h., i_{23} muß für jeden Kesseltyp berechnet werden. Hierbei ergab sich, daß der Wert i_{23} für $p = 2,3$ und 4 beim Kesseltyp I und für $p = 2$ beim Kesseltyp II im Naßdampfgebiet liegt. Es wurde deshalb bei diesen Werten η_i dahingehend korrigiert, daß i_{23} oberhalb der Sättigungslinie im (i_s) -Diagramm zu liegen kam. Für die ermittelten Werte von i_{23} ist eine quadratische Abhängigkeit als Annahme eingeführt und demzufolge eine quadratische Ausgleichung vorgenommen worden. Die Annahme einer Abhängigkeit 3. Grades erwies sich als nicht sinnvoll; der Koeffizient bei p^3 war annähernd Null.

Es ergaben sich die folgenden Funktionen in der Reihenfolge der oben angeführten Kesseltypen:

$$i_{23} = i_{23}(p) = -0,036\,224\,p^2 + 6,125\,63\,p + 633,084\,51 \quad (28a)$$

$$i_{23} = i_{23}(p) = -0,398\,001\,p^2 + 12,088\,34\,p + 624,151\,49 \text{ für } p \geq 3 \quad (28b)$$

$$i_{23}(2) = 645,5$$

$$i_{23} = i_{23}(p) = -0,554\,066\,p^2 + 14,700\,00\,p + 627,993\,11 \quad (28c)$$

Die Funktion $i_{23}(p)$ beim Kesseltyp II besteht aus einer im Intervall (3, 11) analytisch angegebenen Funktion und einem isolierten Wert bei $p = 2$.

3.3. Die Enthalpie i_3 des Trocknerkondensates

Mit i_3 wird die Enthalpie des Trocknerkondensates bei Trocknungsdampfdruck p bezeichnet. Die Werte für i_3 wurden den Dampf tafeln [22] entnommen. Die graphische Darstellung führte ebenfalls zu der Annahme einer quadratischen Abhängigkeit. Die Ausgleichung ergab die folgende Funktion:

$$i_3 = i_3(p) = -0,481\,43\,p^2 + 13,261\,2\,p + 96,974 \quad (29)$$

3.4. Die im Trockner ausgenutzte Enthalpiedifferenz

Im Trockner wird die Enthalpiedifferenz $i_{23} - i_3$ zur Trocknung der Rohfeinkohle benutzt. Diese Differenz spielt als Funktion des Trocknungsdampfdruckes eine ausgezeichnete Rolle in der vorliegenden Arbeit. Aus diesem Grunde soll sie hier angegeben werden. Unter 3.2. und 3.3. sind die Funktionen i_{23} und i_3 durch Ausgleichung ermittelt worden. Die Ausgleichung erfolgte mit der von *Gauß* und *Lagrange* entwickelten Methode des Minimums der Summe der Ordinatenabstandsquadrate, kurz Methode der kleinsten Quadrate genannt. Die hierbei benutzten Formeln können als allgemein bekannt angesehen werden, so daß auf eine Angabe oder Ableitung verzichtet wird. Es soll hier nur bemerkt werden, daß die Differenz von zwei quadratisch ausgeglichenen Funktionen gleich der quadratischen Ausgleichung der Differenzen der Werte ist, die für die Ausgleichung der einzelnen Funktionen verwendet werden. Diesen Sachverhalt kann man benutzen, um die Differenzfunktion $i_{23} - i_3$ durch die Subtraktion der Gleichung (29) von den Gleichungen (28) zu ermitteln. Das ist für den Kesseltyp III erfolgt. Für den Kesseltyp I wurde die Differenzfunktion aus der Differenz der ermittelten Werte von i_{23} und i_3 durch zwei lineare Beziehungen für die Intervalle (2,3) und (4,11) approximiert. Der Grund für diese Ausgleichung besteht in der oben beschriebenen Veränderung von η_i für die Werte $p = 2,3$ und 4. Beim Kesseltyp II gilt die Differenzfunktion für $p \geq 3$. Für $p = 2$ wurde der Funktionswert durch Subtraktion des ermittelten Wertes i_3 von i_{23} errechnet. Diese Funktionen werden nachstehend für die drei verschiedenen Kesseltypen in der oben festgelegten Reihenfolge angegeben.

$$i_{23} - i_3 = -8,350\,p + 543,417 \quad 2 \leq p \leq 4 \quad (30a)$$

$$= -0,112\,5\,p + 510,532 \quad 4 \leq p \leq 11$$

$$i_{23} - i_3 = -0,016\,176\,p^2 + 0,358\,746\,p + 521,809\,785 \quad (30b)$$

$$3 \leq p \leq 11$$

$$= 525,63$$

$$p = 2$$

$$i_{23} - i_3 = -0,060\,773\,p^2 + 1,435\,042\,p + 531,027\,327 \quad (30c)$$

3.5. Die Enthalpien der 1. und 2. Anzapfung

Die Enthalpien des Dampfes bei der 1. und 2. Anzapfung werden mit i_{21} und i_{22} bezeichnet. Bei der Herleitung von i_{12} und i_{22} als Funktionen vom Trocknungsdampfdruck p wird davon ausgegangen, daß bei der Errichtung einer neuen Anlage die Turbinen optimal ausgelegt werden. Die Annahme der Errichtung einer neuen Anlage bedeutet hierbei keine Einschränkung der Allgemeinheit, da bei einer bestehenden Anlage in den Formeln (9) dann nicht die Funktionen i_{21} und i_{22} eingesetzt werden, sondern ihre feststehenden Werte.

Die optimale Auslegung der Turbinen bei zwei Zwischenanzapfungen wird nach der folgenden Regel durchgeführt. Es wird im (is) -Diagramm die die Punkte i_1 und i_{23} verbindende Gerade (Polytrope) eingezeichnet und diese hinsichtlich ihres Temperaturbereiches in drei gleiche Teile geteilt. Bezeichnet man die Temperatur mit t und indiziert man t in der gleichen Weise wie i , so kann man t_{21} und t_{22} aus den Formeln

$$t_{21} = \frac{1}{3} (2 t_1 + t_{23})$$

$$t_{22} = \frac{1}{3} (t_1 + 2 t_{23})$$

bestimmen. Durch dieses Vorgehen werden im (is) -Diagramm auf der Polytrope zwei Punkte bestimmt. Diesen Punkten zugeordnet ist jeweils ein bestimmter Druck und damit eine bestimmte Enthalpie. Auf diese Weise werden die Enthalpien i_{21} und i_{22} bestimmt. Diese Bestimmung wurde nur für die ersten beiden Kesseltypen durchgeführt. Bei dem dritten Kesseltyp wurde angenommen, daß nur eine Zwischenanzapfung erfolgt. Die Bestimmung von i_{21} erfolgt für diesen Fall analog zu der oben beschriebenen Art der Bestimmung von i_{21} und i_{22} . Aus Vergleichsgründen wurden beim Kesseltyp III die Werte i_{21} und i_{22} bei der Annahme von zwei Zwischenanzapfungen für die Trocknungsdampfdrücke $p = 2, 3$ und 4 ermittelt.

Aus den gleichen Gründen wurden für den Kesseltyp I die Enthalpiewerte für drei Zwischenanzapfungen für $p = 2, 3, 4$ und 5 nach der oben angegebenen Methode berechnet.

Für diese beim Kesseltyp I und III zusätzlich errechneten Enthalpiewerte der Zwischenanzapfungen wurden keine Ausgleichungen vorgenommen. Die Werte sind in Tabelle 1d und 1e angegeben.

Die ermittelten Werte für i_{21} und i_{22} wurden mit den anderen in diesem Abschnitt angeführten Werten in Tabelle 1a bis 1e für alle drei Kesseltypen zusammengestellt. Die aus diesen Werten durch Ausgleichung erhaltenen Funktionen sind in der Tabelle 2 enthalten.

3.6. Ermittlung des Dampfeigenverbrauches

Es wird angenommen, daß die bei der 1. und 2. Anzapfung abgezweigten Teile der Gesamtdampfmenge e_{D21} und e_{D22} ausschließlich der Vorwärmung dienen. Die Vorwärmung erfolgt entsprechend der Anzahl der Zwischenanzapfungen in 2 Stufen bei den Kesseltypen I und II und in einer Stufe beim Kesseltyp III.

Tabelle I. Vom Trocknungsdampfdruck p abhängige Parameter

Empirische Werte

a) Kesseltyp I

p	i_{21}	t_{21}	p_{21}	i_{22}	t_{22}	p_{22}	i_{23}	t_{23}	$i_{23}-i_3$	i_3	i_3'
2	765	396,6	40	707	258,1	11	647	119,7	527,1	119,9	112,9
3	767	401,8	43	709	268,6	14	651	135,4	517,6	133,4	126,4
4	768	406,3	47	713	277,5	16	654	148,8	510,4	143,6	136,6
5	769	409,8	48	715	284,2	18	662	159,4	509,9	152,1	145,1
6	771	416,0	53	720	297,0	20	669	177,8	509,7	159,3	152,3
7	774	420,7	54	724	306,3	22	675	192,9	509,4	165,6	158,6
8	776	425,7	55	728	316,3	24	681	206,6	509,7	171,3	164,3
9	776	429,3	59	733	323,7	25	686	218,2	509,6	176,4	169,4
11	780	434,3	61	738	334,3	26	695	234,8	509,4	185,6	178,6

b) Kesseltyp II

p	i_{21}	t_{21}	p_{21}	i_{22}	t_{22}	p_{22}	i_{23}	t_{23}	$i_{23}-i_3$	i_3	i_3'
2	763	385,0	31	704	250,0	9	645,5	118,4	525,6	119,9	112,9
3	766	393,3	34	711	266,7	11	656,3	143,8	522,9	133,4	126,4
4	769	400,6	37	717	281,3	12	666,6	166,6	523,0	143,6	136,6
5	772	408,0	39	724	296,0	14	675,1	185,8	523,0	152,1	145,1
6	775	414,0	41	728	308,0	16	682,4	202,4	523,1	159,3	152,3
7	777	419,3	42	733	318,7	18	689,2	217,8	523,6	165,6	158,6
8	780	424,0	43	738	328,0	19	695,0	231,0	523,7	171,3	164,3
9	781	428,0	44	741	336,0	21	700,5	243,6	524,1	176,4	169,4
11	784	433,7	47	746	347,3	23	709,2	263,4	523,6	185,6	178,6

c) Kesseltyp III

p	i_{21}	t_{21}	p_{21}	i_{22}	t_{22}	$i_{23}-i_3$	i_3
2	725	294,0	10,5	633,263	133	533,363	119,9
3	733	311,0	12,0	668,584	167	535,184	133,4
4	739	323,5	13,0	679,014	192	536,014	143,6
5	743	334,0	15,3	688,856	213	536,758	152,1
6	747	342,0	15,8	695,959	229	536,859	159,3
7	751	351,0	17,1	703,841	247	538,241	165,6
8	753	357,5	20,2	709,996	260	538,696	171,3
9	756	364,0	21,0	715,705	273	539,305	176,4
11	761	374,5	22,8	724,949	294	539,339	185,6

d) Kesseltyp I mit drei Vorwärmstufen

p	i_{21}	t_{21}	p_{21}	i_{22}	t_{22}	p_{22}	i_{23}	t_{23}
2	780	431,2	54	737	327,4	21	692	223,5
3	781	435,1	60	739	335,2	25	696	235,3
4	781	438,5	62	741	341,9	28	699	245,4
5	782	441,1	65	742	347,2	30,5	702	253,3
6	784	445,7	67	746	356,4	32,5	708	267,1

i_3'	i_3''	i_3'''	i_4	t_4	e_{D21}	e_{D22}	e_{D23}
112,62	178,6	176,20	251,2	242,18	0,141 300	0,104 980	0,161 963
125,88	190,1	187,13	256,3	246,48	0,129 626	0,106 222	0,164 905
135,92	196,6	193,43	262,2	251,88	0,129 996	0,100 289	0,167 206
144,11	203,1	199,14	264,2	253,17	0,121 038	0,098 856	0,167 362
151,08	208,8	204,38	271,6	259,34	0,125 751	0,095 076	0,167 427
157,17	214,2	209,23	273,0	260,53	0,117 365	0,095 526	0,167 524
162,61	219,1	213,75	274,4	261,69	0,110 247	0,093 703	0,167 427
167,53	221,5	215,90	280,0	266,20	0,117 944	0,088 368	0,167 459
176,20	223,8	217,99	282,7	268,36	0,118 440	0,074 337	0,167 524

i_3'	i_3''	i_3'''	i_4	t_4	e_{D21}	e_{D22}	e_{D23}
112,62	169,4	167,53	234,6	227,57	0,1234	0,090 693	0,166 374
125,88	178,6	176,20	240,5	232,77	0,1178	0,084 430	0,167 232
135,92	182,7	180,08	246,0	237,62	0,1210	0,071 946	0,167 200
144,11	192,1	187,13	249,5	240,09	0,1099	0,076 503	0,167 200
151,08	196,9	193,43	252,9	243,64	0,1073	0,072 663	0,167 168
157,17	203,1	199,14	254,6	245,07	0,0976	0,074 585	0,167 012
162,61	206,0	201,81	256,3	246,48	0,0960	0,069 307	0,166 979
167,53	211,5	206,85	257,9	247,87	0,0887	0,071 736	0,166 854
176,20	216,6	211,53	262,6	251,88	0,0882	0,064 116	0,167 011

i_3'	t_3'	i_4	t_4	e_{D21}	e_{D22}
112,9	112,62	176,4	174,16	0,115 749	0,168 004
126,4	125,88	182,7	180,08	0,102 308	0,167 447
136,6	135,92	186,5	183,71	0,090 317	0,167 200
145,1	144,11	194,5	191,26	0,091 566	0,166 954
152,3	151,08	196,3	192,83	0,079 898	0,166 984
158,6	157,17	200,4	196,65	0,075 917	0,166 525
164,3	162,61	209,3	204,88	0,082 766	0,166 373
169,4	167,53	211,5	206,85	0,077 319	0,166 190
178,6	176,20	216,1	210,60	0,068 820	0,166 190

p_{23}	i_{24}	t_{24}	$i_{23}-i_3$	i_3	i_3'	i_3''	i_4
7	647	119,7	527,1	119,9	112,9	158,6	273,0
9,5	651	135,4	517,6	133,4	126,4	171,9	281,4
11,5	654	148,8	510,4	143,6	136,6	180,7	284,0
13,5	662	159,4	509,9	152,1	145,1	188,3	287,8
15	669	177,8	509,7	159,3	152,3	193,6	290,3

Fortsetzung von Tabelle 1

p	e_{D21}	e_{D22}
2	0,121 302	0,086 470
3	4,120 096	0,081 921
4	0,112 274	0,080 412
5	0,109 875	0,077 156
6	0,106 948	0,075 227

e) Kesseltyp III mit zwei Vorwärmstufen

p	i_{21}	t_{21}	p_{21}	i_{22}	t_{22}	p_{22}	i_{23}	t_{23}
2	749	347,7	17	702	240,3	6,5	653,263	133
3	754	359,0	18,5	711	263	8	668,584	167
4	758	367,3	20	718	279,7	9,5	679,614	192

Bei der Vorwärmung wurden folgende Annahmen gemacht. Das aus dem Trockner kommende Kondensat erfährt bis zum Kondensatsammelbehälter eine Abkühlung von 7 grad. Diese Annahme wird in etwas vereinfachender Form durch die Gleichung

$$i'_3 = i_3 - 7$$

ausgedrückt. i'_3 ist die Enthalpie des Wassers im Kondensatsammelbehälter. Dieses Wasser wird in der 1. Vorwärmstufe durch den Dampf der 2. Anzapfung auf die Temperatur $t_{22} - 7$ grad vorgewärmt. t_{22} ist die Temperatur des Dampfes bei der 2. Anzapfung. In der 2. Vorwärmstufe wird das Wasser durch den Dampf von der 1. Anzapfung auf die Temperatur $t_{21} - 7$ grad vorgewärmt. Die Einspeisung erfolgt mit Elektrospeisepumpen. Die Enthalpie des Speisewassers nach der 1. Vorwärmstufe wird mit i_3'' und nach der 2. Vorwärmstufe mit i_4 bezeichnet. i_3'' und i_4 sind ebenfalls Funktionen vom Trocknungsdampfdruck p . Da i_4 bei der weiteren Herleitung benötigt wird, wurden die Funktionen $i_4 = i_4(p)$ durch quadratische Ausgleichungen ermittelt.

$$i_4 = i_4(p) = -0,222\ 574\ p^2 + 6,381\ 597\ p + 239,461\ 651 \quad (31a)$$

$$i_4 = i_4(p) = -0,249\ 491\ p^2 + 6,118\ 655\ p + 224,379\ 743 \quad (31b)$$

$$i_4 = i_4(p) = -0,181\ 557\ p^2 + 6,902\ 311\ p + 163,067\ 061 \quad (31c)$$

Der Anteil e_{D21} der 1. Anzapfung kann aus der Gleichung

$$(i_4 - i'_3) = e_{D21} (i_{21} - i_4)$$

bestimmt werden. Nimmt man an, daß der in der 2. Vorwärmung kondensierte Dampf der 1. Anzapfung noch in der Lage ist, Wärme abzugeben, so kann man e_{D22} aus der Gleichung

$$(i''_3 - i'_3) = e_{D21} (i_4 - i''_3) + e_{D22} (i_{22} - i''_3)$$

bestimmen.

Die Werte von e_{D21} und e_{D22} sind für jeden Wert von p ermittelt worden und in Tabelle 1 enthalten. Sie wurden jeweils durch eine quadratische Funktion ausgeglichen. Hierbei

Fortsetzung zu Tabelle 1

e_{D23}	e_{D24}
0,063 115	0,161 963
0,065 314	0,164 905
0,065 629	0,167 200
0,065 693	0,167 362
0,062 890	0,167 427

$i_{23}-i_3$	i_3	i_3'	i_3''	i_4	e_{D21}	e_{D22}	e_{D23}
533,363	119,9	112,9	155,5	200,1	0,081 253	0,071 320	0,168 004
535,184	133,4	126,4	164,3	204,5	0,073 157	0,063 946	0,167 447
536,014	143,6	136,6	171,9	208,8	0,067 189	0,060 100	0,167 200

wurden folgende Funktionen ermittelt:

$$e_{D21} = e_{D21}(p) = 0,000\ 516\ p^2 - 0,009\ 129\ p + 0,156\ 088 \quad (32a)$$

$$e_{D21} = e_{D21}(p) = 0,000\ 136\ p^2 - 0,006\ 209\ p + 0,137\ 353 \quad (32b)$$

$$e_{D21} = e_{D21}(p) = 0,000\ 542\ p^2 - 0,011\ 449\ p + 0,132\ 763 \quad (32c)$$

und

$$e_{D22} = e_{D22}(p) = -0,000\ 312\ p^2 + 0,000\ 944\ p + 0,103\ 769 \quad (33a)$$

$$e_{D22} = e_{D22}(p) = 0,000\ 235\ p^2 - 0,005\ 359\ p + 0,097\ 293 \quad (33b)$$

Beim Kesseltyp III entfällt die Größe e_{D22} , da nur eine Zwischenanzapfung erfolgt. Die Anteile des Eigenbedarfes e_{D1} und e_{D23} werden als nicht vom Trocknungsdampfdruck abhängig angesehen. Für e_{D23} wurde ursprünglich eine Abhängigkeit von p angenommen. Es wurde für einen bestimmten Wert von P der Eigenverbrauch e_{D23} als ein fester Wert angenommen. Der zu diesen Werten gehörende ausnutzbare Wärmeinhalt wurde konstant gehalten, und in Abhängigkeit von p wurde e_{D23} geändert. Die sich ergebende Änderung ist aber so gering, daß die obige Annahme gerechtfertigt ist.

4. Die spezifische Verdampfungsleistung

4.1. Die bisher veröffentlichten Formeln der spezifischen Verdampfungsleistung

Bei der Herleitung der Selbstkosten ging die spezifische Verdampfungsleistung m_H in die Abschreibungen und in die Lohnkosten ein. Die spezifische Verdampfungsleistung m_H als Funktion des Trocknungsdampfdruckes p ist im Abschnitt 2. nicht explizit dargestellt worden. Das soll in diesem Abschnitt geschehen.

In der deutschen Literatur wurden bisher zwei Formeln für die spezifische Verdampfungsleistung veröffentlicht. Diese Formeln werden nachstehend angegeben.

$$m_H = 0,278 \left(\frac{O_{id}}{20} \right)^{0,167} \left(\frac{n}{6} \right)^{0,22} (0,75 t_k - \tau + 36) f_{HK} \quad (34)$$

$$m_H = \frac{F^{0,7}}{0,85 O_{id} - 96,5} \cdot (t - 13,05 p' - 115,8) \quad (35)$$

Tabelle 2. Vom Trocknungsdampfdruck p abhängige Parameter
Ausgleichsfunktionen

Symbol	Kesseltyp I	Kesseltyp II	Kesseltyp III
i_{21}	$0,006621 p^2 + 1,602521 p + 761,686606$	$-0,130443 p^2 + 4,074370 p + 755,082120$	$-0,285969 p^2 + 7,494957 p + 712,399414$
i_{22}	$0,027757 p^2 + 3,306722 p + 699,320908$	$-0,296728 p^2 + 8,553361 p + 687,971010$ 645,5 $p = 2$	
i_{23}	$-0,036224 p^2 + 6,125630 p + 633,084510$	$-0,398001 p^2 + 12,088243 p + 624,151487$	$-0,554066 p^2 + 14,699997 p + 627,993109$
$i_{23} - i_3$	$-8,350 p + 543,417$ $-0,1125 p + 510,532$	$525,63$ $-0,016176 p^2 + 0,358746 p + 521,809785$	$-0,060773 p^2 + 1,435042 p + 531,027327$
	$2 \leq p \leq 4$ $4 \leq p \leq 11$	$3 \leq p \leq 11$ $p = 2$	
i_2	$-0,481430 p^2 + 13,261197 p + 96,947491$	$-0,481430 p^2 + 13,261197 p + 96,974491$	$-0,481430 p^2 + 13,261197 p + 96,974491$
i_4	$-0,222574 p^2 + 6,381597 p + 239,461651$	$-0,249491 p^2 + 6,118655 p + 224,379743$	$-0,181557 p^2 + 6,902311 p + 163,067061$
e_{D21}	$0,000516 p^2 - 0,009129 p + 0,156088$	$0,000136 p^2 - 0,006209 p + 0,137353$	$0,000542 p^2 - 0,011449 p + 0,132763$
e_{D22}	$-0,000312 p^2 + 0,000944 p + 0,103769$	$0,000235 p^2 - 0,005359 p + 0,097293$	
e_{D23}	const. = 0,1672	const. = 0,1672	const. = 0,1672

Die spezifische Verdampfungsleistung

Die erste Formel wurde von *Baunack* [1] und die zweite von *Rademacher* [10] publiziert. In den Formeln bedeuten:

m_H die spezifische Verdampfungsleistung $\left[\frac{\text{kg Wasser}}{\text{m}^2\text{h}} \right]$

O_{id} die idealisierte spezifische Kornoberfläche

tn die Drehzahl des Trockners/min

t_s die Sattedampftemperatur [$^{\circ}\text{C}$]

τ die Kühlgrenztemperatur [$^{\circ}\text{C}$]

f_{HK} die kohleberührte Heizfläche, dividiert durch die Gesamtheizfläche

F der Füllungsgrad $\left[\frac{\text{kg RBK}}{\text{m}^2\text{h}} \right]$

die Taupunkttemperatur [$^{\circ}\text{C}$]

p' bzw. p der Trocknungsdampfdruck [at Überdruck] bzw. [at]

Für die Durchführung dieser Arbeit sollen nur die Formel (34) und eine Verbesserung der Formel (35) herangezogen werden. Dabei soll die idealisierte spezifische Kornoberfläche bei den Betrachtungen nicht berücksichtigt werden.

4.2. Die Notwendigkeit einer neuen Herleitung einer Formel für die spezifische Verdampfungsleistung

Im Jahre 1959 wurde aus dem Trocknungsdiagramm 53 [9] (siehe Bild 2) die Formel (35) für die spezifische Verdampfungsleistung abgeleitet. Die gesamte Herleitung ist in [19] enthalten. *Rademacher* beschrieb in [10] die Übereinstimmung der mit dieser Formel errechneten Werte mit den durch Messungen ermittelten. Es darf daraus geschlossen werden, daß die Formel (35) in einem gewissen Bereich die Praxis hinreichend gut widerspiegelt.

Gegen den Aufbau der Formel selbst aber müssen Bedenken geäußert werden. So sagt die Formel aus, daß mit steigendem Füllungsgrad F die spezifische Verdampfungsleistung m_H ansteigt. Das ist für den Bereich, für den die Formel gilt, sicher richtig. Die Tatsache aber, daß die Formel bei Betrachtungen von Grenzübergängen zu falschen Aussagen führt, ist unbefriedigend.

Mit steigendem Füllungsgrad steigt zunächst die spezifische Verdampfungsleistung. Hat der Füllungsgrad F einen zu bestimmenden Wert erreicht, so wird mit steigendem F die spezifische Verdampfungsleistung m_H abnehmen, da durch den verkleinerten freien Rohrquerschnitt nicht mehr die gesamte verdampfte Wassermenge abgeführt werden kann.

Das für die Formel (35) hinsichtlich des Füllungsgrades F Gesagte gilt prinzipiell auch für die Formel (34) in bezug auf die kohleberührte Heizfläche f_{HK} .

4.3. Herleitung einer neuen Formel für die spezifische Verdampfungsleistung

Die in 4.2. genannten Gründe haben zu einer erneuten Herleitung einer Formel für die spezifische Verdampfungsleistung geführt. Bei dieser Herleitung wurde nicht immer das Trocknungsdiagramm 53 zugrunde gelegt. Im Trocknungsdiagramm 53 wurde angenommen, daß die mittlere korrigierte Temperaturdifferenz u den Wert $-6,71$ annehmen muß, damit die spezifische Verdampfungsleistung Null wird. Eine solche Annahme scheint nicht gerechtfertigt zu sein. Es wurde deshalb angenommen, daß die spezifische Verdampfungsleistung Null wird, wenn die mittlere korrigierte Temperaturdifferenz Null wird.

4.3.1. Herleitung des Zusammenhanges zwischen der Taupunkttemperatur t und der Kühlgrenztemperatur τ

Die Teildiagramme I und II des Trocknungsdiagramms 53 geben den Zusammenhang zwischen der Taupunkttemperatur t und der Kühlgrenztemperatur τ an. Es wurden aus dem Diagramm für den Bereich

$$60 \leq \tau \leq 80$$

die folgenden zugeordneten Werte abgelesen:

τ	t
59,9	69,75
63,25	73,0
68,25	78,1
75,0	83,6
80,0	87,5

Diese Werte wurden in Bild 3 eingetragen. Die Darstellung läßt in dem oben angegebenen Bereich eine lineare Abhängigkeit vermuten. Aus diesem Grunde wurde eine lineare Ausgleichung vorgenommen und die folgende Funktion ermittelt:

$$t = 0,873 \tau + 18,029 \quad (36)$$

Diese Funktion wurde gleichfalls in Bild 2 eingezeichnet.

4.3.2. Herleitung des Zusammenhanges zwischen der Kühlgrenztemperatur τ und der mittleren korrigierten Temperaturdifferenz u

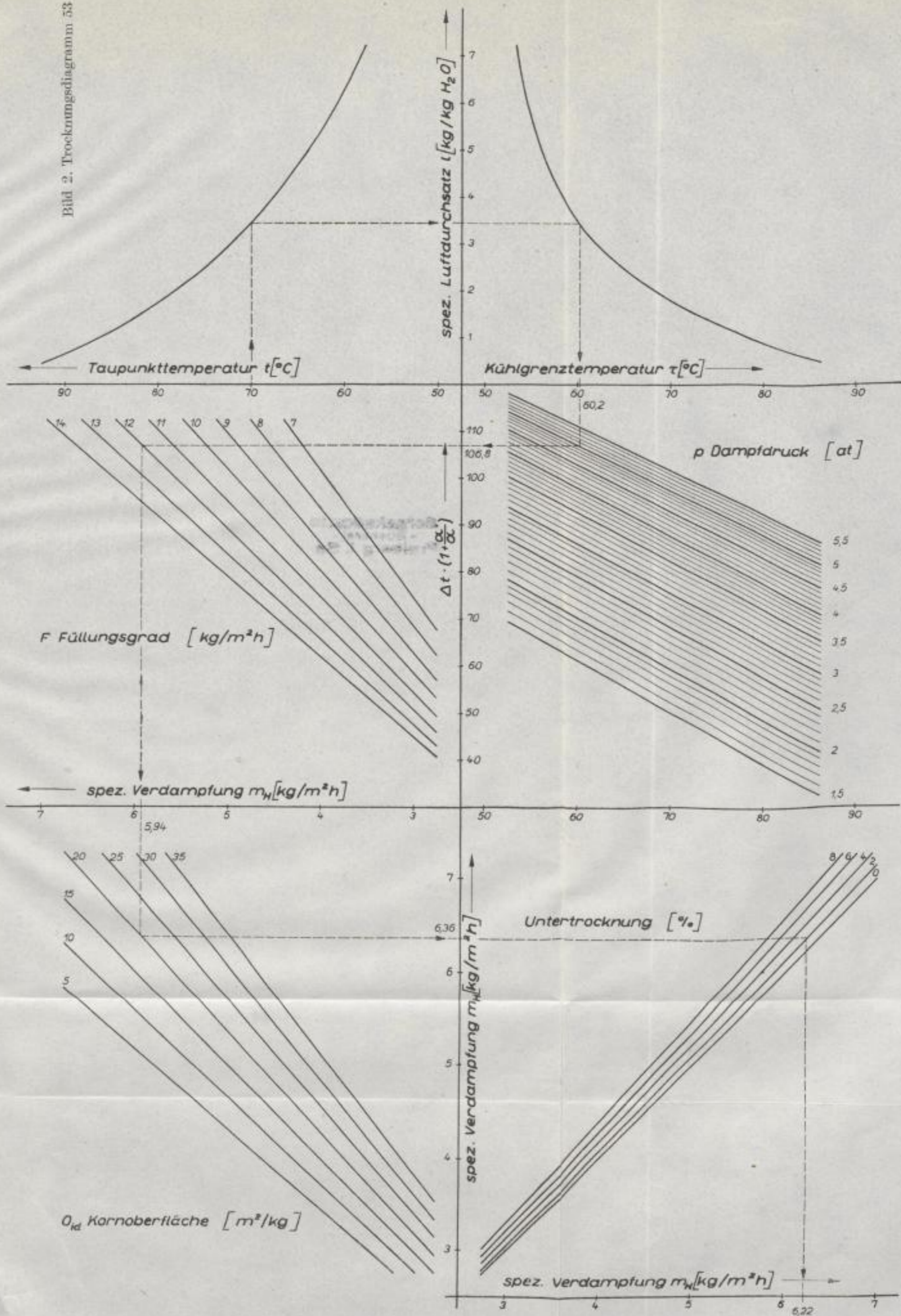
Im Teildiagramm III ist der Zusammenhang zwischen der Kühlgrenztemperatur τ und der mittleren korrigierten Temperaturdifferenz u unter Berücksichtigung des Trocknungsdampfdruckes p' dargestellt. Dieser Zusammenhang ist, wie man aus dem Diagramm ersehen kann, linear. Deshalb kann folgender Ansatz gemacht werden:

$$\tau = c u + d \quad (37)$$

Die Koeffizienten c und d sind Funktionen des Trocknungsdampfdruckes.

Im Diagramm wird der Trocknungsdampfdruck p' in at Überdruck benutzt. Da at Überdruck immer seltener benutzt wird und im allgemeinen durch at ersetzt worden

Bild 2. Trocknungsdiagramm 53



Bergakademie
- Bucherei -
Freiberg i. Sa.



ist, werden die Koeffizienten in Abhängigkeit von p [at] bestimmt. Der Zusammenhang zwischen p und p' ist durch die Gleichung

$$p = p' + 1$$

gegeben.

Für die verschiedenen Werte von p wurden die Geradengleichungen ermittelt, indem durch Ablesen zweier Punkte der entsprechenden Geraden aus dem Teildiagramm III

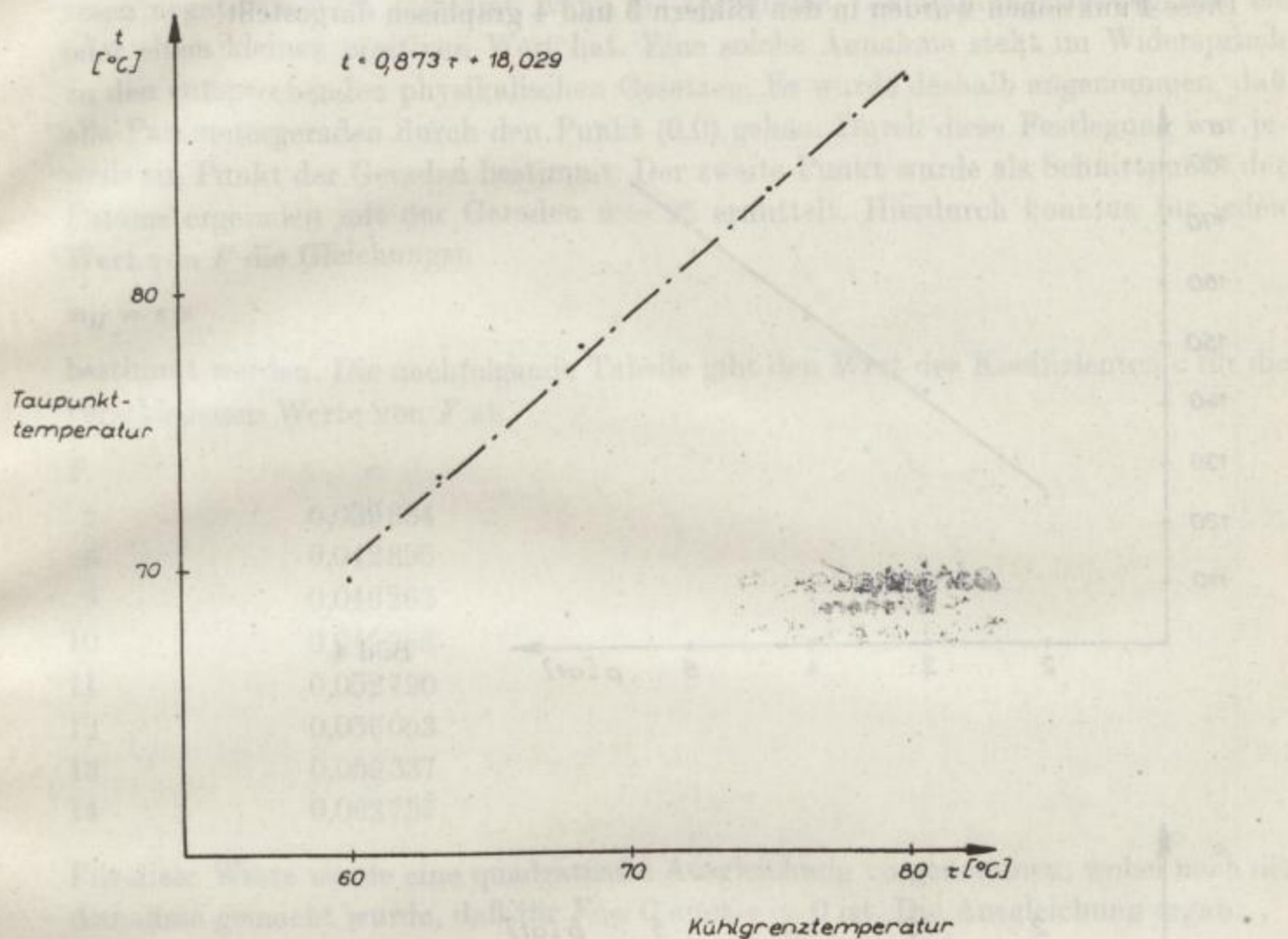


Bild 3

die dazugehörigen Koeffizienten c und d berechnet wurden. Es ergaben sich folgende Werte:

p	c	d
2	-0,92166	124,8157
3	-0,95390	142,0433
4	-0,97403	155,4224
4,5	-1,00671	
5	-1,03448	170,8618
5,5	-1,06195	

Da die Werte für den Koeffizienten c eine gewisse Streuung aufwiesen und zeichnerische Ungenauigkeiten im Diagramm angenommen werden müssen, wurden für c noch zwei Zwischenwerte bei $p = 4,5$ und $5,5$ ermittelt.

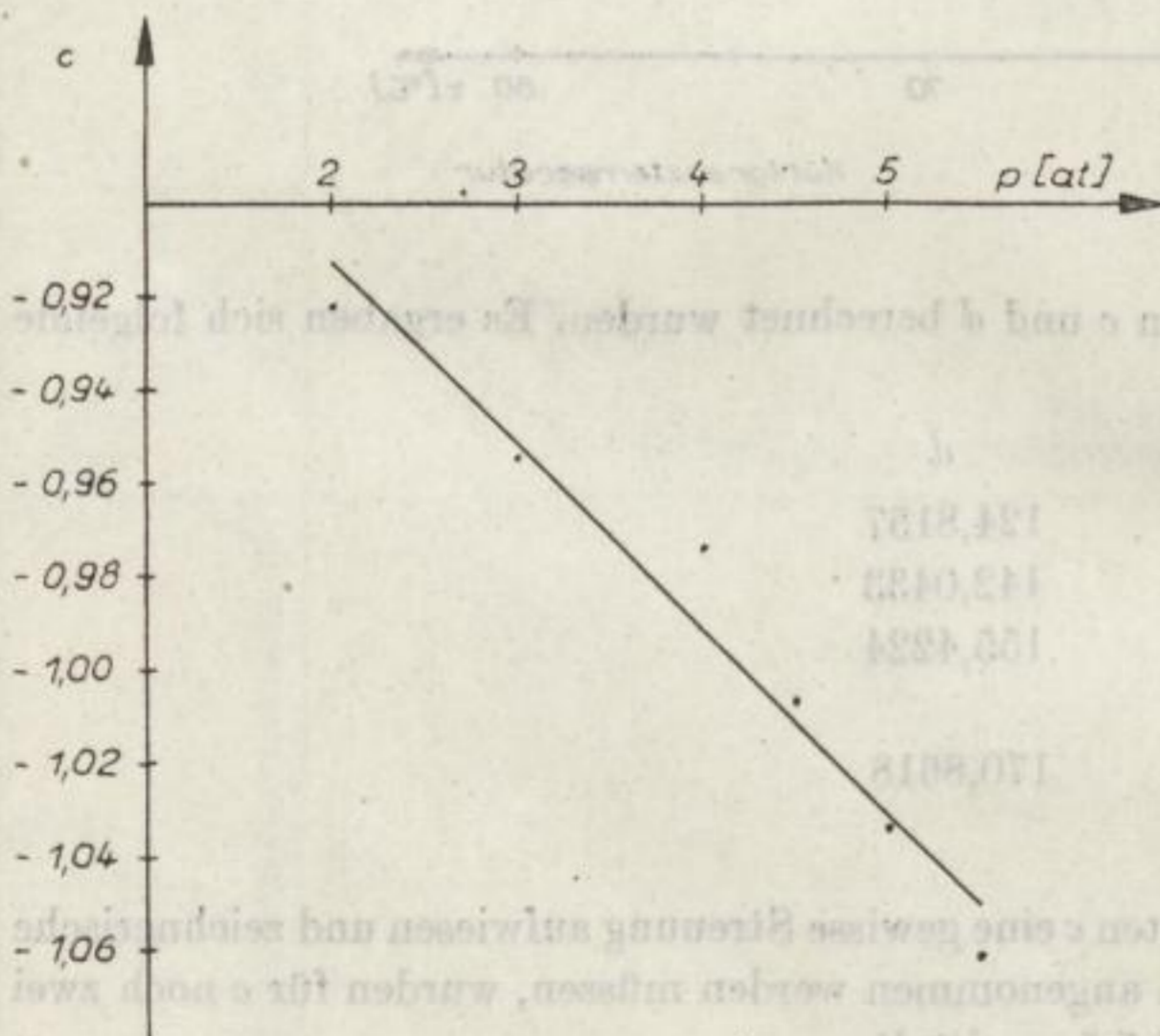
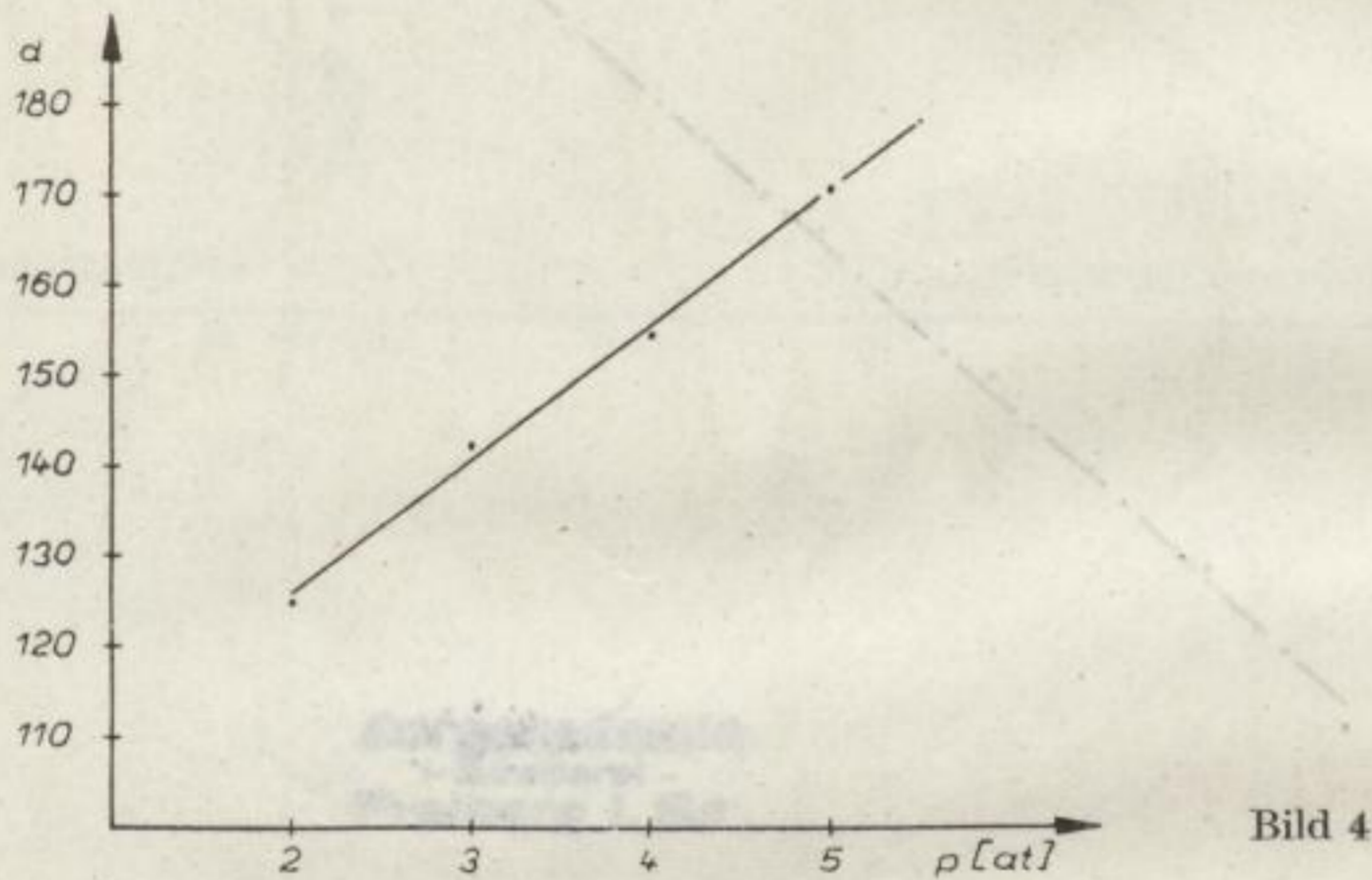
Die Werte c und d wurden in den Bildern 4 und 5 eingetragen. Ihre Darstellung läßt jeweils eine lineare Abhängigkeit vermuten.

Die lineare Ausgleichung ergab die Funktionen:

$$c = c(p) = -0,03924 p - 0,83516 \quad (38)$$

$$d = d(p) = 15,1517 p + 95,2548 \quad (39)$$

Diese Funktionen wurden in den Bildern 3 und 4 graphisch dargestellt.



4.3.3. Herleitung des Zusammenhanges zwischen der spezifischen Verdampfungsleistung m_H und der mittleren korrigierten Temperaturdifferenz u

Im Teildiagramm IV des Trocknungsdiagramms 53 ist der Zusammenhang der mittleren korrigierten Temperaturdifferenz u und der spezifischen Verdampfungsleistung m_H unter Berücksichtigung des Füllungsgrades F dargestellt. Dieser Zusammenhang ist linear. Die von F abhängenden Parametergeraden schneiden sich in dem Punkt $u = -6,71$ und $m_H = 0$. Das bedeutet, daß die mittlere korrigierte Temperaturdifferenz u einen negativen Wert annimmt, wenn die spezifische Verdampfungsleistung Null ist oder einen kleinen positiven Wert hat. Eine solche Annahme steht im Widerspruch zu den entsprechenden physikalischen Gesetzen. Es wurde deshalb angenommen, daß alle Parametergeraden durch den Punkt (0,0) gehen. Durch diese Festlegung war jeweils ein Punkt der Geraden bestimmt. Der zweite Punkt wurde als Schnittpunkt der Parametergeraden mit der Geraden $u = 95$ ermittelt. Hierdurch konnten für jeden Wert von F die Gleichungen

$$m_H = e u$$

bestimmt werden. Die nachfolgende Tabelle gibt den Wert des Koeffizienten e für die verschiedenen Werte von F an.

F	e
7	0,039 684
8	0,042 895
9	0,046 263
10	0,049 368
11	0,052 790
12	0,056 053
13	0,059 337
14	0,062 737

Für diese Werte wurde eine quadratische Ausgleichung vorgenommen, wobei noch die Annahme gemacht wurde, daß für $F = 0$ auch $e = 0$ ist. Die Ausgleichung ergab:

$$e = (-0,000 164 867 F + 0,006 684 08) F \quad (40)$$

Diese Funktion und die oben angegebenen empirischen Funktionswerte wurden im Bild 6 dargestellt.

4.3.4. Zusammenfassung der ermittelten Funktionen

In 4.3.1. wurde der Zusammenhang zwischen der Taupunkttemperatur t und der Kühlgrenztemperatur τ ermittelt. Es ergab sich die Beziehung

$$t = a \tau + b = 0,873 \tau + 18,029.$$

In 4.3.2. wurde die Funktion

$$\tau = c u + d = (-0,039 24 p - 0,835 16) u + 15,1517 p + 95,2548$$

für den Zusammenhang zwischen der Kühlgrenztemperatur τ und der mittleren korrigierten Temperaturdifferenz u gefunden. Setzt man die zweite Gleichung in die erste

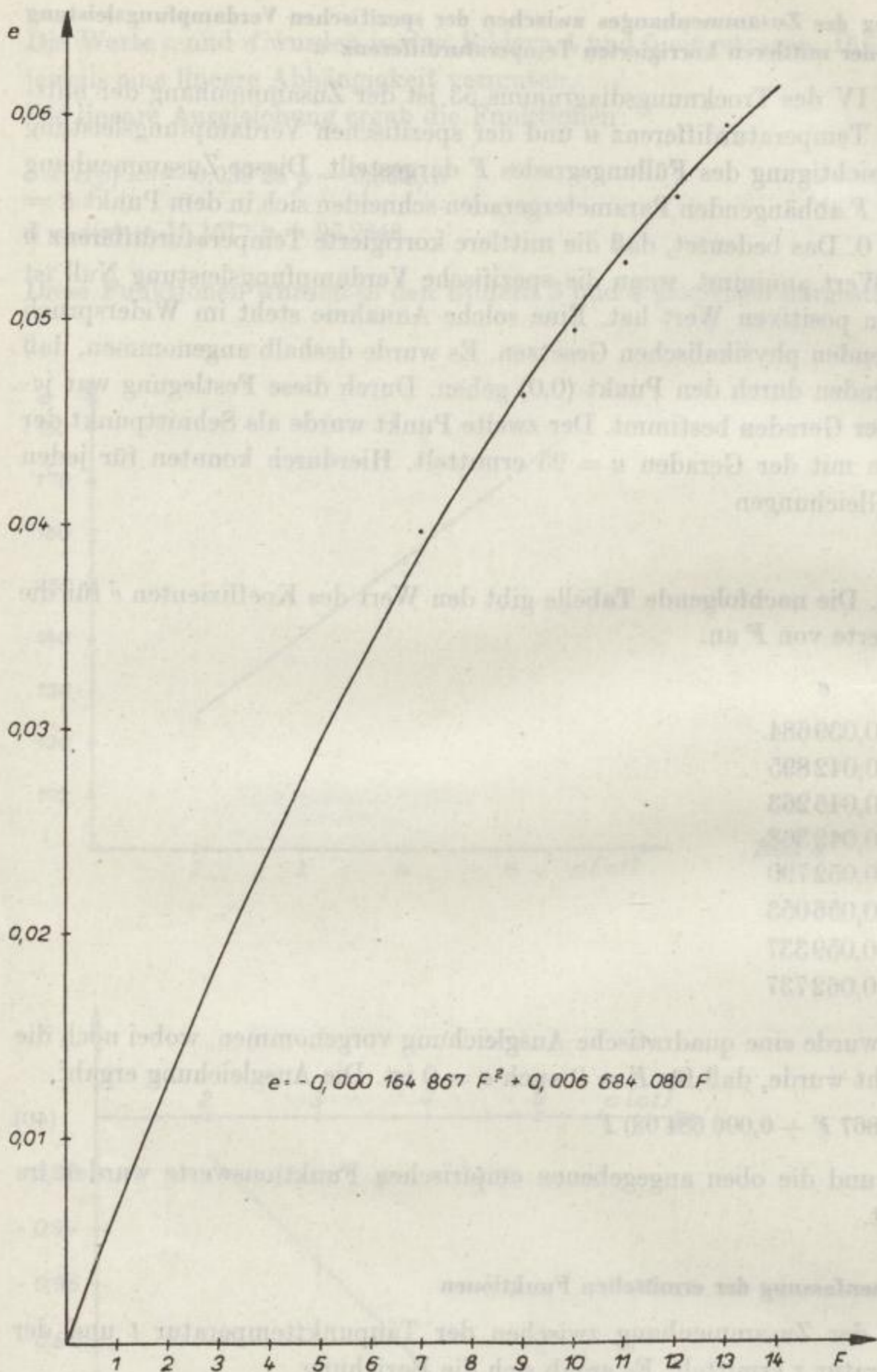


Bild 6

ein und löst die erste Gleichung nach u auf, so erhält man:

$$u = \frac{t - ad - b}{ac} = \frac{t - 13,227p - 101,186}{-0,034p - 0,729}$$

Diese Gleichung kann man in die in 4.3.3. zwischen m_H und u gefundene Beziehung einsetzen und erhält die spezifische Verdampfungsleistung in Abhängigkeit von der Taupunkttemperatur t , dem Trocknungsdampfdruck p und dem Füllungsgrad F .

$$m_H = (-0,000\ 165\ F + 0,006\ 684)\ F \cdot \frac{t - 13,227p - 101,186}{-0,034p - 0,729} \quad (41)$$

Somit ist die in 4.3. gestellte Aufgabe – die erneute Herleitung der spezifischen Verdampfungsleistung unter Zugrundelegung des Trocknungsdiagramms 53 und der in 4.3.3. formulierten Annahmen – gelöst.

Benutzt man das Resultat der in [19] enthaltenen Herleitung des Zusammenhanges zwischen der spezifischen Verdampfungsleistung mit und ohne Berücksichtigung der idealisierten spezifischen Kornoberfläche,

$$m_{H_2} = \frac{1}{-0,01\ O_{id} + 1,13} m_{H_1} \quad (42)$$

so kann man die Funktion der spezifischen Verdampfungsleistung m_H in Abhängigkeit von der Taupunkttemperatur t , des Trocknungsdampfdruckes p , des Füllungsgrades F und der idealisierten spezifischen Kornoberfläche O_{id} angeben:

$$m_{H_2} = \frac{1}{-0,01\ O_{id} + 1,13} (-0,000\ 165\ F + 0,006\ 684)\ F \cdot \frac{t - 13,227p - 101,186}{(-0,034p - 0,729)} \quad (43)$$

Der Index 1 und 2 in den Formeln (42) und (43) gibt die spezifische Verdampfungsleistung ohne und mit Berücksichtigung der idealisierten spezifischen Kornoberfläche an.

Die idealisierte spezifische Kornoberfläche wird in den weiteren Betrachtungen nicht berücksichtigt, d. h., es wird die Formel (41) für die weitere Herleitung benutzt. Da der Quotient in der Formel (42) für die in der Praxis vorkommenden Fälle nicht wesentlich von 1 verschieden ist, ist die Nichtberücksichtigung der idealisierten spezifischen Kornoberfläche gerechtfertigt.

4.4. Ermittlung des optimalen Füllungsgrades

In der Praxis werden Werte des Füllungsgrades von $F = 10$ bis $F = 15$ kg Rohbraunkohle/m² Heizfläche/h erreicht. Es ist von Interesse festzustellen, bei welchem Wert von F ein optimaler Füllungsgrad in bezug auf die spezifische Verdampfungsleistung erreicht wird.

Bei der Ermittlung des optimalen Füllungsgrades F wird von der Formel (41) ausgegangen. Die Formel (41) soll abgekürzt wie folgt geschrieben werden:

$$m_H = (-0,000\ 165\ F + 0,006\ 684)\ F \cdot u \quad (41a)$$

Der Füllungsgrad F kann nur positive Werte annehmen. Unter der Voraussetzung, daß die mittlere korrigierte Temperaturdifferenz u größer als Null ist, nimmt m_H das Minimum „Null“ für $F = 0$ an. Die spezifische Verdampfungsleistung m_H wird aber auch für $F = 40,51$ Null. Inwieweit dieser Wert genau oder näherungsweise mit einer

völligen Verstopfung der Trocknerrohre identisch ist, kann hier nicht untersucht werden. Da in der Praxis, wie bereits oben ausgeführt wurde, solche Werte nicht erreicht werden, ist das ohne Interesse.

Der optimale Füllungsgrad liegt zwischen den beiden o. a. Werten des Füllungsgrades. Man erhält den optimalen Füllungsgrad unter der Voraussetzung, daß $u > 0$ und konstant ist, aus der Beziehung

$$\frac{\partial m_H}{\partial F} = (-0,000\ 330\ F + 0,006\ 684)\ u = 0$$

zu

$$F_{\text{opt}} = 20,255 \left[\frac{\text{kg RBK}}{\text{m}^2\text{h}} \right] \quad (44)$$

Damit ist der optimale Füllungsgrad F ermittelt. Dieser Wert sagt aus, daß die spezifische Verdampfungsleistung m_H bei sonst gleichbleibenden Voraussetzungen verbessert werden kann, wenn der Füllungsgrad bis zu dem angegebenen Wert erhöht wird.

Es könnte jetzt die Frage gestellt werden, inwieweit können zeichnerische Ungenauigkeiten im Trocknungsdiagramm 53 die Herleitung und damit die Ermittlung des Wertes F_{opt} beeinflussen. F_{opt} ist noch mehrmals, jeweils auf eine andere Art und Weise, allerdings immer unter Benutzung des Trocknungsdiagramms 53, und zwar mit und ohne zusätzliche Annahmen, ermittelt worden. Die Werte lagen zwischen $F = 19$ und $F = 21$. Berücksichtigt man weiter, daß F von einigen Kohleeigenschaften abhängt und mithin auch F_{opt} in Abhängigkeit von diesen schwanken kann, so wird es richtig sein, den oben ermittelten Wert als den wahrscheinlichsten anzusehen und einen Schwankungsbereich von ± 1 kg RBK/m²h anzunehmen.

4.5. Die Umformung der Formel (34) für die spezifische Verdampfungsleistung von Baunack

Berücksichtigt man in der Formel (34) die idealisierte spezifische Kornoberfläche nicht ($O_{id} = 20$), so erhält man die folgende Beziehung:

$$m_H = 0,278 \left(\frac{n}{6} \right)^{0,22} (0,75\ t_s - \tau + 36) f_{HK} \quad (45)$$

Setzt man für τ die Beziehung (37) ein, so ergibt sich:

$$m_H = 0,278 \left(\frac{n}{6} \right)^{0,22} (0,75\ t_s - 1,146\ t + 56,65) f_{HK} \quad (46)$$

Die Sattedampftemperatur t_s läßt sich in dem betrachteten Bereich durch eine quadratische Funktion von p darstellen.

$$t_s = -0,481\ p^2 + 13,022\ p + 97,190 \quad (47)$$

Setzt man die letzte Beziehung in Gleichung (41) ein, so erhält man nach entsprechender Umformung:

$$m_H = -0,319 \left(\frac{n}{6}\right)^{0,22} (t + 0,315 p^2 - 8,523 p - 113,039) f_{HK} \quad (48)$$

4.6. Der Vergleich der neuen Formel für die spezifische Verdampfungsleistung mit der Formel von Baunack

Es ist in der Fortführung des in diesem Abschnitt dargelegten Gedankenganges interessant, die Formeln (41) bzw. (43) mit den Formeln (34) bzw. (48) zu vergleichen.

Die Formel (48) kann abgekürzt wie folgt geschrieben werden:

$$m_H = f_1(f_{HK}) f_2(n) f_3(p, t) \quad (48a)$$

Hierbei sei

$$f_3(p, t) = -0,319 (t - 0,315 p^2 - 8,523 p - 113,039)$$

Um die Formel (48a) mit der Formel (41) vergleichen zu können, wird die letztere ebenfalls in abgekürzter Form geschrieben:

$$m_H = f_4(F) u(p, t) \quad (41b)$$

Nimmt man nun an, es gilt

$$f_1(f_{HK}) f_2(n) = f_4(F)$$

(vgl. [10] und [12]), so müßte andererseits auch gelten:

$$f_3(p, t) = u(p, t)$$

In Wirklichkeit muß man annehmen, daß die beiden letzten Gleichungen nur bis auf noch zu bestimmende Konstanten richtig sind. Diese letzte Annahme gilt um so mehr, da die idealisierte spezifische Kornoberfläche bei diesen Betrachtungen nicht berücksichtigt wurde. Es wird daher die letzte Gleichung in der Form

$$f_3(p, t) = f'_3(p, t) u(p, t)$$

geschrieben, wobei nachzuweisen wäre, daß $f'_3(p, t)$ näherungsweise eine Konstante ist. Rechnet man $f'_3(p, t)$ für verschiedene Werte von p und t aus, so erkennt man, daß die Funktionswerte für kleine p um 0,25 schwanken. Es wird daher die Annahme gemacht

$$f'_3(p, t) = 0,25$$

Wir erhalten damit:

$$m_H = 0,25 f_1(f_{HK}) f_2(n) u(p, t) \quad (48b)$$

Man kann jetzt den Einfluß der idealisierten spezifischen Kornoberfläche ebenfalls berücksichtigen. Für die Formel von Baunack gilt:

$$m_{H_2} = \left(\frac{O_{id}}{20}\right)^{0,167} m_{H_1}$$

Diese von *Baunack* angegebene Beziehung für die idealisierte spezifische Kornoberfläche stimmt nicht völlig mit der in [19] abgeleiteten und der in Formel (42) angegebenen überein. Es wird daher gesetzt:

$$c_1 \left(\frac{O_{id}}{20} \right)^{0,167} = \frac{1}{-0,01 O_{id} + 1,13}$$

Für c_1 ergibt sich:

$$c_1 = 1,091$$

Man kann die Konstante in der Formel (48b) in zwei Konstanten c_1 und c_2 multiplikativ wie folgt aufteilen:

$$0,25 = 1,091 \cdot 0,229$$

Daher kann unter Berücksichtigung der idealisierten spezifischen Kornoberfläche an Stelle der Formel (48b) geschrieben werden:

$$m_H = c_1 f_5(O_{id}) c_2 f_2(n) f_1(f_{HK}) u(p, t)$$

oder ausführlich:

$$m_H = 1,091 \left(\frac{O_{id}}{20} \right)^{0,167} 0,229 \left(\frac{n}{6} \right)^{0,22} f_{HK} \frac{t - 13,227p - 101,186}{-0,034p - 0,729} \quad (49)$$

Diese Formel ist mit der neuen Formel (43) für die spezifische Verdampfungsleistung direkt vergleichbar. Das Produkt der ersten zwei Faktoren der Formel (49) entspricht dem ersten Faktor der Formel (43), und das Produkt der Faktoren 3 bis 5 entspricht dem Produkt, das aus dem zweiten und dritten Faktor der Formel (43) besteht. Der letzte Faktor ist bei beiden Formeln identisch.

Mit der Herleitung der Formeln (43) und (49) ist eine seit längerer Zeit von *Rademacher* erhobene Forderung zur Vereinigung der beiden bisher existierenden Trocknungsdiagramme und der ihnen entsprechenden Formeln erfüllt. Die erneute Herleitung einer Formel für die spezifische Verdampfungsleistung aus dem Trocknungsdiagramm 53 und den oben formulierten zusätzlichen Annahmen war eine notwendige Voraussetzung für die Herleitung des Zusammenhanges zwischen den Formeln (43) und (34). Es ist naheliegend, den hergeleiteten Zusammenhang in einem Diagramm darzustellen. Das ist in Bild 7 erfolgt. Das Diagramm hat die Bezeichnung Trocknungsdiagramm 64 erhalten. Das Trocknungsdiagramm 64 besteht aus sechs Teildiagrammen. Das erste Teildiagramm in der linken oberen Ecke stellt den Zusammenhang zwischen der Taupunkttemperatur und der Kühlgrenztemperatur dar. Auf der in diesem Teildiagramm eingezeichneten Geraden kann der spezifische Luftdurchsatz in kg Luft/kg Wasserverdampfung abgelesen werden.

Das zweite Teildiagramm stellt den Zusammenhang zwischen der Kühlgrenztemperatur und der mittleren korrigierten Temperaturdifferenz dar. Die Geraden im Teildiagramm II geben den Trocknungsdampfdruck p in at an.

Im dritten Teildiagramm (Mitte rechts) ist der Zusammenhang zwischen der mittleren korrigierten Temperaturdifferenz und der spezifischen Verdampfungsleistung m_{H_1} dargestellt. Als Parameter wurde in diesem Teildiagramm der Füllungsgrad F in kg Rohbraunkohle/m² Trocknerheizfläche \cdot h eingezeichnet.

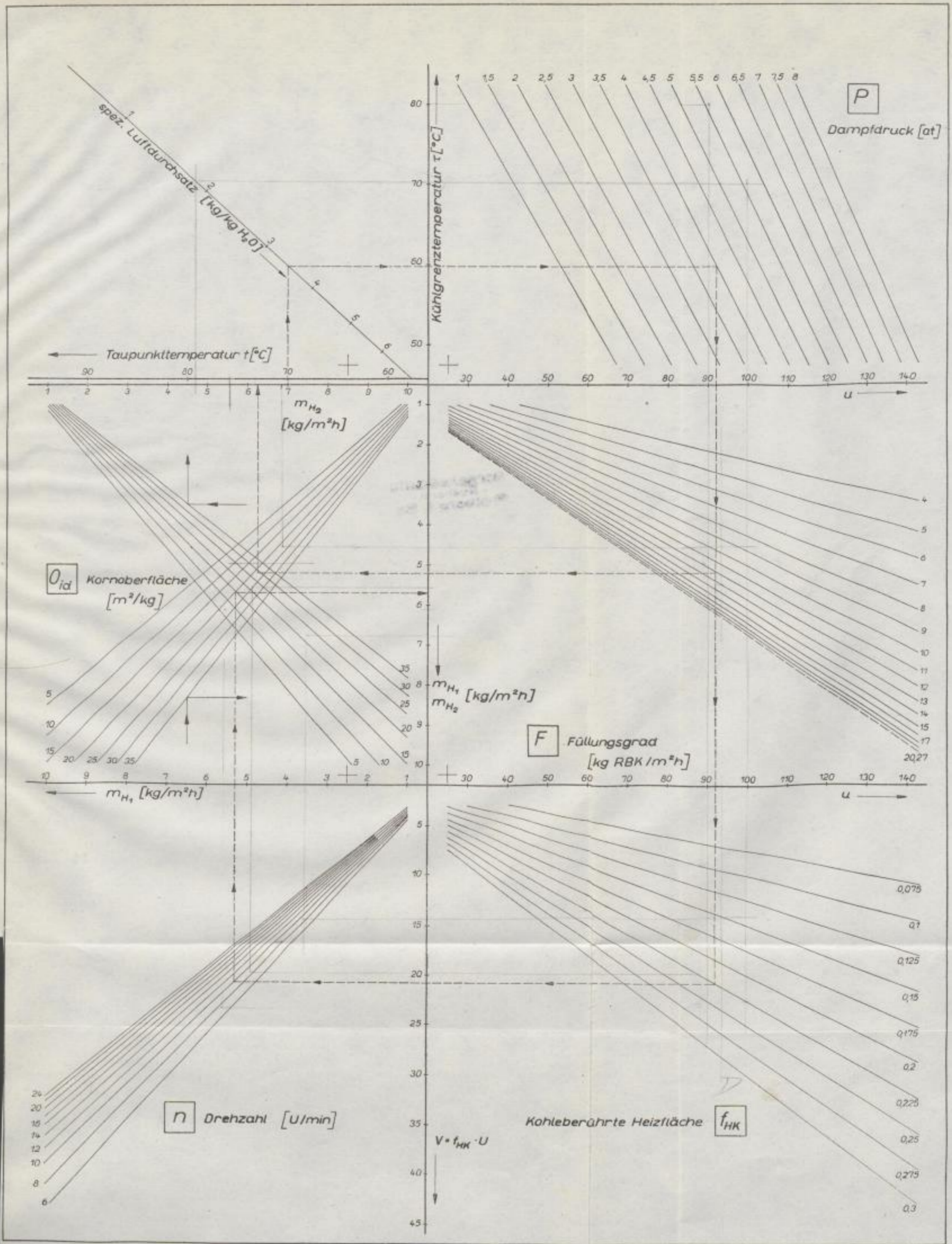


Bild 7. Trocknungsdiagramm 64

Bergakademie
- Bibliothek -
Freiberg i. Sa.

Das vierte Teildiagramm (Mitte links) enthält den durch Formel (42) angegebenen Zusammenhang zwischen der spezifischen Verdampfungsleistung ohne und mit Berücksichtigung der idealisierten spezifischen Kornoberfläche. Die spezifische Ver-

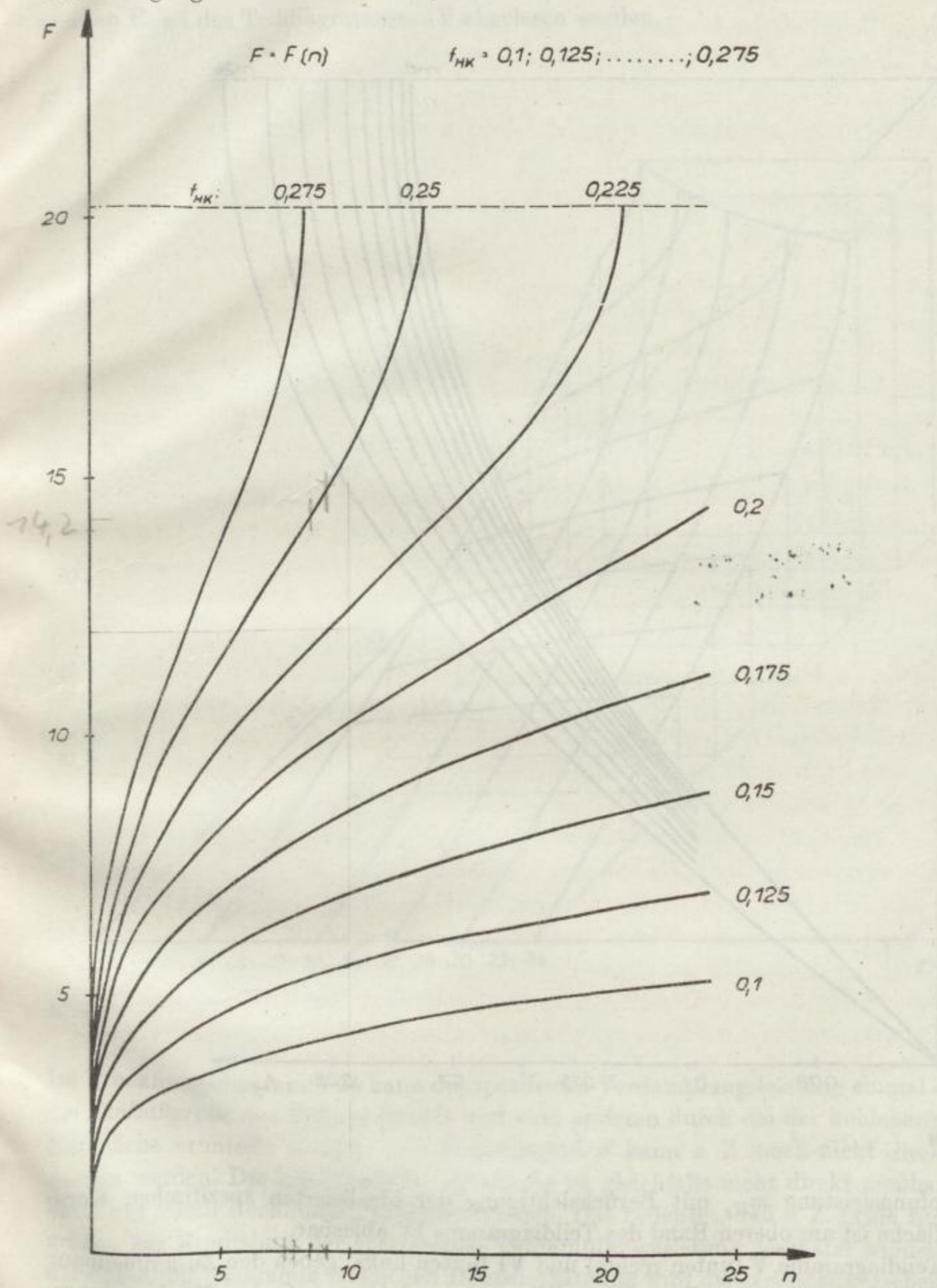


Bild 8

4 FFH A 379

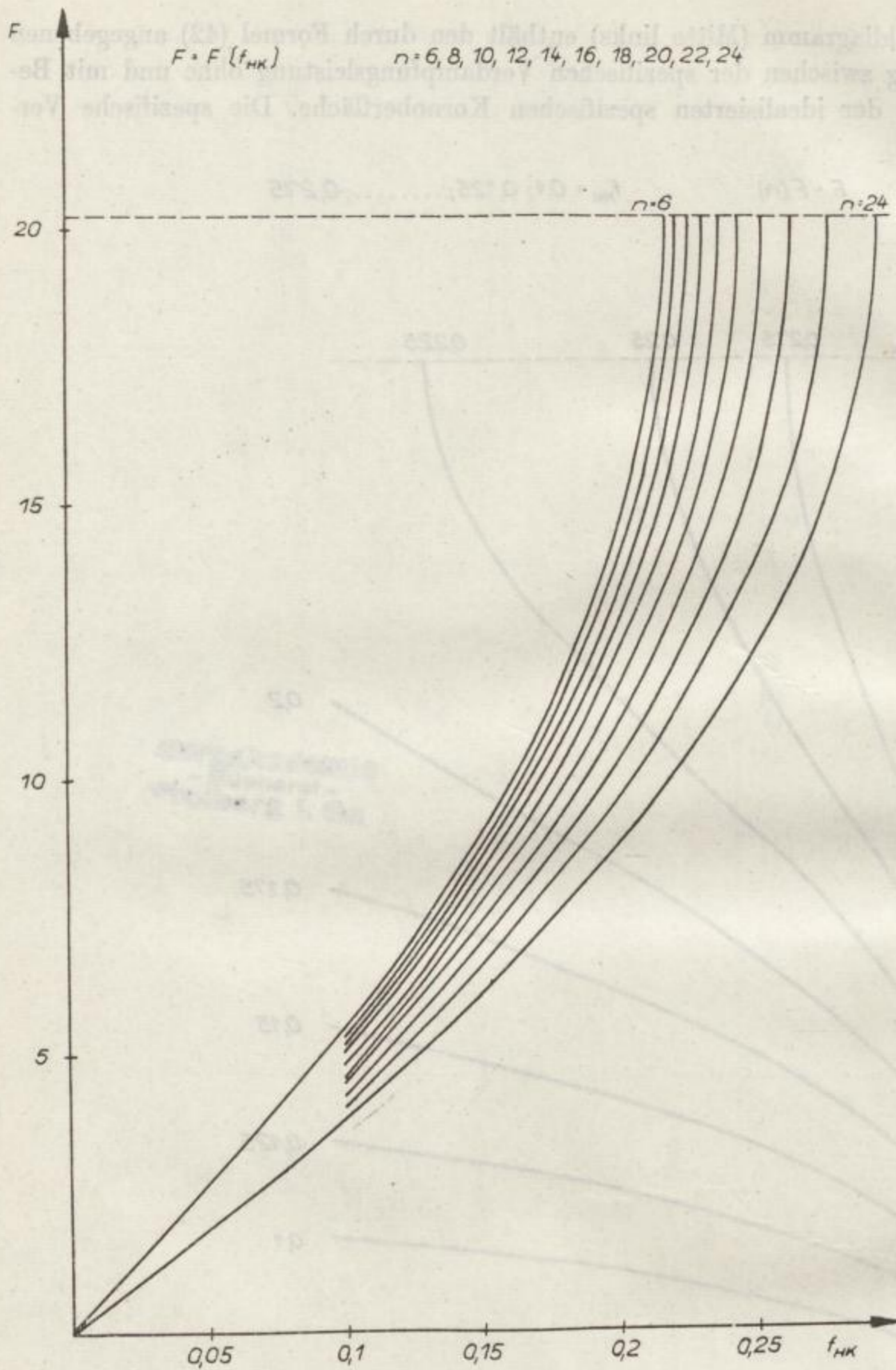


Bild 9

dampfungsleistung m_{H_2} mit Berücksichtigung der idealisierten spezifischen Kornoberfläche ist am oberen Rand des Teildiagramms IV ablesbar.

Die Teildiagramme V (unten rechts) und VI (unten links) geben den Zusammenhang der mittleren korrigierten Temperaturdifferenz u und der spezifischen Verdampfungs-

leistung m_{H_1} mit der kohleberührten Heizfläche f_{HK} und der Trocknerdrehzahl n an. Die spezifische Verdampfungsleistung m_{H_2} mit Berücksichtigung der idealisierten spezifischen Kornoberfläche kann dann bei Benutzung der unteren Teildiagramme am rechten Rand des Teildiagrammes IV abgelesen werden.

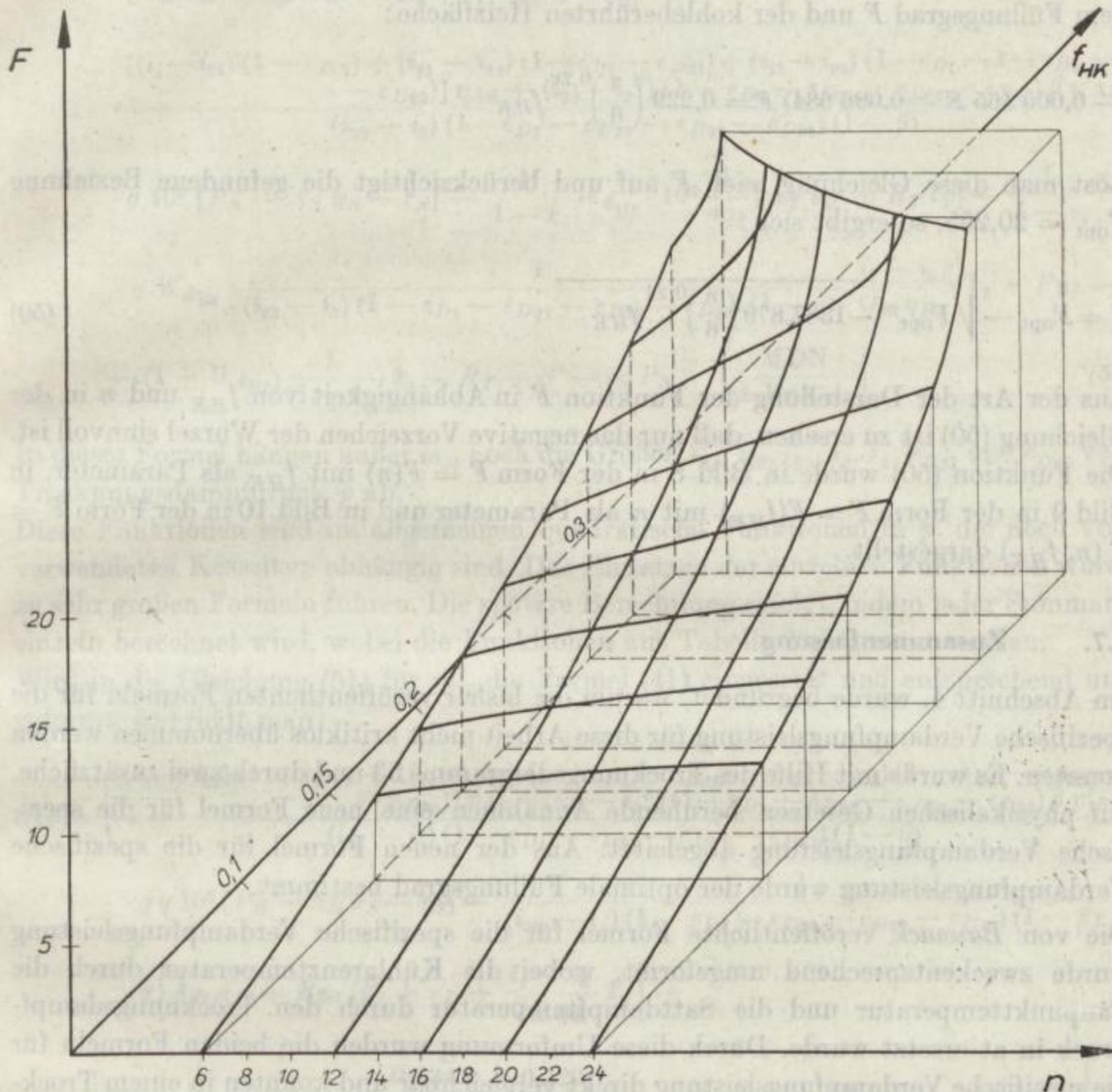


Bild 10

Im Trocknungsdiagramm 64 kann die spezifische Verdampfungsleistung einmal durch die Einflußgröße des Füllungsgrades und zum anderen durch die der kohleberührten Heizfläche ermittelt werden. Der Füllungsgrad F kann z. Z. noch nicht direkt gemessen werden. Die kohleberührte Heizfläche ist gleichfalls nicht direkt meßbar und kann nur durch Rechnungen ermittelt werden. Das bedeutet, daß z. Z. beide Einflußgrößen zur Ermittlung der spezifischen Verdampfungsleistung geschätzt werden. Mit der durch das Diagramm möglichen Doppelschätzung wird die Irrtumswahrscheinlichkeit im Mittel herabgesetzt.

4*

Es ist für verschiedene Zwecke, z. B. für die Verbesserung der Füllung, von Interesse, durch Berechnung der spezifischen Verdampfungsleistung die Füllung genau zu ermitteln. Das ist ebenfalls mit dem Trocknungsdiagramm 64 möglich.

Aus dem Vergleich der Formeln (41) und (48) folgt für den Zusammenhang zwischen dem Füllungsgrad F und der kohleberührten Heizfläche:

$$(-0,000\ 165\ F + 0,006\ 684)\ F = 0,229 \left(\frac{n}{6}\right)^{0,22} f_{HK}$$

Löst man diese Gleichung nach F auf und berücksichtigt die gefundene Beziehung $F_{\text{opt}} = 20,255$, so ergibt sich:

$$F = F_{\text{opt}} - \sqrt{F_{\text{opt}}^2 - 1387,879 \left(\frac{n}{6}\right)^{0,22} f_{HK}} \quad (50)$$

Aus der Art der Darstellung der Funktion F in Abhängigkeit von f_{HK} und n in der Gleichung (50) ist zu ersehen, daß nur das negative Vorzeichen der Wurzel sinnvoll ist. Die Funktion (50) wurde in Bild 8 in der Form $F = F(n)$ mit f_{HK} als Parameter, in Bild 9 in der Form $F = F(f_{HK})$ mit n als Parameter und in Bild 10 in der Form $F = F(n, f_{HK})$ dargestellt.

4.7. Zusammenfassung

Im Abschnitt 4. wurde begründet, warum die bisher veröffentlichten Formeln für die spezifische Verdampfungsleistung für diese Arbeit nicht kritiklos übernommen werden konnten. Es wurde mit Hilfe des Trocknungsdiagramms 53 und durch zwei zusätzliche, auf physikalischen Gesetzen beruhende Annahmen eine neue Formel für die spezifische Verdampfungsleistung abgeleitet. Aus der neuen Formel für die spezifische Verdampfungsleistung wurde der optimale Füllungsgrad bestimmt.

Die von *Baunack* veröffentlichte Formel für die spezifische Verdampfungsleistung wurde zweckentsprechend umgeformt, wobei die Kühlgrenztemperatur durch die Taupunkttemperatur und die Sattedampftemperatur durch den Trocknungsdampfdruck in a_t ersetzt wurde. Durch diese Umformung wurden die beiden Formeln für die spezifische Verdampfungsleistung direkt vergleichbar und konnten in einem Trocknungsdiagramm zusammen graphisch dargestellt werden. Aus dem Vergleich der beiden Formeln ergab sich der Zusammenhang zwischen dem Füllungsgrad und der kohleberührten Heizfläche in Form einer einfachen Funktion.

5. Aufstellung der Gewinnfunktion

5.1. Die Gewinnfunktion basierend auf der neuen Formel für die spezifische Verdampfungsleistung

Die Funktion $G(p)$ wurde in 2.10., Gleichung (26 a), zusammengefaßt. Setzt man in diese Gleichung die Ausdrücke für $a_D(p)$, $a_S(p)$, $a_T(p)$ und $b_R(p)$, d. h. die Gleichungen

(8), (10), (11) und (18) ein, so erhält man:

$$\begin{aligned}
 G(p) = & - \frac{1}{1-v} q W_{dBr} \frac{1}{(i_{23} - i_3) (1 - e_{D1} - e_{D21} - e_{D22} - e_{D23}) (1 - \beta)} \cdot \\
 & \cdot [A_D \alpha_D + B_{Kr} l_K + r_D] + \frac{1}{1-v} q W_{dBr} \cdot \\
 & \cdot \frac{[(i_1 - i_{21}) (1 - e_{D1}) + (i_{21} - i_{22}) (1 - e_{D1} - e_{D21}) + (i_{22} - i_{23}) (1 - e_{D1} - e_{D21} - e_{D22})] \eta_{Ag} + (i_{23} - i_3^*) (1 - e_{D1} - e_{D21} - e_{D22} - e_{D23}) \beta \eta'_{Ag}}{(i_{23} - i_3) (1 - e_{D1} - e_{D21} - e_{D22} - e_{D23}) (1 - \beta)} \\
 & \cdot g 10^3 [P_S - A_S \alpha_S - r_S] - \frac{1}{1-v} W_{dBr} \cdot 10^3 \frac{1}{m_H} [A_T \alpha_T + B_T l_T] - \frac{1}{1-v} \cdot \\
 & \cdot q W_{dBr} \frac{1}{(i_{23} - i_3) (1 - e_{D1} - e_{D21} - e_{D22} - e_{D23}) (1 - \beta)} \frac{i_1 - i_5}{Q_K \eta_K} \cdot k_2 + P_{Br} - \\
 & - (1 + W_{dBr}) \frac{1}{1-v} \cdot k_1 - R_T - S' - e_S P_S \quad \left[\frac{\text{MDN}}{\text{t Brik./h}} \right] \quad (51)
 \end{aligned}$$

In dieser Formel hängen außer m_H noch die Größen i_{21} , i_{22} , i_{23} , i_3 , i_4 , e_{D21} und e_{D22} vom Trocknungsdampfdruck p ab.

Diese Funktionen sind im allgemeinen quadratische Funktionen in p , die noch vom verwendeten Kesseltyp abhängig sind. Das Einsetzen der einzelnen Funktionen würde zu sehr großen Formeln führen. Die spätere Berechnung erfolgt, indem jeder Summand einzeln berechnet wird, wobei die Funktionen aus Tabelle 2 eingesetzt werden.

Wird in die Gleichung (51) für m_H die Formel (41) eingesetzt und entsprechend umgeformt, so erhält man:

$$\begin{aligned}
 G(p) = & \left\{ \frac{[(i_1 - i_{21}) (1 - e_{D1}) + (i_{21} - i_{22}) (1 - e_{D1} - e_{D21}) + (i_{22} - i_{23}) (1 - e_{D1} - e_{D21} - e_{D22})] \eta_{Ag} + (i_{23} - i_3^*) (1 - e_{D1} - e_{D21} - e_{D22} - e_{D23}) \beta \eta'_{Ag}}{(i_{23} - i_3) (1 - e_{D1} - e_{D21} - e_{D22} - e_{D23}) (1 - \beta)} \cdot \right. \\
 & \cdot g q 10^3 [P_S - A_S \alpha_S - r_S] - \frac{1}{(i_{23} - i_3) (1 - e_{D1} - e_{D21} - e_{D22} - e_{D23}) (1 - \beta)} \cdot \\
 & \cdot q \left[A_D \alpha_D + B_{Kr} l_{Kr} + r_D + \frac{i_1 - i_4}{Q_K \eta_K} k_2 \right] - \\
 & \left. - \frac{-0,034 p - 0,729}{(0,00165 F + 0,006684) F (t - 13,227 p - 101,186)} \cdot 10^3 [A_T \alpha_T + B_T l_T] \right\} \cdot \\
 & \cdot \frac{W_{dBr}}{1-v} + P_{Br} - (1 + W_{dBr}) \frac{1}{1-v} k_1 - R_T - S' - e_S P_S \quad \left[\frac{\text{MDN}}{\text{t Brik./h}} \right] \quad (52)
 \end{aligned}$$

5.2. Die Gewinnfunktion basierend auf der Formel (48) von Baunack

Setzt man in die Gleichung (51) die Formel (48) ein, so erhält man:

$$G(p) = \left\{ \frac{[(i_1 - i_{21}) (1 - e_{D1}) + (i_{21} - i_{22}) (1 - e_{D1} - e_{D21}) + (i_{22} - i_{23}) (1 - e_{D1} - e_{D21} - e_{D22})] \eta_{Ag} + (i_{23} - i_3^*) (1 - e_{D1} - e_{D21} - e_{D22} - e_{D23}) \beta \eta'_{Ag}}{(i_{23} - i_3) (1 - e_{D1} - e_{D21} - e_{D22} - e_{D23}) (1 - \beta)} \cdot \right.$$

$$\begin{aligned}
 & \cdot g q 10^3 [P_S - A_S \alpha_S - r_S] - \frac{1}{(i_{22} - i_3) (1 - e_{D1} - e_{D21} - e_{D23} - e_{D23}) (1 - \beta)} \\
 & \cdot q \left[A_D \alpha_D + B_{Kr} l_{Kr} + r_D + \frac{i_1 - i_3}{Q_K \eta_K} k_2 \right] \\
 & \cdot \frac{1}{-0,319 \left[\frac{n}{6} \right]^{0,22} (t + 0,315 p^2 - 3,523 p - 113,039) f_{HK}} \cdot 10^3 [A_T \alpha_T + B_T l_T] \left. \right\} \\
 & \cdot \frac{W_{dBr}}{1 - v} + P_{Br} (1 + W_{dBr}) \frac{1}{1 - v} k_1 - R_T - S' - e_S P_S \left[\frac{\text{MDN}}{t \text{ Brik./h}} \right] \quad (53)
 \end{aligned}$$

5.3. Die Gewinnfunktion bei nicht konstanten Abgabepreisen für die Elektroenergie

Durch die Industriepreisreform wurden mit Wirkung vom 1. 4. 1964 neue Abgabepreise gültig. Hierbei veränderten sich die Abgabepreise für Briketts, Rohbraunkohle und Elektroenergie. Die Preise für Briketts und Rohbraunkohle blieben im Gegensatz zum Abgabepreis für Elektroenergie Fixpreise.

Zur Ermittlung des Abgabepreises für Elektroenergie gilt folgende Regel: Die Selbstkosten der Stromerzeugung werden mit 1,095 multipliziert und ergeben den Abgabepreis. Die Selbstkosten des Dampfes gehen hierbei anteilig ein, wobei für die Bewertung die thermodynamische Methode zugrunde gelegt wird. Die Kesselkohleeinsatzkosten bleiben bei der Multiplikation mit dem Faktor 1,095 unberücksichtigt.

Über den Wert einer solchen Regelung soll in dieser Arbeit nicht polemisiert werden. Der Gesetzgeber ist offensichtlich davon ausgegangen, daß die in Gegendruckkraftwerken erzeugte Menge an Elektroenergie in jedem Falle benötigt wird. Die Regelung gewährleistet die Rentabilität jedes Werkes. Allerdings kann nicht übersehen werden, daß eine Brikettfabrik, deren Kraftwerk hohe Selbstkosten hat, auch den größten Reingewinn aus der Elektroenergieerzeugung erzielt.

Aus dieser Tatsache darf gefolgert werden, daß diese Regelung für den Abgabepreis an Elektroenergie nur vorübergehend gelten wird.

In diesem Abschnitt soll für die Gewinnfunktion der Abgabepreis P_S unter der Annahme der oben dargelegten Preisbildung hergeleitet werden. Hierzu ist es notwendig, zuerst das thermodynamische Bewertungsverfahren darzulegen.

Beim kalorischen Verfahren erfolgt die Bewertung verhältnismäßig zu den bei der Elektroenergieerzeugung und bei der Trocknung genutzten Enthalpiedifferenzen. Bezeichnet man mit S_D die Selbstkosten der Dampferzeugung, so sind

$$S_{DTr} = S_D \frac{i_{23} - i_3}{i_1 - i_3}; \quad S_{DS} = S_D = \frac{i_1 - i_{23}}{i_1 - i_3} \quad (54)$$

die Dampfeinsatzkosten bei der Trocknung und bei der Elektroenergieerzeugung.

Im Gegensatz zum kalorischen Verfahren wird bei der thermodynamischen Bewertungsmethode als das Gesamtenthalpiegefälle nicht die Differenz der Enthalpien bei Turbineneintritt i_1 und bei Trockneraustritt i_3 , sondern die Differenz von i_1 und i_3^* zugrunde gelegt. i_3^* ist die Enthalpie des Dampfes im Kondensator bei Kondensations-

betrieb. D. h., die Selbstkostenaufteilung des Dampfes bei dem thermodynamischen Bewertungsverfahren erfolgt nach den Gleichungen

$$S_{D_{Tr}} = S_D \frac{i_{23} - i_3^*}{i_1 - i_3^*}; S_{D_S} = S_D \frac{i_1 - i_{23}}{i_1 - i_3^*} \quad (55)$$

Die Gleichungen (55) sind für die Herleitung der Selbstkosten der Elektroenergieerzeugung in dieser Form noch nicht verwertbar, weil sie den Dampfeigenverbrauch nicht berücksichtigen. Sie geben nur den Grundgedanken des Bewertungsverfahrens an. Geht man davon aus, daß der Eigenverbrauch an Dampf im Kraftwerk benötigt wird, so kann man die anteiligen Selbstkosten des Dampfes den Selbstkosten der Elektroenergieerzeugung zurechnen. Bei dieser Voraussetzung ergibt sich folgende allgemeine Aufteilung der Selbstkosten des Dampfes:

$$S_{D_{Tr}} = S_D (1 - e_{D1} - e_{D21} - e_{D22} - e_{D23}) (1 - \beta) \frac{i_{23} - i_3^*}{i_1 - i_3^*} \quad (56)$$

für den Trocknungsdampfdruck und

$$S_{D_S} = S_D - S_{D_{Tr}} \quad (57)$$

für die Elektroenergieerzeugung.

S_D seien die Selbstkosten, bezogen auf 1 t Brikettproduktion/h. Für S_D gilt:

$$S_D = a_D(p) (A_D \alpha_D + B_D l_D + r_D) + a_D(p) b_R(p) k_2 \quad (58)$$

Nach Gleichung (56) und (57) gilt für die Dampfeinsatzkosten bei der Elektroenergieerzeugung:

$$S_{D_S} = S_D \left[1 - (1 - e_{D1} - e_{D21} - e_{D22} - e_{D23}) (1 - \beta) \frac{i_{23} - i_3^*}{i_1 - i_3^*} \right] \quad (59)$$

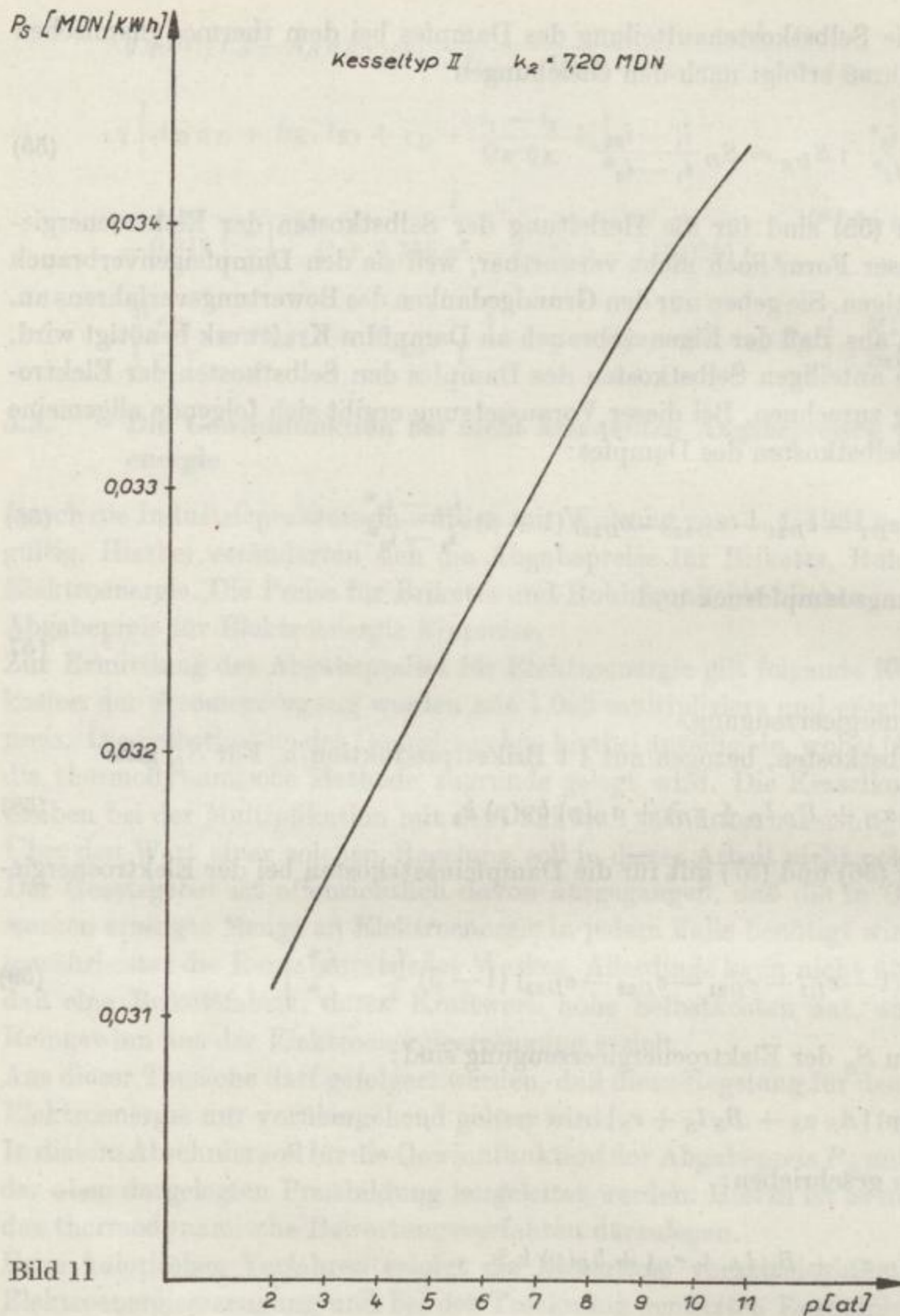
Die Selbstkosten S_S der Elektroenergieerzeugung sind:

$$S_S = S_{D_S} + a_S(p) [A_S \alpha_S + B_S l_S + r_S]$$

der ausführlich geschrieben:

$$S_S = a_D(p) \left\{ [(A_D \alpha_D + B_D l_D + r_D) + b_R(p) k_2] \cdot \left[1 - (1 - e_{D1} - e_{D21} - e_{D22} - e_{D23}) (1 - \beta) \frac{i_{23} - i_3^*}{i_1 - i_3^*} \right] + b_S(p) [A_S \alpha_S + B_S l_S + r_S] \right\} \quad (60)$$

Die Gleichung (60) gibt die gesamten Selbstkosten für die Erzeugung von $a_S(p) = a_D(p) \cdot b_S(p)$ kWh bei den nach der thermodynamischen Methode ermittelten Dampfeinsatzkosten an (siehe Gl. (10)). Multipliziert man S_S mit 1,095 und beachtet, daß die Kesselkohleeinsatzkosten $a_D(p) b_R(p) k_2$ (siehe Gl. (20)) nicht mitmultipliziert werden, so er-



hält man nach Division durch die erzeugte Menge an Elektroenergie den Abgabepreis für eine kWh.

$$P_S = \frac{1,095}{b_S(p)} \left\{ \left[A_D \alpha_D + B_D l_D + r_D \right] + \frac{1,095}{1} b_R(p) k_2 \right. \\ \cdot \left[1 - (1 - e_{D1} - e_{D21} - e_{D22} - e_{D23}) (1 - \beta) \frac{i_{23} - i_3^*}{i_1 - i_3^*} \right] \\ \left. + b_S(p) [A_S \alpha_S + B_S l_S + r_S] \right\} \left[\frac{\text{MDN}}{\text{kWh}} \right] \quad (61)$$

Damit ist der Abgabepreis für 1 kWh nach der oben angegebenen Festlegung hergeleitet worden. Dieser Abgabepreis hängt vom Trocknungsdampfdruck p ab. Im Bild 11 wurde P_S in Abhängigkeit von p beim Kesseltyp II dargestellt. Das Bild 11 zeigt, daß P_S den Wert 0,031 bis 0,033 für $p = 2$ bis $p = 7$ annimmt. Bemerkenswert ist, daß P_S sehr groß ist und nur eine geringe Variabilität zeigt. Die erste Tatsache ist durch die Art der Bewertung der Dampfeinsatzkosten begründet.

Man kann entgegen der Voraussetzung, daß die Kosten für den als Eigenverbrauch für die Vorwärmung im Kraftwerk benötigten Dampf der Elektroenergieerzeugung zugerechnet werden, auch eine anteilige Aufteilung der Kosten auf den Trocknungsdampf und den Dampf für die Erzeugung von Elektroenergie betrachten. Die vorstehenden Gleichungen (56) bis (61) behalten auch für diesen Fall ihre volle Gültigkeit. Es ist in diesen Gleichungen dann der Eigenverbrauch $e = 0$ zu setzen.

Errechnet man bei dieser Annahme den Elektroenergieabgabepreis P_S , so erhält man für $p = 2$ at $P_S = 0,0289$ MDN/kWh und für $p = 7$ at $0,0283$ MDN/kWh.

Auf das Einsetzen der Beziehung (61) in die Formeln (52) bzw. (53) wird verzichtet. Die Gewinnfunktion $G(p)$ wird für mehrere Werte von P_S berechnet. Hierdurch ist es möglich, die sich aus der Veränderung der Abgabepreise P_S ergebenden Konsequenzen festzustellen. Die Ermittlung des optimalen Trocknungsdampfdruckes bleibt damit auch gegenüber anderen Preisfestlegungen von P_S invariant.

6. Aufstellung der Gewinnfunktion bei der Verwendung von Trocknern mit engen Rohren

6.1. Die technologischen Grundlagen der Verwendung von Trocknern mit engen Rohren und die sich aus den experimentellen und theoretischen Untersuchungen ergebenden ökonomischen Resultate

Nach neueren experimentellen [3], [8] und [20] und theoretischen [11] und [21] Untersuchungen führt die Verwendung von engen Rohren bei Röhrentrocknern zur Leistungssteigerung. Die vorliegenden Arbeiten betrachten die Veränderung der technischen und ökonomischen Kennziffern bei Herabsetzung des Innendurchmessers eines Trockenrohres von 100,5 mm auf 75 mm. Ein Innendurchmesser von 75 mm wird z. Z. als beste Lösung angesehen.

In der Arbeit [21] wird der Großtrockner mit 4070 m² Heizfläche und mit einem Trockenrohrdurchmesser von 100,5/108 mm als Ausgangsbasis benutzt, um Veränderungen zu einem Bezugstrockner mit 75/80 mm Rohrdurchmesser zu untersuchen. Hierbei ergeben sich zwei Varianten:

1. die Verdampfungsleistung bleibt unverändert,
2. die Außenabmessungen des Trockners bleiben unverändert.

Bei der ersten Variante erhält man einen Trockner mit 1836 Trockenrohren gegenüber 1608 Rohren beim Trockner mit 4070 m² Heizfläche, aber mit geringerer Stirnfläche. Ein solcher Trockner hat 3450 m² Heizfläche. Bei der zweiten Variante erhält man einen Trockner mit 4800 m² Heizfläche bei 2550 Rohren.

Die ökonomischen Untersuchungen haben ergeben, daß die zweite Variante vorteilhafter ist. Wörtlich heißt es in [21] Seite 137:

„Bei der Frage, welcher Art der Trocknerveränderung der Vorzug gegeben werden soll, ob bei gleichen Trockenkohleleistungen und daraus resultierenden kleineren Trocknerdurchmesser oder bei Beibehaltung der Hauptabmessungen, so muß gesagt werden, daß, wenn die größeren Umfangsgeschwindigkeiten im Bereich der Trocknerperipherie an dem größeren Trockner im Betriebsgeschehen beherrscht werden, die letztere, ökonomisch gesehen, bedeutend günstiger ist.“

Aus diesem Grunde soll in der vorliegenden Arbeit nur diese Variante betrachtet werden. Da die Ergebnisse der experimentellen und der theoretischen Untersuchungen gut übereinstimmen und für den Großtrockner bisher nur theoretische Untersuchungen vorliegen, werden im weiteren die in der Arbeit [21] ermittelten bzw. daraus errechneten Werte benutzt.

Die spezifische Verdampfungsleistung verändert sich gemäß der Beziehung

$$m_{H_1} = m_{H_0} \left[\frac{D_0}{D_1} \right]^{0,564} \quad (62)$$

wobei unter D der Innendurchmesser des Trockenrohres verstanden werden soll. Der Index 0 bezieht sich auf den Ausgangstrockner (4070 m² Heizfläche) und der Index 1 auf den Bezugstrockner (4800 m² Heizfläche). Für unsere Arbeit gilt in Anlehnung an [21]

$$D_0 = 100,5 \text{ mm}$$

$$D_1 = 75,0 \text{ mm.}$$

Rechnet man für diese Werte den Faktor der Gleichung (62) aus, so erhält man

$$\epsilon_m = \left[\frac{D_0}{D_1} \right]^{0,564} = 1,1794$$

d. h., die spezifische Verdampfungsleistung steigt annähernd um 18%.

Bei der Herleitung der Erhöhung der spezifischen Verdampfungsleistung wurde der Füllungsgrad nicht berücksichtigt. Durch die Erhöhung der spezifischen Verdampfungsleistung bei der Verwendung von Trocknern mit engen Rohren erhöht sich der Füllungsgrad um den gleichen Faktor und bewirkt dadurch eine zusätzliche Erhöhung der spezifischen Verdampfungsleistung.

Es wäre bei den Untersuchungen an Trocknern mit engen Rohren experimentell interessant festzustellen, ob der vorher angegebene optimale Füllungsgrad von annähernd 20 kg/m²h erreicht werden kann.

Bei den Investitionskosten tritt eine Verringerung um 8,9% ein. Infolge der Erhöhung der spezifischen Verdampfungsleistung ergibt sich eine Steigerung der Arbeitskräfte/m² Heizfläche um 9,5%.

Für das Drehzahlverhältnis gilt nach [21] die Beziehung:

$$\epsilon_n = \left[\frac{D_0^2}{D_1^2} \right]^{1,282} = \left[\frac{D_0}{D_1} \right]^{2,564} = 2,11785$$

Führen wir für die Änderung der Investitionskosten und der Arbeitskräfte Symbole ein, so können wir schreiben:

$$\epsilon_J = 0,911$$

$$\epsilon_{Ak} = 1,095$$

Die letzten beiden Veränderungen müßten bei Benutzung von Trocknern mit engen Rohren in allen Gleichungen des vorangegangenen Abschnittes berücksichtigt werden. Das würde folgende Ersetzungen bedeuten:

$$A_T \rightarrow A_T \epsilon_J$$

$$B_T \rightarrow B_T \epsilon_{Ak}$$

Die Größe ϵ_m , die die Veränderung der spezifischen Verdampfungsleistung m_H angibt, kann auch in allen Gleichungen des Abschnittes 5 verwendet werden. In den Gleichungen aber, in die die Formel 48 (Formel nach *Baunack*) eingegangen ist, kann die Veränderung der spezifischen Verdampfungsleistung durch die Veränderung der Drehzahl ϵ_n ausgedrückt werden.

6.2. Aufstellung der Gewinnfunktion bei der Verwendung von Trocknern mit engen Rohren

Setzt man ϵ_m , ϵ_J und ϵ_{Ak} in die Gleichung (52) ein, so erhält man:

$$G(p) = \left\{ \frac{[(i_1 - i_{21})(1 - e_{D1}) + (i_{21} - i_{22})(1 - e_{D1} - e_{D21}) + (i_{22} - i_{23})(1 - e_{D1} - e_{D21} - e_{D22})] \eta_{Ag} + (i_{23} - i_3^*) (1 - e_{D1} - e_{D21} - e_{D22} - e_{D23}) \beta \eta'_{Ag}}{(i_{23} - i_3) (1 - e_{D1} - e_{D21} - e_{D22} - e_{D23}) (1 - \beta)} \right. \\ \cdot g q 10^3 [P_S - A_S \alpha_S - r_S] - \frac{1}{(i_{23} - i_3) (1 - e_{D1} - e_{D21} - e_{D22} - e_{D23}) (1 - \beta)} \\ \cdot q \left[A_D \alpha_D + B_{Kr} l_{Kr} + r_D + \frac{i_1 - i_4}{Q_K \eta_K} k_2 \right] \\ \left. - \frac{0,034 p - 0,729}{(-0,000 165 F + 0,006 684) F (t - 13,227 p - 101,186)} \epsilon_m \right\} \\ \cdot 10^3 [A_T \epsilon_J \alpha_T + B_T \epsilon_{Ak} l_T] \left\{ \frac{W_{dBr}}{1 - v} + P_{Br} - (W_{dBr}) \frac{1}{1 - v} k_1 - R_T - S' - e_S P_S \right. \\ \left. \left[\frac{MDN}{t \text{ Brik./h}} \right] \right\} \quad (63)$$

Setzt man ϵ_n , ϵ_J und ϵ_{Ak} in die Gleichung (53) ein, so ergibt sich:

$$G(p) = \left\{ \frac{[(i_1 - i_{22})(1 - e_{D1}) + (i_{21} - i_{22})(1 - e_{D1} - e_{D21}) + (i_{22} - i_{23})(1 - e_{D1} - e_{D21} - e_{D22})] \eta_{Ag} + (i_{23} - i_3^*) (1 - e_{D1} - e_{D21} - e_{D22} - e_{D13}) \beta \eta'_{Ag}}{(i_{23} - i_3) (1 - e_{D1} - e_{D21} - e_{D22} - e_{D23}) (1 - \beta)} \right. \\ \cdot g q 10^3 [P_S - A_S \alpha_S - r_S] - \frac{1}{(i_{23} - i_3) (1 - e_{D1} - e_{D21} - e_{D22} - e_{D23}) (1 - \beta)} \\ \cdot q \left[A_D \alpha_D + B_{Kr} t_{Kr} + r_D + \frac{i_1 - i_4}{Q_K \eta_K} k_2 \right] -$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{0,319 \left[\frac{n \varepsilon_n}{6} \right]^{0,22} (t + 0,315 p^2 - 8,523 p - 113,039) f_{HK}} \\
 & \cdot 10^3 [A_T \varepsilon_J \alpha_T + B_T \varepsilon_{Ak} l_T] \left\{ \frac{W_{dBr}}{1-v} + P_{Br} - (1 + W_{dBr}) \frac{1}{1-v} k_1 \right. \\
 & \left. - R_T - S' - e_S P_S \left[\frac{\text{MDN}}{\text{t Brik./h}} \right] \right\} \quad (64)
 \end{aligned}$$

Diese Beziehungen stellen die allgemeinsten Funktionen für den Gewinn in Abhängigkeit vom Trocknungsdampfdruck p dar, wenn für die spezifische Verdampfungsleistung m_D einmal die Formel (41) und zum anderen die Formel (48) benutzt wird. Werden Trockner mit normalen Rohren verwendet, so wird $\varepsilon_m = \varepsilon_n = \varepsilon_J = \varepsilon_{Ak} = 1$. Liegt kein Kondensationsanteil vor, so wird $\beta = 0$.

7. Ergebnisse der Berechnung der Gewinnfunktion

7.1. Die Durchführung der Rechnungen

Die Ermittlung des optimalen Trocknungsdampfdruckes erfolgt durch Berechnung der Gewinnfunktion $G(p)$ im Bereich von $p = 2$ at bis $p = 11$ at. Die obere Intervallgrenze wurde für Grenzbetrachtungen in der angegebenen Höhe gewählt. Für die zur Zeit verwendeten Trockner gilt 6 at bis 7 at als obere Grenze für eine auf den Trocknungsdampfdruck bezogene Fahrweise. Bei der Erhöhung des Trocknungsdampfdruckes über diese Schranke hinaus gelten andere spezifische Anlagekosten im Trockendienst. Das müßte bei der Berechnung der Gewinnfunktion im Bereich $p > 7$ at berücksichtigt werden. Da es sich in diesem Bereich nur um Grenzbetrachtungen handelt, wurden die spezifischen Anlagekosten nicht verändert. Der sich hierdurch ergebende Fehler wurde abgeschätzt. Die Werte der Gewinnfunktion werden über p in Bildern graphisch dargestellt. Hierdurch ist es möglich, den optimalen Trocknungsdampfdruck p_{opt} zu erkennen und die Gewinnminderung bei einer betrieblichen Fahrweise außerhalb des Optimums abzulesen.

Für die Berechnung der Gewinnfunktion wurden die in Tabelle 2 angegebenen Funktionen für die Enthalpien in Abhängigkeit vom Trocknungsdampfdruck und die in Tabelle 3 zusammengestellten Werte für die Konstanten benutzt. Die Berechnung der Gewinnfunktionen erfolgte für alle drei Kesseltypen, wobei beim Kesseltyp II die Berechnung sowohl nach Formel (63) als auch nach Formel (64) erfolgte. Bei den Kesseltypen I und III wurde die Gewinnfunktion nur nach Formel (63) berechnet.

Bei der Berechnung wurde unterschieden zwischen der Elektroenergieerzeugung mit und ohne Kondensations- bzw. Kondensationsentnahmeturbinen, kurz als mit und ohne Kond.-anteil bezeichnet. Die Größe des Kond.-anteils wurde nicht variiert.

Die Berechnung wurde für Trockner mit normalen Rohren und für Trockner mit engen Rohren durchgeführt. Außerdem wurde der Füllungsgrad F mit den Werten $F = 10, 12$ und 14 bzw. die kohleberührte Heizfläche f_{HK} mit den Werten $f_{HK} = 0,2$ und $0,25$ variiert.

Tabelle 3. Benutzte Zahlenwerte

	Symbol	Maßeinheit	Kesseltyp		
			I	II	III
			Betrag		
Temperatur des Dampfes bei Turbineneintritt	t_1	°C	535	520	455
Druck des Dampfes bei Turbineneintritt	p_1	at	127	89	43
Enthalpie des Dampfes bei Turbineneintritt	i_1	$\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$	821,72	821,72	797,55
Konstante, nicht vom Trocknungsdampfdruck abhängige Selbstkosten	S'	MDN t Brik. t H ₂ O	5,00	5,00	5,00
Menge verdampften Wassers pro t Trockenkohle	W_{dBr}	t Trk.	1	1	1
Heizwert der Kesselkohle	Q_K	$\frac{\text{kcal}}{\text{kg RBK}}$	1800	1800	1800
Wärmeaufwand um 1 kg Wasser im Röhrentrockner zu verdampfen (einschl. Dampfzuleitung)	q	$\frac{\text{kcal}}{\text{kg H}_2\text{O}}$	740	740	740
Trocknungsdampfdruck	p	at	2 ... 11	2 ... 11	2 ... 11
Verlustfaktor an Trockenkohle	v		0,03	0,03	0,03
Enthalpie des Dampfes im Kondensator	i_3^*	$\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$	557,0	557,0	557,0
Mengenmäßiger Anteil des Eigenbedarfes an Frischdampf	e_{D1}		0,0072	0,0072	0,0072
Mengenmäßiger Anteil des in den Kondensations-turbinen ausgenutzten Dampfes	β		0,166154	0,166154	0,166154
Umrechnungsfaktor von kcal zu kWh	g	$\frac{\text{kWh}}{\text{kcal}}$	0,00116272	0,00116272	0,00116272
Produkt des mechanischen und des Generatoren-wirkungsgrades	$\eta_{Ag} = \eta'_{Ag}$		0,93	0,93	0,93
Mechanischer Wirkungsgrad	η_m		0,96	0,96	0,96
Generatorwirkungsgrad	η_G		0,97	0,97	0,97
Kesselwirkungsgrad	η_K		0,85	0,82	0,80
Anlagekosten zur Erzeugung von 1 t Dampf/h	A_D	MDN t Dampf/h	150000	134000	102000

Tabelle 3 (Fortsetzung)

	Symbol	Maßeinheit	Kesseltyp		
			I	II	III
			Betrag		
Anlagekosten zur Erzeugung von 1 kW	A_S	$\frac{\text{MDN}}{\text{kW}}$	475	490	515
Anlagekosten im Trockendienst, bezogen auf 1 m ² Heizfläche	A_T	$\frac{\text{MDN}}{\text{m}^2\text{H}}$	550	550	550
Jährlicher Abschreibungssatz Kesselanlage	α'_D	%	4,26	4,26	4,26
Jährlicher Abschreibungssatz Turbinenanlage	α'_S	%	4,26	4,26	4,26
Jährlicher Abschreibungssatz Trockendienst	α'_T	%	4,15	4,15	4,15
Stündliche Abschreibung Kesselanlage	α_D		$6,553846 \cdot 10^{-6}$	$6,553846 \cdot 10^{-6}$	$6,553846 \cdot 10^{-6}$
Stündliche Abschreibung Turbinenanlage	α_S		$6,085714 \cdot 10^{-6}$	$6,085714 \cdot 10^{-6}$	$6,085714 \cdot 10^{-6}$
Stündliche Abschreibung Trockendienst	α_T		$5,039466 \cdot 10^{-6}$	$5,039466 \cdot 10^{-6}$	$5,039466 \cdot 10^{-6}$
Benutzungsstundenanzahl/a in der Kesselanlage	h_D	h/a	6500	6500	6500
Benutzungsstundenanzahl/a in der Turbinenanlage	h_S	h/a	7000	7000	7000
Benutzungsstundenanzahl/a im Trockendienst	h_T	h/a	8235	8235	8235
Arbeitskräftebedarf im Kraftwerk, bezogen auf 1 t Dampf/h	B_{Kr}	$\frac{\text{Ak}}{\text{t Dampf}}$	0,380	0,400	0,420
Arbeitskräftebedarf/m ² Heizfläche	B_T	$\frac{\text{Ak}}{\text{m}^2}$	$1,31 \cdot 10^{-3}$	$1,31 \cdot 10^{-3}$	$1,31 \cdot 10^{-3}$
Mittlere Lohnkosten pro Person und h im Kraftw.	l_{Kr}	$\frac{\text{MDN}}{\text{h}}$	4,40	4,30	4,20
Mittlere Lohnkosten pro Person und h im Trockendienst	l_T	$\frac{\text{MDN}}{\text{h}}$	4,10	4,10	4,10
Reparaturkosten im Trockendienst pro t Briketts	R_T	$\frac{\text{MDN}}{\text{t Briketts}}$	0,04	0,04	0,04

	Symbol	Maßeinheit	Kesseltyp		
			I	II	III
			Betrag		
Spezifische Reparaturkosten/t Dampf	r_D	$\frac{\text{MDN}}{\text{t Dampf}}$	0,2638	0,18344	0,18344
Spezifische Reparaturkosten/kW	r_S	$\frac{\text{MDN}}{\text{kWh}}$	$0,5746 \cdot 10^{-3}$	$0,43 \cdot 10^{-3}$	$0,43 \cdot 10^{-3}$
Betriebsabgabepreis für 1 kWh (alter Wert)	P_S	$\frac{\text{MDN}}{\text{kW}}$	0,0205	0,0205	0,0205
Betriebsabgabepreis für 1 t Briketts (alter Wert)	P_{Br}	$\frac{\text{MDN}}{\text{t Briketts}}$	17,05	17,05	17,05
Kosten für 1 t Rohbraunkohle (alter Wert)	$k_1 = k_2$	$\frac{\text{MDN}}{\text{t RBK}}$	3,05	3,05	3,05
Betriebsabgabepreis für 1 kWh (neuer Wert)	P_S	$\frac{\text{MDN}}{\text{kW}}$	0,020 ... 0,040	0,014 ... 0,030	0,014 ... 0,030
Betriebsabgabepreis für 1 t Briketts (neuer Wert)	P_{Br}	$\frac{\text{MDN}}{\text{t Briketts}}$	36,50	36,50	36,50
Kosten für 1 t Rohbraunkohle, Trockner (neuer Wert)	k_1	$\frac{\text{MDN}}{\text{t RBK}}$	8,00	8,00	8,00
Kosten für 1 t Rohbraunkohle, Kessel (neuer Wert)	k_2	$\frac{\text{MDN}}{\text{t RBK}}$	6,00; 7,20	6,00; 7,20	6,00; 7,20
Gesamteigenverbrauch an Elektroenergie	ϵ_S	$\frac{\text{kWh}}{\text{t Briketts}}$	98	89	76
Trockenrohrdurchmesser	D_0 D_1	mm	100,5 75,0	100,5 75,0	100,5 75,0
Drehzahl des Trockners	n	$\frac{\text{U}}{\text{min}}$	8	8	8
Taupunkttemperatur	t	°C	70	70	70
Änderung bei engen Rohren:					
Änderung der Anlagekosten/m ² Heizfläche	ϵ_J		0,911	0,911	0,911
Änderung des Arbeitskräftebedarfs/m ² Heizfläche	ϵ_{Ak}		1,095	1,095	1,095
Änderung der spezifischen Verdampfungsleistung	ϵ_m		1,18	1,18	1,18
Änderung der Drehzahl	ϵ_n		2,11785	2,11785	2,11785
Füllungsgrad	F	$\frac{\text{kg RBK}}{\text{m}^3\text{h}}$	10; 12; 14	10; 12; 14	10; 12; 14
Kohleberührte Heizfläche	f_{HK}		0,2; 0,25	0,2; 0,25	0,2; 0,25

Durchführung der Rechnungen

51

Bei Gegenüberstellung von Trocknern mit normalen und mit engen Rohren wurde die durch die Veränderung der spezifischen Verdampfungsleistung bedingte Veränderung des Füllungsgrades nicht berücksichtigt. Hierdurch tritt eine zusätzliche Gewinnerhöhung bei Verwendung von Trocknern mit engen Rohren ein.

Für alle Berechnungen wurde die spezifische Wasserauftrocknung W_{dBr} in kg Wasser/kg Trockenkohle gleich 1 gesetzt. W_{dBr} beeinflusst, wie bereits im Abschnitt 2. nachgewiesen wurde, die Lage des Optimums nicht.

Die Rechnungen wurden mit dem programmgesteuerten elektronischen Digitalrechner ZRA 1 durchgeführt. Durch die Programmierung dieser Aufgabe für den ZRA 1 war es möglich, die Rechnung sehr billig durchzuführen. Die Berechnung eines Wertes der Gewinnfunktion kostete 17,7 Pf. Die Berechnung erfolgte sowohl für die bis zum 31. 3. 1964 gültigen Preise als auch für die nach dem 1. 4. 1964 geltenden Preise.

7.2. Ergebnisse beim Kesseltyp I

Für den Kesseltyp I, der bisher in der Kohleindustrie nicht zum Einsatz gekommen ist¹, wurde für die Berechnung die Gewinnfunktion (63) benutzt. Das Ergebnis der Berechnung der Gewinnfunktion mit den nach dem 1. 4. 1964 geltenden Preisen für den Füllungsgrad $F = 14$ wird im Bild 12 graphisch dargestellt. Parallel zur Ordinate wurde bei $p = 4$ at eine gestrichelte Linie eingezeichnet. Eine Herabsetzung des Trocknungsdampfdruckes unter 4 at führt beim Kesseltyp I zur Verschlechterung des inneren Wirkungsgrades. Man erkennt im Bild 12 die starke Abhängigkeit der Höhe des Gewinns vom Elektroenergieabgabepreis. Der optimale Trocknungsdampfdruck hängt ebenfalls in starkem Maße vom Elektroenergieabgabepreis ab. Mit Vergrößerung des Elektroenergieabgabepreises verschiebt sich die Lage des Optimums in Richtung kleinerer Werte von p .

Vergleicht man den Einfluß der verschiedenen Füllungsgrade auf die Lage des Optimums, so stellt man fest, daß nur beim Elektroenergieabgabepreis $P_s = 0,026$ MDN/kWh ein wesentlicher Unterschied bei $F = 12$ gegenüber $F = 10$ auftritt. Bei $F = 12$ ist $p_{opt} = 3,2$ at, während bei $F = 10$ $p_{opt} = 4,7$ at beträgt. Der Gewinn ist bei $F = 12$ gegenüber $F = 10$ im Optimum um etwa 0,20 MDN/t Brikettproduktion größer. Beim Füllungsgrad $F = 14$ sind die Gewinnkurven gegenüber $F = 12$ fast parallel verschoben. Bei $F = 14$ ist eine Gewinnerhöhung um etwa 0,12 MDN gegenüber $F = 12$ festzustellen.

Die Werte der Gewinnfunktionen wurden einmal mit und einmal ohne Kond.-anteil berechnet. Der Kond.-anteil betrug bei diesen Berechnungen etwa $1/6$, d. h., daß etwa 17% der Dampfmenge in den Kondensations- bzw. Kondensationsentnahmeturbinen zur Elektroenergieerzeugung benutzt wurden. Bei der möglicherweise nichtzutreffenden Annahme, daß $\eta_{Ag} = \eta'_{Ag}$ ist, konnte kein Einfluß des Kond.-anteils auf die Lage des Optimums festgestellt werden.

¹ Im KSP wurden Kessel eingesetzt, die nicht dem standardisierten Kesseltyp I entsprechen, aber mit diesem näherungsweise vergleichbar sind.

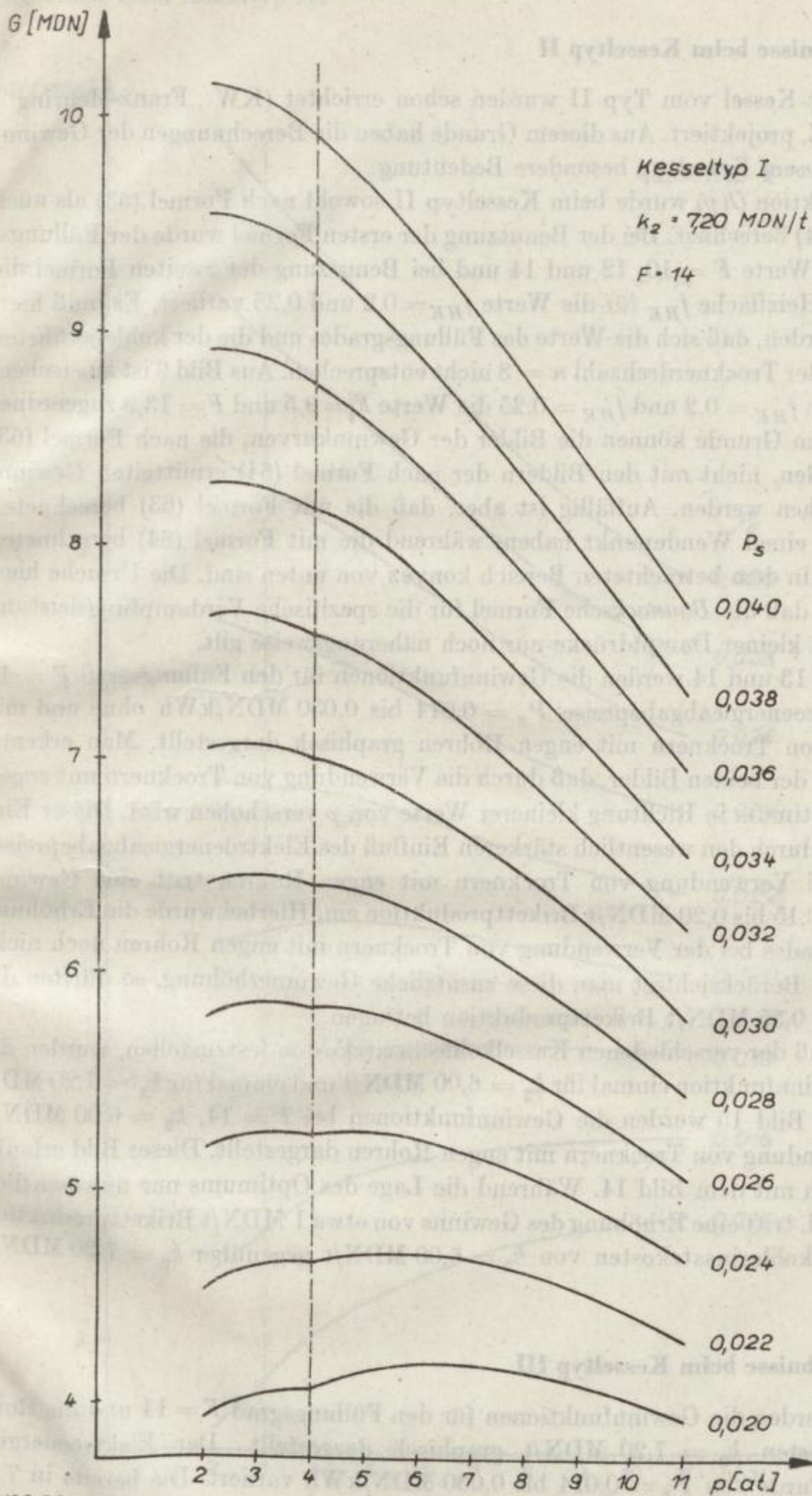


Bild 12

5 FFH A 379

7.3. Ergebnisse beim Kesseltyp II

Kraftwerke mit Kessel vom Typ II wurden schon errichtet (KW „Franz-Mehring“) und werden z. Z. projektiert. Aus diesem Grunde haben die Berechnungen der Gewinnfunktion bei diesem Kesseltyp besondere Bedeutung.

Die Gewinnfunktion $G(p)$ wurde beim Kesseltyp II sowohl nach Formel (63) als auch nach Formel (64) berechnet. Bei der Benutzung der ersten Formel wurde der Füllungsgrad F für die Werte $F = 10, 12$ und 14 und bei Benutzung der zweiten Formel die kohleberührte Heizfläche f_{HK} für die Werte $f_{HK} = 0,2$ und $0,25$ variiert. Es muß hierbei bemerkt werden, daß sich die Werte des Füllungsgrades und die der kohleberührten Heizfläche bei der Trocknerdrehzahl $n = 8$ nicht entsprechen. Aus Bild 9 ist zu ersehen, daß den Werten $f_{HK} = 0,2$ und $f_{HK} = 0,25$ die Werte $F = 9,5$ und $F = 13,9$ zugeordnet sind. Aus diesem Grunde können die Bilder der Gewinnkurven, die nach Formel (63) berechnet wurden, nicht mit den Bildern der nach Formel (64) ermittelten Gewinnkurven verglichen werden. Auffällig ist aber, daß die mit Formel (63) berechneten Gewinnkurven einen Wendepunkt haben, während die mit Formel (64) berechneten Gewinnkurven in dem betrachteten Bereich konvex von unten sind. Die Ursache hierfür liegt darin, daß die *Baunacksche* Formel für die spezifische Verdampfungsleistung in dem Bereich kleiner Dampfdrücke nur noch näherungsweise gilt.

In den Bildern 13 und 14 werden die Gewinnfunktionen für den Füllungsgrad $F = 14$ und die Elektroenergieabgabepreise $P_S = 0,014$ bis $0,030$ MDN/kWh ohne und mit Verwendung von Trocknern mit engen Rohren graphisch dargestellt. Man erkennt beim Vergleich der beiden Bilder, daß durch die Verwendung von Trocknern mit engen Rohren das Optimum in Richtung kleinerer Werte von p verschoben wird. Dieser Einfluß wird aber durch den wesentlich stärkeren Einfluß des Elektroenergieabgabepreises überlagert. Bei Verwendung von Trocknern mit engen Rohren tritt eine Gewinnerhöhung von $0,15$ bis $0,20$ MDN/t Brikettproduktion ein. Hierbei wurde die Erhöhung des Füllungsgrades bei der Verwendung von Trocknern mit engen Rohren noch nicht berücksichtigt. Berücksichtigt man diese zusätzliche Gewinnerhöhung, so dürften die Werte $0,30$ bis $0,35$ MDN/t Brikettproduktion betragen.

Um den Einfluß der verschiedenen Kesselkohleeinsatzkosten festzustellen, wurden die Werte der Gewinnfunktion einmal für $k_2 = 6,00$ MDN/t und einmal für $k_2 = 7,20$ MDN/t berechnet. Im Bild 15 werden die Gewinnfunktionen bei $F = 14$, $k_2 = 6,00$ MDN/t und bei Verwendung von Trocknern mit engen Rohren dargestellt. Dieses Bild erlaubt einen Vergleich mit dem Bild 14. Während die Lage des Optimums nur unwesentlich beeinflusst wird, tritt eine Erhöhung des Gewinns von etwa 1 MDN/t Brikettproduktion bei den Kesselkohleeinsatzkosten von $k_2 = 6,00$ MDN/t gegenüber $k_2 = 7,20$ MDN/t auf.

7.4. Ergebnisse beim Kesseltyp III

Im Bild 16 werden die Gewinnfunktionen für den Füllungsgrad $F = 14$ und die Rohkohleeinsatzkosten $k_2 = 7,20$ MDN/t graphisch dargestellt. Der Elektroenergieabgabepreis wurde von $P_S = 0,014$ bis $0,030$ MDN/kWh variiert. Die bereits in 7.2. und 7.3. festgestellte Abhängigkeit der Lage des Optimums vom Elektroenergie-

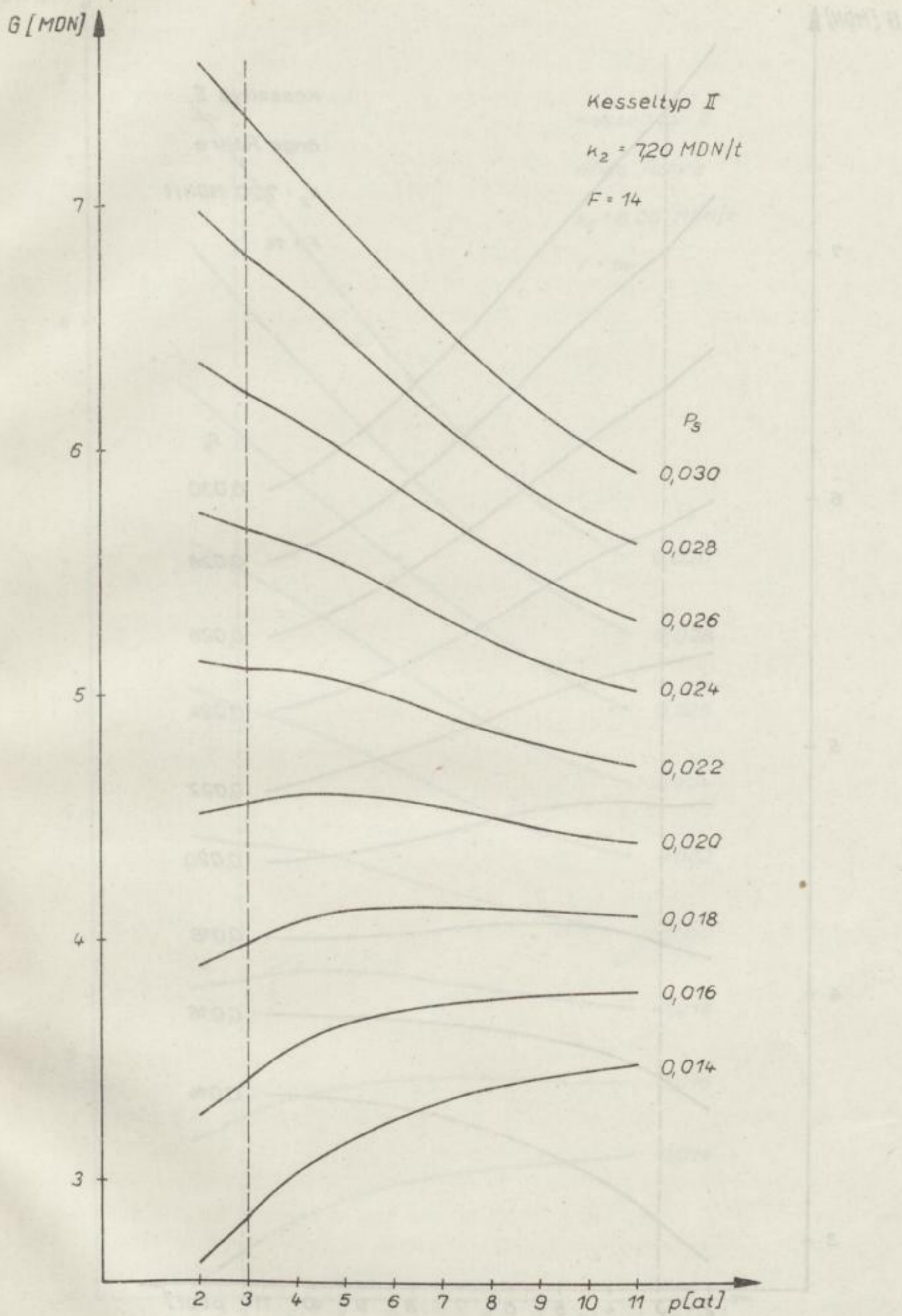


Bild 13

5*

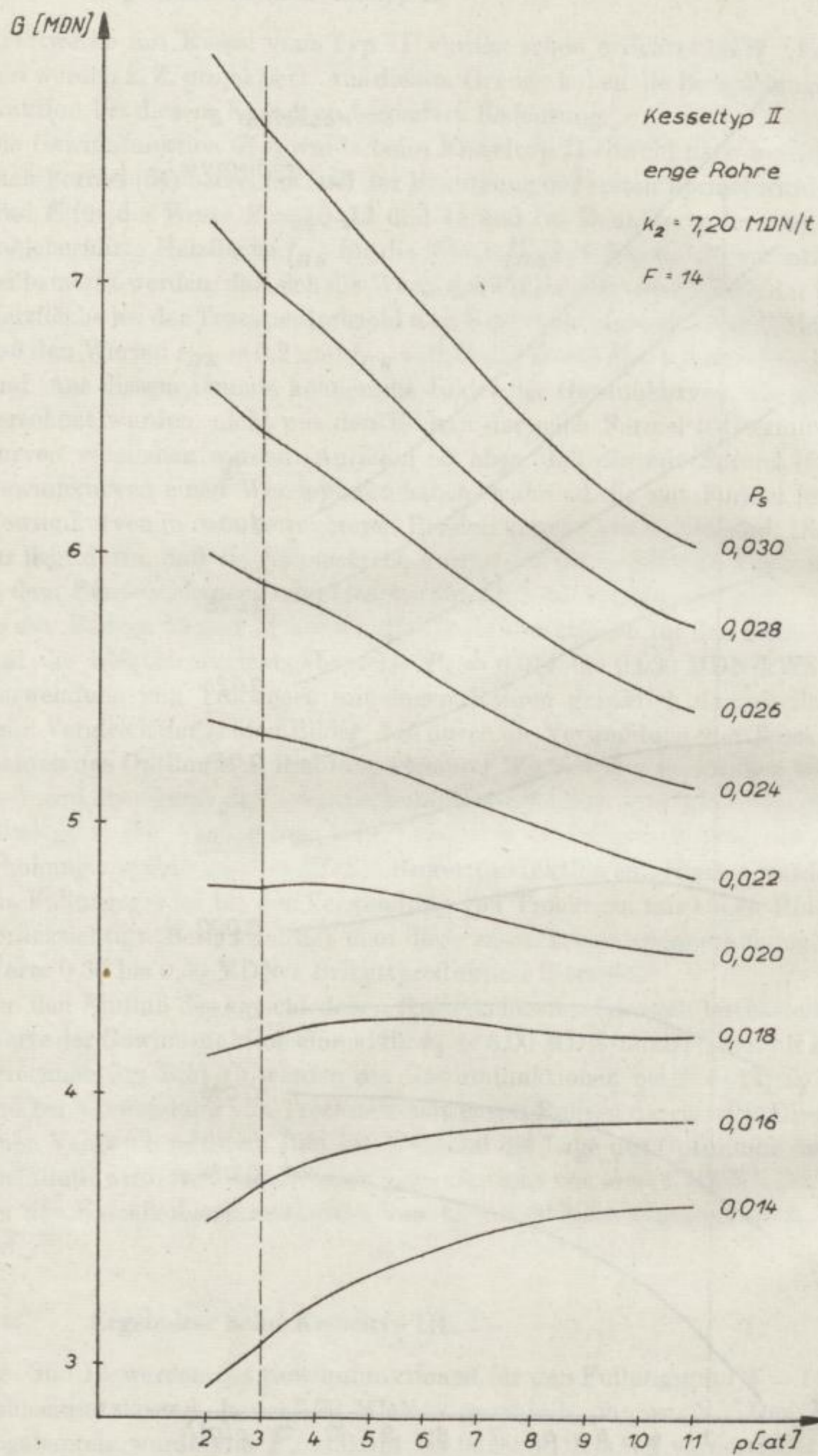


Bild 14

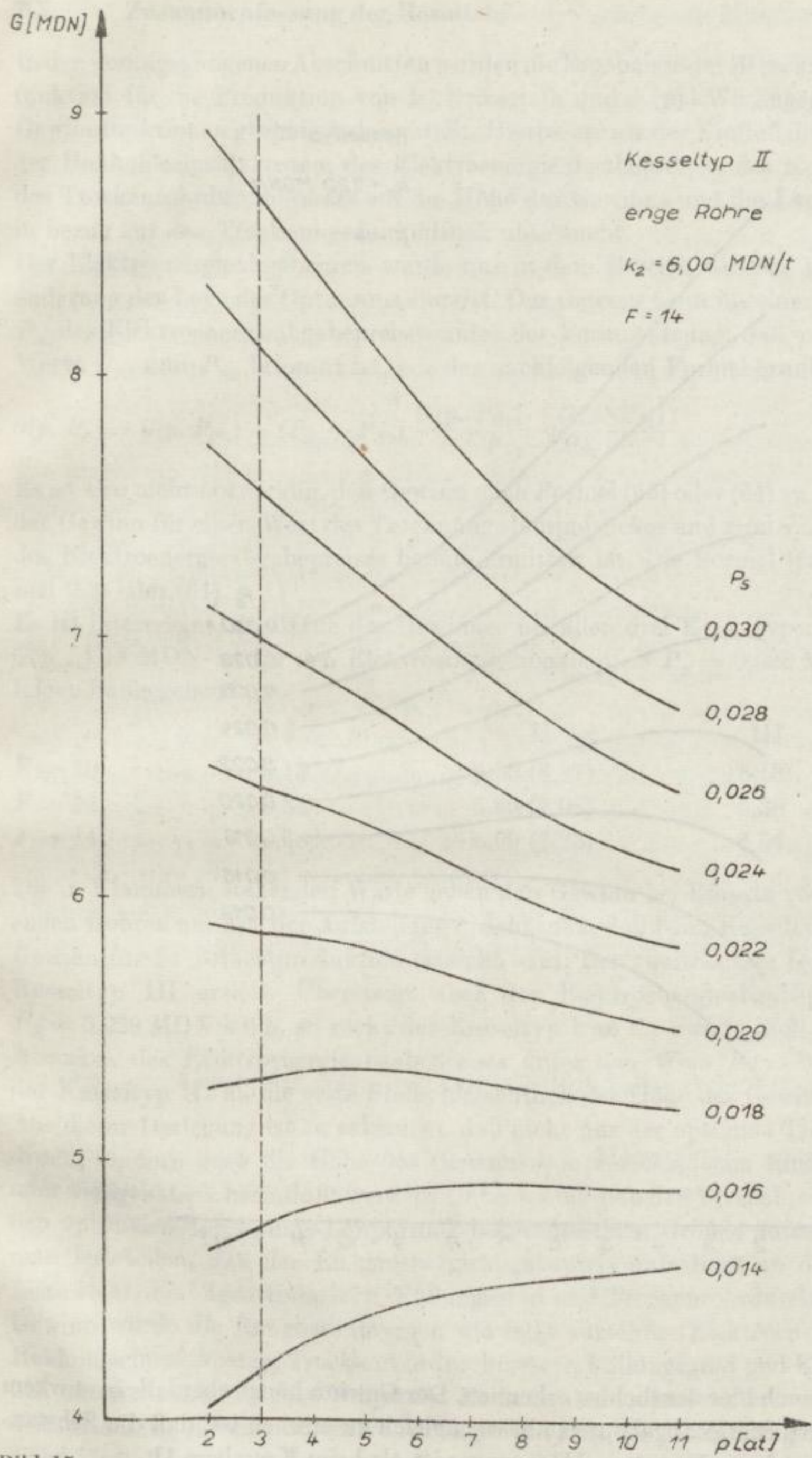


Bild 15

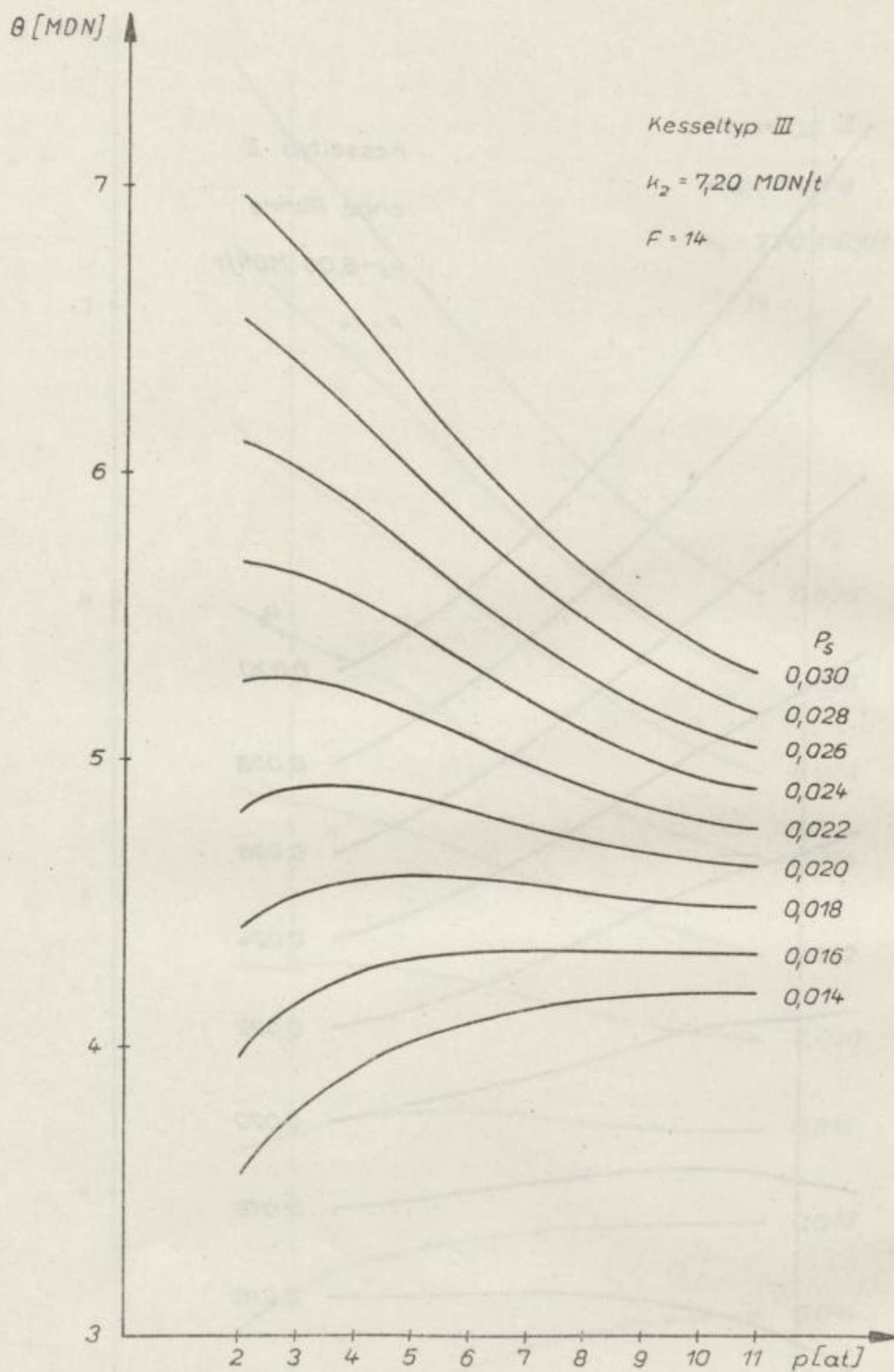


Bild 16

abgabepreis ist auch hier deutlich zu erkennen. Der Gewinn hängt ebenfalls in starkem Maße vom Elektroenergieabgabepreis ab, wenngleich zu ersehen ist, daß die Schwankung des Gewinns beim Kesseltyp III geringer ist als beim Kesseltyp II.

7.5. Zusammenfassung der Resultate

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die Ergebnisse der Berechnung der Gewinnfunktion für die Produktion von 1 t Briketts/h und $a_s(p)$ kWh angegeben und einige Gewinnfunktionen graphisch dargestellt. Hierbei wurde der Einfluß des Füllungsgrades der Rohkohleeinsatzkosten, des Elektroenergieabgabepreises, des Kond.-anteiles und des Trockenrohrdurchmessers auf die Höhe des Gewinns und die Lage des Optimums in bezug auf den Trocknungsdampfdruck untersucht.

Der Elektroenergieabgabepreis wurde nur in dem Bereich variiert, in dem eine Veränderung der Lage des Optimums eintritt. Der Gewinn kann für einen beliebigen Wert P_s des Elektroenergieabgabepreises unter der Voraussetzung, daß er für zwei andere Werte P_{s1} und P_{s2} bekannt ist, aus der nachfolgenden Formel ermittelt werden:

$$G(p, P_s) = G(p, P_{s1}) + (P_s - P_{s1}) \frac{G(p, P_{s2}) - G(p, P_{s1})}{P_{s2} - P_{s1}} \quad (65)$$

Es ist also nicht notwendig, den Gewinn nach Formel (63) oder (64) zu berechnen, wenn der Gewinn für einen Wert des Trocknungsdampfdruckes und zwei verschiedene Werte des Elektroenergieabgabepreises bereits ermittelt ist. Die Formel (65) folgt aus Formel (63) oder (64).

Es ist interessant, die Höhe des Gewinnes bei allen drei Kesseltypen zu vergleichen. $G(p_{opt})$ in MDN ist für den Elektroenergieabgabepreis $P_s = 0,028$ MDN/kWh nachfolgend angegeben:

	I	II	III
$F = 10$	6,13	6,58 (6,87)	6,13
$F = 12$	6,34	6,83 (7,08)	6,38
$F = 14$	6,48	6,99 (7,23)	6,54

Die in Klammern stehenden Werte geben den Gewinn bei Einsatz von Trocknern mit engen Rohren an. Aus der Aufstellung ersieht man, daß beim Kesseltyp II der höchste Gewinn für 1 t Brikettproduktion erreicht wird. Der zweithöchste Gewinn wird beim Kesseltyp III erzielt. Übersteigt aber der Elektroenergieabgabepreis den Wert $P_s = 0,029$ MDN/kWh, so rückt der Kesseltyp I an die zweite Stelle, während beim Absinken des Elektroenergieabgabepreises unter den Wert $P_s = 0,023$ MDN/kWh der Kesseltyp III an die erste Stelle hinsichtlich der Höhe des Gewinns rückt.

Aus dieser Darlegung ist zu erkennen, daß nicht nur der optimale Trocknungsdampfdruck, sondern auch die Höhe des Gewinns von verschiedenen Einflußgrößen mehr oder weniger stark beeinflußt werden. Unternimmt man den Versuch, eine Rangliste der den optimalen Trocknungsdampfdruck beeinflussenden Größen aufzustellen, so kann man feststellen, daß der Elektroenergieabgabepreis unbedingt an der Spitze dieser Liste steht. Es folgen Kesseltyp, Füllungsgrad und Trockenrohrdurchmesser. Für den Gewinn würde die Rangliste dagegen wie folgt aussehen: Elektroenergieabgabepreis, Rohkohleeinsatzkosten, Trockenrohrdurchmesser, Füllungsgrad und Kesseltyp. Natürlich ist eine solche Angabe subjektiv. Es kann nicht ohne weiteres ein Maß, das die Voraussetzung für eine objektive Aussage wäre, für die Auswirkung der Veränderung einer Einflußgröße auf die zu beeinflussende Größe angegeben werden.

8. Zusammenfassung und Schlußfolgerung

8.1. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde ein mathematisches Modell aufgestellt, das den betrieblichen Gewinn einer Brikettfabrik mit Kraftwerk in Abhängigkeit vom Trocknungsdampfdruck ausweist. Bei der Aufstellung der Gewinnfunktion wurde eine Normierung auf 1 t Briketterzeugung/h eingeführt. Hierdurch werden die Selbstkosten in der Brikettfabrik ohne Trockendienst unabhängig vom Trocknungsdampfdruck.

Für die vom Trocknungsdampfdruck abhängigen Werte der Enthalpie wurden rationale Funktionen 2. Grades durch Ausgleichungen ermittelt. Diese Approximationen erfolgten aus rechentechnischen Gründen. Sie gelten für eine Neuanlage unter den angegebenen Voraussetzungen. Bei beliebigen Anlagen kann mit dem gleichen Rechenprogramm für den ZRA 1 mit Funktionswerten der Enthalpie gerechnet werden.

Die spezifische Verdampfungsleistung als Funktion vom Trocknungsdampfdruck wurde erneut hergeleitet. Es konnte gezeigt werden, daß die neue Formel für die spezifische Verdampfungsleistung sich mit der von *Baunack* angegebenen Formel produktweise vergleichen läßt. Beide Formeln wurden zusammen in einem Mehrzugdiagramm dargestellt. Aus der neuen Formel wurde der optimale Füllungsgrad bestimmt. Es wurden die bisher in Vorträgen angegebenen Erkenntnisse beim Einsatz von Trocknern mit engen Rohren bei den Formeln für die spezifische Verdampfungsleistung durch Einfügung von Alternativelementen berücksichtigt.

Der Gewinn wurde in dem Bereich von 2 bis 11 at für den Trocknungsdampfdruck berechnet. Hierbei wurden die zum Einsatz kommenden Kesseltypen und der Füllungsgrad variiert. Es wurde bei der Elektroenergieerzeugung unterschieden zwischen einem in Kondensations- bzw. Kondensationsentnahmeturbinen erzeugten Anteil und der ausschließlichen Erzeugung mit Gegendruckturbinen. Bei der Trocknung wurde unterschieden zwischen dem Einsatz von Trocknern mit normalen und mit engen Rohren. Die Berechnung erfolgte einmal mit den bis zum 31. 3. 1964 und für die vom 1. 4. 1964 an geltenden Preise. Bei den letzteren wurde der Elektroenergieabgabepreis in einem größeren Bereich variiert.

8.2. Schlußfolgerung

Die sich aus der Arbeit ergebenden Schlußfolgerungen sollen in einigen Thesen zusammengefaßt werden:

1. Es ist falsch, von *dem* optimalen Trocknungsdampfdruck zu sprechen. Der Wert des optimalen Trocknungsdampfdruckes hängt von den Werten einer Reihe von Einflußgrößen ab und muß demzufolge für jede neuerrichtende Anlage vor Beginn der Projektierung ermittelt werden.
2. Bei der Rekonstruktion bestehender Anlagen sollte die Erhöhung des betrieblichen Gewinns sowohl in Abhängigkeit vom Trocknungsdampfdruck als auch in Abhängigkeit von anderen den Gewinn beeinflussenden Größen vorher bestimmt werden. Die Ermittlung in Form einer Studie kann auf der Grundlage des vorliegenden Modells und bei der Angabe exakter, in das Modell eingehender Werte in wenigen Tagen durchgeführt werden.

3. Der Wert des Trocknungsdampfdruckes, bei dem der Gewinn zu einem Maximum wird, fällt nicht zusammen mit dem Wert, bei dem die Investitionen und bei dem die Anzahl der Arbeitskräfte zu einem Minimum werden (siehe Bild 18 und 19).

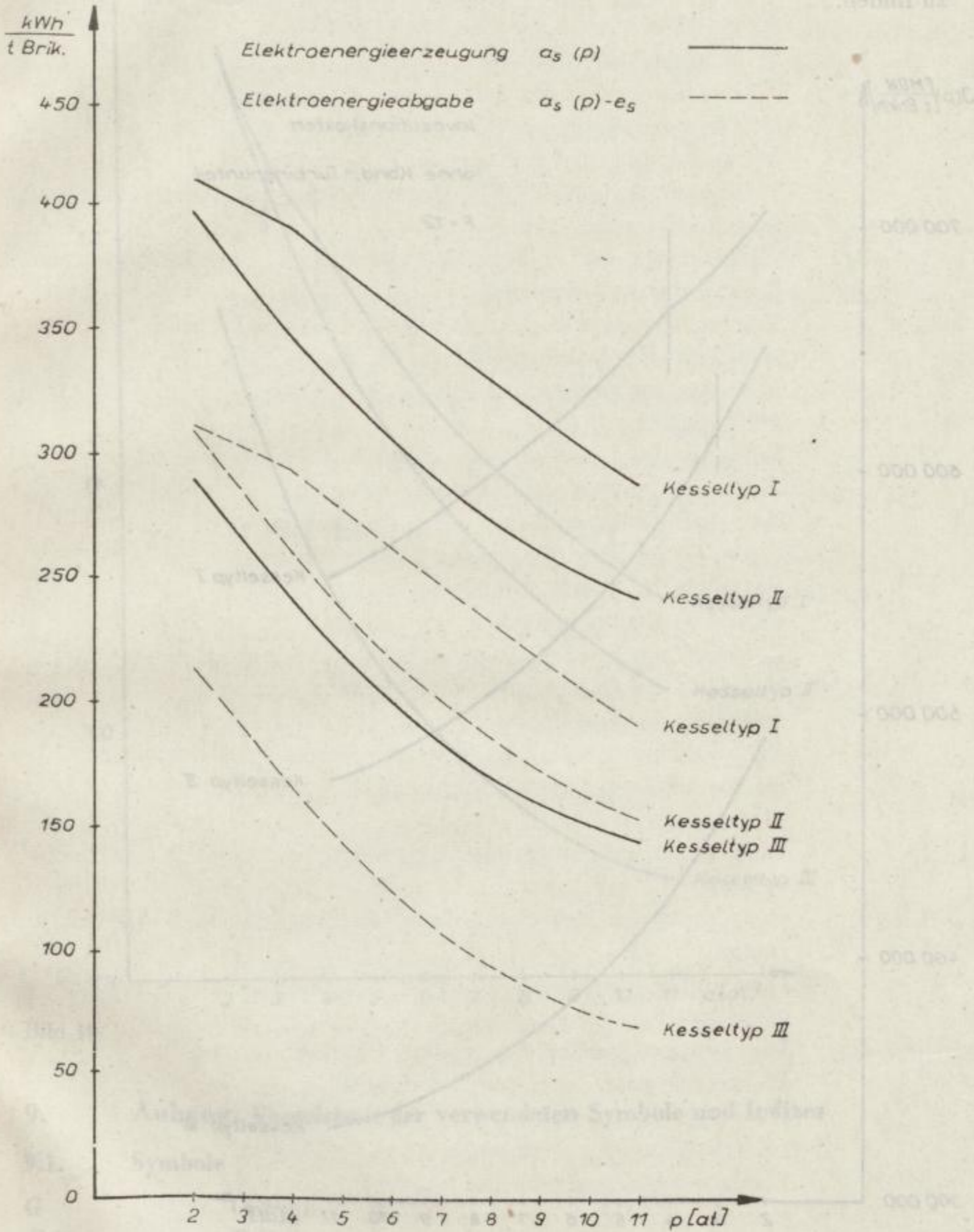
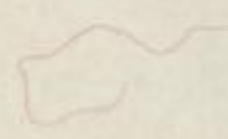


Bild 17



4. Die in der Arbeit angewandte Methode der Aufstellung eines mathematischen Modells und der ökonomischen Untersuchungen an diesem Modell ist von allgemeiner Bedeutung. Es ist z. B. naheliegend, die gleiche Methode anzuwenden, um den günstigsten Geräteeinsatz und die beste Abbau- und Aufschlußvariante im Tagebau zu finden.

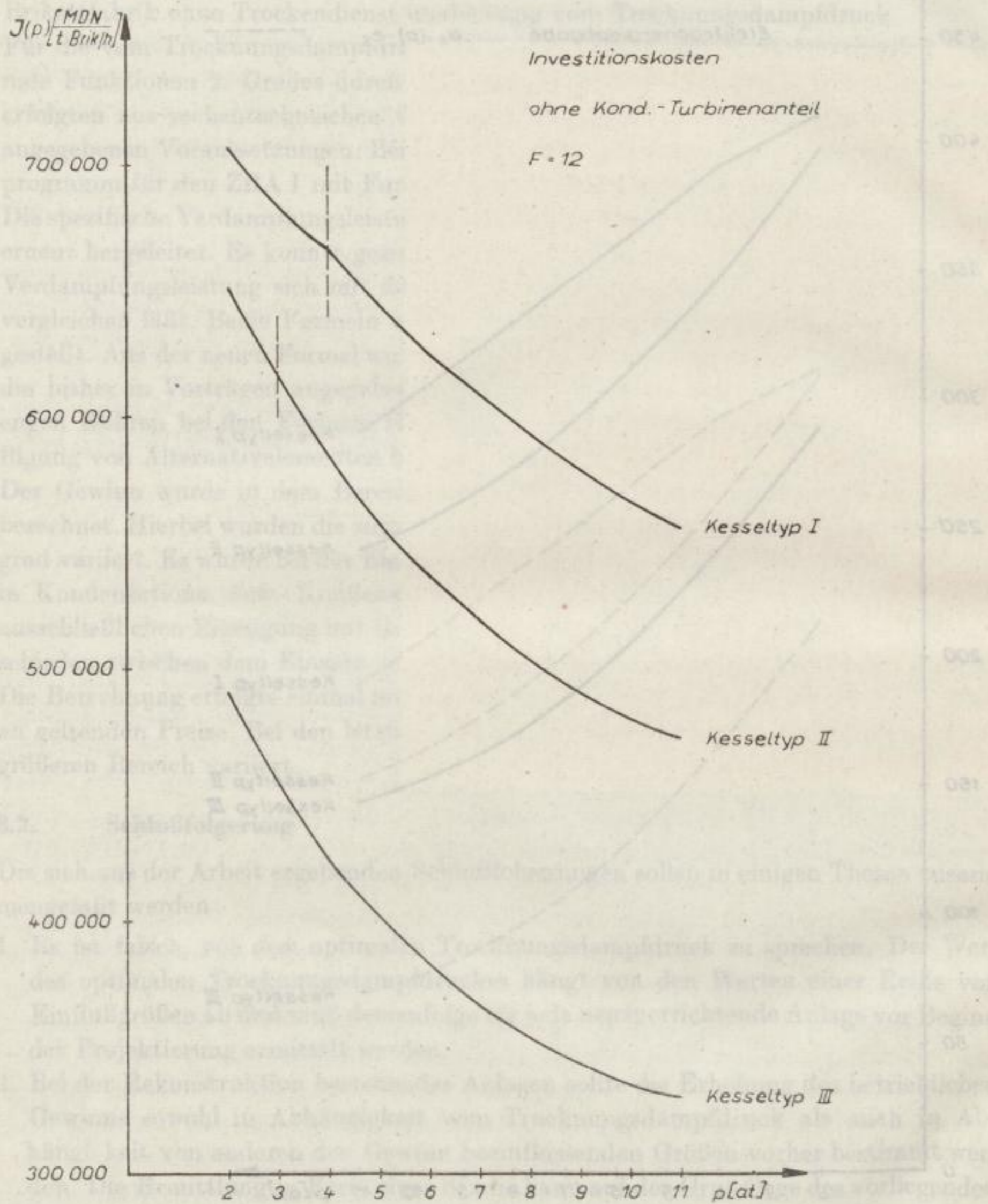


Bild 18

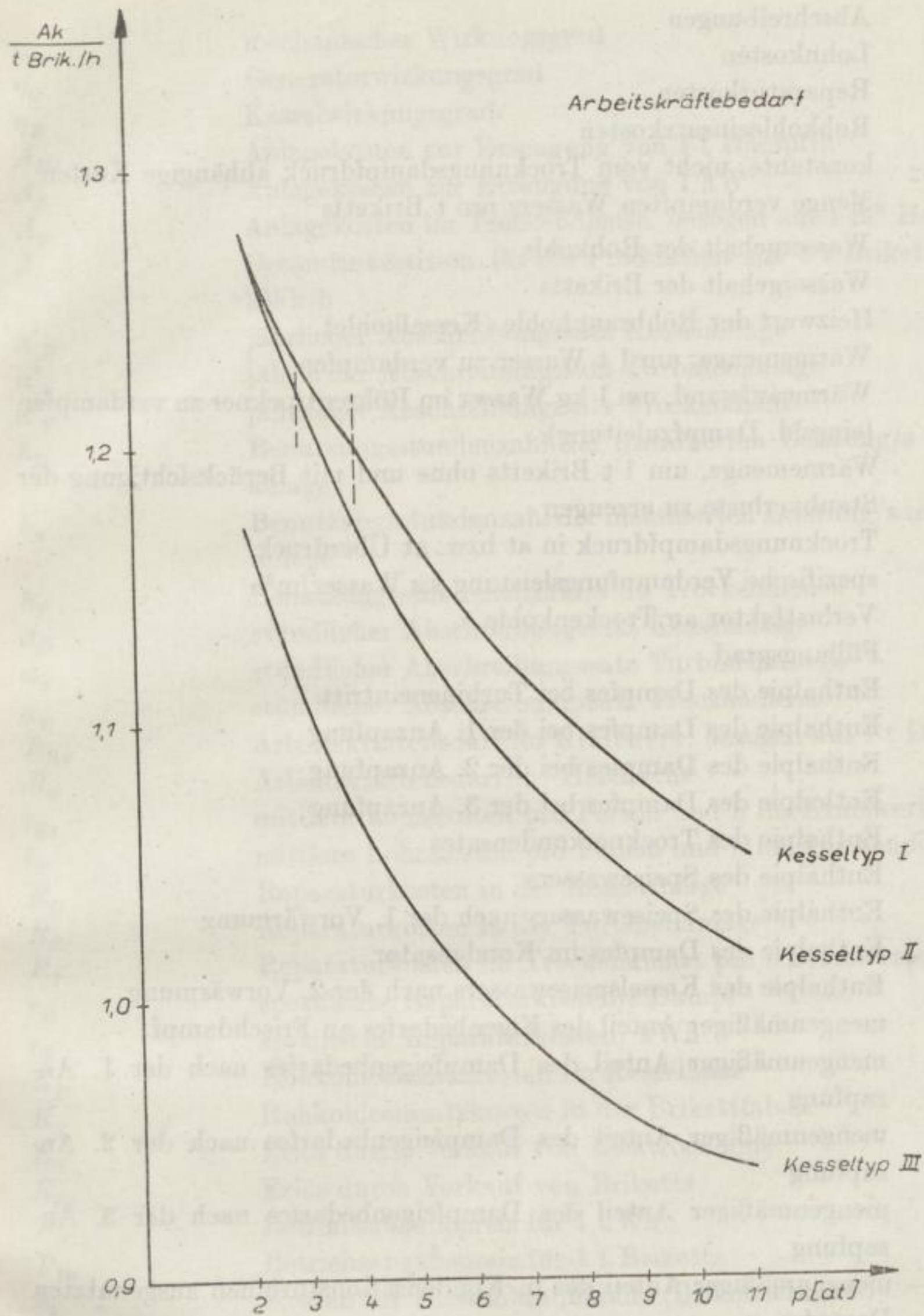


Bild 19

9. Anhang: Verzeichnis der verwendeten Symbole und Indizes

9.1. Symbole

G	Gewinn
E	Erlös
S	Selbstkosten

A	Abschreibungen
L	Lohnkosten
R	Reparaturkosten
K	Rohkohleeinsatzkosten
S'	konstante, nicht vom Trocknungsdampfdruck abhängige Kosten
W_{dBr}	Menge verdampften Wassers pro t Briketts
w_r	Wassergehalt der Rohkohle
w_t	Wassergehalt der Briketts
Q_K	Heizwert der Rohbraunkohle (Kesselkohle)
Q	Wärmemenge, um 1 t Wasser zu verdampfen
q	Wärmeaufwand, um 1 kg Wasser im Röhrentrockner zu verdampfen (einschl. Dampfzuleitung)
Q'_{Br} bzw. Q_{Br}	Wärmemenge, um 1 t Briketts ohne und mit Berücksichtigung der Staubverluste zu erzeugen
p bzw. p'	Trocknungsdampfdruck in at bzw. at Überdruck
m_H	spezifische Verdampfungsleistung kg Wasser/m ² h
v	Verlustfaktor an Trockenkohle
F	Füllungsgrad
i_1	Enthalpie des Dampfes bei Turbineneintritt
i_{21}	Enthalpie des Dampfes bei der 1. Anzapfung
i_{22}	Enthalpie des Dampfes bei der 2. Anzapfung
i_{23}	Enthalpie des Dampfes bei der 3. Anzapfung
i_3	Enthalpie des Trocknerkondensates
i_3'	Enthalpie des Speisewassers
i_3''	Enthalpie des Speisewassers nach der 1. Vorwärmung
i_3^*	Enthalpie des Dampfes im Kondensator
i_4	Enthalpie des Kesselspeisewassers nach der 2. Vorwärmung
e_{D1}	mengenmäßiger Anteil des Eigenbedarfes an Frischdampf
e_{D21}	mengenmäßiger Anteil des Dampfeigenbedarfes nach der 1. Anzapfung
e_{D22}	mengenmäßiger Anteil des Dampfeigenbedarfes nach der 2. Anzapfung
e_{D23}	mengenmäßiger Anteil des Dampfeigenbedarfes nach der 3. Anzapfung
β	mengenmäßiger Anteil des in Kondensationsturbinen ausgenutzten Dampfes
a_D	Dampfmenge zur Erzeugung von 1 t Briketts/h
a_S	Elektroenergieerzeugung bei 1 t Briketts/h
a_T	Heizfläche für 1 t Briketts/h
b_R	t Rohbraunkohle zur Erzeugung von 1 t Dampf
b_S	Elektroenergieerzeugung pro t Dampf
g	Umrechnungsfaktor von kcal zu kWh
η_{Ag} bzw. η'_{Ag}	Produkt von mechanischem und Generatorenwirkungsgrad in Gegen-druck- bzw. Kond.-entnahmeturbinen

η_m	mechanischer Wirkungsgrad
η_G	Generatorwirkungsgrad
η_K	Kesselwirkungsgrad
A_D	Anlagekosten zur Erzeugung von 1 t Dampf/h
A_S	Anlagekosten zur Erzeugung von 1 kW
A_T	Anlagekosten im Trockendienst, bezogen auf 1 m ² Heizfläche
J	Gesamtinvestition für die Produktion von 1 t Briketts/h und $a_S(p)$ kWh/h
α'_D	jährlicher Abschreibungssatz Kesselanlage
α'_S	jährlicher Abschreibungssatz Turbinenanlage
α'_T	jährlicher Abschreibungssatz Trockendienst
h_D	Benutzungsstundenzahl der installierten Leistung/a in der Kesselanlage
h_S	Benutzungsstundenzahl der installierten Leistung/a in der Turbinenanlage
h_T	Benutzungsstundenanzahl/a im Trockendienst
α_D	stündlicher Abschreibungssatz Kesselanlage
α_S	stündlicher Abschreibungssatz Turbinenanlage
α_T	stündlicher Abschreibungssatz Trockendienst
B_{Kr}	Arbeitskräftebedarf im Kraftwerk, bezogen auf 1 t Dampf/h
B_T	Arbeitskräftebedarf/m ² Heizfläche
l_{Kr}	mittlere Lohnkosten pro Person und h im Kraftwerk
l_T	mittlere Lohnkosten pro Person und h im Trockendienst
R_D	Reparaturkosten in der Kesselanlage
R_S	Reparaturkosten in der Turbinenanlage
R_T	Reparaturkosten im Trockendienst pro t Briketterzeugung
r_D	spezifische Reparaturkosten/t Dampf
r_S	spezifische Reparaturkosten/ kWh
K_D	Rohkohleeinsatzkosten im Kesselhaus
K_T	Rohkohleeinsatzkosten in der Brikettfabrik
E_S	Erlös durch Verkauf von Elektroenergie
E_{Br}	Erlös durch Verkauf von Briketts
P_S	Betriebsabgabepreis für 1 kWh
P_{Br}	Betriebsabgabepreis für 1 t Briketts
k_1	Kosten für 1 t Rohbraunkohle (Brikettierkohle)
k_2	Kosten für 1 t Rohbraunkohle (Kesselkohle)
e_S	Gesamteigenverbrauch an Elektroenergie, bezogen auf 1 t Brikettproduktion
D	Trockenrohrdurchmesser
ε	Änderung gegenüber dem Ausgangstrockner

9.2. Indizes

D	bezogen auf Dampf bzw. Kesselanlage
S	bezogen auf Elektroenergie bzw. Turbinenanlage

Kr	bezogen auf Kraftwerk
T	bezogen auf Trockendienst
R	bezogen auf Rohkohle
Br	bezogen auf Briketts
o	bezogen auf den Ausgangstrockner
l	bezogen auf den Bezugstrockner
m	bezogen auf spezifische Verdampfungsleistung
n	bezogen auf die Drehzahl des Trockners
J	bezogen auf die Investitionskosten
Ak	bezogen auf die Arbeitskräfte

Literatur

- [1] *Baunack, F.*: Die Trocknung der Braunkohle in Dampfrohrentrocknern und deren Leistung. Freib. Forsch.-H. A 47, (1956)
- [2] *Bruche, I.*: Diskussionsbeitrag zu [13]
- [3] *Grunewald*: Möglichkeiten der Leistungssteigerung von Röhrentrocknern. Vortrag auf dem 7. Brikettiertechnischen Kolloquium am 2. 11. 1961 in Freiberg
- [4] *Hofmann, K.*: Die Trocknung der Braunkohle in Brikettfabriken und ihre Auswirkung auf die Energieerzeugung. Bergbautechnik 1 (1951), S. 155
- [5] *Hofmann, K.*: Abschlußbericht der Forschungsarbeit 380138/F3-19 D vom 1. 12. 1955 „Untersuchungen über den optimalen Betriebsdruck in Braunkohlen-Brikettfabriken“
- [6] *Kegel, K., u. Rammler, E.*: Brikettieren für Bergleute und Aufbereiter. 3. Lehrbrief, S. 63, BA Freiberg, HA Fernstudium
- [7] *Messikommer, B. H.*: Die Anwendung der Box-Wilsonschen Methode in der chemischen Industrie. Unternehmensforschung 4 (1960) 3
- [8] *Müller, W.*: Einfluß mechanischer Größen auf die Leistung von Röhrentrocknern. Vortrag auf der 2. Sitzung des Arbeitsausschusses „Brikettierung“ am 23. 11. 1962 in Leipzig-Markleeberg
- [9] *Rademacher, W.*: Kapazitätsermittlung und Leistungssteigerung bei Röhrentrocknern mit Hilfe eines neuen Trocknungsdiagramms. Bergbautechnik 3 (1953), S. 627—635
- [10] *Rademacher, W.*: Die Wasserauftrocknungs- und Produktionsleistung von Röhrentrocknern, studiert an einem Großtrockner. Freib. Forsch.-H. A 177, (1961), S. 9—29
- [11] *Rademacher, W., Jänichen, H., u. Kohlert, H.*: Der Bau von Trocknern mit Rohren kleinen Durchmessers in ökonomischer Sicht. Vortrag auf der 2. Sitzung des Arbeitsausschusses „Brikettierung“ am 23. 11. 1962 in Leipzig-Markleeberg
- [12] *Rademacher, W.*: Füllungsprobleme, studiert an einem Großtrockner mit 4070 m² Heizfläche. Freib. Forsch.-H. A 130, (1959), S. 77—100
- [13] *Schäper, W.*: Über den wirtschaftlichen Gegendruck in Brikettfabriken. Freib. Forsch.-H. A 211, (1962), S. 36
- [14] *Schöne, O.*: Grundlagen für den Entwurf von Braunkohlenbrikettfabriken. Springer-Verlag, Berlin 1930
- [15] *Stange, K.*: Statistische Methoden für den Verfahreningenieur. Chemie-Ingenieur-Technik 32 (1960) 3

- [16] *Ulbricht, W.*: Referat auf der Wirtschaftskonferenz des Zentralkomitees der SED und des Ministerrates der DDR. Dietz Verlag, Berlin 1963, S. 59
- [17] *Vigener, K.*: Die Braunkohlenbriketterzeugung Mittelddeutschlands und die öffentliche Elektrizitätswirtschaft. Braunkohle XXIII (1924/25), S. 905
- [18] *Vigener, K.*: Betrachtungen über die wirtschaftlichen Grenzen des Dampfdruckes für die deutsche Braunkohlenbrikettindustrie. Braunkohle XXV (1926/27), S. 471
- [19] Forschungsbericht 0801 01/0-130/9 1960. Braunkohlentrocknungstechnik S. 51—87. Forschungsleiter: Dr. W. Rademacher
- [20] Forschungsbericht 030502 b/9-20/ZO 1959. Trocknerleistung. Bearbeiter: Dr. Grunewald
- [21] Forschungsbericht 080 101/2-130/9-ZO 1962. Braunkohlentrocknungstechnik. Forschungsleiter: Dr. W. Rademacher
- [22] VDI — Wasserdampf tafeln. 4., überarb. und erw. Aufl. von Ernst Schmidt. Springer-Verlag, Berlin 1956

FREIBERGER FORSCHUNGSHEFTE

Schriftenreihe für alle Gebiete der Montanwissenschaften

A 315 Ingenieurökonomie Bergbau

ERHARD EICHFELD

Probleme der Dampfverrechnung im Gegendruckbetrieb

87 Seiten mit 23 Bildern, 12 Tabellen und 6 Anlagen · Format 16,7 × 24 cm · Kartoniert 14,90 MDN

Der Autor findet nach einer kritischen Überprüfung der bisher verwandten Dampfverrechnungsverfahren die Methode der Mischenthalpierechnung als die für unsere sozialistische Wirtschaft exakteste. Damit wird der briкетterzeugenden Industrie ein Berechnungsverfahren ermöglicht, das gestattet, die Energierechnung wirtschaftlich und einwandfrei vorzunehmen.

A 317 Ingenieurökonomie Bergbau

MANFRED SCHOCH

Anwendung der linearen Optimierung zur Ermittlung eines optimalen Kohleversorgungsplanes

124 Seiten mit 7 Bildern und 84 Tabellen · Format 16,7 × 24 cm · Kartoniert 21,70 MDN

Der Autor beschreibt an Hand eines realisierbaren Kohleversorgungsplanes die mathematische Lösung eines weitgehend verallgemeinerten und erweiterten Transportproblems, das außer Beschränkungen in den Transportstrecken-Kapazitäten auch die mit der Lagerhaltung zusammenhängenden Optimierungsprobleme gleichzeitig erfaßt.

V

Bücherei
Bergakademie
Freiberg i. Sa.

